

ผลของตัวเติมไฮบริดเซลลูโลส/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 CELLULOSE/NANOSILICA HYBRID FILLER ON PROPERTIES OF POLY(LACTIC
ACID) COMPOSITES

Mr. Kittithorn Lertphirun



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

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของตัวเติมไฮบริดเซลลูโลส/นาโนซิลิกาต่อสมบัติของ
พอลิเล็กทริกแอซิดคอมพอสิต
โดย นายกิตติธรร เลิศพิรุณ
สาขาวิชา ปีโตรีเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โปธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. นพิตา หิณชรีระนันท์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

กิตติธร เลิศพิรุณ : ผลของตัวเติมไฮบริดเซลลูโลส/นาโนซิลิกาต่อสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต (EFFECTS OF CELLULOSE/NANOSILICA HYBRID FILLER ON PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID) COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. กาวี ศรีกุลกิจ, 128 หน้า.

งานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการเตรียมตัวเติมไฮบริดเซลลูโลส/นาโนซิลิกาที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยสารตัดแปรเฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีไซเลนผ่านปฏิกิริยาไซเลโนเซชันเพื่อให้มีสภาพผิวเป็นไฮโดรโฟบิก โดยใช้อัตราส่วนของตัวเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกา : สารตัดแปรเท่ากับ 1 : 1 และ 1 : 0.25 โดยน้ำหนัก จากนั้นเตรียมมาสเตอร์แบทช์ของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตด้วยตัวเติมไฮบริดตัดแปรที่เตรียมได้ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ จากนั้นนำมาสเตอร์แบทช์ที่เตรียมได้ไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดแบบหลอมเหลวอีกครั้งเพื่อลดปริมาณตัวเติมไฮบริดเซลลูโลส/นาโนซิลิกาตัดแปรในพอลิแล็กติกแอซิดให้เหลือร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ที่ใช้อุณหภูมิภายในบารเรลล์จากโซนป้อนถึงหัวตายเท่ากับ 195/190/180/165/150 องศาเซลเซียส จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตด้วยเครื่องฉีดแบบสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลและการย่อยสลายทางชีวภาพ จากการทดสอบ พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เตรียมจากตัวเติมไฮบริดตัดแปรด้วย 2 ระบบ ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.1 และ 3.0 และมีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.9 และลดลงร้อยละ 1.6 เมื่อใช้ตัวเติมเซลลูโลส : สารตัดแปร 1 : 1 และ 1 : 0.25 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่ตัวเติมไฮบริดเซลลูโลส/นาโนซิลิกาตัดแปรร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าคอมพอสิตที่ใส่ไฮบริดเซลลูโลส/นาโนซิลิกาตัดแปรร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากการแตกสลายของพอลิแล็กติกแอซิดในส่วนผสมมาสเตอร์แบทช์เมื่อได้รับความร้อน 2 ครั้ง ขณะที่มาสเตอร์แบทช์ถูกนำไปฉีดขึ้นรูปโดยตรง ตัวเติมไฮบริดเซลลูโลส/นาโนซิลิกาตัดแปรร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จึงสามารถเสริมแรงให้กับพอลิแล็กติกแอซิดและส่งเสริมการเร่งย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตภายใต้สภาวะการฝังดินด้วยกลไกการดูดซึมน้ำ เพื่อนำพหุคูณทรีย์เข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสได้เป็นกรดแล็กติก และซิลิกาจะปลดปล่อยกรดไซลิซิก กรดที่เกิดขึ้นจะเร่งการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดผ่านกลไกไฮโดรไลติก ไฮโดรลิซิส จึงทำให้คอมพอสิตสลายตัวได้เร็วกว่าพอลิแล็กติกบริสุทธิ์

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5971913923 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS:

KITTITHORN LERTPHIRUN: EFFECTS OF CELLULOSE/NANOSILICA HYBRID FILLER ON PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID) COMPOSITES. ADVISOR: ASSOC. PROF. KAWEE SRIKULKIT, Ph.D., 128 pp.

In this research, cellulose/nanosilica hybrid filler (CF) was first hydrophobically modified by hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) using CF : HDTMS weight ratios of 1 : 1 and 1 : 0.25 through silanization reaction. Masterbatch of poly(lactic acid) (PLA) containing 10 wt% modified CF was then prepared using a twin screw extruder. Thereafter, the obtained masterbatch was melt mixed with PLA to dilute the modified CF content in composite to 1, 3 and 5 wt% by the twin screw extruder (temperature profile of barrels from feed zone to die was 150/165/180/190/195 °C, followed by sample preparation for mechanical and biodegradable testing using an injection molding machine. The results showed that the PLA composites with 10 wt% CF modified fillers in all case exhibited higher impact strength by 3.1 and 3.0%, respectively, and higher tensile strength by 6.9 % and lower tensile strength by 1.6% for CF 1 : HDTMS 1 and CF 1 : HDTMS 0.25, respectively, when compared to the pure PLA. However, the composites with lower loadings of modified fillers (1, 3 and 5 wt%) exhibited lower mechanical properties than 10 wt% fillers. This was due to the repeating thermal degradation of the PLA in masterbatch, resulting from twice melt-mixing. In case of 10 wt% modified CF composites, the masterbatch was subject to injection molding in one step process, resulting in an improvement in mechanical properties of PLA composites due to a reinforcing effect of composite fillers. The addition of cellulose/SiO₂ composite was found to enhance biodegradation of PLA though water absorption capability of PLA composite. Water acted as a carrier for microorganism to consume cellulose and then produce lactic acid. In the presence of lactic acid, PLA underwent hydrolytic hydrolysis degradation which was much faster when compared to enzymatic hydrolysis. In addition, SiO₂ released silicic acid under acidic condition which provides synergistic effect on PLA degradation. As a result, burial testing results showed that PLA composite's weight loss was much pronounced when compared to neat PLA.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Student's Signature

Science Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์ เพราะได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และสนับสนุนในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัยอย่างดีตลอดการทำงานวิจัยนี้ และแนะแนวทางในการดำเนินงานรวมถึงการแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดข้อผิดพลาด ในการทำวิจัยได้อย่างถูกต้อง รวมถึงการแนะนำแนวทางในการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

2. รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช ที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

3. รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทิณชีระนนท์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

4. รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตรที่ สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

5. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนและเอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมืออุปกรณ์ทำวิจัย และเครื่องมือทดสอบต่างๆ

5. รุ่งพี เพื่อน บุคลากร ในหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือเอื้อเฟื้อเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ชาย น้องชาย ที่ให้การสนับสนุนและคอยให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสรรค์สร้างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
สารบัญตาราง.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 เซลลูโลส (Cellulose).....	3
2.1.1 สมบัติของเซลลูโลส.....	5
2.1.1.1 สมบัติการละลายของเซลลูโลส.....	5
2.1.1.2 ความหนืดของเซลลูโลส.....	6
2.1.1.3 สมบัติการดูดซับและการพองตัว.....	6
2.1.1.4 ความสามารถในการละลาย.....	6
2.1.2 การประยุกต์ใช้เซลลูโลส.....	6
2.1.2.1 ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส.....	7
2.1.2.2 เซลลูโลสเจล.....	7
2.2 ซิลิกา.....	7
2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของซิลิกา.....	7
2.2.2 การสังเคราะห์ซิลิกา.....	8
2.2.2.1 การสังเคราะห์ซิลิกาด้วยกระบวนการตกตะกอน (precipitation).....	9
2.2.3 ข้อจำกัดของการใช้ซิลิกา.....	9

2.2.4 การประยุกต์ใช้ซิลิกา	9
2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	9
2.3.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	10
2.3.1.1 แหล่งวัตถุดิบจากปิโตรเลียม	10
2.3.1.2 แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนได้	10
2.3.2 ประเภทของการย่อยสลายได้ของพลาสติกตามกลไกในการย่อยสลาย	11
2.3.2.1 การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)	11
2.3.2.2 การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation).....	11
2.3.2.3 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)	11
2.3.2.4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation)	12
2.3.2.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation).....	12
2.4 พอลิแล็กติกแอซิด.....	12
2.4.1 โครงสร้าง องค์ประกอบและการสังเคราะห์	14
2.4.2 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด	15
2.4.2.1 สมบัติทางกายภาพ สมบัติการละลายและสมบัติเชิงกล	16
2.4.2.2 สมบัติทางความร้อน	16
2.4.2.3 สมบัติการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว	16
2.4.3 การเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิด	16
2.4.4 ข้อจำกัดของพอลิแล็กติกแอซิด	17
2.5 สารเชื่อมประสาน (Coupling agents).....	17
2.5.1 กลไกการปรับปรุงการยึดติดระหว่างฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรงกับพอลิเมอร์โดย การใช้สารเชื่อมประสาน	17
2.5.1.1 การใช้สารเชื่อมประสาน.....	18

2.5.1.2 ชนิดสารประสานที่ใช้กันทั่วไป.....	18
2.5.2 ไฮเลน (Silanes).....	18
2.6 คอมพอสิต	19
2.6.1 เฟสหลัก	19
2.6.1.1 พอลิเมอร์ (Polymer).....	19
2.6.1.2 เซรามิก (Ceramic).....	19
2.6.1.3 โลหะ (Metal)	20
2.6.2 เฟสกระจาย.....	20
2.6.2.1 วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced composite).....	20
2.6.2.2 วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fibrous composite).....	20
2.6.2.3 วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้าง (Other composite structure).....	21
2.7 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน	21
2.7.1 การผสม.....	22
2.7.1.1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin screw extruder)	22
2.7.2 การขึ้นรูปและการหล่อเย็น.....	23
2.7.2.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	23
2.7.2.2 กระบวนการอัดขึ้นรูป.....	24
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	31
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย	31
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	33
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	35

3.4.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา	35
3.4.2 เตรียมเซลล์เจล.....	36
3.4.2.1 เตรียมไมโครคริสตัลไลน์เซลล์เจล	36
3.4.2.2 เตรียมเซลล์เจล	36
3.4.3 การเตรียมและตัดแปรพื้นผิวอนุภาคเซลล์เจล/นาโนซิลิกาคอมพอสิต.....	37
3.4.4 เตรียมพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลล์เจล/นาโนซิลิกาคอมพอสิต	38
3.4.5 ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลล์เจล/นาโนซิลิกาคอมพอสิต	40
3.4.6 เตรียมขึ้นรูปชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลล์เจล/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน.....	41
3.4.7 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของนาโนซิลิกา	43
3.4.8 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคเซลล์เจล/นาโนซิลิกาคอม พอสิตและตัดแปรด้วยสารออร์แกนโซเลน	44
3.4.8.1 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคเซลล์เจล/นาโนซิลิกาคอม พอสิต.....	44
3.4.8.2 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเซลล์เจล/นาโนซิลิกา คอมพอสิตตัดแปรด้วยสารออร์แกนโซเลน	44
3.4.9 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลล์เจล/นาโนซิลิกา คอมพอสิตภายหลังจากการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน	45
3.4.9.1 การทดสอบความทนแรงดึง	45
3.4.9.2 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต.....	46
3.4.9.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของคอมพอสิตภายใต้ความร้อน.....	47
3.4.9.4 การทดสอบความทนแรงกระแทก.....	48
3.4.9.5 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตภายหลังจากการ ทดสอบความทนแรงกระแทก.....	48

3.4.10 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกา คอมพอสิตภายหลังจากการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน	49
3.4.10.1 ทดสอบย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ	49
3.4.10.2 ทดสอบการดูดซึมน้ำ	50
3.4.10.3 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตภายหลังจากการ ทดสอบย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ	51
3.4.10.4 ทดสอบและวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของชิ้นงานแผ่นฟิล์ม	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	52
4.1 ผลของการเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกา.....	52
4.1.1 สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกา	52
4.2 ผลการดัดแปรเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตด้วยสารออร์แกโนไซเลน.....	54
4.2.1 สัณฐานวิทยาของเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต	54
4.2.2 ลักษณะการกระจายตัวของเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตดัดแปรด้วยสารออร์แก โนไซเลน.....	55
4.3 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตภายหลังจากการ ฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน.....	56
4.3.1 สมบัติเชิงกล	56
4.3.1.1 ความทนแรงกระแทก	56
4.3.1.2 ความทนแรงดึง (Tensile strength).....	57
4.3.1.3 ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus).....	59
4.3.1.4 การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)	60
4.3.1.5 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทก	61
4.3.2 สมบัติทางความร้อน	64

4.3.2.1 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น อุณหภูมิการหลอมตัว ของผลึกและปริมาณผลึก	64
4.3.2.2 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน	67
4.4 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตภายหลังจากการ อัดขึ้นรูปด้วยความร้อน	69
4.4.1 ทดสอบการดูดซึมน้ำ	69
4.4.2 ทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ	70
4.4.2.1 ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง	70
4.4.2.2 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ	75
4.4.2.3 พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ของชิ้นงานหลังทดสอบการย่อยสลาย.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	80
5.1 สรุปผลการทดลอง	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	82
รายการอ้างอิง	83
ภาคผนวก.....	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	128

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	โครงสร้างของเซลล์โลส.....	3
รูปที่ 2.2	พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของเซลล์โลส.....	4
รูปที่ 2.3	รูปแบบโครงสร้างผลึกของเซลล์โลส.....	5
รูปที่ 2.4	ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา	8
รูปที่ 2.5	วัฏจักรของพอลิเล็กทริกแอซิด	13
รูปที่ 2.6	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเล็กทริกแอซิด	14
รูปที่ 2.7	โครงสร้างสเตอริโอไอโซเมอร์พอลิเล็กทริกแอซิด	14
รูปที่ 2.8	การสังเคราะห์พอลิเล็กทริกแอซิดจากกรดเล็กทริกชนิดแอล และดี	15
รูปที่ 2.9	แผนผังการแบ่งประเภทของวัสดุคอมพอสิต	20
รูปที่ 2.10	ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของเส้นใย	21
รูปที่ 2.11	ส่วนประกอบภายในสกรู	22
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา	35
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนเตรียมไมโครคริสตัลไลน์เซลล์โลส	36
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการเตรียมเซลล์โลสเจล	37
รูปที่ 3.4	ขั้นตอนการเตรียมเซลล์โลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต	38
รูปที่ 3.5	ขั้นตอนการเตรียมพอลิเล็กทริกแอซิดผสมด้วยเซลล์โลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต	39
รูปที่ 3.6	เครื่องอัดรีดสกรูคู่ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28	39
รูปที่ 3.7	เครื่องฉีดขึ้นรูปของบริษัท Nissei Injection Molding Machine รุ่น NEX80.....	40
รูปที่ 3.8	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล	41
รูปที่ 3.9	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบความทนแรงกระแทก.....	41
รูปที่ 3.10	เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนยี่ห้อ Labtech Engineering รุ่น LP20-b.....	42
รูปที่ 3.11	แม่แบบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส	42

รูปที่ 3.12 เครื่อง Trans Electron Microscope บริษัท FEI TECNAI รุ่น T20 G ²	43
รูปที่ 3.13 เครื่อง Scanning Electron Microscope บริษัท JEOL รุ่น JSM-6400LV	44
รูปที่ 3.14 เครื่องยูนิเวอร์แซล บริษัท Instron รุ่น 5566.....	45
รูปที่ 3.15 ลักษณะตัวอย่างชิ้นงานคัมเบลล์ที่ใช้ในการทดสอบ	45
รูปที่ 3.16 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry บริษัท Mettler Toledo รุ่น DSC/STAR ^e	47
รูปที่ 3.17 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) บริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC3 ⁺	47
รูปที่ 3.18 เครื่องทดสอบแรงกระแทก บริษัท Gotech Testing Machine รุ่น GT-7045-MDH....	48
รูปที่ 3.19 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ.....	49
รูปที่ 3.20 กระบะพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ	50
รูปที่ 3.21 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ	50
รูปที่ 3.22 เครื่องฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ บริษัท Thermo Scientefic รุ่น Nicolet 6700.....	51
รูปที่ 4.1 สันฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกา	53
รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายนาโนซิลิกาที่ระยะเวลา 2 วัน, 8 วัน และ 12 วัน	53
รูปที่ 4.3 สมการเคมีที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา	53
รูปที่ 4.4 สันฐานวิทยาของเซลลูโลส (cellulose) และเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต (cellulose/SiO ₂).....	54
รูปที่ 4.5 ลักษณะสันฐานวิทยาและการกระจายตัวของเซลลูโลสผสมเข้ากับอนุภาคนาโนซิลิกา ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเซลลูโลสและดัดแปรด้วยสารออกแกโนไซเลนที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:0.25	56
รูปที่ 4.6 ความทนแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก.....	57
รูปที่ 4.7 ความทนแรงดึงของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก	59

รูปที่ 4.8 ยังสัมพันธ์ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่ เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก	60
รูปที่ 4.9 การยึดตัว ณ จุดขาดของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่ เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก.....	61
รูปที่ 4.10 สันฐานวิทยาของชิ้นงานหลังทดสอบความทนแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก.....	63
รูปที่ 4.11 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_c) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก.....	66
รูปที่ 4.12 ร้อยละการดูดซึมน้ำของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก.....	70
รูปที่ 4.13 ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนักที่ระยะเวลา 1, 2 และ 3 เดือน.....	71
รูปที่ 4.14 ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสแบบ acid hydrolysis ของพอลิแล็กติกแอซิด	75
รูปที่ 4.15 สันฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับที่ระยะเวลา 1, 2 และ 3 เดือน.....	77
รูปที่ 4.16 พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ของพื้นผิวชิ้นงานหลังการย่อยสลาย ด้วยวิธีการฝังกลบของ neat PLA และ PLA/1.0:0.25 CF :HDTMS 10% ที่ระยะเวลา 0, 1, 2 และ 3 เดือน	79

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	32
ตารางที่ 3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	33
ตารางที่ 3.3	อัตราส่วนการผสมนาโนซิลิกาและเฮกซะเดกซิลไตรเมทอกซีไซเลนในเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต	38
ตารางที่ 3.4	อัตราส่วนผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับมาสเตอร์แบทช์	40
ตารางที่ 3.5	สภาวะที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรูปด้วยความร้อน.....	43
ตารางที่ 4.1	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_c) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (melting temperature, T_m) และปริมาณผลึก (degree of crystallinity, X_c) ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก.....	66
ตารางที่ 4.2	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ (neat PLA) และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดกซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1.0:1.0, 1.0:0.25 และไม่ได้เติม ตามลำดับ.....	68
ตารางที่ 4.3	ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงและลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนักตามลำดับที่ระยะเวลา 1, 2 และ 3 เดือน.....	72

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันมีการนำผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกมาใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เมื่อพิจารณาถึงแหล่งที่มาของพลาสติกที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้นพบว่าส่วนใหญ่มีที่มาจากวัตถุดิบที่เป็นสารตั้งต้นจากสารอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งสารตั้งต้นที่นำมาแปรรูปเป็นพลาสติกนั้นนับวันจะมีปริมาณที่น้อยลงและมีราคาต้นทุนที่สูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากวัสดุปิโตรเลียมเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ในระยะเวลาอันสั้น ขณะเดียวกันการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกดังกล่าวยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเมื่อนำไปทำลายจะก่อให้เกิดมลพิษ เนื่องจากพลาสติกเหล่านี้ไม่สามารถเกิดการย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ถึงแม้ปัจจุบันจะมีการนำพลาสติกที่ใช้แล้วมาแปรรูปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ก็ตามแต่สมบัติของพลาสติกที่ได้จะต่ำลง ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าวพอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดหนึ่งซึ่งกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก มีสมบัติพิเศษคือใส มีความคงทนไม่สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมทั่วไปสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการอัดรีดหรือฉีด แต่ขึ้นรูปได้ยากกว่าปิโตรเลียมพลาสติกเนื่องจากปัญหาการควบคุมความหนืดขณะหลอมทำให้สมบัติเชิงกลมีความแข็งแรงและสมบัติความทนความร้อนต่ำ แม้ว่าเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้เอง แต่ก็มีข้อจำกัดคือไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีการฝังกลบ เนื่องจากไม่มีตัวกลางในการดูดซึมน้ำเพื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและไฮโดรไลติก ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาให้พอลิแล็กติกแอซิดสามารถที่จะย่อยสลายได้เร็วขึ้นผ่านตัวกลางที่สามารถดูดซึมน้ำและปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นในงานวิจัยจึงเติมเซลลูโลส เนื่องจากเซลลูโลสสามารถพบได้บริเวณผนังเซลล์ของพืชซึ่งพบตามธรรมชาติ อีกทั้งเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นใย มีความเป็นผลึกสูง เหมาะที่จะใช้เป็นสารเสริมแรง เซลลูโลสเป็นโฮโมพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยเบต้า-D-กลูโคไพราโนส (β -D-glucopyranose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า1,4-ไกลโคซิดิก (β -1.4-glycosidic bond) เกิดเป็นพอลิเมอร์กลูแคน (glucan) โดยมีแรงยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และเติมซิลิกา เนื่องจากซิลิกามีสมบัติที่ดีในการช่วยปรับปรุงสมบัติทนแรงกระแทก อีกทั้งยังช่วยเร่งการย่อยสลายตัวโดยผ่านกลไกการเพิ่มความสามารถในการดูดซึมน้ำ นำเซลลูโลสและซิลิกาผสมเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการผสมเข้ากับพอลิแล็กติกแอซิด เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลสที่มีพันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาคสูงจึงจะทำการปรับปรุงพื้นผิวของเซลลูโลสด้วยสารออร์แกนโอซิลเลน โดยสารออร์แกนโอซิลเลนที่เลือกใช้คือเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีซิลเลน (hexadecyl trimethoxysilane) เพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวในพอลิแล็กติกแอซิดและทำหน้าที่เสริมแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะสามารถเพิ่มสมบัติ

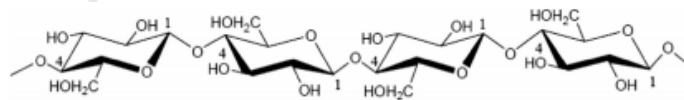
เชิงกลและความสามารถในการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดด้วยวิธีฝังกลบ การผสมเซลลูโลส/ซิลิกาตัดแปรเข้าไปในพอลิแล็กติกแอซิดจะอาศัยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ คอมพอสิตที่ได้จะนำไปขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ต่อไป



บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

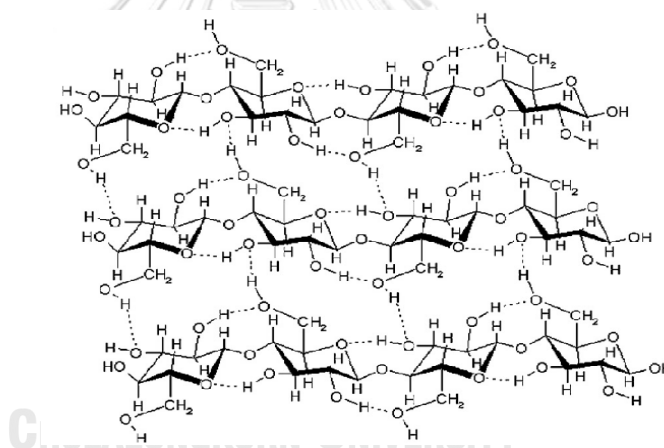
เซลลูโลส [1-10] เป็นองค์ประกอบหลักของเซลลูโลส โดยพบได้ตามธรรมชาติโดยทั่วไปในส่วนของผนังเซลล์ของพืชทุกชนิด อยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยเราพบเซลลูโลสได้มากในส่วนของใบ และผลของพืช นอกจากนี้เรายังพบได้ตามบริเวณลำต้นของพืช ในเส้นใยฝ้ายประกอบด้วยเซลลูโลสถึง 90% เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ประเภทโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์หรือโฮโมพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้านสาขา ประกอบด้วยหน่วยย่อยเบต้า-D-กลูโคไพราโนส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า1,4-ไกลโคซิดิก เกิดเป็นพอลิเมอร์กลูแคน มีความยาวตามธรรมชาติประมาณ 10,000 หน่วย แสดงดังรูปที่ 2.1 แต่ละสายโซ่ของเซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวขนานกันไป โดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน พืชต่างชนิดกันจะมีปริมาณเซลลูโลสที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปจะไม่พบเซลลูโลสบริสุทธิ์แต่จะมีการปะปนของสารประกอบอื่นๆ เช่น ลิกนิน เพกทิน หรือซีลิ่ง เซลลูโลสมีข้อดีหลายประการ เช่น วัสดุธรรมชาติที่ใช้แล้วไม่หมดไปสามารถสร้างขึ้นใหม่ทดแทนได้ มีราคาถูก มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต มีความแข็งแรงสูงเนื่องจากมีโครงสร้างที่มีความเป็นผลึก โดยโครงสร้างการจัดเรียงตัวของเซลลูโลสประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) และส่วนอสัณฐาน (amorphous region) เซลลูโลสจะไม่ละลายในน้ำหรือกรดอ่อน และละลายได้ยากในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป แต่สามารถละลายได้เล็กน้อยในโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลลูโลส [1]

จำนวนหน่วยย่อยของเซลลูโลสขึ้นอยู่กับชนิดของพืชตั้งแต่ 15 หน่วยย่อย จนถึง 14,000 หน่วยย่อย โดยทั่วไปเซลลูโลสหนึ่งหน่วยจะประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี 3 หมู่ โดยอยู่ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 3 และ 6 ตามลำดับ (โดยเป็น primary group 1 หมู่ และ secondary group 2 หมู่) เซลลูโลสมีหน่วยซ้ำเรียกว่าเซลโลไบโอส และทุกๆ หน่วยที่สองของกลูโคสที่เชื่อมกันภายในโมเลกุลของเซลลูโลสสามารถหมุนได้ 180 องศา ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่สูง เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างจำนวนมาก ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล และระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลของ

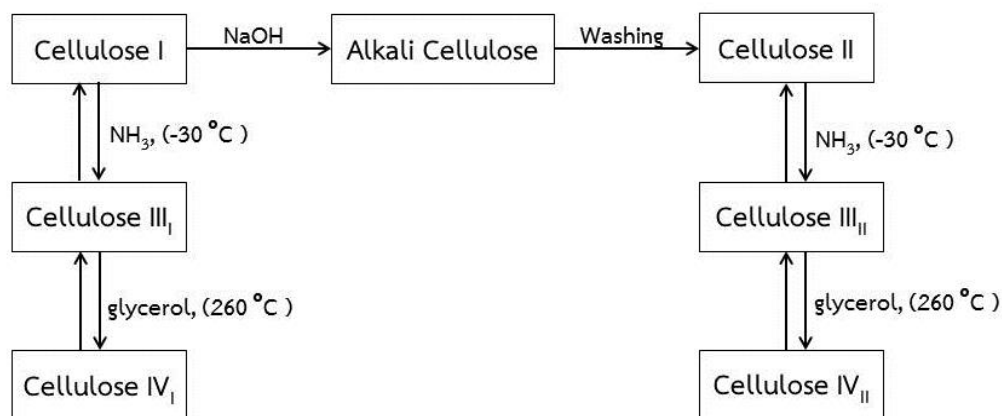
เซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.2 ส่งผลให้เซลลูโลสมีปริมาณผลึกที่สูง ทำให้เซลลูโลสมีความสามารถในการละลายที่ต่ำหรือไม่สามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ทั่วไป อาจเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายบางชนิด แต่สามารถละลายได้ในกรดแก่ เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก เป็นต้น อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของเซลลูโลสมีค่าสูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิการสลายตัวส่งผลให้ต้องดัดแปรเซลลูโลสก่อนนำไปใช้งาน เพื่อให้พันธะไฮโดรเจนมีความเป็นชั่วคราวที่ลดลง ซึ่งจะทำให้เซลลูโลสละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปได้มากขึ้น เซลลูโลสประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ บริเวณที่มีความเป็นผลึก (crystalline region) โดยมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะไฮโดรเจนจำนวนมาก ส่งผลให้มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลน้อย จึงมีความสามารถในการละลายต่ำหรือมีความทนทานต่อตัวทำละลายเคมีได้ดี ในขณะที่ส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบในส่วนอสัณฐาน (amorphous region) มีการเรียงตัวกันที่ไม่แน่นอน ส่งผลให้มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมากกว่าบริเวณเป็นระเบียบ จึงทำให้ถูกทำลายพันธะได้ด้วยการไฮโดรลิซิส (hydrolysis) ได้ง่ายกว่าส่วนที่มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่เป็นระเบียบ



รูปที่ 2.2 พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของเซลลูโลส [3]

เซลลูโลสแบ่งรูปแบบโครงสร้างผลึกได้เป็น 4 รูปแบบ คือ เซลลูโลส I, เซลลูโลส II, เซลลูโลส III และ เซลลูโลส IV โดยที่เซลลูโลส I พบได้ตามธรรมชาติ ส่วนเซลลูโลส II (Regenerated cellulose II) ได้จากการนำเซลลูโลสตั้งต้น I มาทำปฏิกิริยาในสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นหรือเกิดการตกตะกอนจากสารละลาย โดยกระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการเมอร์เซอร์เซชัน (mercerization process) โดยกระบวนการที่ใช้เปลี่ยนรูปแบบของเซลลูโลส I ให้เป็นเซลลูโลส II ให้เป็นเซลลูโลส III ทำได้โดยการทำปฏิกิริยาแก่เซลลูโลส I หรือเซลลูโลส II ในแอมโมเนียเหลว และการเตรียมเซลลูโลส IV ทำได้โดยให้ความร้อนกับเซลลูโลส I หรือเซลลูโลส II ในสภาวะที่มีการดึงยึด

หรือเตรียมได้จากการให้ความร้อนกับเซลลูโลส I หรือเซลลูโลส III ในสารละลายกลีเซอรอล โดยกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปแบบโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส [5]

2.1.1 สมบัติของเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นกลุ่มของเส้นใยชนิดไม่ละลายน้ำ แต่สามารถดูดซับน้ำไว้ที่บริเวณผิวส่งผลให้เกิดการพองตัวของเซลลูโลส เนื่องจากการจัดเรียงตัวของเซลลูโลสมีทั้งแบบการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน และการจัดเรียงตัวแบบสวนทิศทางกัน ทำให้เส้นใยของเซลลูโลสมีความแข็งแรง มีความยืดหยุ่น ไม่เปราะ แต่เนื่องจากมีบางส่วนที่มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้เซลลูโลสมีความสามารถดูดซับน้ำได้ทำให้เกิดการพองตัว ซึ่งความสามารถในการพองตัวจะขึ้นอยู่กับตัวทำละลายแต่ละชนิด โดยพบว่าตัวทำละลายชนิดใดมีขั้วสูงจะทำให้เซลลูโลสเกิดการพองตัวได้กว่าสารที่มีขั้วต่ำหรือไม่มีขั้ว

2.1.1.1 สมบัติการละลายของเซลลูโลส

เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในกรดเข้มข้นและด่างเข้มข้น เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น จึงสามารถแบ่งชนิดของเซลลูโลสตามความสามารถในการละลายในกรดหรือด่างได้ 3 ชนิด ดังนี้

2.1.1.1.1 แอลฟาเซลลูโลส (α -cellulose) คือเซลลูโลสที่ไม่สามารถละลายในสารละลายด่างเข้มข้น

2.1.1.1.2 เบต้าเซลลูโลส (β -cellulose) คือเซลลูโลสที่สามารถละลายในสารละลายด่างเข้มข้น

2.1.1.1.3 แกมมาเซลลูโลส (γ -cellulose) คือเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ดีทั้งในสารละลายต่างเข้มข้น และสารละลายกรดอ่อน

2.1.1.2 ความหนืดของเซลลูโลส

ความหนืดของสารละลายเซลลูโลสเมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูโลส ส่งผลให้ความหนืดของสารละลายเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้น

2.1.1.3 สมบัติการดูดซับและการพองตัว

เซลลูโลสมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ มีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลหมู่ไฮดรอกซิล ส่งผลให้เซลลูโลสมีความสามารถในการดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวของตัวด้วยน้ำหรือสารอินทรีย์ชนิดอื่น ซึ่งการพองตัวของเซลลูโลสจะทำให้ความเป็นผลึกลดลงและส่งผลให้เซลลูโลสส่งต่อการทำปฏิกิริยาเคมี การพองตัวแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การพองตัวภายในผลึกและการพองตัวระหว่างผลึก การพองตัวภายในผลึกเกิดบริเวณที่มีการแทรกตัวหรือการกระจายตัวในส่วนผลึกของเซลลูโลสส่วนการพองตัวระหว่างผลึกเกิดบริเวณที่มีการแทรกตัวของส่วนอสัณฐานที่อยู่ระหว่างผลึก สารละลายที่ทำให้เซลลูโลสพองตัว เช่น สารอัลคาไลน์ กรดอินทรีย์ และสารละลายเกลือโลหะ

2.1.1.4 ความสามารถในการละลาย

เซลลูโลสมีความเป็นขั้วสูง และมีลักษณะการจัดเรียงตัวที่เป็นผลึก ส่งผลให้ตัวทำละลายที่สามารถละลายเซลลูโลสหาได้ยาก

$$\Delta G_{\text{diss}} = \Delta H_{\text{diss}} - T \Delta S_{\text{diss}}$$

จากสมการเทอร์โมไดนามิกส์แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการละลายสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อพลังงานอิสระ (Gibb free energy, ΔG_{diss}) ของสารละลายมีเครื่องหมายติดลบ ถ้าหากค่า ΔG_{diss} มีเครื่องหมายบวกแสดงว่าไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายนั้น กรณีของเซลลูโลสเมื่อนำไปละลายในน้ำหรือสารละลายอินทรีย์พบว่ามีค่า ΔG_{diss} เป็นเครื่องหมายบวกแสดงว่าเซลลูโลสไม่ละลายในน้ำหรือสารละลายอินทรีย์ ถ้าหากต้องการให้เซลลูโลสสามารถละลายในสารละลายได้ต้องทำให้มีค่าพลังงานอิสระเป็นเครื่องหมายลบ

2.1.2 การประยุกต์ใช้เซลลูโลส

เซลลูโลสถูกนำไปประยุกต์ใช้หลากหลายด้าน โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ทางด้านพอลิเมอร์ที่มีการนำเอาเซลลูโลสใช้เป็นตัวเสริมแรงให้กับคอมพอสิตเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล อีกทั้งเซลลูโลสยังช่วยเร่งการย่อยทางชีวภาพ เนื่องจากเซลลูโลสมีความเป็นไฮโดรฟิลิกจึงเร่งการย่อยสลาย

ทางชีวภาพได้เป็นอย่างดี และเซลลูโลสเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ ใช้แล้วไม่หมดไป สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ในระยะเวลาอันสั้น จึงมีการนำเซลลูโลสมาประยุกต์ เช่น ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส และเซลลูโลสเจล [11-12]

2.1.2.1 ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสเป็นการนำเซลลูโลสที่มีการรวมกลุ่มกันเป็นไมโครไฟบริล (microfibril) และมีพันธะภายในสร้างพันธะกันในแต่ละสายโซ่ ทำให้เกิดโครงสร้างเซลลูโลสที่มีผลึกและไม่มีผลึก โดยไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสเกิดจากการนำเซลลูโลสผ่านกระบวนการตัดสายโซ่ด้วยกรด (acid hydrolysis) ให้มีสายโซ่ที่สั้นลง จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีภาวะเป็นกลางและนำไปทำให้แห้ง ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ด้านอาหารและเครื่องดื่ม ด้านเครื่องสำอาง เป็นต้น

2.1.2.2 เซลลูโลสเจล

เซลลูโลสเจลเป็นการนำไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมาทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมระหว่างยูเรียและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิติดลบ และนำไปตกตะกอนในสารละลายกรด จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีภาวะเป็นกลางและนำไปแช่แข็ง เซลลูโลสเจลดำเนินไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น วิศวกรรมเนื้อเยื่อ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ เป็นต้น

2.2 ซิลิกา

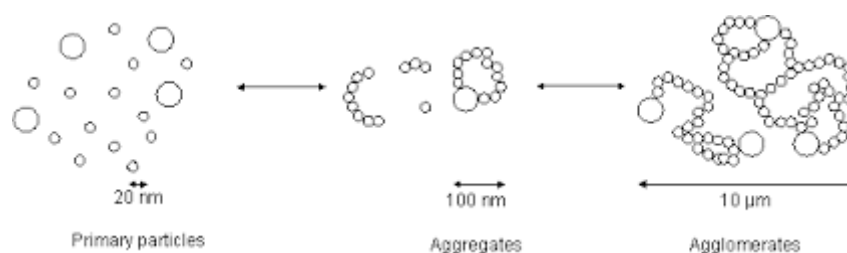
ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ [11-14] สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้น ซิลิกาเป็นตัวเสริมแรงที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรม เพราะการเติมสารเสริมแรงดังกล่าวลงไปจะช่วยให้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่างๆ ของคอมพอสิตให้ดีขึ้น โดยเฉพาะค่ามอดูลัส (modulus), ค่าความแข็ง (hardness), ความทนทานต่อแรงกระแทก (impact strength) เป็นต้น ปัจจุบันซิลิกาที่นิยมมาใช้เป็นสารตัวเติม คือ ปริซิพิเทตซิลิกา (precipitated silica) ซึ่งมีหลายเกรดแต่ละเกรดมีความแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ (primary particle size) หรือพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) โดยทั่วไปซิลิกาเกรดที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิลึกหรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ช่วยเสริมแรงให้แก่คอมพอสิตได้ดีกว่าซิลิกาเกรดที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิใหญ่หรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ

2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของซิลิกา

ซิลิกามักปรากฏอยู่ในสถานะผลึกและรูปของควอตซ์ ซึ่งรูปร่างทางกายภาพของซิลิกาสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ ผลึก (crystalline) ออสัญฐาน (amorphous) และอสัญฐาน

สังเคราะห์ (synthetic amorphous) โดยซิลิกาที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้นมักเป็นผลึกของแข็งสีขาว เกิดจากสารประกอบระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจน มีสูตรทางเคมีคือ SiO_2

ลักษณะโครงสร้างของซิลิกามีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอลเกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์กับออกซิเจน 4 อะตอมอย่างแข็งแรง อะตอมของซิลิกอนจัดเรียงตัวเช่นเดียวกับคาร์บอนในผลึกเพชร โดยทั่วไปซิลิกามีจุดหลอมเหลวประมาณ 1,500-1,700 องศาเซลเซียส และมีความแข็งสูง แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา [11]

ซิลิกามีขนาดโครงสร้างอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 20 นาโนเมตร ซึ่งปกติแล้วอนุภาคของซิลิกามักไม่อยู่โดดเดี่ยวในรูปอนุภาคปฐมภูมิ แต่จะจับรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนเกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (primary structure) ที่เรียกว่าแอกกรีเกต (aggregate) ซึ่งจะมีขนาดประมาณ 100 นาโนเมตร หากกลุ่มก้อนแอกกรีเกตรวมกลุ่มก้อนขนาดใหญ่มากขึ้นเกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary structure) จะเรียกว่าแอกโกลเมอเรต (agglomerate) ซึ่งจะมีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร

พื้นที่ผิวจำเพาะของซิลิกาเป็นปัจจัยที่สำคัญในการบอกถึงประสิทธิภาพในการเสริมแรง และลักษณะทางเคมีของพื้นผิวซิลิกาเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกสิ่งหนึ่งที่ส่งผลต่อการเสริมแรง โดยทั่วไปพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลอย่างหนาแน่น หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลส่งผลให้พื้นผิวของซิลิกามีค่าความเป็นกรดและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี

2.2.2 การสังเคราะห์ซิลิกา

ซิลิกาสามารถสังเคราะห์ได้จากหลากหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการตกตะกอน (precipitation) กระบวนการโซลเจล (sol-gel) กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) กระบวนการพลาสมาสเปรย์ไพโรไลซิส (flame spray pyrolysis)

2.2.2.1 การสังเคราะห์ซิลิกาด้วยกระบวนการตกตะกอน (precipitation)

การสังเคราะห์ซิลิกาสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการตกตะกอนเป็นด้วยกรดซิลฟิวริกของสารละลายอัลคาไลซิลิเกต หลังจากซิลิกาอิ่มตัวไปด้วยน้ำก็จะนำไปกรอง จากนั้นก่อนจะนำไปเก็บต้องนำไปล้างเพื่อกำจัดอัลคาไลซิลเฟตออกและทำให้แห้ง

2.2.3 ข้อจำกัดของการใช้ซิลิกา

เนื่องจากพื้นผิวของซิลิกามีความเป็นขั้วสูงหรือมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้เกิดอนุภาคปฐมภูมิของซิลิกาเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน (filler-filler interaction) จึงเกิดรวมกลุ่มกันเป็นก้อนใหญ่ โดยมีพันธะไฮโดรเจนเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงสูงเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้ซิลิกาไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.4 การประยุกต์ใช้ซิลิกา

ซิลิกาเป็นตัวเสริมแรงที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรม และงานวิจัย โดยมีการนำเอาซิลิกาไปใช้งานในอุตสาหกรรมหลายด้าน ตัวอย่างเช่น

อุตสาหกรรมยาง ซิลิกาเป็นตัวเสริมแรงที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น โดยเฉพาะค่าความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ค่าความแข็ง (hardness) และโมดูลัส (modulus) ซึ่งนิยมใช้ซิลิกาที่อยู่ในรูปคอลลอยด์ หรือพรีซิพิตเตดซิลิกา

อุตสาหกรรมซีเมนต์ มักใช้ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเพื่อทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพ เนื่องจากซิลิกาในระดับนาโนมีการกระจายตัวที่ดีเพราะอนุภาคมีขนาดเล็ก

อุตสาหกรรมยา ซิลิกาใช้เป็นสารเพิ่มแรงดึงผิว และช่วยการกระจายตัวของยา

อุตสาหกรรมสี ใช้เป็นสารควบคุมการไหลของสี

อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ใช้เป็นสารช่วยดูดซับน้ำ

2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ปัจจุบันมีการนำเอาผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกมาใช้กันจำนวนมาก เนื่องจากมีน้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปได้ง่าย แต่เมื่อพิจารณาแหล่งที่มาของพลาสติกที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้นพบว่าส่วนใหญ่นั้นมีที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งการย่อยสลายเป็นไปได้ยากจะต้องใช้ระยะเวลาหลายร้อยปี ส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางขยะ จึงทำให้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) ซึ่งพัฒนามาจากวัสดุพอลิเมอร์จากธรรมชาติเพื่อใช้ทดแทน

ได้รับความสนใจศึกษาและมีการนำมาใช้งานมากขึ้น โดยการพัฒนาพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่จะนิยมเตรียมในรูปของคอมพอสิต (composite) และอาศัยสารเสริมแรงเพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติ

คำนิยามของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพตามมาตรฐานของสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society for Testing and Materials, ASTM D6400-99) ได้ให้คำจำกัดความคือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา และสาหร่าย และองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (International Standards Organization, ISO 472:1998) ได้ให้คำจำกัดความคือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น [15]

2.3.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์

2.3.1.1 แหล่งวัตถุดิบจากปิโตรเลียม

คือ พลาสติกที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ แนนพธา เป็นแหล่งวัตถุดิบที่ไม่สามารถทดแทนได้ ใช้แล้วหมดไป อีกทั้งกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิไวน์แอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) พอลิไวนิลคลอไรด์ (poly(vinyl chloride)) เป็นต้น

2.3.1.2 แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนได้

คือ พลาสติกที่ได้มาจากพืชผลทางการเกษตร จำพวกแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวสาลี หรือมันฝรั่งซึ่งแต่ละประเทศจะใช้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับพืชผลทางการเกษตรเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีการใช้วัตถุดิบนอกเหนือจากแป้งและน้ำตาล เช่น เซลลูโลส ลิกโนเซลลูโลส ที่อยู่ในพืช ซึ่งสามารถนำไปย่อยเป็นน้ำตาลได้ พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ เช่น พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (polyhydroxybutyrate, PHB) เป็นต้น

2.3.2 ประเภทของการย่อยสลายได้ของพลาสติกตามกลไกในการย่อยสลาย

การย่อยสลายได้ของพลาสติกคือกระบวนการที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติต่างๆ ภายในพลาสติก เช่น สี รูปร่าง ความแข็งแรง เป็นต้น เนื่องจากเกิดการแตกออกของพันธะภายในโครงสร้าง ทำให้พอลิเมอร์มีความยาวของสายโซ่ที่สั้นลงและมีโครงสร้างโมเลกุลเล็กลง โดยปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสามารถเกิดขึ้นได้จากหลากหลายปัจจัย อาทิ แสง ความร้อน สารเคมี จุลินทรีย์ เป็นต้น

การจัดประเภทตามกลไกในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพลาสติก สามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

2.3.2.1 การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายด้วยแสงโดยส่วนใหญ่มักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงไปหรือพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างภายในมีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง ซึ่งสามารถแตกออกของพันธะได้เมื่อได้รับรังสียูวี (Ultraviolet Radiation, UV) เมื่อสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกออกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งไม่เสถียร อนุมูลอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยาทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กลงเรื่อยๆ ดังนั้นข้อเสียของการย่อยสลายด้วยแสงคือ การย่อยสลายแบบนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ หรือสภาวะแวดล้อมที่มีดปราดจากรังสียูวี หรือพลาสติกที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกหนาமாக บริเวณพื้นผิวส่งผลให้พลาสติกไม่มีการสัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2.3.2.2 การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)

การย่อยสลายทางกลเกิดจากการให้แรงกระทำแก่พลาสติก ทำให้เกิดการแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ

2.3.2.3 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก คือปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงไปในโครงสร้างของพอลิเมอร์ โดยมีออกซิเจน และความชื้น แสงยูวี หรือแรงเป็นปัจจัยสำคัญ ทำให้เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) และจะแตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่มีความไม่เสถียร จากนั้นจะเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์มีขนาดที่เล็กลงอย่างรวดเร็ว

2.3.2.4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ (polyester) พอลิแอนไฮไดรด์ (polyanhydride) พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate) และพอลิยูรีเทน (polyurethane) ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ไม่ใช้ตัวเร่ง (non-catalytic hydrolysis) และใช้ตัวเร่ง (catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทที่ใช้ตัวเร่งแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (external catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (enzyme) เช่น depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase และตัวเร่งที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ เบส และกรด ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

2.3.2.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์เกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยมีขั้นตอน 2 กระบวนการ ขั้นแรก เนื่องจากขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ การย่อยสลายจึงเกิดขึ้นโดยปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งทั้งแบบใช้ endo-enzyme คือการที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme คือการที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย คือ พลังงาน และสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำเกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

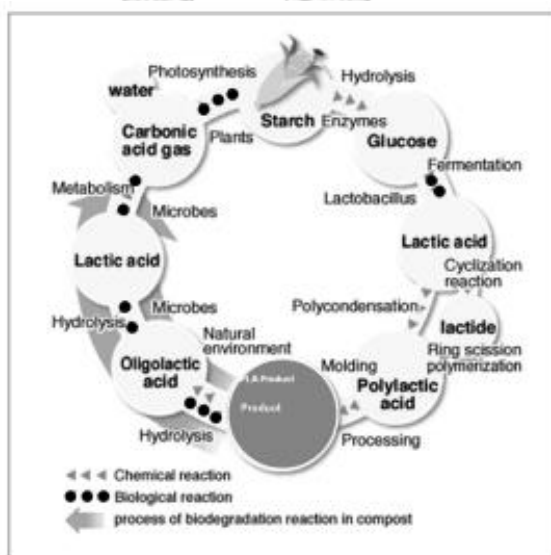
2.4 พอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิด [16-19] เป็นพอลิเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ตรง (aliphatic polyester) จัดเป็นพลาสติกชีวภาพชนิดหนึ่งซึ่งสังเคราะห์ได้จากกรดแล็กติก (lactic acid) ซึ่งกรดแล็กติกสามารถผลิตได้จากการหมักคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้งหรือน้ำตาล (fermentation) โดยใช้แบคทีเรีย *Lactobacillus brevis* (พืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง) โดยทั่วไปนิยมผลิต

จากข้าวโพด ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้เป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วไม่หมดไปสามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้ในระยะเวลาอันสั้น

พอลิแล็กติกแอซิดจัดเป็นพลาสติกทางชีวภาพที่เป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตหลากหลายวิธี เช่น การฉีดขึ้นรูป (injection molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (thermoforming) การอัดขึ้นรูป (compression molding) และการอัดรีด (extrusion) เป็นต้น

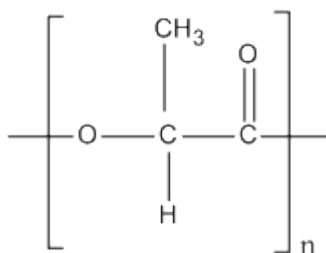
การใช้งานผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิแล็กติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเมื่อนำไปฝังกลบในดินโดยใช้ระยะเวลาอันสั้นเมื่อเทียบกับพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยวัฏจักรของพอลิแล็กติกแอซิดแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วัฏจักรของพอลิแล็กติกแอซิด [19]

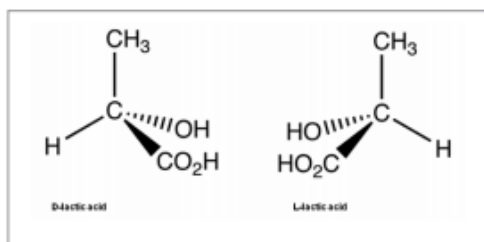
พอลิแล็กติกแอซิดมีราคาแพงเนื่องจากต้นทุนในการผลิตสูง และเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทำให้มีสมบัติเชิงกลต่ำ จึงมีการพัฒนาพอลิแล็กติกแอซิดให้มีน้ำหนักโมเลกุลสูง การใช้งานของพอลิแล็กติกแอซิดเป็นอย่างกว้างขวาง เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อีกทั้งผลิตได้จากวัตถุดิบที่สร้างขึ้นใหม่ได้ระยะเวลาอันสั้น จึงทำให้การใช้พลาสติกชนิดนี้ช่วยลดปัญหาขยะที่ก่อให้เกิดภาวะมลพิษทางอากาศ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งทำให้พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในด้านบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภคบริโภคอื่น ๆ

2.4.1 โครงสร้าง องค์ประกอบและการสังเคราะห์



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิดสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้จากกรดอัลฟาไฮดรอกซี (α -hydroxy acids) พอลิแล็กติกแอซิดมีหน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์ คือกรดแล็กติก หรือมีชื่อทางเคมีคือ 2-ไฮดรอกซีโพรพิโอนิกแอซิด (2-hydroxy propionic acid) กรดแล็กติกมีไอโซเมอร์สองรูปแบบ คือแบบดี และแอล แสดงดังรูปที่ 2.6 และ รูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นอีนันซีโอเมอร์ (enantiomer) ที่มีความว่องไวต่อแสง (optical active) ที่แตกต่างกัน โดยมีสูตรเคมีเหมือนกันแต่การจัดเรียงตัวในสามมิติแตกต่างกันและการบิดของระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางต่างกัน โดยทั่วไปพบในไอโซเมอร์ในรูปแบบแอลไอโซเมอร์มากกว่าเนื่องจากมอนอเมอร์ที่สกัดได้จากธรรมชาติพบว่าจะอยู่ในรูปของแอลไอโซเมอร์ ปัจจุบันการผลิตกรดแล็กติกอาศัยการหมักเป็นหลัก (fermentation) ซึ่งสามารถผลิตพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงที่ดี



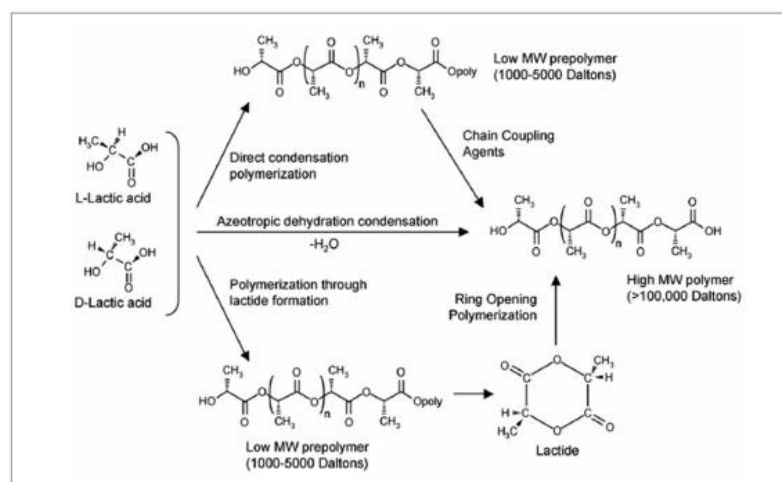
รูปที่ 2.7 โครงสร้างสเตอริโอไอโซเมอร์พอลิแล็กติกแอซิด [19]

รูปซ้าย : PLLA

รูปขวา : PDLA

พอลิแล็กติกแอซิดสามารถสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิก (azeotropic dehydrative condensation) ซึ่งจะทำให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึงระดับมากกว่า 100,000 ปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรง (direct condensation polymerization) จะได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 1,000 – 5,000 โดยบางครั้งเรียกว่าพรีพอลิเมอร์และ/หรือการสังเคราะห์ผ่านการเกิดแล็กไทด์ (lactide formation) แสดงดังรูปที่ 2.8 พอลิแล็กติก

แอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสามารถสังเคราะห์ผ่านการเปิดวง (ring-opening polymerization) ของแล็กไทด์ เนื่องจากกรดแล็กติกมีสองไอโซเมอร์สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ที่ได้ส่วนใหญ่อาจประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ชนิดแอลไอโซเมอร์เกือบทั้งหมด (PLLA) หรือประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ที่เป็นของผสมราซิเมอิก (PDLLA) ซึ่งปริมาณดีและหรือแอลไอโซเมอร์จะส่งผลต่อสมบัติด้านต่างๆ ของพอลิแล็กติกแอซิด ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิในการหลอมผลึก (T_m) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณแอลไอโซเมอร์ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.8 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดจากกรดแล็กติกชนิดแอล และดี [19]

ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณแอตและ/หรือดีไอโซเมอร์ อัตราการเย็นตัว เป็นต้น โดยทั่วไปพอลิแล็กติกแอซิดมีโครงสร้างผลึกสามรูปแบบ ได้แก่ แอลฟา (α) เบตา (β) และแกมมา (γ) ซึ่งโครงสร้างแบบอัลฟาเป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรมากที่สุด โดยมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส ในขณะที่โครงสร้างเบต้ามี่ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส

2.4.2 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด

สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างทางโมเลกุล ความบริสุทธิ์ของ enantiometric ของแล็กติกแอซิด น้ำหนักโมเลกุล และความบริสุทธิ์เชิงแสงของพอลิแล็กติกแอซิด เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติด้านต่างๆ ของพอลิแล็กติกแอซิด เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ความเหนียว ความแข็งแรงขณะหลอม สมบัติด้านการไหล สมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว และอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะ

2.4.2.1 สมบัติทางกายภาพ สมบัติการละลายและสมบัติเชิงกล

สมบัติทางกายภาพของพอลิแล็กติกแอซิดมีลักษณะใสมีความแวววาวสูง มีค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ประมาณ 1.25 สมบัติการละลายของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในสายโซ่พอลิเมอร์ และปริมาณความเป็นผลึก พอลิแล็กติกแอซิดไม่สามารถละลายในน้ำ แอลกอฮอล์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่แทนที่ได้ สมบัติเชิงกลพอลิแล็กติกแอซิดพบว่าพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ผ่านการดึงยืดจะมีความเปราะมากแต่มีความคงรูปและความแข็งแรงสูง แต่เมื่อนำไปผ่านการได้รับแรงโดยการดึงยืดจะมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป โดยสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักโมเลกุล สัดส่วนแอลต่อดีไอโซเมอร์ และปริมาณผลึก

2.4.2.2 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดมีอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกทั่วไป อุณหภูมิคล้ายแก้วขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักโมเลกุล และสัดส่วนแอลต่อดีไอโซเมอร์ โดยพบว่าอุณหภูมิคล้ายแก้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิแล็กติกแอซิดยังขึ้นอยู่กับประวัติทางความร้อน (Thermal history) พบว่าโดยทั่วไปนั้นอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิแล็กติกแอซิดอยู่ในช่วง 60-65 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างได้ง่ายหากนำไปเก็บไว้ในที่มีอุณหภูมิสูง อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์เชิงแสง โดยอุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณดีไอโซเมอร์เพิ่มขึ้น โดยสามารถลดลงได้มากถึง 50 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปพอลิแล็กติกแอซิดมีอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วง 130-160 องศาเซลเซียส

2.4.2.3. สมบัติการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว

สมบัติการซึมผ่านของก๊าซและของเหลวของพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าใกล้เคียงกับพลาสติกชนิดอื่น นอกจากนี้ยังมีสมบัติการป้องกันการแพร่ผ่านของกลิ่นได้ดีอีกด้วย

2.4.3 การเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิด

การเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิดเกิดจากการขาดออกของสายโซ่หลัก (main chain) ของพอลิแล็กติกแอซิด หรือสายโซ่ด้านข้าง (side chain) โดยทั่วไปการเสื่อมสภาพเกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง แรงกล ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การย่อยสลายทางชีวภาพ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น น้ำหนักโมเลกุล ความบริสุทธิ์ ปริมาณผลึก ความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ พอลิแล็กติกแอซิดที่เกิดการสลายตัวจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิแล็กติกแอซิดและโคพอลิเมอร์เกิดจากเอนไซม์ประเภทโปรติเอส เอสเทอเรส และไลเปสที่จุลินทรีย์ปล่อยออกมา

2.4.4 ข้อจำกัดของพอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกทางชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ แต่ข้อจำกัดของพอลิแล็กติกแอซิดคือขึ้นรูปได้ยากกว่าปิโตรเคมีพลาสติกเนื่องจากปัญหาการควบคุมความหนืดขณะหลอมเหลวทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดมีความแข็งแรง และสมบัติความทนความร้อนต่ำ จึงต้องพัฒนาพอลิแล็กติกแอซิดให้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดี

2.5 สารเชื่อมประสาน (Coupling agents)

การปรับปรุงสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ของพอลิเมอร์ด้วยการใส่ตัวเสริมแรง (reinforcing agent) หรือเส้นใยที่ได้จากธรรมชาตินั้น พอลิเมอร์คอมพอสิตจะมีสมบัติที่ดีถ้าเกิดการกระจายตัวของตัวเสริมแรง (reinforcing agent) หรือเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติได้ดี ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้คือ การปรับปรุงพื้นผิวของตัวเสริมแรงหรือเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติด้วยสารที่สามารถทำให้เข้ากันได้กับพอลิเมอร์และตัวเสริมแรงหรือเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ

การปรับปรุงพื้นผิวระหว่างฟิลเลอร์หรือเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติกับพอลิเมอร์ นอกจากการใช้สารปรับปรุงพื้นผิว อาจใช้สารอีกประเภทหนึ่งคือ สารเชื่อมประสานหรือสารช่วยยึด (coupling agents or adhesion promoters) ซึ่งสารชนิดนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางหรือสะพานเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับตัวเสริมแรงหรือเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ โดยสร้างพันธะที่แข็งแรง ทำให้มีการยึดเกาะระหว่างทั้งสองเฟสที่ดีขึ้น [20]

2.5.1 กลไกการปรับปรุงการยึดติดระหว่างฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรงกับพอลิเมอร์โดยการใช้สารเชื่อมประสาน

สารเชื่อมประสาน มีสูตรทั่วไปคือ $(R'O)_x-M-(R-X)_y$

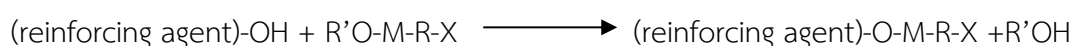
โดย M คือ โลหะ

X เป็นหมู่ฟังก์ชันที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับพอลิเมอร์

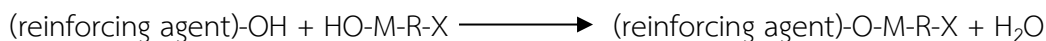
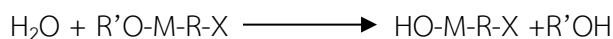
R เป็นหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่เชื่อมอยู่ระหว่างหมู่ X กับโลหะ M

R'O เป็นหมู่ที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับตัวเสริมแรงหรือเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ

การเชื่อมระหว่างสารเชื่อมประสานและตัวเสริมแรงเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ R'O ของสารเชื่อมประสานกับหมู่ OH ที่พื้นผิวของตัวเสริมแรงดังนี้



หรือเกิดจากการหมู่ R'O ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยความชื้นบริเวณพื้นผิวของตัวเสริมแรงเกิดเป็นหมู่ OH โดยเข้าทำปฏิกิริยาควบแน่นกับตัวเสริมแรงต่อไป



การเชื่อมประสานระหว่างสารเชื่อมประสานและพอลิเมอร์เกิดจากหมู่ X ของสารเชื่อมประสานเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น สารเชื่อมประสานที่มีหมู่ X คือหมู่ไวนิลหรือหมู่อะคริลิล (acrylyl) ถูกนำไปใช้กับพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัวหรือพอลิโอเลฟินส์ประเภทเชื่อมขวาง (crosslinked polyolefins) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารเชื่อมประสานกับพอลิเมอร์เป็นแบบฟรีแรดิคัล (free radical) เป็นต้น

2.5.1.1 การใช้สารเชื่อมประสาน

มี 2 วิธีคือ

2.5.1.1.1 ปรับปรุงพื้นผิวของตัวเสริมแรงหรือเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติแล้วนำไปผสมกับพอลิเมอร์

2.5.1.1.2 การผสมเข้ากับพอลิเมอร์ระหว่างกระบวนการคอมพาวด์ดิ้ง

2.5.1.2 ชนิดสารประสานที่ใช้กันทั่วไป

มีดังนี้คือ

2.5.1.2.1 ซิลเลน (silanes)

2.5.1.2.2 สารโครเมียมเชิงซ้อน (chromium complexes)

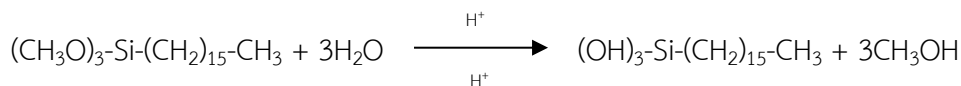
2.5.1.2.3 เซอร์โคเนียมอะลูมิเนต (zirconium aluminates)

2.5.1.2.4 ไททาเนต (titanates)

2.5.2 ซิลเลน (Silanes)

ซิลเลนเป็นสารประสานที่นิยมใช้มากที่สุดโดยมีสูตรทั่วไป คือ X-Si(OR)_3 โดยหมู่ OR (เช่น $-\text{OCH}_3$) ถูกเปลี่ยนเป็นซิลานอล (Si-OH) จากนั้นเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) ของตัวเสริมแรงหรือเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ ในขณะที่หมู่ X จะเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการผสมระหว่างตัวเสริมแรงหรือเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติและพอลิเมอร์ได้ดี โดยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้

ขั้นที่ 1 เกิดการไฮโดรไลซิสหมู่เมทอกซีของไซเลนได้เป็นหมู่ซิลานอล (Si-OH) ในขั้นตอนนี้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว



ขั้นที่ 2 ซิลานอลเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของตัวเสริมแรงหรือเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ

2.6 คอมพอสิต

คอมพอสิต [21-23] คือ วัสดุที่มากกว่าหนึ่งชนิดมารวมหรือผสมกัน แต่ไม่เกิดการรวมหรือผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสมบัติของคอมพอสิตขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ โดยสมบัติหลักของคอมพอสิตจะเป็นสมบัติที่ดีของวัสดุแต่ละชนิด คอมพอสิตประกอบด้วย 2 เฟส (phase) คือ เฟสหลักหรือเฟสต่อเนื่อง (matrix phase) และเฟสที่สอง คือ เฟสรองหรือเฟสกระจายตัว (dispersed phase) อยู่ในวัสดุเนื้อหลัก

2.6.1 เฟสหลัก

เฟสหลักจะห่อหุ้มเฟสกระจายตัวและทำให้คอมพอสิตเป็นรูปร่าง และยังเป็นตัวกลางถ่ายเทแรงเมื่อได้รับแรง โดยเฟสหลักที่นิยมใช้คือ พอลิเมอร์ (polymer) โลหะ (metal) และเซรามิก (ceramic)

2.6.1.1 พอลิเมอร์ (Polymer)

โดยธรรมชาติพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำ เชื่อมกันเป็นสายโซ่พอลิเมอร์สายยาว แต่พอลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลที่มีความแข็งแรงไม่สูงมากนักและมีความหนาแน่นต่ำ สำหรับเฟสหลักของพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกเป็น เทอร์โมเซตติง (thermosetting matrix) และเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic matrix) โดยเทอร์โมเซตติงมีโครงสร้างแบบร่างแห และมีสมบัติแข็งเปราะ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลจะเกิดการคงรูปและไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ส่วนเทอร์โมพลาสติกมีโครงสร้างแบบเส้นหรือกิ่ง สามารถหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน และเมื่อเกิดการแข็งตัวสามารถนำกลับมาหลอมเหลวได้อีก

2.6.1.2 เซรามิก (Ceramic)

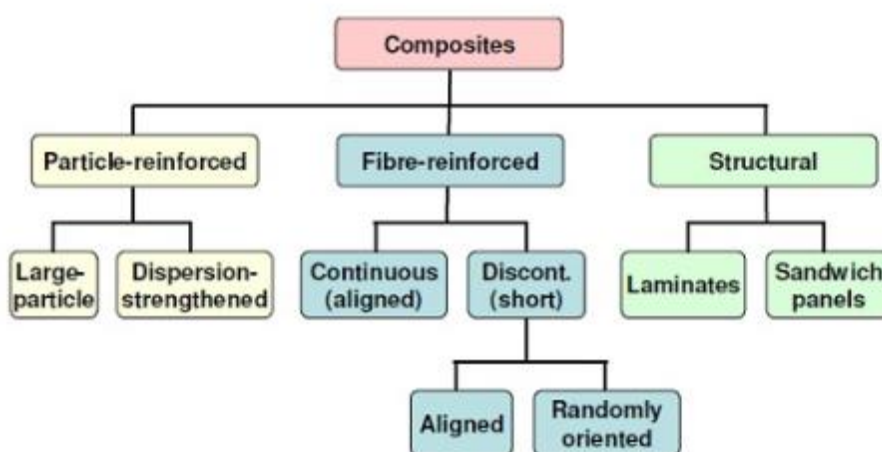
เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อน ทนต่อการกัดกร่อน และเมื่อได้รับความร้อนมีอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำ ข้อเสียของเซรามิก คือ มีความเหนียวน้อย ส่งผลให้มีความเปราะแตกหักง่าย

2.6.1.3 โลหะ (Metal)

โลหะเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและความเหนียวสูง แต่มีข้อเสียคือ เป็นสนิมง่าย และมีความล้าของโลหะต่ำมาก โดยเฉพาะอลูมิเนียมและไทเทเนียม

2.6.2 เฟสกระจาย

เฟสรองหรือเฟสกระจายตัวเป็นส่วนที่มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับเฟสหลัก และกระจายตัวได้ในเฟสหลัก โดยจะทำหน้าที่เสริมเฟสหลักและทำให้ได้คอมพอลิตที่มีสมบัติตามที่ต้องการ สมบัติที่ดีของเฟสหลักคือ ต้องมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง ความแกร่ง ความยืดหยุ่น และต้องมีรูปร่างที่เหมาะสมกับการยึดเกาะกับเฟสหลัก ตัวอย่างของเฟสกระจาย คือวัสดุเสริมแรง สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนผังการแบ่งประเภทของวัสดุคอมพอลิต [22]

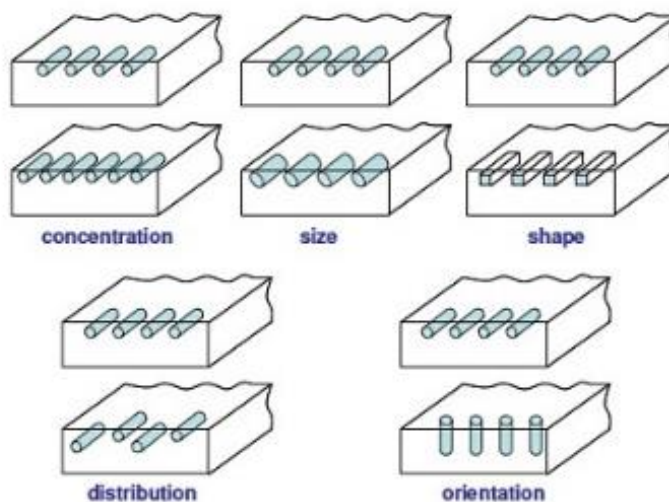
2.6.2.1 วัสดุคอมพอลิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced composite)

วัสดุคอมพอลิตประเภทนี้สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อย คือวัสดุคอมพอลิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ และวัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งทั้งสองแตกต่างกันเรื่องกลไกในการเสริมแรง โดยการเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่เป็นการเพิ่มความแข็งแรงทางกลศาสตร์เท่านั้น สำหรับการเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก โดยปกติทั่วไปแล้วขนาดอนุภาคเล็กมีขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตรถึง 0.1 ไมโครเมตร

2.6.2.2 วัสดุคอมพอลิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fibrous composite)

วัสดุคอมพอลิตเสริมแรงด้วยเส้นใยมีลักษณะอาจเป็นแถบหรือเป็นเส้น ลักษณะที่เป็นเส้นใยขนาดสั้น หรือเส้นใยขนาดยาวต่อเนื่อง โดยทั่วไปมักใช้เส้นใยที่มีความแข็งแรง

เพื่อทำหน้าที่ในการรับแรงและส่งผ่านแรงไปยังเฟสหลัก ซึ่งสมบัติของเส้นใยขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัย เช่น ปริมาณการเติมเส้นใย ชนิดของเฟสหลัก และการกระจายตัวของเส้นใย แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของเส้นใย [22]

2.6.2.3 วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้าง (Other composite structure)

วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้าง สมบัติที่ได้ขึ้นอยู่กับ องค์ประกอบของวัสดุ และรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้าง ประเภทโครงสร้างของวัสดุที่พบบ่อยคือ โครงสร้างแบบลามิना (lamina) และโครงสร้างแผงประกอบแซนด์วิช (sandwich panels) โดยโครงสร้างแบบลามินา ประกอบด้วยแผ่น 2 มิติเรียงซ้อนกัน ซึ่งแต่ละแผ่นจะได้รับแรงในทิศทางที่ตั้งฉากเพื่อให้เกิดความแข็งแรง ดังนั้นโครงสร้างแบบลามิานานั้นจะมีความแข็งแรงสูง สามารถรองรับแรงได้ทุกทิศทาง ส่วนโครงสร้างแบบแซนด์วิชนั้นประกอบด้วยโครงสร้างแผ่นนอกที่มีความแข็งแรงและมีการแทรกชั้นของวัสดุชนิดอื่นที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า ซึ่งแผ่นหน้าจะทำหน้าที่รับแรงในแนวระนาบ และรับแรงดัดงอในทิศทางตามขวาง และชั้นแกนทำหน้าที่แยกแผ่นบริเวณด้านหน้าออกจากกัน อีกทั้งยังต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในทิศทางตั้งฉากกับระนาบแผ่นหน้าได้อีกด้วย

2.7 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน

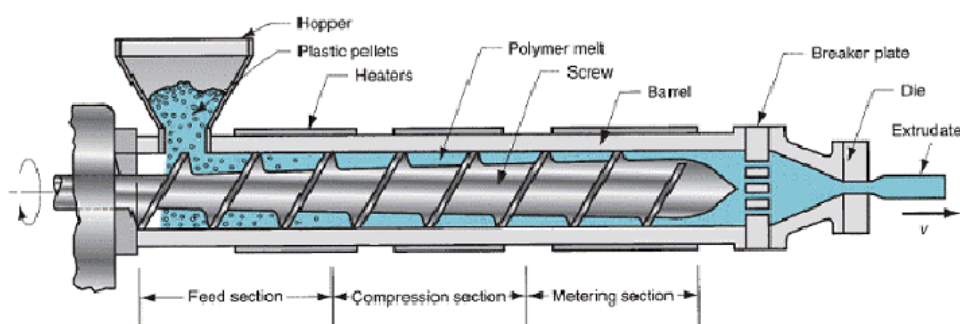
กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปของชิ้นงาน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การผสม การขึ้นรูป และการหล่อเย็น [24, 25]

2.7.1 การผสม

การผสมเป็นการผสมสารเติมแต่งเข้ากับพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ตรงกับความต้องการ การผสมสารเติมแต่งเข้ากับพอลิเมอร์นั้นทำได้ยากเนื่องจากการกระจายตัวได้ดีของสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ จึงมีการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการเตรียมคอมพอสิตในรูปของมาสเตอร์แบตช์ (master batch) มาสเตอร์แบตช์หมายถึง คอมพอสิตระหว่างสารเติมแต่งกับพอลิเมอร์ในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน เช่นการผสมผ่านเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder)

2.7.1.1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin screw extruder)

เครื่องอัดรีดสกรูคู่เป็นการผสมสารเติมแต่งกับพอลิเมอร์เข้าด้วยกัน โดยเข้าสู่ทางช่องใส่เม็ดพลาสติก (hopper) จากนั้นสารเติมแต่งกับเม็ดพลาสติกจะถูกหลอมภายในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยอาศัยความร้อน แรงเฉือน และความดัน จากนั้นจะถูกดันออกบริเวณหัวปลายเปิด (die) เพื่อขึ้นรูปตามที่ต้องการ เครื่องอัดรีดสกรูคู่มีประสิทธิภาพในการผสมสูงกว่าเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว เนื่องจากแรงเฉือนที่ใช้ในการผสมของเครื่องอัดรีดสกรูคู่สูงกว่า โดยลักษณะการหมุนของสกรูคู่มีสองลักษณะ ได้แก่ การหมุนในทิศทางเดียวกันหรือหมุนเข้าหากัน (co-rotating screw) และการหมุนสวนทางกัน (counter rotating screw) โดยการผสมทั่วไปนั้นมักใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่มีลักษณะการหมุนของสกรูในทิศทางเดียวกัน เครื่องอัดรีดสกรูคู่มีลักษณะเป็นท่อยาว เรียกว่าบาร์เรล (barrel) สามารถแบ่งโซนภายในสกรูออกเป็น 3 โซน แสดงดังรูปที่ 2.11 คือ



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบภายในสกรู [24]

Feed zone เป็นโซนบริเวณช่องใส่เม็ดพลาสติก สกรูบริเวณโซนนี้จะมีความลึกเพื่อใช้ในการรองรับเม็ดพลาสติกและสารเติมแต่งที่ถูกป้อนเข้ามาทางช่องป้อน สกรูจะหมุนเพื่อพาเม็ดพลาสติกไปบริเวณโซนถัดไป ความร้อนจากเครื่องและความร้อนจากแรงเสียดทานในบริเวณโซนนี้จะทำให้เม็ดพลาสติกและสารเติมแต่งเกิดการหลอมตัว

Compression zone เป็นโซนบริเวณกลางบาร์เรล บริเวณนี้ช่องว่างระหว่างเกลียวสกรูจะมีขนาดเล็กลง ทำให้เกิดแรงบีบอัดทำให้เม็ดพลาสติกและสารเติมแต่งเกิดการหลอมเหลวผสมเข้ากันและเกิดความร้อนจากแรงเสียดทานส่งผลให้เกิดแรงเฉือน ทำให้เม็ดพลาสติกและสารเติมแต่งเกิดการผสมที่สมบูรณ์

Metering zone เป็นโซนบริเวณปลายบาร์เรล บริเวณนี้ช่องว่างระหว่างสกรูจะมีขนาดเล็กลงกว่าบริเวณโซนกลางเพื่อให้เกิดแรงดันดันคอมพอสิตหลอมเหลวออกมาที่บริเวณหัวดาย

2.7.2 การขึ้นรูปและการหล่อเย็น

การขึ้นรูปพลาสติกประกอบไปด้วยหลากหลายวิธี โดยพิจารณาจากลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปใช้ สำหรับในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตและทดสอบสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยจะทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) และกระบวนการอัดขึ้นรูป (compression molding) ตามลำดับ

2.7.2.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูป

กระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยความดันสูง โดยทั่วไปประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ชุดฉีด ชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์ และฐาน

2.7.2.1.1 ชุดฉีด (injection unit)

ชุดฉีดเป็นส่วนที่คอมพอสิตที่อยู่บริเวณกรวยค่อยๆ ไหลลงสู่สกรูหมุน จากนั้นเกิดการหลอมเหลวภายในกระบอกสูบด้วยความร้อนจากฮีทเตอร์ สกรูจะทำหน้าที่หมุนพาและคลุกเคล้าคอมพอสิตเข้าด้วยกันพร้อมกับผลักดันให้คอมพอสิตหลอมเหลวไปยังหัวฉีดเพื่อฉีดออกสู่แม่พิมพ์

2.7.2.1.2 ชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์ (clamp unit)

ชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์ทำหน้าที่เคลื่อนที่เปิด-ปิดแม่พิมพ์ด้วยไฮดรอลิก โดยปกติแม่พิมพ์จะประกอบด้วยสองด้าน ด้านหนึ่งเป็นด้านที่อยู่กับที่ ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นด้านที่เคลื่อนที่เปิด-ปิดแม่พิมพ์ ขณะฉีดคอมพอสิตเข้าไปยังแม่พิมพ์ชิ้นงานจะถูกหล่อเย็น และเมื่อฉีดคอมพอสิตได้รูปร่างตามที่ต้องการ ก็จะปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

2.7.2.2 กระบวนการอัดขึ้นรูป

กระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นเทคนิคการขึ้นรูปที่เก่าแก่ การขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้ทำให้ได้ชิ้นงานของคอมพอสิตที่มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้เกิดข้อดีหลายประการ เช่นสารเติมแต่งเกิดการกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ ชิ้นงานมีความเค้นตกค้างต่ำ และสมบัติเชิงกลยังคงเหมือนเดิมเนื่องจากการไหลภายใต้แรงเฉือนค่อนข้างต่ำ โดยมีหลักการดังต่อไปนี้

2.7.2.2.1 นำแม่พิมพ์หรือแผ่นฟิล์มไม่ลว้างบนแผ่นเหล็ก จากนั้นวางคอมพอสิตที่ได้จากการผสมในปริมาณที่เหมาะสมและประกบด้วยแม่พิมพ์เหล็กอีกแผ่น

2.7.2.2.2 วางแผ่นเหล็กที่มีการประกบเข้าด้วยกันแล้วลงบนแท่นเหล็กที่มีการให้ความร้อน จากนั้นอัดแท่นเหล็กเข้าด้วยกันด้วยความดันที่คงที่ ด้วยระบบไฮดรอลิก ความร้อนจำทำให้คอมพอสิตสามารถไหลเคลื่อนที่ได้ทั่วของแม่พิมพ์หรือแผ่นฟิล์มไม่ลว้าง

2.7.2.2.3 ทำการหล่อเย็นแผ่นเหล็กด้วยระบบการหล่อเย็นเพื่อให้ชิ้นงานเกิดการแข็งตัว

2.7.2.2.4 ปลดแท่นเหล็กที่เข้าหากันออกจากกันเพื่อเปิดแผ่นเหล็กออกจากนั้นนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์หรือแผ่นไม่ลว้าง

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพลาสติกเป็นที่นิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีน้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีราคาถูก แต่เมื่อพิจารณาถึงแหล่งที่มาของพลาสติกเหล่านั้นพบว่าได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งพลาสติกที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมนั้นเป็นวัสดุที่ใช้แล้วหมดไป ไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ในระยะเวลาอันสั้น อีกทั้งไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมก่อให้เกิดปัญหาขยะที่เพิ่มมากขึ้นจากการอุปโภคและบริโภค ดังนั้นจึงมีความพยายามในการพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีสมบัติที่เหมือนกับพลาสติกที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นที่สนใจในการวิจัยและพัฒนาในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการคือ ใส มีความคงทนไม่สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมทั่วไปสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการรีดหรือฉีด แต่ขึ้นรูปได้ยากกว่าปิโตรเลียมพลาสติกเนื่องจากปัญหาการควบคุมความหนืดขณะหลอมทำให้สมบัติเชิงกลมีความแข็งแรงและสมบัติความทนความร้อนต่ำ แม้ว่าจะเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพแต่ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีการฝังกลบ ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาพอลิแล็กติกแอซิดที่สามารถย่อยสลายได้เร็วขึ้นโดยผสมกับวัสดุที่สามารถช่วยเร่งการย่อยสลายได้ เช่น เซลลูโลส แป้ง เป็นต้น และปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น เช่น ซิลิกาแกรฟีน เป็นต้น

ซิลิกา เป็นตัวเสริมแรงที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีขนาดอนุภาคขนาดเล็กและมีรูปร่างที่เป็นทรงกลม เพราะการเติมซิลิกาลงไปจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่างๆ ของคอมพอสิตให้ดีขึ้น โดยเฉพาะค่ามอดูลัส, ค่าความแข็ง, ความทนทานต่อแรงกระแทก เป็นต้น ปัจจุบันซิลิกาที่นิยมมาใช้เป็นสารตัวเติม คือ ฟริซิฟิเทดซิลิกา ซึ่งมีหลายเกรดแต่ละเกรดมีความแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคปฐุมภูมิ หรือพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยทั่วไปซิลิกาเกรดที่มีขนาดอนุภาคปฐุมภูมิเล็กหรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ช่วยเสริมแรงให้แก่คอมพอสิตได้ดีกว่าซิลิกาเกรดที่มีขนาดอนุภาคปฐุมภูมิใหญ่หรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ อีกทั้งซิลิกามีความเป็นไฮโดรฟิลิกสูง สามารถดูดซับความชื้นให้กับชิ้นงานคอมพอสิตได้ดี จึงสามารถช่วยเร่งสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพได้

จากงานวิจัย Ali และคณะ [26] ได้ทำการสังเคราะห์ซิลิกาเจลจากโซเดียมซิลิเกตเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุด โดยทำการสังเคราะห์ซิลิกาเจลด้วยการทำปฏิกิริยากับกรด พบว่าที่ค่า pH ของไฮโดรโซลต่ำจะป้องกันการเกิดการพอร์มตัวของเจล โดยไฮโดรโซลไม่สามารถที่จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นไฮโดรเจลได้หลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมง จึงทำให้ทราบว่า การควบคุมค่า pH ของไฮโดรโซลและน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกตนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาคซิลิกา และจากงานวิจัย Jal และคณะ [27] ศึกษาการเตรียมนาโนซิลิกาด้วยวิธีการตกตะกอน โดยนำซิลิกาเจลมาแยกขนาดอนุภาคด้วยซีฟ (sieve) และทำการแยกเหลือออกด้วยวิธีการรีฟลักซ์ด้วยกรด จากนั้นนำมาบดให้เป็นผงและผสมเข้ากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วนำกรดมาหยดเพื่อให้เกิดการตกตะกอนและล้างทำให้แห้ง พบว่านาโนซิลิกาที่ได้มีขนาดอนุภาคเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 นาโนเมตร และมีรูปร่างเป็นทรงกลม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์นาโนซิลิกาจากโซเดียมซิลิเกตด้วยวิธีการฟริซิฟิเทดซิลิกา โดยมีการควบคุมน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกต และค่า pH ของสารละลายเพื่อให้ได้ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโน

พอลิแล็กติกแอซิด สังเคราะห์ขึ้นจากกรดอัลฟาไฮดรอกซี หน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์ของพอลิแล็กติกแอซิด คือ กรดแล็กติก หรือมีชื่อทางเคมีคือ 2-ไฮดรอกซีโพรพิโอเนอิกแอซิด สามารถผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลีหรืออ้อย จึงนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตในอุตสาหกรรมใช้งานของพอลิแล็กติกแอซิดจำกัดอยู่ในวงการแพทย์ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตสูง หาได้ยากและพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้มีสมบัติเชิงกลต่ำ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ ที่ช่วยให้สามารถผลิตพอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในเชิงพาณิชย์ขึ้นได้

จากงานวิจัย Pilic และคณะ [28] ได้ทำการเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดผสมเข้ากับอนุภาคนาโนไฮโดรฟอบิกซิลิกาที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนไฮโดรฟอบิกซิลิกาต่อสมบัติต่างๆ จากผลการทดสอบ SEM พบว่าอนุภาคนาโนไฮโดรฟอบิกซิลิกามีลักษณะสีขาว มีรูปร่างทรงกลม

อัตราการผสมอนุภาคนาโนไฮโดรโฟบิกซิลิกาที่ 1% พบว่ามีการกระจายตัวที่ดีที่สุด อัตราการผสมอนุภาคนาโนไฮโดรโฟบิกซิลิกาที่มากกว่า 1% พบว่าเกิดการรวมกลุ่มก้อนเป็นคลัสเตอร์ (cluster) ส่งผลให้พื้นผิวของคอมพอสิตไม่เรียบและมีช่องว่างเกิดขึ้น จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน DSC พบว่าค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนอนุภาคนาโนไฮโดรโฟบิกซิลิกา 0.2 และ 0.5% เนื่องจากที่อัตราส่วนอนุภาคนาโนไฮโดรโฟบิกต่ำกว่าอนุภาคนาโนไฮโดรโฟบิกซิลิกาสามารถกระจายตัวได้ดีทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้น้อยจึงทำให้มีอุณหภูมิคล้ายแก้วสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนไฮโดรโฟบิกซิลิกาพบว่าค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของคอมพอสิตมีค่าที่ลดลงเนื่องจากเกิดการกระจายตัวไม่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างสายโซ่จำนวนมากส่งผลให้เกิดการขยับของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ง่ายจึงทำให้มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วต่ำลง จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าค่าความทนแรงดึง มีค่าเพิ่มสูงสุดที่อัตราการผสมอนุภาคนาโนไฮโดรโฟบิกซิลิกา 0.2% และเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนไฮโดรโฟบิกซิลิกาพบว่าค่าความทนแรงดึงมีค่าลดลง เนื่องจากผลของการกระจายตัวของซิลิกาที่ทำให้เกิดช่องว่างภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้เกิดรอยแตกขึ้นได้ง่ายทำให้ค่าความทนแรงดึงมีค่าลดลง

เซลลูโลส เป็นองค์ประกอบที่พบมากในวัสดุประเภททิกโนเซลลูโลส สามารถพบได้ในส่วนของผนังเซลล์ของพืช และแบคทีเรียบางชนิด อยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ปริมาณที่พบแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและส่วนของพืช เช่น เนื้อไม้พบประมาณร้อยละ 40-50 และเส้นใยฝ้ายพบประมาณร้อยละ 89 เซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ เบต้า-D-กลูโคไพราโนส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า1,4-ไกลโคซิดิก เกิดเป็นพอลิเมอร์กลูแคน มีความยาวตามธรรมชาติประมาณ 10,000 หน่วย ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยโครงสร้างการจัดเรียงตัวของเซลลูโลสประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ซึ่งทั้งสองสัดส่วนจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของพืชแต่ละประเภท

จากงานวิจัย Kowalczyk และคณะ [29] ได้ทำการเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดผสมเข้ากับเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์และเซลลูโลสขนาดไซค์มาตรฐาน และขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป จากผลการทดสอบ SEM ของเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์และเซลลูโลสขนาดไซค์มาตรฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 10 ถึง 17 ไมโครเมตร ผลการทดสอบ SEM ของคอมพอสิตพบว่าเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์และเซลลูโลสขนาดไซค์มาตรฐานมีการกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน TGA พบว่าคอมพอสิตมีอุณหภูมิที่สูงกว่า 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป การเติมเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์และเซลลูโลสขนาดไซค์มาตรฐานที่ 2% ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด แต่ที่การเติมเซลลูโลสขนาดไซค์มาตรฐานที่ 20% พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดลดลง 10 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ได้มีการปรับปรุง

จากงานวิจัย Awal และคณะ [30] ได้ทำการเตรียมพอลิเล็กทริกแอซิดผสมเข้ากับเซลลูโลสโดยมีการเปรียบเทียบระหว่างคอมพอสิตที่มีการเติมและไม่เติมสารปรับปรุงพื้นผิวไบโอออดีไมด์ เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ จากผลการทดสอบค่าความทนแรงดึงของคอมพอสิตที่มีการเติมและไม่เติมสารปรับปรุงพื้นผิวไบโอออดีไมด์ลงไปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงกับพอลิเล็กทริกแอซิดที่ไม่ได้มีการเติมสารเติมแต่งใดๆ อีกทั้งยังพบว่ามีการเติมสารปรับปรุงพื้นผิวไบโอออดีไมด์ลงไปยังคอมพอสิตทำให้ได้ค่าความทนแรงดึงที่สูงกว่าคอมพอสิตที่ไม่ได้เติมสารปรับปรุงพื้นผิวไบโอออดีไมด์ลงไป เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างเซลลูโลสและไบโอออดีไมด์ ทำให้เกิดการเชื่อมยึดติดระหว่างพอลิเล็กทริกแอซิดและเซลลูโลสที่ดีขึ้น จากผลการทดสอบค่าความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตที่มีการทำรอยบากและไม่มีการทำรอยบากพบว่าชิ้นงานที่ไม่มีการทำรอยบากมีค่าความทนแรงกระแทกที่สูงกว่าชิ้นงานที่มีการทำรอยบาก เนื่องจากชิ้นงานที่ไม่มีการทำรอยบากสามารถที่จะดูดซับพลังงานได้สูงกว่าหรือสามารถที่จะป้องกันและขัดขวางน้ำหนักของแรงได้ดีกว่า ต่อมาเมื่อพิจารณาค่าความทนแรงกระแทกของชิ้นงานที่มีการทำรอยบากพบว่า พอลิเล็กทริกแอซิดที่ไม่มีการปรับปรุงใดๆ มีค่าความทนแรงกระแทก ที่ 23 J/m ส่วนคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลสและมีการเติมและไม่เติมสารไบโอออดีไมด์ลงไปพบว่ามีค่าความทนแรงกระแทกที่ 30 J/m และ 24 J/m ตามลำดับ พบว่าคอมพอสิตที่มีการเติมสารปรับปรุงพื้นผิวไบโอออดีไมด์ลงไปมีค่าความทนแรงกระแทกที่สูงกว่าคอมพอสิตที่ไม่ได้มีการเติมสารปรับปรุงพื้นผิวไบโอออดีไมด์ลงไป เนื่องจากการเติมสารปรับปรุงพื้นผิวไบโอออดีไมด์ลงไปทำให้การยึดติดระหว่างเซลลูโลสและพอลิเล็กทริกแอซิดดีขึ้น โดยสารไบโอออดีไมด์จะสร้างพันธะที่แข็งแรงระหว่างเซลลูโลสและพอลิเล็กทริกแอซิด จากผลการทดลองทำให้ทราบว่ามีการเติมสารปรับปรุงพื้นผิวไบโอออดีไมด์ลงไปจะทำหน้าที่เหมือนเป็นตัวประสานระหว่างเซลลูโลสและพอลิเล็กทริกแอซิด

ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในคอมพอสิตพอลิเมอร์ โดยธรรมชาติพอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวซึ่งการเสริมแรงให้พอลิเมอร์ก่อให้เกิดเป็นคอมพอสิตที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ทำได้โดยการเติมตัวเติมลงไป ตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบสามารถจำแนกตามลักษณะวัสดุได้แก่ อนุภาคและเส้นใย โดยทั่วไปตัวเติมเสริมแรงทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรงกระทำ ทำให้เมทริกซ์ของพอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง เช่นเดียวกับพอลิเล็กทริกแอซิดเป็นพอลิเอสเทอร์ที่มีสายตรงมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ดังนั้นหากต้องการปรับปรุงสมบัติเชิงกล จำเป็นต้องเลือกตัวเติมเสริมแรงที่สามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่และเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับพอลิเล็กทริกแอซิด จึงนำเซลลูโลส/ซิลิกาคอมพอสิตซึ่งสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับพอลิเล็กทริกแอซิด อีกทั้งยังมีโครงสร้างที่แข็งแรงเหมาะกับการนำมาเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ได้

สารคู่ควบไซเลน คือ สารคู่ควบปฏิกิริยาที่ช่วยปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่งทำหน้าที่เหมือนเป็นสะพานที่เชื่อมระหว่างสองโมเลกุลไว้ โดยโมเลกุลด้านหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับสารเติมแต่งและอีกด้านหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ เมื่อพื้นผิวของสารเติมแต่งถูกปรับปรุงด้วยสารคู่ควบจะช่วยลดแรงดึงผิวของสารเติมแต่งหรือเปลี่ยนพื้นผิวของสารเติมแต่งจากเดิมที่มีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิกเป็นไฮโดรโฟบิก ทำให้สามารถเข้ากับพอลิเมอร์ ซึ่งไม่เพียงช่วยให้การผสมเกิดได้ดีขึ้น แต่ยังช่วยปรับปรุงสมบัติโดยรวมของคอมพอสิตอีกด้วย

จากงานวิจัย Thakur และคณะ [31] ได้ทำการเตรียมเซลลูโลสปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการเมอร์เซอร์ไรเซชัน (mercerization) และการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน จากผลการทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยา SEM พบว่าเซลลูโลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าเกิดการกำจัดออกของ impurity, wax และ hemi-cellulose ของเส้นใย และจากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน TGA พบว่าเซลลูโลสที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ดีขึ้น กว้างขึ้น อีกทั้งอุณหภูมิสุดท้ายในการสลายตัวของเซลลูโลสที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน ที่ 491 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิสุดท้ายในการสลายตัวของเซลลูโลสที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวที่ 480 องศาเซลเซียส

จากงานวิจัย dos Santos และคณะ [32] ได้ทำการเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดผสมเข้ากับเซลลูโลสชนิดไมโครคริสตัลเซลลูโลสและเซลลูโลสนาโนคริสตัลด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย ซึ่งจะสามารถลดการเกิดการสลายตัวขณะหลอมเหลว จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าเซลลูโลสนาโนคริสตัลมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าไมโครคริสตัลเซลลูโลส เนื่องจากเซลลูโลสนาโนคริสตัลมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าไมโครคริสตัลเซลลูโลสทำให้เกิดการกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์พอลิแล็กติกแอซิด ไม่เกิดการรวมกลุ่มกันของเซลลูโลสนาโนคริสตัล และเซลลูโลสนาโนคริสตัลมีปริมาณความเป็นผลึกสูงกว่า จึงทำให้ได้ค่าความทนแรงดึงที่สูงกว่าไมโครคริสตัลเซลลูโลส

จากงานวิจัย Robles และคณะ [33] ได้ทำการเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดผสมเข้ากับเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนและเซลลูโลสนาโนคริสตัลที่มีการปรับปรุงด้วยกรดไขมัน จากผลการทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยา SEM พบว่าคอมพอสิตที่ผสมด้วยเซลลูโลสนาโนคริสตัลปรับปรุงด้วยกรดไขมันมีอันตรกิริยาที่ดีกว่าคอมพอสิตที่ผสมด้วยเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ เนื่องจากเกิดเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลสที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวใดๆ ทำให้ทราบว่า การปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนและกรดไขมันจะเกิดพันธะที่แข็งแรงกว่า จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตพบว่าเกิดการลดลงของค่าสมบัติเชิงกล เนื่องจากเกิดการรวมกลุ่มกันของฟิลเลอร์ ทำให้เกิดการส่งผ่านแรงระหว่างเมทริกซ์และฟิลเลอร์ต่ำลง จึงก่อให้เกิดโครงสร้างแบบเปราะที่มากขึ้น จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน DSC พบว่าการเปลี่ยนแปลง

ของค่าอุณหภูมิล้ำยแก้วไม่มีนัยสำคัญ อุณหภูมิการเกิดผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าปริมาณผลึกของเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นสายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่รอบผลึกได้

จากงานวิจัย Lv และคณะ [34] ได้ทำการเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดผสมเข้ากับแป้งและผงไม้เพื่อศึกษากลไกการย่อยสลายและผลของการเติมฟิลเลอร์ที่มีต่อการย่อยสลาย จากผลการทดสอบน้ำหนักที่หายจากการย่อยสลายและลักษณะทางกายภาพพบว่าก่อนการย่อยสลายพื้นผิวของพอลิแล็กติกแอซิดเรียบและมีสีเป็นเนื้อเดียวกัน ภายหลังจากการย่อยสลาย 60 วันพบว่าเกิดจุดบนพื้นผิวของพอลิแล็กติกแอซิดและมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่หายไป การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีนัยสำคัญทำให้เกิดการไฮโดรไลซิสที่ช้า แต่เมื่อพิจารณาคอมพอสิตพบว่าอัตราการย่อยสลายเกิดการลดลงของน้ำหนักมากกว่า เนื่องจากความเป็นไฮโดรฟิลิกของแป้งและผงไม้สามารถทำให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และแป้งเป็นเหมือนแหล่งผลิตกลูโคสที่ใช้สำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เมื่อเปรียบเทียบฟิลเลอร์ระหว่างแป้งกับผงไม้พบว่าผงไม้สามารถเกิดไฮโดรไลซิสมากกว่าเนื่องจากความเป็นผลึกของเซลลูโลสที่สูงและการแตกออกของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสมีพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงทำให้เป็นเหมือนตัวกั้นน้ำหรือจุลินทรีย์ที่จะเข้าไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์

จากงานวิจัย Lv และคณะ [35] ได้ทำการเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดผสมเข้ากับแป้งและผงไม้เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของคอมพอสิตทั้งก่อนและหลังย่อยสลาย จากผลการทดสอบ FTIR-ATR พบว่าเส้นสเปกตรัมของคอมพอสิตเหมือนกันไม่เกิดเลื่อนตำแหน่งหรือเกิดเส้นสเปกตรัมเส้นใหม่แสดงให้เห็นว่าไม่เกิดผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงานขณะเกิดกระบวนการย่อยสลายอย่างช้าๆ ถึงแม้ว่าจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นสเปกตรัมภายหลังจากการย่อยสลาย แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของค่า intensity ของเส้นสเปกตรัม ในช่วงเส้นสเปกตรัม 2995-2850 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันมีเทน (-CH-) ของสายโซ่อัลคิล แต่ปกติโดยทั่วไปแล้วสารอินทรีย์ทุกชนิดจะประกอบไปด้วยโครงสร้าง -CH- เกือบทั้งหมด อย่างไรก็ตามค่า intensity ของสเปกตรัม 2995-2850 cm^{-1} ลดลง เนื่องจากสายโซ่อัลคิลที่ยาวของพอลิแล็กติกแอซิด แป้ง และผงไม้เกิดการถูกตัดสายโซ่ ที่ตำแหน่งสเปกตรัม 1750 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน C=O เกิดการลดลงของค่า intensity เมื่อเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดที่หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ในสายโซ่โมเลกุลขนาดยาว ค่า intensity ที่ตำแหน่งสเปกตรัม 1455 cm^{-1} แสดงถึง asymmetric หมู่ฟังก์ชัน $-\text{CH}_3$ มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการย่อยสลายตัวเพิ่มขึ้น ที่ตำแหน่ง 1084 และ 1040 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน C-O ของ $-\text{O}-\text{C}=\text{O}$ มีค่า intensity ที่ลดลง เนื่องจากเกิดการย่อยสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดอีกครั้งที่หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ ที่ตำแหน่ง 856 cm^{-1} แสดงถึงหมู่

ฟังก์ชัน C-C ค่า intensity ไม่ลดลง เนื่องจากสายโซ่ระหว่างคาร์บอนไม่เกิดการขาดออกภายในโมเลกุล และที่ตำแหน่ง $3100, 3500 \text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของแป้งและผงไม้ พบว่าลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงการเกิดการย่อยสลายของแป้งและผงไม้ในคอมพอสิต



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย

- 3.1.1 ศึกษา ค้นคว้าทฤษฎี และสืบค้นข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2 วางแผนการดำเนินงานวิจัย กำหนดขั้นตอนและวิธีการทดลอง
- 3.1.3 เตรียมวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง
- 3.1.4 ศึกษาและอบรมการใช้เครื่องมือขึ้นรูปและเครื่องมือทดสอบ
- 3.1.5 สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาด้วยวิธีการตกตะกอน
- 3.1.6 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของนาโนซิลิกา
- 3.1.7 เตรียมเซลล์ลูโลสเจล
- 3.1.8 เตรียมและตัดแปรรูปแผ่นฟิล์มอนุภาคเซลล์ลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต
- 3.1.9 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคเซลล์ลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต
- 3.1.10 เตรียมมาสเตอร์แบตช์พอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลล์ลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ จากนั้นเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลล์ลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตจากมาสเตอร์แบตช์ที่อัตราส่วนต่างๆ
- 3.1.11 ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลล์ลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต
- 3.1.12 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล ลักษณะสัณฐานวิทยา ของพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลล์ลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตภายหลังจากการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน
- 3.1.13 เตรียมขึ้นรูปชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลล์ลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน
- 3.1.14 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติการย่อยสลายตัวด้วยวิธีการฝังกลบ ลักษณะสัณฐาน สมบัติการดูดซึมน้ำ ทดสอบพิสจูมเอกลักษณะด้วยเทคนิค FTIR ของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลล์ลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ภายหลังจากการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน
- 3.1.15 วิเคราะห์ สรุปผล และจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบ/สารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต/ประเทศ
พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA)	4023D	Nature Works Company/ ประเทศ USA
ผ้าฝ้าย (cotton)	-	Laboratory/ประเทศไทย
โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate)	commercial grade	Local supplier/ประเทศไทย
เฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน (hexadecyl trimethoxysilane)	-	Evonik/ประเทศเยอรมัน
กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid)	เกรด AR	QRëC/ประเทศนิวซีแลนด์
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) ชนิดเกล็ด	เกรดอุตสาหกรรม	Local supplier/ประเทศไทย
ยูเรีย (urea)	เกรดอุตสาหกรรม	ประเทศจีน
กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid)	เกรด AR	QRëC/ประเทศนิวซีแลนด์
ความเข้มข้นร้อยละ 37		
เมทานอล (methanol)	เกรดอุตสาหกรรม	Local supplier/ประเทศไทย
น้ำกรอง (Water filter)	-	Laboratory/ประเทศไทย
ดินปุ๋ย	-	ยี่ห้อนางสีดา/ประเทศไทย

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

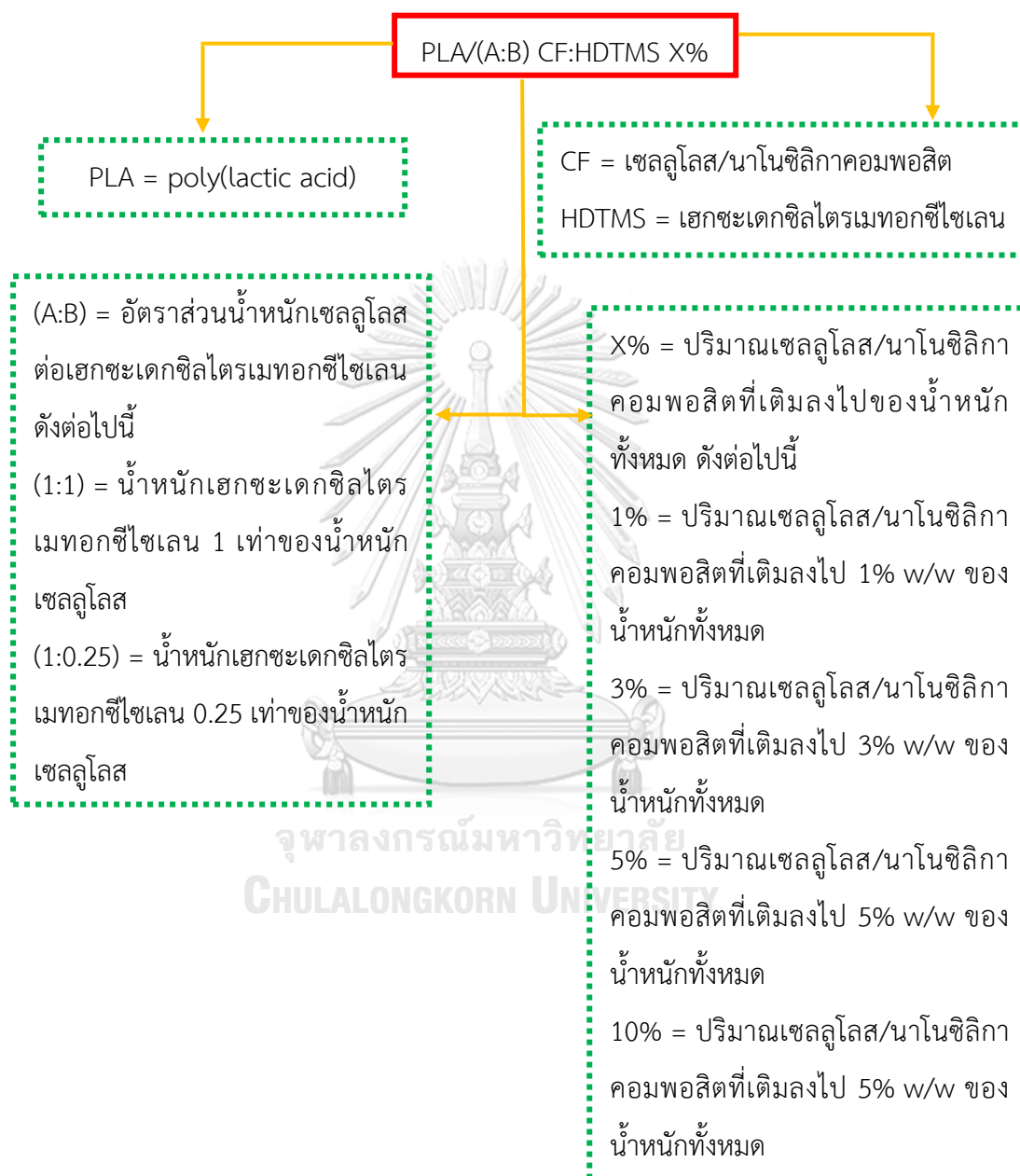
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต/รุ่น
ตู้อบ (hot air oven)	Memmert รุ่น UNB 400
เครื่องชั่งดิจิทัลทศนิยมสองตำแหน่ง (digital balance)	Mettler Toledo รุ่น AB204-S/FACT
เครื่องชั่งดิจิทัลทศนิยมสี่ตำแหน่ง (digital balance)	Mettler Toledo รุ่น AB204-S/FACT
เครื่องกวนสารแบบใช้ความร้อน (hot plate)	IKA C-MAG HS 7
เครื่องกวนแบบเชิงกล (mechanical stirrer)	IKA LABORTECHNIK
เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (co-rotating twin screw extruder)	Thermo Prism รุ่น DSR-28
เครื่องฉีดขึ้นรูป (injection molding)	Nissei Injection Molding Machine รุ่น NEX80
เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding)	Labtech Engineering รุ่น LP20-b
เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC)	Mettler Toledo รุ่น DSC1/STAR ^e
เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA)	Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC3 ⁺
เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine)	Instron 5566
เครื่องทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก (impact testing machine)	Gotech Testing Machine รุ่น GT-7045-MDH
เครื่องวัดความหนาของฟิล์ม (thickness gage)	Mitutoyo รุ่น digital micrometer
เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR)	Thermo Scientifc รุ่น Nicolet 6700
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)	JEOL รุ่น JSM-6400LV
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM)	Hitachi HT-7700

ดัชนีอักษรย่อ

ในงานวิจัยนี้มีการใช้ดัชนีอักษรย่อเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ ดังนั้นจึงอธิบายอักษรย่อที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ดังต่อไปนี้



ตัวอย่างเช่น neat PLA = พอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ได้มีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต

PLA/(1:1) CF:HSTMS 1% = พอลิแล็กติกแอซิดที่มีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1 เท่าของน้ำหนักเซลลูโลส และมีการเติมลงไป 1% ของน้ำหนักทั้งหมด

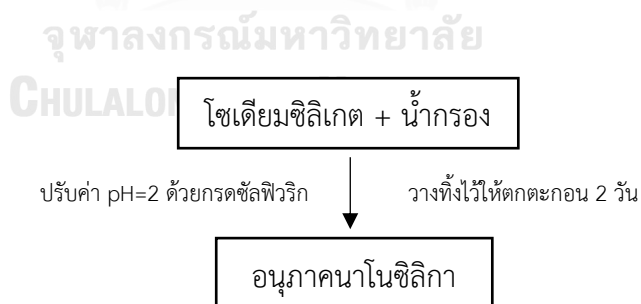
PLA/(1:0.25) CF:HSTMS 1% = พอลิแล็กติกแอซิดที่มีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 0.25 เท่าของน้ำหนักเซลลูโลส และมีการเติมลงไป 1% ของน้ำหนักทั้งหมด

PLA/CF 1% = พอลิแล็กติกแอซิดที่มีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนและมีการเติมลงไป 1% ของน้ำหนักทั้งหมด

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา

ซิงโครเดียมซิลิเกต (50 % w/w) น้หนัก 55 กรัม ละลายด้วยน้ำกรองปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายให้อยู่ในช่วงความเป็นกรดที่มีพีเอช 2 ด้วยกรดซัลฟิวริก (ทดสอบค่าความเป็นกรดเบสด้วยกระดาษลิตมัส) หลังจากนั้นทิ้งไว้ 2 วันเพื่อให้ซิงโครเดียมซิลิเกตเปลี่ยนเป็นอนุภาคนาโนซิลิกา ขั้นตอนวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาแสดงดังรูปที่ 3.1

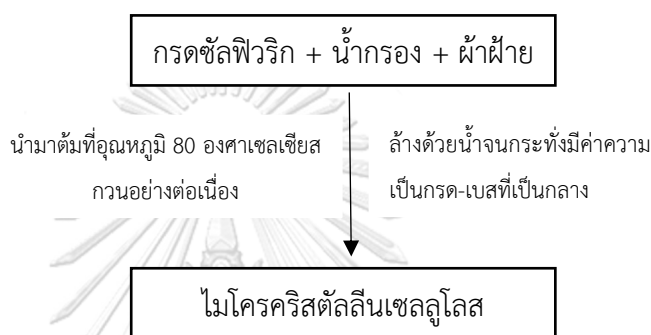


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา

3.4.2 เตรียมเซลลูโลสเจล

3.4.2.1 เตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

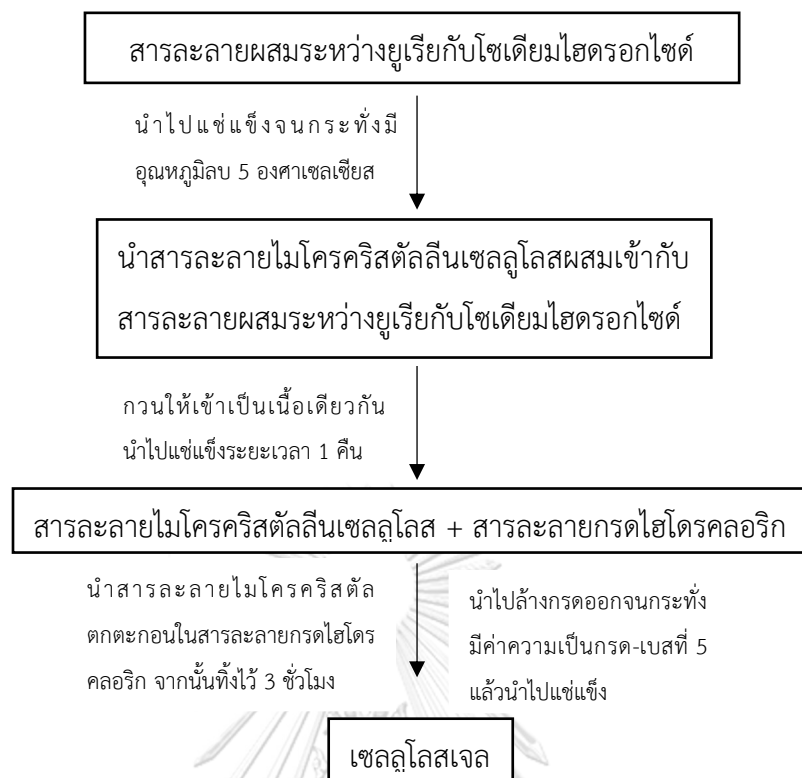
นำผ้าฝ้ายจากเศษผ้ามาตัดให้มีขนาดเล็ก จากนั้นเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก ปริมาตร 72 มิลลิลิตร ผสมเข้ากับน้ำ 928 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายกรดซัลฟิวริก ปริมาตร 700 มิลลิลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสด้วยสภาวะกวนอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นเติมเศษผ้าฝ้ายลงไปยังสารละลายกรดซัลฟิวริก รอจนกระทั่งกรดซัลฟิวริกย่อยเศษผ้าฝ้ายจนหมด จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำจนกระทั่งมีค่าความเป็นกรด-เบสที่เป็นกลาง นำไปอบให้แห้ง แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนเตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส [36]

3.4.2.2 เตรียมเซลลูโลสเจล

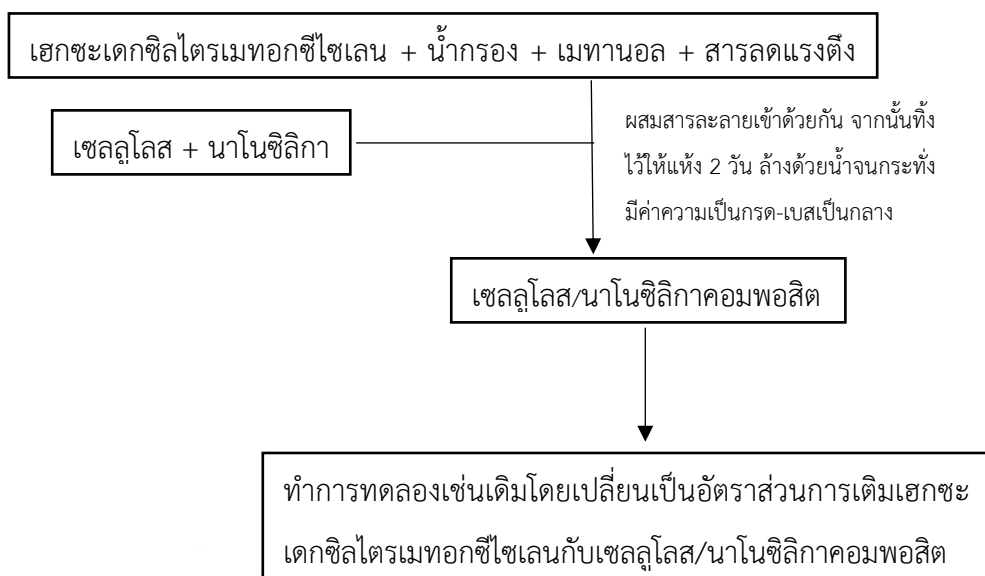
เตรียมสารละลายผสมระหว่างยูเรีย 120 กรัม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 70 กรัม ผสมเข้ากันด้วยน้ำกรอง ปริมาตร 810 มิลลิลิตร จากนั้นกวนสารละลายผสมเข้าด้วยกันแล้วนำไปแช่แข็งด้วยตู้แช่เย็นจนกระทั่งมีอุณหภูมิของสารละลายผสมลบ 5 องศาเซลเซียส จากนั้นชั่งน้ำหนักไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส 43.75 กรัม ผสมเข้ากับสารละลายผสมยูเรียและโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำไปกวนจนกระทั่งผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปแช่แข็งเป็นระยะเวลา 1 คืน จากนั้นนำออกมาจากตู้แช่แข็งเพื่อละลายน้ำแข็งแล้วนำไปกวนอีกครั้งเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ปริมาตร 171.78 มิลลิลิตร เข้ากับน้ำ ปริมาตร 2000 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมาตกตะกอนในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยตั้งแคมป์ ใส่กรวย ค่อยๆ เทสารละลายไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสอย่างช้าๆ จากนั้นทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปล้างกรดออกจนกระทั่งมีค่าความเป็นกรด-เบสที่ 5 แล้วนำไปแช่แข็ง แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมเซลลูโลสเจล [37]

3.4.3 การเตรียมและตัดแปรพื้นผิวอนุภาคเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต

ซึ่งเซลลูโลสผง 200 กรัม จากนั้นเติมอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 ของน้ำหนักเซลลูโลส จากนั้นตัดแปรคอมพอสิตที่ได้ให้มีสมบัติไฮโดรโฟบิกด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน เตรียมเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนในอัตราส่วน 1.0:1.0 ของน้ำหนักเซลลูโลส เติมน้ำกับเมทานอลปริมาตรเท่ากับจำนวนโมลที่เตรียมเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน และ non-ionic surfactant (5 g/L) ปริมาตร 5-10 มิลลิลิตร จากนั้นนำของผสมผสมเข้าด้วยกันแล้วกวนให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปทิ้งไว้ให้แห้ง 2 วัน จากนั้นนำมาล้างให้มีค่าความเป็นกลางด้วยน้ำกรอง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 วัน ทำการทดลองเช่นเดิม เปลี่ยนอัตราส่วนการเติมเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนกับเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต 1.0:0.25 แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต

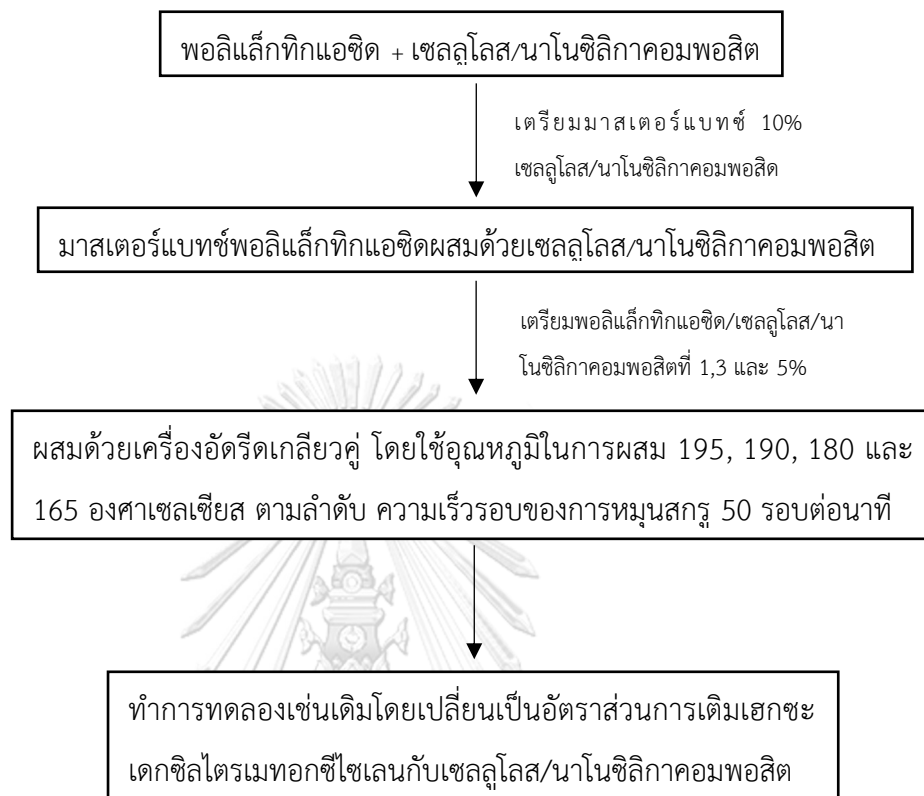
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนการผสมนาโนซิลิกาและเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนในเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต

ตัวอย่าง	อนุภาคนาโนซิลิกา	เฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน
1	ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเซลลูโลสเจล	1.0 เท่าของน้ำหนักเซลลูโลสเจล
2	ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเซลลูโลสเจล	0.25 เท่าของน้ำหนักเซลลูโลสเจล

3.4.4 เตรียมพอลิเล็กทิกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต

ก่อนการเตรียมพอลิเล็กทิกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ต้องนำเม็ดพอลิเล็กทิกแอซิดไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ขั้นตอนการผสมเริ่มต้นจากการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเซลลูโลส/นาโนคอมพอสิต ผสมเข้ากับพอลิเล็กทิกแอซิดด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยใช้อุณหภูมิในการผสม 195, 190, 180 และ 165 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบของการหมุนสกรู 50 รอบต่อนาที จากนั้นนำมาสเตอร์แบทช์ที่ผสมแล้วมาเตรียมผสมใหม่อีกครั้งในสัดส่วน 1, 3, 5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่อุณหภูมิในการผสม 195, 190, 180 และ 165 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบของการหมุนสกรู 50 รอบต่อนาที ทำการทดลองเช่นเดิมโดยเปลี่ยนเป็นอัตราส่วนการเติมเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนกับเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต 0.25:1 และคอนโทรลแบทช์โดยไม่ต้องเติม

เฮกซะเดกซิลไตรเมทอกซีไซเลน ที่อุณหภูมิในการผสม 195, 190, 180 และ 165 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบของการหมุนสกรู 50 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต



รูปที่ 3.6 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับมาสเตอร์แบทช์

คอมพอลสิต	พอลิแล็กติกแอซิด (กรัม)	มาสเตอร์แบทช์ (กรัม)
neat PLA	-	-
PLA/(1.0:1.0) CF:HDTMS 1%	1350	150
PLA/(1.0:1.0) CF:HDTMS 3%	1050	450
PLA/(1.0:1.0) CF:HDTMS 5%	750	750
PLA/(1.0:1.0) CF:HDTMS 10%	-	1500
PLA/(1.0:0.25) CF:HDTMS 1%	1350	150
PLA/(1.0:0.25) CF:HDTMS 3%	1050	450
PLA/(1.0:0.25) CF:HDTMS 5%	750	750
PLA/(1.0:0.25) CF:HDTMS 10%	-	1500
PLA/CF1%	1485	15

3.4.5 ฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลสิต

ก่อนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานนำคอมพอลสิตไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่ 65 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอลสิตของพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลสิตด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปของบริษัท Nissei Injection Molding Machine รุ่น NEX80 แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการฉีดคอมพอลสิต 195/190/190/190/170/30 องศาเซลเซียส ตามลำดับความเร็วรอบของการหมุนสกรู 80 รอบต่อนาที แม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดแสดงดังรูปที่ 3.8 และ รูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 เครื่องฉีดขึ้นรูปของบริษัท Nissei Injection Molding Machine รุ่น NEX80



รูปที่ 3.8 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดยื่นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล



รูปที่ 3.9 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดยื่นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบความทนแรงกระแทก

3.4.6 เตรียมชิ้นรูปชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน

ก่อนการขึ้นรูปฟิล์มนำคอมพอสิตไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่ 65 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตในลักษณะแผ่นด้วยเครื่องอัดของบริษัท Labtech Engineering รุ่น LP20-b แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยใช้แม่แบบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร ความกว้าง 10 เซนติเมตร ความยาว 10

เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.11 โดยเริ่มการชั่งคอมพอสิตปริมาณ 4 กรัม โดยภาวะที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปฟิล์มแสดงดังแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.10 เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนยี่ห้อ Labtech Engineering รุ่น LP20-b



รูปที่ 3.11 แม่แบบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ตารางที่ 3.5 สภาวะที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรูปด้วยความร้อน

อุณหภูมิที่ใช้ตลอดการทำงาน	160 องศาเซลเซียส
ความดัน	15 เมกะปาสคาล
ระยะเวลาในการหลอมสาร (Pre-heating)	60 วินาที
ระยะเวลาในการกดอัดเพื่อกำจัดฟองอากาศต่อ ครั้ง (Venting)	60 วินาที
จำนวนครั้งในการกดอัดเพื่อกำจัดฟองอากาศ Venting	3 ครั้ง
ระยะเวลาในการกดอัด (Final)	60 วินาที
ระยะเวลาในการลดอุณหภูมิ (Cooling)	600 วินาที

3.4.7 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของนาโนซิลิกา

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Trans Electron Microscope, TEM) ของบริษัท FEI TECNAI รุ่น T20 G² แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่อง Trans Electron Microscope บริษัท FEI TECNAI รุ่น T20 G²

3.4.8 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตและตัดแปรด้วยสารออร์แกโนไซเลน

3.4.8.1 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6400LV ดังแสดงในรูปที่ 3.13 การเตรียมตัวอย่างก่อนนำมาวิเคราะห์ต้องนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จึงนำมาเคลือบด้วยทองผ่านเครื่อง Sputter-coater ที่มีศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า และ 7,000 เท่า

3.4.8.2 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตตัดแปรด้วยสารออร์แกโนไซเลน

การศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตตัดแปรด้วยสารออร์แกโนไซเลนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยใช้เทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6400LV แสดงดังรูปที่ 3.13 การเตรียมตัวอย่างก่อนนำมาวิเคราะห์ต้องนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จึงนำมาเคลือบด้วยทองผ่านเครื่อง Sputter-coater ที่มีศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ โดยใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า และ 3,000 เท่า



รูปที่ 3.13 เครื่อง Scanning Electron Microscope บริษัท JEOL รุ่น JSM-6400LV

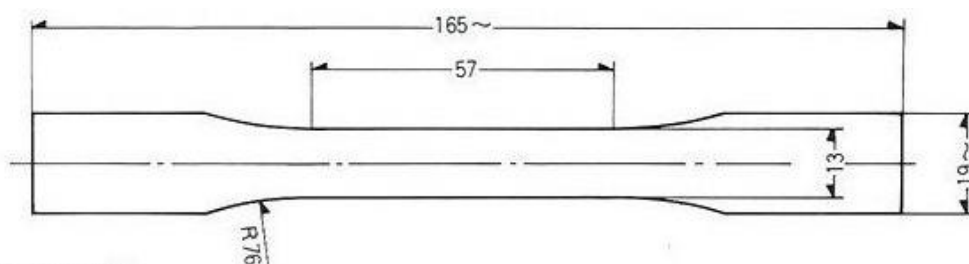
3.4.9 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของพอลิเอทิลีนกึ่งผลึกด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตภายหลังจากการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน

3.4.9.1 การทดสอบความทนแรงดึง

การทดสอบความทนแรงดึง (ensile strength) ยังสัมพันธ์กับ (Young's modulus) และความยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) ของชิ้นงานดัมเบลล์ที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยเครื่องยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) ของบริษัท Instron รุ่น 5566 แสดงดังรูปที่ 3.14 โดยขนาดชิ้นงานรูปดัมเบลล์ที่ใช้ในการทดสอบมีความกว้าง 1.9 เซนติเมตร ความยาว 16.5 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.15 ภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ ใช้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน ใช้อัตราเร็วในการดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะที่วัดการยืดออก (gauge length) 5.7 เซนติเมตร



รูปที่ 3.14 เครื่องยูนิเวอร์แซล บริษัท Instron รุ่น 5566



รูปที่ 3.15 ลักษณะตัวอย่างชิ้นงานดัมเบลล์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.4.9.2 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์จากชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องดีพีเฟอเวียสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry, DSC) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น DSC/STAR^c แสดงดังรูปที่ 3.16 โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_{cc}) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (melting temperature, T_m) และปริมาณผลึก (degree of crystallinity, X_c) ภายใต้การให้ความร้อน-ทำให้เย็นตัว (heating-cooling) ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง 180 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการทำให้เย็นตัว 1 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ปริมาณผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

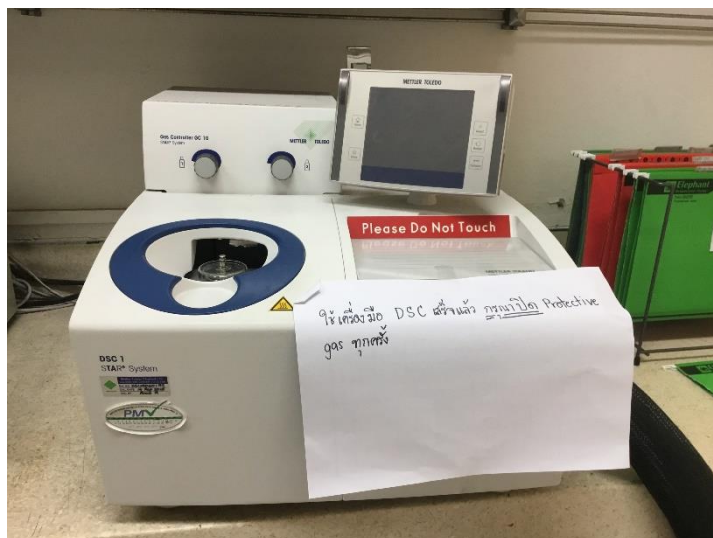
$$X_c = \left(\frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_{(100\%)}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ ΔH_m คือเอนทาลปีของการหลอมผลึกอย่างสมบูรณ์ขณะให้ความร้อน มีหน่วยเป็น จูล/กรัม

ΔH_{cc} คือเอนทาลปีของการเกิดผลึกเย็นขณะให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง มีหน่วยเป็น จูล/กรัม

$\Delta H_{(100\%)}$ คือเอนทาลปีของการหลอมผลึกอย่างสมบูรณ์ของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ มีหน่วยเป็น จูล/กรัม โดยเป็นค่าคงที่คือ 93 จูล/กรัม

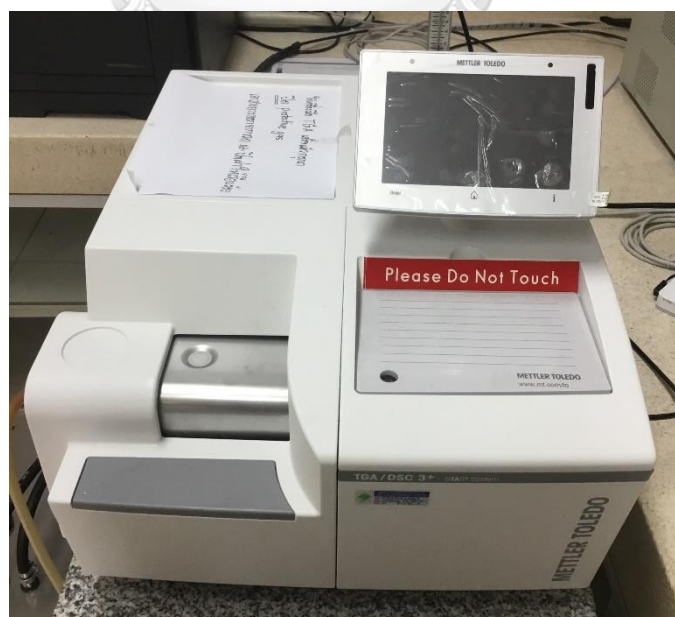
\emptyset คืออัตราส่วนของน้ำหนักเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลิเมอร์ที่เติมลงไป ในคอมพอลิเมอร์



รูปที่ 3.16 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry บริษัท Mettler Toledo รุ่น DSC/STAR[®]

3.4.9.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของคอมพอลิเมอร์ภายใต้ความร้อน

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของคอมพอลิเมอร์จากชิ้นงานที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปภายใต้ความร้อน ด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric Analyzer, TGA) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC3⁺ แสดงดังรูปที่ 3.17 โดยทดสอบคอมพอลิเมอร์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียส ถึง 650 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



รูปที่ 3.17 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) บริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC3⁺

3.4.9.4 การทดสอบความทนแรงกระแทก

การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength) ของชิ้นงานคอมพอสิตด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (Izod Impact Strength) ของบริษัท Gotech Testing Machine รุ่น GT-7045-MDH แสดงดังรูปที่ 3.18 โดยชิ้นงานทดสอบจะเป็นแท่งยาว มีพื้นที่หน้าตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และมีรอบบากอยู่บริเวณตรงกลางเป็นรูปตัว V หรือ U จะวางชิ้นงานทดสอบในแนวตั้งฉากและให้หัวค้อนกระแทกบริเวณด้านที่มีรอบบาก โดยหัวค้อนที่ใช้มีขนาด 1J (hammer 01)



รูปที่ 3.18 เครื่องทดสอบแรงกระแทก บริษัท Gotech Testing Machine รุ่น GT-7045-MDH

3.4.9.5 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตภายหลังจากการทดสอบความทนแรงกระแทก

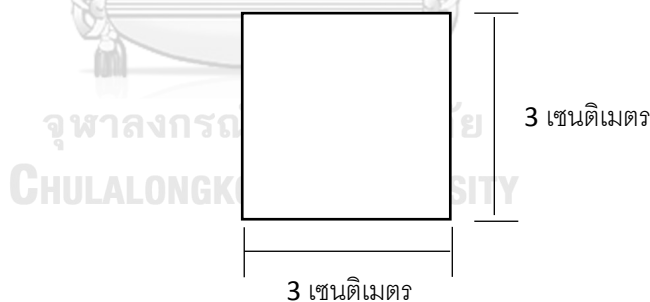
การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตภายหลังจากการทดสอบความทนแรงกระแทกเพื่อดูลักษณะพื้นผิวบริเวณรอยแตกออกของชิ้นงานตัวอย่าง โดยดูการกระจายตัวของเซลลูโลส/นาโนซิลิกาในพอลิแล็กติกแอซิดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6400LV การเตรียมตัวอย่างก่อนนำมาวิเคราะห์ต้องนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จึงนำมาเคลือบด้วยทองผ่านเครื่อง sputter-coater ที่มีศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า และ 7,000 เท่า

3.4.10 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกา คอมพอสิตภายหลังจากการอัดขึ้นรูปขึ้นงาน

3.4.10.1 ทดสอบย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ

การทดสอบย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบจะนำชิ้นงานแผ่นฟิล์มที่ได้จากการอัดขึ้นรูปขึ้นงานตัดให้มีขนาดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 3×3 เซนติเมตร และความหนา 0.20 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.19 โดยแต่ละสูตรของคอมพอสิตเตรียมตัวอย่างสูตรละ 3 ตัวอย่างในการทดสอบย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ ความเป็นกรดเบสของดินปุ๋ยอยู่ในช่วง 5-6 เริ่มต้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างแผ่นฟิล์มทุกตัวอย่างก่อนนำไปฝังกลบและกำหนดเป็นน้ำหนักเริ่มต้น (W_0) จากนั้นเตรียมกระบะพลาสติกเติมดินลงไปให้มีความสูง 12 เซนติเมตร จากนั้นวางชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละสูตรลงไป แล้วจึงเติมดินลงไปอีก 5 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.20 การทดสอบย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบนั้น จะทำการรดน้ำทุกวัน วันละ 2,000 มิลลิลิตรอย่างสม่ำเสมอ โดยจะทำการชุดตัวอย่างชิ้นงานขึ้นมาทุกๆ 1 เดือน เป็นระยะเวลา 3 เดือน ในแต่ละเดือนหลังจากชุดขึ้นมาจะทำความสะอาดล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดดินออกจากชิ้นงาน จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักจนกระทั่งน้ำหนักคงที่และกำหนดเป็นน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (W_n) ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบของชิ้นงานแผ่นฟิล์มสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป} = ((W_n - W_0) / W_0) \times 100 \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.19 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ

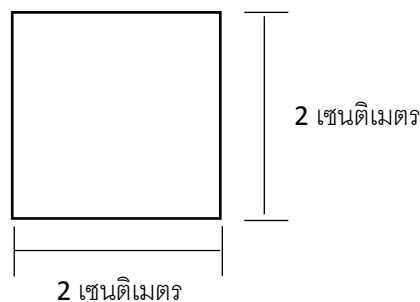


รูปที่ 3.20 กระบะพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ

3.4.10.2 ทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำจะนำชิ้นงานแผ่นฟิล์มที่ได้จากการอัดขึ้นรูปชิ้นงานมา ตัดให้มีขนาดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 2×2 เซนติเมตร และความหนา 0.20 มิลลิเมตร แสดง ดังรูปที่ 3.21 โดยแต่ละสูตรของคอมพอสิตเตรียมตัวอย่างสูตรละ 3 ตัวอย่างในการทดสอบการดูดซึมน้ำ เริ่มต้นนำชิ้นงานแผ่นฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานแผ่นฟิล์มไปชั่งน้ำหนัก และกำหนดเป็นน้ำหนักเริ่มต้น (V_0) แล้วจึงนำชิ้นงานแผ่นฟิล์มไปแช่ในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิห้อง และบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปในระยะเวลา 2 4 6 8 10 30 60 120 180 1440 นาที โดยนำชิ้นงานแผ่นฟิล์มออกมาชั่งน้ำหนักแล้วชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้คือน้ำหนักที่เปลี่ยนไป (V_n) ร้อยละการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = ((V_n - V_0) / V_0) \times 100 \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.21 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ

3.4.10.3 ทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมพอลิเมอร์หลังจากการทดสอบย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมพอลิเมอร์หลังจากการทดสอบย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบเพื่อดูลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง โดยดูการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของชิ้นงานแผ่นฟิล์มหลังจากการฝังกลบเป็นระยะเวลา 3 เดือน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6400LV การเตรียมตัวอย่างก่อนนำมาวิเคราะห์ต้องนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จึงนำมาเคลือบด้วยทองผ่านเครื่อง Sputter-coater ที่มีศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า และ 7,000 เท่า

3.4.10.4 ทดสอบและวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของชิ้นงานแผ่นฟิล์ม

การทดสอบและวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของชิ้นงานแผ่นฟิล์มหลังจากการทดสอบย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ โดยดูหมู่ฟังก์ชันชิ้นงานแผ่นฟิล์มภายในโครงสร้างที่เปลี่ยนไปของพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700 แสดงดังรูปที่ 3.22 ในช่วงเลขคลื่น $400\text{-}3800\text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 3.22 เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ บริษัท Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700

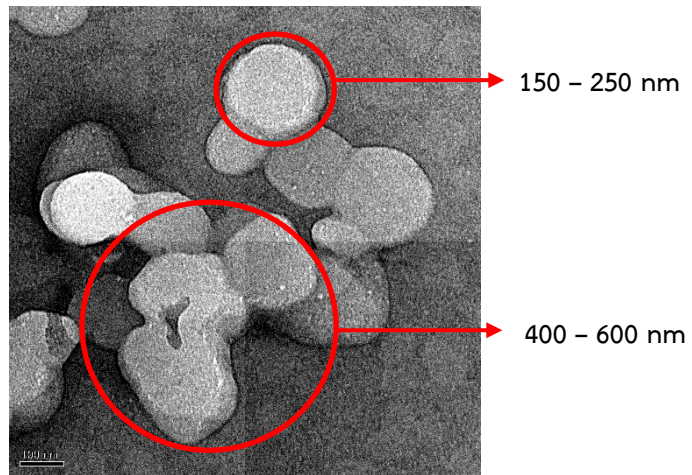
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลของการเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกา

4.1.1 สันฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกา

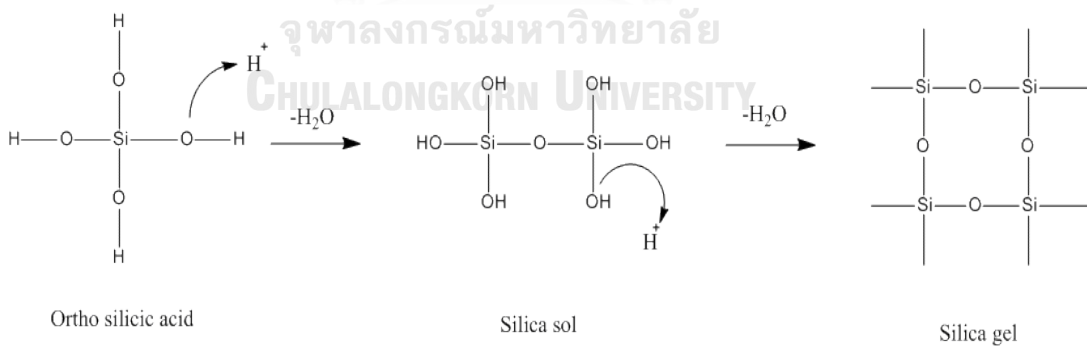
ลักษณะสันฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการตกตะกอนเป็นเวลา 12 วัน แสดงดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 จากสันฐานวิทยาแสดงให้เห็นถึงขนาดอนุภาคของซิลิกาแบบปฐมภูมิ (primary particle) เนื่องจากเป็นขนาดอนุภาคที่เป็นทรงกลมก้อนเดียว และเกิดการรวมตัวแบบรวมกลุ่ม (agglomerate) สอดคล้องกับการสังเกตโดยการยิงแสงเลเซอร์ทะลุผ่าน ซึ่งขนาดอนุภาคแบบรวมกลุ่ม 400-600 นาโนเมตรขึ้นไปจะกระเจิงแสงได้อย่างชัดเจน โดยอนุภาคของซิลิกาแบบปฐมภูมิและแบบรวมกลุ่มมีขนาด 150-250 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ตามลำดับ จากสันฐานวิทยาทำให้ทราบว่าสภาวะที่ดีที่สุดที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา คือ ความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกต 55 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วงต่ำตั้งแต่ 1-2 ที่อุณหภูมิห้อง และปล่อยให้ทิ้งไว้ 2 วันเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาตกตะกอนที่มีขนาดของอนุภาคตามต้องการ โดยเมื่อผ่านไป 2 วัน นำสารละลายนาโนซิลิกาไปส่องผ่านด้วยเลเซอร์ พบว่าแสงเลเซอร์ส่องผ่านสารละลายนาโนซิลิกาได้อย่างชัดเจนไม่เกิดการกระเจิงของลำแสงเลเซอร์ หากทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 12 วันจะทำให้เกิดอนุภาคของซิลิกาเจลขึ้น เมื่อนำไปส่องผ่านด้วยแสงเลเซอร์พบว่า การส่องผ่านของแสงเลเซอร์จะลดลงเกิดการกระเจิงแสงที่มากขึ้น โดยดูจากฉากหลังที่ตั้งรับลำแสงอนุภาคเลเซอร์มีขนาดลำแสงที่เล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายนาโนซิลิกาที่ปล่อยให้ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 2 วันและ 8 วัน โดยรูปที่ 4.3 แสดงสมการเคมีที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา เริ่มต้นเมื่อผสมสารโซเดียมซิลิเกตเข้ากับน้ำให้ความเข้มข้นที่เหมาะสม จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกลงไป กรดซัลฟิวริกจะทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตกลายเป็นกรดอโธซิลิซิก (ortho silicic acid) จากนั้นกรดยังคงทำปฏิกิริยา dehydration บริเวณหมู่ไฮดรอกซิลของกรดซิลิซิก ทำให้เกิดการหลุดออกของโมเลกุลน้ำ ส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อกันของพันธะไฮดรอกซิลกลายเป็นซิลิกาโซล (silica sol) ซึ่งเป็นอนุภาคซิลิกาที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ หากปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปเรื่อยๆ ซิลิกาโซลจะทำปฏิกิริยากันเองกลายเป็นซิลิกาเจล ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการสำหรับงานวิจัยนี้ การเกิดซิลิกาเจลจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกตตั้งนั้นในการทดลองนี้ได้เตรียมความเข้มข้นหลายความเข้มข้น โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกาอยู่ 55 g/L ของ 50 wt% sodium silicate



รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกา



รูปที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายนาโนซิลิกาที่ระยะเวลา 2 วัน, 8 วัน และ 12 วัน



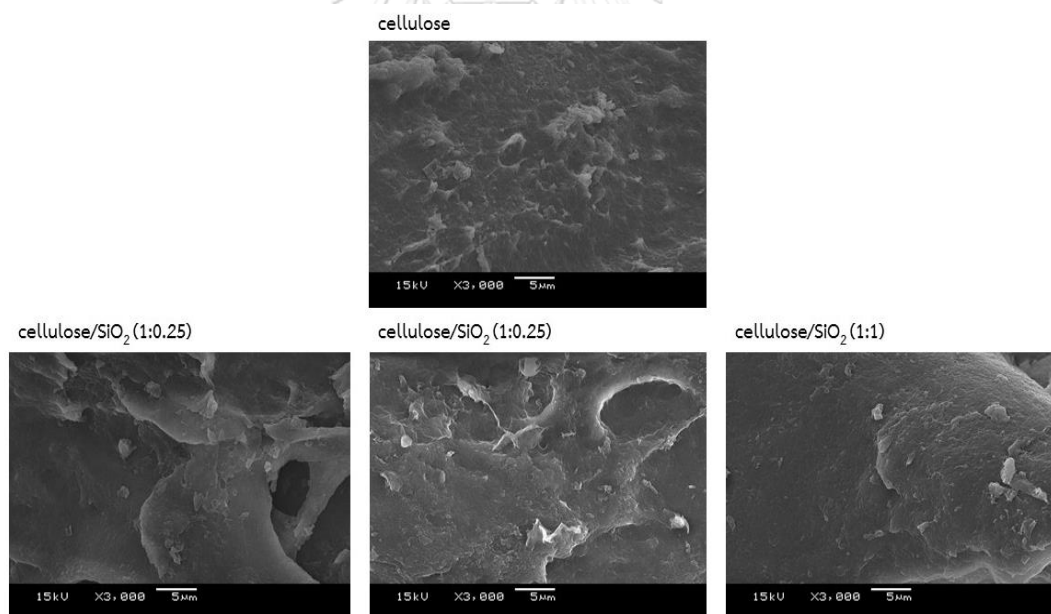
รูปที่ 4.3 สมการเคมีที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา [26]

4.2 ผลการดัดแปรเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตด้วยสารออร์แกโนไซเลน

4.2.1 สัณฐานวิทยาของเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต

ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของเซลลูโลสและเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตแสดงดังรูปที่ 4.4 ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตด้วยวิธีการตกตะกอน โดยเติมนานซิลิการ้อยละ 5 ของน้ำหนักเซลลูโลส ซึ่งจากสัณฐานวิทยาพบว่าเซลลูโลสและเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตมีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกัน โดยก่อนเติมอนุภาคนานซิลิกาพบว่าเซลลูโลสมีลักษณะพื้นผิวแบบต่อเนื่อง แต่ภายหลังจากการเติมอนุภาคนานซิลิกาพบว่าเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตมีลักษณะพื้นผิวที่เปลี่ยนแปลงไป มีลักษณะเป็นก้อนรวมกลุ่มกันเป็นคลัสเตอร์ (cluster) ดังรูปที่ 4.4

ภายหลังจากการผสมเซลลูโลสเข้ากับอนุภาคนานซิลิกาแล้ว ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวของคอมพอสิตด้วยสารออร์แกโนไซเลนที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25, และ 1:1 และไม่ได้เติม จากนั้นนำไปผสมเข้ากับพอลิแล็กติกแอซิด โดยผสมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก



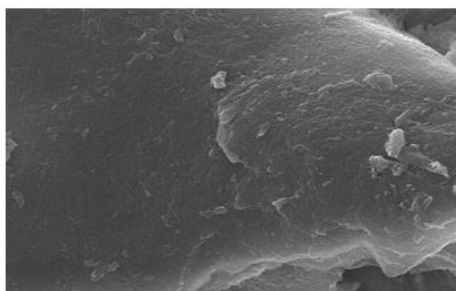
รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของเซลลูโลส (cellulose) และเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต (cellulose/SiO₂)

4.2.2 ลักษณะการกระจายตัวของเซลล์โลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตัดัดแปรด้วยสารออร์แกโนไซเลน

ลักษณะการกระจายตัวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดโหมด EDS ของเซลล์โลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตัดัดแปรด้วยสารออร์แกโนไซเลน ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลล์โลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 และ 1:0.25 แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยบริเวณจุดสีแดงแสดงถึงการกระจายตัวของซิลิกอนอะตอม จากผลการทดลองพบว่าภายหลังจากการเติมนาโนซิลิกาและปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารออร์แกโนไซเลนอัตราส่วนน้ำหนักเซลล์โลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 และ 1:0.25 อนุภาคนาโนซิลิกาสามารถเกิดการกระจายตัวบนเซลล์โลสได้ โดยจากรูป EDS mapping ของซิลิกอนอะตอมซึ่งเป็นธาตุของสารประกอบนาโนซิลิกา จะเห็นได้ว่าจุดสีแดงเกิดการกระจายตัวได้ทั่วซึ่งแสดงถึงอนุภาคนาโนซิลิกาที่ทำการผสมร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเซลล์โลสเข้ากับเซลล์โลสก่อนตัดแปรด้วยสารออร์แกโนไซเลน จึงยืนยันได้ว่าภายหลังจากการเติมนาโนซิลิกาลงไปจะเกิดการกระจายตัวของนาโนซิลิกาบนเซลล์โลส

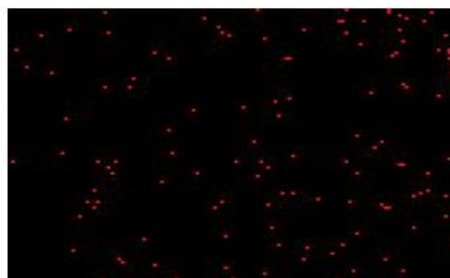
เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลล์โลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 และ 1:0.25 จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลล์โลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 ซิลิกอนอะตอมเกิดการกระจายตัวได้ดีกว่าที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลล์โลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 โดยจะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลล์โลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 ซิลิกอนอะตอมเกิดการรวมกลุ่มกันมากกว่าสังเกตได้จากจุดสีแดงจะมีการกระจายตัวเป็นกลุ่มก้อนที่มากกว่าเมื่อเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเซลล์โลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 เนื่องจากที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลล์โลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 มีปริมาณสารออร์แกโนไซเลนที่มากกว่าจึงทำให้เกิดการกระจายตัวของซิลิกาได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักเซลล์โลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25

1:1 CF :HDTMS



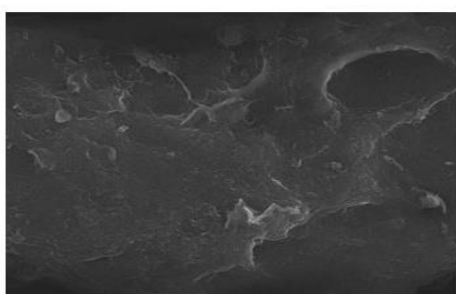
Electron image 1

EDS mapping of 1:1 CF :HDTMS



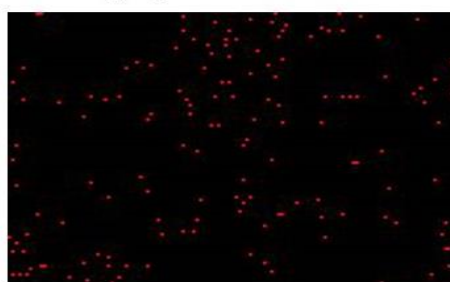
Si Ka1

1:0.25 CF :HDTMS



Electron image 1

EDS mapping of 1:0.25 CF :HDTMS



Si Ka1

รูปที่ 4.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของเซลลูโลสผสมเข้ากับอนุภาคนาโนซิลิกา ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเซลลูโลสและตัดแปรด้วยสารอแกโนไซเลนที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:0.25

4.3 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตภายหลังการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน

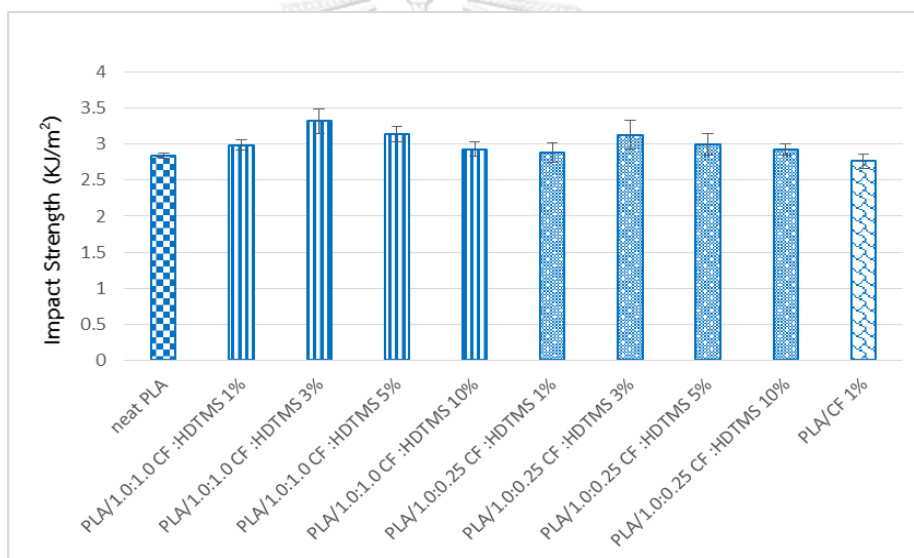
4.3.1 สมบัติเชิงกล

4.3.1.1 ความทนแรงกระแทก

จากผลการวิเคราะห์ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต แสดงดังรูปที่ 4.6 และภาคผนวก ก พบว่าพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าความทนแรงกระแทก 2.75 KJ/m^2 ภายหลังจากการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 ที่ร้อยละต่ำ (1 และ 3 โดยน้ำหนัก) ความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นสูงถึงร้อยละ 17 แต่เมื่อพิจารณาปริมาณการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ร้อยละสูง (5 และ 10 โดยน้ำหนัก) ความทนแรงกระแทกมีค่าลดลง เนื่องจากที่ปริมาณการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตสูงเกิดการรวมกลุ่มกันของเซลลูโลส ซึ่งขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้ค่าความทนแรงกระแทกลดลง เมื่อได้รับแรงจากภายนอกไม่สามารถเกิดการส่งผ่านแรงไปยังพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ จึงทำให้ความทนแรงกระแทกมีค่า

ลดลง แต่เมื่อเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตต์่าไม่ขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่ เมื่อได้รับแรงจากภายนอกสามารถเกิดการส่งผ่านแรงไปยังพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ จึงทำให้ความทนแรงกระแทกมีค่าสูงกว่า

เมื่อพิจารณาชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตต์ที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตต์ที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความทนแรงกระแทกมีค่าลดลง เนื่องจากอัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 และไม่ได้ตัดแปร ทำให้การกระจายตัวของเซลลูโลสเกิดการรวมกลุ่มกันไม่สามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีเหมือนกับอัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 ส่งผลให้เมื่อได้รับแรงจากภายนอกไม่สามารถเกิดการส่งผ่านแรงเมื่อได้รับแรงจากภายนอกได้ จึงทำให้ค่าความทนแรงกระแทกลดลง [30]



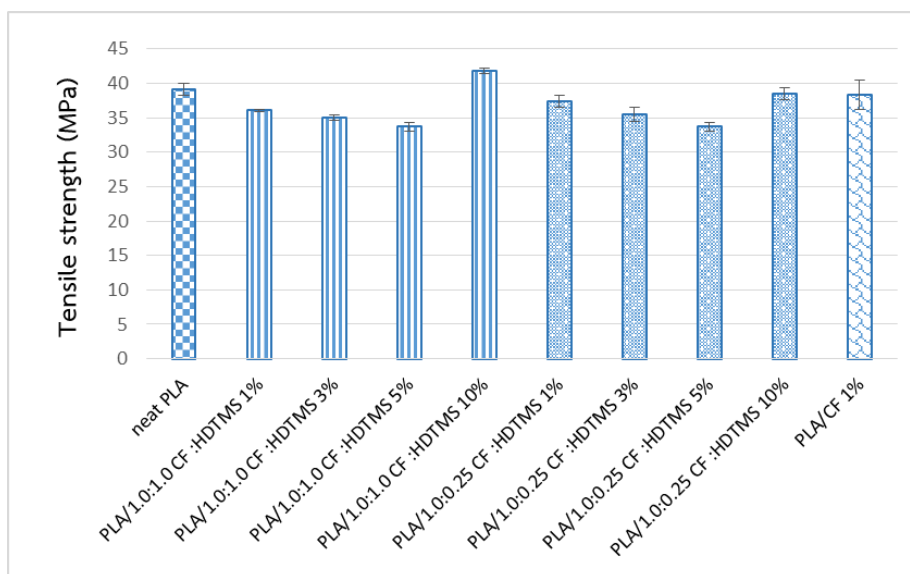
รูปที่ 4.6 ความทนแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตต์ที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตต์ที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

4.3.1.2 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

จากผลการวิเคราะห์การทนแรงดึงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตต์ แสดงดังรูปที่ 4.7 และ ภาคผนวก ก พบว่าความทนแรงดึงของชิ้นงานคอมพอสิตต์เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิด ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 ความทนแรงดึงลดลงร้อยละ 8.18, 11.83 และ 16 เมื่อมีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตต์ร้อยละ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ ชิ้นงานคอมพอสิตต์

อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 ความทนแรงดึงลดลงร้อยละ 4.6, 10.1 และ 16 เมื่อมีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ และชิ้นงานคอมพอสิตที่ไม่ได้เติมเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนมีค่าความทนแรงดึงลดลงร้อยละ 2 เมื่อมีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 1 ซึ่งจากผลการทดสอบความทนแรงดึงคอมพอสิตที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 เตรียมจากมาสเตอร์แบทช์ร้อยละ 10 จากนั้นนำไปผสมใหม่อีกครั้งจึงได้รับความร้อนเนื่องจากการหลอมเหลวจึงเกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงลดลง แต่เมื่อพิจารณาที่ร้อยละการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต 10 อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 และ 1:0.25 พบว่าค่าความทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณการเติมร้อยละ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากคอมพอสิตที่ร้อยละ 10 ถูกนำไปขึ้นรูปโดยตรง ทำให้ลดการเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิแล็กติกแอซิด

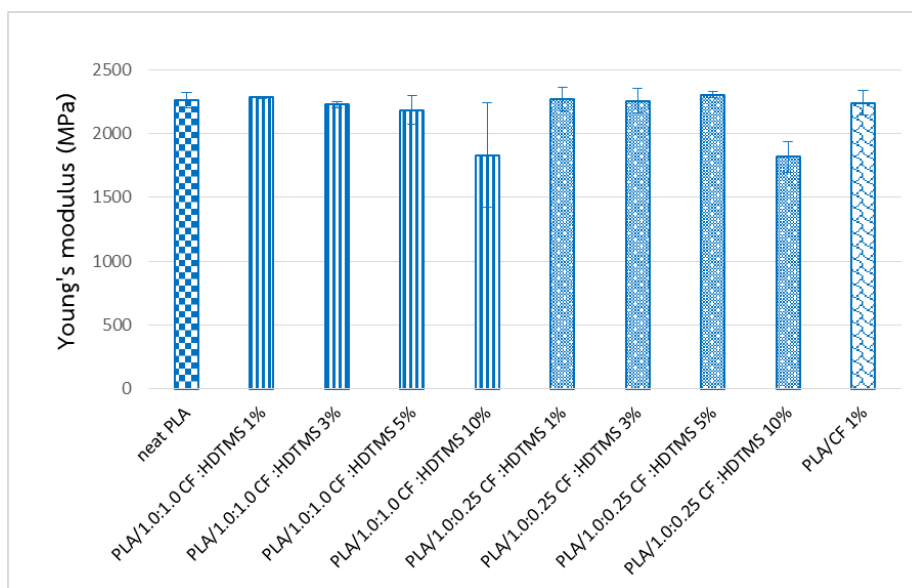
เพราะฉะนั้นค่าความทนแรงดึงของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปร ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่าค่าความทนแรงดึงของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 เกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน ส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงมีค่าลดลงที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเซลลูโลส/อนุภาคนาโนซิลิกามีความสามารถเป็นสารเสริมแรง (reinforcement) ให้กับพอลิแล็กติกแอซิดได้ [33]



รูปที่ 4.7 ความทนแรงดึงของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

4.3.1.3 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus)

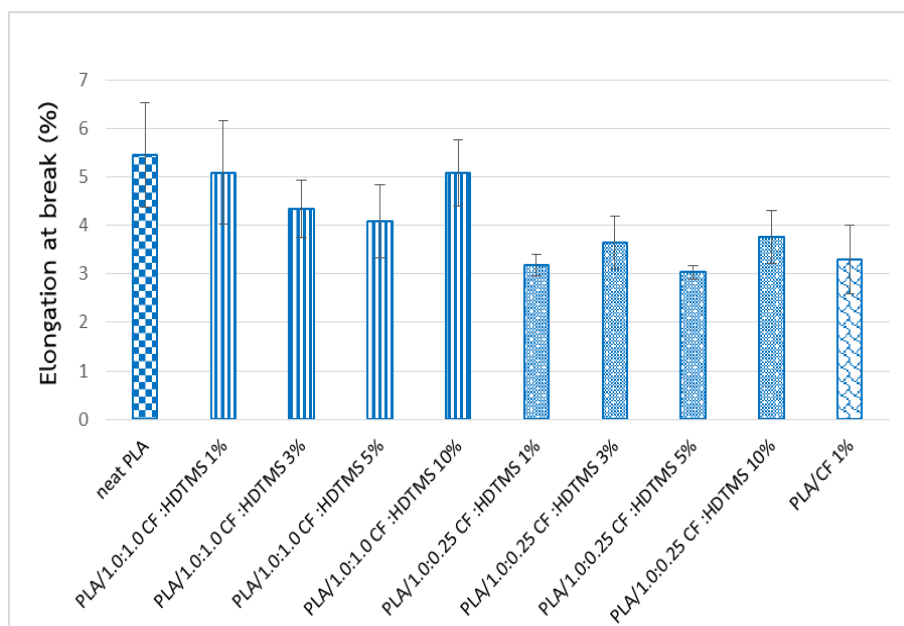
จากผลการวิเคราะห์ห้มอดุลัสของยังของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต แสดงดังรูปที่ 4.8 และภาคผนวก ก ค่ายังส์มอดุลัสคือค่าที่บอกความสามารถในการคงรูปของวัสดุเมื่อได้รับแรงเค้น พบว่าค่ายังส์มอดุลัสของชิ้นงานคอมพอสิตเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิด ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 เพิ่มขึ้นร้อยละ 1 เมื่อมีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 1 จากนั้นค่ายังส์มอดุลัสมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 3, 5 และ 10 โดยมีค่าลดลงร้อยละ 1.5, 3.5 และ 23.5 ตามลำดับ ค่ายังส์มอดุลัสของชิ้นงานคอมพอสิตที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.4 และ 1.9 เมื่อมีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 1 และ 5 จากนั้นค่ายังส์มอดุลัสมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 3 และ 10 โดยมีค่าลดลงร้อยละ 0.2 และ 24.3 ตามลำดับ และค่ายังส์มอดุลัสของชิ้นงานคอมพอสิตที่ไม่ได้เติมเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนมีค่าความทนแรงดึงลดลงร้อยละ 0.9 เมื่อมีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 1 ซึ่งจากการทดสอบยังส์มอดุลัสพบว่าค่ายังส์มอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น คอมพอสิตที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 มีสมบัติแบบแข็งเปราะเนื่องจากเกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) แต่คอมพอสิตที่ร้อยละ 10 มีสมบัติเหนียว เนื่องจากไม่เกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ค่ายังส์มอดุลัสจึงมีค่าลดลงมากที่สุด [33]



รูปที่ 4.8 ยังสัมมอดูลัสของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

4.3.1.4 การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

จากผลการวิเคราะห์ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต แสดงดังรูปที่ 4.9 และภาคผนวก ก ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดคือร้อยละการยืดตัวของชิ้นงานที่จุดขาดเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวของชิ้นงานเริ่มต้น พบว่าค่าความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานคอมพอสิตที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 ลดลงร้อยละ 7.1, 25.3, 33.3 และ 7.3 เมื่อมีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 ตามลำดับ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานคอมพอสิตที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 ลดลงร้อยละ 71.4, 49.7, 79.3 และ 44.9 เมื่อมีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 ตามลำดับ และค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานคอมพอสิตที่ไม่ได้เติมเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนมีค่าความทนแรงดึงลดลงร้อยละ 65.7 เมื่อมีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 1 ซึ่งจากผลการทดสอบค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิด เนื่องจากการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิการ้อยละ 1, 3 และ 5 คอมพอสิตมีสมบัติแบบแข็งเปราะจากการเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชัน ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจึงลดลง แต่ที่การเติมร้อยละ 10 คอมพอสิตมีสมบัติเหนียว ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจึงสูงกว่า ร้อยละ 1, 3 และ 5 [16-19, 33]



รูปที่ 4.9 การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

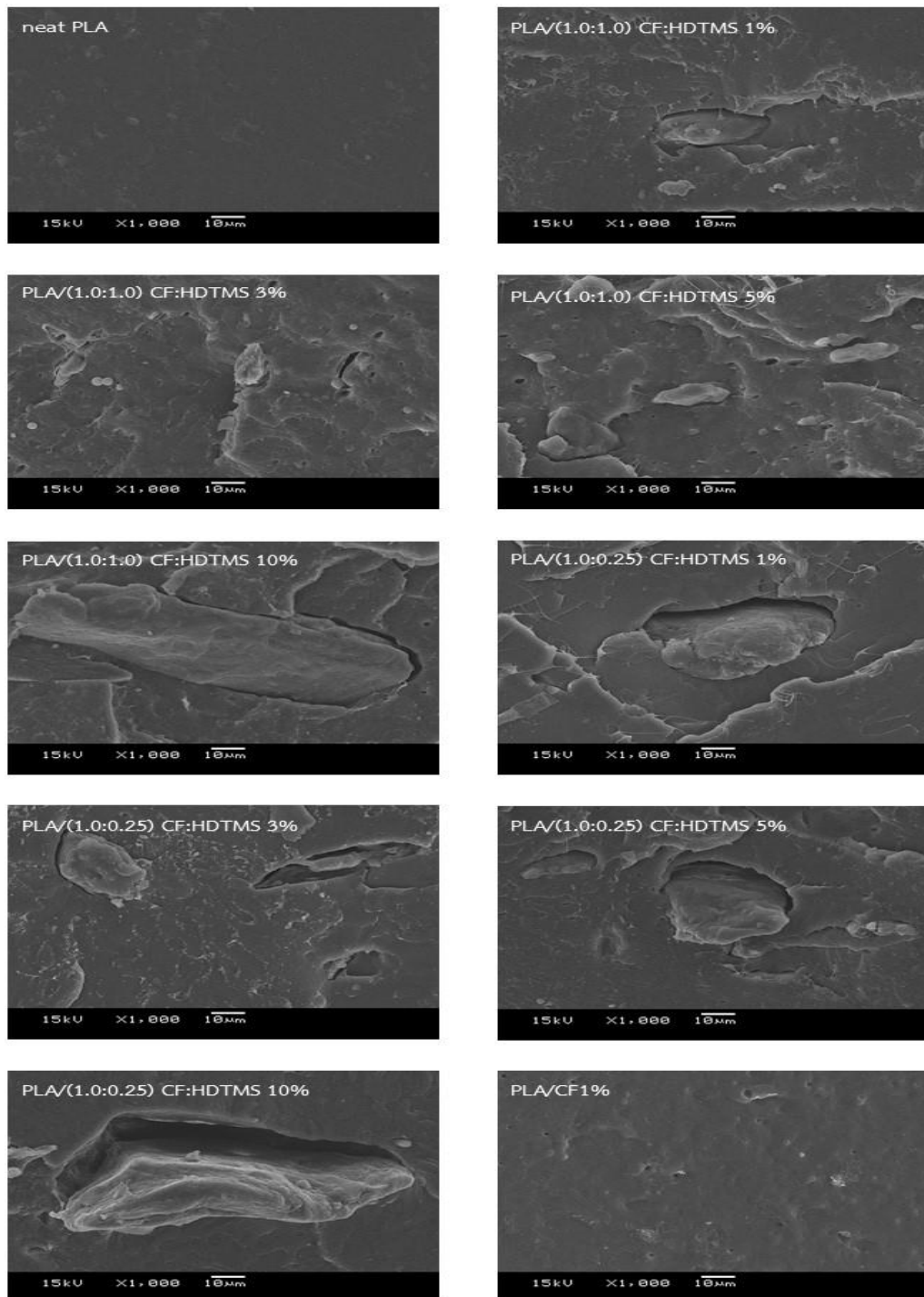
4.3.1.5 สันฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทก

จากผลการวิเคราะห์สันฐานวิทยาของชิ้นงานหลังทดสอบความทนแรงกระแทกพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าสอดคล้องกับผลการทดสอบความทนแรงกระแทก เมื่อพิจารณาชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 1 และ 3 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 พบว่าอนุภาคเซลลูโลสมีการกระจายตัวที่ดีกว่าชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก โดยจะเห็นว่าร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก เซลลูโลสเกิดการรวมกลุ่มก้อนเป็นขนาดอนุภาคที่ใหญ่มากขึ้น ทำให้เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกเซลลูโลสไม่สามารถส่งแรงไปยังพอลิเมอร์เมทริกซ์ส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นที่ปริมาณการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละต่ำ (1 และ 3 โดยน้ำหนัก) แต่เมื่อปริมาณการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละสูง (5 และ 10 โดยน้ำหนัก) ค่าความทนแรงกระแทกมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาสันฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 และไม่ได้เติม พบว่าเซลลูโลสเกิดการรวมกลุ่ม

ก่อนขนาดใหญ่เมื่อปริมาณการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ปริมาณการเติมอัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 และไม่ได้เติม ไม่สามารถลดความเป็นขั้วของเซลลูโลสทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันของเซลลูโลสมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวได้ไม่ดีของเซลลูโลสในพอลิเมอร์เมทริกซ์เมื่อได้แรงกระทำภายนอกทำให้ไม่สามารถเกิดการส่งผ่านแรงไปยังพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้จึงทำให้ความทนแรงกระแทกลดลง





รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานหลังทดสอบความทนแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

4.3.2 สมบัติทางความร้อน

4.3.2.1 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกและปริมาณผลึก

การศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_{cc}) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต แสดงผลดังตารางที่ 4.1 และ ภาคผนวก ข

สำหรับการศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ด้วยเทคนิคดีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี โดยศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_{cc}) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) จากการให้ความร้อนครั้งแรก สำหรับอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของพอลิแล็กติกแอซิดจากการเย็นตัวจะไม่พบ เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดเกรดที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเกรดฉีดจึงเกิดผลึกขณะเย็นตัวได้ยากต้องใช้อัตราการเย็นตัวต่ำมากจึงไม่พบอุณหภูมิการเกิดผลึก

จากการศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) คืออุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากของแข็งที่มีลักษณะคล้ายแก้วเป็นของยืดหยุ่นที่มีลักษณะคล้ายยาง พบว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธ์มีค่าอุณหภูมิแก้ว 58.21 องศาเซลเซียส ภายหลังจากการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิแก้วของพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากสายโซ่ของพอลิเมอร์มีการยึดเกาะกับผิวของเซลลูโลส จึงเกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ที่ยากขึ้น จึงส่งผลให้อุณหภูมิแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_{cc}) คืออุณหภูมิที่เกิดจากประวัติทางความร้อน (thermal history) ของชิ้นงานพบว่าพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็นที่ 109.40 องศาเซลเซียส ภายหลังจากการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็นเกิดในช่วง 103 – 106 องศาเซลเซียส ซึ่งหมายความว่าพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตเกิดผลึกได้ยากกว่า เนื่องจากเซลลูโลส/นาโนซิลิกาไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่

สำหรับอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) คืออุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวทำให้ผลึกเกิดการหลอมเหลว สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระ พบว่าอุณหภูมิหลอมตัวของผลึกพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธ์เกิดที่อุณหภูมิ 147.45 (T_{m1})

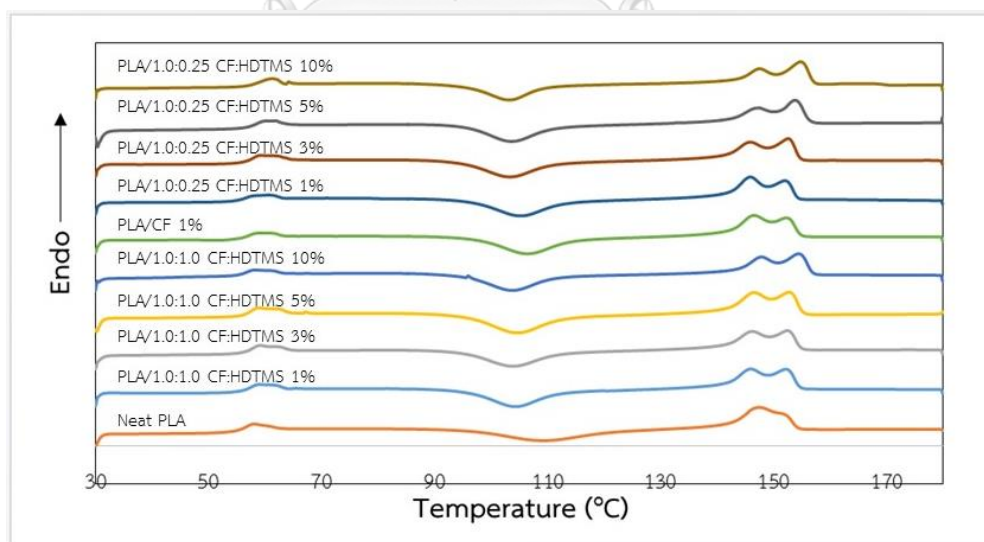
และ 152.31 (T_{m2}) องศาเซลเซียส โดยที่ตำแหน่งอุณหภูมิ 152 คือตำแหน่งอุณหภูมิผลึกที่สมบูรณ์ และผลึกที่ไม่สมบูรณ์เกิดที่ตำแหน่งประมาณ 146 – 147 องศาเซลเซียส ภายหลังจากการเติม เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต พบว่าตัวฟิลเลอร์ส่งผลต่อการเกิดผลึกที่สมบูรณ์ เนื่องจากพอลิ แล็กติกแอซิดมีโครงสร้างผลึกหลายรูปแบบจึงทำให้พบอุณหภูมิที่เกิดผลึกได้มากกว่าหนึ่งอุณหภูมิ ภายหลังจากการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ร้อยละต่ำ (ร้อยละ 1 และ 3 โดยน้ำหนัก) ที่ อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1, 1:0.25 และไม่ได้เติมพบว่า อุณหภูมิหลอมตัวของผลึกมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากผลึกของเซลลูโลส/นาโนซิลิกามีผลต่อ การเกิดผลึกแบบ α' (ผลึกที่ไม่เสถียร) ของพอลิแล็กติกแอซิด และเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ ร้อยละสูง (ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก) ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซี ไซเลน 1:1, 1:0.25 พบว่าอุณหภูมิหลอมตัวของผลึกมีค่าใกล้เคียงกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ เนื่องจากที่ปริมาณการเติมร้อยละ 5 และ 10 เซลลูโลส/นาโนซิลิกาเกิดการรวมกลุ่มกันทำให้ผลึก α (ผลึกที่เสถียร) ของพอลิแล็กติกแอซิดไม่ถูกยับยั้งทำให้พอลิแล็กติกแอซิดสามารถตกผลึกเองได้

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วย เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วน น้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิด บริสุทธิ์ เนื่องจากการเติมนาโนซิลิกาสามารถทำหน้าที่เป็นตัวก่อผลึกที่ดี ทำให้สายโซ่ของพอลิแล็กติก แอซิดสามารถเคลื่อนที่มาจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ แต่เมื่อปริมาณการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักพบว่าปริมาณผลึกมีค่าลดลง เนื่องจากการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ปริมาณมากเกินไปสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่เพื่อมาก่อผลึกจึงทำให้ปริมาณผลึก ลดลง และเมื่อพิจารณาพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิล ไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 พบว่ามีปริมาณผลึกที่ลดลง เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อ เฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนต่ำ ความมีขั้วของเซลลูโลสสูงส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันของ เซลลูโลสทำให้สายโซ่พอลิแล็กติกแอซิดไม่สามารถเคลื่อนตัวเพื่อมาจัดเรียงตัวก่อผลึกได้

จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนเพื่อศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ คล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_c) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ทำให้ทราบว่า การเติมไฮโดรโฟบิกนาซิลิกาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของสมบัติ ทางความร้อน

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_{cc}) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (melting temperature, T_m) และปริมาณผลึก (degree of crystallinity, X_c) ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_m (°C)	X_c (%)
neat PLA	58.2	109.4	147.4, 152.2	2.44
PLA/(1.0:1.0) CF:HDTMS 1%	59.9	104.3	145.9, 152.4	3.51
PLA/(1.0:1.0) CF:HDTMS 3%	60.1	103.8	146.0, 152.4	4.22
PLA/(1.0:1.0) CF:HDTMS 5%	59.9	104.5	146.3, 152.7	4.33
PLA/(1.0:1.0) CF:HDTMS 10%	59.1	103.8	147.7, 154.4	2.20
PLA/(1.0:0.25) CF:HDTMS 1%	59.6	105.2	145.8, 152.2	0.57
PLA/(1.0:0.25) CF:HDTMS 3%	60.1	103.3	145.6, 152.5	1.38
PLA/(1.0:0.25) CF:HDTMS 5%	60.8	103.6	146.7, 153.7	1.57
PLA/(1.0:0.25) CF:HDTMS 10%	61.5	103.1	147.3, 154.7	2.70
PLA/CF1%	59.8	106.3	146.5, 152.6	0.45



รูปที่ 4.11 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_{cc}) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

4.3.2.2 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน

การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA) โดยศึกษาอุณหภูมิที่สารเริ่มสลายตัว (T_{onset}) อุณหภูมิที่สารสลายตัวได้มากที่สุด (T_{max}) และน้ำหนักที่เหลือของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 4.2 และ ภาคผนวก ค

จากผลการทดลองพบว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ (neat PLA) มีอุณหภูมิที่สารเริ่มต้นสลายตัว 361.60 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่สารสลายตัวได้มากที่สุด 374.00 องศาเซลเซียส สำหรับพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตพบว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสองช่วง โดยในช่วงแรกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 319 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่สารสลายตัวได้มากที่สุดประมาณ 347.00 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดและเซลลูโลส การเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตทำให้พอลิแล็กติกแอซิดมีอุณหภูมิการสลายตัวที่เร็วขึ้น และปริมาณน้ำหนักที่เหลือของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตพบว่าเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้พอลิแล็กติกแอซิดและเซลลูโลสหรือที่เรียกว่าขี้เถ้า (char) ส่วนการสลายตัวทางความร้อนช่วงที่สอง เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 402.92 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่สารสลายตัวได้มากที่สุดประมาณ 347.00 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารประกอบชนิดใหม่หรือขี้เถ้า และน้ำหนักที่เหลือจากการสลายตัวในช่วงที่สอง คือปริมาณซิลิกาที่เติมลงไปและปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์จากสารอแกโนไซเลน เนื่องจากสารดังกล่าวไม่สามารถเกิดการสลายตัวได้ช่วงอุณหภูมิ 30 – 650 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าปริมาณน้ำหนักที่เหลือของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตไม่สอดคล้องกับปริมาณการเติมนาโนซิลิกาและเฮกซะเดคซิลไตริเมทอกซีไซเลน เกิดจากการรวมกลุ่มกันของเซลลูโลสจึงทำให้สารทั้งสองเกิดการกระจายตัวได้ไม่ดีภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ (neat PLA) และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1.0:1.0, 1.0:0.25 และไม่ได้เติม ตามลำดับ

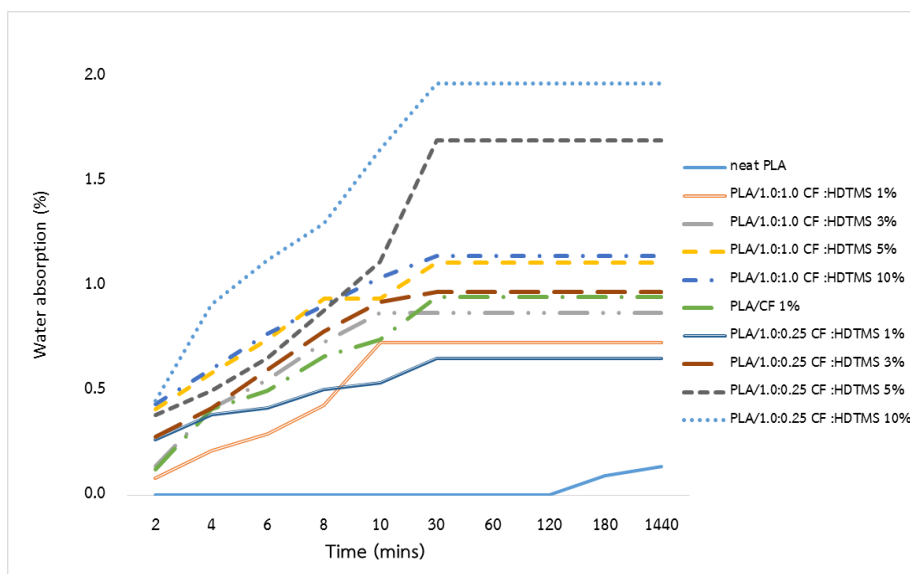
ตัวอย่าง	การสลายตัวทางความร้อน			การสลายตัวทางความร้อน		
	ช่วงที่ 1			ช่วงที่ 2		
	T _{onset} (°C)	T _{max} (°C)	น้ำหนักที่ เหลือ (%)	T _{onset} (°C)	T _{max} (°C)	น้ำหนักที่ เหลือ (%)
neat PLA	361.6	374.0	0.5	-	-	-
PLA/(1:1) CF:HDTMS 1%	340.8	364.0	1.9	438.6	454.0	0.7
PLA/(1:1) CF:HDTMS 3%	337.9	368.0	3.1	469.6	473.0	1.3
PLA/(1:1) CF:HDTMS 5%	359.0	373.0	2.4	482.6	500.0	0.3
PLA/(1:1) CF:HDTMS 10%	352.3	367.0	4.3	488.6	497.0	0.4
PLA/(1:0.25) CF:HDTMS 1%	327.6	347.0	2.2	402.9	405.0	0.8
PLA/(1:0.25) CF:HDTMS 3%	338.8	368.0	2.9	453.3	460.0	0.9
PLA/(1:0.25) CF:HDTMS 5%	329.6	360.0	3.3	454.6	441.0	1.2
PLA/(1:0.25) CF:HDTMS 10%	352.0	366.0	4.8	498.3	496.0	2.4
PLA/CF1%	319.1	360.0	2.2	419.7	425.0	0.5

4.4 สมบัติของพอลิเล็กทริกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตภายหลังการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน

4.4.1 ทดสอบการดูดซึมน้ำ

จากผลการวิเคราะห์ร้อยละการดูดซึมน้ำของพอลิเล็กทริกแอซิดและพอลิเล็กทริกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1, 1:0.25 และไม่ได้เติม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และภาคผนวก จ จากผลการทดสอบพบว่าพอลิเล็กทริกแอซิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการดูดซึมน้ำเมื่อระยะเวลาผ่านไป แต่เมื่อพิจารณาพอลิเล็กทริกแอซิดคอมพอสิตพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการดูดซึมน้ำเมื่อมีการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต โดยจะมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักในช่วงต้นหลังจากนั้นจะเกิดการคงที่ของน้ำหนักขึ้นงาน เนื่องจากเซลลูโลสมีพันธะไฮดรอกซิลอยู่ภายในโครงสร้างจึงมีความเป็นไฮโดรฟิลิกสูง ทำให้สามารถดูดซึมน้ำได้ และนาโนซิลิกามีสมบัติในการดูดความชื้นได้ดี จึงสามารถดูดซึมน้ำได้เช่นกัน ส่งผลให้พอลิเล็กทริกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตมีการเปลี่ยนแปลงร้อยละการดูดซึมน้ำ

เมื่อพิจารณาพอลิเล็กทริกแอซิดคอมพอสิตที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1.0:1.0, 1.0:0.25 และไม่ได้เติมพบว่าที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1.0:0.25 มีการดูดซึมน้ำได้ดีกว่าที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1.0:1.0 เนื่องจากเมื่อปริมาณการเติมเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนมาก สารออกแกโนไซเลนจะเสมือนหุ้มเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ทำให้เกิดการดูดซึมน้ำได้ลดลง ส่งผลให้เซลลูโลสและนาโนซิลิกาไม่สามารถดูดซึมน้ำผ่านเข้ามายังพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้นั่นเอง [38]



รูปที่ 4.12 ร้อยละการดูดซึมน้ำของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

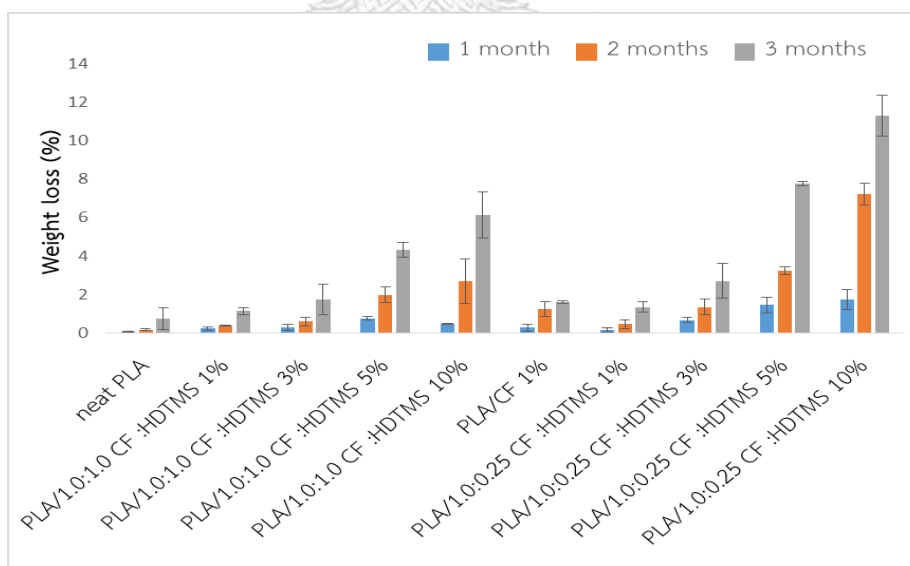
4.4.2 ทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ

4.4.2.1 ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง

จากผลการวิเคราะห์ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบของพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1, 1:0.25 และไม่ได้เติม ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.13, ตารางที่ 4.3 และภาคผนวก ง พบว่าพอลิแล็กติกแอซิดมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ระยะเวลา 1, 2 และ 3 เดือน ร้อยละ 0.07, 0.16 และ 0.73 ตามลำดับ ภายหลังจากการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตพบว่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1.0:0.25 มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสูงสุดที่ระยะเวลา 1, 2 และ 3 เดือน โดยร้อยละ 1.73, 7.21 และ 11.30 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักขึ้นงานด้วยวิธีการฝังกลบ เนื่องจากการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตทำให้เกิดการดูดซึมน้ำผ่านเข้าสู่พอลิแล็กติกแอซิดได้มากขึ้น ทำให้แบคทีเรียที่อยู่ภายในดินสามารถไหลผ่านเข้าไปพร้อมกับน้ำได้ จึงเกิดการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกลไก enzymatic hydrolysis ได้เป็นกรดแล็กติกและกรดที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนซิลิกากลายเป็นกรดซิลิซิก ทำให้และกรดทั้งสองตัวจะเร่งปฏิกิริยา

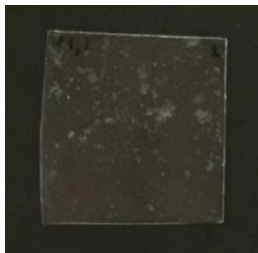
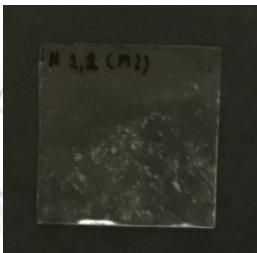
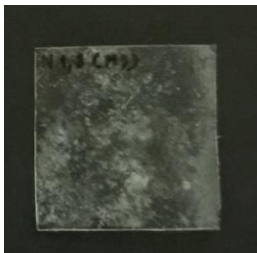
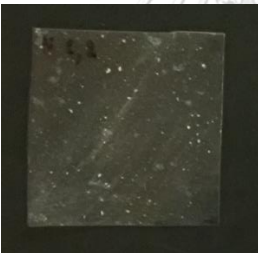
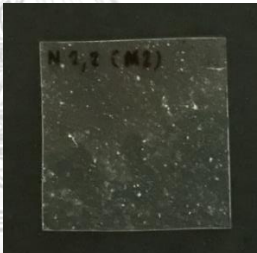
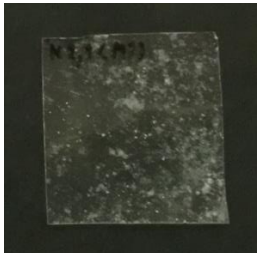
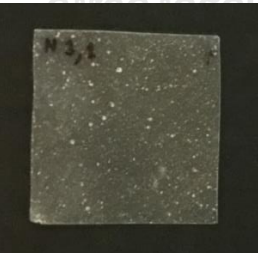
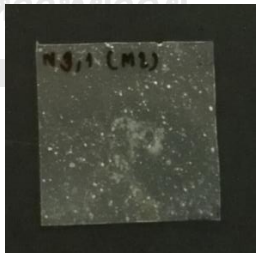
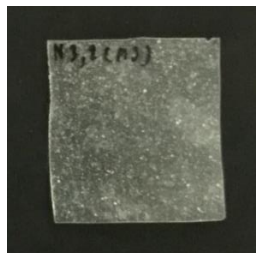
hydrolytic degradation ซึ่งเป็นกลไกแบบ acid hydrolysis ที่มีอัตราเร็วกว่า enzymatic hydrolysis ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดอย่างรวดเร็วภายในสามเดือน อีกทั้งค่าความเป็นกรด-เบสของดินอยู่ในช่วง 5-6 จะช่วยให้แบคทีเรียที่อยู่ภายในดินทำหน้าที่ได้เป็นอย่างดี และยังมีกรดที่อยู่ภายในดินยังช่วยเร่งการเกิด acid hydrolysis ได้เช่นกัน จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานจนสังเกตได้ด้วยตาเปล่าและน้ำหนักที่ลดลงอย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1, 1:0.25 และไม่ได้เติม พบว่าอัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 เกิดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่มากที่สุด การเติมเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนปริมาณน้อยหรือไม่ได้เติมทำให้น้ำสามารถผ่านเข้าไปยังพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่า เนื่องจากเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนเป็นสารอนินทรีย์ เมื่อเติมลงไปนในคอมพอสิตจะเปรียบเสมือนเป็นตัวกั้นขวางทางการเคลื่อนที่ของน้ำทำให้น้ำไม่สามารถเข้าไปเพื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสเกิดการตัดสายโซ่ระหว่างโมเลกุลพอลิแล็กติกแอซิด อีกทั้งการเติมเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนเพื่อปรับปรุงความมีขั้วของเซลลูโลสและนาโนซิลิกา หากเติมในปริมาณมากทำให้เซลลูโลสและนาโนซิลิกาเสมือนหุ้มด้วยสารเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนส่งผลให้เซลลูโลสและนาโนซิลิกาไม่สามารถดูดซึมน้ำไว้ได้ จึงมีน้ำไหลผ่านชิ้นงานได้น้อย ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจึงน้อยลง


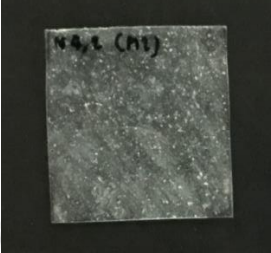
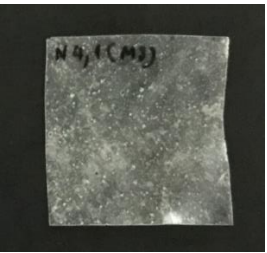

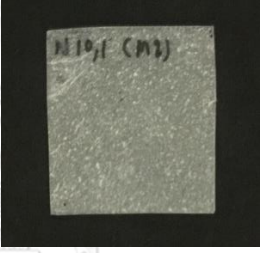
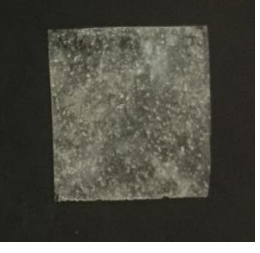

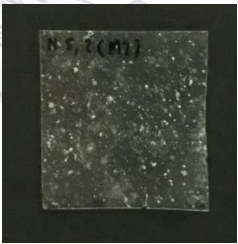
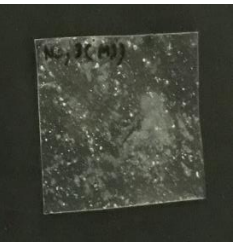

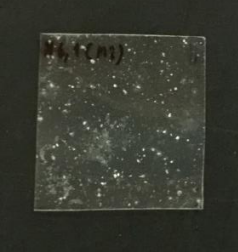
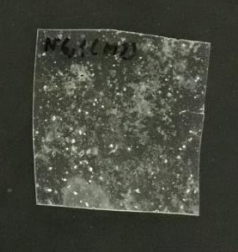


รูปที่ 4.13 ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนักที่ระยะเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

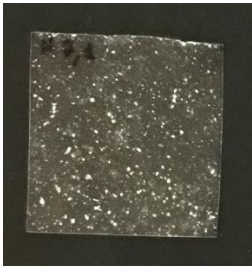
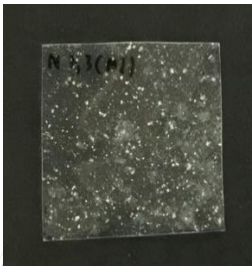
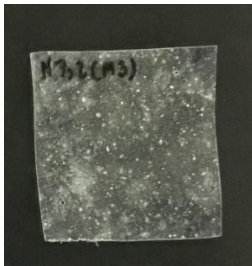

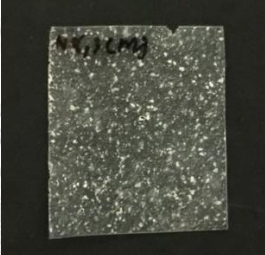
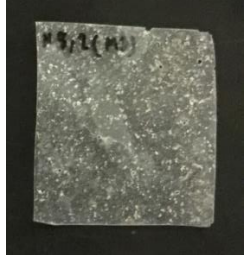
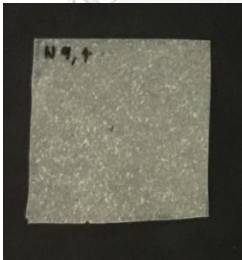
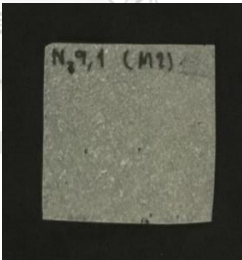

ตารางที่ 4.3 ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงและลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการย่อยสลาย ด้วยวิธีการฝังกลบของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกา คอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนักตามลำดับที่ ระยะเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

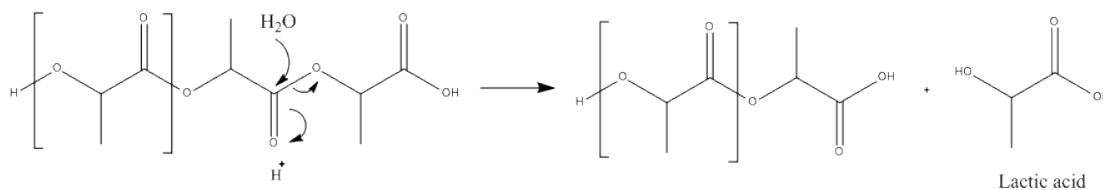
สูตร	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป (%) และลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน		
	1 เดือน	2 เดือน	3เดือน
neat PLA	0.07	0.16	0.73
			
	0.23	0.38	1.13
PLA/1.0:1.0 CF :HDTMS 1%			
	0.28	0.59	1.74
			

(ต่อตารางที่ 4.3)

สูตร	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป (%) และลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน		
	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน
PLA/1.0:1.0 CF :HDTMS 5%	0.76 	1.98 	4.32 
PLA/1.0:1.0 CF :HDTMS 10%	0.45 	2.67 	6.14 
PLA/CF 1%	0.28 	1.23 	1.59 
PLA/1.0:0.25 CF :HDTMS 1%	0.14 	0.45 	1.33 

(ต่อตารางที่ 4.3)

สูตร	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป (%) และลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน		
	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน
PLA/1.0:0.25 CF :HDTMS 3%	0.66	1.35	2.7
			
	1.45	3.23	7.75
PLA/1.0:0.25 CF :HDTMS 5%			
	1.73	7.21	11.3
			



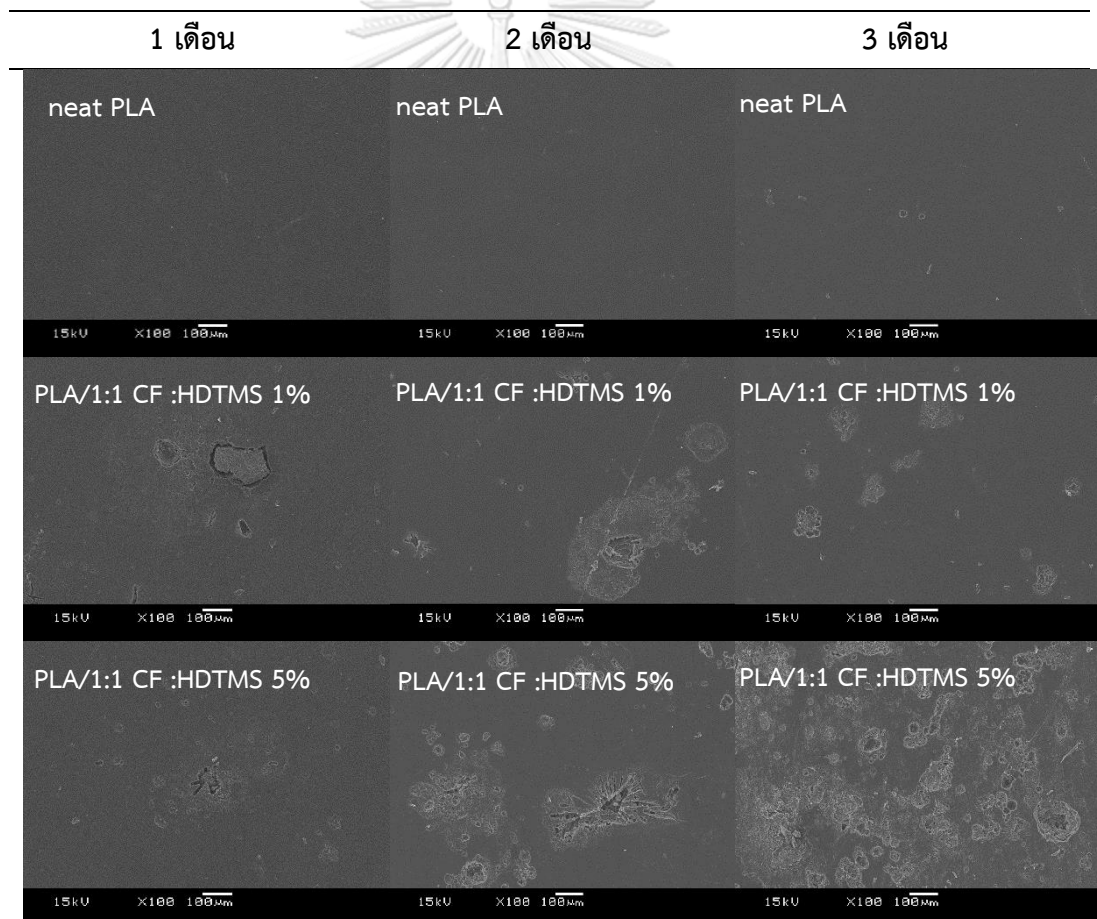
รูปที่ 4.14 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบ acid hydrolysis ของพอลิแล็กติกแอซิด [34]

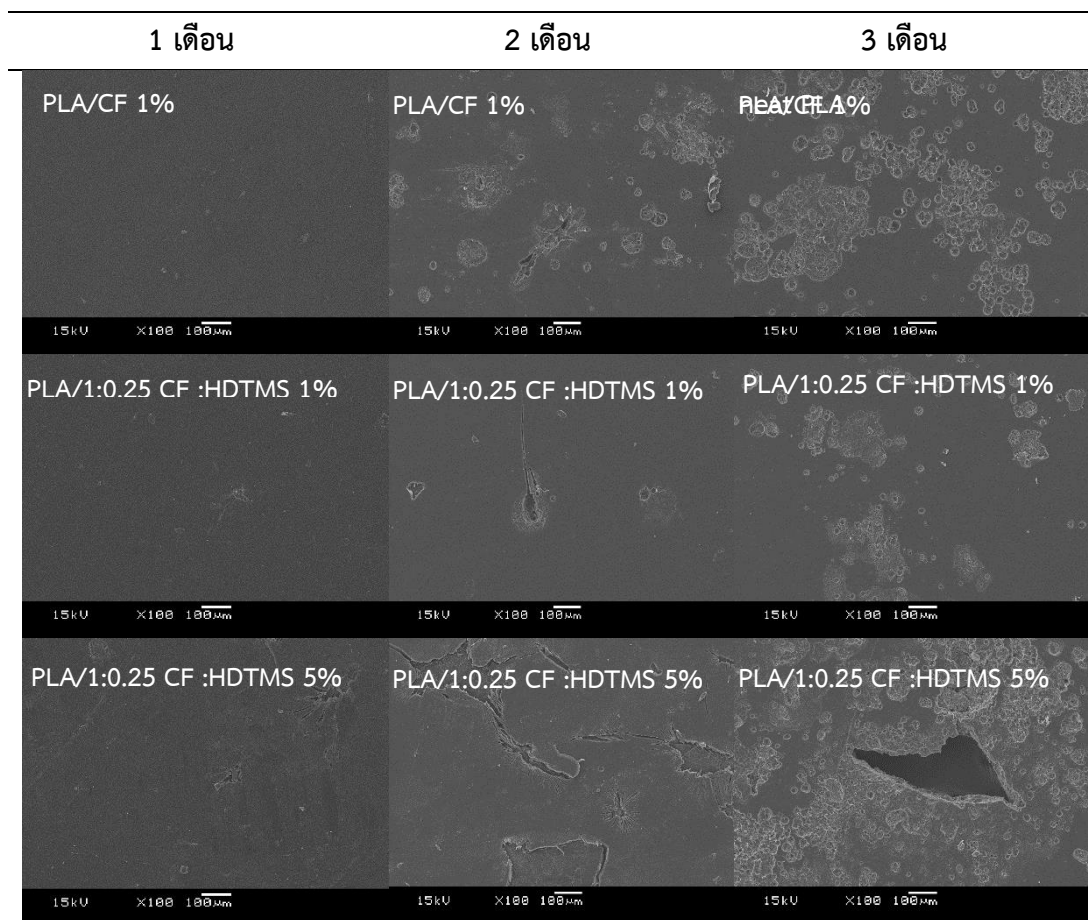
4.4.2.2 สันฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ

จากผลการวิเคราะห์สันฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1, 1:0.25 และไม่ได้เติม ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าสอดคล้องกับผลร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์พบว่าพื้นผิวชิ้นงานที่ระยะเวลา 1, 2 และ 3 เดือนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากไม่ได้เติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ไม่มีตัวกลางดูดซึมน้ำผ่านชิ้นงาน เพื่อเกิดปฏิกิริยา enzymatic hydrolysis และ hydrolytic degradation ของพอลิแล็กติกแอซิด แต่เมื่อพิจารณาพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1, 1:0.25 และไม่ได้เติม พบว่าที่ระยะเวลา 1 เดือน พื้นผิวชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเกิดรอยแตกบริเวณพื้นผิว ซึ่งรอยแตกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลา 2 และ 3 เดือน พบว่ารอยแตกบริเวณพื้นผิวมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับระยะเวลา 1 เดือน เนื่องจากเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นเซลลูโลสและนาโนซิลิกาสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยา และกรดแล็กติกแอซิดที่เกิดขึ้นจากการย่อยเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ ประกอบกับเริ่มต้นการทดสอบทำการปรับสภาพดินให้มีค่า pH อยู่ในช่วง 5-6 (กรดอ่อน) จะเร่งการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดแบบ hydrolytic degradation ที่รุนแรง การสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดจึงการขึ้นอย่างรวดเร็ว สังเกตเห็นรอยแตกด้วยตาเปล่า สอดคล้องกับน้ำหนักที่หายไปซึ่งมีมากกว่าน้ำหนักของฟิลเลอร์ที่เติมเข้าไป

เมื่อพิจารณาพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1, 1:0.25 และไม่ได้เติม พบว่าที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 และไม่ได้เติม เกิดรอยแตกบริเวณพื้นผิวมากกว่าอัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1 ในปริมาณร้อยละการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่เท่ากัน เนื่องจากการเติมเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนในปริมาณมากทำให้น้ำผ่านชิ้นงานเพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับพอลิแล็กติก

แอซิดได้น้อยกว่าจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวชิ้นงานน้อยกว่า และเมื่อพิจารณาพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต รั้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักชิ้นงานมากที่สุด พบว่าที่ระยะเวลา 3 เดือน พื้นผิวของชิ้นงานเกิดรอยแตกบริเวณพื้นผิวอย่างชัดเจน โดยจะเห็นได้ว่ารอยแตกเกิดการขยายออกกลายเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ที่สามารถยืนยันได้ว่าเกิดการย่อยสลายของชิ้นงานคอมพอสิตอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณการเติมเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนต่ำทำให้เสมือนมีตัวกั้นขวางทางน้ำน้อยลง เซลลูโลสและนาโนซิลิกาสามารถดูดซึมน้ำได้ในปริมาณมาก จึงสามารถเกิดปฏิกิริยา enzymatic hydrolysis และ hydrolytic degradation ของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตได้มากขึ้น น้ำหนักของชิ้นงานลดลง จึงเห็นรอยแตกของชิ้นงานขนาดใหญ่ขึ้น





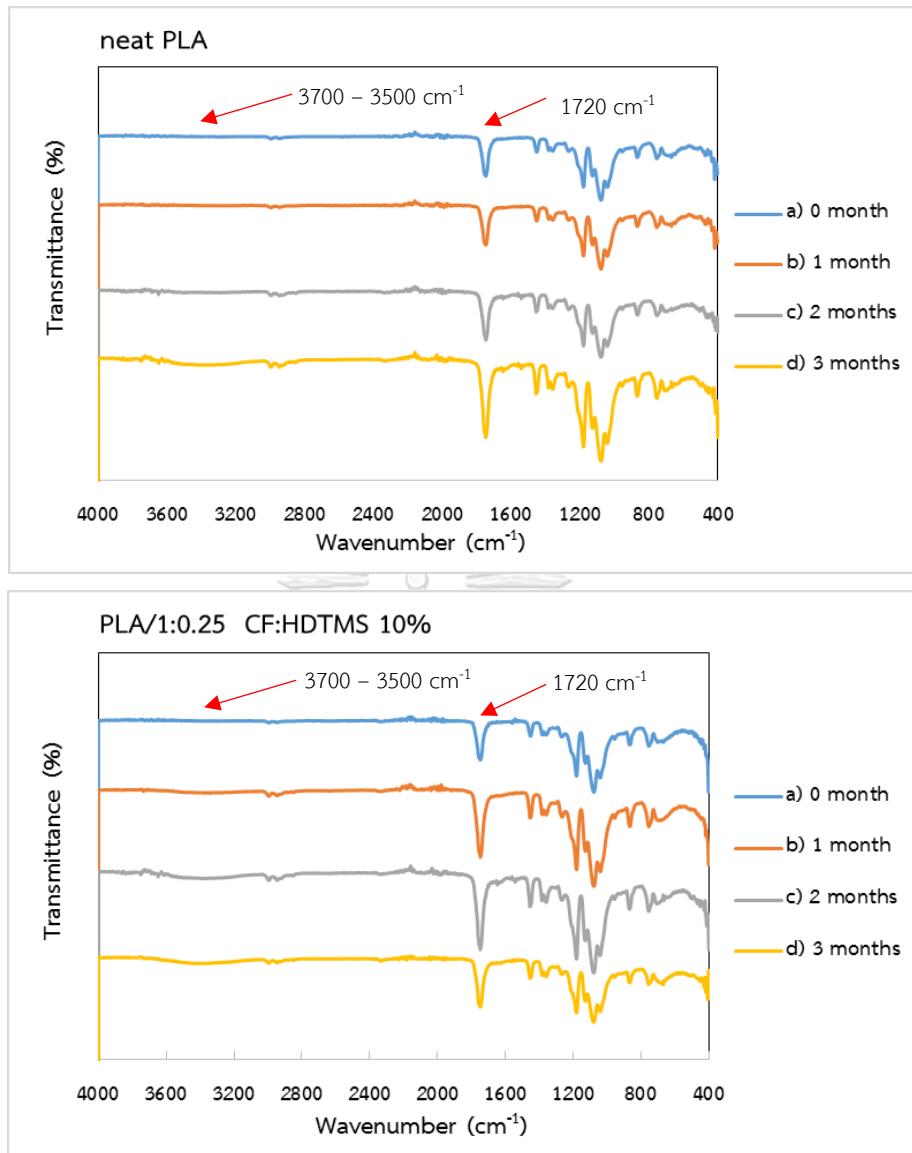
รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับที่ระยะเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

4.4.2.3 พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ของชิ้นงานหลังทดสอบการย่อยสลาย

จากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ของพื้นผิวชิ้นงานหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบของ neat PLA และ PLA/1:0.25 CF :HDTMS 10% ที่ระยะเวลา 0, 1, 2 และ 3 เดือน แสดงดังรูปที่ 4.16 และ โดยแกน X คือเลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1}) แกน Y คือค่าร้อยละการส่องผ่านของแสง (Transmittance, %) พบว่าที่ตำแหน่ง 1720 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลของหมู่คาร์บอกซิลโดยจะเห็นว่าชิ้นงานของ neat PLA ที่ระยะเวลา 0, 1 และ 2 เดือน สเปกตรัมที่ตำแหน่งนี้จะมีพีคที่ไม่แหลม แต่ที่ระยะเวลา 3 เดือนพบว่าสเปกตรัมชัดเจนมากขึ้น โดยมีพีคที่แหลมมากขึ้น และชิ้นงาน PLA/1:0.25 CF :HDTMS 10% พบว่าที่ระยะเวลา 1 เดือน สเปกตรัมที่ตำแหน่งนี้จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนโดยมีลักษณะพีคที่แหลม ซึ่งสอดคล้องกับผลร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าเกิดการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ เนื่องจากเกิดจากการ

แตกสลายของพันธะเอสเทอร์ของพอลิแล็กติกแอซิดแบบ hydrolytic degradation ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่รุนแรงได้หมู่ปลายเป็นคาร์บอกซิลิก และที่ตำแหน่ง 3500 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของหมู่คาร์บอกซิลของชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าชิ้นงาน PLA/1:0.25 CF :HDTMS 10% ที่ระยะเวลาฝึกลับ 1 และ 2 เดือนสามารถเห็นสเปกตรัมได้อย่างชัดเจน เมื่อระยะเวลามากขึ้นที่ 3 เดือนจะเห็นได้ว่าสเปกตรัมที่ตำแหน่งนี้มีลักษณะกว้างและชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับระยะเวลา 1 และ 2 เดือน เนื่องจากเมื่อนำชิ้นงานไปฝึกลับและรดน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสและไฮโดรลิติกเกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลที่ปลายโซ่ของพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน neat กับ PLA/1:0.25 CF :HDTMS 10% ที่ตำแหน่ง 3500 cm^{-1} พบว่าชิ้นงาน PLA/1:0.25 CF :HDTMS 10% พืคจะกว้างขึ้น (board) เนื่องจากมีการดูดน้ำไปมากขึ้น หมู่คาร์บอกซิลจึงเกิด hydrogen bonding กับน้ำ ซึ่งจะปรากฏลักษณะเอกลักษณ์ทาง FT-IR เป็นพืคไม่แหลม แต่มีฐานกว้างมากขึ้น ซึ่งต่างจากชิ้นงาน neat PLA ยังคงไม่ดูดน้ำพืคในตำแหน่งนี้ซึ่งเป็นหมู่คาร์บอกซิลเหมือนกันแต่ไม่พบพืค เนื่องจากไม่มี hydrogen bonding กับน้ำ [35]





รูปที่ 4.16 พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ของพื้นผิวชิ้นงานหลังการย่อยสลาย ด้วยวิธีการฝังกลบของ neat PLA และ PLA/1.0:0.25 CF :HDTMS 10% ที่ระยะเวลา 0, 1, 2 และ 3 เดือน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกา/เซลลูโลสคอมพอสิต ด้วยการปรับปรุงพื้นผิวของนาโนซิลิกา/เซลลูโลสคอมพอสิตด้วยสารออร์แกนโอซิลีน คือ เฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลส : เฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1.0:1.0 และ 1.0:0.25 แล้วนำไฮโดรฟอบิกนาโนซิลิกา/เซลลูโลสคอมพอสิตไปใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิแล็กติกแอซิด ที่ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนักของพอลิแล็กติกแอซิด หลังจากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูปและเทคนิคการอัดด้วยความร้อน ศึกษาสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เตรียมได้ เช่น สันฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ พิสูจน์เอกลักษณ์ของชิ้นงานหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ และสมบัติการดูดซึมน้ำ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกา

อนุภาคนาโนซิลิกาที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนสามารถเตรียมได้จากสภาวะที่ดีที่สุดที่ใช้ในการสังเคราะห์ คือ ความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกต 55 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วง 1-2 ที่อุณหภูมิห้อง และปล่อยทิ้งไว้ 2 วันเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ ทำให้ได้อนุภาคซิลิกาในระดับนาโน

2. สันฐานวิทยาของเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต

การเติมอนุภาคนาโนซิลิกาเข้ากับเซลลูโลสทำให้เซลลูโลสมีการรวมกลุ่มก้อนแบบคลัสเตอร์ เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกาทำหน้าที่เสมือนเป็นสารก่อนผลึก

3. สมบัติเชิงกล

ในภาพรวมของการวิเคราะห์พบว่า การเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 ค่าความทนแรงดึง โมดูลัสของยัง และความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด มีค่าลดลง เนื่องจากการเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 เตรียมได้จากมาสเตอร์แบทช์ร้อยละ 10 ทำให้เกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน 2 ครั้ง ส่งผลให้ความทนแรงดึงมีค่าลดลง และทำให้พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตมีสมบัติแบบแข็งเปราะ จึงส่งผลให้ค่าโมดูลัสของยังมีค่าลดลง อีกทั้งการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่มีความเป็นผลึกสูง ทำให้ความยืดหยุ่นของคอมพอสิตลดลง ส่งผลให้ค่าความยืดตัวสูงสุด

ณ จุดขาด มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน แต่พบว่าความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นที่ร้อยละการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต 1 และ 3 ที่การเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ร้อยละ 5 และ 10 พบว่าความทนแรงกระแทกมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการรวมกลุ่มกันของเซลลูโลส ทำให้ไม่สามารถเกิดการส่งผ่านแรงไปยังพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้

4. สมบัติทางความร้อน

การเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตลงในพอลิเอทิลีนเทอแรตส่งผลให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_{cc}) มีค่าลดลง อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) มีค่าลดลงที่การเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 1 และ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นที่การเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 5 และ 10 ปริมาณผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นที่การเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 1, 3 และ 5 จากนั้นมีค่าลดลงที่การเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 10 อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (T_{max}) มีค่าลดลง และปริมาณน้ำหนักที่เหลือพบว่าไม่สอดคล้องกับปริมาณการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต

5. การย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ

การเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตลงในพอลิเอทิลีนเทอแรตทำให้ร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในระยะเวลา 3 เดือน มีค่าลดลงสูงสุดที่การเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1.0:0.25 เนื่องจากการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตทำให้เกิดการดูดซึมน้ำผ่านเข้าสู่พอลิเอทิลีนเทอแรตได้มากขึ้น เกิดการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยกลไก enzymatic hydrolysis ได้เป็นกรดแล็กติก และกรดที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนซิลิกาเป็นกรดซิลิสิก และกรดทั้งสองตัวจะเร่งปฏิกิริยา hydrolytic degradation ซึ่งเป็นกลไกแบบ acid hydrolysis ที่มีอัตราเร็วกว่า enzymatic hydrolysis ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายของพอลิเอทิลีนเทอแรตอย่างรวดเร็วภายในสามเดือน จนสังเกตได้ด้วยตาเปล่าและน้ำหนักลดลงอย่างชัดเจน และเมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบระยะเวลา 1, 2 และ 3 พิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าเกิดการเปลี่ยนของหมู่ฟังก์ชันที่ชัด

6. สมบัติการดูดซึมน้ำ

การเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตลงในพอลิเอทิลีนเทอแรต ทำให้การดูดซึมน้ำของพอลิเอทิลีนเทอแรตเพิ่มขึ้นและปริมาณการเติมเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่สูงขึ้นส่งผลให้พอลิเอทิลีนเทอแรตมีสมบัติการดูดซึมน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นไปด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวที่เหมาะสมของเซลล์โอส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต เพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวได้ดีในพอลิแล็กติกแอซิด



รายการอ้างอิง

- [1] Bajpai, P. Structure and Properties of Cellulose and Nanocellulose. in Pulp and Paper Industry, pp. 27-40, 2017.
- [2] Choe, D., Kim, Y.M., Nam, J.E., Nam, K., Shin, C.S., and Roh, Y.H. Synthesis of high-strength microcrystalline cellulose hydrogel by viscosity adjustment. Carbohydrate Polymers 180 (2018): 231-237.
- [3] Stenius, P. Forest Products Chemistry. Papermaking Science and Technology 3. Finland: Fapet OY, 2000.
- [4] Trache, D., et al. Microcrystalline cellulose: Isolation, characterization and bio-composites application—A review. International Journal of Biological Macromolecules 93 (2016): 789-804.
- [5] ขวัญชีวา แก้วอินทร์. ผลของโครงสร้างผ้าทอต่อสมบัติเชิงกลของผ้าฝ้าย/เซลลูโลสคอมพอสิต ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2014.
- [6] นวลแข ปาลินิช. ความรู้เรื่องผ้าและเส้นใย. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 1999.
- [7] บุญศรี คู่สุขธรรม. วิทยาศาสตร์เส้นใย. กรุงเทพมหานคร: สปีดเจ็ท, 2012.
- [8] มณฑา จันท์เกตุเลียด. วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: สมาคมคหเศรษฐศาสตร์ 1998.
- [9] วีรศักดิ์ อุดมกิจเดชา. วิทยาศาสตร์เส้นใย. in. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2007.
- [10] อภิชาติ สนธิสมบัติ. กระบวนการทางเคมีสิ่งทอ. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2002.
- [11] Dierkes, W. Mixing with filler [Online]. 2018. Available from: https://www.tut.fi/ms/muo/vert/7_raw_materials_and_compounds/fillers_mixing.htm [25 May 2018]
- [12] M.Mebert, A., J.Baglolo, C., F.Desimone, M., and DusicaMaysinger. Nanoengineered silica: Properties, applications and toxicity. Food and Chemical Toxicology 109 (2017): 753-770.
- [13] เซาว์น ศรีเพชรดี. การศึกษาการใช้ซิลิกาเจลขนาดนาโนชนิดมีรูพรุน ที่สังเคราะห์จากเถ้าแกลบเพื่อเสริมแรงในยางธรรมชาติโดยกระบวนการโซลเจล ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2010.

- [14] พัชรินทร์ วรรณกุล. Sol-gel เทคโนโลยีสังเคราะห์ซิลิกาจากขานอ้อย. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2018.
- [15] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [Online]. 2007. Available from: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic [25 May 2018]
- [16] Lim, L.T., Auras, R., and Rubino, M. Processing technologies for poly(lactic acid). Progress in Polymer Science 33(8) (2008): 820-852.
- [17] Murariu, M. and Dubois, P. PLA composites: From production to properties. Adv Drug Deliv Rev 107 (2016): 17-46.
- [18] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์และคณะ. งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพชนิด. 2018, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [19] อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล. พอลิแล็กติกแอซิด. 2018, ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2011.
- [20] อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่ม 1. 2003, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
- [21] Gurit. Guide to composites [Online]. 2018. Available from: <http://www.gurit.com/Our-Business/Composite-Materials> [25 May 2018]
- [22] บริษัท ไทย คอมโพสิต. นิยามของคอมโพสิต [Online]. 2014. Available from: http://www.thaitechno.net/t1/knowledge_detail.php?id=1849&uid=42939 [25 May 2018]
- [23] ทฤทัก กิรติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, and อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ 2018, วิศวกรรมสารมก. 18-32.
- [24] Techminy. extrusion moulding process for plastic machining [Online]. 2018. Available from: <http://techminy.com/extrusion-moulding> [25 May]
- [25] ดรรชนี พัชรวารากร. เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ [Online]. 2018. Available from: <http://www.inc.science.cmu.ac.th/thai/upload/article/file/13-07-07-72b32.pdf> [25 May]
- [26] Ali, H.A., Chughtai, A., and Sattar, A. Synthesis of quality silica gel; optimization of parameter. Chemical Engineering and Technology Punjab Lahore University, 2009.

- [27] Jal, P.K., Sudarshan, M., Saha, A., Patel, S., and Mishra, B.K. Synthesis and characterization of nanosilica prepared by precipitation method. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 240(1-3) (2004): 173-178.
- [28] Pilic, B., et al. Hydrophobic silica nanoparticles as reinforcing filler for poly (lactic acid) polymer matrix. Hemijaska industrija 70(1) (2016): 73-80.
- [29] Kowalczyk, M., Piorkowska, E., Kulpinski, P., and Pracella, M. Mechanical and thermal properties of PLA composites with cellulose nanofibers and standard size fibers. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 42(10) (2011): 1509-1514.
- [30] Awal, A., Rana, M., and Sain, M. Thermorheological and mechanical properties of cellulose reinforced PLA bio-composites. Mechanics of Materials 80 (2015): 87-95.
- [31] Thakur, M.K., Gupta, R.K., and Thakur, V.K. Surface modification of cellulose using silane coupling agent. Carbohydr Polym 111 (2014): 849-55.
- [32] dos Santos, F.A., Iulianelli, G.C.V., and Tavares, M.I.B. Effect of microcrystalline and nanocrystals cellulose fillers in materials based on PLA matrix. Polymer Testing 61 (2017): 280-288.
- [33] Robles, E., Urruzola, I., Labidi, J., and Serrano, L. Surface-modified nano-cellulose as reinforcement in poly(lactic acid) to conform new composites. Industrial Crops and Products 71 (2015): 44-53.
- [34] Lv, S., Zhang, Y., Gu, J., and Tan, H. Biodegradation behavior and modelling of soil burial effect on degradation rate of PLA blended with starch and wood flour. Colloids Surf B Biointerfaces 159 (2017): 800-808.
- [35] Lv, S., Liu, X., Gu, J., Jiang, Y., Tan, H., and Zhang, Y. Microstructure analysis of polylactic acid-based composites during degradation in soil. International Biodeterioration & Biodegradation 122 (2017): 53-60.
- [36] Fan, L.-t., Gharpuray, M.M., and Lee, Y.-H. Acid hydrolysis of cellulose. Cellulose hydrolysis. Vol. 3. Springer, 1987.
- [37] Willberg-Keyriläinen, P., Hiltunen, J., and Ropponen, J. Production of cellulose carbamate using urea-based deep eutectic solvents. Cellulose 25(1) (2017): 195-204.

- [38] Jalalvandi, E., Majid, R.A., 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) (2013): 496-509.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

สมบัติเชิงกลของชิ้นงานของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอลิเมอร์ที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลิเมอร์ที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

ก-1 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิด

ตาราง ก-1.1 ความทนแรงดึง, โมดูลัสของยัง และ การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิด

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังส์ของโมดูลัส (MPa)	การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)
1	39.07	2180.89	5.63
2	38.96	2305.76	5.45
3	40.26	2259.12	4.04
4	38.25	2299.78	6.67
Average	39.13	2261.39	5.45
SD	0.83	57.52	1.08

ก-2 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกา
คอมพอสิต

ตาราง ก-2.1 ความทนแรงดึง, ยั่งส์มอดุลัส และการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานพอลิแล็กติก
แอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนัก
เซลลูโลสต่อเฮกซะเดกซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 1%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยั่งส์ของมอดุลัส (MPa)	การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)
1	36.10	2282.27	4.71
2	35.82	2290.59	6.29
3	36.21	2279.40	4.26
Average	36.04	2284.09	5.09
SD	0.20	5.81	1.06

ตาราง ก-2.2 ความทนแรงดึง, ยั่งส์ของมอดุลัส และการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานพอลิ
แล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วน
น้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดกซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 3%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยั่งส์ของมอดุลัส (MPa)	การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)
1	35.08	2251.07	4.35
2	34.50	2240.17	4.37
3	35.56	2223.94	3.61
4	34.86	2251.07	5.05
Average	35.00	2227.36	4.34
SD	0.44	24.72	0.58

ตาราง ก-2.3 ความทนแรงดึง, ยั่งส์ของมอดุลัส และ การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 5%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยั่งส์ของมอดุลัส (MPa)	การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)
1	34.42	2251.07	4.35
2	34.03	2240.17	4.37
3	33.53	2223.94	3.61
4	32.94	2251.07	5.05
Average	33.73	2227.36	4.34
SD	0.64	24.72	0.58

ตาราง ก-2.4 ความทนแรงดึง, ยั่งส์ของมอดุลัส และ การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 10%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยั่งส์ของมอดุลัส (MPa)	การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)
1	41.31	1489.26	6.11
2	41.85	2430.98	4.30
3	41.80	2082.02	4.72
4	41.87	1506.59	5.37
5	42.29	1649.44	4.90
Average	41.83	2227.36	5.08
SD	0.34	24.72	0.69

ตาราง ก-2.5 ความทนแรงดึง, ย้งส์ของมอดุลัส และ การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดกซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 1%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ย้งส์ของมอดุลัส (MPa)	การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)
1	36.22	2296.04	3.30
2	38.43	2134.37	3.28
3	37.44	2296.19	3.26
4	37.57	2356.71	2.84
Average	37.41	2270.83	3.17
SD	0.91	95.34	0.21

ตาราง ก-2.6 ความทนแรงดึง, ย้งส์ของมอดุลัส และ การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดกซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 3%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ย้งส์ของมอดุลัส (MPa)	การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)
1	34.75	2317.05	4.30
2	36.95	2309.64	3.09
3	35.71	2114.16	3.30
4	34.77	2287.09	3.86
Average	35.54	2256.98	3.64
SD	1.038	96.06	0.54

ตาราง ก-2.7 ความทนแรงดึง, ยั่งส์ของมอดุลัส และ การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 5%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยั่งส์ของมอดุลัส (MPa)	การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)
1	33.22	2282.27	4.71
2	33.52	2290.59	6.29
3	34.44	2279.40	4.26
Average	33.73	2284.09	5.09
SD	0.63	5.81	1.06

ตาราง ก-2.8 ความทนแรงดึง, ยั่งส์ของมอดุลัส และ การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 10%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยั่งส์ของมอดุลัส (MPa)	การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)
1	37.60	1970.31	3.12
2	39.63	1764.12	3.65
3	38.26	1814.84	4.24
4	37.94	1652.71	3.38
5	39.12	1893.55	4.38
Average	38.51	1819.10	3.75
SD	0.84	121.58	0.54

ตาราง ก-2.9 ความทนแรงดึง, ยั่งส์ของมอดุลัส และ การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตริเมทอกซีไซเลน ไม่ได้เติม (PLA/CF 1%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยั่งส์ของมอดุลัส (MPa)	การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)
1	37.91	2282.44	3.22
2	37.13	2257.54	4.02
3	37.18	2104.54	3.55
4	41.59	2322.18	2.35
Average	38.45	2241.67	3.28
SD	2.11	95.21	0.70

ก-3 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิด

ตาราง ก-3.1 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิด

ตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (KJ/m ²)
1	2.88
2	2.86
3	2.84
4	2.82
5	2.78
Average	2.84
SD	0.04

ก-4 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต

ตาราง ก-4.1 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 1%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (KJ/m ²)
1	3.06
2	3.05
3	3.00
4	2.91
5	2.90
Average	2.98
SD	0.07

ตาราง ก-4.2 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 3%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (KJ/m ²)
1	3.57
2	3.35
3	3.30
4	3.26
5	3.09
Average	3.32
SD	0.17

ตาราง ก-4.3 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วย เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 5%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (KJ/m ²)
1	3.30
2	3.18
3	3.07
4	3.06
5	3.04
Average	3.13
SD	0.10

ตาราง ก-4.4 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วย เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 10%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (KJ/m ²)
1	3.04
2	2.96
3	2.94
4	2.91
5	2.76
Average	2.92
SD	0.10

ตาราง ก-4.5 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วย เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไฮเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 1%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (KJ/m ²)
1	2.99
2	2.96
3	2.94
4	2.78
5	2.69
Average	2.87
SD	0.13

ตาราง ก-4.6 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วย เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไฮเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 3%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (KJ/m ²)
1	3.42
2	3.16
3	3.14
4	2.98
5	2.92
Average	3.13
SD	0.19

ตาราง ก-4.7 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วย เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 5%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (KJ/m ²)
1	3.19
2	3.04
3	3.04
4	2.90
5	2.80
Average	2.99
SD	0.14

ตาราง ก-4.8 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วย เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 10%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (KJ/m ²)
1	2.97
2	2.96
3	2.96
4	2.92
5	2.78
Average	2.92
SD	0.07

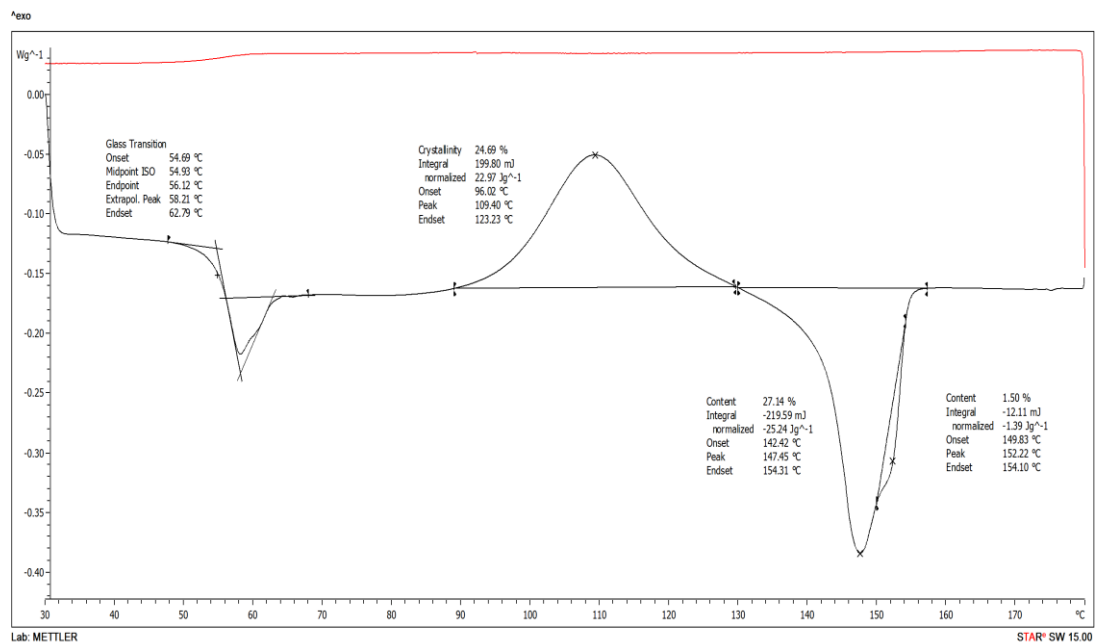
ตาราง ก-4.9 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วย เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไฮเลน ไม่ได้เติม (PLA/CF 1%)

ตัวอย่าง	ความทนแรงกระแทก (KJ/m ²)
1	2.91
2	2.78
3	2.74
4	2.71
5	2.65
Average	2.76
SD	0.09

ภาคผนวก ข

DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นงานของพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ที่ได้
เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลิเมอร์ที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร
ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

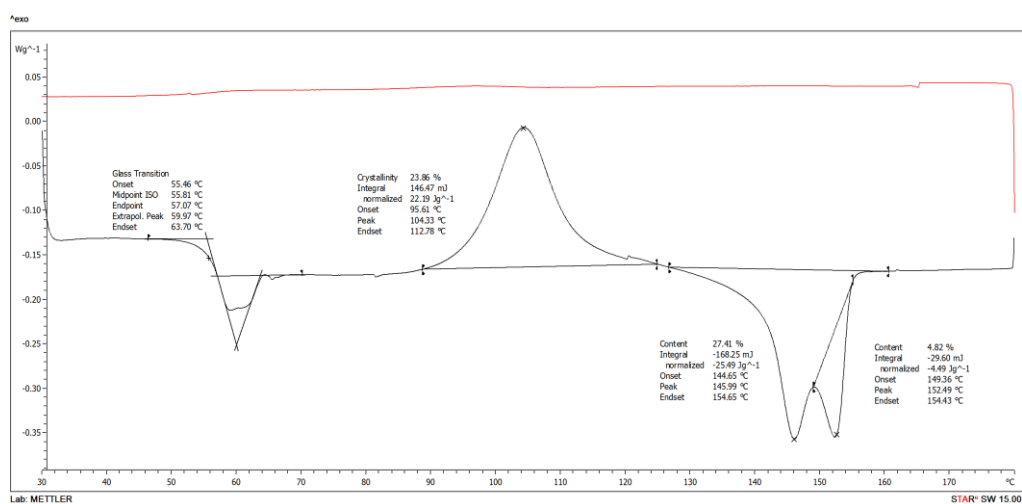
ข-1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเล็กทิกแอซิด



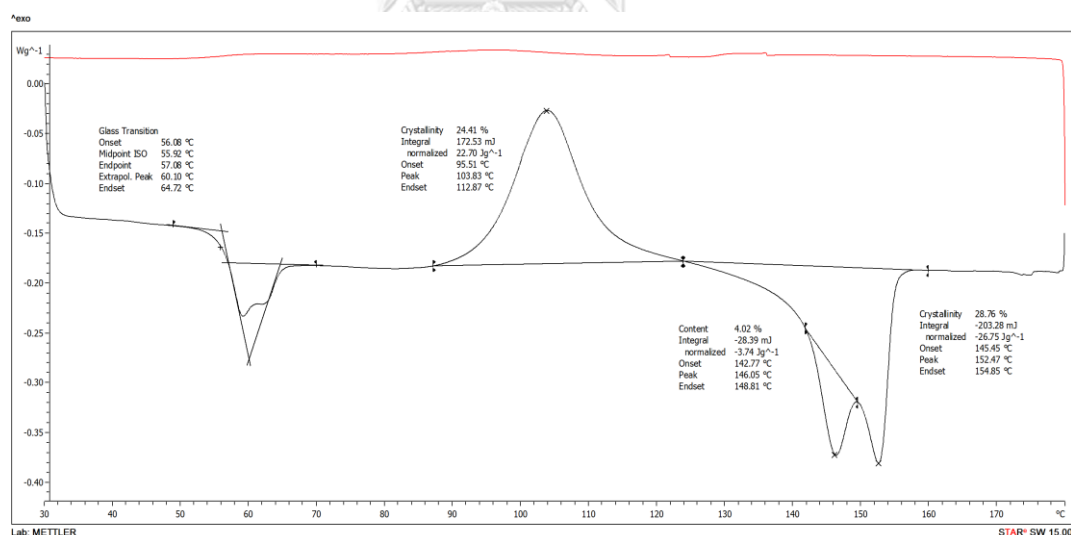
รูปที่ ข-1.1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเล็กทิกแอซิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

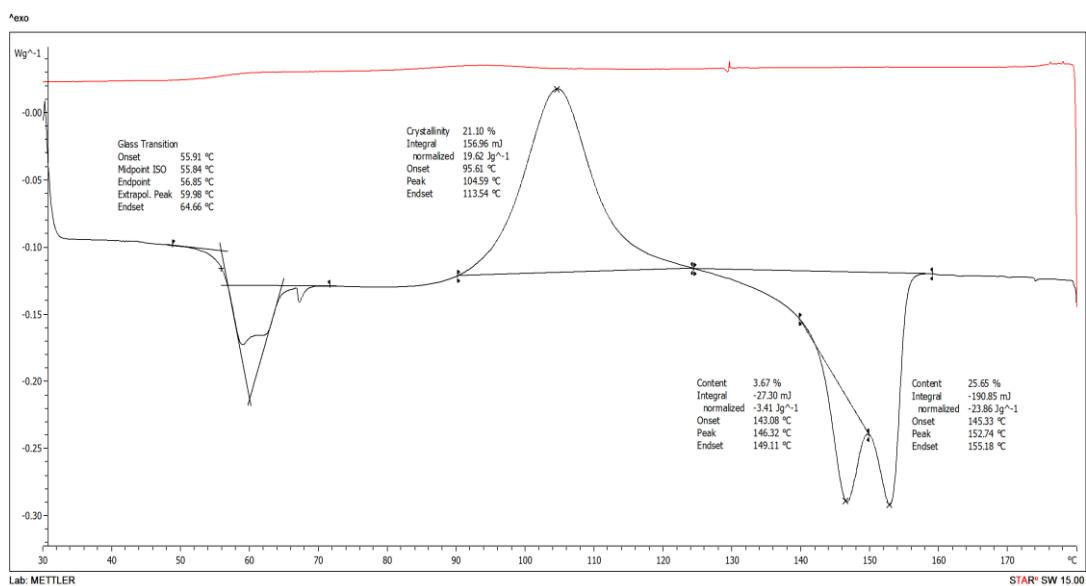
ข-2 DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต



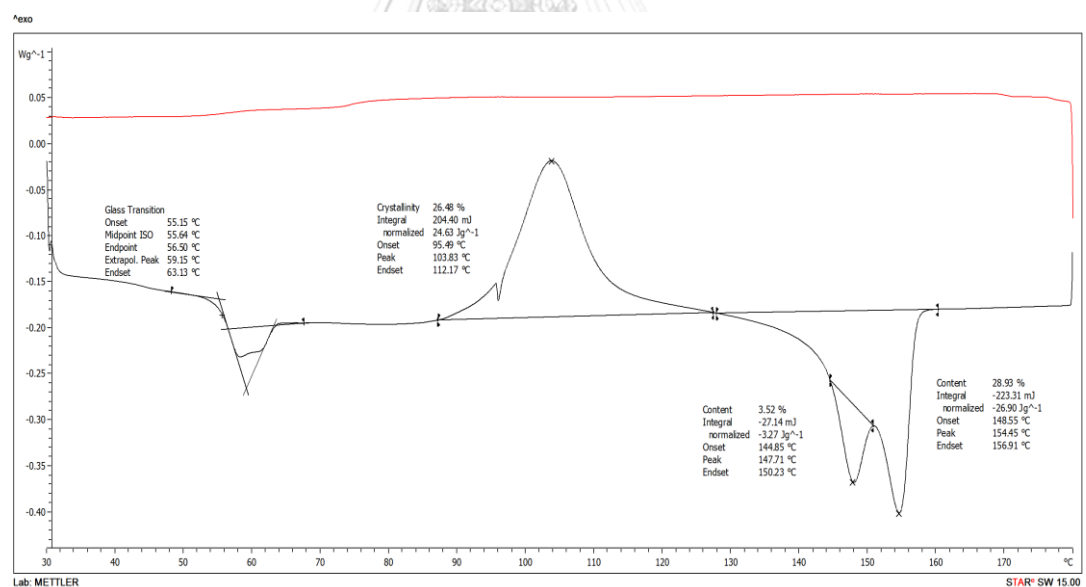
รูปที่ ข-2.1 DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 1%)



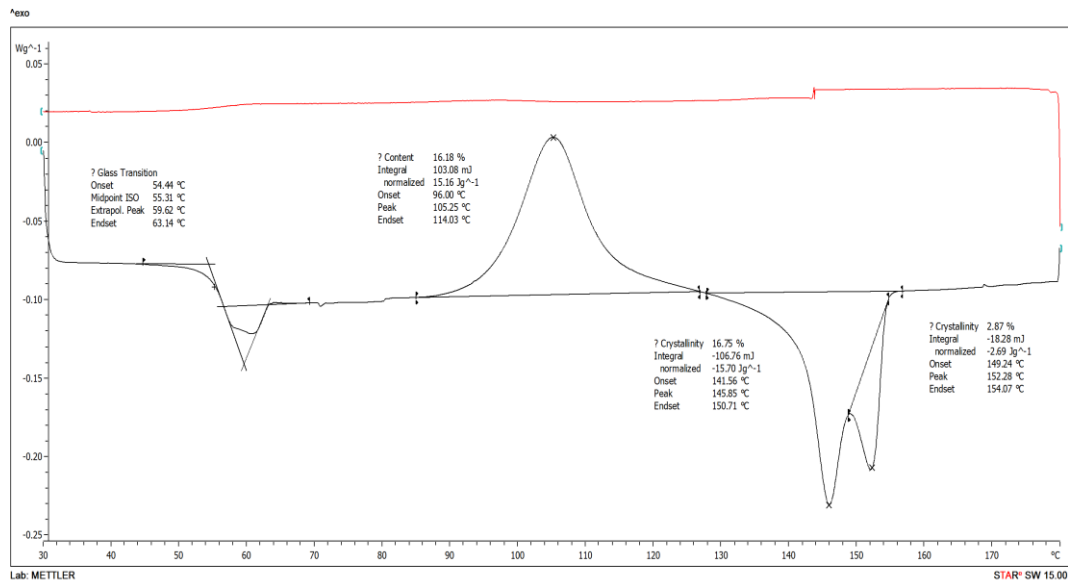
รูปที่ ข-2.2 DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 3%)



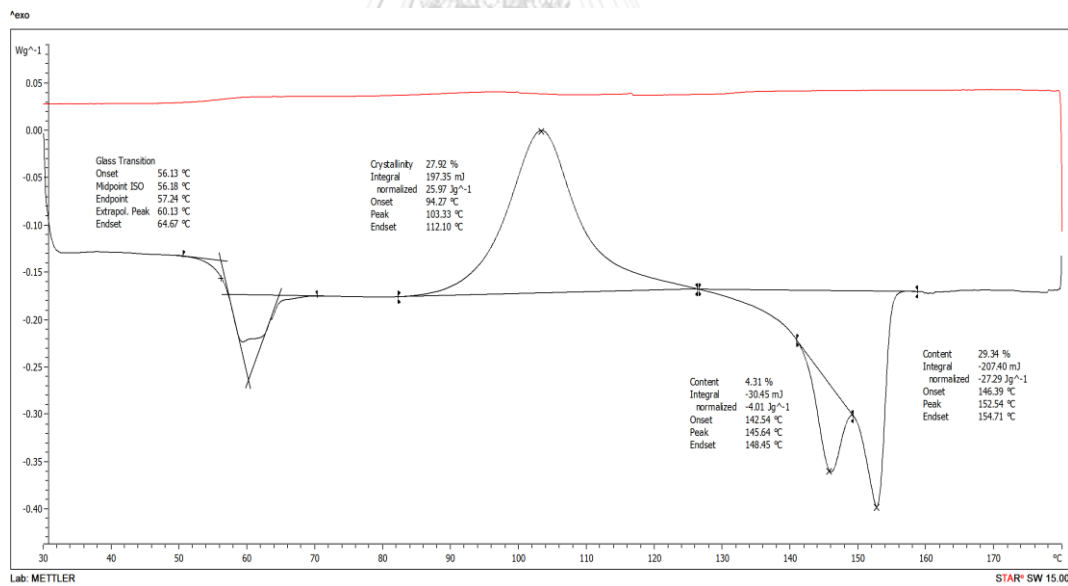
รูปที่ ข-2.3 DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 5%)



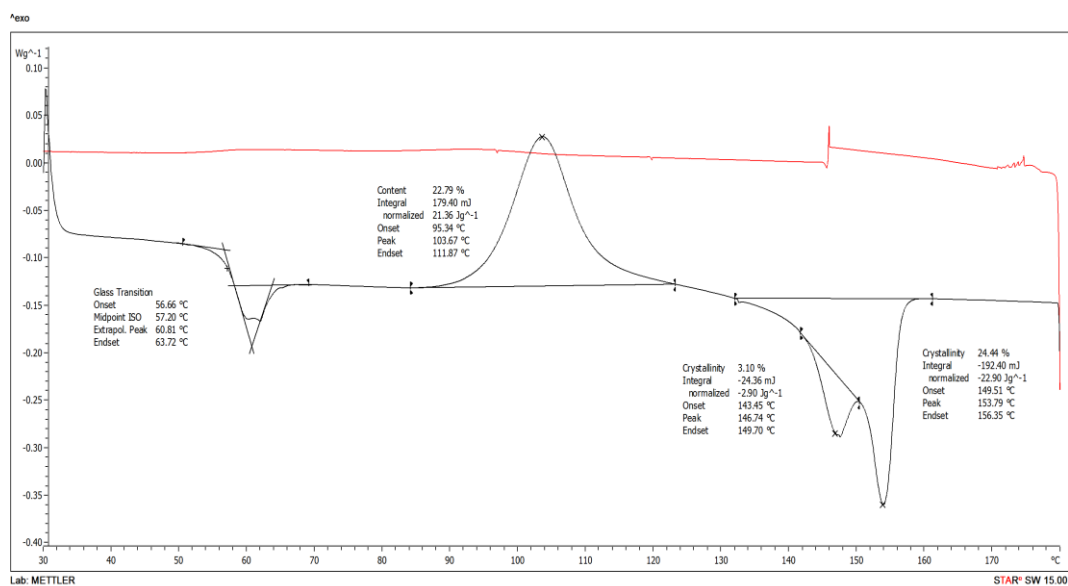
รูปที่ ข-2.4 DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 10%)



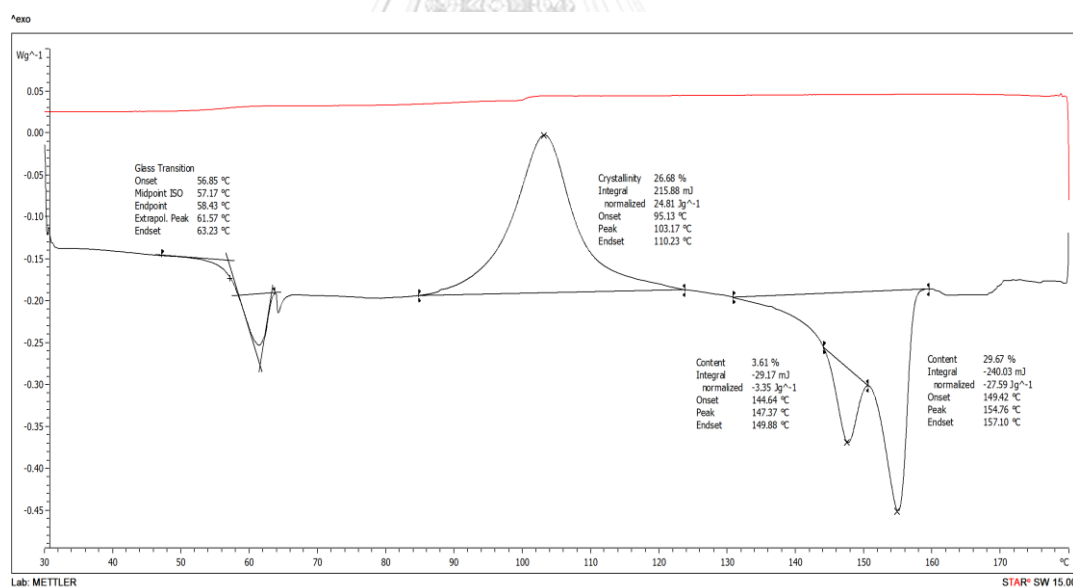
รูปที่ ข-2.5 DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 1%)



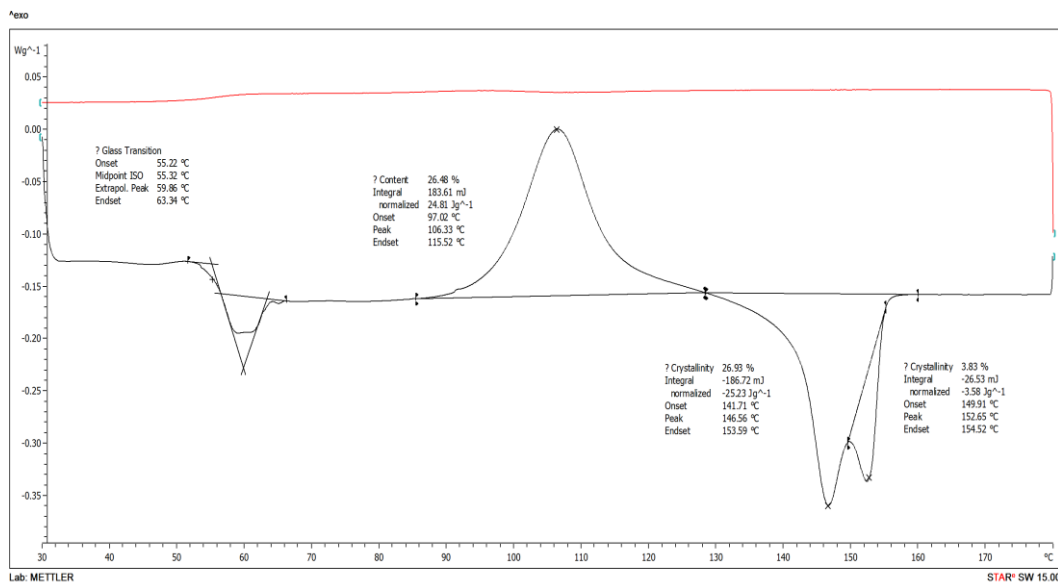
รูปที่ ข-2.6 DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 3%)



รูปที่ ข-2.7 DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 5%)



รูปที่ ข-2.8 DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 10%)



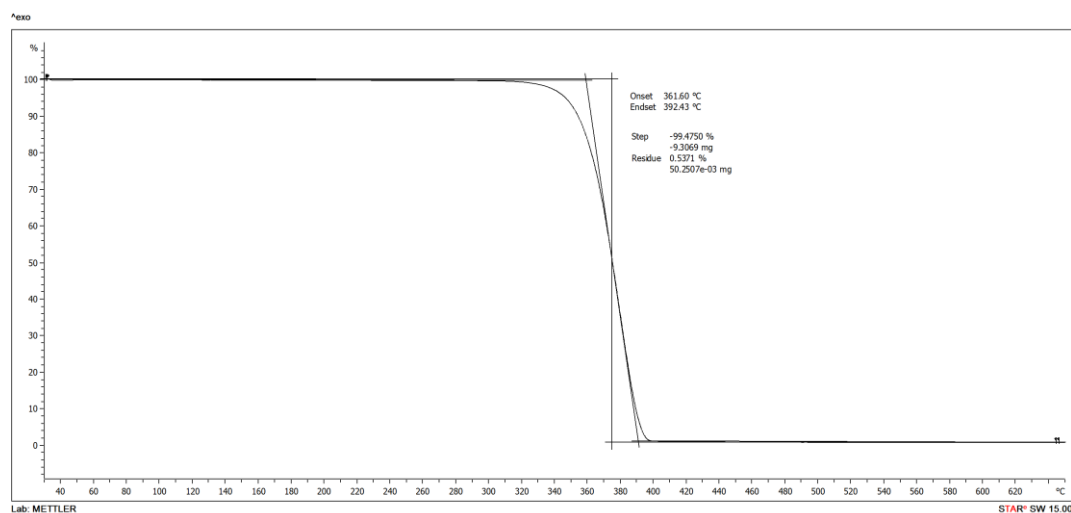
รูปที่ ข-2.9 DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน ไม่ได้เติม (PLA/CF 1%)



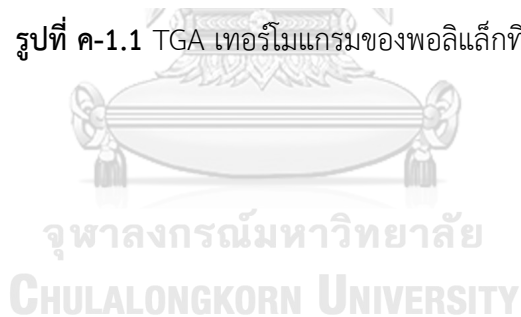
ภาคผนวก ค

TGA เทอร์โมแกรมและการคำนวณปริมาณน้ำหนักที่เหลือของพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

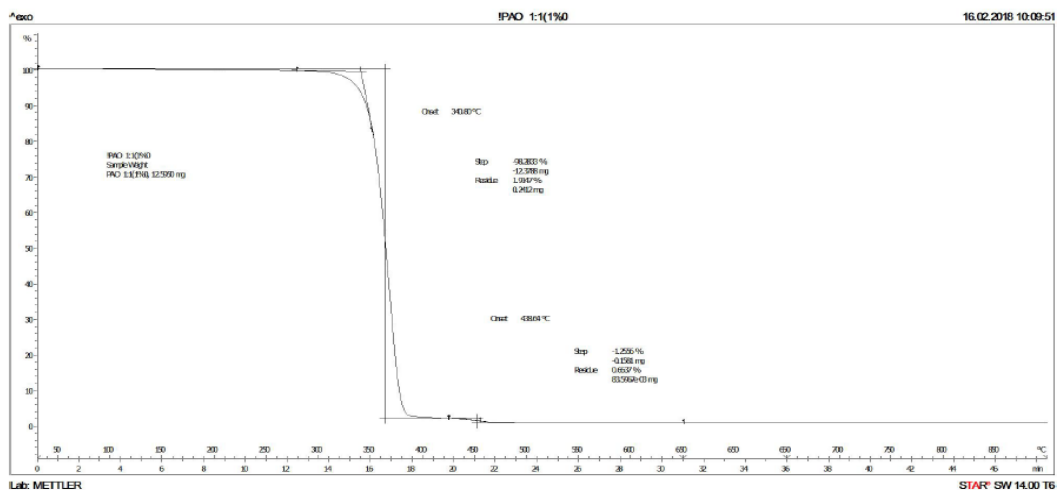
ค-1 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเล็กทิกแอซิด



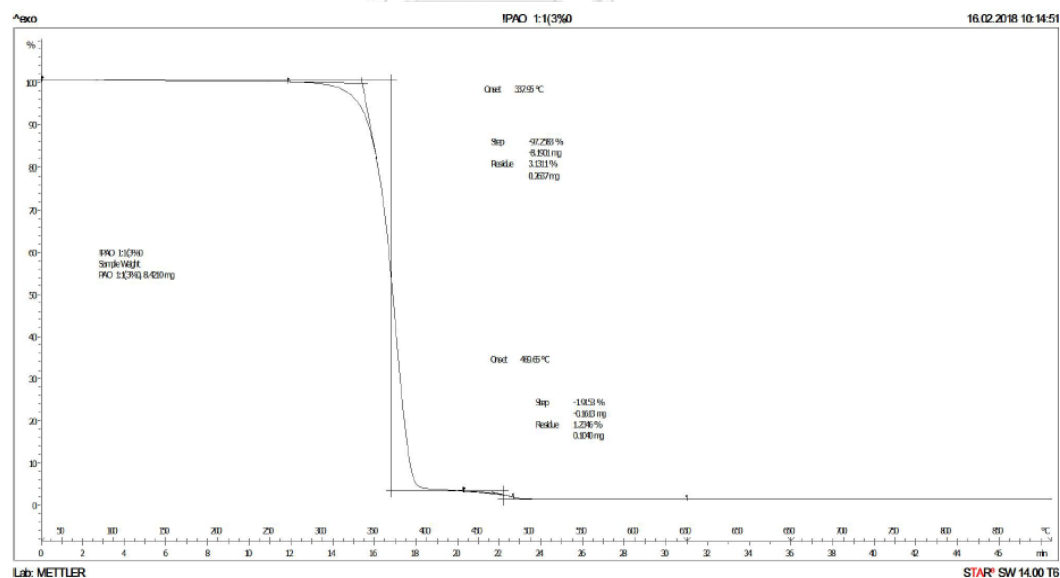
รูปที่ ค-1.1 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเล็กทิกแอซิด



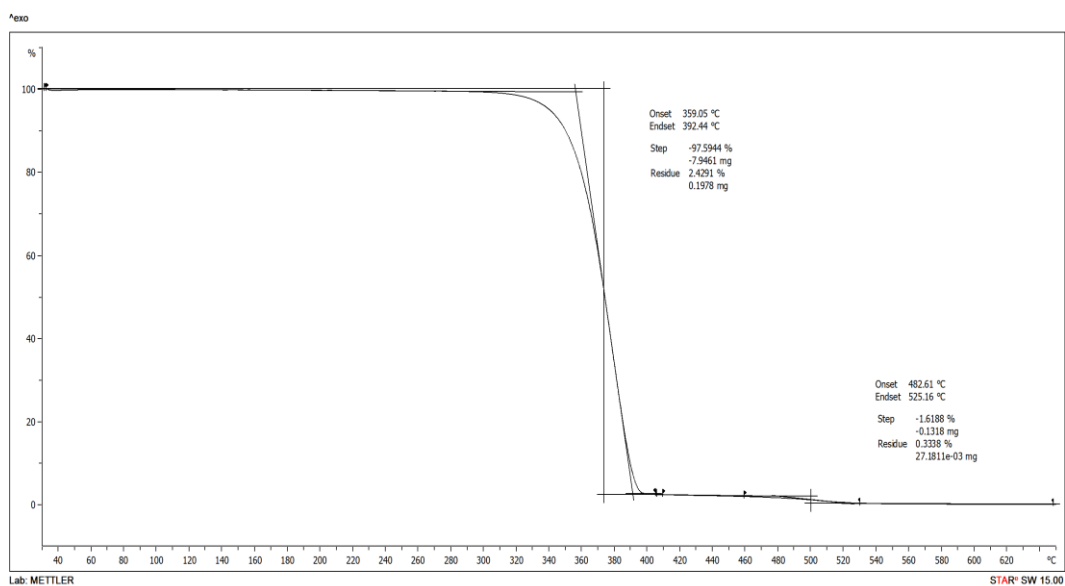
ค-2 TGA เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต



รูปที่ ค-2.1 TGA เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 1%)

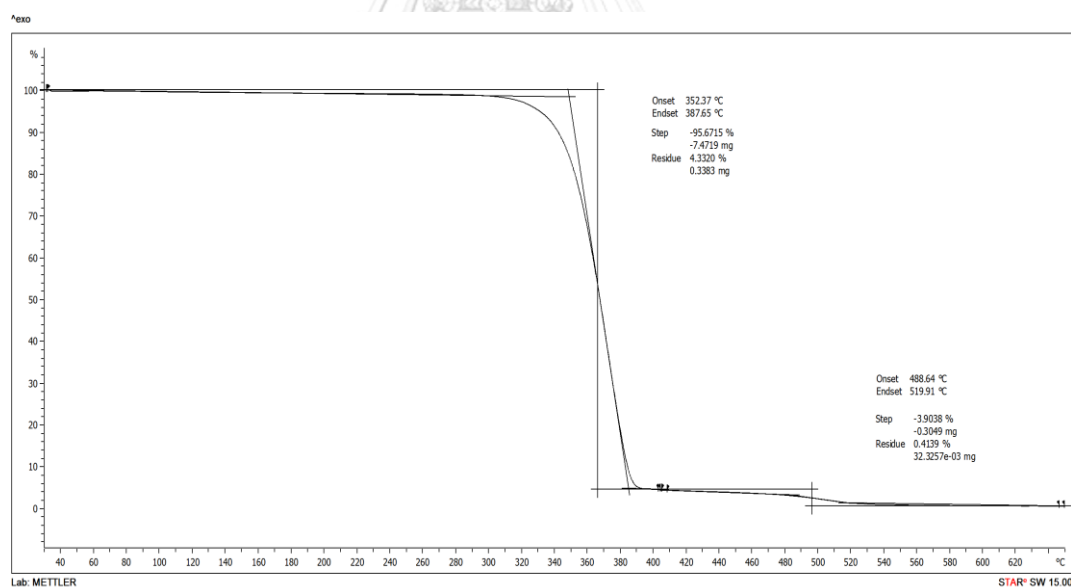


รูปที่ ค-2.2 TGA เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 3%)

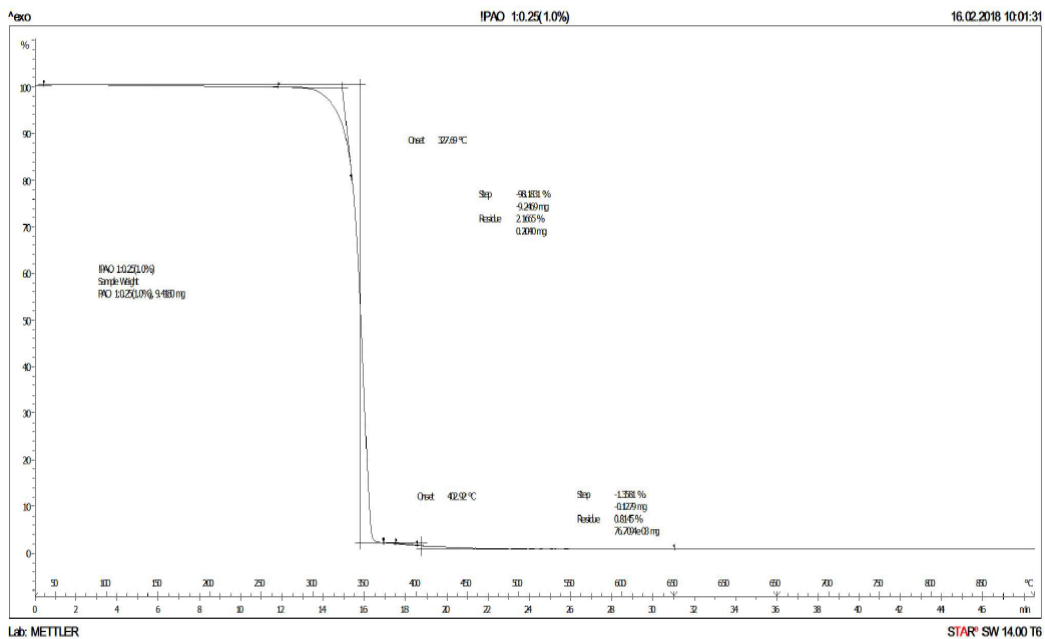


รูป

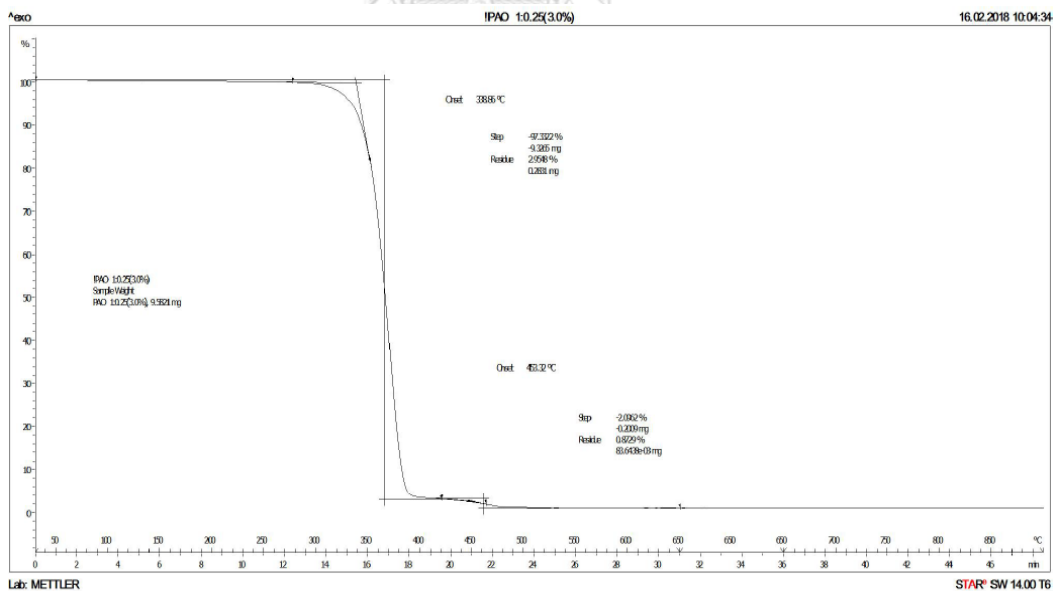
รูปที่ ค-2.3 TGA เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 5%)



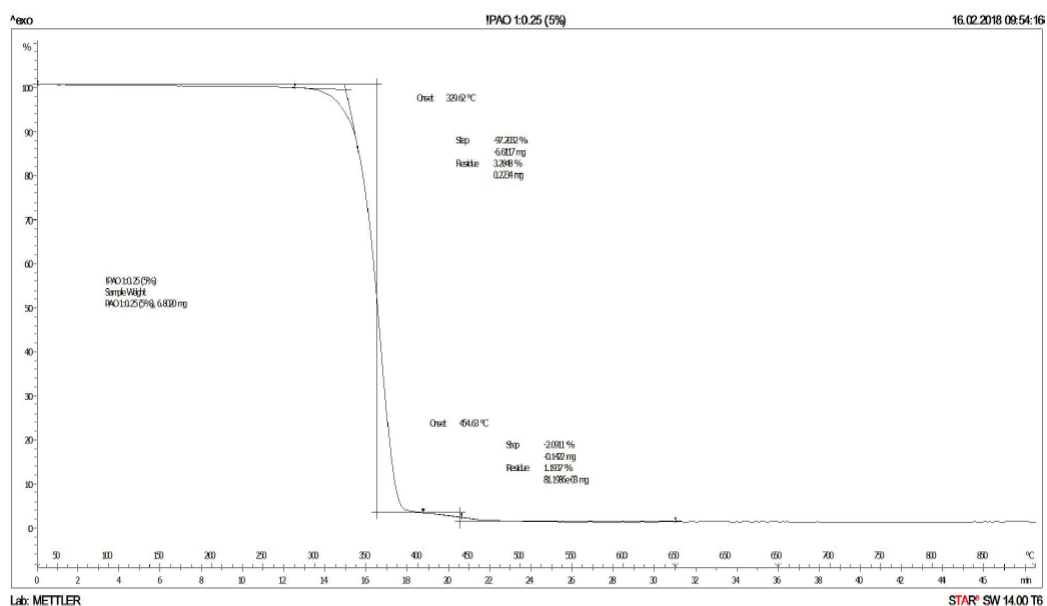
รูปที่ ค-2.4 TGA เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 10%)



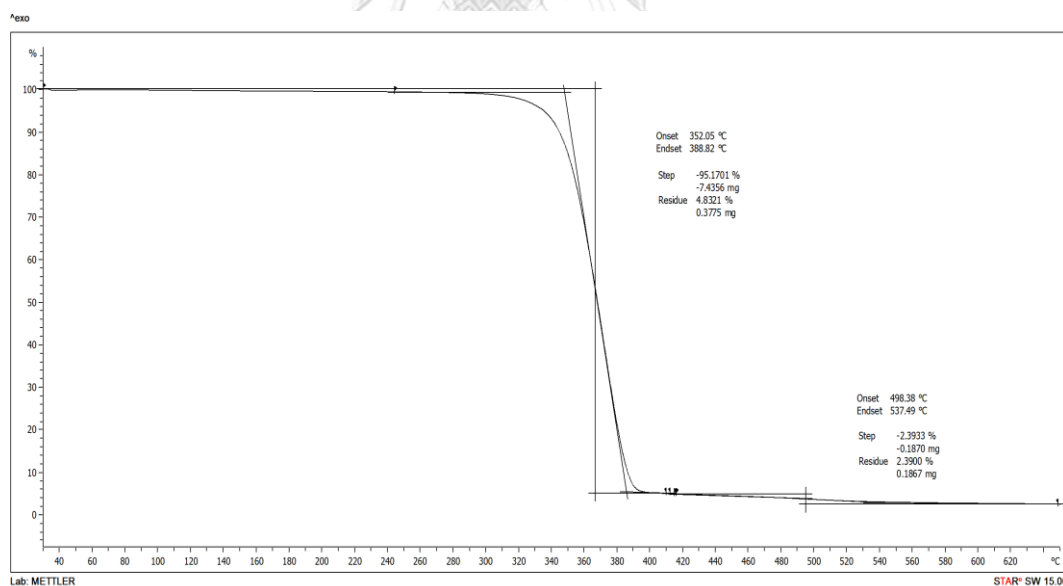
รูปที่ ค-2.5 TGA เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 1%)



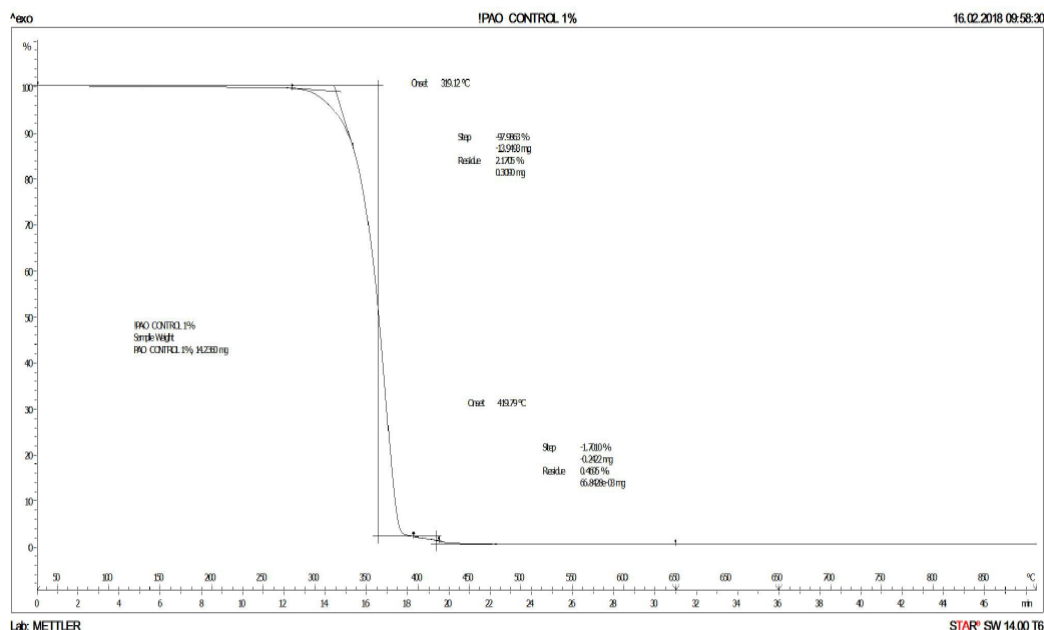
รูปที่ ค-2.6 TGA เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 3%)



รูปที่ ค-2.7 TGA เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 5%)



รูปที่ ค-2.8 TGA เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 10%)



รูปที่ ค-2.9 TGA เทอร์โมแกรมของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน ไม่ได้เติม (PLA/CF 1%)

ค-3 การคำนวณปริมาณน้ำหนักที่เหลือของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต

ค-3.1 การคำนวณปริมาณน้ำหนักที่เหลือของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 10%)

ปริมาณการเติมนาโนซิลิกา 50%(w/v) = 55g

น้ำหนักซิลิกาที่เหลือ = 27.5g

ปริมาณการเติมสารออร์แกโนไซเลนที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 = 150g

หาปริมาณน้ำหนักซิลิกอนไดออกไซด์ที่เหลือจากสารออร์แกโนไซเลน

$$\frac{150g}{346.62} = \frac{gSiO_2}{60}$$

$$gSiO_2 = 25.9650$$

ปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน = 27.5 + 25.9650

$$= 53.465g$$

ร้อยละปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนานอซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน

$$= \frac{53.465}{150+150+27.5+1350} \times 100 = 3.187\%$$

เพราะฉะนั้นพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นานอซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 จะต้องมีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนานอซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลนร้อยละ 3.187

ค-3.2 การคำนวณปริมาณน้ำหนักที่เหลือของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นานอซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 1%)

ชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นานอซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 เตรียมได้จากมาสเตอร์แบบซ์ที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นานอซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 ที่ปริมาณ 150 กรัม

จะได้ว่า 1500 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนานอซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน 3.187

150 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนานอซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน 0.3187

จากนั้นนำไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์

จะได้ว่า 1500 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนานอซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน 0.3187

100 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนานอซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน 0.0212

เพราะฉะนั้นพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นานอซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 จะต้องมีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนานอซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลนร้อยละ 0.0212

ค-3.3 การคำนวณปริมาณน้ำหนักที่เหลือของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วย เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 3%)

ชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 เตรียมได้จากมาสเตอร์แบบท์ที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 ที่ปริมาณ 450 กรัม

จะได้ว่า 1500 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกนโอไซเลน 3.187

450 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกนโอไซเลน 0.9561

จากนั้นนำไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์

จะได้ว่า 1500 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกนโอไซเลน 0.9561

100 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกนโอไซเลน 0.0637

เพราะฉะนั้นพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 จะต้องมีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกนโอไซเลนร้อยละ 0.0637

ค-3.4 การคำนวณปริมาณน้ำหนักที่เหลือของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วย เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 5%)

ชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 เตรียมได้จากมาสเตอร์แบบท์ที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 ที่ปริมาณ 750 กรัม

จะได้ว่า 1500 กรัม มีปริมาณน้ำหนัที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน

3.187

750 กรัม มีปริมาณน้ำหนัที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน

1.5935

จากนั้นนำไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์

จะได้ว่า 1500 กรัม มีปริมาณน้ำหนัที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน

1.5935

100 กรัม มีปริมาณน้ำหนัที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน

0.1062

เพราะฉะนั้นพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนัที่เซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 จะต้องมีปริมาณน้ำหนัที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลนร้อยละ 0.1062

ค-3.5 การคำนวณปริมาณน้ำหนัที่เหลือของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนัที่เซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 10%)

ปริมาณการเติมนาโนซิลิกา 50%(w/v) = 55g

น้ำหนัที่ซิลิกาที่เหลือ = 27.5g

ปริมาณการเติมสารออร์แกโนไซเลนที่อัตราส่วนน้ำหนัที่เซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 = 37.5g

หาปริมาณน้ำหนัที่ซิลิกอนไดออกไซด์ที่เหลือจากสารออร์แกโนไซเลน

$$\frac{37.5g}{346.62} = \frac{gSiO_2}{60}$$

$$gSiO_2 = 6.4 g$$

ปริมาณน้ำหนัที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน = 27.5 + 6.4
= 33.9g

ร้อยละปริมาณน้ำหนัที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน

$$= \frac{33.9}{37.5+150+27.5+1350} \times 100 = 2.166\%$$

เพราะฉะนั้นพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 จะต้องมีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลนร้อยละ 2.166

ค-3.2 การคำนวณปริมาณน้ำหนักที่เหลือของชิ้นงานพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 1%)

ชิ้นงานพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 เตรียมได้จากมาตรฐานแม่พิมพ์ที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 ที่ปริมาณ 150 กรัม

จะได้ว่า 1500 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน 2.166

150 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน 0.2166

จากนั้นนำไปผสมกับพอลิเล็กทิกแอซิดบริสุทธิ์

จะได้ว่า 1500 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน 0.2166

100 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน 0.0144

เพราะฉะนั้นพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 จะต้องมีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลนร้อยละ 0.0144

ค-3.3 การคำนวณปริมาณน้ำหนักที่เหลือของชิ้นงานพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 3%)

ชิ้นงานพอลิเอทิลีนทิกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 เตรียมได้จากมาสเตอร์แบบท์ที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 ที่ปริมาณ 450 กรัม

จะได้ว่า 1500 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกนโอไซเลน

2.166

450 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกนโอไซเลน

0.6498

จากนั้นนำไปผสมกับพอลิเอทิลีนทิกแอซิดบริสุทธิ์

จะได้ว่า 1500 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกนโอไซเลน

0.6498

100 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกนโอไซเลน

0.0433

เพราะฉะนั้นพอลิเอทิลีนทิกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 จะต้องมีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกนโอไซเลนร้อยละ 0.0433

ค-3.4 การคำนวณปริมาณน้ำหนักที่เหลือของชิ้นงานพอลิเอทิลีนทิกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 5%)

ชิ้นงานพอลิเอทิลีนทิกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 เตรียมได้จากมาสเตอร์แบบท์ที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 ที่ปริมาณ 750 กรัม

จะได้ว่า 1500 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกนโอไซเลน

2.166

750 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนาโนซิลิกาและสารออร์แกนโอไซเลน

1.083

จากนั้นนำไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์

จะได้ว่า 1500 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนานอซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน

1.083

100 กรัม มีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนานอซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลน

0.0722

เพราะฉะนั้นพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นานอซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดกซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 จะต้องมีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนานอซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลนร้อยละ 0.0722

ค-3.5 การคำนวณปริมาณน้ำหนักที่เหลือของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นานอซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดกซิลไตรเมทอกซีไซเลน ไม่ได้เติม (PLA/CF 1%)

ปริมาณการเติมนานอซิลิกา 50%(w/v) = 55g

น้ำหนักซิลิกาที่เหลือ = 27.5g

ร้อยละปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนานอซิลิกา

$$\frac{27.5}{15+27.5+1485} \times 100 = 1.8003\%$$

เพราะฉะนั้นพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นานอซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดกซิลไตรเมทอกซีไซเลน ไม่ได้เติม จะต้องมีปริมาณน้ำหนักที่เหลือจากการเติมนานอซิลิกาและสารออร์แกโนไซเลนร้อยละ 1.8003

ภาคผนวก ง

ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงและรูปภาพชิ้นงานของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอลิเมอร์ที่ใส่เซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลิเมอร์ที่ผ่านการตัดแปรและไม่ได้ตัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

ง-1 ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิด

ตาราง ง-1.1 ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิด

ตัวอย่าง	เดือนที่ 1 (%)	เดือนที่ 2 (%)	เดือนที่ 3 (%)
1	0.10	0.15	0.99
2	0.05	0.20	0.08
3	0.05	0.13	1.10
Average	0.07	0.16	0.72
SD	0.02	0.03	0.55

ง-2 ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอลิเมอร์ที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลิเมอร์

ตาราง ง-2.1 ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอลิเมอร์ที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลิเมอร์ ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตริเมทอกซีไฮดรอกซี (PLA/1:1 CF :HDTMS 1%)

ตัวอย่าง	เดือนที่ 1 (%)	เดือนที่ 2 (%)	เดือนที่ 3 (%)
1	0.25	0.40	0.91
2	0.31	0.37	1.17
3	0.12	0.37	1.30
Average	0.23	0.38	1.12
SD	0.09	0.018	0.19

ตาราง ง-2.2 ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 3%)

ตัวอย่าง	เดือนที่ 1 (%)	เดือนที่ 2 (%)	เดือนที่ 3 (%)
1	0.23	0.54	1.09
2	0.44	0.83	2.63
3	0.16	0.39	1.50
Average	0.28	0.59	1.74
SD	0.14	0.22	0.79

ตาราง ง-2.3 ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 5%)

ตัวอย่าง	เดือนที่ 1 (%)	เดือนที่ 2 (%)	เดือนที่ 3 (%)
1	0.81	2.41	3.95
2	0.80	1.95	4.31
3	0.65	1.57	4.69
Average	0.75	1.98	4.32
SD	0.08	0.42	0.36

ตาราง ง-2.4 ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 10%)

ตัวอย่าง	เดือนที่ 1 (%)	เดือนที่ 2 (%)	เดือนที่ 3 (%)
1	0.43	1.53	3.62
2	0.47	1.72	3.34
3	0.42	2.19	4.64
Average	0.44	1.81	3.87
SD	0.02	0.34	0.68

ตาราง ง-2.5 ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน ไม่ได้เติม (PLA/CF 1%)

ตัวอย่าง	เดือนที่ 1 (%)	เดือนที่ 2 (%)	เดือนที่ 3 (%)
1	0.46	1.53	5.54
2	0.25	3.84	5.35
3	0.10	2.64	7.52
Average	0.27	2.67	6.13
SD	0.18	1.15	1.20

ตาราง ง-2.6 ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 1%)

ตัวอย่าง	เดือนที่ 1 (%)	เดือนที่ 2 (%)	เดือนที่ 3 (%)
1	0.05	0.59	1.59
2	0.26	0.55	1.05
3	0.09	0.19	1.33
Average	0.14	0.44	1.32
SD	0.11	0.21	0.27

ตาราง ง-2.7 ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 3%)

ตัวอย่าง	เดือนที่ 1 (%)	เดือนที่ 2 (%)	เดือนที่ 3 (%)
1	0.78	1.73	1.87
2	0.69	1.38	2.53
3	0.50	0.92	3.67
Average	0.66	1.34	2.69
SD	0.13	0.40	0.90

ตาราง ง-2.8 ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 5%)

ตัวอย่าง	เดือนที่ 1 (%)	เดือนที่ 2 (%)	เดือนที่ 3 (%)
1	1.90	3.41	7.80
2	1.27	3.27	7.62
3	1.15	2.99	7.80
Average	1.44	3.22	7.74
SD	0.399	0.21	0.10

ตาราง ง-2.9 ร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนักเซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 10%)

ตัวอย่าง	เดือนที่ 1 (%)	เดือนที่ 2 (%)	เดือนที่ 3 (%)
1	2.17	6.59	10.67
2	1.85	7.73	10.67
3	1.15	7.30	12.53
Average	1.73	7.21	11.29
SD	0.52	0.57	1.07

ภาคผนวก จ

ร้อยละการดูดซึม น้ำของพอลิเอทิลีนกึ่งผลึกและพอลิเอทิลีนกึ่งผลึกที่ใส่ซิลิกาคอมพอสิตที่ใส่ซิลิกาคอมพอสิตที่ผ่านการดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

จ-1 ร้อยละการดูดซึม น้ำของชิ้นงานพอลิเอทิลีนกึ่งผลึก

ตาราง จ-1.1 ร้อยละการดูดซึม น้ำของชิ้นงานพอลิเอทิลีนกึ่งผลึก

ตัวอย่าง	2 นาที	4 นาที	6 นาที	8 นาที	10 นาที	30 นาที	60 นาที	120 นาที	180 นาที	1440 นาที
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.28
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12
Average	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.13
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.14

จ-2 ร้อยละการดูดซึม น้ำของชิ้นงานพอลิเอทิลีนกึ่งผลึกที่มีการผสมด้วยเซลลูลอส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต

ตาราง จ-2.1 ร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานพอลิเอทิลีนกึ่งผลึกที่มีการผสมด้วยเซลลูลอส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนัก

เซลลูลอสต่อเอทิลีนไดเรทเมทอกรีไซเคิล 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 1%)

ตัวอย่าง	2 นาที	4 นาที	6 นาที	8 นาที	10 นาที	30 นาที	60 นาที	120 นาที	180 นาที	1440 นาที
1	0.12	0.24	0.36	0.48	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
2	0.00	0.14	0.14	0.42	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
3	0.12	0.25	0.37	0.37	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
Average	0.08	0.21	0.29	0.42	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
SD	0.07	0.06	0.13	0.05	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

ตาราง จ-2.2 ร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนัก เซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 3%)

ตัวอย่าง	2 นาที	4 นาที	6 นาที	8 นาที	10 นาที	30 นาที	60 นาที	120 นาที	180 นาที	1440 นาที
1	0.27	0.55	0.69	0.69	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
2	0.13	0.41	0.55	0.83	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
3	0.00	0.26	0.40	0.66	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Average	0.13	0.41	0.54	0.73	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
SD	0.13	0.14	0.14	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

ตาราง จ-2.3 ร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนัก เซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 5%)

ตัวอย่าง	2 นาที	4 นาที	6 นาที	8 นาที	10 นาที	30 นาที	60 นาที	120 นาที	180 นาที	1440 นาที
1	0.19	0.28	0.47	0.76	0.76	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
2	0.39	0.65	0.78	0.91	0.91	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
3	0.64	0.80	0.96	1.12	1.12	1.28	1.28	1.28	1.28	1.28
Average	0.40	0.58	0.74	0.93	0.93	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
SD	0.22	0.26	0.24	0.18	0.18	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22

ตาราง จ-2.4 ร้อยละการดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอลิซิตีที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลิซิตี ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนัก เซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:1 (PLA/1:1 CF :HDTMS 10%)

ตัวอย่าง	2 นาที	4 นาที	6 นาที	8 นาที	10 นาที	30 นาที	60 นาที	120 นาที	180 นาที	1440 นาที
1	0.38	0.48	0.67	0.77	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
2	0.40	0.51	0.71	0.81	0.91	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
3	0.41	0.62	0.72	0.93	1.03	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
Average	0.40	0.53	0.70	0.84	0.97	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
SD	0.01	0.07	0.02	0.08	0.06	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14

ตาราง จ-2.5 ร้อยละการดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอลิซิตีที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลิซิตี ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนัก เซลลูโลสต่อเฮกซะเดคซิลไตริเมทอกซีไซเลน ไม่ได้เติม (PLA/CF 1%)

ตัวอย่าง	2 นาที	4 นาที	6 นาที	8 นาที	10 นาที	30 นาที	60 นาที	120 นาที	180 นาที	1440 นาที
1	0.13	0.26	0.52	0.66	0.66	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
2	0.12	0.60	0.60	0.72	0.96	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
3	0.11	0.35	0.35	0.59	0.59	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
Average	0.12	0.40	0.49	0.66	0.74	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
SD	0.00	0.17	0.12	0.06	0.19	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33

ตาราง จ-2.6 ร้อยละการดูดซึม น้ำของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอลิสม์ที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลิสม์ ร้อยละ 1 ที่อัตราส่วนน้ำหนัก เซลลูโลสต่อเฮกซะเดกซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 1%)

ตัวอย่าง	2 นาที	4 นาที	6 นาที	8 นาที	10 นาที	30 นาที	60 นาที	120 นาที	180 นาที	1440 นาที
1	0.34	0.45	0.45	0.57	0.57	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
2	0.44	0.59	0.59	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
3	0.00	0.09	0.19	0.19	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
Average	0.26	0.38	0.41	0.50	0.53	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
SD	0.23	0.25	0.20	0.27	0.22	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31

ตาราง จ-2.7 ร้อยละการดูดซึม น้ำของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอลิสม์ที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอลิสม์ ร้อยละ 3 ที่อัตราส่วนน้ำหนัก เซลลูโลสต่อเฮกซะเดกซิลไตริเมทอกซีไซเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 3%)

ตัวอย่าง	2 นาที	4 นาที	6 นาที	8 นาที	10 นาที	30 นาที	60 นาที	120 นาที	180 นาที	1440 นาที
1	0.27	0.41	0.55	0.83	0.97	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
2	0.26	0.53	0.80	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
3	0.28	0.28	0.42	0.56	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Average	0.27	0.41	0.59	0.78	0.92	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
SD	0.00	0.12	0.19	0.19	0.06	0.13	0.13	0.134	0.13	0.13

ตาราง จ-2.8 ร้อยละการดูดซึม น้ำของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนน้ำหนัก เซลลูโลสต่อเอทกษะไตรเมทอกซีไฮเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 5%)

ตัวอย่าง	2 นาที	4 นาที	6 นาที	8 นาที	10 นาที	30 นาที	60 นาที	120 นาที	180 นาที	1440 นาที
1	0.44	0.55	0.55	0.99	1.21	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
2	0.24	0.36	0.60	0.84	1.08	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92
3	0.45	0.57	0.80	0.80	1.03	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60
Average	0.38	0.49	0.65	0.88	1.11	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69
SD	0.12	0.11	0.13	0.10	0.09	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

ตาราง จ-2.9 ร้อยละการดูดซึม น้ำของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่มีการผสมด้วยเซลลูโลส/นาโนซิลิกาคอมพอสิต ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำหนัก เซลลูโลสต่อเอทกษะไตรเมทอกซีไฮเลน 1:0.25 (PLA/1:0.25 CF :HDTMS 10%)

ตัวอย่าง	2 นาที	4 นาที	6 นาที	8 นาที	10 นาที	30 นาที	60 นาที	120 นาที	180 นาที	1440 นาที
1	0.57	0.67	0.86	0.96	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
2	0.40	0.51	0.71	0.81	0.91	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
3	0.31	0.62	0.72	0.93	1.03	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
Average	0.43	0.60	0.76	0.90	1.03	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
SD	0.13	0.08	0.08	0.07	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติธร เลิศพิรุณ เกิดเมื่อวันที่ 14 มีนาคม 2537 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปี พ.ศ. 2558 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559 จนสำเร็จในปี 2560

การนำเสนอผลงานจากวิทยานิพนธ์ ดังนี้

นำเสนอผลงานวิจัยแบบโปสเตอร์ในหัวข้อ Preparation of Poly(lactic acid) Filled with Cellulose/SiO₂ Composite จัดขึ้นโดย งาน PURE AND APPLIED CHEMISTRY INTERNATIONAL CONFERENCE 2018 วันที่ 7 กุมภาพันธ์ – 9 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 ศูนย์ประชุมนานาชาติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี สงขลา ประเทศไทย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY