

พฤติกรรมการย่อยสลายทางชีวภาพและความเข้ากันได้ของพอลิแล็กติกแอซิดที่เติมแต่งด้วยแอซิที
เลตเซลลูโลส



นายธนา บุญนาค

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIODEGRADABLE BEHAVIOR AND COMPATIBILITY OF POLY(LACTIC ACID) FILLED WITH
ACETYLATED CELLULOSE



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

Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

5871963123 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS: POLYLACTIC ACID, ACETYLATED CELLULOSE, BACILLUS LICHENIFORMIS, BIOPLASTIC, BIODEGRADABLE

THANA BOONNAK: BIODEGRADABLE BEHAVIOR AND COMPATIBILITY OF POLY(LACTIC ACID) FILLED WITH ACETYLATED CELLULOSE. ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. KAWEE SRIKULKIT, 59 pp.

Acetylated cellulose (ACC) was synthesized by acetylation of cellulose gel with vinyl acetate. The optimum acetylation was monitored by FTIR analysis which showed the unique absorbance peak at 1740 cm^{-1} , indicating the presence of acetyl group on cellulose backbone as a result of acetylation reaction. The peak intensity increased with an increase in vinyl acetate to cellulose mole ratio. The optimum peak intensity was reached when 12: 1 mole ratio was employed. ACC synthesized using 12: 1 mole ratio was employed for the preparation of PLA/acetylated cellulose composites containing 1, 3 and 5 % (w/w) of ACC by melt-mixing using a twin-screw extruder. Mechanical properties evaluation showed that tensile strength and modulus were improved in case of PLAACC1 due to the optimum dispersion of ACC. These properties were dropped when the ACC content increased due to the agglomeration problem. It could be concluded that ACC was found to enhance mechanical properties of PLA only when its dispersibility was achieved particularly at low percent loadings. The soil burial test in the presence of *Bacillus Licheniformis* revealed that the degradation was observed after 90 days; the more the ACC loading as in case of PLAACC5 film the more the number of cracks and holes. On the other hand, neat samples and samples in the absence of *Bacillus Licheniformis* hardly changed in 90 days. The degradation mechanism was proposed that due to water absorption ability of ACC the enzymatic hydrolysis of ACC led to the formation of lactic acid which consequently catalyzed the hydrolytic degradation of PLA. The hydrolytic degradation produced carboxylic acid end group which further accelerated the faster degradation rate.

Department: Materials Science Student's Signature

Field of Study: Applied Polymer Science Advisor's Signature
and Textile Technology

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยคามอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มัณฑนา โอภาประกาศิต ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์ และ รองศาสตราจารย์.เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตรี ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และได้เสนอแนวทางการแก้ไขและปรับปรุงให้วิทยานิพนธ์ครั้งนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่น้อง และ เพื่อนๆ ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำส่งเสริมและเป็นกำลังใจให้ทุกๆ ด้านด้วยดีเสมอมา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พอลิแล็กติกแอซิด.....	3
2.1.1 โครงสร้าง องค์ประกอบและการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด.....	3
2.1.2 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด	4
2.1.3 การขึ้นรูปของพอลิแล็กติกแอซิด	6
2.1.4 การเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิด.....	7
2.2 เซลลูโลส.....	7
2.3 เซลลูโลสแอซีเตต.....	8
2.4 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	10
2.4.1 การทำปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดคาร์บอกซิลิก	11
2.4.2 การทำปฏิกริยาโดยใช้สารแอนไฮไดรต์	11
2.4.3 การทำปฏิกริยาโดยใช้สารไวนิลแอซีเตต	12
2.5 พอลิเมอร์ผสม	12

2.5.1	สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม	13
2.5.2	กระบวนการตัดแปรรพอลิเมอร์ผสมให้เข้ากันได้.....	14
2.6	พอลิเมอร์คอมพอสิต	14
2.7	การย่อยสลายของพลาสติก	16
2.7.1	การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)	16
2.7.2	การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation).....	17
2.7.3	การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation).....	17
2.7.4	การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (Hydrolysis Degradation).....	17
2.7.5	การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)	18
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย	24
3.1	วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.4	ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	25
3.4.1	การเตรียมเซลลูโลสเจลโดยเทคนิคการละลายและตกตะกอน.....	25
3.4.2	การเตรียมแอซิติเลตเซลลูโลสที่มีระดับของการแทนที่ต่างๆ	25
3.4.3	เทคนิคการวิเคราะห์แอซิติเลตเซลลูโลส	26
3.4.4	การวิเคราะห์ระดับการแทนที่ของแอซิติเลตเซลลูโลส (Degree of substitution) ด้วยเทคนิคการไทเทรต	27
3.4.5	การเตรียมแอซิติเลตเซลลูโลสสำหรับนำไปใช้ผสมกับพอลิแล็กติกแอซิด	27
3.4.6	การผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับแอซิติเลตเซลลูโลสด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่	28
3.4.7	การขึ้นรูปฟิล์มสุตรผสม	28

3.4.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล(mechanical properties)	29
3.4.9 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายของพอลิแล็กติกสูตรผสม.....	29
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	30
4.1 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	30
4.1.1 เซลลูโลสเจลาโดยเทคนิคการละลายและตกตะกอน	30
4.1.2 การวิเคราะห์แอสซิติเลตเซลลูโลสด้วยเทคนิคเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)	31
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ระดับการแทนที่ของแอสซิติเลตเซลลูโลส (Degree of Substitution, DS) ด้วยเทคนิคการไทเทรต.....	32
4.1.4 ผลการวิเคราะห์เข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอสซิติลกับแอสซิติเลตเซลลูโลสบนพอลิแล็กติกแอสซิติลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM).....	33
4.1.5 ผลทดสอบสมบัติเชิงกล	34
4.1.6 ผลทดสอบการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอสซิติลสูตรผสมโดยวิธีฝังกลบ	38
4.1.7 ผลทดสอบการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอสซิติลสูตรผสมโดยการทดสอบร้อยละน้ำหนักที่หายไป (Weight loss).....	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	43
รายการอ้างอิง	45
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก.....	51
ภาคผนวก ข.....	53
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	59

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเซลลูโลสกับไวนิลแอสีเทต.....	26
ตารางที่ 3.2	อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและแอซิทีเลตเซลลูโลส	28
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์ระดับการแทนที่ของแอซิทีเลตเซลลูโลส.....	33
ตารางที่ 4.2	สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด (Neat PLA) และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลสในสัดส่วนร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก (PLAACC1, PLAACC3 และ PLAACC5 ตามลำดับ).....	36
ตารางที่ 4.3	ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของฟิล์มสูตรผสมที่ทำการฝังกลบในดินควบคุม ที่ระยะเวลาต่างๆ	42
ตารางที่ 4.4	ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของฟิล์มสูตรผสมที่ทำการฝังกลบในดินผสมแบคทีเรีย Bacillus licheniformis ที่ระยะเวลาต่างๆ	42
ตาราง ก-1	สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด(Neat PLA)ตาราง ข- 1	51
ตาราง ก-2	สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลสร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PLAACC1).....	51
ตาราง ก-3	สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลสร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (PLAACC3).....	52
ตาราง ก-4	สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลสร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PLAACC5).....	52
ตาราง ข-1	น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดฝังกลบในดินควบคุม	53
ตาราง ข-2	น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดฝังกลบในดินผสม Bacillus licheniformis	53

ตาราง ข-3	น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลสร้อยละ 1 โดยมวล (PLAACC1) ฝังกลบในดินควบคุม.....	54
ตาราง ข-4	น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลสร้อยละ 1 โดยมวล (PLAACC1) ฝังกลบในดินผสม <i>Bacillus licheniformis</i>	54
ตาราง ข-5	น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลสร้อยละ 3 โดยมวล (PLAACC3) ฝังกลบในดินควบคุม.....	55
ตาราง ข-6	น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลสร้อยละ 3 โดยมวล (PLAACC3) ฝังกลบในดินผสม <i>Bacillus licheniformis</i>	55
ตาราง ข-7	น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลสร้อยละ 5 โดยมวล (PLAACC5) ฝังกลบในดินควบคุม.....	56
ตาราง ข-8	น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลสร้อยละ 5 โดยมวล (PLAACC5) ฝังกลบในดินผสม <i>Bacillus licheniformis</i>	56

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบสามมิติของกรดแล็กติก..... 3

รูปที่ 2.2 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดจากกรดแล็กติกชนิดแอลและดี..... 4

รูปที่ 2.3 โครงสร้างเซลลูโลส 7

รูปที่ 2.4 โครงสร้างเซลลูโลสแอซีเทต 9

รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาอะซิทิเลชันของแป้ง 11

รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดปฏิกริยาอะซิทิเลชันของแป้งโดยใช้สารไวนิลแอซีเทต 12

รูปที่ 2.7 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเมอร์ A (____) และ พอลิเมอร์ B..... 13

รูปที่ 2.8 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง A และ B ที่เติมสารช่วยผสมแบบ (ก) พอลิเมอร์ร่วมแบบ
บล็อก 14

รูปที่ 4.1 เซลลูโลสเจล..... 31

รูปที่ 4.2 FTIR สเปกตรัมของเซลลูโลส (a) และ แอซิติเลตเซลลูโลสที่เตรียมจากอัตราส่วน
เซลลูโลส : ไวนิลแอซิติเตดสัดส่วนต่างๆ 1:3 (b) 1:6 (c) 1:9 (d) และ 1:12 (e)..... 32

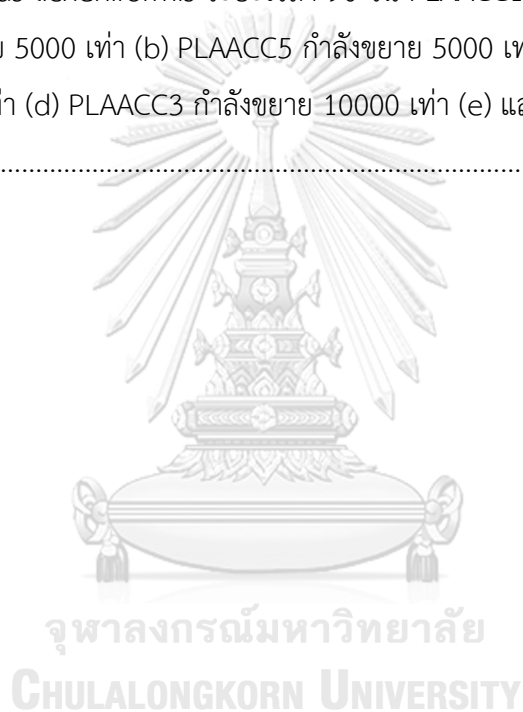
รูปที่ 4.3 สันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดและฟิล์มสูตรผสม PLAACC1 ที่กำลังขยาย
ต่างๆ (a) PLAACC3 กำลังขยาย 100 เท่า (b) PLAACC5 กำลังขยาย 100 เท่า (c) PLAACC1
กำลังขยาย 10000 เท่า (d) PLAACC3 กำลังขยาย 10000 เท่า (e) และ PLAACC5 กำลังขยาย
10000 เท่า (f)..... 34

รูปที่ 4.4 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด (Neat PLA) และฟิล์มพอลิแล็กติก
แอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสในสัดส่วนร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก (PLAACC1, PLAACC3
และ PLAACC5 ตามลำดับ)..... 36

รูปที่ 4.5 ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด (Neat PLA) และฟิล์มพอลิ
แล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสในสัดส่วนร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก (PLAACC1,
PLAACC3 และ PLAACC5 ตามลำดับ)..... 37

รูปที่ 4.6 ค่ามอดุลัสของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด (Neat PLA) และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแ
อซิติเลตเซลลูโลสในสัดส่วนร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก (PLAACC1, PLAACC3 และ
PLAACC5 ตามลำดับ)..... 37

- รูปที่ 4.7** ภาพถ่ายของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดสูตรผสมในดินควบคุมที่ระยะเวลา 90 วัน Neat PLA (a) PLAACC1 (b) PLAACC3 (c) PLAACC5 (d) และภาพถ่ายของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดสูตรผสมในดินผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* Neat PLA (e) PLAACC1 (f) PLAACC3 (g) และ PLAACC5 (h).....39
- รูปที่ 4.8** สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดสูตรผสมกำลังขยาย 5000 เท่า ที่ผ่านการฝังกลบในดินควบคุมในระยะเวลา 90 วัน PLAACC1 (a) PLAACC3 (b) และ PLAACC5 (c)40
- รูปที่ 4.9** สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดสูตรผสมที่ผ่านการย่อยสลายในดินที่ทำการผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* ระยะเวลา 90 วัน PLAACC1 กำลังขยาย 5000 เท่า (a) PLAACC3 กำลังขยาย 5000 เท่า (b) PLAACC5 กำลังขยาย 5000 เท่า (c) PLAACC1 กำลังขยาย 10000 เท่า (d) PLAACC3 กำลังขยาย 10000 เท่า (e) และ PLAACC5 กำลังขยาย 10000 เท่า (f).....40



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พอลิแล็กติกแอซิดมีแนวโน้มถูกนำมาใช้ทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียมมากขึ้นเรื่อยๆ ในปัจจุบัน เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความใส แข็งแรง ทนทาน เทียบเท่ากับพลาสติกจากปิโตรเลียม ด้วยสมบัติที่แข็งแรงทนทานสูงทำให้พอลิแล็กติกแอซิดในทางค้าในปัจจุบันไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดในปัจจุบันมีความเป็นผลึกสูง มีความสามารถในการดูดน้ำได้ต่ำมาก ทำให้อัตราการปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยน้ำช้ามาก และทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไลติกดีเกรเดชัน (hydrolytic degradation) เกิดขึ้นช้าตามไปด้วย จึงทำให้พอลิแล็กติกแอซิดไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ดังที่พบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และตามด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลติกดีเกรเดชันได้เอง เนื่องจากพอลิเมอร์ตัวนี้มีความเป็นผลึกที่ต่ำกว่าจึงดูดน้ำได้ดีกว่า ดังนั้นปัจจัยหลักอันดับแรกที่ทำให้พอลิเมอร์สามารถย่อยสลายตัวเองได้เองตามธรรมชาติคือต้องมีสมบัติในการดูดน้ำได้ เช่น แป้ง หรือ เซลลูโลส เป็นต้น หนึ่งในวิธีการที่จะช่วยทำให้พอลิแล็กติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ คือการเตรียมพอลิเมอร์ผสม เช่น พอลิแล็กติกแอซิดผสมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแล็กติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และ พอลิแล็กติกแอซิดผสมเซลลูโลส (ข้อสังเกตคือ เซลลูโลสอะซิเตตเป็นพอลิเมอร์ที่ตัดแปรจากพอลิเมอร์ชีวภาพและมีความเข้ากันได้ดีกับพอลิแล็กติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสมบัติความยืดหยุ่นดีขึ้น แต่เซลลูโลสอะซิเตตมีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำจึงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ช้า ผลที่ตามมาคือปฏิกิริยาไฮโดรไลติกดีเกรเดชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาเร่งการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดก็จะช้าตามไปด้วย ดังนั้นการผสมเซลลูโลสอะซิเตตจึงไม่ได้ช่วยเร่งการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดได้เองตามธรรมชาติ)

ข้อจำกัดของการเติมตัวเติมที่มีสมบัติเร่งการย่อยสลายพอลิแล็กติกแอซิดได้เองตามธรรมชาติ คือ ปัญหาความสามารถในการเข้ากันได้ลดลง ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามไปด้วย ในบรรดาตัวเติมทั้งหลาย ตัวเติมในกลุ่มอนุพันธ์ของอะซิเตตมีความสามารถในการเข้ากันได้ดีกับพอลิแล็กติกแอซิด เช่น เซลลูโลสอะซิเตต หรือ สตาโรลอะซิเตต เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามทั้งสองตัวเติมนี้อาจไม่สามารถเร่งการย่อยสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดได้เองโดยธรรมชาติเนื่องจากไม่มีหมู่ชอบน้ำเป็นองค์ประกอบ สมบัติของตัวเติมที่เหมาะสมจึงควรมีหมู่ชอบน้ำเป็นองค์ประกอบ เช่น ตัวเติม

ประเภทแอซิติเลตของแป้ง หรือเซลลูโลส ซึ่งในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการเตรียมแอซิติเลตเซลลูโลสที่มีดีกรีของการแทนที่ต่างๆ แล้วนำไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิด เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ โดยจะอาศัยเทคนิคการผสมแบบหลอมเหลวและอัดแบบขึ้นรูปด้วยเทคนิค compression จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและ แอซิติเลตเซลลูโลสที่มีระดับของการแทนที่สูงสุด ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อน (ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์และเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลซิส) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาผลของแอซิติเลตเซลลูโลสที่มีผลต่อการย่อยสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดโดยวิธีฝังกลบในสภาวะที่เดิมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สามารถผลิตเอ็นไซม์เซลลูเลสที่ปลดปล่อยออกมาเพื่อย่อยสลายเซลลูโลส ซึ่งกลไกการย่อยสลายเริ่มต้นโดยพอลิเมอร์ผสมจะดูดน้ำและเอ็นไซม์เซลลูเลสจากแบคทีเรียเข้าไป เซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและได้กรดแล็กติกออกมา กรดแล็กติกจะให้โปรตอนแก่พอลิแล็กติกแอซิดซึ่งจะเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลติกดีเกรเดชันที่ผิวพอลิแล็กติกแอซิด ได้ปลายหมู่คาร์บอกซิลิกแอซิดเพิ่มขึ้น จากนั้นก็จะเกิดการย่อยสลายตัวเองเกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เตรียมแอซิติเลตเซลลูโลสที่มีระดับของการแทนที่ต่างๆ
2. เลือกแอซิติเลตเซลลูโลสที่มีระดับการแทนที่สูงสุดมาผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดและศึกษาความเข้ากันได้
3. ศึกษาผลของสมบัติของแอซิติเลตเซลลูโลสต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการย่อยสลายแบบฝังกลบของพอลิเมอร์สูตรผสมในสภาวะที่เดิมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis*

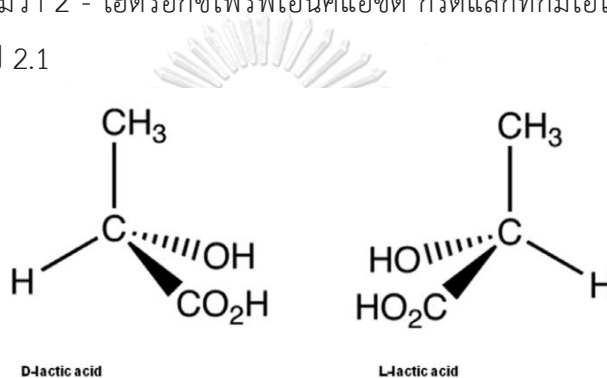
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิแล็กติกแอซิด

2.1.1 โครงสร้าง องค์ประกอบและการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด

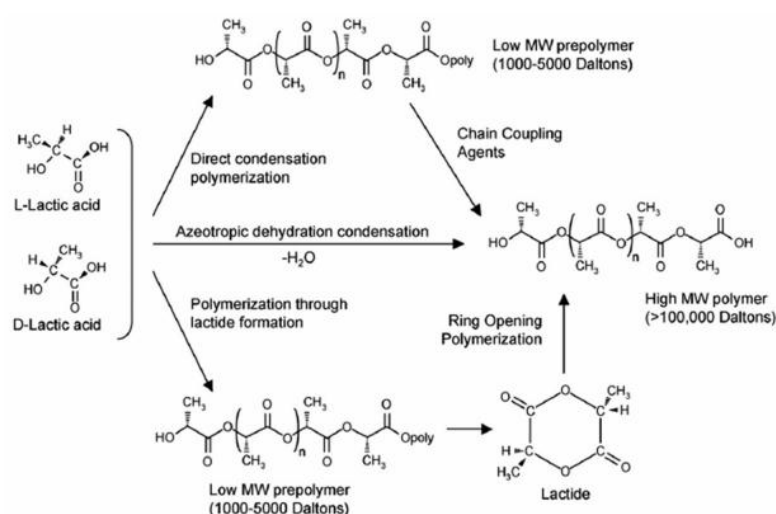
พอลิแล็กติกแอซิดสังเคราะห์ขึ้นจากการทำพอลิเมอไรเซชันของกรดอัลฟาไฮดรอกซี หรือกรดแล็กติก ที่มีชื่อทางเคมีว่า 2 - ไฮดรอกซีโพรพอโนนิกแอซิด กรดแล็กติกมีไอโซเมอร์สองรูปแบบ คือ แบบดี และแอล ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบสามมิติของกรดแล็กติก

ซึ่งเป็นอแนนชิโอเมอร์ (enantiomer) ที่มีปฏิริยาต่อแสงโพลาไรซ์แตกต่างกัน เนื่องจากมีโครงสร้างแบบสามมิติที่ไม่เหมือนกัน เมื่อมีระนาบแสงโพลาไรซ์ส่องผ่านจึงเกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางตรงกันข้ามกัน ในธรรมชาติส่วนใหญ่พบในรูปแบบแอล-ไอโซเมอร์ หรือพบในรูปแบบของผสมระหว่างแอล-และดี-ไอโซเมอร์ เรียกว่าของผสมราซิมิก (racemic mixture, อัตราส่วน = 1:1 เขียนแทนด้วย DL) หรือ สารประกอบมีโซ (meso-compound) ซึ่งไม่มีสมบัติบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (optically inactive) ปัจจุบันการผลิตกรดแล็กติกอาศัยการหมักเป็นหลัก ซึ่งสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสง (optical purity) สูงได้ การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดอาจกระทำโดยสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซิโทรปิก (azeotropic dehydrative condensation) ปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรง (direct condensation polymerization) และ/หรือ การสังเคราะห์ผ่านการเกิดแลคไทด์ (lactide formation) พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (มากกว่า 100,000 ดาลตัน) ในเชิงพาณิชย์สังเคราะห์ได้โดยผ่านการเปิดวง (ring opening polymerization) ของแลคไทด์ เนื่องจากกรดแล็กติกมีสองไอโซเมอร์สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่

สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่อาจประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ชนิดแอล-ไอโซเมอร์เกือบทั้งหมด (พอลิแอล-แล็กติกแอซิด (PLLA)) หรือประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ที่เป็นของผสมราซิเมอิก (พอลิดีแอล-แล็กติกแอซิด (PDLLA)) ในปัจจุบันการผลิต ดี-ไอโซเมอร์ของกรดแล็กติกที่บริสุทธิ์นั้นทำได้ยาก การผลิตพอลิเมอร์ที่สายโซ่หลักประกอบไปด้วยมอนอเมอร์ชนิด ดี หรือพอลิดี-แล็กติกแอซิด (PDLA) ในเชิงพาณิชย์จึงยังไม่มีพอลิแล็กติกแอซิดมีโครงสร้างผลึกสามรูปแบบ ได้แก่ แอลฟา เบตา และแกมมา ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอินทรีย์ไอโซเมอร์แอล หรือดี, แอล โครงสร้างแบบอัลฟาเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุด หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 185 องศาเซลเซียส ในขณะที่โครงสร้างแบบเบต้าหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.2 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดจากกรดแล็กติกชนิดแอลและดี

2.1.2 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด

ความบริสุทธิ์เชิงแสง ของพอลิแล็กติกแอซิดส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว (barrier properties) พอลิแล็กติกแอซิดที่มีสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์สูงกว่าร้อยละ 90 มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semicrystalline polymer) ในขณะที่พอลิเมอร์ที่แนวโน้มเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous) นอกจากนี้อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิกลาสทรานสิชันและระดับความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์ที่ลดลงด้วยสัดส่วนของไอโซเมอร์ที่มีดี-ไอโซเมอร์ในองค์ประกอบเพิ่มขึ้น มีความบริสุทธิ์เชิงแสงต่ำลงและ มีความแตกต่างกันในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พอลิแล็กติกแอซิดที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีสมบัติได้หลากหลาย จึงสามารถปรับให้รองรับความต้องการการใช้งานได้กว้างขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่นพอลิเอทิลีนเทรฟทา

เลต (PET) และ พอลิสไตรีน (PS) พอลิแล็กติกแอซิดมีความใส และมีสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซใกล้เคียงกัน

การละลายของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับสัดส่วนของหน่วยที่เป็นองค์ประกอบในสายโซ่พอลิเมอร์ และระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity) พอลิแล็กติกแอซิดไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่แทนที่ เช่น เฮกเซน (hexane) และเฮปเทน (heptane) ตัวทำละลายที่ดีสำหรับพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงสูง (poly(L-lactic acid), PLLA) ได้แก่ ตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มคลอริเนตและฟลูออริเนต (chlorinated or fluorinated organic solvents) ไดออกเซน (dioxane) ไดออกโซเลน (dioxolane) และฟูเรน (furan) ราซิมีคพอลิแล็กติกแอซิด (poly(raclactic acid) นอกจากละลายได้ในตัวทำละลายสำหรับพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงสูงที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ยังละลายได้ในอะซิโตน (acetone) ไพริดีน (pyridine) เอทิลแลคเตต (ethyl lactate) เอทิลอะซิเตต (ethyl acetate) เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran) ไชลีน (xylene) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethylsulfoxide) เอ็น,เอ็น-ไดเมทิล ฟอร์มาไมด์ (N,N dimethylformamide) และเมทิลเอทิลคีโตน (methyl ethyl ketone)

พอลิแล็กติกแอซิดมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 พอลิเมอร์ที่ไม่ผ่านการดึงยึด (unoriented PLA) มีความเปราะมากแต่มีความคงรูป (stiffness) และความแข็งแรง (strength) สูง เมื่อนำไปผ่านการดึงยึด (oriented) จะมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนแต่ดีกว่า พอลิสไตรีนที่ผ่านการดึงยึด (oriented PS) มอดูลัสแรงดึงและแรงดัด (tensile and flexural moduli) ของพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีนแต่ความทนต่อแรงกระแทก (izod impact strength) และการยืด ณ จุดแตกหัก (elongation at break) มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

พอลิแล็กติกแอซิดมีอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ค่อนข้างสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกทั่วไป อุณหภูมิกลาสทรานสิชันมีค่าขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและอัตราส่วนระหว่างอีแนน-ซีโอเมอร์โดยพบว่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุล การผสมแอล-อีแนนซีโอเมอร์เข้ากับอีแนนซีโอเมอร์ทำให้อุณหภูมิกลาสทรานสิชันมีแนวโน้มลดต่ำลง เมื่ออัตราส่วนระหว่างแอลและดีใกล้เคียงกันมากขึ้น เช่น อัตราส่วนระหว่างแอลต่อดีเป็น 50:50 อุณหภูมิกลาสทรานสิชันมีแนวโน้มลดต่ำลงมากที่สุดพฤติกรรมกลาสทรานสิชันของพอลิแล็กติกแอซิดยังขึ้นอยู่กับประวัติทางความร้อน (thermal history) ของพอลิเมอร์อีกด้วยอุณหภูมิหลอมเหลว ของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์เชิงแสงของพอลิเมอร์ด้วยเช่นกัน อุณหภูมิหลอมเหลวสูงที่สุดที่ พบในพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสง (ทั้ง PLLA และ PDLA) มีค่าประมาณ 180 องศาเซลเซียส และมีค่าเอนทัลปี 40-50 จูลต่อกรัม อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์มีค่าลดลง หาก

ในโครงสร้างมีปริมาณของดี-แลคไทด์เป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิหลอมเหลวลดลงได้มาก ถึง 50 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าอยู่ในช่วง 130-160 องศาเซลเซียส การลดลงของอุณหภูมิหลอมเหลวเนื่องจากผลของมีโซ-แลคไทด์มีความสำคัญโดยช่วยให้ขึ้นรูปง่ายขึ้น และลดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

2.1.3 การขึ้นรูปของพอลิแล็กติกแอซิด

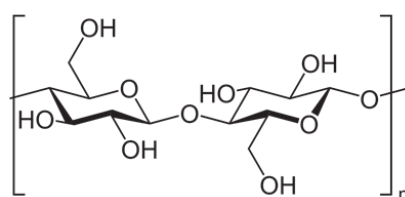
วิธีการแปรรูปหลักสำหรับพอลิแล็กติกแอซิดคือการขึ้นรูปโดยใช้ความร้อนเช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป ระดับความร้อนที่ใช้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการขึ้นรูป สำหรับกรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยความร้อนหรือเทอร์โมฟอร์มมิง (thermoforming) ความร้อนที่ใช้อยู่ในระดับที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการอ่อนตัวและสามารถดึงยืดได้ตามแบบของแม่พิมพ์เท่านั้น ในขณะที่การอัดรีด (extrusion) การฉีดขึ้นรูป (injection molding) การอัดขึ้นรูป (compression molding) และการเป่าขึ้นรูป (blow molding) นั้น ความร้อนที่ใช้อยู่ในระดับสูงถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแล็กติกแอซิด พอลิเมอร์หลอมเหลวจะไหลเข้าไปเติมเต็มช่องว่างในแม่พิมพ์ แล้วเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งและมีรูปร่างตามแบบแม่พิมพ์เมื่อเย็นตัวลง ดังนั้นการเข้าใจถึงพฤติกรรมทางความร้อน การตกผลึกของพอลิเมอร์หลอมเย็นตัวและพฤติกรรมด้านกระแสวิทยา (rheological behavior) จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการปรับการผลิตและควบคุมคุณภาพก่อนนำพอลิแล็กติกแอซิดไปขึ้นรูปจำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการอบไล่ความชื้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลง รวมถึงป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาการเปลี่ยนแปลงไป โดยทั่วไประดับความแห้งอยู่ในระดับที่น้อยกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) พอลิแล็กติกแอซิดที่ใช้กันทั่วไปในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่มีความเป็นผลึก จึงนิยมทำแห้งที่อุณหภูมิสูงเพื่อลดเวลาการทำแห้งลงอุณหภูมิการทำแห้งอยู่ในช่วง 80-100 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเม็ดพลาสติกที่มีโครงสร้างอสัณฐานจำเป็นต้องทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (น้อยกว่า 60 องศาเซลเซียส) เพื่อป้องกันการเหนียวติดกันเองและทำให้เครื่องทำแห้งอุดตันการเลือกเกรดพอลิแล็กติกแอซิดให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยทั่วไปชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดที่ต้องการสมบัติความทนทานต่อความร้อนสูงสามารถฉีดขึ้นรูปได้โดยใช้เรซินที่มี ดี-ไอโซเมอร์ผสมอยู่ไม่น้อยกว่า 1% และการเติมสารก่อผลึก (nucleating agent) ช่วยเพิ่มความเป็นผลึกภายในระยะเวลาการขึ้นรูปที่สั้น (short molding cycle) ในทางกลับกันเรซินที่มีสัดส่วนดี-ไอโซเมอร์สูงขึ้น (4-8%) เหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิง กระบวนการอัดรีด และกระบวนการเป่าขึ้นรูป เนื่องจากกระบวนการเหล่านี้ทำได้ง่ายกว่าเมื่อเรซินมีความเป็นผลึกต่ำ

2.1.4 การเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิด

การเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิดส่วนใหญ่เกิดจากการขาดของสายโซ่หลักหรือสายโซ่ด้านข้างของโมเลกุล ในธรรมชาติการเสื่อมสภาพเกิดจากการกระตุ้นด้วยความร้อนปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส หรือกิจกรรมทางชีวภาพ (เช่น เอนไซม์) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การแตกสลายด้วยแสง (photolysis) และการแตกสลายด้วยรังสี (radiolysis) เนื่องจากการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นทั้งจากกระบวนการทางชีวภาพและกายภาพ กลไกการเสื่อมสภาพจึงมักเกี่ยวโยงไปกับการเสื่อมสภาพจากสิ่งแวดล้อม (environmental degradation) การเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิ น้ำหนักโมเลกุล ระดับความเป็นผลึก ความบริสุทธิ์ อุณหภูมิ สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระดับความเข้มข้นของเกลือ (salinity) การมีอยู่ของออกซิเจน หรือปริมาณอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในระบบ ดังนั้นในการทดสอบการเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิดจึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยดังกล่าวประกอบด้วย นอกจากนี้การเสื่อมสภาพยังขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะทางเคมีและกายภาพ เช่น อัตราการแพร่ (diffusivity) ความเป็นรูพรุน (porosity) สัมฐาน (morphology) และความแข็งแรงทางกล (mechanical strength) เป็นต้น พอลิแล็กติกแอซิดในปัจจุบันได้พัฒนาจนถึงในระดับที่มีความแข็งแรงทนทานเทียบเท่ากับพลาสติกจากปิโตรเลียม ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์จึงไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ หรือจะกล่าวได้ว่าพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่ไม่สามารถย่อยสลายตัวเองได้โดยวิธีทางธรรมชาติ

2.2 เซลลูโลส

เซลลูโลส เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืช เซลลูโลสแต่ละ โมเลกุลประกอบด้วย น้ำตาลมากกว่า 53,000 หน่วยต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง β -D-1,4 linkage ต่างจาก โครงสร้างของสตาร์ชที่มีน้ำตาลกลูโคสต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง α -D-1,4 linkage จึงไม่ถูกย่อยด้วยน้ำย่อยอะไมเลส (amylase) และเซลลูโลสไม่ละลายในน้ำและในด่าง แต่ละลายในกรดไขมัน โมเลกุลของเซลลูโลสเป็นสายยาวไม่มีสายแขน สายยาวเกาะกันตาม แนวราบด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล ในโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างเซลลูโลส

เมื่อศึกษา เส้นใยเซลลูโลสโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน พบว่าประกอบด้วยใยอาหารที่หยาบและหนา แต่ละโมเลกุลของ ใยอาหารเรียงตัวไปทางเดียวกันเชื่อมต่อกับเส้นใยที่เรียงตัวในทิศทางตรงข้ามกันอย่างเป็นระเบียบ ด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้พีซีมีความแข็งแรง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสใน แต่ละหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสยังมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเหลืออยู่ ซึ่งเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง สายของโพลิเมอร์ ทำให้บางส่วนของโครงสร้างเป็นผลึกส่วนที่เกิดผลึกนี้มีความหนาแน่นมากกว่า จึงทนต่อการถูกแยกสลายด้วยเอนไซม์และสารเคมีมากกว่าส่วนที่ไม่เป็นผลึกส่วนที่เป็นผลึกยังดูดน้ำได้น้อยกว่าด้วย ทำให้ไม่สามารถละลายน้ำได้ และพบโมเลกุลที่เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบจับกัน ไม่แน่นหรือส่วนที่ไม่เกิดผลึกสามารถดูดซับโมเลกุลของน้ำเข้ามาในโมเลกุลส่วนที่ไม่เป็นระเบียบส่วน นี้จึงพองออกเมื่อได้รับความร้อน ทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย การดูดน้ำจึงเพิ่มขึ้น และส่วนที่เป็นผลึกลดลงด้วย ทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสมีลักษณะทั้งแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ จึงโค้งงอได้โดย ไม่แตกหัก การละลายของเซลลูโลส เซลลูโลสมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์หรือสารละลายต่างอ่อน แต่จะละลายในกรดแก่และต่างแก่ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งชนิดของเซลลูโลสตามลักษณะการ ละลายในกรดหรือต่าง ได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้ แอลฟาเซลลูโลส เป็นเซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 % เบต้าเซลลูโลส เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 % และแกมมาเซลลูโลส เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ดีทั้งใน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5% และสารละลายกรดเจือจาง ความหนืดของเซลลูโลส ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลสโดย ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลส จะส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น การดูดซับความชื้นของเซลลูโลส เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับหรือการคายไอน้ำ หรือของเหลวอื่นๆ ในบรรยากาศรอบตัว จนกระทั่งถึงจุดสมมูล โดยสมดุลของความชื้นของเซลลูโลสจะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศนั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น เมื่อความชื้นสูงขึ้น ค่าความคงทนต่อแรงดึงจะมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของเซลลูโลส เซลลูโลสที่เป็นเส้นใยเดี่ยว จะมีค่าความหนาแน่นที่ไม่แน่นอน ค่าความหนาแน่นจะ แปรเปลี่ยนไปตามที่มาหรืออาจเปลี่ยนไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

2.3 เซลลูโลสแอซีเทต

การผลิตเซลลูโลสแอซีเทต ประกอบด้วย

1. กระจายเซลลูโลสจากแผ่นเซลลูโลส (cellulose sheet) ที่ผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น เยื่อไม้ เศษฝ้าย เป็นต้น
2. ละลายเซลลูโลสด้วยกรดอะซีติก (acetic acid) ที่ไว้ระยะเวลาหนึ่งพร้อมกับการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม

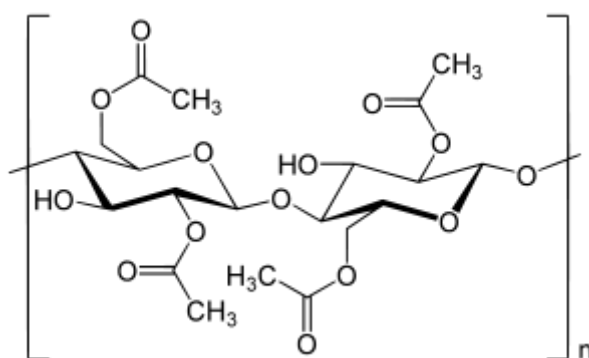
3. นำสารละลายที่ได้ผสมกับอะซีติกแอนไฮไดรด์ (acetic anhydride) โดยมีกรดกำมะถันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ คือ ปฏิกิริยาอะซีทิลเลชัน (acetylation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีที่หมู่ไฮดรอกซิล ในเซลลูโลสถูกเปลี่ยนเป็นหมู่อะซิเตต ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า ไพรมารีอะซิเตท (primary acetate) หรือ เซลลูโลสไตรอะซิเตท (cellulose triacetate) ส่วนแอนไฮไดรด์ที่เหลือหลังการเกิดปฏิกิริยาอะซีทิลเลชันจะถูกกำจัดด้วยน้ำ

4. สารละลายเซลลูโลสไตรอะซิเตทจะถูกไฮโดรไลซ์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เพื่อให้ได้ secondary acetate หรือเรียกว่า เซลลูโลสไดอะซิเตท (cellulose diacetate) หรือเซลลูโลสอะซิเตท (cellulose acetate) โดยใช้กรดกำมะถัน (sulfuric acid) ร้อยละ 4-6 ของน้ำหนักเซลลูโลสเริ่มต้น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส สารละลายเซลลูโลสอะซิเตทควรมีความเข้มข้นของน้ำประมาณร้อยละ 10-15 ส่วนระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis time) ขึ้นอยู่กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิที่ใช้ กล่าวคือ ใช้อุณหภูมิถ้ามีตัวเร่งปฏิกิริยาน้อย

5. ตกตะกอนสารละลายเซลลูโลสอะซิเตทโดยการเติมสารละลายกรดอะซีติกเจือ ลงในสารละลายเซลลูโลสอะซิเตทที่ถูกควบคุมการกวน เพื่อให้ได้เซลลูโลสอะซิเตทที่มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดใกล้เคียงกัน ง่ายต่อการล้างทำความสะอาด นอกจากการตกตะกอนแล้ว อาจฉีดสารละลายเซลลูโลสอะซิเตทผ่านไอร้อนของกรดอะซีติกเจือจางเพื่อผลิตเซลลูโลสอะซิเตทที่มีอนุภาคหยาบ เพื่อง่ายต่อการล้างทำความสะอาดก่อนการทำให้มีขนาดละเอียดขึ้น ซึ่งวิธีการนี้ไอร้อน ของกรดอะซีติกจะถูกนำไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ซึ่งประกอบด้วยสารละลายกรดอะซีติกในน้ำร้อยละ 30

6. ล้างเซลลูโลสอะซิเตทที่ได้จากการตกตะกอนด้วยน้ำเพื่อขจัดสารปนเปื้อน แล้วจึงขจัดน้ำออกด้วยวิธีการเหวี่ยงแยก (centrifugation)

7. อบเซลลูโลสอะซิเตทให้แห้ง โดยอุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรเกิน 100 องศาเซลเซียส และเซลลูโลสอะซิเตทแบบเกล็ดเมื่ออบแล้วจะต้องมีความชื้นประมาณร้อยละ 2-3



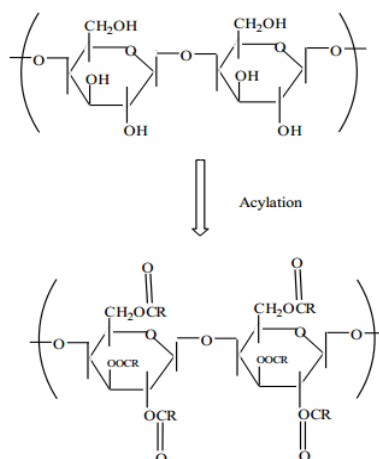
รูปที่ 2.4 โครงสร้างเซลลูโลสอะซิเตท

2.4 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันหมายถึงปฏิกริยาการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของแ่งจากหมู่ไฮดรอกซีไปเป็นหมู่เอสเทอร์ โดยใช้สารที่ทำให้เกิดหมู่เอสเทอร์ (esterifying agent) ชนิดต่างๆ เช่นกรดคาร์บอกซิลิกหรือสารแอนไฮไดรต์ หรือสารไวนิลอะซิเตต เป็นต้น นอกจากนั้นในบางครั้งอาจจะเรียกปฏิกริยาดังกล่าวว่า ปฏิกริยาอะซิลเลชัน (acylation) เนื่องจากหมู่แทนที่ใหม่ที่เกิดขึ้นคือหมู่เอซิล สิ่งที่ควรคำนึงถึงในเบื้องต้น ก่อนที่จะทำปฏิกริยาดัดแปรโครงสร้างโมเลกุลของแ่งคือการที่จะต้องทำการเตรียมแ่งหรือกระตุ้นให้แ่งให้อยู่ในสภาพที่พร้อมที่จะทำปฏิกริยากับ สารเคมีก่อน (เรียกว่าขั้นตอน pre-activation) ทั้งนี้เนื่องจากว่าแ่งโดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ อะไมโลเพคตินและอะไมโลส โดยในส่วนแรกจะเป็นส่วนที่มีโครงสร้างจุลภาคแบบอสัณฐาน ในขณะที่องค์ประกอบส่วนหลังที่กล่าวถึงจะเป็นส่วนที่มีความเป็นผลึก (โดยที่แ่งแต่ละชนิดจะมีสัดส่วนองค์ประกอบทั้ง 2 แตกต่างกันไป) ดังนั้นในส่วนของ อะไมโลสจึงเกิดปฏิกริยากับสารเคมีได้ยากกว่าทำให้ปฏิกริยาการแทนที่ของแ่งมีจำกัด การกระตุ้นแ่งจึงเท่ากับเป็นการทำให้โครงสร้างผลึกของอะไมโล สเปิดออกซึ่งจะทำให้สารเคมีแพร่เข้าไปทำปฏิกริยาได้ง่ายขึ้นวิธีการกระตุ้นแ่งที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถทำได้โดยการทำการกวนแ่งในตัวทำละลาย เช่นไพริดีน หรือไดเมทิลซัลฟอกไซด์ ซึ่งจะทำให้อนุภาคเม็ดแ่งละลายและสารละลายแ่งที่ได้จะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวมากขึ้นในกรณีที่ใช้สารละลายน้ำในการกวนแ่งพบว่าแ่งจะยังไม่ค่อยละลายได้ในน้ำเย็น (เนื่องจากอิทธิพลของโครงสร้างผลึกในอะไมโล ส) อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกวนสารละลายแ่งในน้ำให้สูงขึ้น (ประมาณ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป) พบว่าสารละลายแ่งจะมีความหนืดสูงขึ้น ในกรณีนี้พบว่า โครงสร้างผลึกของแ่งได้เกิดการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากความร้อนได้ทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลในส่วนของอะไมโลส ทำให้น้ำแพร่เข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลแ่งได้มากขึ้น ทำให้ความหนืดของแ่งสูงขึ้นและเรียกการเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังกล่าวว่าการเกิดเจล (gelation) โดยแ่งเจลที่ได้จากการตกตะกอนแยกผลิตภัณฑ์จะสูญเสียลักษณะความเป็นอนุภาคไป (ในขณะที่แ่งที่กระตุ้นด้วยไพริดีนหรือไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO)) จะคงสภาพเป็นเม็ดแ่งอยู่ภายหลังจากการตกตะกอนแยกผลิตภัณฑ์ออกมาจากสารละลาย (แต่การใช้ไพริดีนจะมีอันตรายและมีกลิ่นที่รุนแรงกว่าการใช้ DMSO) ซึ่งลักษณะทางกายภาพของแ่งที่ได้ เช่นความเป็นผงหรืออนุภาคอาจจะมีผลต่อความสะดวกในการนำแ่งดัดแปรไปใช้งานต่อไป

2.4.1 การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้กรดคาร์บอกซิลิก

การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของแป้งโดยใช้กรดคาร์บอกซิลิก เช่น กรดฟอร์มิก จะเกิดผ่านกลไกแบบdirect esterification กล่าวคือกรดฟอร์มิกจะถูกให้โปรตอน (protonated) ให้กลายเป็นออกซิเนียมไอออน (oxonium ion) หรือคาร์บอนเนียมไอออน (carbonium ion) จากนั้นไอออนบวกดังกล่าวจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นปริมาณหมู่แทนที่ของแป้งที่ได้จากวิธีนี้จึงไม่ค่อยสูงมากนัก โดยมีค่าระดับการแทนที่ (DS) ต่ำกว่า 0.2 (เทียบกับค่า DS สูงสุดที่มีได้คือ 3) นอกจากนี้ ข้อเสียของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของแป้งโดยใช้กรดคาร์บอกซิลิกคือเกิดการแตกของสายโซ่โมเลกุลแป้ง (depolymerization) อันเนื่องมาจากกรดที่เติมลงไป ยกเว้นในกรณีที่เติมกรดฟอร์มิกเนื่องจากกรดดังกล่าวสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำ (hydration) กลายเป็นสารฟอร์มेटไอออนซึ่งจะส่งผลทำให้ปริมาณน้ำที่จะทำปฏิกิริยากับแป้งลดลง



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาอะซิไทเลชันของแป้ง

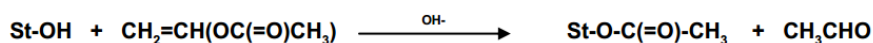
2.4.2 การทำปฏิกิริยาโดยใช้สารแอนไฮไดรต์

การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของแป้งทางอ้อม โดยใช้สารอนุพันธ์ของกรดคาร์บอกซิลิก เช่น สารแอนไฮไดรต์ หรือสารเอซิลคลอไรด์ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของแป้งเพื่อลดปัญหาเรื่องกรด ทำให้โมเลกุลของแป้งเกิดการเสื่อมสภาพ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้สารแอนไฮไดรต์จะ

สามารถเกิดได้ทั้งในระบบที่มีน้ำเป็นตัวกลาง (aqueous media) และในระบบที่ปราศจากน้ำ (anhydrous media) นอกจากนั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีถ้ามีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะมีลักษณะเป็นเบส หรือเป็นสารที่สามารถรับโปรตอนได้

2.4.3 การทำปฏิกิริยาโดยใช้สารไวนิลแอซีเทต

การทำปฏิกิริยาเอซิติลชันของแป้งโดยใช้สารไวนิลแอซีเทตจะทำในตัวกลางน้ำ โดยใช้สารอัลคาไลน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยา มีสารอะเซทาลดีไฮด์ (acetaldehyde) เกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงซึ่งสามารถแยกออกโดยการล้าง หรืออาจ ใช้ประโยชน์ต่อโดยการใช้เป็นสารที่ ชักนำให้เกิดพันธะข้ามหรือโครงสร้างแบบร่างแหในโมเลกุลแป้ง อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาดังกล่าวจะมีข้อเสียในด้านของความเป็นพิษของสารไวนิลโมโนเมอร์ที่ใช้



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาอะซิติลเลชันของแป้งโดยใช้สารไวนิลแอซีเทต

2.5 พอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม (polymer blend) เป็นการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่ามาผสมกันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือเพื่อแก้ไขสมบัติที่ไม่ดีของพอลิเมอร์เดิมซึ่งไม่สามารถใช้สารเติมแต่ง (additives) ในการปรับปรุงสมบัติเหล่านั้นได้ โดยในปัจจุบันมีผู้ให้ความสนใจพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น และมีการผลิตเป็นการค้า กัน อย่างกว้างขวางสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการทำให้ได้สมบัติที่ต้องการของพอลิเมอร์ผสม คือ วิธีการ ผสมเครื่องมือ และเทคนิคในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิด หรือมากกว่าให้ผสมเข้ากันได้ดี ซึ่งเป็นปัจจัยในการควบคุมสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

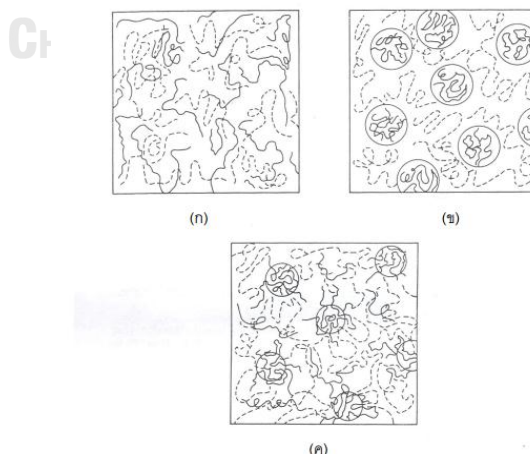
ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ระดับโมเลกุล (miscibility) ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อเกิดขึ้นจะทำให้เกิดระบบวัฏภาคเดี่ยวเนื้อเดียว (homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด และโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ ชนิดนั้นๆ องค์ประกอบที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายเข้ากันได้ระดับโมเลกุล (molecular miscibility) ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความเป็นผลึกซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ ความมีขั้วคล้ายกัน และพันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (compatibility) จัดเป็นสมบัติในทางปฏิบัติของพอลิเมอร์ผสมบางชนิดที่เข้ากันได้ในระดับโมเลกุลและมีประโยชน์ต่อทางการค้า อย่างไรก็ตามระบบพอลิ

เมอร์ผสมส่วนใหญ่ในทางการค้า เป็นระบบที่เข้ากันไม่ได้ในระดับโมเลกุล (immiscible) และแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (multi-phase system) ทำให้เกิดการปรับปรุงระบบผสมเพื่อให้แต่ละวัฏภาคเกิดการยึดเกาะกัน ดีขึ้นซึ่งเป็นการรวมสมบัติที่ดีของแต่ละวัฏภาคและเกิดเป็น ความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว

2.5.1 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

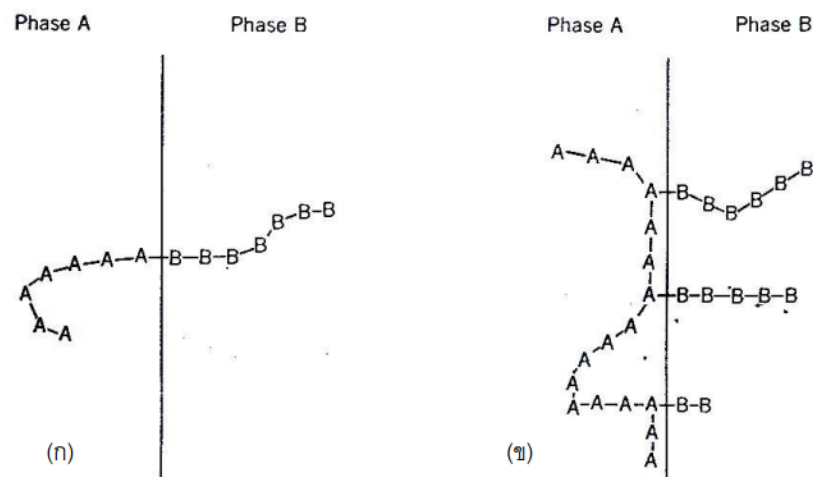
โดยทั่วไปสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมี 3 แบบ ซึ่งใช้ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเป็นหลักเกณฑ์ในการจำแนก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในรูปที่ 2.7 (ก) แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีมีวัฏภาคเดียวไปจนถึงระดับโมเลกุล (miscible) ลักษณะของสันฐานวิทยาคล้ายกับพอลิเมอร์ร่วมแบบอิสระ (random copolymer) การที่พอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้ดีเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B รูปที่ 2.7 (ข) แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันมีหลายวัฏภาค สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีอิทธิพลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล จากสันฐานวิทยาในรูปที่ 2.7 (ข) และ (ค) การกระจายตัวและการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) ของพอลิเมอร์ผสมไม่ดี ทำให้เกิดรอยตำหนิระหว่างวัฏภาค ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นในการผสมพอลิเมอร์เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ จำเป็นต้องทราบความสามารถในการเข้ากันของพอลิเมอร์แต่ละชนิด (immiscible) ซึ่งเป็นแบบที่พบบ่อยในพอลิเมอร์ผสม ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยพื้นฐานต่างๆ เช่น ความหนืดของพอลิเมอร์แต่ละชนิด สมบัติความเข้ากันได้การละลาย นอกจากนี้ยังมีสันฐานวิทยาแบบที่เข้ากันได้ดีบางส่วนและแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน (partially miscible)



รูปที่ 2.7 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเมอร์ A (____) และ พอลิเมอร์ B (____) โดย (ก) miscible (ข) immiscible และ (ค) partially miscible

2.5.2 กระบวนการตัดแปรรวมโพลิเมอร์ผสมให้เข้ากันได้

การเติมสารช่วยผสมเป็นวิธีการหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของโพลิเมอร์ผสม ซึ่งมีผลทำให้แรงตึงผิว (interfacial tension) ของโพลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าลดลง ทำให้กระจายตัวในวัฏภาคได้ดีขึ้น และเพิ่มการยึดติด (adhesion) ระหว่างผิวสัมผัส ทำให้การถ่ายเทความเค้น (stress transfer) เกิดได้ดีขึ้นโดยสารช่วยผสมอาจเป็นโพลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อกหรือต่อกิ่ง ซึ่งสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัฏภาคของโพลิเมอร์ผสม ดังในรูปที่ 2.8 แสดงโพลิเมอร์ผสมที่เติมสารช่วยผสม โดยในรูปที่ 2.8 (ก) เป็นโพลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก และในรูปที่ 2.8 (ข) เป็นโพลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า โพลิเมอร์ร่วมทั้ง 2 แบบนี้จะมีโครงสร้างเหมือนกับโพลิเมอร์ผสมโดยส่วนที่เหมือน A จะแทรกซึมผ่านไปโพลิเมอร์ผสมส่วนที่เป็นโพลิเมอร์ A และส่วนที่เหมือน B จะแทรกซึมผ่านไปโพลิเมอร์ผสมส่วนที่เป็นโพลิเมอร์ B จากวิธีการนี้เป็นการปรับปรุงการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) ทำให้สมบัติเชิงกลของโพลิเมอร์ผสมดีขึ้น



รูปที่ 2.8 โพลิเมอร์ผสมระหว่าง A และ B ที่เติมสารช่วยผสมแบบ (ก) โพลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก และ (ข) โพลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง

2.6 โพลิเมอร์คอมพอสิต

คอมพอสิต (composite) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ (distinct components) อยู่ด้วยกัน และมีสมบัติแตกต่างกันอย่างชัดเจน

เมื่อผสมเป็นคอมพอสิตแล้วจะมีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย วัสดุคอมพอสิตชนิดพอลิเมอร์คอมพอสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการ ที่สำคัญที่สุด คือ มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ ปัจจุบันจึงมีการใช้งานวัสดุคอมพอสิตเป็นโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ไซ้ เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์เรือ เฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ นอกจากนี้ คอมพอสิตยังมีสมบัติที่กว้าง เนื่องจากมีคอมพอสิตหลายรูปแบบคือ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัสดุคอมพอสิต ดังนั้น จึงสามารถเลือกใช้วัสดุคอมพอสิตให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภทได้

องค์ประกอบหลักของคอมพอสิตประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ ส่วนเสริมแรงและเมทริกซ์ส่วนเสริมแรง (reinforced part) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมพอสิต หมายถึง เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมพอสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง โดยที่ลักษณะของส่วนเสริมแรงมีหลายแบบ ตัวอย่างเช่น ส่วนเสริมแรงแบบแผ่น แบบเป็นก้อน หรือผงที่มีขนาดเล็ก แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ส่วนเสริมแรงแบบเส้นใย (fiber) ชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยแก้ว (glass fibers) เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) เส้นใยเคพลาร์ (kevlar fiber) ฯลฯ อาจเป็นเส้นใยยาว (long fibers) หรือเส้นใยสั้น (short fibers) นอกจากนี้ อาจเป็นเส้นใยพันกัน หรือทอ (weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่างๆ

เมทริกซ์ (matrix) คือ ส่วนที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัว ที่กำหนด มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง นอกจากนี้ เมทริกซ์จะทำหน้าที่ปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียหายเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น วัสดุเมทริกซ์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมพอสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติหลากหลายซึ่งอาจแบ่งชนิดของวัสดุเมทริกซ์ได้ 3 ชนิด คือ พอลิเมอร์ โลหะ และ เซรามิกส์พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในคอมพอสิต คือ พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (thermosets) เนื่องจากใช้สารตั้งต้นน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีความหนืดต่ำ สามารถผสมกับส่วนเสริมแรงขึ้นรูปได้ง่ายตัวอย่างเทอร์โมเซตที่นิยมใช้ ได้แก่ อีพอกซีเรซิน (epoxy resins) ไวนิลเอสเทอร์ (vinyl esters) ฟีนอลิก (phenolics) และพอลิอิมิด (polyimides) เริ่มจากการใช้มอนอเมอร์ (monomers) หรือโอลิโกเมอร์ (oligomers) ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชันทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อกัน ด้วยพันธะโควาเลนต์เกิดเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างร่างแหสามมิติ ซึ่งไม่สามารถหลอมเหลวนำกลับ มาขึ้นรูปใหม่ได้ ส่วนพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกใช้เป็นเมทริกซ์สำหรับคอมพอสิตน้อยกว่า แม้ว่าจะมีแนวโน้มการประยุกต์เป็นคอมพอสิตมากขึ้น เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า ทนอุณหภูมิต่ำกว่า แต่มีข้อดีคือสามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งการใช้วัสดุโลหะเป็นเมทริกซ์สำหรับคอมพอสิตนิยมใช้กับ เส้นใยโลหะเป็นส่วนเสริมแรงซึ่งมีความแข็งแรงสูงแต่มีข้อจำกัด คือ น้ำหนักของวัสดุสูง ตัวอย่างเมทริกซ์โลหะที่นิยม

ใช้ คืออะลูมิเนียม (aluminium) ไททาเนียม (titanium) แมกนีเซียม (magnesium) และทองแดง (copper) ซึ่งการใช้โลหะและเซรามิกส์เป็นเมทริกซ์นิยมใช้กับคอมพอสิตที่ใช้งานอุณหภูมิสูงและทนต่อ สารเคมี

การแบ่งชนิดของคอมพอสิตสามารถแบ่งวัสดุคอมพอสิตได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของคอมพอสิตได้ ดังนี้

1. คอมพอสิตแบบเส้นใย (fibrous composites) คือ คอมพอสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยยาว (long fibers) หรือเส้นใยสั้น (short fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมพอสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่น ๆ

2. คอมพอสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (laminar composites) คือ คอมพอสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแผ่นประกบ หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง

3. คอมพอสิตแบบเป็นก้อน (particulate composites) คือ คอมพอสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (beads) แผ่น (flake) หรือผง (powder) ที่มีขนาดเล็ก

2.7 การย่อยสลายของพลาสติก

ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้โดยทั่วไป เราสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

2.7.1 การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติก หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นๆ เช่น ที่มีดิน หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการพิมพ์ด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2.7.2 การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)

โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

2.7.3 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH) ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิเอทิลีนเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ เป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

2.7.4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮไดรด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลาย (catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลาย (non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์ เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (external catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (enzyme) เช่น depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุล

ของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส

2.7.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

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

นอกจากนี้พบว่า มีการใช้คำว่า พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (environmentally degradable plastics, EDP) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ด่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงจากดวงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝนและแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึม และย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยการย่อยสลายและการดูดซึมนี้นี้ต้องเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม และคำว่า พลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental Friendly Plastics) หรือ พลาสติกสีเขียว (green plastics) หมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดการขยะลดลง และส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน

การประเมินผลกระทบด้านบวกต่อสภาวะแวดล้อมของการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้งานทดแทนพลาสติกทั่วไปในบางโอกาส สามารถทำได้โดยการใช้วิธีประเมินวัฏจักรชีวิต (life cycle assessment) ของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เปรียบเทียบกับพลาสติกทั่วไปที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเพื่อประเมินผลกระทบที่เป็นประโยชน์ต่อสังคมและสภาพแวดล้อมด้านต่างๆ เช่น แหล่งวัตถุดิบ ซึ่งอาจเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ปลูกหรือผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ หรือเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี ปริมาณการใช้น้ำและพลังงานในกระบวนการผลิต การใช้สารเคมีในการเพาะปลูก และการปล่อย

แก๊สเรือนกระจก เป็นต้น หากมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้งาน และมีการกำจัดอย่างมีประสิทธิภาพแล้วจะก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่นๆ ดังต่อไปนี้

1. คอมโพสท์ที่ได้จากการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพร่วมกับขยะอินทรีย์อื่นๆ สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ ความชื้น และสารอาหารให้แก่ดิน พร้อมทั้งช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยและลดการเกิดโรคในพืช การหมักพลาสติกย่อยสลายได้ทำให้เกิดการหมุนเวียนของธาตุ ในขณะที่การใช้พลาสติกมักต้องกำจัดด้วยการฝังกลบหรือเผา

2. ลดเนื้อที่การใช้งานของบ่อฝังกลบขยะ โดยการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และถุงที่ย่อยสลายได้ทำให้เพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายของเศษอาหารหรือขยะอินทรีย์ในบ่อฝังกลบ และเพิ่มศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในกรณีที่บ่อฝังกลบได้ถูกออกแบบมาให้ผลิตและใช้ประโยชน์จากแก๊สมีเทนได้ การใช้ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นวัสดุคลุมหน้าบ่อฝังกลบแทนดินในแต่ละวันเป็นการเพิ่มเนื้อที่ให้บ่อฝังกลบ เนื่องจากการปิดหน้าบ่อฝังกลบด้วยดินทุกวันจะใช้น้ำที่รวม 25% ของเนื้อที่ในบ่อฝังกลบ

3. การใช้พลังงานในการสังเคราะห์ และผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพน้อยกว่าการผลิตพลาสติกทั่วไป ดังแสดงในตารางข้างล่างโดยเทียบกับพลังงานที่ใช้ในการผลิต HDPE และ LDPE โดยพลังงานที่ใช้ในการผลิต PHA ใกล้เคียงกับที่ใช้ในการผลิต PE หากการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้โดยใช้สารอาหารน้ำตาลในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตแป้ง กากน้ำตาล ตะกอนจากบ่อน้ำทิ้ง จะทำให้การใช้พลังงานลดลง

4. การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญจากการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่จากการศึกษาโดยวิธีประเมินวัฏจักรตั้งแต่เริ่มการผลิต จนถึงการกำจัดภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน พบว่า พลาสติกย่อยสลายได้ก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกในปริมาณที่ต่ำกว่าพอลิเอทิลีน ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีที่เป็พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน ซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของพลาสติกจะถูกใช้ไปในการเติบโตของพืชที่จะปลูกขึ้นมาใหม่ทำให้เกิดการหมุนเวียนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในธรรมชาติซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรคาร์บอน ทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1. ก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำจากการเพิ่มของค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (biological oxygen demand, BOD) และค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (chemical oxygen demand, COD) อันเนื่องมาจากการมีปริมาณสารอินทรีย์ หรือสารอาหารในแหล่งน้ำในปริมาณสูง

ทำให้จุลินทรีย์มีความต้องการใช้ออกซิเจนในน้ำสูงขึ้นด้วย ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศน์ทางน้ำ

2. เกิดการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อม เช่น การย่อยสลายของพลาสติกในสภาวะการฝังกลบหรือการคอมโพสต์ อาจทำให้สารเติมแต่งต่างๆ รวมถึง สี

พลาสติกไซเซออร์ สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตกค้าง รั่วไหลและปนเปื้อนไปกับแหล่งน้ำใต้ดินและบนดิน ซึ่งสารบางชนิดอาจมีความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์

3. เกิดมลภาวะจากขยะอันเนื่องมาจากการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ถูกต้องหรือตกลงในสิ่งแวดล้อมที่มีสภาวะไม่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย เช่น ถูกลมพัด และติดค้างอยู่บนกิ่งไม้ ซึ่งมีปริมาณจุลินทรีย์ไม่มากพอที่จะไม่สามารถย่อยสลายได้ดี นอกจากนี้การใช้พลาสติกย่อยสลายได้ อาจทำให้ผู้บริโภคเข้าใจผิดว่า จะสามารถกำจัดได้ง่ายและรวดเร็วทำให้มีการใช้งานเพิ่มขึ้น และพลาสติกย่อยสลายได้บางชนิดอาจใช้เวลานานหลายปีในการย่อยสลายทางชีวภาพอย่างสมบูรณ์ และก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์ที่กินกินพลาสติกเข้าไป เนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ภายในกระเพาะของสัตว์

4. ความเป็นพิษของคอมโพสต์ที่ได้จากการหมักพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เนื่องจากการมีสารตกค้าง หรือใช้สารเติมแต่งที่มีความเป็นพิษ และส่งผลกระทบต่อพืชและสัตว์ที่อาศัยอยู่ในดิน เช่น ไส้เดือน ดังนั้นจึงต้องศึกษาความเป็นพิษ ของคอมโพสต์ด้วย ชิ้นส่วนที่เกิดจากการหักเป็นชิ้นเล็กๆ เกิดการสะสมอยู่ในดินที่ใช้ทางการเกษตรในปริมาณเล็กน้อยจะช่วยให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศได้ดี จึงนิยมใช้ในสวนดอกไม้ ไร่ร่องุ่น และใส่ในกระถางเพื่อทำหน้าที่ปรับสมบัติของดิน แต่อย่างไรก็ตามอาจเกิดการสะสมของเศษพลาสติกในดินมากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของดินและปริมาณผลิตผลที่เพาะปลูกได้

5. เกิดสารประกอบที่ไม่ย่อยสลาย เช่น สารประกอบประเภทแอมโรแมติกจากการย่อยสลายของพลาสติกบางชนิด เช่น AACs โดยส่วนที่เป็นวงแหวนแอมโรแมติกในพอลิเมอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบขนาดเล็ก เช่น กรดเทเรพทาลิก (terephthalic acid) ซึ่งย่อยสลายทางชีวภาพได้ไม่สิ้นก

6. การตกค้างของสารเติมแต่งที่เติมลงในพลาสติกย่อยสลายได้ เพื่อปรับสมบัติให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป เมื่อพลาสติกเกิดการย่อยสลาย สารเติมแต่งเหล่านี้อาจปนเปื้อนอยู่ในสภาวะแวดล้อมได้ เช่น สารช่วยในการผสมพลาสติกต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น methylene diisocyanate (MDI) สารพลาสติกไซเซอร์ที่มักเติมในพลาสติกเพื่อความยืดหยุ่น เช่น glycerol, sorbitol, , ethylene glycol, polyethylene glycol, triethyl citrate และ triacetine สารตัวเติมที่มักเติมลงในพลาสติกเพื่อทำให้ราคาถูกลง ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์ จึงมักเกิดการสะสมในดินและสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตามสารตัวเติมมักค่อนข้างเสถียร จึงมักไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษ เช่น CaCO_3 TiO_2 SiO_2 และ talc เป็นต้น สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์พลาสติกย่อยสลายได้มักเป็นสารประกอบของโลหะ ซึ่งในการผลิตโดยทั่วไปมักมีตัวเร่งปฏิกิริยาเหลือค้างอยู่ในเนื้อพลาสติกเสมอ หากเป็นพลาสติกทั่วไปที่ไม่ย่อยสลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาจะติดค้างอยู่ในเนื้อพลาสติก แต่ในกรณีของพลาสติกย่อยสลายได้เมื่อเกิดการย่อยสลายจะมีการปลดปล่อยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลืออยู่ออกมาสู่สภาพแวดล้อมได้

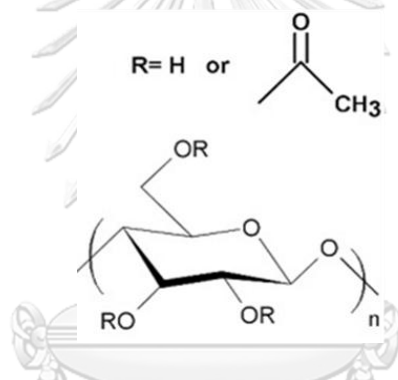
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาของ F. Hua และคณะ [8] ศึกษาสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยแอซิติเลเตดเซลลูโลสนาโนคริสตัลพบแอซิติเลเตดเซลลูโลสนาโนคริสตัลมีสมบัติที่สามารถเข้ากับได้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอพร้อมกับเป็นสารเสริมแรงและสารก่อกผลึกให้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตดังเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้เกิดความสนใจการพัฒนาความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิดกับแอซิติเลเตดเซลลูโลสในอัตราส่วนต่างๆและศึกษาสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้

จากการศึกษาของ F.Luzi และคณะ [9] ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเล็กทิกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเปรียบเทียบกับพอลิเล็กทิกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เสริมแรงด้วยเซลลูโลสนาโนคริสตัลที่ผ่านการดัดแปรด้วยโนนิล ฟีนอล อีทอกซีเลต และไม่ผ่านการดัดแปรพบว่าที่อัตราส่วน 80:20ของพอลิเล็กทิกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เกิดการแยกเฟสมีความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสอง และที่อัตราส่วน 70:30 ของพอลิเล็กทิกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบว่าเกิดการแยกเฟสที่มากขึ้นเกิดความไม่เข้ากันที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราส่วน 80:20 ทำให้พอลิเมอร์ที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลที่ไม่เปลี่ยนแปลงเพิ่มลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเล็กทิกแอซิดล้วน แต่เมื่อทำการเติมเซลลูโลสนาโนคริสตัลที่ไม่ได้ทำการดัดแปรเพิ่มลงไปในพอลิเล็กทิกแอซิดกับ

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบว่ายังคงมีความไม่เข้ากันของเฟสในพอลิเมอร์ผสมส่งผลให้ไม่ช่วยพัฒนาสมบัติเชิงกลเท่าใดนัก และเมื่อทำการเติมเซลลูโลสนาโนคริสตัลที่ผ่านการดัดแปลงลงไปพบว่าทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้นกันของแต่ละเฟสทำให้ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้มากขึ้นส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมมีสมบัติที่ดีขึ้นทั้งความแข็งแรงและความยืดหยุ่น

จากการศึกษาของ N. Lin และคณะ [18] ทำการศึกษาการผลของแอสิติเลเตดเซลลูโลสนาโนคริสตัลต่อพอลิแล็กติกแอซิดพบว่าแอสิติเลเตดเซลลูโลสนาโนคริสตัลสามารถเข้าได้กับพอลิแล็กติกแอซิดมีการกระจายตัวที่ดีของแอสิติเลเตดเซลลูโลสนาโนคริสตัลในพอลิแล็กติกแอซิดเนื่องจากสามารถลดแรงระหว่างโมเลกุลของแอสิติเลเตดเซลลูโลสนาโนคริสตัลกับพอลิแล็กติกแอซิดทำให้เกิดความเข้ากันได้มากขึ้นรวมถึงของแอสิติเลเตดเซลลูโลสนาโนคริสตัลยังมีสมบัติเสริมแรงให้กับพอลิแล็กติกแอซิดอีกทั้งยังส่งผลการผลึกเกิดผลึกในพอลิแล็กติกแอซิดเกิดเร็วขึ้นหรือกล่าวได้ว่าแอสิติเลเตดเซลลูโลสนาโนคริสตัลเป็นสารก่อผลึกให้กับพอลิแล็กติกแอซิด



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของแอสิติเลเตดเซลลูโลส

จากการศึกษาของ R. Homklinec และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาสมบัติของสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เติมสารก่อผลึก พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อัตราส่วนต่างๆเกิดการแยกเฟสมีสมบัติที่ไม่เข้ากัน ถึงแม้การเติมสารก่อผลึกลงไปจะทำให้เกิดผลึกได้เร็วขึ้น และทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตนั้นมีความเปราะลดลงและความยืดตัวสูงขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อตรวจสอบด้วย scanning electron microscope พบว่ายังคงมีความไม่เข้ากันเกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

จากการศึกษาของ S. Pilla และคณะ [24] ได้ทำการเติมเซลลูโลสลงในพอลิแล็กติกแอซิดพบว่าส่งผลให้พอลิแล็กติกแอซิดมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น มีการยึดตัวที่ดีขึ้น แต่พบว่าเซลลูโลสกับพอลิแล็กติกแอซิดเกิดความไม่เข้ากัน เกิดการแยกตัวกันของเซลลูโลสกับพอลิแล็กติกแอซิดในบางอัตราส่วน ทำให้สมบัติเชิงกลที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีมากนัก เนื่องจากเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3

ตำแหน่งภายในโครงสร้างส่งผลให้มีแรงระหว่างโมเลกุลที่สูงมากจึงจำเป็นต้องลดปริมาณหรือทำการเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลก่อนนำไปใช้งาน

จากการศึกษาของ T. Chaichana และคณะ [27] พบว่า *Bacillus licheniformis* จะผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากของเหลวในกระเพาะหมักของวุ้น ซึ่งมีแบคทีเรียจำนวน 20 ไอโซเลท โดยไอโซเลท B4 มีกิจกรรมผลิตเอนไซม์สูงที่สุด และมีความใกล้เคียงกับ *Bacillus subtilis* มากที่สุดคือ 99 % เมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค 16s rDNA sequencing เอนไซม์เซลลูเลสที่บริสุทธิ์โดยการตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต แล้วผ่านคอลัมน์ DEAD Toyopearl 650M, Butyl-Toyopearl 650M และ SuperQ-650 พบว่าสมบัติของเอนไซม์มีค่าแอกติวิตีจำเพาะของเอนไซม์ เท่ากับ 4.70 U/mg protein น้ำหนักของโมเลกุลเอนไซม์มีค่าประมาณ 35 KDa และทำงานได้ที่พีเอช 6.0 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความเสถียรที่พีเอช 5.0 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดย Mn^{2+} และ Fe^{3+} สามารถกระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์ แต่ Cu^{2+} มีผลเป็นตัวขัดขวางกิจกรรมของเอนไซม์นอกจากนี้ เอนไซม์บริสุทธิ์มีความสามารถในการย่อย CMC และของเหลือใช้ทางการเกษตรได้ดี เช่น ชังข้าวโพด ฟางข้าว จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะนำเอนไซม์นี้ไปประยุกต์ในด้านต่างๆ

จากการศึกษาของ T. Yokohara และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบว่าที่อัตราส่วนของพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตค 80:20 เกิดการแยกเฟสกันอย่างชัดเจนพอลิเมอร์ ดังสรุปได้ว่าพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไม่มีสมบัติที่สามารถเข้ากันได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

- พอลิแล็กติกแอซิด(PLA pellet (4003D grade, Natureworks))ชนิดเกรดอัดรีดสั่งซื้อจากบริษัท BC Polymers Marketing Co., Ltd.
- ลิกโนเซลลูโลสจากใยกล้วย ที่ผ่านกรรมวิธีสกัดเอาสิ่งสกปรกออก (ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส) ด้วยการต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ฟอกขาวด้วยไฮโปคลอไรท์ และลดขนาดสายโซ่เซลลูโลสด้วยการแช่ในกรดซัลฟิวริก (ความเข้มข้น 1 โมลาร์) เป็นเวลา 5 วัน ที่อุณหภูมิห้อง
- แบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* จากบริษัท Vega-Bacillus Subtilis
- ดินปุ๋ย ยี่ห้อนางสีดา

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีสำหรับเตรียมเซลลูโลสในรูปผงโดยเทคนิคการละลายและตกตะกอน

- | | |
|--|----------|
| - ยูเรีย | AR grade |
| - โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) | AR grade |
| - กรดซัลฟิวริก (H ₂ SO ₄) | AR grade |
| - น้ำกลั่น | |

สารเคมีสำหรับเตรียมแอซิติเลตเซลลูโลสที่มีระดับของการแทนที่ต่างๆ

- | | |
|--|----------|
| - โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) | AR grade |
| - โมโนไวนิลเอซีเตต | AR grade |
| - พอลิแล็กติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ 1 รอบ | |
| - น้ำกลั่น | |

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
- เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (LTE-26-44, Labtech Scientific, Labtech Engineering, Thailand)
- เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Labtech Scientific, Labtech Engineering, Thailand)
- เครื่องอัด (Labtech Scientific, Labtech Engineering, Thailand)
- เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine (LR100K, LLOYD, UK))
- เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- Magnetic stirrer
- Magnetic bar

3.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมเซลลูโลสเจลโดยเทคนิคการละลายและตกตะกอน

เตรียมสารละลายผสม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 70 กรัม ยูเรีย 12 กรัม ในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร นำสารละลายผสมดังกล่าวไปลดอุณหภูมิในช่องแช่แข็ง ให้ได้อุณหภูมิต่ำกว่า -5 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเซลลูโลสจำนวน 50 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วนำลดอุณหภูมิในช่องแช่แข็งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิจนต่ำกว่า -5 องศาเซลเซียส จึงนำสารละลายผสมมาเทลงในบีกเกอร์เซลลูโลส เซลลูโลสเกิดการบวมตัวเป็นวุ้นใส กวนให้เซลลูโลสกลายเป็นเจลใส แล้วนำไปแช่ในช่องแช่แข็งเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อให้ได้สารละลายเซลลูโลสที่ละลายอย่างสมบูรณ์ จากนั้นเตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 1 โดยมวล ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 5 โดยมวล จำนวน 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปเติมในสารละลายเซลลูโลส กวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วตกตะกอนด้วยการเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกร้อยละ 1 โดยมวล จำนวน 1000 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการล้างและกรองสารที่ตกตะกอนได้ ด้วยน้ำกลั่นจนมีค่า pH เท่ากับ 7 เพื่อกำจัดเกลือออกจนหมด จึงได้เซลลูโลสเจล

3.4.2 การเตรียมแอซิติเลตเซลลูโลสที่มีระดับของการแทนที่ต่างๆ

นำเซลลูโลสเจลทั้งหมดที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.4.1 มาเติมในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร และวางบน เครื่องกวนสาร แบบให้ความร้อน พร้อมกวนตลอดเวลาด้วยแท่งแม่เหล็ก จากนั้นเติมไวนิลแอซิติตตามอัตราส่วนต่างๆดังตารางที่ 3.1 กวนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารละลาย

ด้วยแท่งแม่เหล็ก หลังจากนั้น เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ซ้ำๆ เมื่อเติมเสร็จทั้งจนไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะสังเกตว่าค่า pH จะลดลงเรื่อยๆเนื่องจากปฏิกิริยาแอซิติลเลชัน ทำการหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่า pH คงที่ ซึ่งแสดงว่าไวนิลแอซิติลถูกใช้จนหมด หลังจากนั้นทำการตกตะกอนสารดังกล่าวด้วยน้ำกลั่นจนมีค่า pH เท่ากับ 7 จึงได้แอซิติลเลตเซลลูโลส นำแอซิติลเลตเซลลูโลสไปอบให้แห้ง ในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ต่อไป

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเซลลูโลสกับไวนิลแอซิติล

สูตร	หน่วยไกลโคซิดิก :ไวนิลแอซิติล (อัตราส่วนโดยโมล)
Cellulose	1 : 0
1ACC	1 : 1
3ACC	1 : 3
6ACC	1 : 6
9ACC	1 : 9
12ACC	1 : 12
15ACC	1 : 15
18ACC	1 : 18

3.4.3 เทคนิคการวิเคราะห์แอซิติลเลตเซลลูโลส

นำแอซิติลเลตเซลลูโลสที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.4.2 มาตรวจสอบเพื่อทำการยืนยันโครงสร้างทางเคมีของแอซิติลเลตเซลลูโลส และหาระดับการแทนที่ต่างๆของแอซิติลเลตเซลลูโลสโดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแอซิติลเลตเซลลูโลส ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

3.4.4 การวิเคราะห์ระดับการแทนที่ของแอสซิทีเลตเซลลูโลส (Degree of substitution) ด้วยเทคนิคการไทเทรต

นำแอสซิทีเลตเซลลูโลสที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.4.2 มาตรวจสอบเพื่อทำการคำนวณหา ระดับการแทนที่ของแอสซิทีเลตเซลลูโลส โดยการไทเทรต เริ่มจากนำแอสซิทีเลตเซลลูโลสที่สังเคราะห์ ได้มาต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ จำนวน 30 มิลลิลิตร เป็น เวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้อย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นนำสารละลายที่ต้มไปทำ การไทเทรตด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0M และทำการบันทึกค่าปริมาณของไฮดรอกคลอริกที่ได้ นำไปเทียบกับการไทเทรตเซลลูโลส เพื่อนำไปคำนวณค่าระดับการแทนที่ของแอสซิทีเลตเซลลูโลส โดย แทนค่าในสมการ

$$DS = 0.162A / (1 - 0.058A)$$

เมื่อ A คือจำนวนมิลลิมอลของ NaOH ต่อน้ำหนักเป็นกรัมของตัวอย่าง

3.4.5 การเตรียมแอสซิทีเลตเซลลูโลสสำหรับนำไปใช้ผสมกับพอลิแล็กติกแอซิด

เลือกสูตรที่ทำปฏิกิริยาแอสซิทีเลชันสูงสุดมาใช้ คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเซลลูโลสกับไวนิลแอซีเตต 1:12 โดยนำเซลลูโลสเจลที่เตรียมได้จากขั้นตอน 3.4.1. ไวนิลแอซีเตต 286.67 กรัม เซลลูโลสเจล 25 กรัม (คิดที่น้ำหนักแห้งของเซลลูโลส) เติมน้ำในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมน้ำ เพลสติกพอลิแล็กติกแอซิดที่ผ่านการหลอมเหลวด้วยเครื่องอัลตราซาวด์จำนวน 100 กรัม กวนให้ เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก หลังจากนั้น เติมน้ำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ช้าๆ เมื่อเติมเสร็จทิ้งจนไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะสังเกตว่าค่า pH จะลดลงเรื่อยๆเนื่องจาก ปฏิกิริยาแอสซิทีเลชัน ทำการหยุดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่า pH คงที่ ซึ่ง แสดงว่าไวนิลแอซีเตตถูกใช้จนหมด หลังจากนั้นทำการตกตะกอนสารดังกล่าวด้วยน้ำกลั่นจนมีค่า pH เท่ากับ 7 จึงได้แอสซิทีเลตเซลลูโลสที่กระจายอยู่ในพอลิแล็กติกแอซิดอย่างสม่ำเสมอ

เนื่องจากผลผลิตที่ได้ในขั้นตอนนี้คือได้แอสซิทีเลตเซลลูโลสที่กระจายอยู่ในพอลิแล็กติกแอซิด ทำให้ต้องตรวจสอบแอสซิทีเลตเซลลูโลสที่เหลืออยู่จากการสังเคราะห์ เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดอาจ ไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสกับไวนิลแอซีเตตทำให้ต้องตรวจสอบจำนวนแอสซิทีเลต เซลลูโลสที่เหลืออยู่ โดยการสกัดเอาพอลิแล็กติกแอซิดออก โดยการนำแอสซิทีเลตเซลลูโลสที่กระจาย อยู่ในพอลิแล็กติกแอซิดจำนวน 5 กรัม ที่ผ่านการอบให้แห้ง ต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0

โมลาร์ 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดพอลิแล็กติกแอซิด หลังจากนั้นทำการอบสารที่กำจัดพอลิแล็กติกแอซิดออก เปรียบเทียบค่าน้ำหนักเริ่มต้น พบว่ามีปริมาณแอซิติเลตเซลลูโลสอยู่ร้อยละ 20 เพื่อให้ได้แอซิติเลตเซลลูโลสที่เพียงพอต่อการนำไปใช้ผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดจึงได้มีการเตรียมสูตรคอมพาวด์นี้ไว้ที่ 5 กิโลกรัม

3.4.6. การผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับแอซิติเลตเซลลูโลสด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่

ทำการผสมพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์กับแอซิติเลตเซลลูโลสเนื้อผสมที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.4.5 โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่โดยผสมอัตราส่วนดังตารางที่ 3.2 โดยอุณหภูมิของสกรูการผสมอยู่ที่ 170/175/175/175/170 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และรอบการหมุนของสกรูอยู่ที่ 40 rpm เมื่อทำการผสมเสร็จนำไปตัดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและแอซิติเลตเซลลูโลส

ชื่อตัวอย่างสูตรผสม	พอลิแล็กติกแอซิด (g): แอซิติเลตเซลลูโลส (g)
PLAACC1	99 : 1
PLAACC3	97 : 3
PLAACC5	95 : 5

3.4.7 การขึ้นรูปฟิล์มสูตรผสม

นำพอลิแล็กติกแอซิด และ พอลิแล็กติกแอซิดสูตรผสมจากหัวข้อ 3.4.6 ชั่งน้ำหนักจำนวน 4 กรัม เทลงแม่แบบขนาดความกว้าง 6 เซนติเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร และความหนา 0.1 มิลลิเมตร โดยทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องอัด (Compression machine) ใช้อุณหภูมิที่ 160 องศาเซลเซียส ความดัน 5 เมกะปาสคาล ระยะเวลาในการหลอมสาร 8 นาที จำนวนครั้งในการกดอัดเพื่อไล่ฟองอากาศ 3 ครั้ง ระยะเวลาในการกดอัดเพื่อไล่ฟองอากาศ 0.5 นาทีต่อครั้ง ระยะเวลาในการกดอัด 5 นาที ระยะเวลาในการลดอุณหภูมิ 20 นาที

3.4.8 การทดสอบสมบัติเชิงกล(mechanical properties)

การทดสอบสมบัติเชิงกลในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติความทนแรงดึง (tensile strength) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (strain at Break) และ โมดูลัส (modulus) ของฟิล์มมาตรฐาน ASTM D882 ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีความกว้าง 0.5 เซนติเมตร ความยาว 8 เซนติเมตร และความหนา 0.10-0.16 มิลลิเมตร โดยใช้ load cell ขนาด 500 นิวตัน อัตราเร็วในการดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะที่วัดการยืดออก (gauge length) 5 เซนติเมตร สำหรับจำนวนชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบคือ 5 ชิ้นต่อประเภทของฟิล์ม

3.4.9 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายของพอลิแล็กติกอซิเดส

ทดสอบการย่อยสลายของฟิล์มพอลิแล็กติกอซิเดสโดยทำการตัดตัวอย่างขนาดความกว้าง 3 เซนติเมตร และ ความยาว 3 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้นงานต่อหนึ่งสูตร โดยวิธีฝังกลบในดินสองชนิด คือดินควบคุมจำนวน 5 กิโลกรัม และดินที่ผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* โดยใช้ดินจำนวน 5 กิโลกรัม และ ผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* จำนวน 1 กิโลกรัม ในกล่องขนาด กว้าง 40 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร และสูง 40 เซนติเมตร

โดยทำการเก็บตัวอย่างทุก 30 วัน เพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปจากสมการ

$$\% \text{ Weight loss} = [(W_0 - W) \times 100] / W_0$$

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักของแผ่นฟิล์มก่อนการฝังกลบ

W คือน้ำหนักของแผ่นฟิล์มหลังการฝังกลบ

และวิเคราะห์สัญญาณวิทยาของฟิล์มที่ผ่านการฝังกลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แล้วเปรียบเทียบการย่อยสลายระหว่างดินควบคุม และดินผสมแบคทีเรีย

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1.1 เซลลูโลสเจลโดยเทคนิคการละลายและตกตะกอน

เซลลูโลสเจลที่เตรียมโดยเทคนิคการละลายและตกตะกอน มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 การทำให้ได้ซึ่งเซลลูโลสเจลในงานวิจัยนี้ เริ่มต้นด้วยการสกัดลิกโนเซลลูโลสให้เป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ จากนั้นทำการละลายเซลลูโลสด้วยระบบ non-derivatizing solvent คือ ใช้ระบบสารละลายผสม NaOH/Urea/water ในภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ในภาวะอุณหภูมิดังกล่าว โมเลกุลของหมู่ไฮดรอกซิล สามารถสอดแทรกเข้าไปทำลายพันธะ inter-hydrogen bonding ระหว่างสายโซ่โมเลกุลเซลลูโลส ทำให้เซลลูโลสเกิดการบวมตัว หลังจากนั้นโมเลกุลของยูเรีย ได้แทรกสอดเข้าไปอยู่ระหว่างกลางของสายโมเลกุลเซลลูโลสจนทำให้ intermolecular hydrogen bonding มีค่าเป็นศูนย์ สายโซ่โมเลกุลเซลลูโลสจึงแยกออกออกและเป็นอิสระซึ่งกันและกัน จึงได้เซลลูโลสในรูปของสารละลาย เนื่องจากโมเลกุลของเซลลูโลสสามารถรวมกลายเป็นผลึกกลับมาได้อีกครั้งเมื่อทำการกำจัดเอา NaOH และยูเรียออกจากสารละลายเซลลูโลส เพื่อให้ได้เซลลูโลสในรูปเจลจึงต้องเติมตัวขัดขวางการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเซลลูโลส ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงได้เติมสารช่วยกระจายตัว (stabilizing agent) ซึ่งในที่นี้ คือ สารละลายแป้ง โดยโมเลกุลของแป้งได้แทรกสอดอยู่ระหว่างกลางของโมเลกุลเซลลูโลสจึงทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โมเลกุลเซลลูโลสเกาะรวมตัวกันเป็นผลึกขนาดใหญ่ เมื่อทำการกำจัด NaOH และยูเรียออกจากสารละลายเซลลูโลส โดยการตกตะกอนสารละลายเซลลูโลสในสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น NaOH จะถูกสะเทินให้เป็น Na_2SO_4 ซึ่งจะส่งผลให้โมเลกุลเซลลูโลสพยายามจัดเรียงตัวใหม่อีกครั้งเพื่อเกิดเป็นผลึกเซลลูโลส แต่ด้วยมีโมเลกุลแป้งขัดขวางอยู่ การจัดเรียงตัวจึงเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในขณะที่โมเลกุลแป้งเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด เมื่อทำการปล่อยให้ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมงโมเลกุลแป้งจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างสมบูรณ์ จึงทำการกรองเพื่อล้าง Na_2SO_4 , urea และ glucose ออก ผลที่ได้จะได้เป็นเซลลูโลสเจลบริสุทธิ์ ดังรูปที่ 4.1

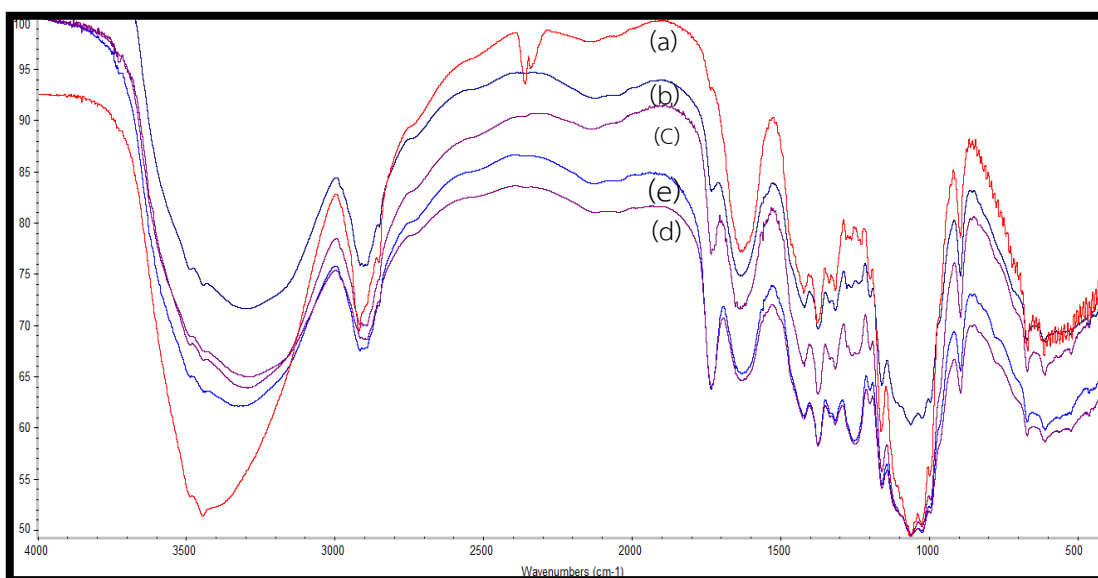


รูปที่ 4.1 เซลลูโลสเจล

4.1.2 การวิเคราะห์แอสซิติเลตเซลลูโลสด้วยเทคนิคเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

แอสซิติเลตเซลลูโลสสังเคราะห์ได้โดยการทำปฏิกิริยา acetylation ระหว่างไวนิลแอสซิเตตกับเซลลูโลสเจล โดยอาศัย NaOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลองนี้ได้ทำการสังเคราะห์แอสซิติเลตเซลลูโลสสูตรต่างๆ โดยปรับอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส : ไวนิลแอสซิเตตดังนี้ 1:3, 1:6, 1:9, 1:12 และ 1:15 จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันอะซิติลของแอสซิติเลตเซลลูโลสด้วยเทคนิค FT-IR ผลการวิเคราะห์ปรากฏ ในรูปที่ 4.2 จากรูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแอสซิติเลตเซลลูโลสด้วยเทคนิคเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ที่อัตราส่วน 1:3, 1:6, 1:9, 1:12 และ 1:15 พบพีกที่สำคัญที่ 1740 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของอะซิติลเอสเทอร์ที่เกาะบนสายโซ่เซลลูโลส ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลสพบว่าไม่ปรากฏพีกนี้ที่ตำแหน่งดังกล่าว จึงแสดงได้ว่าเกิดปฏิกิริยา acetylation เกิดขึ้นจริง ความเข้มของเอสเทอร์พีกจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนระหว่าง Cellulose : vinyl acetate และเริ่มคงที่ที่อัตราส่วน 1 : 12 ทั้งนี้เนื่องจากผลผลิตแอสซิติเลตเซลลูโลส จะเกิดการตกตะกอนแยกออกมาจากระบบปฏิกิริยาดังนั้นแม้ว่าจะเติมไวนิลแอสซิเตตเพิ่มไปมากกว่านี้ ก็จะไม่ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยา acetylation เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ไวนิลแอสซิเตตจะเสื่อมสภาพเนื่องจากเกิดปฏิกิริยา hydrolysis กับน้ำแทน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยา acetylation ทำให้หมู่ไฮดรอกซิล ของเซลลูโลสลดลง ซึ่งสอดคล้องกับพีกบริเวณ $3000 - 3600\text{ cm}^{-1}$ (cellulose hydroxyl

band) ที่ลดลงตามอัตราส่วน cellulose : VAM จากผลทางสเปกโตรสโคปีทำให้สรุปได้ว่าอัตราส่วน cellulose 1 : VAM 12 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียมแอสิติเลตเซลลูโลส



รูปที่ 4.2 FTIR สเปกตรัมของเซลลูโลส (a) และ แอสิติเลตเซลลูโลสที่เตรียมจากอัตราส่วนเซลลูโลส : ไวนิลแอสिटเตดสัดส่วนต่างๆ 1:3 (b) 1:6 (c) 1:9 (d) และ 1:12 (e)

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ระดับการแทนที่ของแอสิติเลตเซลลูโลส (Degree of Substitution, DS) ด้วยเทคนิคการไทเทรต

เพื่อหาค่า DS จึงทำการไฮโดรลิซิสหมู่แอสिटเตตออกโดยการทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นทำการ back titration โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน แล้วคำนวณหาค่า DS ตามสมการ

$$DS = 0.162A / (1 - 0.058A)$$

เมื่อ A คือจำนวนมิลลิมอลของ NaOH ต่อน้ำหนักเป็นกรัมของตัวอย่าง

ผลที่ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.1 ถ้าหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะได้ DS = 3 จากการทดลองนี้พบว่าได้ค่า DS อยู่ระหว่าง 0.018-0.054 ซึ่งมีค่าต่ำมาก แสดงว่าการเกิดปฏิกิริยา

acetylation เกิดขึ้นที่พื้นผิวของอนุภาคเซลลูโลสเท่านั้น หรือเรียกเป็น surface modification การทำ surface modification ก็เพื่อให้แอสซิติลเลตเซลลูโลสยึดเกาะกับพอลิแล็กติกแอซิดได้ (interphase adhesion force) ในขณะเดียวกันก็ลดการเกาะกลุ่มรวมตัวกันของอนุภาคเซลลูโลส (cohesive force หรือ agglomeration) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาเครื่องดับในขั้นตอนการผสมในเครื่องอัดรีดเกลียวคู่

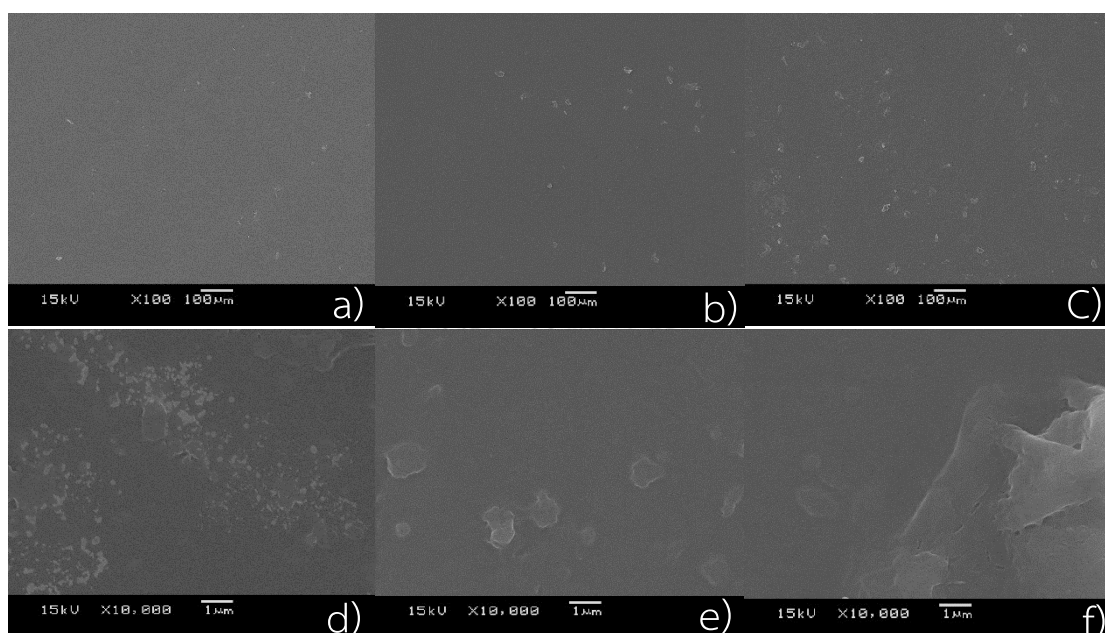
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ระดับการแทนที่ของแอสซิติลเลตเซลลูโลส

สูตร	Degree of Substitution (DS)
Cellulose	0.000
1ACC	0.000
3ACC	0.018
6ACC	0.039
9ACC	0.043
12ACC	0.054
15ACC	0.054
18ACC	0.054

4.1.4 ผลการวิเคราะห์เข้ากันได้ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับแอสซิติลเลตเซลลูโลสบนพอลิแล็กติกแอซิดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

หลังจากการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับแอสซิติลเลตเซลลูโลสด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่แล้วทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องอัด เพื่อทำการตรวจสอบความเข้ากันได้ของพอลิแล็กติกแอซิดกับแอสซิติลเลตเซลลูโลส รวมถึงดูการกระจายตัวของแอสซิติลเลตเซลลูโลสในพอลิแล็กติกแอซิด จึงนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ได้ผลทดสอบ ดังรูปที่ 4.3 พบว่าฟิล์มผสมสูตร PLAACC1 PLAACC3 และ PLAACC5 แอสซิติลเลตเซลลูโลสที่กำลังขยาย 100 เท่ามีการกระจายตัวที่มีความสม่ำเสมอบนพอลิแล็กติกแอซิด แต่จะเห็นการเกาะกลุ่มที่มีขนาดใหญ่ขึ้นของพอลิแล็กติกแอซิดแอสซิติลเลตเซลลูโลสบนพอลิแล็กติกแอซิดโดยสามารถสังเกตเห็นได้จากภาพที่เห็นบริเวณสีขาวที่ชัดเจนในรูปแฉวบนของฟิล์มผสมสูตร PLAACC5 และเมื่อทำการพิจารณาที่กำลังขยาย 10000 เท่าพบว่าเกิดการแยกเฟสขึ้นของพอลิแล็กติกแอซิดแอสซิติลเลตเซลลูโลสบนพอลิแล็กติกแอซิดที่สูตร PLAACC5

เนื่องจากเมื่อทำการเติมแอซิติเลตเซลลูโลสในปริมาณที่มากขึ้นจะเกิดแรงระหว่างโมเลกุลที่มากขึ้นระหว่างโมเลกุลแอซิติเลตเซลลูโลสเองซึ่งทำให้แรงระหว่างโมเลกุลดังกล่าวมีแรงที่มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับแอซิติเลตเซลลูโลส ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มและมีความสามารถในการกระจายบนพอลิแล็กติกแอซิดที่ลดลง



รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดและฟิล์มสูตรผสม PLAACC1 ที่กำลังขยายต่างๆ (a) PLAACC3 กำลังขยาย 100 เท่า (b) PLAACC5 กำลังขยาย 100 เท่า (c) PLAACC1 กำลังขยาย 10000 เท่า (d) PLAACC3 กำลังขยาย 10000 เท่า (e) และ PLAACC5 กำลังขยาย 10000 เท่า (f)

4.1.5 ผลทดสอบสมบัติเชิงกล

หลังจากการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับแอซิติเลตเซลลูโลสด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่แล้วทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องอัด และนำมาทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสด้วยเครื่องดึงพบว่าค่า ความคงทนต่อแรงดึง ของพอลิแล็กติกแอซิดอยู่ที่ 17.1 MPa และเมื่อทำการเติมแอซิติเลตเซลลูโลสพบว่า PLAACC1 มีค่าความคงทนต่อแรงดึงอยู่ที่ 21.1 MPa และ PLAACC3 มีค่าความคงทนต่อแรงดึงอยู่ที่ 17.8 MPa ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจาก

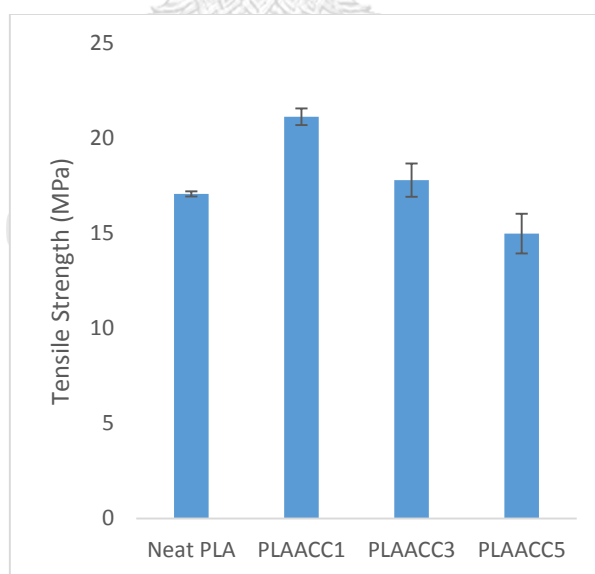
พอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ได้เติมแอซิติเลตเซลลูโลส ในทางกลับกัน PLAACC5 มีค่า ความคงทนต่อแรงดึงที่ต่ำกว่าพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ได้เติมแอซิติเลตเซลลูโลสโดยมีค่าอยู่ที่ 15.0 MPa และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด จากการทดสอบพบว่าค่า ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิแล็กติกแอซิดอยู่ที่ 3.4 และเมื่อทำการเติมแอซิติเลตเซลลูโลสพบว่า PLAACC1 มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดอยู่ที่ 2.8 PLAACC3 มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด อยู่ที่ 2.5 และ PLAACC5 มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดอยู่ที่ 1.9 ซึ่งมีค่าลดลง และ ค่ามอดุลัสจากการทดสอบพบว่าค่า มอดุลัสของพอลิแล็กติกแอซิดอยู่ที่ 798.4 MPa และเมื่อทำการเติมแอซิติเลตเซลลูโลสพบว่าค่า มอดุลัส ของชิ้นทดสอบทั้งสามอัตราส่วนมีค่าที่เพิ่มขึ้นทั้งหมดโดย PLAACC1 มีค่าอยู่ที่ 1415.1 MPa PLAACC3 มีค่าอยู่ที่ 1639.8 MPa และ PLAACC5 มีค่าอยู่ที่ 2076.6 MPa

จากค่าการทดสอบดังกล่าวเมื่อพิจารณา ค่าทดสอบแรงดึงพบว่าฟิล์มสูตร PLAACC1 มีความแข็งแรงที่มากขึ้นกว่าฟิล์มสูตร Neat PLA ส่วนฟิล์มสูตร PLAACC3 มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับฟิล์มสูตร Neat PLA แต่ในฟิล์มสูตรเนื่องจากแอซิติเลตเซลลูโลสมีการกระจายตัวได้ดีบนพอลิแล็กติกแอซิด และไม่เกิดการแยกชั้นกันของพอลิแล็กติกแอซิดกับแอซิติเลตเซลลูโลส ดังรูปที่ 4.3 ทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการทนแรงดึงที่มากขึ้นเนื่องจากแอซิติเลตเซลลูโลสเป็นตัวช่วยในการรับแรงบนแผ่นฟิล์มทำให้ฟิล์มที่ทำการเติมแอซิติเลตเซลลูโลสในอัตราส่วนต่างๆ สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับแผ่นฟิล์มได้ แต่ในทางกลับกันถ้าเติมแอซิติเลตเซลลูโลสปริมาณที่มากขึ้นดังฟิล์มสูตร PLAACC5 จะทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงที่ลดลงอย่างมาก เนื่องจากฟิล์มสูตร PLAACC5 มีการแยกชั้นเกิดขึ้นของพอลิแล็กติกแอซิดกับแอซิติเลตเซลลูโลส ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันไม่ได้ของพอลิแล็กติกแอซิดกับแอซิติเลตเซลลูโลส ดังรูปที่ 4.3 ทำให้ฟิล์มสามารถทนแรงดึงได้น้อยลง และเมื่อพิจารณาค่าร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด พบว่าฟิล์มทั้งสามสูตรมี ค่าร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด มีค่าน้อยกว่าฟิล์มสูตร Neat PLA ทั้งหมดแสดงถึงการยืดตัวที่ลดลงของฟิล์ม เนื่องจากแอซิติเลตเซลลูโลสไปขัดขวางการเคลื่อนตัวของสายโซ่บนพอลิแล็กติกแอซิดขณะทำการดึง ทำให้ฟิล์มมีการยืดตัวที่ต่ำลง โดยพบว่าเมื่อเติมแอซิติเลตเซลลูโลสในปริมาณที่มากขึ้น ยิ่งส่งผลให้ฟิล์มมีการยืดตัวที่ลดลง โดยเป็นเหตุจากแอซิติเลตเซลลูโลสไปขัดขวางการเคลื่อนตัวของสายโซ่บนพอลิแล็กติกแอซิดขณะทำการดึง และความเข้ากันได้ที่ลดลงของพอลิแล็กติกแอซิดกับแอซิติเลตเซลลูโลส ทำให้สมบัติการยืดตัวของฟิล์มมีค่าที่ลดลงและเมื่อทำการสรุปสมบัติของฟิล์มสูตรผสมทั้ง 3 สูตรเทียบกับ Neat PLA โดยพิจารณาจากค่ามอดุลัสพบว่าฟิล์มทั้งสูตรจะมีความเปราะที่มากขึ้นเมื่อทำการเติมแอซิติเลตเซลลูโลสที่ปริมาณสูงขึ้น แต่ฟิล์มสูตร PLAACC1 จะมีความแข็งแรงสูงสุดและความยืดหยุ่นมากที่สุด รองลงมาคือฟิล์มสูตร PLAACC3

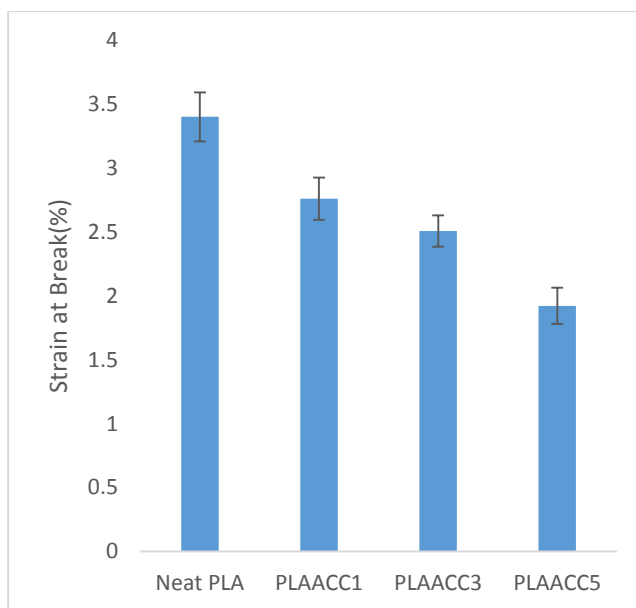
ที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับฟิล์มสูตร Neat PLA แต่มีความยืดหยุ่นต่ำกว่า และฟิล์มสูตร PLAACC5 พบว่ามีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า Neat PLA ซึ่งฟิล์มสูตร PLAACC5 มีความเปราะสูงที่สุด

ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด (Neat PLA) และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสในสัดส่วนร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก (PLAACC1, PLAACC3 และ PLAACC5 ตามลำดับ)

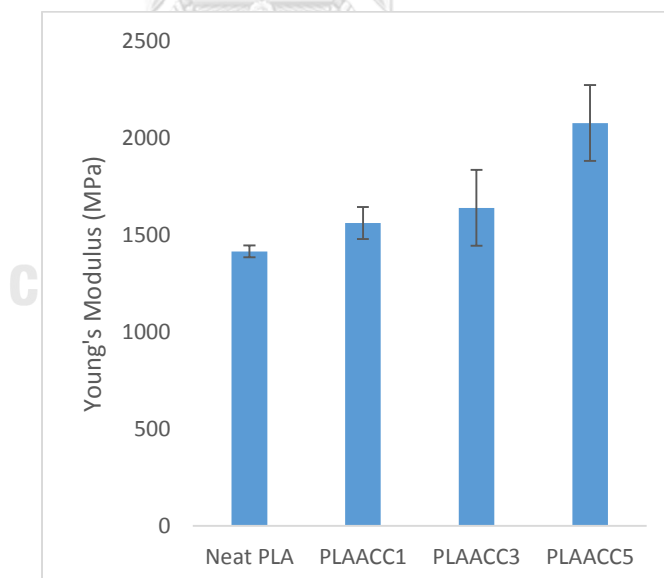
	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	มอดุลัส (เมกะปาสคาล)
Neat PLA	17.1± 0.1	3.4±0.19	1415.1±30.6
PLAACC1	21.1±0.4	2.8±0.16	1561.6±82.3
PLAACC3	17.8±0.9	2.5±0.12	1639.8±196.2
PLAACC5	15.0±1.0	1.9±0.14	2076.6±195.5



รูปที่ 4.4 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด (Neat PLA) และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสในสัดส่วนร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก (PLAACC1, PLAACC3 และ PLAACC5 ตามลำดับ)



รูปที่ 4.5 ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด (Neat PLA) และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสในสัดส่วนร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก (PLAACC1, PLAACC3 และ PLAACC5 ตามลำดับ)



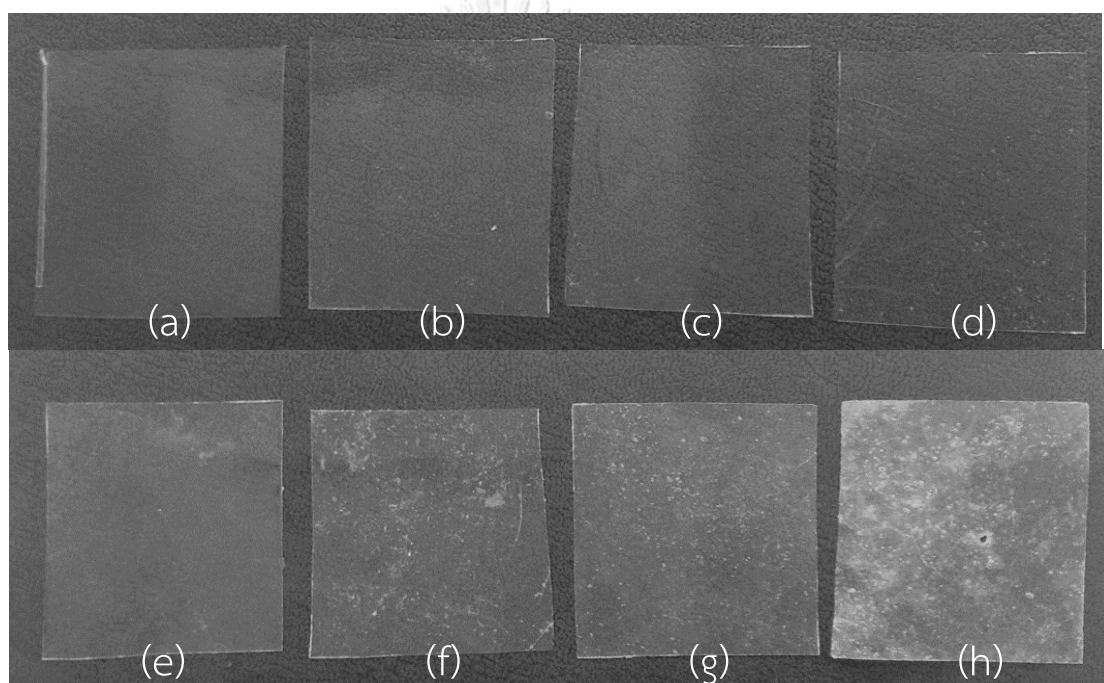
รูปที่ 4.6 ค่ามอดุลัสของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด (Neat PLA) และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสในสัดส่วนร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก (PLAACC1, PLAACC3 และ PLAACC5 ตามลำดับ)

4.1.6 ผลทดสอบการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดสูตรผสมโดยวิธีฝังกลบ

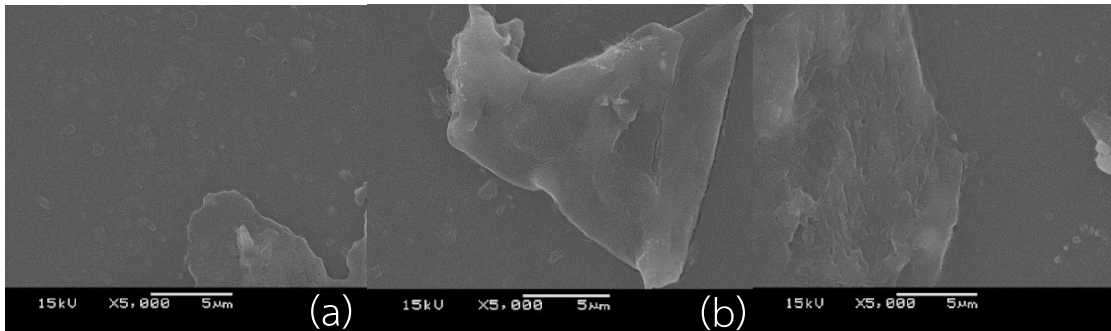
จากการทดสอบการฝังกลบลงในดินโดยทำการเปรียบเทียบการย่อยสลายในดินที่มีความแตกต่างกันสองชนิดคือดินควบคุม และดินที่ทำการผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* จากการสังเกตด้วยตาเปล่าที่ระยะเวลา 60 วัน หลังการฝังกลบ พบว่าฟิล์มทุกๆอัตราส่วนทั้งที่ทำการฝังกลบในดินควบคุมและดินที่ทำการผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* ไม่พบความเปลี่ยนแปลงใดๆในแผ่นฟิล์ม แต่เมื่อฝังกลบครบระยะเวลา 90 วันสามารถสังเกตความเปลี่ยนแปลงของฟิล์มที่ทำการฝังกลบในดินที่ผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* พบว่าฟิล์มเกิดการขึ้นฝ้าขึ้นหรือเกิดด่างสีขาวบนฟิล์ม ดังรูปที่ 4.7 โดยพบว่าฟิล์มสูตร PLAACC5 พบการขึ้นฝ้าเกือบทั้งแผ่นเป็นบริเวณกว้างและมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่ฟิล์มสูตร PLAACC3 และ PLAACC1 ในส่วนของฟิล์มสูตร PLAACC3 พบฝ้าขึ้นแค่เล็กน้อยบางส่วนของฟิล์มเท่านั้น แต่พบว่ามากกว่าฟิล์มสูตร PLAACC1 แต่ในทางกลับกันพบว่าฟิล์มที่ทำการฝังกลบในดินควบคุม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆ จากผลการทดลองดังกล่าวจึงทำการสอบอีกรอบโดยนำฟิล์มที่ฝังกลบครบ 90 วัน ทุกสูตรไปส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าฟิล์มที่ทำการฝังกลบลงในดินผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* พบว่าเกิดช่องว่างในโครงสร้างของแผ่นฟิล์ม และช่องว่างดังกล่าวพบมากที่สุดและมีความลึกที่สุดที่สูตร PLAACC5 ดังแสดง ในรูปที่ 4.9 และในสูตร PLAACC3 และ PLAACC1 พบช่องว่างแค่บางส่วนและน้อยกว่าสูตร PLAACC5 ในส่วนของฟิล์มทุกอัตราส่วนที่ฝังกลบลงในดินควบคุมไม่พบความเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างดัง รูปที่ 4.8

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* มีผลต่อการย่อยสลายฟิล์มสูตรผสม เนื่องจากเมื่อทำการเปรียบเทียบฟิล์มฝังกลบลงในดินควบคุมกับดินที่ผสมแบคทีเรีย พบว่าฟิล์มที่ฝังกลบลงในดินที่ผสมแบคทีเรียเกิดการย่อยสลายที่เวลาสามเดือนโดยสามารถสังเกตด้วยตาเปล่า และตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าฟิล์มเกิดฝ้าสีขาว และมีบริเวณช่องว่างหรือรูเกิดขึ้นซึ่งเกิดจากแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* ทำการย่อยแอซิติเลตเซลลูโลสบนฟิล์มทำให้เกิดช่องว่างดังกล่าว ทำให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายขึ้น แต่ในฟิล์มที่ทำการฝังกลบในดินควบคุมกลับไม่พบการย่อยสลายเลย สาเหตุดังกล่าวเกิดจากแอซิติเลตเซลลูโลสในฟิล์มสูตร PLAACC1 และสูตร PLAACC3 มีความเข้ากันได้กับพอลิแล็กติกแอซิดเป็นอย่างดี ทำให้พอลิแล็กติกแอซิดเกิดการเคลือบหรือห่อหุ้มแอซิติเลตเซลลูโลสภายในฟิล์มทำให้แบคทีเรีย *Bacillus*

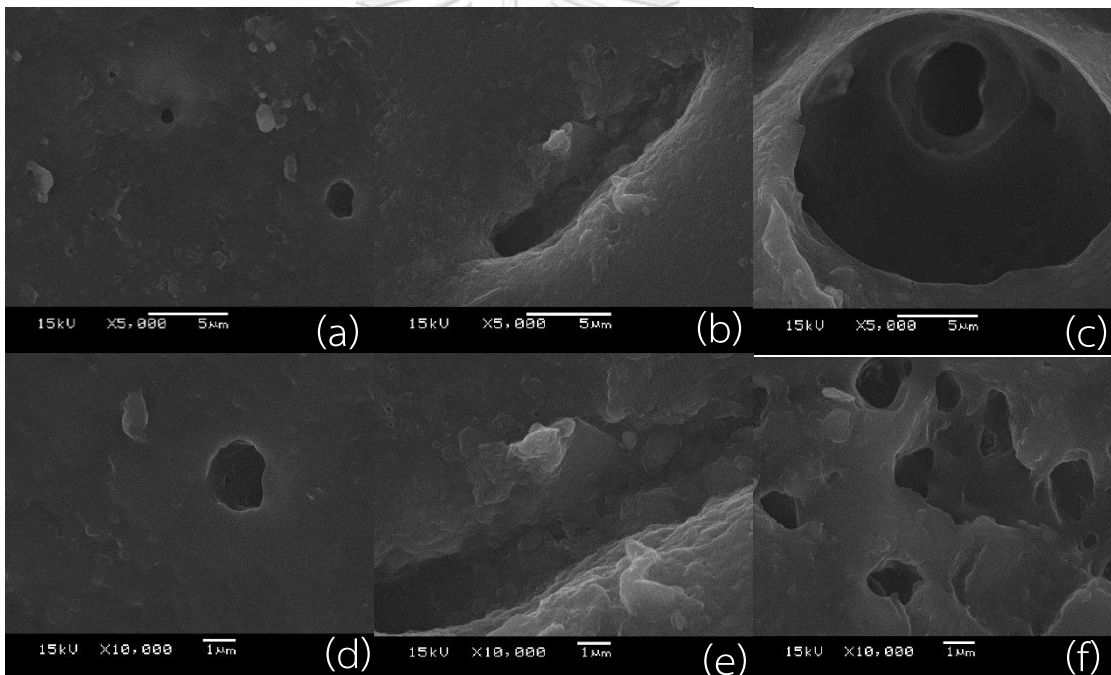
licheniformis ไม่สามารถย่อยสลายแอสซิติเลตเซลลูโลสในฟิล์มได้ ทำให้ไม่เกิดการย่อยสลาย ซึ่งตรงข้ามกับฟิล์มสูตร PLAACC5 เมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่า เกิดการแยกชั้นกันของพอลิแล็กติกแอซิดแอสซิติเลตเซลลูโลสบนพอลิแล็กติกแอซิด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิแล็กติกแอซิดไม่ได้ทำการห่อหุ้มหรือเคลือบแอสซิติเลตเซลลูโลสได้ทั้งหมด ส่งผลแอสซิติเลตเซลลูโลสสัมผัสกับน้ำ ความชื้นและแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* ในดินมากกว่าฟิล์มสูตร PLAACC1 และสูตร PLAACC3 ทำให้เกิดการย่อยสลายได้ง่ายกว่าฟิล์มทั้งสองสูตร



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดสูตรผสมในดินควบคุมที่ระยะเวลา 90 วัน Neat PLA (a) PLAACC1 (b) PLAACC3 (c) PLAACC5 (d) และภาพถ่ายของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดสูตรผสมในดินผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* Neat PLA (e) PLAACC1 (f) PLAACC3 (g) และ PLAACC5 (h)



รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดสูตรผสมกำลังขยาย 5000 เท่า ที่ผ่านการฝังกลบในดินควบคุมในระยะเวลา 90 วัน PLAACC1 (a) PLAACC3 (b) และ PLAACC5 (c)



รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดสูตรผสมที่ผ่านการย่อยสลายในดินที่ทำการผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* ระยะเวลา 90 วัน PLAACC1 กำลังขยาย 5000 เท่า (a) PLAACC3 กำลังขยาย 5000 เท่า (b) PLAACC5 กำลังขยาย 5000 เท่า (c) PLAACC1 กำลังขยาย 10000 เท่า (d) PLAACC3 กำลังขยาย 10000 เท่า (e) และ PLAACC5 กำลังขยาย 10000 เท่า (f)

4.1.7 ผลทดสอบการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดสูตรผสมโดยการทดสอบร้อยละ น้ำหนักที่หายไป (Weight loss)

จากผลการทดลอง พบว่าฟิล์มสูตรผสมที่ถูกฝังกลบในดินควบคุมน้ำหนักที่หายไป น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตรผสมที่ทำการฝังกลบในดินผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* โดยพบว่าฟิล์มสูตรผสมที่ฝังในดินควบคุมตัวแรกที่เกิดการสูญเสียน้ำหนักคือฟิล์มสูตร PLAACC5 ที่ระยะเวลา 60 วันแต่หายไปเพียงแค่อ้อยละ 0.01 เท่านั้น หลังจากนั้นเวลาผ่านไป 90 วัน พบว่าฟิล์มทุกสูตรมีค่าน้ำหนักที่ลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจไม่ได้เกิดจากปัจจัยการย่อยสลาย เนื่องจากเมื่อการตรวจสอบผ่านกล้องจุลทรรศน์แผ่นส่องกราดพบว่าไม่มีร่องรอยการย่อยของ แผ่นฟิล์ม ซึ่งตรงข้ามกับฟิล์มที่ทำการฝังกลบในดินที่ทำการผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* พบว่ามีร่องรอยการย่อยสลายเกิดขึ้น ในฟิล์มสูตร PLAACC1 PLAACC3 และ PLAACC5 อีกทั้งยัง สอดคล้องกับน้ำหนักที่หายไปของแผ่นฟิล์ม พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 90 วันฟิล์มสูตร PLAACC5 พบว่า เกิดการย่อยสลายสูงสุด โดยมีน้ำหนักหายไปร้อยละ 6.43 โดยสามารถสรุปได้ว่า แบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* มีผลต่อการช่วยย่อยของฟิล์มสูตรผสม เนื่องจากแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* สามารถปล่อยเอนไซม์ที่ชื่อว่า เซลลูเลส โดยจะไปช่วยเร่งการย่อยของแอซิติเลตเซลลูโลสในฟิล์ม ทำ ให้น้ำหนักของแผ่นฟิล์มลดลง รวมทั้งยังพบว่า เมื่อเติมแอซิติเลตเซลลูโลสมากขึ้น ฟิล์มมี ความสามารถในการดูดซึมน้ำ ความชื้น และแบคทีเรียในดินได้ดีมากขึ้น ทำให้เกิดการย่อยสลายได้ ง่าย และทำให้เกิดการสลายตัวทางไฮโดรไลติกทำให้เกิดกรดคาร์บอกซิลิกซึ่งช่วยเร่งอัตราการ สลายตัวได้เร็วมากขึ้น จะส่งผลต่อการย่อยมากขึ้น โดยสังเกตค่าจาก ตารางที่ 4.10 พบว่าที่ 90 วัน น้ำหนักของฟิล์มจะลดลงมากเมื่อมีแอซิติเลตเซลลูโลส ในแผ่นฟิล์มสูตรผสมมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของฟิล์มสูตรผสมที่ทำการฝังกลบในดินควบคุม ที่ระยะเวลาต่างๆ

ตัวอย่าง	ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของฟิล์มสูตรผสมในดินควบคุม		
	30 วัน	60 วัน	90 วัน
Neat PLA	0.00	0.00	0.01
PLAACC1	0.00	0.00	0.03
PLAACC3	0.00	0.00	0.02
PLAACC5	0.00	0.01	0.06

ตารางที่ 4.4 ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของฟิล์มสูตรผสมที่ทำการฝังกลบในดินผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* ที่ระยะเวลาต่างๆ

ตัวอย่าง	ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของฟิล์มสูตรผสมในดินผสมแบคทีเรีย <i>Bacillus licheniformis</i>		
	30 วัน	60 วัน	90 วัน
Neat PLA	0.00	0.00	0.03
PLAACC1	0.00	0.01	0.23
PLAACC3	0.00	0.02	0.38
PLAACC5	0.00	0.02	6.43

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากผลการสังเคราะห์แอซิติเลตเซลลูโลสพบว่าสามารถสังเคราะห์แอซิติเลตเซลลูโลสได้สำเร็จ โดยสามารถทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคเรย์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟระหว่างเซลลูโลสกับเซลลูโลสที่เติมไวนิลแอซิติเตต พบว่าปรากฏกราฟที่มีความแตกต่างกันพบว่ากราฟของเซลลูโลสที่เติมไวนิลแอซิติเตต ปรากฏกราฟที่บริเวณ 1740 cm^{-1} ซึ่งเป็นบริเวณของหมู่เอสเทอร์ ซึ่งเป็นการระบุถึงหมู่เอสเทอร์ของแอซิติเลตเซลลูโลสที่ไม่พบในเซลลูโลส และพบว่า อัตราส่วนแรกที่เกิดการแทนที่ของไวนิลแอซิติเตตบนเซลลูโลส คือ 1:3 โมล (เซลลูโลส : ไวนิลแอซิติเตต) และอัตราส่วนที่สูงที่สุดอยู่ที่ 1:12 โมล โดยมีค่าระดับการแทนที่อยู่ระหว่าง 0.018 - 0.054 ซึ่งมีค่าต่ำมาก แสดงว่าการเกิดปฏิกิริยา acetylation เกิดขึ้นที่พื้นผิวของอนุภาคเซลลูโลสเท่านั้น หรือเรียกเป็น surface modification การทำ surface modification

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสพบว่าค่า ความทนต่อแรงดึง (MPa) ของฟิล์มสูตร PLAACC1 มีค่าความทนต่อแรงดึงอยู่ที่ 21.1 MPa และ PLAACC3 มีค่าอยู่ที่ 17.8 MPa ซึ่งมีค่ามากกว่าพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่เติมแอซิติเลตเซลลูโลสซึ่งมีค่าอยู่ที่ 17.1 MPa ซึ่ง PLAACC1 มีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสในทางกลับกันพบว่า PLAACC5 มีค่าความทนต่อแรงดึงน้อยกว่าพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่เติมแอซิติเลตเซลลูโลส ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มที่มีขนาดใหญ่และแยกชั้นกันของแอซิติเลตเซลลูโลสบนพอลิแล็กติกแอซิด ส่งผลให้มีค่า ความคงทนต่อแรงดึงที่ลดลง และจากการทดสอบแรงดึงพบว่าค่า ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิแล็กติกแอซิดอยู่ที่ 3.4 และเมื่อทำการเติมแอซิติเลตเซลลูโลสพบว่า PLAACC1 PLAACC3 และ PLAACC5 มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด อยู่ที่ 2.8 2.5 และ 1.9 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ลดลงทั้งหมด แสดงถึงฟิล์มมีความยืดหยุ่นที่ลดลง ฟิล์มมีความเปราะที่สูงขึ้นซึ่งเกิดจากเซลลูโลสไปขัดขวางการเคลื่อนตัวของสายโซ่บนพอลิแล็กติกแอซิดขณะทำการดึงและความเข้ากันได้ที่ลดลงของพอลิแล็กติกแอซิดกับแอซิติเลตเซลลูโลสทำให้สมบัติการยืดตัวของฟิล์มมีค่าที่ลดลง

จากผลการย่อยสลายพบว่าแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* มีผลต่อการย่อยสลายของฟิล์มสูตรผสมโดยเมื่อทำการเปรียบเทียบฟิล์มที่ฝังกลบในดินควบคุมกับดินที่ผสมแบคทีเรีย *Bacillus*

licheniformis พบว่าฟิล์มที่ถูกฝังกลบในดินผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* เกิดการย่อยสลายโดยเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบฝ้าสีขาวเกิดขึ้นบนฟิล์มที่ระยะเวลา3เดือน และพบมากที่สุดที่สูตร PLAACC5 และเมื่อนำฟิล์มดังกล่าวไปส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่า เกิดช่องว่างในฟิล์ม เพราะเกิดการย่อยสลายของแอซิติเลตเซลลูโลสจากแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* แต่ในทางกลับกันในฟิล์มที่ทำการฝังกลบในดินควบคุมไม่พบการย่อยสลายใดๆในทุกอัตราส่วน อีกทั้งเมื่อทำการตรวจสอบน้ำหนักที่หายไปของฟิล์มที่ทำการฝังกลบในดินทั้งสองประเภท พบว่า ฟิล์มสูตร PLAACC5 ในดินที่ผสมแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* มีน้ำหนักลดลงมากที่สุด แสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายมากที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มสูตรอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกชั้นกันระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับแอซิติเลตเซลลูโลสส่งผลให้แอซิติเลตเซลลูโลสสัมผัสกับน้ำ ความชื้น แบคทีเรีย ได้มากกว่าฟิล์มอื่นๆทำให้เกิดการย่อยสลายสูงที่สุด การย่อยสลายดังกล่าวเกิดจากแอซิติเลตเซลลูโลสที่มีปริมาณสูง สามารถดูดซึมน้ำ ความชื้น และแบคทีเรียในดินได้ดี ทำให้เกิดการย่อยสลายได้ง่าย และทำให้เกิดการสลายตัวทางไฮโดรไลติกทำให้เกิดกรดคาร์บอกซิลิกซึ่งช่วยเร่งอัตราการสลายตัวได้เร็วมากขึ้น

รายการอ้างอิง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

- [1] A. Ashori, M. Babae, M. Jonoobi, Y. Hamzeh, Solvent-free acetylation of cellulose nanofibers for improving compatibility and dispersion, *Carbohydrate Polymers* 102 (2014) 369–375.
- [2] A. Boujemaoui, S. Mazieres, E. acetate on cellulose nanocrystals for nanocomposite applications, *Polymer* 99 (2016) 240-249.
- [3] A.M. Das, A.A. Ali, M. P. Hazarika, Synthesis and characterization of cellulose acetate from rice husk: Eco-friendly condition, *Carbohydrate Polymers* 112 (2014) 342–349
- [4] A. NorioNakagaito, A. Fujimura, T. S. Hama, H. Yano, Production of microfibrillated cellulose (MFC)-reinforced polylactic acid nanocomposites from sheets obtained by a papermaking-like process, *Composite Science and Technology* 69 (2009) 1293-1297.
- [5] A.P. Mathew, K. Oksman, M. Sain, Mechanical properties of biodegradable composites from poly lactic acid (PLA) and microcrystalline cellulose (MCC), *J. Appl. Polymer. Sci.* 97 (2005) 2014–2025.
- [6] A.R. FialhoMoraes, C.C. Pola, A. P. Bilck , F. Yamashita, J. Tronto, E. A. Medeiros, N. F. Soares, Starch, cellulose acetate and polyester biodegradable sheets: Effect of composition and processing conditions, *Materials Science and Engineering C* 78 (2017) 932–941.
- [7] C. Xu, J. Chen, D Wu, Y. Chen, Q. Lv, M. Wang, Polylactide/ acetylated nanocrystalline cellulose composites prepared by a continuous route: A phase interface-property relation study, *Carbohydrate Polymers* 146 (2016) 58–66.

- [8] F. Hua, N. Lina, P.R. Chang, J. Huang, Reinforcement and nucleation of acetylated cellulose nanocrystals infoamed polyester composites, *Carbohydrate Polymers* 129 (2015) 208–215.
- [9] F. Luzia, E. Fortunatia, A. Jiménezb, D. Pugliaa, D. Pezzollaa, G. Gigliottia, J.M. Kennya, A. Chiraltb, L. Torreea, Production and characterization of PLA/PBS biodegradable blends reinforced with cellulose nanocrystals extracted from hemp fibres, *Industrial Crops and Products* 93 (2016) 276–289.
- [10] J. Chen, J. Xu, K. Wang, X. Cao, R. Sun, Cellulose acetate fibers prepared from different raw materials with rapid synthesis method, *Carbohydrate Polymers* 137 (2016) 685–692.
- [11] J. Guana, K. M. Eskridgeb, M. A. Hanna, Acetylated starch-polylactic acid loose-fill packaging materials, *Industrial Crops and Products* 22 (2005) 109–123.
- [12] L. Jiang, J. Zhang, *Applied Plastics Engineering Handbook*. United States: Biodegradable and Biobased Polymers; 2017 [chapter 7], p.127.
- [13] M. A. Elsayya, K. Kimc, J. Parkc, A. Deep, Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (2017) 1346–1352.
- [14] M. Murariu, P. Dubois, PLA composites: From production to properties, *Advanced Drug Delivery Reviews* (2016).
- [15] M.S. Butt, J. Bai, X. Wan, C. Chu, F. Xue, H. Ding, G. Zhou, Mechanical and degradation properties of biodegradable strengthened poly-lactic acid composite through plastic injection molding, *Materials Science and Engineering C* 70 (2017) 141–147.
- [16] M.P. Arrieta, J. López, E. Rayón, A. Jiménez, Disintegrability under composting conditions of plasticized PLA-PHB blends, *Polymer Degradation and Stability* 108 (2014) 307–318.

- [17] M.P. Arrieta, E. Fortunati, F. Dominici, E. Rayon, J. Lopez, J.M. Kenny, PLA-PHB/cellulose based films: Mechanical, barrier and disintegration properties, *Polymer Degradation and Stability* 107 (2014) 139-149.
- [18] N. Lina, J. Huang, P.R. Chang, J. Feng, J. Yud, Surface acetylation of cellulose nanocrystal and its reinforcing function in poly(lactic acid), *Carbohydrate Polymers* 83 (2011) 1834–1842.
- [19] P. Müller, J. Bere, E. Fekete, J. Mocz, B. Nagy, M. Kallay, B. Gyarmati, B. Pukanszky, Interactions, structure and properties in PLA/ plasticized starch blends, *Polymer* 103 (2016) 9-18.
- [20] R. G. Candido, A. R. Goncalves, Synthesis of cellulose acetate and carboxymethylcellulose from sugarcane straw, *Carbohydrate Polymers* 152 (2016) 679–686.
- [21] R. Homklin, N. Hongsriphan, Mechanical and thermal properties of PLA/PBS cocontinuous blends adding nucleating agent, *Energy Procedia* 34 (2013) 871 – 879.
- [22] R. Quintana, O. Persenaire, Y. Lemmouchi, L. Bonnaud, P. Dubois, Grafted D/L-lactide to cellulose acetate by reactive melt processing: Its role as CA/PLA blend compatibilizer, *European Polymer Journal* 57 (2014) 30–36.
- [23] S. Lin, J. Huang, P. R. Chang, S. Wei, Y. Xu, Q. Zhang, Structure and mechanical properties of new biomass- based nanocomposite: Castor oil- based polyurethane reinforced with acetylated cellulose nanocrystal, *Carbohydrate Polymers* 95 (2013) 91–99.
- [24] S. Pilla, S. Gong, E. O'Neill, L. Yang, R.M. Rowell, Polylactide-recycled wood fiber composites, *J. Appl. Polym. Sci.* 111 (2009) 37–47.
- [25] S. Sato, A. Saika, Y. Shinozaki, T. Watanabe, K. Suzuki, Y. Sameshima-Yamashita, T. Fukuoka, H. Habe, T. Morita, H. Kitamoto, Degradation profiles of

- biodegradable plastic films by biodegradableplastic-degrading enzymes from the yeast *Pseudozyma antarctica* and the fungus *Paraphoma* sp. B47-9, *Polymer Degradation and Stability* 141 (2017) 26-32.
- [26] S. Spinella, G. L. Re, B. Liu, J. Dorgan, Y. Habibi, P. Leclere, J.M. Raquez, P. Dubois, R. A. Gross, Poly lactide/cellulose nanocrystal nanocomposites: Efficient routes for nanofiber modification and effects of nanofiber chemistry on PLA reinforcement, *Polymer* 65 (2015) 9-17.
- [27] T. Chaichana, P. Virote , D. Monchai, P. Yupin, N. Ngarmnit. Using *Bacillus licheniformis* isolated from rumen to enhance TMR feed digestibility in in vitro digestion, *Khon kaen arg supplement* 38 (2010) 1-5.
- [28] T. Watanabe, K. Suzuki, Y. Shinozaki, T. Yarimizu, S. Yoshida, Y. Sameshima-Yamashita, M. Koitabashi, H.K. Kitamoto, A UV-induced mutant of *Cryptococcus flavus* GB-1 with increased production of a biodegradable plastic-degrading enzyme, *Process Biochemistry* 50 (2015) 1718–1724.
- [29] T. Yokohara, M. Yamaguchi, Structure and properties for biomass- based polyester blends of PLA and PBS, *European Polymer Journal* 44 (2008) 677–685.
- [30] V.P. Cyras, C. Ma. Soledad, V.Z. Anal, Biocomposites based on renewable resource: Acetylated and nonacetylated cellulose cardboard coated with polyhydroxybutyrate, *Polymer* 50 (2009) 6274–6280.
- [31] X. Li, C. Chu, L. Zhou, J. Bai, C. Guo, F. Xue, P. Lin, P.K. Chu, Fully degradable PLA-based composite reinforced with 2D-braided wires for orthopedic implants, *Composites Science and Technology* 142 (2017) 180-188
- [32] Y. Xu, W. Ding, J. Liu, Y. Li, J.F. Kennedy, Q. Gu, S. Shao, Preparation and characterization of organicsoluble acetylated starch nanocrystals, *Carbohydrate Polymers* 80 (2010) 1078–1084.



ภาคผนวก ก

สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดและฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลส

ตาราง ก-1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด(Neat PLA)ตาราง ข- 1

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	มอดุลัส (เมกะปาสคาล)
1	17.2	3.3	1460.2
2	17.0	3.5	1380.7
3	17.2	3.2	1428.8
4	16.9	3.6	1398.9
5	17.1	3.3	1406.4
ค่าเฉลี่ย	17.1	3.4	1415.1
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.1	0.2	30.6

ตาราง ก-2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลสร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PLAACC1)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	มอดุลัส (เมกะปาสคาล)
1	21.0	2.6	1650.1
2	21.0	2.8	1505.3
3	20.8	2.8	1498.1
4	20.9	3.00	1501.1
5	21.9	2.6	1653.4
ค่าเฉลี่ย	21.1	2.8	1561.6
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.4	0.2	82.3

ตาราง ก-3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนกึ่งผลึกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (PLAACC3)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	มอดุลัส (เมกะปาสคาล)
1	19.0	2.6	1491.9
2	17.3	2.4	1795.6
3	17.1	2.6	1778.9
4	18.4	2.4	1369.2
5	17.1	2.6	1763.4
ค่าเฉลี่ย	17.8	2.5	1639.8
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.9	0.1	196.2

ตาราง ก-4 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนกึ่งผลึกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PLAACC5)

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด	มอดุลัส (เมกะปาสคาล)
1	14.2	1.8	1953.1
2	16.3	2.1	2360.1
3	14.3	1.8	1971.0
4	14.1	1.8	1900.0
5	16.0	2.00	2198.9
ค่าเฉลี่ย	15.0	1.9	2076.6
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.0	0.1	195.5

ภาคผนวก ข

น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดและฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิทีเลตเซลลูโลสในฝัองกลบ
ดินควบคุมและดินผสม *Bacillus licheniformis*

ตาราง ข-1 น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดฝัองกลบในดินควบคุม

ตัวอย่าง	ก่อนฝัองกลบ	หลังฝัองกลบ 30 วัน	หลังฝัองกลบ 60 วัน	หลังฝัองกลบ 90 วัน
1	0.3276	0.3276	0.3276	0.3275
2	0.3281	0.3281	0.3281	0.3281
3	0.3274	0.3274	0.3274	0.3272
ค่าเฉลี่ย	0.3277	0.3277	0.3277	0.3276
ส่วนเบี่ยงเบน	0.0004	0.0004	0.0004	0.0005

ตาราง ข-2 น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดฝัองกลบในดินผสม *Bacillus licheniformis*

ตัวอย่าง	ก่อนฝัองกลบ	หลังฝัองกลบ 30 วัน	หลังฝัองกลบ 60 วัน	หลังฝัองกลบ 90 วัน
1	0.3291	0.3291	0.3291	0.3290
2	0.3280	0.3280	0.3280	0.3280
3	0.3278	0.3278	0.3278	0.3276
ค่าเฉลี่ย	0.3283	0.3283	0.3283	0.3282
ส่วนเบี่ยงเบน	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006

ตาราง ข-3 น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสร้อยละ 1 โดยมวล
(PLAACC1) ฝังกลบในดินควบคุม

ตัวอย่าง	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 30 วัน	หลังฝังกลบ 60 วัน	หลังฝังกลบ 90 วัน
1	0.3401	0.3401	0.3401	0.3397
2	0.3390	0.3390	0.3390	0.3389
3	0.3403	0.3403	0.3403	0.3402
ค่าเฉลี่ย	0.3398	0.3398	0.3398	0.3396
ส่วนเบี่ยงเบน	0.0007	0.0007	0.0007	0.0006

ตาราง ข-4 น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสร้อยละ 1 โดยมวล
(PLAACC1) ฝังกลบในดินผสม *Bacillus licheniformis*

ตัวอย่าง	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 30 วัน	หลังฝังกลบ 60 วัน	หลังฝังกลบ 90 วัน
1	0.3422	0.3422	0.3420	0.3413
2	0.3417	0.3417	0.3417	0.3411
3	0.3418	0.3418	0.3417	0.3412
ค่าเฉลี่ย	0.3419	0.3419	0.3418	0.3412
ส่วนเบี่ยงเบน	0.0003	0.0003	0.0002	0.0001

ตาราง ข-5 น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสร้อยละ 3 โดยมวล (PLAACC3) ฝังกลบในดินควบคุม

ตัวอย่าง	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 30 วัน	หลังฝังกลบ 60 วัน	หลังฝังกลบ 90 วัน
1	0.3399	0.3399	0.3399	0.3398
2	0.3420	0.3420	0.3420	0.3420
3	0.3414	0.3414	0.3414	0.3412
ค่าเฉลี่ย	0.3411	0.3411	0.3411	0.3410
ส่วนเบี่ยงเบน	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011

ตาราง ข-6 น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสร้อยละ 3 โดยมวล (PLAACC3) ฝังกลบในดินผสม *Bacillus licheniformis*

ตัวอย่าง	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 30 วัน	หลังฝังกลบ 60 วัน	หลังฝังกลบ 90 วัน
1	0.3409	0.3409	0.3409	0.3395
2	0.3415	0.3415	0.3414	0.3409
3	0.3415	0.3415	0.3413	0.3396
ค่าเฉลี่ย	0.3413	0.3413	0.3412	0.3400
ส่วนเบี่ยงเบน	0.0003	0.0003	0.0003	0.0007

ตาราง ข-7 น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสร้อยละ 5 โดยมวล (PLAACC5) ฝังกลบในดินควบคุม

ตัวอย่าง	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 30 วัน	หลังฝังกลบ 60 วัน	หลังฝังกลบ 90 วัน
1	0.3381	0.3381	0.3381	0.3377
2	0.3499	0.3499	0.3497	0.3492
3	0.3384	0.3384	0.3384	0.3283
ค่าเฉลี่ย	0.3387	0.3387	0.3386	0.3384
ส่วนเบี่ยงเบน	0.0007	0.0007	0.0007	0.0105

ตาราง ข-8 น้ำหนักของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดผสมแอซิติเลตเซลลูโลสร้อยละ 5 โดยมวล (PLAACC5) ฝังกลบในดินผสม *Bacillus licheniformis*

ตัวอย่าง	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 30 วัน	หลังฝังกลบ 60 วัน	หลังฝังกลบ 90 วัน
1	0.3385	0.3385	0.3384	0.3168
2	0.3393	0.3393	0.3393	0.3175
3	0.3390	0.3390	0.3388	0.3170
ค่าเฉลี่ย	0.3389	0.3389	0.3388	0.3171
ส่วนเบี่ยงเบน	0.0004	0.0004	0.0005	0.0004



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนา บุนนาค เกิดเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ.2534 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ แขนงพอลิเมอร์และสิ่งทอ จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 หลังจากนั้นได้ทำการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2558





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY