



การควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยเรียโดยฟิล์มฐาน PBAT สำหรับใช้งานด้านเกษตรกรรม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียโดยฟิล์มฐาน PBAT สำหรับใช้งานด้านเกษตรกรรม



โดย  
นางสาวปณิดา ไทยประสงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

CONTROLLED - RELEASE UREA FERTILIZER BY PBAT - BASED FILMS FOR  
AGRICULTURAL APPLICATIONS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2021

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียโดยฟิล์มฐาน PBAT สำหรับใช้ งานด้านเกษตรกรรม
โดย	ปณิดา ไทยประสงค์
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เมฆะปะบุตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์มาณฑพ ปานะโปย)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล้าห์บุตรี )

61402229 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

นางสาว ปณิดา ไทยประสงค์: การควบคุมการปลดปล่อยยูเรียโดยฟิล์มฐาน PBAT สำหรับใช้งานด้านเกษตรกรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐวุฒิ ชัยยุตต์

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมซีทคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (poly(butylene adipate-co terephthalate); PBAT) ที่ประกอบด้วยยูเรียและแรมมอนต์มอริลโลไนท์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงแล้ว (organomontmorillonite; OMMT) โดยวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต นอกจากนี้ยังศึกษาพื้นฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ และการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลองของซีทคอมพอสิตฐาน PBAT อีกด้วย ในตอนที่หนึ่ง ทำการเตรียมซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ประกอบด้วยยูเรีย 20 30 และ 40%wt พบว่าซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่มีปริมาณยูเรียมากขึ้นจะแสดงการปลดปล่อยยูเรียที่เร็วกว่า โดยการปลดปล่อยยูเรียสูงสุดจะใช้เวลาประมาณ 72 48 และ 12 ชั่วโมงสำหรับซีทคอมพอสิตที่มีปริมาณยูเรีย 20 30 และ 40%wt ตามลำดับ นอกจากนี้ ยูเรียส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อน ความแข็งแรง ความเหนียว และสมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำของซีทคอมพอสิตแย่งลง สมบัติต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าซีทคอมพอสิตที่ประกอบด้วยยูเรีย 30 %wt (PBAT/u30) เป็นสูตรที่เหมาะสมที่จะนำไปทำการศึกษาต่อในตอนต่อไป ในตอนที่สอง ทำการเตรียมซีท PBAT/u30/OMMT ที่ประกอบด้วย OMMT 1 3 และ 5 phr ซีทคอมพอสิตที่ประกอบด้วย OMMT ปริมาณมากกว่าจะสามารถหน่วงการปลดปล่อยยูเรียได้ การปลดปล่อยยูเรียสูงสุดจะใช้เวลาประมาณ 48 96 และ 120 ชั่วโมง สำหรับซีทคอมพอสิตที่ประกอบด้วย OMMT 1 3 และ 5 phr ตามลำดับ อนึ่ง OMMT ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำของซีทคอมพอสิต อย่างไรก็ตาม OMMT ไม่สามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อน ความแข็งแรงและความเหนียวของซีทคอมพอสิตได้ เนื่องจากเกิดการรวมกลุ่มของ OMMT เมื่อปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดศูนย์รวมแรงเค้นโดยบริเวณนี้ก่อให้เกิดการแตกหักในซีทคอมพอสิต สุดท้ายนี้ทั้งยูเรียและ OMMT ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมีของ PBAT ที่ผ่านการทดสอบการเร่งสภาวะ

61402229 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

MISS PANIDA THAI PRASONG : CONTROLLED - RELEASE UREA FERTILIZER BY PBAT - BASED FILMS FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR NATTAWUT CHAIYUT, Ph.D.

Composite sheets of poly(butylene adipate-co-terephthalate (PBAT) containing urea and organomontmorillonite (OMMT) were prepared in this study. The main objective of this research was to study the controlled-releasability of urea by the composite sheets. In addition, morphological, thermal, mechanical, barrier, and accelerated weathering properties of PBAT-based composite sheets were also studied. Firstly, PBAT/urea composite sheets with urea contents of 20, 30, and 40%wt were prepared. It was found that the PBAT/urea sheets with higher urea content exhibited the faster release of urea. The maximum urea release was approximately 72, 48, and 12 hours for the composite sheets containing 20, 30, and 40%wt of urea, respectively. Moreover, urea negatively affected the thermal stability, strength, ductility, and barrier properties of the composite sheets. Various properties demonstrated that the sheet containing 30 %wt of urea (PBAT/u30) was the optimal formula for further investigation. Secondly, PBAT/u30/OMMT composite sheets with 1, 3, and 5 phr of OMMT were prepared. The composite sheets containing higher OMMT content retarded the release of urea. The maximum urea release was about 48, 96, and 120 hours for the composites with 1, 3, and 5 phr of OMMT, respectively. Furthermore, OMMT improved the barrier property of the composite sheet. However, OMMT was unable to improve the thermal stability, strength, and ductility of the composite sheets. It could be due to the agglomeration of OMMT at higher loading that caused the stress concentration and consequently caused the cracks in the sheets. Lastly, both urea and OMMT had no influence on the chemical structure of PBAT after the accelerated weathering test.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือและคำแนะนำจากบุคคลหลาย ๆ ฝ่าย ซึ่งผู้วิจัยขอกล่าวขอบคุณดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เฆษะปะบุตร และรองศาสตราจารย์ มาณพ ปานะโปย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่มี ส่วนช่วยสนับสนุน ช่วยเหลือตลอดจนแนะนำวิธีการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ จนงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับ นี้เสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส ผู้เป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์และรอง ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เกาท์บุตร ผู้เป็นผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่สละเวลามาเป็นคณะกรรมการในการ สอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ตลอดจนการให้คำแนะนำและชี้แนะในการพัฒนาและปรับปรุงเล่มวิทยานิพนธ์ ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

คณาจารย์ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และคำแนะนำต่าง ๆ ที่ สามารถนำมาปรับใช้ในงานวิจัยได้

คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์และคุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช วิศวกรประจำภาควิชา วิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ผู้ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ทำการเตรียม ชิ้นงานและในการทดสอบ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย รวมไปถึงคำแนะนำ ข้อควรระวังและเทคนิค ต่าง ๆ สำหรับการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์

พี่ลูกกวาง อุ่นศิริ และพี่ ๆ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาฯ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านเอกสาร การเบิกงบประมาณและการติดต่อประสานงานกับบัณฑิตวิทยาลัย

บิดา มารดาและครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะ ด้านทุนทรัพย์ รวมถึงการมอบโอกาสในการเรียนปริญญาโท ตลอดจนเพื่อนร่วมรุ่น และพี่ ๆ นักศึกษา ปริญญาโทที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำในทุก ๆ เรื่องรวมถึงเรื่องที่อยู่ นอกเหนือจากเรื่องงานวิจัย ด้วย

นางสาว ปณิดา ไทยประสงค์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	20
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	20
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	21
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	21
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	22
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	22
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	23
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	24
2.1 การทบทวนทฤษฎี.....	24
2.1.1 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	24
2.1.2 พอลิเมอร์ฐานสังเคราะห์/ปิโตรเลียม.....	24
2.1.2.1 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (Polybutylene adipate-co-terephthalate).....	24
2.1.2.2 การผลิตพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (polybutylene adipate-co-terephthalate).....	25
2.1.2.3 การสลายตัวของ PBAT.....	26



2.1.3	ฟิล์มคลุมดิน (mulch film) .....	28
2.1.4	ถุงเพาะกล้า (seedling bag) .....	28
2.1.5	ความรู้เรื่องปุ๋ย ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและการบำรุงดิน .....	29
2.1.5.1	ปุ๋ยไนโตรเจน (nitrogen fertilizers) .....	30
2.1.5.2	ยูเรีย (urea).....	30
2.1.6	ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (controlled released fertilizers; CRF).....	31
2.1.6.1	กลไกการควบคุมการปลดปล่อย .....	32
2.1.7	แรมมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite; MMT).....	33
2.1.8	วัสดุคอมพอสิตระหว่างแรมมอนต์มอริลโลไนต์กับพอลิเมอร์ (clay/polymer composite) .....	35
2.1.8.1	โครงสร้างของคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์/แรมมอนต์มอริลโลไนต์ .....	37
2.1.9	การหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย (solvent casting) [21].....	38
2.1.10	กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding).....	38
2.2	การทบทวนวรรณกรรม.....	39
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	50
3.1	วัสดุและสารเคมี.....	50
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย.....	51
3.3	วิธีดำเนินงานวิจัย .....	52
3.3.1	ตอนที่ 1 การเตรียมซีทคอมพอสิตจาก PBAT และยูเรีย และการทดสอบสมบัติ.....	52
3.3.1.1	การเตรียมซีทคอมพอสิต PBAT/urea.....	52
3.3.1.2	การพิสูจน์เอกลักษณ์ซีทคอมพอสิต PBAT/urea .....	53
3.3.1.2.1	การศึกษาสัณฐานวิทยา .....	53
3.3.1.2.2	การวัดความทึบแสงของซีท (sheet opacity).....	53
3.3.1.2.3	การศึกษาองค์ประกอบและผลึกของคอมพอสิต.....	54

3.3.1.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของซีทคอมพอสิต PBAT และ PBAT/urea.....	54
3.3.1.3.1 การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน.....	54
3.3.1.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	54
3.3.1.3.3 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle).....	54
3.3.1.3.4 การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีท PBAT ....	54
3.3.1.3.5 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission; WVT).....	55
3.3.1.3.6 การทดสอบการทนต่อสภาพแวดล้อม (weathering testing).....	55
3.3.2 ตอนที่ 2 การเตรียมซีทคอมพอสิตจาก PBAT ยูเรียและ OMMT และการทดสอบสมบัติ .....	56
3.3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมซีทคอมพอสิต .....	56
3.3.2.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และซีท PBAT/urea/OMMT .....	57
3.3.2.2.1 การศึกษาสัมมนาวิทยา .....	57
3.3.2.2.2 การวัดความทึบแสงของซีท (sheet opacity).....	57
3.3.2.2.3 การศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างของคอมพอสิต .....	57
3.3.2.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/urea/OMMT .....	58
3.3.2.3.1 การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน.....	58
3.3.2.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	58
3.3.2.3.3 การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต .....	59
3.3.2.3.4 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission)	59
3.3.2.3.5 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle).....	59
3.3.2.3.6 การทดสอบการทนต่อสภาพแวดล้อม (weathering testing).....	60

บทที่ 4 .....	61
4.1 ตอนที่ 1 การเตรียมซีทคอมพอสิตจาก PBAT และยูเรีย และการทดสอบสมบัติ.....	61
4.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ซีทคอมพอสิต PBAT/urea .....	61
4.1.1.1 การศึกษาสัญญาณวิทยา .....	61
4.1.1.2 การทดสอบความทึบแสงของซีทคอมพอสิต .....	63
4.1.1.3 การศึกษาองค์ประกอบและผลึกของซีทคอมพอสิต .....	65
4.1.2 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของซีทคอมพอสิต PBAT และ PBAT/urea .....	67
4.1.2.1 การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน.....	67
4.1.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	69
4.1.2.3 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle).....	72
4.1.2.4 การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีท PBAT.....	73
4.1.2.5 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission; WVT).....	77
4.1.2.6 การทดสอบการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลอง (weathering testing)....	78
4.2 ตอนที่ 2 การเตรียมซีทคอมพอสิตจาก PBAT ยูเรียและ OMMT และการทดสอบสมบัติ.....	85
4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/urea/OMMT .....	85
4.2.1.1 การศึกษาสัญญาณวิทยาของคอมพอสิต.....	85
4.2.1.2 การทดสอบความทึบแสงของซีท .....	90
4.2.1.3 การศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างของคอมพอสิต .....	93
4.2.2 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/urea/OMMT .....	101
4.2.2.1 การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน.....	101
4.2.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	105
4.2.2.3 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle).....	110
4.2.2.4 การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีท PBAT.....	112

4.2.2.5 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission; WVT)....	116
4.2.2.6 การทดสอบการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลอง (weathering testing)..	118
บทที่ 5 .....	128
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	128
5.1.1 ตอนที่ 1 การเตรียมซีทคอมพอสิตจาก PBAT และยูเรีย และการทดสอบสมบัติ .....	128
5.1.2 ตอนที่ 2 การเตรียมซีทคอมพอสิตจาก PBAT ยูเรียและ OMMT และการทดสอบ สมบัติ	129
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	131
ภาคผนวก.....	133
ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ.....	134
ภาคผนวก ข การคำนวณ.....	174
ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงานวิจัย .....	183
รายการอ้างอิง.....	190
ประวัติผู้เขียน .....	200



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวและความยาวก้านเฉลี่ยของผักกาดหอม [3] .....	41
ตารางที่ 2.2 ปริมาณของ active compounds ที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อเทียบกับ NPK อีสระ [25]	43
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบและสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังสูตรต่างๆ [27].....	48
ตารางที่ 4.1 ความทึบแสง (Opacity) ของซีท PBAT และ PBAT/urea สูตรต่าง ๆ.....	64
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบ TGA ของซีท PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	68
ตารางที่ 4.3 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ % Elongation at break ของซีท PBAT และ PBAT/urea สูตรต่าง ๆ.....	69
ตารางที่ 4.4 มุมสัมผัสของหยดน้ำ (contact angle) ที่เวลา 0 ถึง 2 วินาทีของซีท PBAT/urea สูตร ต่าง ๆ.....	72
ตารางที่ 4.5 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของซีท PBAT และซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/urea สูตรต่าง ๆ.....	77
ตารางที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของซีท PBAT และ PBAT/urea ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบ การทดสอบต่าง ๆ.....	80
ตารางที่ 4.7 ความทึบแสง (Opacity) ของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/OMMT และ PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ.....	91
ตารางที่ 4.8 ค่า d-spacing ของ OMMT และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (degree of crystallinity; $X_c$ ) ของ PBAT ในซีทแต่ละสูตร .....	97
ตารางที่ 4.9 ค่า $d_{001}$ ของ OMMT.....	98
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบ TGA ของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน.....	102
ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบ TGA ของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน.....	103

ตารางที่ 4.12 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ % Elongation at break ของซีทคอมพอสิตฐาน PBAT สูตรต่าง ๆ..... 106

ตารางที่ 4.13 มุมสัมผัสของหยดน้ำ (contact angle) ที่เวลา 0 ถึง 2 วินาทีของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/urea/OMMT สูตรต่าง ๆ ..... 110

ตารางที่ 4.14 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission rate) ของซีทคอมพอสิตฐาน PBAT สูตรต่าง ๆ ..... 117

ตารางที่ 4.15 ลักษณะทางกายภาพของซีทคอมพอสิตที่รอบการทดสอบต่าง ๆ ..... 120

ตารางที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพของซีทที่รอบการทดสอบต่าง ๆ..... 122



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ PBAT [5] .....	24
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ PBAT [7] .....	25
รูปที่ 2.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงของ PBAT (a-c) และนาโนคอมพอสิตของ PBAT ที่เสริมแรงด้วย CNC (d-f) ที่เวลาต่าง ๆ ของการทดสอบการย่อยสลาย [8].....	26
รูปที่ 2.4 กลไกการสลายตัวของ PBAT ที่ถูกเสนอขึ้นมา [8] .....	27
รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยูเรีย [13].....	30
รูปที่ 2.6 การเคลือบปุ๋ยยูเรียด้วย (a) กัมมะถัน (b) กัมมะถันและเคลือบทับด้วยพอลิเมอร์ (c) พอลิเมอร์อินทรีย์ [14] .....	32
รูปที่ 2.7 กลไกการปลดปล่อยปุ๋ย โดยใช้ Biodegradable superabsorbent polymer [15].....	33
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของแรมอนต์มอริลโลไนต์ [16].....	33
รูปที่ 2.9 ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกในแรมอนต์มอริลโลไนต์ [18] .....	34
รูปที่ 2.10 การเตรียมคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์กับแรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธี <i>In situ</i> polymerization [19] .....	35
รูปที่ 2.11 การเตรียมคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์กับแรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีการกระจายตัวในสารละลาย [19].....	36
รูปที่ 2.12 การเตรียมคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์กับแรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธี Intercalation ในสถานะหลอมเหลว [19].....	36
รูปที่ 2.13 โครงสร้างที่เป็นไปได้ของคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์และแรมอนต์มอริลโลไนต์ [20]....	37
รูปที่ 2.14 แผนผังส่วนประกอบหลักของเครื่องกดอัดแบบทั่วไป [22].....	39
รูปที่ 2.15 อัตราการละลายของปุ๋ยโพแทสที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยพอลิอะคลิลาไมต์ในน้ำ 100 mL [23] .....	40
รูปที่ 2.16 ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากการทดสอบการชะแบบลำดับของชิ้นงานตัวอย่าง (a) PBS, (b) PBS5C, (c) PBS30U และ (d) PBS30U5C [3] .....	41

รูปที่ 2.17 รูป SEM ของชิ้นงานตัวอย่าง (a,b) PBS, (c,d) PBS30U, และ (g,h) PBS30U5C (ซ้าย) ก่อนและ (ขวา) หลังการชะด้วยน้ำ [3].....	42
รูปที่ 2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแรมอนต์มอริลโลไนต์ และคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์กับแรมอนต์มอริลโลไนต์ [26] .....	45
รูปที่ 2.19 อัตราการปลดปล่อยยูเรียของ MMT/Ur และนาโนคอมพอสิตที่เตรียมจาก (a) HG (b) PCL และ (c) การเปรียบเทียบระหว่างนาโนคอมพอสิตทั้งสามชนิด [26].....	46
รูปที่ 2.20 ผลการทดสอบสมบัติการดึงยืด a) Tensile strength และ b) Elongation at break ของฟิล์มแป้งจากมันสำปะหลัง (cassava starch) ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคชานอ้อยและพลาสติกไซส์ ด้วยยูเรียที่ก่อน (0 days) และหลัง (30 days) การเก็บภายใต้สภาวะควบคุม [25].....	47
รูปที่ 2.21 การปลดปล่อยยูเรียในดินจากคอมพอสิตที่ประกอบด้วยยูเรียปริมาณต่าง ๆ หลังจาก 15 30 และ 45 วัน ภายใต้สภาวะย่อยสลาย[25].....	48
รูปที่ 2.22 การปลดปล่อยยูเรียของตัวอย่างสูตรต่าง ๆ [27].....	49
รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT .....	50
รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของ Octadecyl trimethyl ammonium.....	50
รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของยูเรีย .....	50
รูปที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีของไดคลอโรมีเทน .....	51
รูปที่ 4.1 (A) รูป FE-SEM ของยูเรียที่กำลังขยาย 50 เท่าและ (B) ฮิสโตแกรมของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคยูเรีย .....	62
รูปที่ 4.2 รูป FE-SEM ของพื้นที่หน้าตัดของซีท (A) PBAT, (B) PBAT/u20, (C) PBAT/u30 และ (D) PBAT/u40 ที่กำลังขยาย 150 เท่า.....	62
รูปที่ 4.3 UV-vis spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt.63	
รูปที่ 4.4 ความทึบแสงของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt.....	64
รูปที่ 4.5 ลักษณะปรากฏของซีทคอมพอสิต (a) PBAT (b) PBAT/u20 (c) PBAT/u30 และ (d) PBAT/u40.....	64
รูปที่ 4.6 XRD pattern ของซีท PBAT และ PBAT/urea สูตรต่าง ๆ ในช่วงมุม $2\theta$ ระหว่าง $10-30^\circ$ .....	66

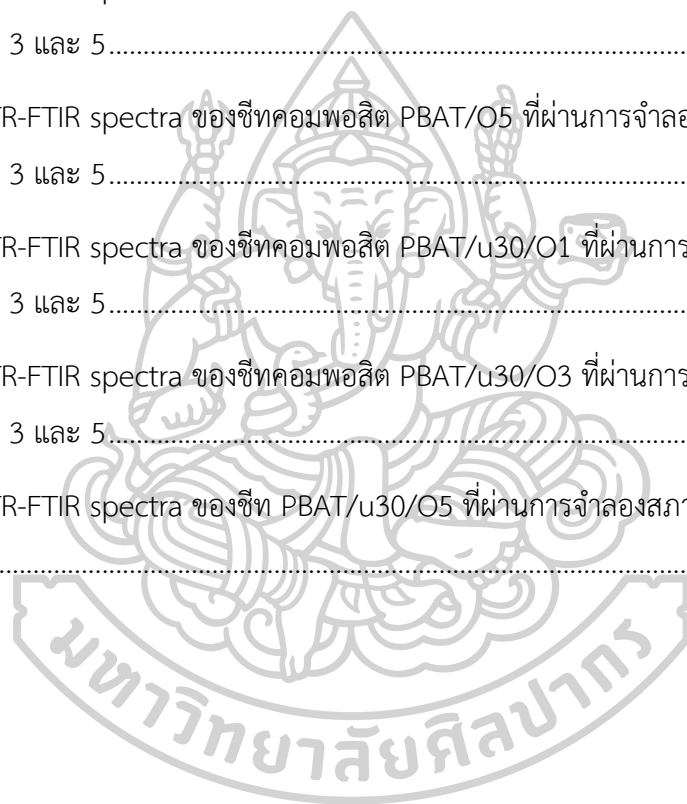


รูปที่ 4.7 TGA thermogram ของซีท PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	67
รูปที่ 4.8 DTG thermogram ของซีท PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน .....	67
รูปที่ 4.9 Young's modulus ของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt.....	70
รูปที่ 4.10 Tensile strength ของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt .....	71
รูปที่ 4.11 Elongation at break ของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt.....	72
รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/urea สูตรต่าง ๆ.....	73
รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/urea สูตรต่าง ๆ ในช่วงเวลา 0 ถึง 60 นาที .....	74
รูปที่ 4.14 รูป SEM พื้นผิวของซีท (A,B) PBAT/u20 (C,D) PBAT/u30 และ (E,F) PBAT/u40 (ซ้าย) ก่อนและ (ขวา) หลังจากผ่านการทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีท PBAT.....	76
รูปที่ 4.15 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt.....	77
รูปที่ 4.16 รูป SEM พื้นผิวของซีทคอมพอสิตสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ.....	79
รูปที่ 4.17 ค่า b ในระบบการวัดสี CIE L*a*b* ของซีท PBAT และ PBAT/urea ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ.....	80
รูปที่ 4.18 ATR-FTIR Spectra ของซีท PBAT ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5 .....	81
รูปที่ 4.19 ปฏิกริยาการสลายตัวด้วยแสง (photodegradation) ที่เป็นไปได้ของ PBAT โดยผ่านกระบวนการ Norrish type I [49].....	82
รูปที่ 4.20 ATR-FTIR Spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/u20 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5.....	83

รูปที่ 4.21 ATR-FTIR Spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5.....	83
รูปที่ 4.22 ATR-FTIR Spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/u40 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5.....	84
รูปที่ 4.23 รูป FE-SEM ของ Organomontmorillonite (OMMT) ที่กำลังขยาย (A) 500 เท่า (B) 1,000 เท่า และ (C) 50,000 เท่า.....	85
รูปที่ 4.24 รูป FE-SEM ของพื้นที่หน้าตัดของซีทคอมพอสิต (A) PBAT (B) PBAT/O1 (C) PBAT/O3 และ (D) PBAT/O5 ที่กำลังขยาย (ซ้าย) 150 (กลาง) 5,000 และ (ขวา) 10,000 เท่า.....	87
รูปที่ 4.25 FE-SEM ของพื้นที่หน้าตัดของซีทคอมพอสิต (A) PBAT/u30 (B) PBAT/u30/O1 (C) PBAT/u30/O3 และ (D) PBAT/u30/O5 ที่กำลังขยาย (ซ้าย) 150 (กลาง) 5,000 และ (ขวา) 10,000 เท่า.....	89
รูปที่ 4.26 UV-vis spectra ของซีทคอมพอสิต (A) PBAT/OMMT และ (B) PBAT/u30/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 5 phr.....	90
รูปที่ 4.27 ความทึบแสงของซีทคอมพอสิต (A) PBAT/OMMT และ (B) PBAT/urea/OMMT สูตรต่าง ๆ.....	92
รูปที่ 4.28 ลักษณะปรากฏของซีท (a) PBAT (b) PBAT/O1 (c) PBAT/O3 (d) PBAT/O5 (e) PBAT/u30 (f) PBAT/u30/O1 (g) PBAT/u30/O3 และ (h) PBAT/u30/O5.....	93
รูปที่ 4.29 XRD pattern ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT สูตรต่าง ๆ ในช่วงมุม $2\theta$ ระหว่าง $2-10^\circ$ .....	95
รูปที่ 4.30 XRD pattern ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT สูตรต่าง ๆ ในช่วงมุม $2\theta$ ระหว่าง $10-30^\circ$ .....	96
รูปที่ 4.31 XRD pattern ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ในช่วงมุม $2\theta$ ระหว่าง $2-10^\circ$ .....	98
รูปที่ 4.32 XRD pattern ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ในช่วงมุม $2\theta$ ระหว่าง $10-30^\circ$ .....	99
รูปที่ 4.33 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของซีท PBAT/u30/OMMT ที่ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของ OMMT แคบลง.....	100

รูปที่ 4.34 TGA thermogram ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน.....	101
รูปที่ 4.35 DTG thermogram ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน.....	101
รูปที่ 4.36 TGA thermogram ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน.....	103
รูปที่ 4.37 DTG thermogram ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน.....	104
รูปที่ 4.38 Young's modulus ของซีทคอมพอสิต (A) PBAT/OMMT และ (B) PBAT/urea/OMMT สูตรต่าง ๆ.....	105
รูปที่ 4.39 Tensile strength ของซีทคอมพอสิต (A) PBAT/OMMT และ (B) PBAT/urea/OMMT สูตรต่าง ๆ.....	107
รูปที่ 4.40 Elongation at break ของซีทคอมพอสิต (A) PBAT/OMMT และ (B) PBAT/urea/OMMT สูตรต่าง ๆ.....	109
รูปที่ 4.41 เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/urea/OMMT สูตรต่างๆ เมื่อเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30.....	112
รูปที่ 4.42 เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ในช่วงเวลา 0 ถึง 60 นาที.....	113
รูปที่ 4.43 รูป SEM พื้นผิวของซีทคอมพอสิต (A,B) PBAT/u30/O1 (C,D) PBAT/u30/O3 และ (E,F) PBAT/u30/O5 (ซ้าย) ก่อนและ (ขวา) หลังจากผ่านการทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT.....	115
รูปที่ 4.44 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของซีทคอมพอสิต (A) PBAT/OMMT และ (B) PBAT/urea/OMMT สูตรต่าง ๆ.....	116
รูปที่ 4.45 รูป SEM พื้นผิวของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ.....	119
รูปที่ 4.46 ค่า b ในระบบการวัดสี CIE L*a*b* ของซีทคอมพอสิตที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ.....	120

รูปที่ 4.47 รูป SEM พื้นผิวของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการจำลอง สภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ.....	121
รูปที่ 4.48 ค่า b ในระบบการวัดสี CIE L*a*b* ของซีทคอมพอสิตที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการ ทดสอบต่าง ๆ.....	122
รูปที่ 4.49 ATR-FTIR spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/O1 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการ ทดสอบที่ 0 1 3 และ 5.....	124
รูปที่ 4.50 ATR-FTIR spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/O3 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการ ทดสอบที่ 0 1 3 และ 5.....	124
รูปที่ 4.51 ATR-FTIR spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/O5 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการ ทดสอบที่ 0 1 3 และ 5.....	125
รูปที่ 4.52 ATR-FTIR spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการ ทดสอบที่ 0 1 3 และ 5.....	126
รูปที่ 4.53 ATR-FTIR spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O3 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการ ทดสอบที่ 0 1 3 และ 5.....	126
รูปที่ 4.54 ATR-FTIR spectra ของซีท PBAT/u30/O5 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5.....	127



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้ภาคเกษตรกรรมในประเทศไทยมีการใช้ปุ๋ยเคมีในพื้นที่การเกษตรในปริมาณที่มาก ซึ่งปุ๋ยที่สำคัญและถูกใช้มากชนิดหนึ่งคือปุ๋ยไนโตรเจน เนื่องจากโดยทั่วไปธาตุไนโตรเจนในดินมักมีไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช พืชสามารถใช้ประโยชน์จากธาตุไนโตรเจนได้โดยตรงใน 2 รูปแบบ คือ แอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) และไนเตรตไอออน ( $\text{NO}_3^-$ ) เท่านั้น แต่ไนโตรเจนในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ซึ่งจะต้องผ่านการย่อยด้วยจุลินทรีย์ก่อน ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ต้องใช้ปุ๋ยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้นิยมใช้ปุ๋ยไนโตรเจนหรือปุ๋ยยูเรียกันอย่างแพร่หลาย ในปัจจุบัน ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นปุ๋ยที่ให้ธาตุไนโตรเจนซึ่งเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมากเพื่อการเจริญเติบโตและให้ผลผลิต เนื่องจากธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักของโปรตีน กรดอะมิโน กรดนิวคลีอิก คลอโรฟิลล์ และเอนไซม์ที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของส่วนที่กำลังเจริญเติบโตในพืช โดยพืชที่ได้รับธาตุไนโตรเจนเพียงพอจะมีลักษณะใบเขียวสด โตเร็ว ออกดอกและผลที่สมบูรณ์ [1]

ถึงแม้ว่าปุ๋ยยูเรียจะเป็นที่นิยมใช้กันมาก แต่ปุ๋ยยูเรียเป็นปุ๋ยไนโตรเจนที่มีประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารของพืชจากปุ๋ย (nutrient use efficiency) ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากยูเรียจะถูกไฮโดรไลซ์โดยมีเอนไซม์ยูเรส (urease) ในดินช่วยเร่งปฏิกิริยา แล้วจะได้แอมโมเนียมไอออน และถ้ามีอากาศเพียงพอจะได้ไนเตรตไอออน โดยไนโตรเจนในรูปของไนเตรตไอออนถ้าหากพืชดูดไม่ทันจะถูกน้ำพาออกไปจากชั้นของดินอย่างรวดเร็ว และจะไม่เกิดประโยชน์ต่อพืชแต่อย่างใด แต่ถ้าอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออนจะถูกพาออกจากชั้นดินได้ยากกว่า เนื่องจากจะยึดอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว นอกจากนี้ปุ๋ยไนโตรเจนที่ใส่ลงไปไนดินยังเป็นสาเหตุให้เกิดแก๊สไนตรัสออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}$ ) และไนตริกออกไซด์ (NO) ซึ่งส่งผลต่อการเกิดภาวะโลกร้อนและเป็นมลพิษต่ออากาศ ดังนั้นจึงต้องมีการใช้การควบคุมการปลดปล่อย (controlled release) เพื่อควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยให้พืชได้รับธาตุอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยพบว่าระบบที่ใช้เทอร์โมพลาสติกทั้งกระบวนการเคลือบและการทำคอมพอสิต สามารถปรับปรุงสมบัติการพอง (swelling property) ของปุ๋ยได้ ซึ่งกลไกในการปลดปล่อยปุ๋ยคือน้ำแพร่เข้าไปผ่านช่องว่างเล็ก ๆ ของพอลิเมอร์เพื่อเข้าไปละลายปุ๋ยที่พอลิเมอร์เคลือบไว้ จากนั้นเนื้อปุ๋ยภายในเม็ดจะกลายเป็นสารละลายความเข้มข้นสูง แล้วจึงเกิดการแพร่ผ่านพอลิเมอร์ออกมา ส่งผลให้ธาตุอาหารถูกละลายออกมาจากเม็ดปุ๋ยอย่างช้า ๆ [2]

V. A. R. Baldanza และคณะ [3] ได้ทำการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุคอมพอสิตจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate); PBS) คือ PBS/urea/MMT และ PBS/urea พบว่าวัสดุคอมพอสิต PBS/30Urea/5MMT มีความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียดีที่สุด รองลงมาคือ PBS/30U ซึ่งจะเป็นระบบที่ไม่ใส่ MMT เพราะเกิดการกระจายตัวของ MMT ใน PBS ซึ่งส่งผลให้การควบคุมการปลดปล่อยเป็นไปตามโหมดการปลดปล่อยช้า โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมและทดสอบวัสดุคอมพอสิต PBAT/urea/OMMT โดยพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (poly(butylene adipate-co terephthalate); PBAT) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงจึงเหมาะแก่การนำมาทำเป็นฟิล์มคลุมหน้าดิน ซึ่งประโยชน์ของฟิล์มคลุมหน้าดินคือช่วยรักษาอุณหภูมิและความชื้นในดินและลดการระเหยของน้ำ โดยทั้งความชื้นในดินและลดการระเหยของน้ำเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลผลิต วิธีการผสมจะทำการกระจายแรมอนต์มอริลโลไนท์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงแล้ว (organomontmorillonite; OMMT) เพื่อให้เกิดความเข้ากันได้กับ PBAT ที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับแรมอนต์มอริลโลไนท์ที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง และยูเรียในสารละลายพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิคโซโนเคมี เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของ OMMT และยูเรียใน PBAT โดย OMMT จะทำหน้าที่เป็นตัวขวางกั้นการแพร่เข้ามาของน้ำเพื่อละลายยูเรียและขวางกั้นการแพร่ออกของสารละลายยูเรีย ทำการขึ้นรูปซีทคอมพอสิตฐาน PBAT โดยการเตรียมเป็นฟิล์มก่อนด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย (solvent casting) จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding) จนได้เป็นแผ่นซีทออกมา แล้วจึงนำไปทำการศึกษาต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของซีท PBAT และซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT
- 1.2.2 เพื่อศึกษาพื้นฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ และการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลองของซีทคอมพอสิตฐาน PBAT

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 ปริมาณยูเรียจะส่งผลต่อการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิตคือ เมื่อปริมาณยูเรียเพิ่มขึ้น จะทำให้ซีทคอมพอสิตมีประสิทธิภาพในการควบคุมการปลดปล่อยที่ลดลง
- 1.3.2 การทำซีทคอมพอสิต PBAT/urea และซีทคอมพอสิต PBAT/urea/OMMT สามารถควบคุมการปลดปล่อยยูเรียได้

- 1.3.3 ปริมาณ OMMT ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอลิเมอร์ฐาน PBAT ลดลง

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 งานวิจัยนี้ใช้ยูเรียเป็นตัวแทนของปุ๋ยยูเรียในการเกษตร เพื่อศึกษาแนวโน้มของการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยยูเรีย โดยได้เลือกใช้ AR grade urea แทนปุ๋ยยูเรียในงานวิจัยเพื่อตัดปัจจัยในด้านสิ่งเจือปนที่อาจส่งผลต่อการขึ้นรูปซีทคอมพอลิเมอร์ฐาน PBAT
- 1.4.2 งานวิจัยนี้ใช้ PBAT (Ecoflex F Mulch C1201) จากบริษัท BASF
- 1.4.3 งานวิจัยนี้ใช้แรมมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงแล้วคือ Nanomer® I.28E จากบริษัท Nanocor®, Inc. ซึ่งทำการปรับปรุงด้วย Octadecyl trimethyl ammonium 28-30 %wt
- 1.4.4 งานวิจัยนี้จะมีขั้นตอนขึ้นรูปซีท 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย (solvent casting) โดยจะทำการควบคุมชนิดตัวทำละลาย อุณหภูมิ และขนาดของแม่พิมพ์ และจากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปทำการขึ้นรูปต่อในขั้นตอนที่สอง โดยจะขึ้นรูปซีทด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding) โดยจะทำการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปและขนาดของแม่พิมพ์

#### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง
- 1.5.3 ดำเนินงานวิจัย

โดยงานวิจัยจะแบ่งเป็น 2 ตอนดังนี้

**ตอนที่ 1** เตรียมซีทคอมพอลิเมอร์จาก PBAT และยูเรียด้วยการขึ้นรูปเป็นฟิล์มก่อนด้วยวิธี Solvent casting โดยปริมาณของยูเรียที่ผสมในแต่ละสูตรคือ 20 30 และ 40 %wt จากนั้นนำฟิล์ม PBAT/urea ที่ได้ไปทำการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding) แล้วนำซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/urea ที่ได้ไปทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ คือ สัมฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล การควบคุมการปลดปล่อยยูเรีย

สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ และการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลอง จากนั้นเลือกสูตรที่มีปริมาณการเติมยูเรียที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาต่อในตอนที่ 2

**ตอนที่ 2** เตรียมซีทคอมพอสิตจาก PBAT ยูเรีย และ OMMT ด้วยการขึ้นรูปเป็นฟิล์มก่อนด้วยวิธี Solvent casting โดยปริมาณของยูเรียในแต่ละสูตรจะคงที่เท่ากับปริมาณยูเรียที่เหมาะสมที่สุดจากตอนที่ 1 ส่วนปริมาณของ OMMT ที่ผสมในแต่ละสูตรคือ 1 3 และ 5 phr จากนั้นนำฟิล์ม PBAT/urea/OMMT ที่ได้ไปทำการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding) แล้วนำซีทคอมพอสิต PBAT/urea/OMMT ที่ได้ไปทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ คือ สันฐานวิทยา องค์ประกอบและโครงสร้างของคอมพอสิต สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล การควบคุมการปลดปล่อยยูเรีย สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ และการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลอง

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.6.1 สามารถหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณการเติมยูเรียและ OMMT ที่ยังทำให้ซีทมีสมบัติที่ดี
- 1.6.2 ทำให้ทราบได้ว่าการทำซีทคอมพอสิตฐาน PBAT จะส่งผลให้สมบัติด้านต่าง ๆ ของ PBAT เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร
- 1.6.3 เพิ่มทางเลือกในการใช้งานซีทสำหรับใช้งานด้านเกษตรกรรมที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยได้ โดยเมื่อสิ้นสุดการใช้งาน ซีทนั้นจะสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ



## บทที่ 2

### วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การทบทวนทฤษฎี

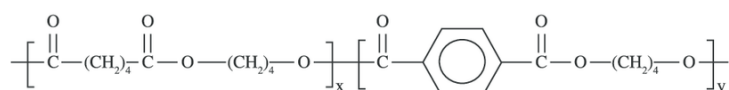
##### 2.1.1 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายโดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ โดยการสลายตัวของพอลิเมอร์จะได้สารผลิตภัณฑ์ทางธรรมชาติได้แก่ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ชีวมวลและเกลืออนินทรีย์ จากการศึกษาเกี่ยวกับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งพอลิเมอร์ที่ได้มาจากธรรมชาติและพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ จะมีสายโซ่หลักสามารถเป็นได้ทั้งหมู่เอสเทอร์ เอไมด์และอีเทอร์ พบว่าลักษณะการสลายตัวรวมถึงสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะถูกกำหนดโดยโครงสร้างของพอลิเมอร์นั้น พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถเป็นได้ทั้งพอลิเอสเทอร์ พอลิเอไมด์ พอลิแอนไฮไดรด์ พอลิคาร์บอเนต พอลิแซคคาไรด์และอื่นๆ ซึ่งพอลิแซคคาไรด์เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดหนึ่งซึ่งสามารถพบได้ในสิ่งมีชีวิตเช่น พืชและสัตว์ [4]

##### 2.1.2 พอลิเมอร์ฐานสังเคราะห์/ปิโตรเลียม

พอลิเมอร์ที่ถูกสังเคราะห์มาจากทรัพยากรที่ไม่สามารถทดแทนได้เช่นปิโตรเลียมหรือแก๊สจะถูกพิจารณาว่าเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับราคาของเชื้อเพลิงฟอสซิลในตลาด ตัวอย่างพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่น พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) พอลิคาโปแลคโตน (PCL) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) เป็นต้น

##### 2.1.2.1 พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท (Polybutylene adipate-co-terephthalate)

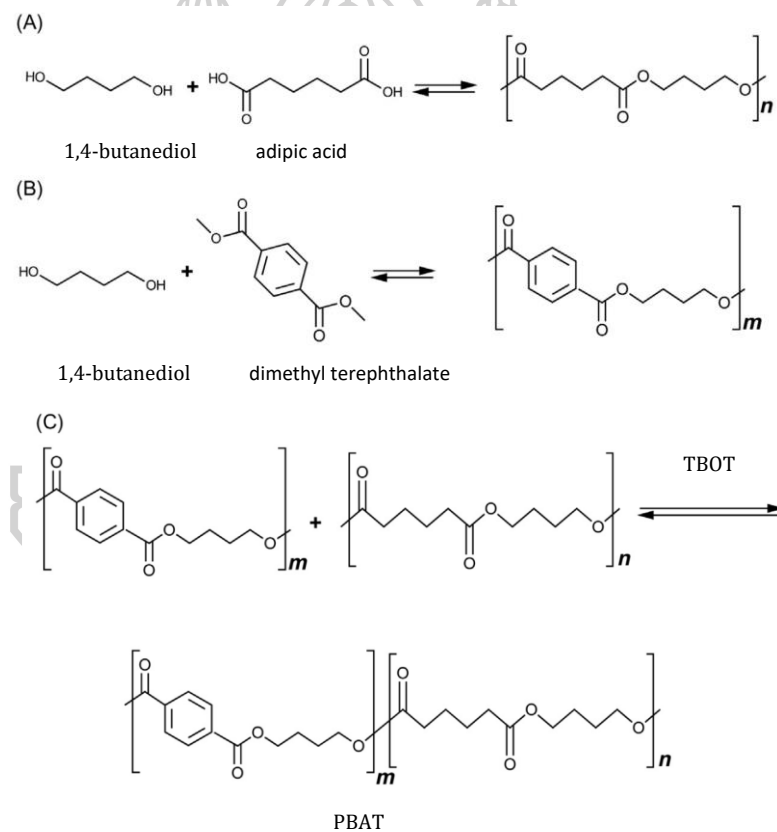


รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ PBAT [5]

Poly(butylene adipate-co-terephthalate) หรือ PBAT เป็นโคพอลิเมอร์ซึ่งโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.1 PBAT สังเคราะห์ได้จากมอนอเมอร์สามชนิด คือกรดอะดิพิค (adipic acid) 1,4-บิวเทนได-ออล (1,4-butanediol) และไดเมทิลเทเรพทาเลท (dimethyl terephthalate) มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 110-120 °C อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว -30 °C PBAT เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อย

สลายได้ทางชีวภาพที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากการที่ PBAT มีความเหนียวและมีค่า % Elongation at break มากจึงทำให้เหมาะแก่การนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์อาหารและฟิล์มที่ใช้ทางการเกษตร สมบัติของ PBAT จะคล้ายกับสมบัติของ LDPE เพราะ PBAT มีน้ำหนักโมเลกุลที่มาก และมีกิ่ง ส่วนที่เป็นอะโรมาติกในโครงสร้าง PBAT สามารถเสริมแรงให้กับโครงสร้างของโคพอลิเมอร์ได้มากที่สุดถึง 40% โดยไม่ส่งผลต่อความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพของสายโซ่โคพอลิเมอร์ ส่วนที่เป็นอะลิฟาติกจะเป็นส่วนที่เกิดการสลายตัวทางชีวภาพ [6]

### 2.1.2.2 การผลิตพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท (polybutylene adipate-co-terephthalate)



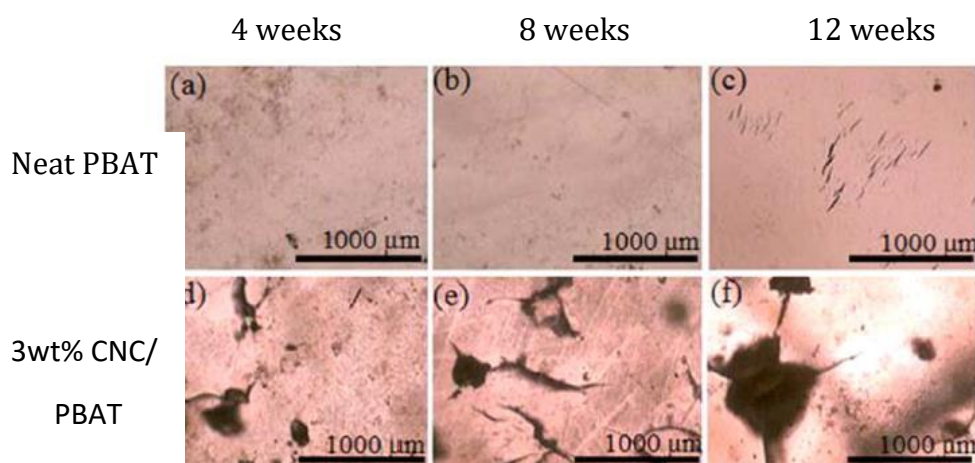
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PBAT [7]

การผลิต PBAT จะใช้มอนอเมอร์ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ กรดอะดิพิค 1,4-บิวเทนไดออล และ ไดเมทิลเทเรพทาเลท โดยปฏิกิริยาระหว่างมอนอเมอร์เหล่านี้แสดงในรูปที่ 2.2 ในขั้นตอนแรกจะเป็นเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ 1,4-บิวเทนไดออลกับกรดอะดิพิคในถังปฏิกรณ์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (ขั้นตอน A) ในขั้นตอนที่ 2 ทั้งไดเมทิลเทเรพทาเลทและ 1,4-บิวเทนไดออลจะทำปฏิกิริยา

กันเพื่อเกิดเป็นพอลิเอสเทอร์และจะมีการทำการกลั่นเพื่อกำจัดน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาออกไป (ขั้นตอน B) ในขั้นตอนที่ 3 จะมีการเติม tetrabutylorthotitanate (TBOT) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิไปที่ประมาณ 180 °C ภายใต้อากาศ (ขั้นตอน C) [7]

### 2.1.2.3 การสลายตัวของ PBAT

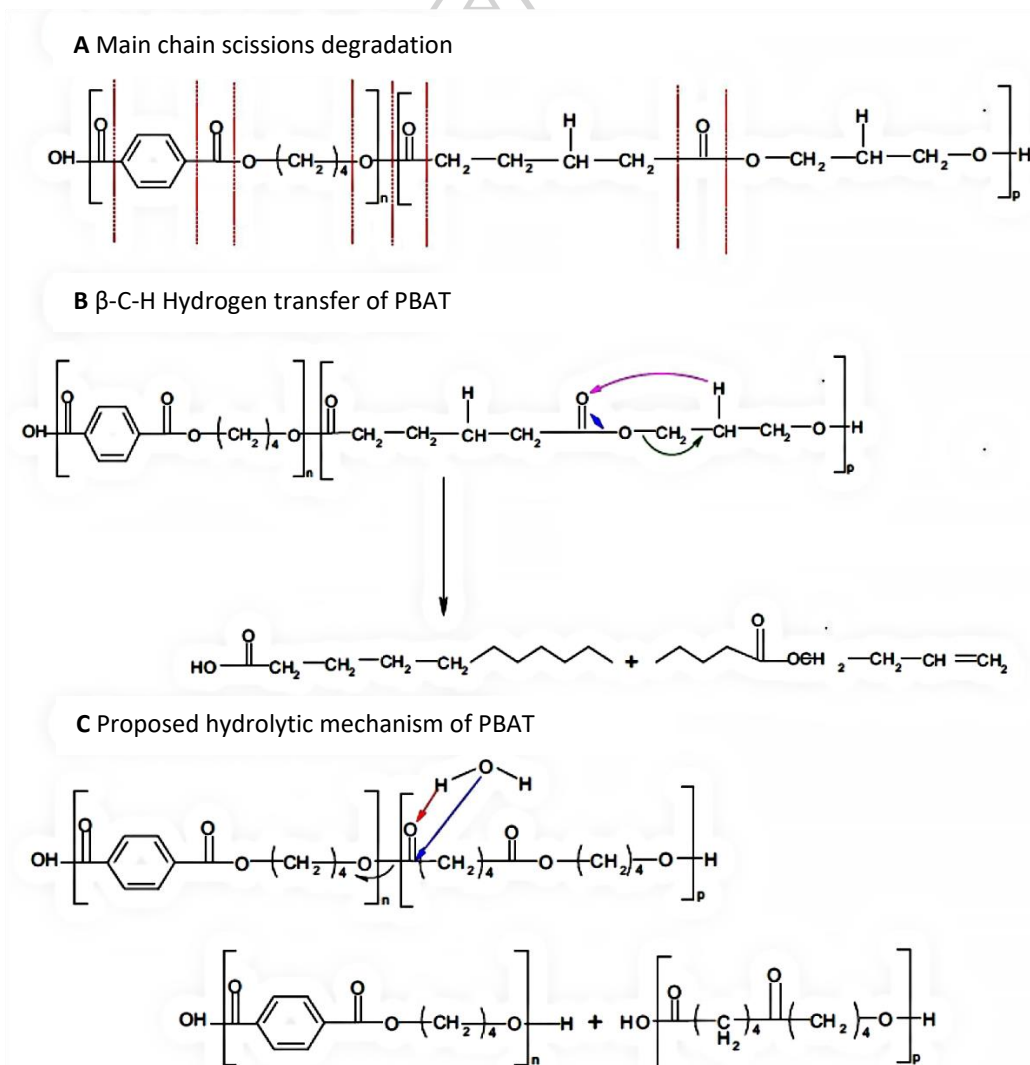
การสลายตัวของ PBAT สามารถเกิดได้ 2 แนวทาง โดยแนวทางแรกคืออาศัยเอนไซม์จากแบคทีเรีย ฟังไจและสาหร่ายซึ่งพบได้ในธรรมชาติและอีกแนวทางหนึ่งคือการไม่ใช้เอนไซม์ เช่น การสลายตัวทางความร้อน การไฮโดรไลซิส เป็นต้น ในกรณีที่เป็นการสลายตัวโดยใช้เอนไซม์ แบคทีเรียที่ใช้ ออกซิเจน ฟังไจ และสาหร่าย จะทำการย่อยสลาย PBAT อย่างรวดเร็วระหว่างกระบวนการสลายตัวทางชีวภาพ โดยปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสลายตัวทางชีวภาพของ PBAT คือ อุณหภูมิ การสลายตัวและตัวกลาง ปริมาณเอนไซม์หรือตัวเร่งในโครงสร้างระหว่างการสลายตัวทางชีวภาพ และการเติมสารตัวเติมต่าง ๆ



รูปที่ 2.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสงของ PBAT (a-c) และนาโนคอมพอสิตของ PBAT ที่เสริมแรงด้วย CNC (d-f) ที่เวลาต่าง ๆ ของการทดสอบการย่อยสลาย [8]

การเติมสารตัวเติมจากธรรมชาติสามารถเพิ่มแนวโน้มการแตกออกของคอมพอสิตฐาน PBAT ในดิน รูปที่ 2.3 เป็นรูปของ PBAT และนาโนคอมพอสิตที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมมาจากการผสม PBAT และ Cellulose nanocrystals (CNC) พบว่าการเติม CNC เข้าไปจะเกิดการกระจายตัวของ CNC ในเมทริกซ์ PBAT ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ PBAT ได้ และยังปรับปรุงการย่อยสลายทางชีวภาพได้

ในกรณีที่เป็นกรย่อยสลายโดยไม่ใช้เอนไซม์จะเป็นการเกิดการแตกออกของสายโซ่พอลิเมอร์ (depolymerization) ซึ่งจะเกิดแบบสุ่มและเกิดผ่านการแตกออกของพันธะเอสเทอร์เป็นหลัก (รูปที่ 2.4a) ดังนั้นสารมัธยันต์ที่เกิดขึ้นเหล่านั้นจะถูกดูดซึมเพื่อไปเป็นสารอาหารแก่จุลชีพเช่น *Pseudomonas cepacia* และจะถูกเมทาบอลิซ์ต่อไป ส่วนในกระบวนการสลายตัวทางความร้อน กระบวนการหลักที่เกิดขึ้นคือการตัดพันธะโดยไฮโดรเจนที่สร้างพันธะกับคาร์บอนตำแหน่ง  $\beta$  (รูปที่ 2.4b) ในขณะที่การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสหรือการตัดพันธะด้วยน้ำจะเกิดในการสลายตัวที่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง (รูปที่ 2.4c) ตัวแปรบางอย่างที่ส่งผลต่อการสลายตัวของแบบไม่ใช้เอนไซม์คือความเป็นผลึก สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ ปริมาณน้ำ อุณหภูมิ และการเติมสารตัวเติม [8]



รูปที่ 2.4 กลไกการสลายตัวของ PBAT ที่ถูกเสนอขึ้นมา [8]

### 2.1.3 พลาสติกคลุมดิน (mulch film)

การใช้ฟิล์มพลาสติกคลุมดินเหมาะกับการปลูกพืชในพื้นที่ที่มีแหล่งน้ำจำกัด เพราะจะช่วยรักษาอุณหภูมิและความชื้นในดิน ลดการระเหยของน้ำ และช่วยป้องกันไม่ให้วัชพืชเติบโตหรือแย่งน้ำ และสารอาหารจากพืชที่กำลังเพาะปลูกอยู่ ซึ่งฟิล์มที่นำมาใช้จะมีข้อดีข้อเสียขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น ถ้าเป็นฟิล์มดำ (black film) จะช่วยป้องกันการเจริญเติบโตของวัชพืช แต่จะกันแสงที่ผ่านไปยังดิน ส่วนฟิล์มใส (clear film) จะเป็นฟิล์มที่ส่งผ่านแสงได้ดี จึงทำให้วัชพืชเติบโต พลาสติกที่นำมาใช้ทำฟิล์มพลาสติกคลุมดินได้แก่ LDPE LLDPE และ HDPE นอกจากนี้ยังนิยมนำฟิล์มพลาสติกคลุมดินไปปรับคุณภาพเพื่อให้สมบัติที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืชและเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ เช่น

- ผสมหรือเคลือบด้วยสารเสริมความแข็งแรง เพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นพลาสติกยืดออก เมื่อถูกดึงให้ดึงเป็นเวลานาน
- ผสมด้วยสารป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV blocking) เพื่อป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตและการส่งผ่านแสง

ในปัจจุบันกระแสการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้น ทำให้ผู้ผลิตพลาสติกคิดค้นและพัฒนาพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติเพื่อนำมาใช้งานทางด้านเกษตรกรรมมากขึ้นซึ่งนอกจากจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาการกำจัดขยะพลาสติก [9]

พลาสติกที่สามารถนำมาทำเป็นฟิล์มพลาสติกคลุมดินที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้คือ PBAT เนื่องจากสมบัติที่มีความยืดหยุ่นคล้าย LDPE ฟิล์มเมื่อขึ้นรูปมาแล้วจะมีความขุ่นและมีเสถียรภาพทางความร้อนถึงอุณหภูมิ 230 °C และนอกจากจะทำเป็นฟิล์มพลาสติกคลุมดินแล้ว PBAT ยังสามารถนำมาใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารและย่อยสลายได้โดยใช้กระบวนการขึ้นรูปไม่ซับซ้อน คือการเป่าฟิล์มและการหล่อฟิล์ม เป็นต้น [6]

### 2.1.4 ถุงเพาะกล้า (seedling bag)

การปลูกถ่าย (transplanting) หรือการปลูกใหม่ (replanting) เป็นเทคนิคการย้ายพืชจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยทั่วไปกระบวนการจะเริ่มต้นด้วยการเพาะเมล็ดในสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมเช่นในเรือนกระจก ตามด้วยการย้ายต้นกล้าไปปลูกในบริเวณอื่น ซึ่งอาจจะเป็นกลางแจ้งหรือในสถานที่ที่ต้องการปลูก การปลูกถ่ายมีประโยชน์ที่หลากหลายเช่น ปกป้องต้นกล้าจากโรคและแมลงศัตรูพืช

รวมไปถึงหลีกเลี่ยงปัญหาเกี่ยวกับการรอกของเมล็ดโดยการปักต้นกล้าแทนการเพาะเมล็ดโดยตรง [10]

ถุงเพาะชำหรือชื่อที่เรียกโดยทั่วไปคือ พอลิแบ็ก (polybag) คือบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ใช้ในภาคเกษตรกรรม ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้ในการปลูกต้นกล้าซึ่งพืชแต่ละชนิดจะมีขนาดที่แตกต่างกันโดยขนาดถุงที่ใช้ก็จะมีขนาดตามขนาดของพืชที่ปลูก การใช้งานของถุงเพาะกล้าคือใช้ใส่ต้นกล้าเพื่อให้ต้นกล้าได้รับสิ่งแวดล้อมที่ดีในขั้นตอนแรกของการเจริญเติบโตและยังช่วยการปกป้องระบบรากพืชในระหว่างการเจริญเติบโตด้วย เมื่อต้นกล้าโตได้ขนาดที่ต้องการสำหรับการปลูกแล้ว จะนำถุงเพาะต้นกล้าออกก่อนที่จะวางต้นกล้าลงในดิน

โดยปกติแล้วถุงเพาะกล้าจะผลิตมาจากพลาสติก เนื่องจากมีราคาถูก ไม่เกิดสนิม ทนทาน มีรูปทรงคงที่ และสามารถนำมาใช้ได้ง่าย [10] ซึ่งพลาสติกที่นำมาผลิตเป็นถุงเพาะชำโดยทั่วไปเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากและไม่สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้เมื่อฝังลงไปดินเช่น LDPE [11] โดยพลาสติกจะยังคงรูปร่างเดิมถึงแม้ว่าเวลาจะผ่านไปนานมาก จุลินทรีย์ในดินไม่สามารถย่อยสลายพลาสติกกลุ่มนั้นได้เพราะจุลินทรีย์ในดินไม่มีเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายพลาสติก ซึ่งมีแต่อะตอมคาร์บอนเท่านั้นในสายโซ่หลัก [12]

### 2.1.5 ความรู้เรื่องปุ๋ย ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและการบำรุงดิน

ปุ๋ย คือ วัตถุหรือสารที่ใส่ลงไปในดินหรือให้แก่พืชโดยตรง สำหรับใช้เป็นธาตุอาหารแก่พืชได้ เพื่อบำรุงการเจริญเติบโตแก่พืช ปุ๋ยแบ่งออกได้ 3 ชนิดตามธาตุอาหารปุ๋ย ได้แก่

1. ปุ๋ยไนโตรเจน (nitrogen fertilizer) คือปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารไนโตรเจนเป็นหลัก เช่น ปุ๋ยยูเรีย ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต เป็นต้น ทำหน้าที่บำรุงใบ เร่งการเจริญเติบโตทางใบ เร่งการสร้างคลอโรฟิลล์ของใบ เร่งการขยายขนาดผลและเพิ่มผลผลิต พืชที่ได้รับปุ๋ยไนโตรเจนจะมีลักษณะใบสีเขียวขึ้นจนถึงเขียวเข้ม ใช้มากในระยะต้นอ่อนจนถึงระยะเติบโต ใช้กับพืชทุกชนิด แต่สำคัญมากสำหรับพืชที่ต้องการผลผลิตเป็นใบ เช่น ผักต่างๆ
2. ปุ๋ยฟอสฟอรัส (phosphorus fertilizer) คือปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารฟอสฟอรัสเป็นหลัก เช่น ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต ปุ๋ยหินฟอสเฟต กระจุกป่น เป็นต้น ทำหน้าที่เร่งการเจริญเติบโตของราก หัว ลำต้น ดอก และผล ปุ๋ยสูตรนี้จะใช้มากในระยะต้นอ่อนจนถึงเจริญเติบโตเต็มที่ มักใช้ในพืชทุกชนิดและทุกระยะ

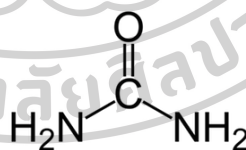
3. ปุ๋ยโพแทสเซียม (potassium fertilizer) คือปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารโพแทสเซียมเป็นหลัก เช่น ปุ๋ยโพแทสเซียม ทำหน้าที่ช่วยในการสังเคราะห์แป้ง และน้ำตาล ปุ๋ยสูตรนี้จะใช้มากในระยะก่อนการเก็บเกี่ยวของพืชในกลุ่มที่ให้ราก หัว ดอก และผล

#### 2.1.5.1 ปุ๋ยไนโตรเจน (nitrogen fertilizers)

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นอย่างมากในการเพาะปลูกพืช เพราะธาตุไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบของกรดอะมิโน โปรตีน กรดนิวคลีอิก คลอโรฟิลล์ และเอนไซม์ต่าง ๆ ในพืช โดยจะมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของพืช และยังช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของส่วนอ่อนในพืชซึ่งเป็นส่วนที่กำลังเจริญเติบโตทั้งหลาย เช่น ยอดอ่อน ใบอ่อน กิ่ง ก้านอ่อน รากอ่อน ปม ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของเซลล์พืชหรือการเพิ่มจำนวนเซลล์ ซึ่งในเซลล์มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ โปรตีนจำเป็นที่จะต้องมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบและเป็นส่วนสำคัญในการแบ่งเซลล์ หรือเพิ่มการเจริญเติบโตของเซลล์ [1]

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมาก แต่ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกโดยทั่วไปมักมีไนโตรเจนไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช นอกจากนี้ธาตุไนโตรเจนที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้จะต้องอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) และไนเตรตไอออน ( $\text{NO}_3^-$ ) เท่านั้น ในขณะที่ไนโตรเจนที่อยู่ในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งจะต้องรอให้จุลินทรีย์ย่อยสลายก่อน ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ต้องใช้ปุ๋ยไนโตรเจนหรือปุ๋ยยูเรียเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร [1, 2]

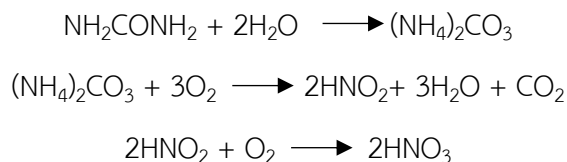
#### 2.1.5.2 ยูเรีย (urea)



รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยูเรีย [13]

ยูเรียมีสูตรทางเคมี  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  และมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.5 มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว มีความถ่วงจำเพาะ  $1.335 \text{ g/cm}^3$  ดูดความชื้นได้ง่าย เมื่อเก็บทิ้งไว้จะมีกลิ่นแอมโมเนียซึ่งมีรสเค็ม มีจุดหลอมเหลวที่  $132.7 \text{ }^\circ\text{C}$  และละลายน้ำได้มาก นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์และแอมโมเนีย แต่ไม่ละลายในไฮโดรคาร์บอน ยูเรียเป็นสารที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง ยูเรียจึงต้องถูกไฮโดรไลซ์โดยมีเอนไซม์ Urease ในดินช่วยเร่งปฏิกิริยาและถ้าอยู่ในภาวะที่มีออกซิเจน

เพียงพอ  $\text{NH}_4^+$  ที่เกิดขึ้นจะถูกจุลินทรีย์ออกซิไดซ์ต่อไปเป็น  $\text{NO}_2^-$  และเปลี่ยนเป็น  $\text{NO}_3^-$  ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ [1]



เนื่องจากประโยชน์ของปุ๋ยไนโตรเจนหรือปุ๋ยยูเรียนั้นขึ้นอยู่กับ การละลาย (dissolution) และสภาพการละลายได้ (solubility) ของปุ๋ยในสารละลายดิน ซึ่งส่งผลให้ยูเรียที่เป็นปุ๋ยที่ละลายได้ง่ายและให้ประโยชน์แก่พืชเร็ว ทำให้ประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารของพืชจากปุ๋ย (nutrient use efficiency) ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น การสูญเสียปุ๋ยเกิดได้จากปัจจัยต่อไปนี้คือ การเก็บเกี่ยวผลผลิตพืช การชะล้างจากน้ำฝนหรือน้ำชลประทาน และการชะล้างพังทลายของหน้าดิน จึงมีการคิดค้นและ พัฒนาวิธีต่างๆ ในการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียและการปลดปล่อยยูเรียให้ช้าลง

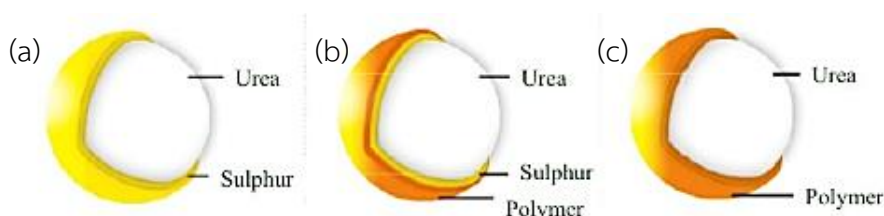
### 2.1.6 ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (controlled released fertilizers; CRF)

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (controlled released fertilizers; CRF) หมายถึง ปุ๋ยที่มีการเตรียมและปรับปรุงให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารแก่พืชได้ และยังทราบแน่ชัดว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่ออัตราและช่วงเวลา que ปุ๋ยนั้นจะปลดปล่อยธาตุอาหาร รวมทั้งมีกลไกที่ควบคุมการปลดปล่อยในปุ๋ยที่ผลิต เช่น ปุ๋ยเคลือบ (coated fertilizer) ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยจะมีลักษณะเป็นปุ๋ยเม็ดที่มีสารเคลือบอยู่ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยด้วยอินทรีย์สาร (รูปที่ 2.6a) เช่น กำมะถัน (sulfur-coated urea หรือ SCU) การเคลือบด้วยกำมะถันเพียงอย่างเดียว ผิวเคลือบจะมีรูพรุนมากเกินไป เป็นเหตุให้การควบคุมการละลายได้ไม่ดีนัก
2. เคลือบด้วยกำมะถันและเคลือบทับด้วยพอลิเมอร์ (polymer coating of SCU) เนื่องจากยูเรียเคลือบด้วยกำมะถันมีการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียออกจากเม็ดปุ๋ยได้ไม่ค่อยดีนัก จึงได้ปรับปรุงวิธีการโดยการเคลือบพอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) หรือเรซิน (resin) เพิ่มอีกชั้นหนึ่ง (รูปที่ 2.6b) ทำให้สมบัติด้านควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารแก่พืชดีกว่า SCU มาก นอกจากนี้ ชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบทับยังเพิ่มความทนทานต่อการขัดสี (attrition resistance) ระหว่างเม็ดปุ๋ยข้างเคียงด้วย
3. เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยด้วยพอลิเมอร์อินทรีย์ (fertilizers coated with organic polymers) (รูปที่ 2.6c) ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งเรซินและเทอร์โมพลาสติก การเคลือบผิวเม็ดปุ๋ยด้วยพอลิเมอร์



อินทรีย์จะสามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ดี และอัตราการปลดปล่อยจะได้รับอิทธิพลจากสมบัติของดินเพียงเล็กน้อย

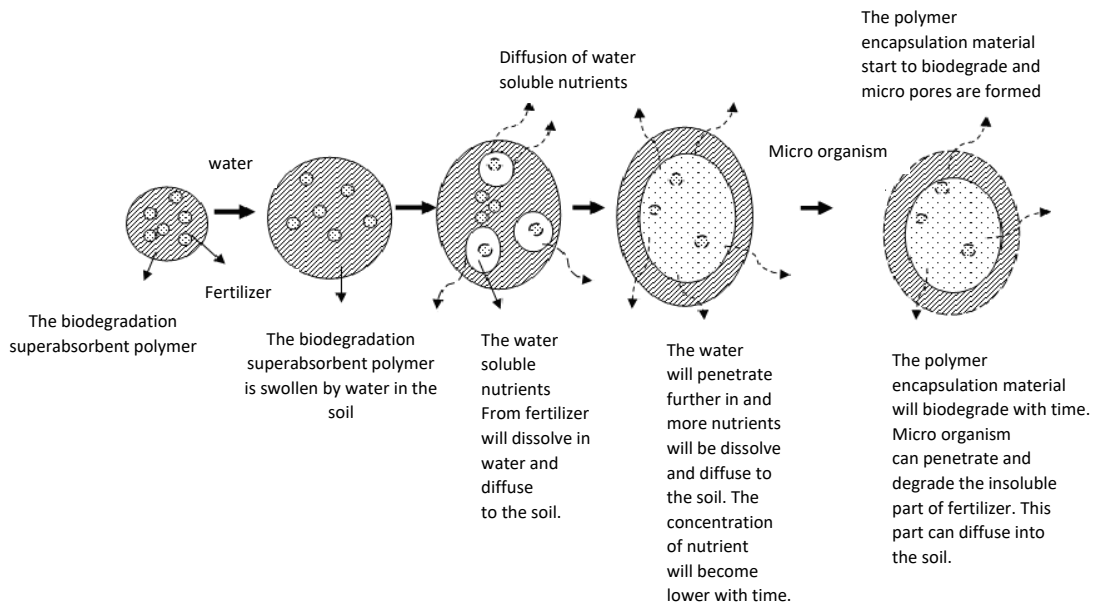


รูปที่ 2.6 การเคลือบปุ๋ยยูเรียด้วย (a) กำมะถัน (b) กำมะถันและเคลือบทับด้วยพอลิเมอร์ (c) พอลิเมอร์อินทรีย์ [14]

ปัจจุบันนี้มีการนำพอลิเมอร์ธรรมชาติเช่นแป้ง เซลลูโลส ลิกนิน ไคโตซาน โปรตีนจากถั่วเหลือง ซีไธลอลอย แป้งมันสำปะหลัง และการทำคอมพอสิตจากแร่ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ เช่นมอนต์มอริลโลไนต์และเบนโทไนท์นาโนคอมพอสิต ซึ่งสารทั้งหมดที่กล่าวมานี้สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการพองของปุ๋ย (swelling property) อีกทั้งลดต้นทุนการผลิตและยังสามารถย่อยสลายตามได้ธรรมชาติ

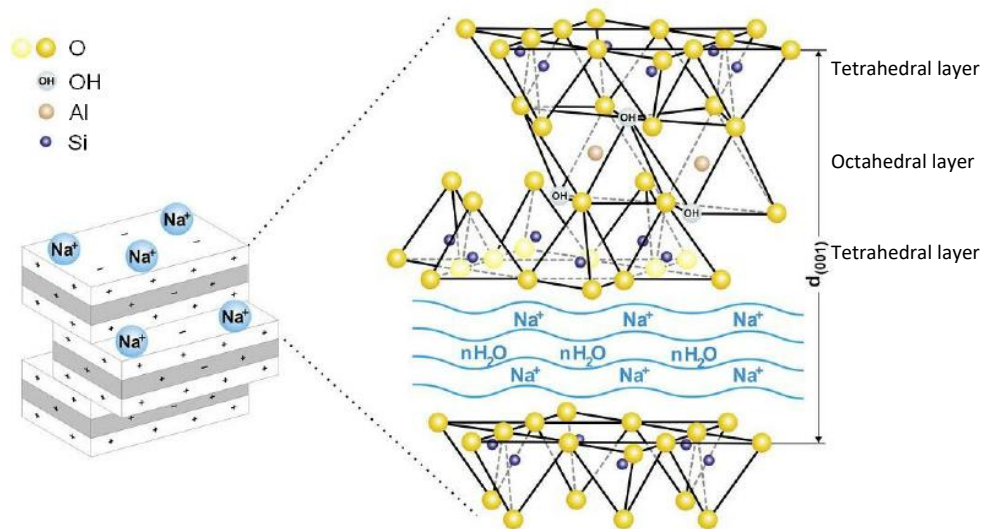
#### 2.1.6.1 กลไกการควบคุมการปลดปล่อย

การควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารมีกลไกการปลดปล่อยคือน้ำจะแทรกซึมเข้าไปภายในเม็ดปุ๋ยผ่านรูเล็ก ๆ ของพอลิเมอร์จนเข้าไปถึงเนื้อปุ๋ย ทำให้เนื้อปุ๋ยภายในเม็ดกลายเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงและอาศัยการแพร่ผ่านพอลิเมอร์ออกมาตามหลักการแพร่ของสารละลายที่จะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำเสมอ ส่งผลให้ธาตุอาหารถูกละลายออกมานอกเม็ดปุ๋ยอย่างช้า ๆ ซึ่งกลไกการปลดปล่อยปุ๋ย โดยใช้ Biodegradable superabsorbent polymer เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยแสดงดังรูปที่ 2.7 [1] จากรูปในขั้นแรกน้ำจะแพร่ผ่าน Biodegradable superabsorbent polymer เข้าไป หลังจากนั้นพอลิเมอร์จะเกิดการบวมตัวและสารอาหารที่สามารถละลายน้ำได้จะละลายในน้ำแล้วแพร่ออกมา เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะแพร่เข้าไปและสารอาหารจะถูกละลายและถูกปลดปล่อยออกมาในปริมาณมากขึ้น ซึ่งความเข้มข้นของยูเรียในพอลิเมอร์จะลดลงตามเวลาที่มากขึ้น ส่วนพอลิเมอร์นั้นจะสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เมื่อเวลาผ่านไป จุลชีพสามารถแทรกซึมเข้าไปเพื่อย่อยส่วนที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งส่งผลให้ส่วนนี้แพร่ออกมายังดินได้



รูปที่ 2.7 กลไกการปลดปล่อยปุ๋ย โดยใช้ Biodegradable superabsorbent polymer [15]

2.1.7 แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite; MMT)



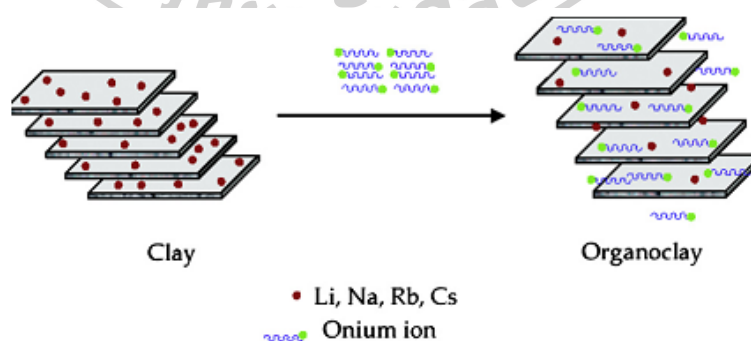
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ [16]

แร่มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างเป็นชั้นซ้อนทับกัน ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นที่อยู่ตรงกลางซึ่งเป็นชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ถูกระบายประจุลบและกลางด้วยชั้นที่เป็นซิลิกาเตตระฮีดรอน (รูปที่ 2.8) เรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า 2 : 1 Phyllosilicate แต่ละชั้นจะมีความบางมาก ซึ่งจะมีความหนาน้อยกว่า 1 นาโนเมตรและมีความยาวประมาณ 1000 เท่า ทำให้มีค่า Aspect ratio

สูง และเหมาะสมอย่างมากที่จะนำไปใช้เสริมแรงวัสดุพอลิเมอร์ พื้นผิวของชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminosilicate) จะมีประจุลบ แต่ชั้นเหล่านี้สามารถยึดเกาะกันได้ด้วยประจุบวก เช่น โซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) และ แคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^+$ ) จะทำหน้าที่ยึดชั้นของดินที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นของดินยึดติดกันแน่น

พอลิเมอร์โดยทั่วไปมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ในขณะที่มอนต์มอริลโลไนต์โดยธรรมชาติจะมีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) จึงทำให้เมื่อนำไปทำเป็นคอมพอสิตกับพอลิเมอร์จะเกิดการผสมและเกิดความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ต่าง ๆ ได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ก่อนที่จะนำไปผสมเข้ากับพอลิเมอร์ เพื่อให้โครงสร้างของแรมมอนต์มอริลโลไนต์เกิดการแยกชั้น หรือเกิดการขยายชั้น หรือเกิดความชอบน้ำน้อยลง และสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้สมบัติต่าง ๆ ของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล

วิธีการที่ใช้ในการดัดแปรแรมมอนต์มอริลโลไนต์คือ การทำปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange reaction) โดยสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก (organic cation) เช่น อัลคิลแอมโมเนียมหรืออัลคิลฟอสโฟเนียม หรืออัลคิลโอเนียม แคทไอออนซึ่งสามารถเข้าไปแลกเปลี่ยนประจุกับประจุบวกที่อยู่ภายในชั้นของแรมมอนต์มอริลโลไนต์ได้ จึงทำให้สารเหล่านั้นเข้าไปแทนที่ประจุบวกซึ่งส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นของแรมมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้นและทำให้ความชอบน้ำลดลง แรมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรแล้วจะถูกเรียกว่าออร์กาโนเคลย์ (organoclay) รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างประจุบวกในชั้นของแรมมอนต์มอริลโลไนต์กับไอออนไอออน [6, 17]



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกในแรมมอนต์มอริลโลไนต์ [18]

### 2.1.8 วัสดุคอมโพสิตระหว่างแรมอนต์มอริลโลไนต์กับพอลิเมอร์ (clay/polymer composite)

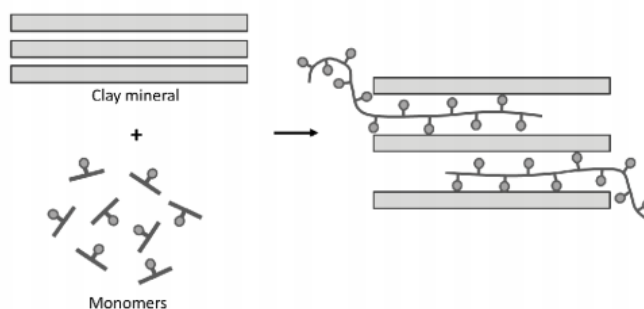
ในวัสดุคอมโพสิตระหว่างแรมอนต์มอริลโลไนต์กับพอลิเมอร์ แรมอนต์มอริลโลไนต์จะสามารถใช้ปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ได้ ดังนี้ สมบัติเชิงกล สมบัติการขวางกัน สมบัติทางความร้อน การต้านทานไฟ และสมบัติทางการไหล ซึ่งการเตรียมคอมโพสิตระหว่างแรมอนต์มอริลโลไนต์กับพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

#### *In situ* polymerization

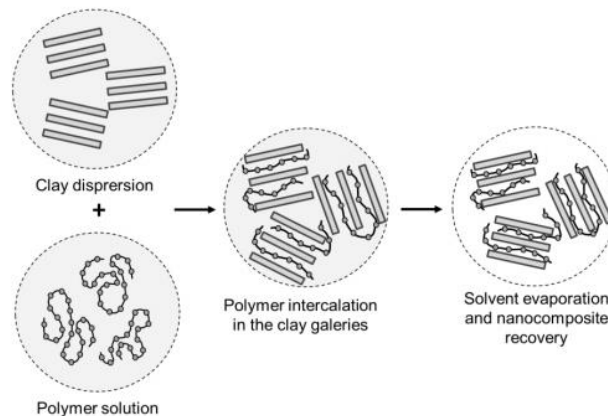
การเตรียมคอมโพสิตด้วยวิธีนี้จะใช้มอนอเมอร์โดยมีแรมอนต์มอริลโลไนต์กระจายอยู่ในมอนอเมอร์แล้วจึงทำการตั้งสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายในระหว่างชั้นแต่ละชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์ (รูปที่ 2.10) ซึ่งจากการที่แรมอนต์มอริลโลไนต์มีพื้นที่ผิวที่มากจึงทำให้แรมอนต์มอริลโลไนต์มีแรงดึงดูดกับมอนอเมอร์ภายในชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์จนเข้าสู่สมดุแล้วจึงเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในระหว่างชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์ [19]

#### การกระจายตัวในสารละลาย (dispersion in solution)

การเตรียมด้วยวิธีนี้แรมอนต์มอริลโลไนต์จะถูกทำให้แต่ละชั้นแตกออกจากกันเป็นชั้นเดี่ยว ๆ โดยใช้ตัวทำละลายที่สามารถละลายพอลิเมอร์หรือพรีพอลิเมอร์ได้ หลังจากนั้นพอลิเมอร์จะถูกตั้งไว้กับชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์ที่แตกออกมาและเมื่อตัวทำละลายระเหยออกหมดจะได้ชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์รวมกับพอลิเมอร์โดยมีแรมอนต์มอริลโลไนต์เป็นฟิลเลอร์ (รูปที่ 2.11) การเตรียมด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องเลือกพอลิเมอร์และตัวทำละลายให้มีความเหมาะสม สิ่งที่น่าสังเกตเมื่อใช้วิธีนี้คือจะสามารถเตรียมคอมโพสิตที่มีปริมาณการ Intercalate ได้มากสำหรับระบบพอลิเมอร์/แรมอนต์มอริลโลไนต์/ตัวทำละลายที่จำเพาะ



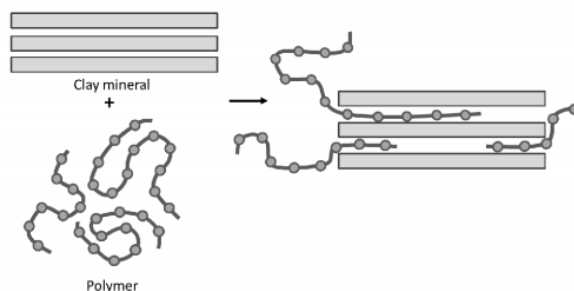
รูปที่ 2.10 การเตรียมคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์กับแรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธี *In situ* polymerization [19]



รูปที่ 2.11 การเตรียมคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์กับแร่มอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีการกระจายตัวในสารละลาย [19]

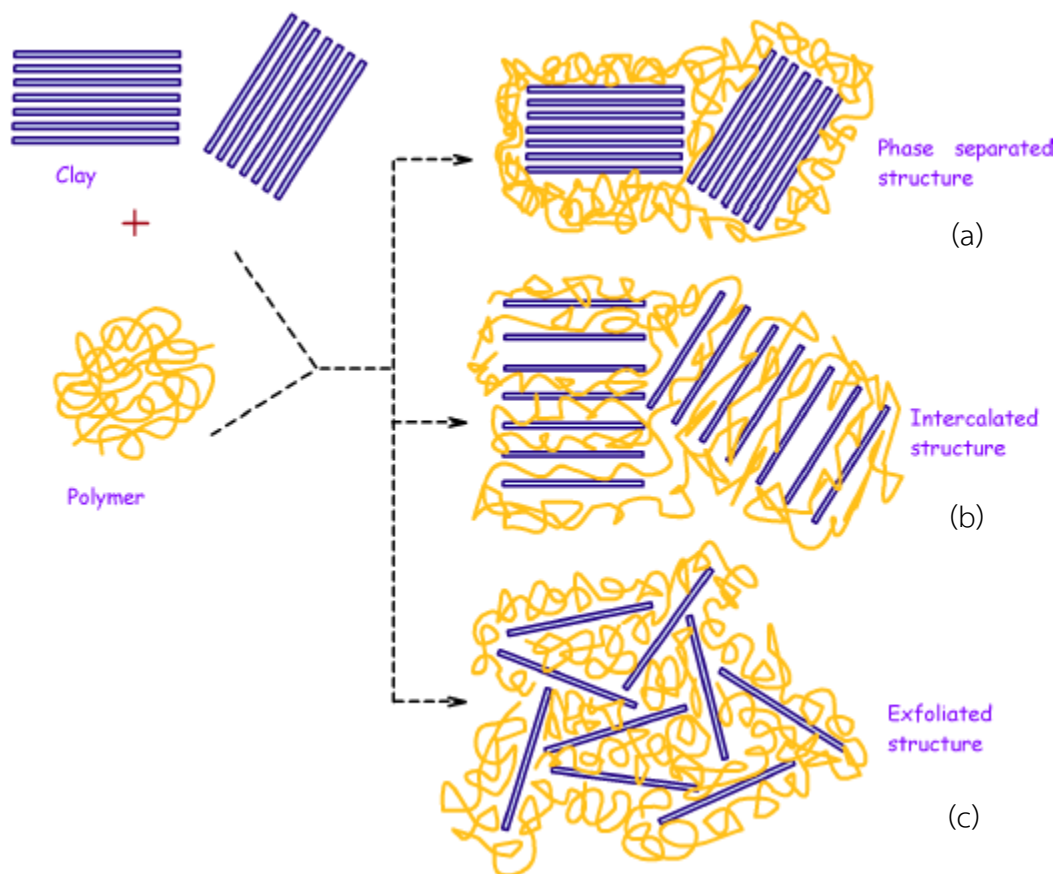
#### Intercalation ในสถานะหลอมเหลว (intercalation in molten state)

วิธีการนี้จะเป็นการผสมแร่มอนต์มอริลโลไนต์กับเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ในขณะหลอมเหลว ภายใต้สภาวะนี้พอลิเมอร์จะเข้าไปอยู่ในพื้นที่บริเวณระหว่างชั้นของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ เพื่อเกิดเป็นนาโนคอมพอสิต (รูปที่ 2.12) ซึ่งสิ่งที่ทำให้เกิดกระบวนการนี้คืออันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับแร่มอนต์มอริลโลไนต์ นอกเหนือจากนี้ วิธีนี้เป็นวิธีที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นวิธีที่ยืดหยุ่นได้และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจากวิธีการทั้งหมดในการเตรียมคอมพอสิตระหว่างแร่มอนต์มอริลโลไนต์กับพอลิเมอร์ แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือเมื่อปริมาณแร่มอนต์มอริลโลไนต์มากขึ้นจะเกิดการรวมกลุ่มกันของแร่มอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ 2.12 การเตรียมคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์กับแร่มอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธี Intercalation ในสถานะหลอมเหลว [19]

### 2.1.8.1 โครงสร้างของคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์/แร่มอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ 2.13 โครงสร้างที่เป็นไปได้ของคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์และแร่มอนต์มอริลโลไนต์ [20]

#### 1. โครงสร้างแบบแยกวัฏภาค (phase separated structure)

โครงสร้างชนิดนี้จะมีผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และแร่มอนต์มอริลโลไนต์ที่อ่อนแอมาก ซึ่งส่งผลให้ไม่เกิดการแทรกของสายโซ่พอลิเมอร์เข้าไประหว่างชั้นของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (รูปที่ 2.13a) โครงสร้างของคอมพอสิตในกรณีที่มีการแยกวัฏภาคนี้จะเรียกว่าคอมพอสิตระดับไมโครไม่ใช่คอมพอสิตระดับนาโน ดังนั้น สามารถคาดเดาได้ว่าคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบนี้จะมีสมบัติที่แย่งลง

#### 2. โครงสร้างแบบสอดแทรก (intercalated structure)

ถ้าสายโซ่พอลิเมอร์สามารถแทรกเข้าไปในชั้นของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ได้บางส่วนในระหว่างกระบวนการเตรียมคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์/แร่มอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งผลที่ได้จะเป็นโครงสร้างที่เรียกว่าโครงสร้างแบบสอดแทรก (รูปที่ 2.13b) ในกรณีที่เกิดโครงสร้างแบบนี้ ระยะห่างระหว่างชั้น

ของแรมอนต์มอริลโลไนต์จะเพิ่มขึ้นเพราะกระบวนการสอดแทรกของสายโซ่พอลิเมอร์เข้าไปในระหว่างชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์

### 3. โครงสร้างแบบแยกจากกัน (exfoliated structure)

โครงสร้างแบบนี้จะมีลักษณะที่ชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์จะเกิดการแยกออกจากกันเป็นชั้นเดี่ยว ๆ และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์พอลิเมอร์ (รูปที่ 2.13c) สามารถคาดเดาได้ว่าการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์ที่แยกจากกันอย่างสมบูรณ์ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ จะมีหน้าที่หลักในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติการกั้นขวางของนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ [20]

#### 2.1.9 การหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย (solvent casting) [21]

เป็นวิธีการขึ้นรูปพอลิเมอร์ให้เป็นฟิล์มพลาสติกบาง ซึ่งจะมีองค์ประกอบของกระบวนการดังนี้

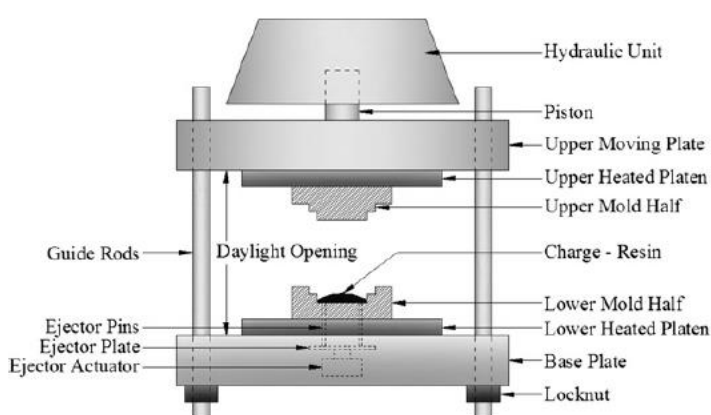
1. วัตถุดิบ (raw materials) ซึ่งมีสิ่งที่จำเป็นคือ พอลิเมอร์ที่ใช้ต้องละลายในตัวทำละลายจนได้สารละลายซึ่งปริมาณตัวทำละลายต้องสอดคล้องกับปริมาณส่วนที่เป็นของแข็งหรือความหนืดของสารผลิตภัณฑ์เมื่อขึ้นรูปฟิล์มแล้วจะต้องอยู่ในลักษณะ homogenous film
2. การเตรียมการโด๊ป (dope preparation) เป็นการนำพอลิเมอร์ของแข็งที่อยู่ในลักษณะต่าง ๆ เช่น เป็นเม็ด เป็นแผ่น หรือเป็นผง มาละลายในตัวทำละลายบริสุทธิ์หลังจากนั้นทำการกวนจนเกิดเป็นอนุภาคแบบเจล แล้วจึงทำการเติมสารเติมแต่งลงไป
3. กระบวนการหล่อ (casting process) นำสารที่ทำการผสมเทใส่ลงในแม่พิมพ์ หลังจากนั้นจึงทำการระเหยตัวทำละลายออกจนทำให้ได้ชิ้นงานที่เป็นของแข็งออกมาในรูปร่างตามแม่พิมพ์

#### 2.1.10 กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding)

กระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดเป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกที่เก่าแก่ที่สุดวิธีหนึ่ง กระบวนการพื้นฐานประกอบด้วยทำให้ความร้อนแก่เรซินภายใต้ความดันซึ่งกระบวนการนี้เกิดภายในช่องของแม่พิมพ์ที่เป็นระบบปิด เมื่อเรซินได้รับความดันจะเกิดการหลอมเหลวและเกิดการไหลไปตามรูปร่างของช่องแม่พิมพ์ หลังจากนั้นจะทำการหล่อเย็นชิ้นงาน แล้วทำการแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

โดยปกติแล้วเครื่องกดอัดจะมีขนาดกะทัดรัดแต่มักมีน้ำหนักมากและมักมีโครงสร้างรองรับตนเองหรืออาจวางบนโต๊ะหรือแท่นที่แข็งแรง ส่วนประกอบของเครื่องกดอัดโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่

2.14 แผ่นฐานโลหะทำหน้าที่รองรับแท่นวางด้านล่างและแท่งไกด์ (สไลด์) สีสันซึ่งช่วยให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยระบบไฮดรอลิกส์ ซึ่งแผ่นรองด้านล่างถูกทำให้ร้อนได้หลายวิธี โดยทั่วไปคือใช้เครื่องทำความร้อน น้ำมันร้อน หรือไอน้ำ อีกหนึ่งระบบที่สำคัญคือระบบติดชิ้นส่วนที่ประกอบด้วยหมุดติดที่เชื่อมต่อกับแผ่นติด จากรูปที่ 2.14 ด้านบนของรูปจะมีหน่วยไฮดรอลิกซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วยลูกสูบไฮดรอลิกหรือแรม (ram) การทำงานของแรม อาจเป็นแบบแมนนวล (บีบด้วยมือ) กิ่งอัตโนมัติ (เปิดวาล์วที่จ่ายแรงดัน) หรืออัตโนมัติ (ควบคุมด้วยตัวจับเวลา)

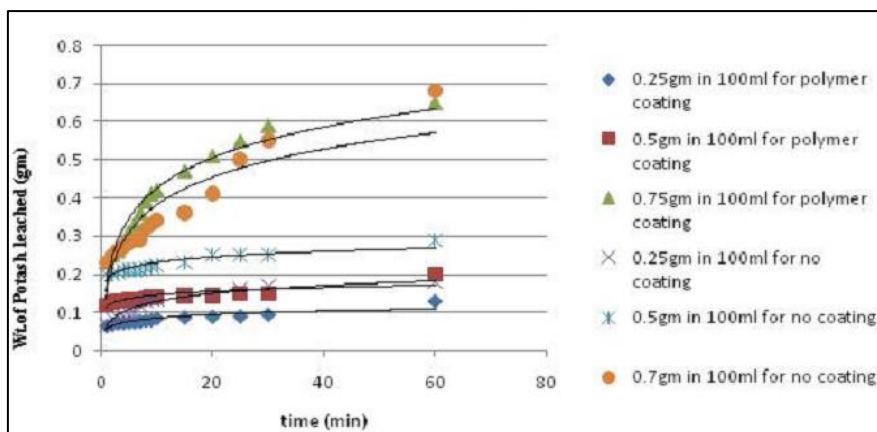


รูปที่ 2.14 แผนผังส่วนประกอบหลักของเครื่องกดอัดแบบทั่วไป [22]

## 2.2 การทบทวนวรรณกรรม

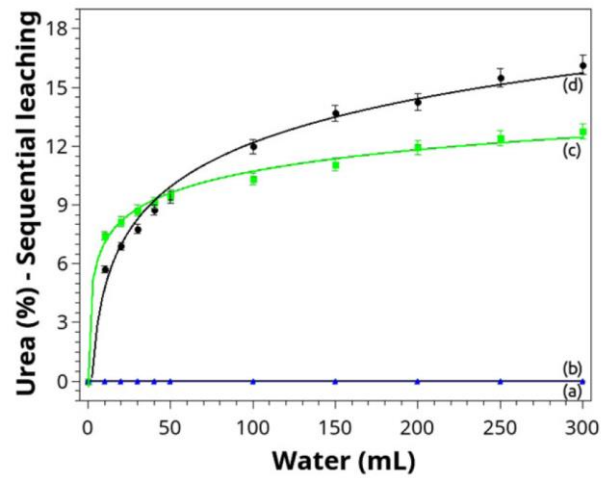
จากงานวิจัยของ Subbarao และคณะ [23] ทำการเตรียมปุ๋ยโพแทสเซียมแร่ดินเหนียว (clay) ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้คือพอลิอะคริลาไมด์ (polyacrylamide) ซึ่งถูกเตรียมในรูปแบบของเม็ดทรงกระบอก วิธีการเตรียมคือในขั้นแรก นำปุ๋ยโพแทสเซียมผสมกับแร่ดินเหนียวเปียก จากนั้นขึ้นรูปให้เป็นทรงกระบอกโดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอก ทั้งเม็ดปุ๋ยทรงกระบอกไว้ให้เย็น ขั้นตอนถัดไปนำเม็ดปุ๋ยที่แห้งแล้วไปเคลือบด้วยยาสีฟัน เนื่องจากในยาสีฟันจะมีแคลเซียมอยู่ ซึ่งแคลเซียมจะทำหน้าที่เป็นสารอาหารทุติยภูมิแก่ดิน หลังจากนั้นนำเม็ดปุ๋ยนี้ไปทำการจุ่มลงในพอลิอะคริลาไมด์ เมื่อเตรียมเม็ดปุ๋ยทรงกระบอกเคลือบพอลิอะคริลาไมด์แล้ว จึงทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณปุ๋ย ปริมาณน้ำที่ใช้ชะรอบ ๆ เม็ดปุ๋ยและเวลาที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยที่สมบูรณ์ ซึ่งการทดสอบทั้งหมดจะใช้การวัดค่าการนำไฟฟ้าเพื่อหาการละลายของปุ๋ยโพแทสเซียมในน้ำ จากผลการศึกษาที่น่าสนใจซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.15 พบว่าปริมาณของปุ๋ยที่ลดลงจะส่งผลให้การปลดปล่อยปุ๋ยลดลง และเม็ดปุ๋ยที่ถูกเคลือบจะทำให้อัตราการปลดปล่อยปุ๋ยช้ากว่าเม็ดปุ๋ยที่ไม่ทำการเคลือบ





รูปที่ 2.15 อัตราการละลายของปุ๋ยโพแทสที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยพอลิอะคริลาไมด์ในน้ำ 100 mL [23]

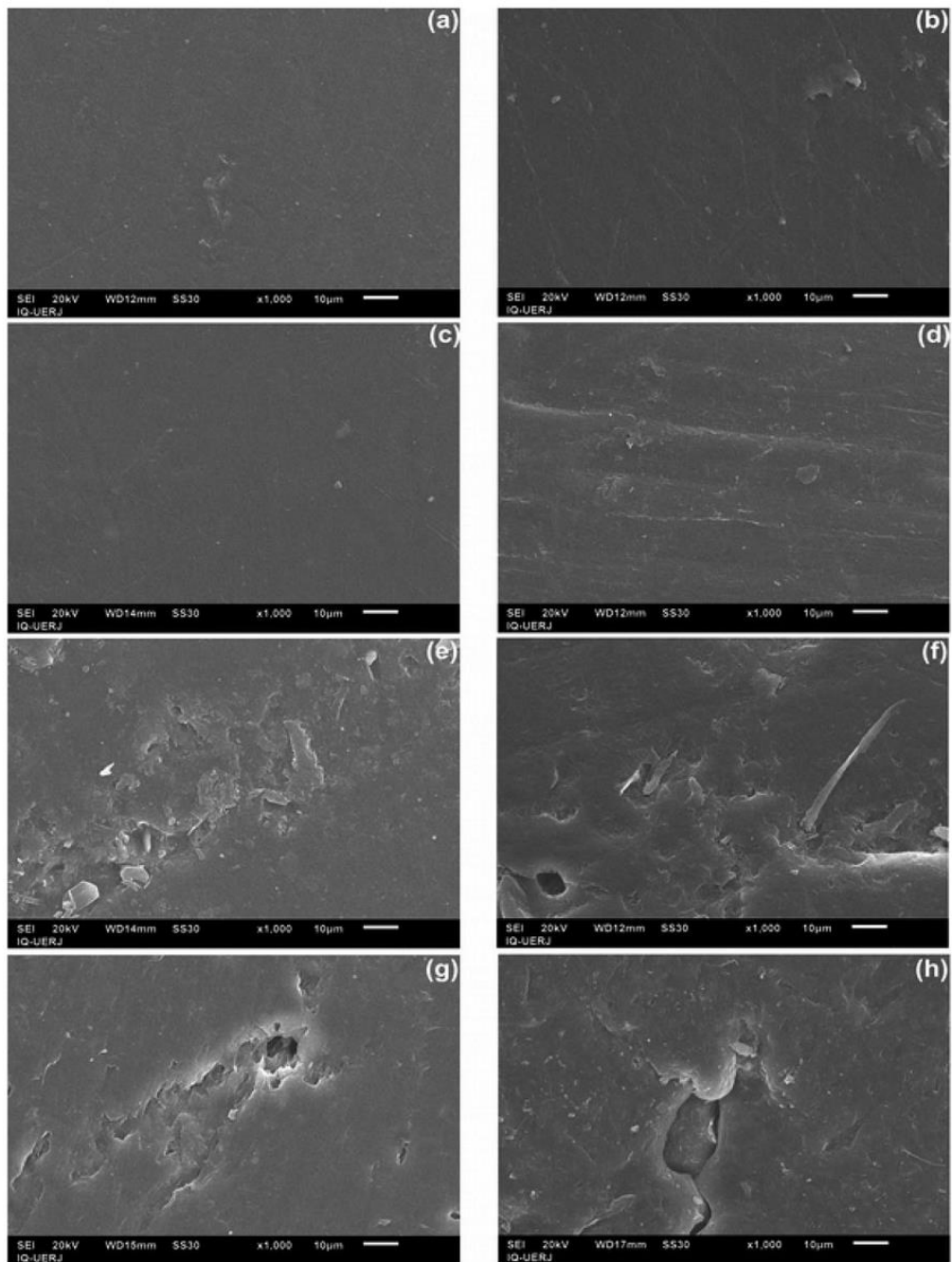
Baldanza และคณะ [3] ได้ทำการเตรียมและพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุคอมพอสิต PBS/Urea/MMT ซึ่งเตรียมจากกระบวนการผสมหลอมเหลวโดยใส่ยูเรีย 30%wt และแรมอนท์มอริลโลไนท์ 5%wt วัสดุที่ได้จะถูกพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยวิธีต่าง ๆ รวมทั้งการทดสอบการปลดปล่อยของยูเรียและการวิเคราะห์การเติบโตของผักกาดหอม โดยผลการทดสอบที่น่าสนใจคือ จากรูปที่ 2.16 เป็นผลการทดสอบ Sequential leaching ซึ่งเป็นการทดสอบการปลดปล่อยยูเรีย จะพบว่าวัสดุคอมพอสิต PBS/30Urea/5MMT มีความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียดีที่สุด รองลงมาคือ PBS/30U ซึ่งระบบที่ไม่ใส่ MMT เพราะเกิดการกระจายตัวที่ดีของ MMT ในเมทริกซ์ ซึ่งส่งผลให้การควบคุมการปลดปล่อยเป็นไปตามโหมดการปลดปล่อยช้า นอกจากนี้ยังได้มีการทำ SEM ก่อนและหลังทำการทดสอบการชะด้วยน้ำซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.17 จะพบว่าหลังทำการชะวัสดุคอมพอสิตด้วยน้ำ วัสดุคอมพอสิตที่มียูเรียเป็นส่วนประกอบนั้นจะเกิดช่องว่างและความขรุขระบนผิวของวัสดุคอมพอสิต ซึ่งเกิดจากการที่ยูเรียที่อยู่ในวัสดุคอมพอสิตถูกน้ำชะออกไปจึงทำให้เกิดช่องว่าง จากการทดลองการวิเคราะห์การเติบโตของผักกาดหอมซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2.1 พบว่าสูตร PBS/30U สามารถทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของผักกาดหอมเพิ่มขึ้น 59% เมื่อเทียบกับตัวควบคุมที่ไม่ใส่สารใด ๆ แก่ดินที่ใช้ปลูกผักกาดหอมและทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของผักกาดหอมเพิ่มขึ้น 12% เมื่อเทียบกับยูเรียที่ใช้โดยทั่วไป ส่วนคอมพอสิต PBS/30Urea/5MMT จะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของผักกาดหอมเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับ PBS/30U แต่ความยาวของก้านมากกว่าจึงเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในการปรับปรุงยูเรีย



รูปที่ 2.16 ยูเรียที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากการทดสอบการชะแบบลำดับของชิ้นงานตัวอย่าง (a) PBS, (b) PBS5C, (c) PBS30U และ (d) PBS30U5C [3]

ตารางที่ 2.1 เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวและความยาวก้านเฉลี่ยของผักกาดหอม [3]

Sample	Identification code	Head diameter (cm)	Stem length (cm)
Control	T0	21.33a	1.87a
PBS	T1	22.33b	2.63b
PBS30U	T2	36.00c	3.80c
PBS5C	T3	27.33d	2.63d
PBS30U5C	T4	35.67e	4.27e
Urea	T5	31.67f	4.07f



รูปที่ 2.17 รูป SEM ของชิ้นงานตัวอย่าง (a,b) PBS, (c,d) PBS30U, และ (g,h) PBS30U5C (ช้่าย) ก่อนและ (ขวา) หลังการชะด้วยน้ำ [3]

Daitx และคณะ [24] ได้ทำการเตรียมและศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย NPK ของระบบสองระบบได้แก่ ระบบแรกคือ พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรท (poly(hydroxybutyrate); PHB) ผสมกับปุ๋ย NPK โดยตรง และระบบที่สองคือจะนำปุ๋ย NPK ไปแทรกกระหว่างชั้นของเบนโทไนท์

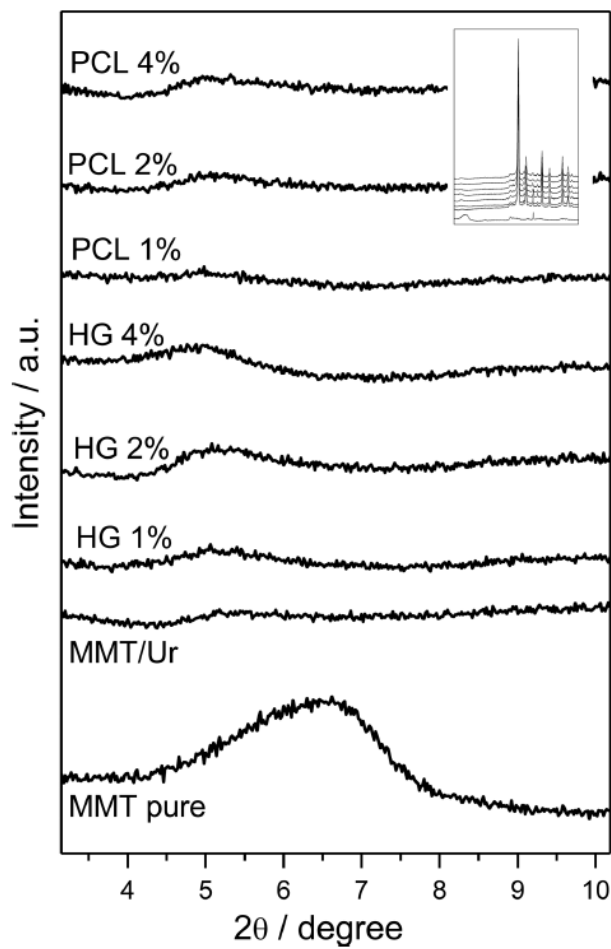
(bentonite) ก่อนโดยใช้วิธี Cation exchange แล้วนำไปผสมกับ PHB ซึ่งระบบที่สองต่างจากระบบแรกเนื่องจากมีทั้ง PHB และเบนโทไนท์ที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยได้ โดยทั้งสองระบบจะใช้กระบวนการผสมแบบหลอมเหลว จากนั้นนำไปทดสอบการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย สมบัติเชิงกลแบบพลวัตและสมบัติทางความร้อน โดยจากตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นผลการทดสอบการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยพบว่า ระบบ PHB/NPK จะสามารถลดปริมาณการปลดปล่อย NPK ออกมาใน 24 ชั่วโมงแรกเมื่อเทียบกับ NPK อิสระที่ไม่ได้ทำการผสมกับพอลิเมอร์ และในกรณีนี้ การปลดปล่อยจะเริ่มคงที่ที่ 168 ชั่วโมงและที่ 240 ชั่วโมงซึ่งเป็นเวลาสิ้นสุดการทดลองพบว่าการปลดปล่อย NPK เพียง 37% แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมการปลดปล่อย NPK โดยใช้ระบบนี้ได้ ส่วนระบบที่สองพบว่า การควบคุมการปลดปล่อย NPK จะควบคุมได้ดีกว่าระบบแรกที่ใช้ NPK ไปโดยตรงเนื่องจากอันตรกิริยาที่ดีกว่าของ PHB และเบนโทไนท์

ตารางที่ 2.2 ปริมาณของ active compounds ที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อเทียบกับ NPK อิสระ [25]

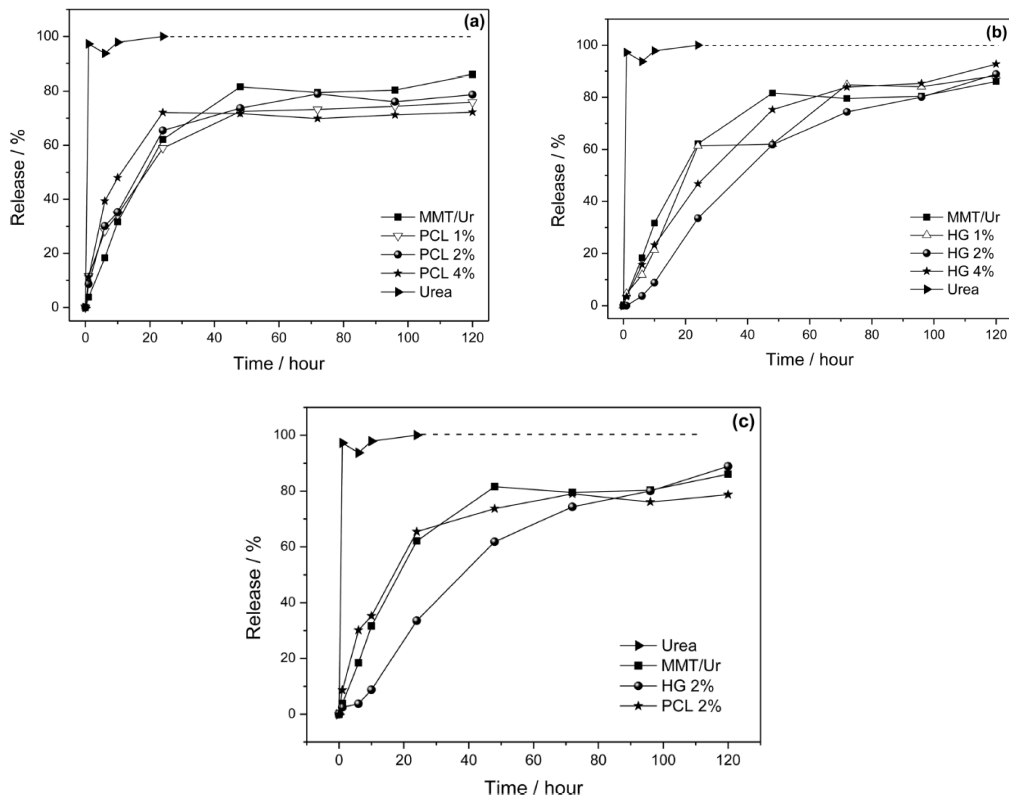
Compounds		Active Compounds Released, %	
PHB/NPK, %	PHB/m-Bent, %	24 h	240 h
95/5	-	19	37
90/10	-	29	52
80/20	-	33	53
-	0/3	43	66
-	97/3	7	8
-	0/5	44	70
-	95/5	6	9
-	0/15	43	67
-	85/15	4	11

Pereira และคณะ [26] ทำการเตรียมคอมพอสิตจากพอลิเมอร์ ยูเรีย และแรมอนต์มอริลโลไนต์ โดยพอลิเมอร์ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้จะใช้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic polymer) และพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymer) คือพอลิคาโพรแลคโตน (poly(caprolactone); PCL) และพอลิอะคลิลาไมด์ ไฮโดรเจล (HG) ตามลำดับ ทำการเตรียมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนคู่ (twin-screw extruder) ที่ความเร็วรอบ 120 rpm อุณหภูมิ 40 °C โดยขึ้นรูปเป็นเม็ดที่มีความรัศมีโดยประมาณ 3 มิลลิเมตร และยาว 5 มิลลิเมตร อัตราส่วนโดยมวลระหว่างแรมอนต์มอริลโลไนต์ : ยูเรีย คือ 1 : 4 ส่วนมวลของพอลิเมอร์เท่ากับ 1 2 และ 4% โดยเทียบกับมวลรวมทั้งหมด จากการทดสอบเม็ดคอมพอสิตด้วยเทคนิค XRD ซึ่งผลการทดสอบแสดงดัง

รูปที่ 2.18 พบว่าตำแหน่งของพีกเอกลักษณ์ของแรมอนต์มอริสโลไนต์จะเลื่อนไปที่มุมต่ำลงในคอมพอสิตทุกสูตร พร้อมทั้งความเข้มของพีกเกิดการลดลงด้วย ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถคาดการณ์ได้ว่าชั้นของแรมอนต์มอริสโลไนต์สามารถเกิดการแยกออกกันได้หลังจากผ่านกระบวนการอัดรีดผสมกับยูเรียและพอลิเมอร์ นอกเหนือจากนี้ ผู้วิจัยทำการทดสอบการปลดปล่อยยูเรียในน้ำ โดยเตรียมพีกเกอร์ที่มีเม็ดคอมพอสิตแช่อยู่ในน้ำ ทำการกวาดจากภายนอกเพื่อให้มั่นใจว่ายูเรียที่วัดในตัวกลางที่เป็นของเหลวจะสัมพันธ์กับการแพร่จากจุดศูนย์กลางและไม่ได้เกิดจากการกระทำทางกลของเครื่องกวน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแล้วนำไปทดสอบโดยใช้เทคนิค UV-vis spectrophotometry ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.19 พบว่าคอมพอสิตที่ทำมาจาก HG แสดงจลนศาสตร์การปลดปล่อยที่ช้ากว่าคอมพอสิตสูตรอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 50 ชั่วโมงแรกระหว่างช่วงการบวมตัวของเม็ดปุ๋ยซึ่งแสดงออกมาในรูปแบบของความชันของกราฟในรูปที่ 2.19 (c) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (HG) สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำที่จะเข้ามาละลายยูเรียทำให้น้ำเข้าไปถึงยูเรียได้น้อยลง ในขณะที่คอมพอสิตที่เตรียมด้วย PCL จะมีอัตราการปลดปล่อยยูเรียที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 2.19 (a) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า PCL มีอันตรกิริยาน้อยมากกับแรมอนต์มอริสโลไนต์และยูเรีย เมื่อเปรียบเทียบกับ HG ซึ่งพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ ทำให้ HG มีอันตรกิริยาทางเคมีกับแรมอนต์มอริสโลไนต์และยูเรียที่ดีกว่า PCL เพราะทั้งแรมอนต์มอริสโลไนต์และยูเรียมีสมบัติชอบน้ำทั้งคู่ นอกเหนือจากพอลิเมอร์แล้ว แรมอนต์มอริสโลไนต์ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลการปลดปล่อยยูเรียคือ แรมอนต์มอริสโลไนต์จะไปทำหน้าที่เป็นตัวขวางกั้นทางกายภาพซึ่งจะคอยป้องกันน้ำไม่ให้เข้ามาละลายยูเรียออกไป



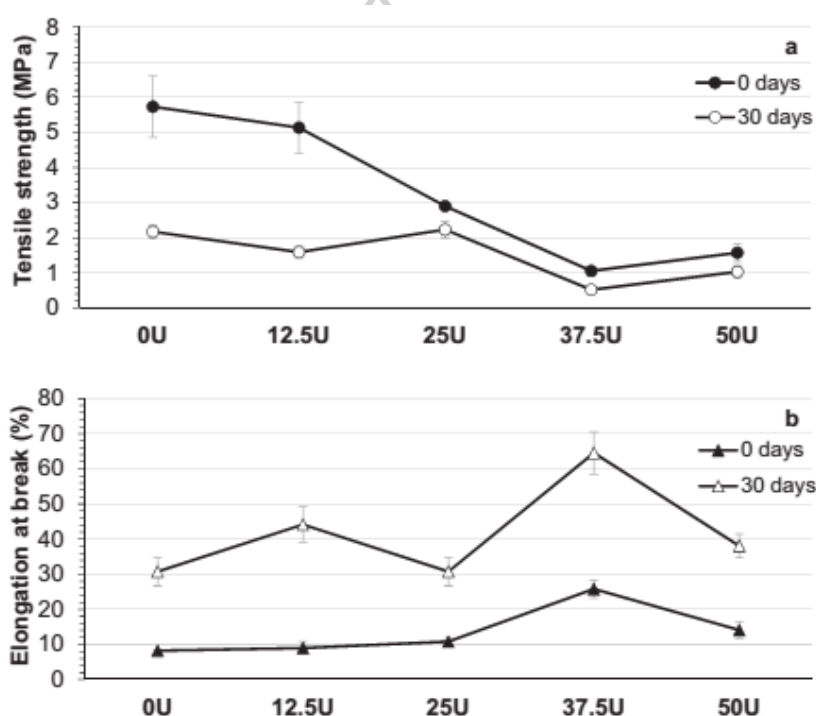
รูปที่ 2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแรมอนต์มอริลโลไนต์ และคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์กับแรมอนต์มอริลโลไนต์ [26]



รูปที่ 2.19 อัตราการปลดปล่อยยูเรียของ MMT/Ur และนาโนคอมพอสิตที่เตรียมจาก (a) HG (b) PCL และ (c) การเปรียบเทียบระหว่างนาโนคอมพอสิตทั้งสามชนิด [26]

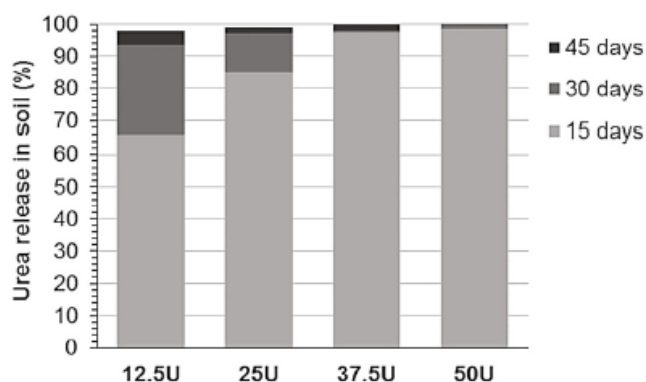
Versino และคณะ [25] เตรียมฟิล์มที่มีเมทริกซ์เป็นแป้งจากมันสำปะหลัง (cassava starch) ซึ่งใช้อนุภาคชานอ้อยเป็นสารเสริมแรงและเติมยูเรียในช่วง 0 ถึง 50 %wt ของแป้ง ทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยใช้การหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย (solvent casting) โดยใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำ แล้วจึงทำการพิสูจน์เอกลักษณ์และศึกษาเกี่ยวกับอัตราส่วนที่ดีที่สุด จากผลการทดสอบสมบัติการดึงยืดซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.20 พบว่าการเติมยูเรีย 0 12.5 25 37.5 และ 50 %wt เข้าไปในฟิล์มจะทำให้ค่า Tensile strength ลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมยูเรีย เมื่อเติมยูเรียลงไปจะทำให้ค่า Elongation at break เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมยูเรีย โดยค่าที่สูงที่สุดจะได้มาจากการเติมยูเรีย 37.5%wt และจากรูปที่ 2.21 ซึ่งเป็นผลการทดสอบการปลดปล่อยยูเรียในดิน โดยการทดสอบทำได้โดยการนำฟิล์มไปฝังไว้ในดินที่มีสถานะตามมาตรฐาน ASTM D5988-0319 จากนั้นทำการวัดปริมาณยูเรียที่เหลืออยู่ในฟิล์มเมื่อเวลาผ่านไป 15 30 และ 45 วันเทียบกับปริมาณยูเรียเริ่มต้นที่มีอยู่ในฟิล์ม การวัดปริมาณยูเรียในฟิล์มจะใช้วิธี urease salicylate enzymatic method คือจะทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของอินโดฟินอล (indophenol) ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารผลิตภัณฑ์ของการไฮโดรลิซิสยูเรียด้วยเอนไซม์ยูเรสกับแอลคาไลน์ไฮโปคลอไรต์ (alkaline hypochlorite) พบว่าฟิล์มที่

เติมยูเรียลงไป 50% จะเกิดการปลดปล่อย Active compound ถึง 45% ในวันที่ 15 ของการทดสอบ หลังจากวันที่ 30 ของการทดสอบพบว่า การปลดปล่อยถูกพิจารณาว่าเกิดการปลดปล่อยเกือบสมบูรณ์โดยไม่คำนึงถึงชนิดของวัสดุแต่ละสูตร และผู้วิจัยได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับกลไกการปลดปล่อย Active compound ไว้ 3 ขั้นตอนได้แก่ ขั้นตอนแรกคือเป็นช่วงระหว่างที่แทบจะไม่มี การปลดปล่อยออกมาซึ่งขั้นนี้จะถูกเรียกว่าคาบการหน่วง (delay period) ตามด้วยขั้นการปลดปล่อยด้วยอัตราคงที่ และขั้นสุดท้ายคืออัตราการปลดปล่อยค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งจะสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างขั้นต่างๆ ได้ชัดเจนมากขึ้นถ้าเปลี่ยนเวลาที่ทดสอบให้สั้นลง



รูปที่ 2.20 ผลการทดสอบสมบัติการดึงยืด a) Tensile strength และ b) Elongation at break ของฟิล์มแป้งจากมันสำปะหลัง (cassava starch) ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคชานอ้อยและพลาสติกไซส์ ด้วยยูเรียที่ก่อน (0 days) และหลัง (30 days) การเก็บภายใต้สภาวะควบคุม [25]





รูปที่ 2.21 การปลดปล่อยยูเรียในดินจากคอมพอสิตที่ประกอบด้วยยูเรียปริมาณต่าง ๆ หลังจาก 15 30 และ 45 วัน ภายใต้สภาวะย่อยสลาย[25]

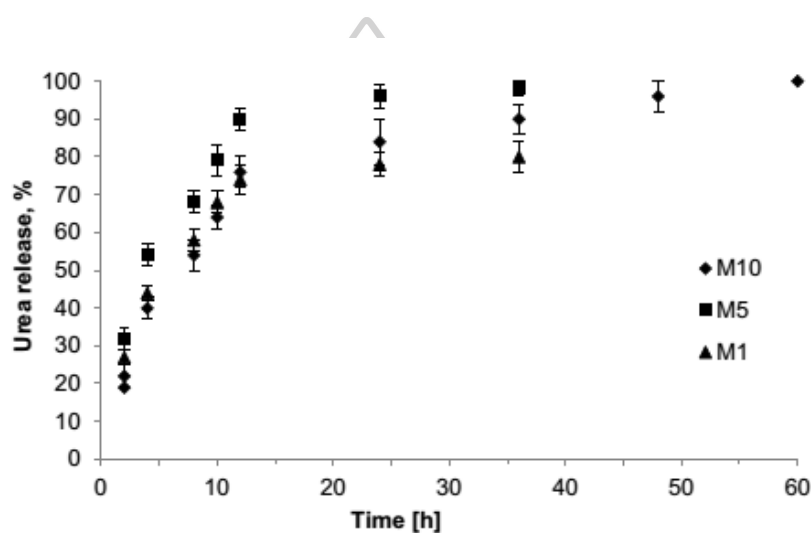
Rychter และคณะ [27] ขึ้นรูปฟิล์มแข็งมันสำปะหลังที่พลาสติกไซส์โดยยูเรียซึ่งทำหน้าที่เป็นปุ๋ยด้วย โดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว ฟิล์มที่ได้มีความหนา 1 มิลลิเมตร จากนั้นทำการศึกษาการปลดปล่อยยูเรียในน้ำ การหาค่าหน้าหนักโมเลกุลเฉลี่ย การกัดกร่อนที่ผิวหน้า และการหายไปของน้ำหนักจากการทดสอบการดึงยึดซึ่งแสดงในตารางที่ 2.3 พบว่าปริมาณยูเรียที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า % Elongation at break ของฟิล์มเพิ่มขึ้นตามปริมาณยูเรียที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า Tensile strength จะมีค่าลดลงตามปริมาณยูเรียที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นในสูตร M1 จะเกิดการเพิ่มขึ้นของค่า Tensile strength เนื่องจากผลกระทบจากการเกิดแอนติพลาสติกไซเซชัน โดยอันตรกิริยาระหว่างหมู่อะมิโนของยูเรียและหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งจะมีอิทธิพลเหนือกว่าเมื่อเทียบกับคู่หมู่ไฮดรอกซิลของน้ำและแป้ง

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบและสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังสูตรต่างๆ [27]

Samples	Starch/glycerol %	Urea wt. %	TS (MPa)	E (%)
M0	100	0	3.8 ± 0.4	148 ± 7
M1	99	1	6.3 ± 0.5	212 ± 11
M5	95	5	1.6 ± 0.2	242 ± 9
M10	90	10	1.7 ± 0.2	254 ± 13
			LSD <sub>0.05</sub> = 0.5	LSD <sub>0.05</sub> = 15

จากรูปที่ 2.22 ซึ่งเป็นผลการทดสอบการปลดปล่อยยูเรีย พบว่าฟิล์ม M1 ซึ่งมีปริมาณยูเรียน้อยที่สุดจะเกิดรูปแบบการปลดปล่อยที่ช้าอย่างคงที่ คือปลดปล่อยด้วยอัตรา 1 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง จนเกิดการปลดปล่อยไปได้ 5 มิลลิกรัมเมื่อเวลาผ่านไป 35 ชั่วโมง ส่วนฟิล์ม M5 พบว่าในช่วง 2-3 วันแรกจะมีปริมาณการปลดปล่อยยูเรียอยู่ที่ 4-6 มิลลิกรัมไปจนครบทั้งหมด 25 กรัมหลังวันที่ 35 ส่วนฟิล์มที่มีปริมาณยูเรียมากที่สุดคือ M10 ในช่วงแรกนั้นจะเกิดการปลดปล่อยยูเรียอย่างรวดเร็ว

จนถึงชั่วโมงที่ 10 หลังจากนั้นจึงเกิดรูปแบบการปลดปล่อยแบบหน่วงไปจนถึงชั่วโมงที่ 60 ซึ่งเกิดจากการที่เหลือยูเรียปริมาณน้อยลงในฟิล์ม จากกลไกการสลายตัวของแป้งคือเมื่อแช่ฟิล์มในน้ำ ฟิล์มจะเกิดการบวมตัวในน้ำในเวลาหลายชั่วโมง โดยถ้ามีปริมาณยูเรียมากจะเกิดการบวมตัวได้ง่ายขึ้น จากนั้นจึงเกิดการสลายตัวของสารตัวอย่างเนื่องจากความอ่อนไหวของทั้งแป้งและยูเรียต่อน้ำ ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ถ้านำแป้งที่ผ่านการปรับปรุงไปใช้งานในระยะยาวเพื่อควบคุมการปลดปล่อยสารเคมีทางการเกษตร จะต้องมีการศึกษาและทดลองเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเพิ่มความไม่ชอบน้ำของแป้ง



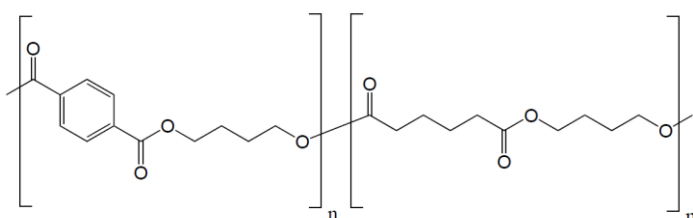
รูปที่ 2.22 การปลดปล่อยยูเรียของตัวอย่างสูตรต่างๆ [27]

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

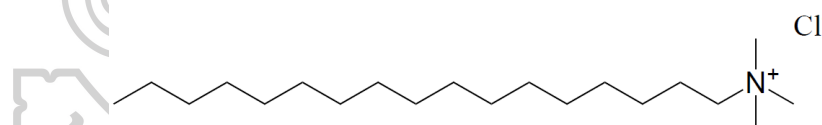
#### 3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 พอลิ บิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทเรพธาลาต (poly(butylene adipate-co-terephthalate); PBAT) เกรด Ecoflex F Blend C1200 จากบริษัท พอลิแมทส์ จำกัด ประเทศไทย



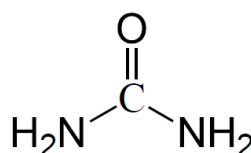
รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT

3.1.2 ออแกโนมอนท์มอริลโลไนต์ (organomontmorillonite; OMMT) ชนิด Nanomer<sup>®</sup> I.28 E ซึ่งเป็นแรมอนท์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วย Octadecyl trimethyl ammonium จากบริษัท Nanocor<sup>®</sup>, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา



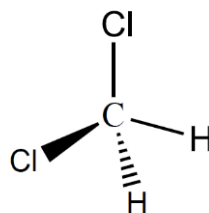
รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของ Octadecyl trimethyl ammonium

3.1.3 ยูเรีย (urea; CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O) เกรด AR จากบริษัท Better Syndicate CO., LTD. ประเทศไทย



รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของยูเรีย

3.1.4 ไดคลอโรมีเทน (dichloromethane) จาก RCI Labscan Limited ประเทศไทย



รูปที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีของไดคลอโรมีเทน

3.1.5 น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

- 3.2.1 เครื่องเขย่าตะแกรง (sieve shaker) รุ่น AS200 digit บริษัท Retsch GmbH ประเทศเยอรมนี
- 3.2.2 เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (sonicator Homogenizer) รุ่น VCX 750 บริษัท Sonic & materials, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.3 เครื่องวัดดัชนีหักเหของแสง (refractometer) รุ่น AR2 บริษัท A. KRÜSS Optronic GmbH
- 3.2.4 เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding machine) รุ่น PR1D-W300L350 จากบริษัท แล็บเทค เอนจิเนียริง จำกัด ประเทศไทย
- 3.2.5 เครื่อง QUV accelerated weathering tester รุ่น QUV/spray บริษัท Color Global Co.,Ltd ประเทศไทย
- 3.2.6 เครื่อง Fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) รุ่น Vortex บริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี
- 3.2.7 เครื่อง Universal testing machine รุ่น 5969 บริษัท Instron engineering corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.8 เครื่อง X-ray diffraction spectrometer (XRD) รุ่น Lab-X, XRD-6100 บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.9 เครื่อง X-ray diffraction spectrometer (XRD) รุ่น Aris บริษัท Malvern Panalytical ประเทศสหราชอาณาจักร
- 3.2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น TM3030 บริษัท HITACHI ประเทศญี่ปุ่น

- 3.2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น MIRA3 บริษัท TESCAN ประเทศสาธารณรัฐเช็ก
- 3.2.12 เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) บริษัท Mettler Toledo รุ่น DSC-1 STAR<sup>e</sup> System ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.2.13 เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA) บริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC-1 STAR<sup>e</sup> System ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.2.14 เครื่อง UV-vis spectrophotometer รุ่น UV-1800 บริษัท Bara Scientific Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น
- 3.2.15 เครื่อง Drop shape analysis system (DSA) รุ่น DSA MK2 บริษัท Krüss Scientific ประเทศเยอรมนี
- 3.2.16 เครื่อง Color reader รุ่น CR-10 บริษัท Konica Minolta ประเทศญี่ปุ่น

### 3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

#### 3.3.1 ตอนที่ 1 การเตรียมซีทคอมพอลิตจาก PBAT และยูเรีย และการทดสอบสมบัติ

##### 3.3.1.1 การเตรียมซีทคอมพอลิต PBAT/urea

แบ่งการเตรียมเป็น 2 ปีกเกอร์ โดยปีกเกอร์แรกจะนำยูเรียไปทำการกระจายตัวในไดคลอโรมีเทน (dichloromethane) โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic) จากเครื่อง Sonicator homogenizer และปีกเกอร์ที่สองทำการเตรียมสารละลาย PBAT โดยนำ PBAT ไปละลายในไดคลอโรมีเทนจน PBAT ละลายจนหมด หลังจากนั้นนำทั้งสองปีกเกอร์มาผสมกัน แล้วใช้คลื่นอัลตราโซนิกอีกครั้งเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของยูเรียใน PBAT โดยปริมาณของยูเรียที่ใส่ในแต่ละสูตรคือ 0-40%wt อัตราส่วนการผสมแสดงดังตารางที่ 3.1 จากนั้นนำไปกวนโดยใช้เครื่องกวนเชิงกล (mechanical stirrer) แล้วจึงนำสารละลาย PBAT ที่มียูเรียกระจายอยู่ไปขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย โดยเทสารที่ได้ลงในแม่พิมพ์ แล้วปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยออกไป จะได้ชิ้นงานอยู่ในรูปของแผ่นฟิล์ม จากนั้นนำฟิล์ม PBAT/urea ที่ได้ไปตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding machine) โดยใช้อุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 130°C และใช้ความดันในการกดอัด 1,500 psi และควบคุมเวลาในการ pre-heat อัดให้ความร้อนครั้งแรก อัดให้ความร้อนซ้ำ หล่อเย็น เป็น 6 2 4 และ 1 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการผสมซีท PBAT/urea

สูตรการผสม	ปริมาณ PBAT (%wt)	ปริมาณยูเรีย (%wt)
PBAT	100	0
PBAT/u20	80	20
PBAT/u30	70	30
PBAT/u40	60	40

### 3.3.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/urea

#### 3.3.1.2.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในซีท เตรียมตัวอย่างโดยการนำชิ้นงานซีทตัวอย่างไปแช่ในไนโตรเจนเหลวแล้วทำการหักซีทตัวอย่างภายใต้สภาวะเย็นยิ่งยวด (cryogenic fracture) จากนั้นนำซีทตัวอย่างที่ผ่านการหักแล้วไปติดกับสตัป (stub) ด้วยเทปคาร์บอนโดยหันด้านที่เกิดการแตกหักขึ้นด้านบน ส่วนที่ 2 ศึกษาลักษณะพื้นผิว เตรียมตัวอย่างโดยการนำชิ้นงานซีทตัวอย่างไปติดกับสตัปด้วยเทปคาร์บอนโดยหันด้านที่ต้องการศึกษาพื้นผิวขึ้นด้านบน เมื่อเตรียมสตัปทั้งส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 แล้วจึงนำสตัปไปทำการเคลือบด้วยทองโดยใช้เครื่อง Sputter coater ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและใช้กระแสไฟฟ้า 20 mA หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบทองแล้วไปศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ที่ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์

#### 3.3.1.2.2 การวัดความทึบแสงของซีท (sheet opacity)

เตรียมซีทขนาด 5x5 เซนติเมตร จากนั้นทำการวัดความหนาของซีท นำซีทไปทดสอบโดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่นที่ 300-800 นาโนเมตร เพื่อนำค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความทึบแสงของซีท ซึ่งความทึบแสงของซีทสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงและการส่องผ่านของแสงดังนี้ [28]

$$\text{Opacity} = \frac{\text{Abs}_{600}}{x} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\text{Abs}_{600}$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของซีทที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร  
 $x$  คือ ความหนาของซีท (มิลลิเมตร)

### 3.3.1.2.3 การศึกษาองค์ประกอบและผลึกของคอมพอลิเมอร์

การศึกษาองค์ประกอบและผลึกของซีที PBAT และซีที PBAT/urea ที่เตรียมได้จะทำการทดสอบด้วยเครื่อง X-ray diffraction spectrometer (XRD) ( $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ) โดยใช้ความต่างศักย์ 40 kV ในช่วง  $2\theta$  ที่  $10\text{-}30^\circ$  และความเร็วในการสแกนที่  $2^\circ/\text{min}$

### 3.3.1.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของซีทีคอมพอลิเมอร์ PBAT และ PBAT/urea

#### 3.3.1.3.1 การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน

นำซีที PBAT ยูเรียและซีที PBAT/urea ที่เตรียมได้แต่ละสูตรมาทำการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนโดยใช้เทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน อุณหภูมิทดสอบในช่วง  $50$  ถึง  $600^\circ\text{C}$  อัตราการให้ความร้อน  $10^\circ\text{C}/\text{min}$

#### 3.3.1.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

เป็นการทดสอบการตอบสนองต่อแรงดึงของซีที PBAT และซีที PBAT/urea ตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยใช้เครื่อง Universal testing machine ซึ่งจะทำการทดสอบชิ้นงานสูตรละ 25 ตัวอย่าง ชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีช่วงความยาวพิกัด (gauge length) 2 นิ้ว ความกว้าง 1 นิ้ว ความยาว 4 นิ้ว ใช้อัตราเร็วในการดึงชิ้นงานที่  $100 \text{ mm}/\text{min}$  เพื่อนำค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break มาวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของซีทีที่เตรียมได้

#### 3.3.1.3.3 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle)

ทำการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle) ของซีทีสูตรต่าง ๆ โดยการหยดน้ำลงบนพื้นผิว แล้วทำการถ่ายภาพ จากนั้นวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้น

#### 3.3.1.3.4 การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีที PBAT

ทำการสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน (calibration curve) โดยการเตรียมสารละลายยูเรียความเข้มข้นต่าง ๆ แล้วนำไปวัดค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index) โดยใช้เครื่องวัดการหักเหของแสง (refractometer) เพื่อนำค่าดัชนีหักเหของแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มาทำการสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นและค่าดัชนีหักเหของแสง จะได้กราฟเส้นตรงที่สามารถนำสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาหาค่าความเข้มข้นได้

ทำการหาปริมาณยูเรียที่ปลดปล่อยออกมาที่เวลาต่าง ๆ โดยการนำชิ้นงานแช่ในน้ำ และทำการวัดค่าดัชนีหักเหของแสงของน้ำในบีกเกอร์ที่ได้ ณ เวลาต่าง ๆ คือ 0 5 10 15 20 30 40 50

นาที่และ 1 2 3 6 12 24 48 72 96 120 ชั่วโมง แล้วนำค่าที่วัดได้ไปหาความเข้มข้นของยูเรียที่เวลาต่าง ๆ จากกราฟเทียบมาตรฐาน จะทำการทดสอบจนกระทั่งความเข้มข้นของยูเรียที่ถูกปลดปล่อยมีค่าคงที่

### 3.3.1.3.5 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission; WVT)

ใช้เทคนิค Cup method แบบการใช้สารดูดความชื้น (desiccant) ในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ ทำการเตรียมสารละลายอิ่มตัวของ NaCl ปริมาตร 500 ml ใน Desiccator ให้มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 75% จากนั้นเตรียมถ้วยแก้วที่ใช้ทดสอบโดยเริ่มจากตัดซีทที่ต้องการทดสอบให้มีขนาดพอดีกับปากถ้วยแก้ว โดยตัดซีทเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 นิ้ว จากนั้นใส่ซิลิกา-กาเจลที่ทำการอบแล้วน้ำหนัก 15 กรัมลงในถ้วยแก้ว แล้วปิดปากขวดแก้วด้วยซีทแล้วนำไปไว้ใน Desiccator ที่มีสารละลาย NaCl อิ่มตัว บันทึกน้ำหนักถ้วยแก้วที่มีซิลิกาเจลและปิดด้วยแผ่นซีทแล้วตอนเริ่มต้น จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักขวดแก้วทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักทุก ๆ 24 ชั่วโมง จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ ค่า WVTR สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$WVTR = \frac{\text{ความชื้นของกราฟ (y)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม}} \quad (3.2)$$

### 3.3.1.3.6 การทดสอบการทนต่อสภาพแวดล้อม (weathering testing)

ทำการทดสอบการทนต่อสภาพแวดล้อมของซีทตัวอย่างโดยใช้มาตรฐาน ASTM G154-04 ซึ่งเป็นการทดสอบโดยที่ 1 รอบการทดสอบ ประกอบด้วย UVB ที่ความยาวคลื่น 310 nm ความเข้มแสง 0.63 W/m<sup>2</sup>/nm เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วควบคุมไอน้ำควบแน่นที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการทดลองทั้งหมด 5 รอบการทดสอบ จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบนี้ไปทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโดยใช้เทคนิค SEM และการวัดสเปกตรัมเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของซีท รวมถึงเทคนิค ATR เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีขององค์ประกอบต่าง ๆ ของซีท



### 3.3.2 ตอนที่ 2 การเตรียมซีทคอมพอลิตจาก PBAT ยูเรียและ OMMT และการทดสอบสมบัติ

#### 3.3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมซีทคอมพอลิต

แบ่งการเตรียมเป็น 2 ปีกเกอร์ โดยปีกเกอร์แรกจะนำ OMMT ไปทำการกระจายตัวในไดคลอโร-มีเทนโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคจากเครื่อง Sonicator homogenizer ช่วยในการกระจายตัว และปีกเกอร์ที่สองทำการเตรียมสารละลาย PBAT โดยนำ PBAT ไปละลายในคลอโรฟอร์มจน PBAT ละลายจนหมด หลังจากนั้นนำทั้งสองปีกเกอร์มาผสมกันและทำการปั่นกวนใช้เครื่องกวนเชิงกล จากนั้นเติมยูเรียลงไปแล้วทำการ Sonicate อีกครั้งแล้วตามด้วยการปั่นกวนด้วยเครื่องกวนเชิงกล โดยปริมาณของยูเรียในแต่ละสูตรจะคงที่เท่ากับปริมาณยูเรียที่เหมาะสมที่สุดจากตอนที่ 1 และ ปริมาณของ OMMT ที่ใส่ในแต่ละสูตรคือ 0-5 phr เทียบกับปริมาณของ PBAT อัตราส่วนการผสม แสดงดังตารางที่ 3.2 แล้วจึงนำสารละลาย PBAT ที่มียูเรียและ OMMT กระจายอยู่ไปขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย โดยเทสารละลายที่ได้ลงในแม่พิมพ์ แล้วปล่อยให้ตัวทำละลาย ระเหยออกไป และได้ชิ้นงานอยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มคอมพอลิต จากนั้นนำฟิล์ม PBAT/urea/OMMT ที่ได้ไปตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding machine) โดยใช้อุณหภูมิการขึ้นรูปที่  $130^{\circ}\text{C}$  และใช้ความดันในการกดอัด 1,500 psi และควบคุม เวลาในการ pre-heat อัดให้ความร้อนครั้งแรก อัดให้ความร้อนย้ำ หล่อเย็น เป็น 6 2 4 และ 1 นาที ตามลำดับ ทำการเตรียมซีทคอมพอลิตอีกระบบหนึ่งคือ PBAT/OMMT ที่ปริมาณ OMMT ต่าง ๆ โดยใช้วิธีการเดียวกับการเตรียม PBAT/urea/OMMT เพื่อนำไปศึกษาผลของการผสม OMMT เข้าไปในซีท PBAT โดยจะใช้เป็นระบบอ้างอิงในการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบต่าง ๆ

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนการผสมซีท PBAT/urea/OMMT

สูตรการผสม	ปริมาณ PBAT (กรัม)	ปริมาณยูเรีย (กรัม)	ปริมาณ OMMT (phr)	ปริมาณ OMMT (กรัม)
PBAT/O1	100	0	1	1
PBAT/O3	100	0	3	3
PBAT/O5	100	0	5	5
PBAT/ux/O1	$100 - x$	$x$	1	$(100 - x)(0.01)$
PBAT/ux/O3	$100 - x$	$x$	3	$(100 - x)(0.03)$
PBAT/ux/O5	$100 - x$	$x$	5	$(100 - x)(0.05)$

\*หมายเหตุ: x คือ ปริมาณยูเรียในซีท PBAT/urea สูตรที่เหมาะสมจากตอนที่ 1

### 3.3.2.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ซีทคอมพอลิต PBAT/OMMT และซีท

#### PBAT/urea/OMMT

##### 3.3.2.2.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในซีท เตรียมตัวอย่างโดยการนำชิ้นงานซีทตัวอย่างไปแช่ในไนโตรเจนเหลวแล้วทำการหักซีทตัวอย่างภายใต้สภาวะเย็นยิ่งยวด (cryogenic fracture) จากนั้นนำซีทตัวอย่างที่ผ่านการหักแล้วไปติดกับสตัป (stub) ด้วยเทปคาร์บอนโดยหันด้านที่เกิดการแตกหักขึ้นด้านบน ส่วนที่ 2 ศึกษาลักษณะพื้นผิว เตรียมตัวอย่างโดยการนำชิ้นงานซีทตัวอย่างไปติดกับสตัปด้วยเทปคาร์บอนโดยหันด้านที่ต้องการศึกษาพื้นผิวขึ้นด้านบน เมื่อเตรียมสตัปทั้งส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 แล้วจึงนำสตัปไปทำการเคลือบด้วยทองโดยใช้เครื่อง Sputter coater ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและใช้กระแสไฟฟ้า 20 mA หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบทองแล้วไปศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ที่ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์

##### 3.3.2.2.2 การวัดความทึบแสงของซีท (sheet opacity)

เตรียมซีทขนาด 5x5 เซนติเมตร จากนั้นทำการวัดความหนาของซีท นำซีทไปทดสอบโดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่นที่ 300-800 นาโนเมตร เพื่อนำค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความทึบแสงของซีท ซึ่งความทึบแสงของซีทสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงและการส่องผ่านของแสงดังนี้ [28]

$$\text{Opacity} = \frac{\text{Abs}_{600}}{x} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\text{Abs}_{600}$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของซีทที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

$x$  คือ ความหนาของซีท (มิลลิเมตร)

##### 3.3.2.2.3 การศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างของคอมพอลิต

นำ PBAT ยูเรีย OMMT และซีทคอมพอลิตมาทดสอบโดยใช้เทคนิค X-ray diffraction ด้วยเครื่อง X-ray diffraction spectrometer (XRD) ( $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ) โดยใช้ความต่างศักย์ 30 kV กระแสไฟฟ้า 20 mA ทำการทดสอบในช่วง  $2\theta$  ที่  $2-10^\circ$  และความเร็วในการสแกนที่  $1^\circ/\text{min}$  ซึ่งสามารถคำนวณหาระยะห่างของชั้น OMMT ได้โดยใช้สมการของ Bragg's equation ดังสมการ

$$n\lambda = 2d(\sin\theta) \quad (3.4)$$

เมื่อ	$n$	=	ระยะห่างของชั้นที่พิจารณา
	$\theta$	=	มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
	$\lambda$	=	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ( $\lambda = 0.15418$ nm ของ $\text{CuK}\alpha$ )

การศึกษาผลึกของ PBAT ในซีทคอมพอสิตฐาน PBAT จะทำการทดสอบด้วยเครื่อง X-ray diffraction spectrometer (XRD) ( $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda = 1.5418$  Å) โดยใช้ความต่างศักย์ 40 kV ในช่วง  $2\theta$  ที่  $10-30^\circ$  และความเร็วในการสแกนที่  $2^\circ/\text{min}$  เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (degree of crystallinity;  $X_c$ ) ของ PBAT สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$X_c = \frac{\sum A_{\text{Crystal}}}{\sum A_{\text{Crystal}} + \sum A_{\text{Amorphous}}} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ	$A_{\text{Crystal}}$	คือ	พื้นที่ใต้พีคส่วนที่เป็นผลึก
	$A_{\text{Amorphous}}$	คือ	พื้นที่ใต้พีคส่วนที่เป็นอสัณฐาน [29]

### 3.3.2.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/urea/OMMT

#### 3.3.2.3.1 การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน

นำ OMMT และซีทคอมพอสิตที่เตรียมได้แต่ละสูตรมาทำการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนโดยใช้เทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน อุณหภูมิทดสอบในช่วง  $50 - 500^\circ\text{C}$  อัตราการให้ความร้อน  $10^\circ\text{C}/\text{min}$

#### 3.3.2.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

เป็นการทดสอบการตอบสนองต่อแรงดึงของซีท PBAT/OMMT และซีท PBAT/urea/OMMT ตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยใช้เครื่อง Universal testing machine ซึ่งจะทำการศึกษาชิ้นงานสูตรละ 25 ตัวอย่าง ชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีช่วงความยาวพิกัด (gauge length) 2 นิ้ว ความกว้าง 1 นิ้ว ความยาว 4 นิ้ว ใช้อัตราเร็วในการดึงชิ้นงานที่  $100$  mm/min เพื่อนำค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break มาวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของซีทที่เตรียมได้

### 3.3.2.3.3 การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอลิเมอร์

ทำการสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน (calibration curve) โดยการเตรียมสารละลายยูเรียความเข้มข้นต่าง ๆ แล้วนำไปวัดค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index) โดยใช้เครื่องวัดการหักเหของแสง (refractometer) เพื่อนำค่าดัชนีหักเหของแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มาทำการสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นและค่าดัชนีหักเหของแสง จะได้กราฟเส้นตรงที่สามารถนำสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาหาค่าความเข้มข้นได้

ทำการหาปริมาณยูเรียที่ปลดปล่อยออกมาที่เวลาต่าง ๆ โดยการนำชิ้นงานแช่ในน้ำ และทำการวัดค่าดัชนีหักเหของแสงของน้ำในปิเกตอร์ที่ได้ ณ เวลาต่าง ๆ คือ 0 5 10 15 20 30 40 50 นาที และ 1 2 3 6 12 24 48 72 96 120 ชั่วโมง แล้วนำค่าที่วัดได้ไปหาความเข้มข้นของยูเรียที่เวลาต่าง ๆ จากกราฟเทียบมาตรฐาน จะทำการทดสอบจนกระทั่งความเข้มข้นของยูเรียที่ถูกปลดปล่อยมีค่าคงที่

### 3.3.2.3.4 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission)

ใช้เทคนิค Cup method แบบการใช้สารดูดความชื้น (desiccant) ในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ ทำการเตรียมสารละลายอิ่มตัวของ NaCl ปริมาตร 500 ml ใน Desiccator ให้มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 75% จากนั้นเตรียมถ้วยแก้วที่ใช้ทดสอบโดยเริ่มจากตัดซีทที่ต้องการทดสอบให้มีขนาดพอดีกับปากถ้วยแก้ว โดยตัดซีทเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 นิ้ว จากนั้นใส่ซิลิกาเจลที่ทำการอบแล้วน้ำหนัก 15 กรัมลงในถ้วยแก้ว แล้วปิดปากขวดแก้วด้วยซีทแล้วนำไปไว้ใน desiccator ที่มีสารละลาย NaCl อิ่มตัว บันทึกน้ำหนักถ้วยแก้วที่มีซิลิกาเจลและปิดด้วยแผ่นซีทแล้วตอนเริ่มต้น จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักขวดแก้วทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 9 ชั่วโมง จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักทุกๆ 24 ชั่วโมง จนกว่าน้ำหนักจะคงที่

$$WVTR = \frac{\text{ความชื้นของกราฟ (y)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม}} \quad (3.6)$$

### 3.3.2.3.5 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle)

ทำการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle) ของซีทสูตรต่างๆ โดยการหยดน้ำลงบนพื้นผิว แล้วทำการถ่ายภาพ จากนั้นวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้น

### 3.3.2.3.6 การทดสอบการทนต่อสภาพแวดล้อม (weathering testing)

ทำการทดสอบการทนต่อสภาพแวดล้อมของซีทคอมพอลิเมอร์โดยใช้มาตรฐาน ASTM G154-04 ซึ่งเป็นการทดสอบโดยที่ 1 รอบการทดสอบ ประกอบด้วย UVB ที่ความยาวคลื่น 310 nm ความเข้มแสง  $0.63 \text{ W/m}^2/\text{nm}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วควบคุมไอน้ำควบแน่นที่อุณหภูมิ  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการทดลองทั้งหมด 5 รอบการทดสอบ จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบนี้ไปทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโดยใช้เทคนิค และการวัดสีเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของซีท รวมถึงเทคนิค ATR เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีขององค์ประกอบต่าง ๆ ของซีท



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีความตั้งใจที่จะพัฒนาวัสดุที่ใช้ทางด้านเกษตรกรรมจากพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยมีแนวคิดที่จะนำไปใช้เป็นซีทที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยได้ ซึ่งสามารถนำเอาไปประยุกต์ใช้เป็นถุงเพาะต้นกล้า หรือวัสดุคลุมหน้าดินได้ จึงนำ PBAT ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาผสมกับปุ๋ยไนโตรเจนชนิดปุ๋ยยูเรีย นอกจากนี้ยังมีการผสมแร่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงแล้วหรือ Organomontmorillonite (OMMT) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวขวางกั้นการแพร่ของน้ำเข้าไปในซีท และขวางกั้นการแพร่ออกของยูเรีย แล้วนำซีทคอมพอสิต PBAT/urea และ PBAT/urea/OMMT ที่ได้ไปทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ คือ สัณฐานวิทยา องค์ประกอบและโครงสร้างของคอมพอสิต สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล การควบคุมการปลดปล่อยยูเรีย สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ และการทนต่อสภาพแวดล้อม โดยในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอนได้แก่

ตอนที่ 1 การเตรียมซีทคอมพอสิตจาก PBAT และยูเรีย และการทดสอบสมบัติ

ตอนที่ 2 การเตรียมซีทคอมพอสิต PBAT ยูเรียและ OMMT และการทดสอบสมบัติ

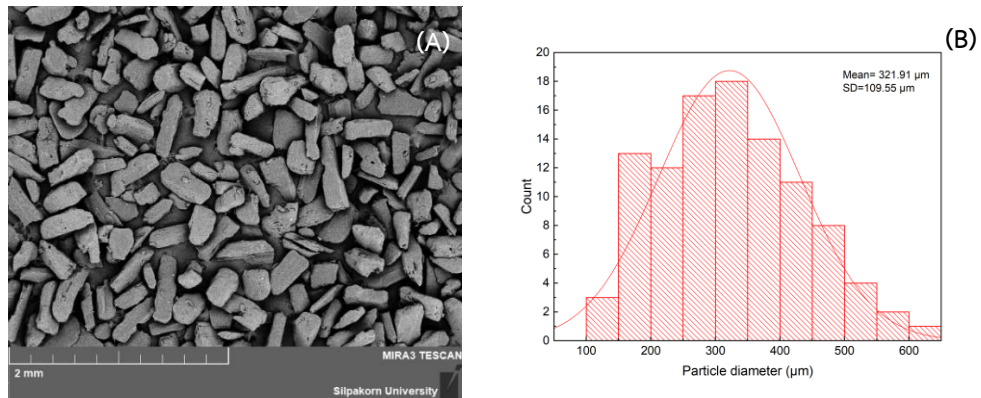
#### 4.1 ตอนที่ 1 การเตรียมซีทคอมพอสิตจาก PBAT และยูเรีย และการทดสอบสมบัติ

ในตอนที่ 1 เตรียมซีทคอมพอสิตจาก PBAT และยูเรีย โดยปริมาณของยูเรียที่ผสมในแต่ละสูตรคือ 20 30 และ 40 %wt ทำการขึ้นรูปผ่าน 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย (solvent casting) และจากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปทำการขึ้นรูปต่อในขั้นตอนที่สอง โดยจะขึ้นรูปซีทด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding) แล้วนำซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ได้ไปทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ คือ สัณฐานวิทยา องค์ประกอบและโครงสร้างของคอมพอสิต สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล การควบคุมการปลดปล่อยยูเรีย สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ และการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลอง

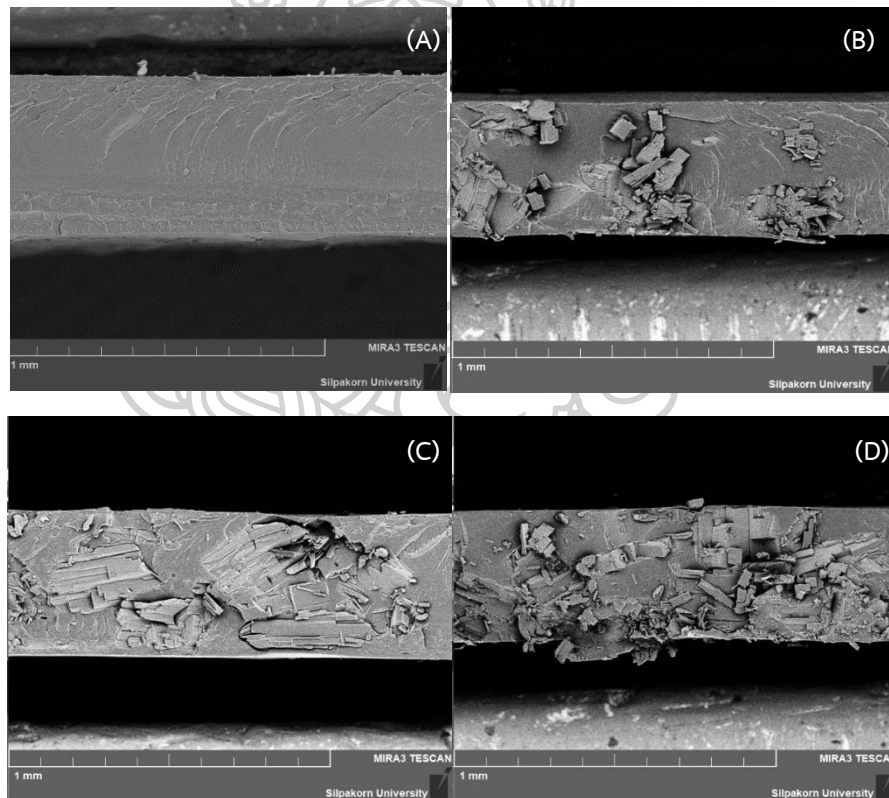
##### 4.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ซีทคอมพอสิต PBAT/urea

###### 4.1.1.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา

จากรูปที่ 4.1 (A) ซึ่งเป็นรูป FE-SEM ของผงยูเรียที่ได้มาจากการคัดแยกขนาดด้วยเครื่อง Sieve shaker พบว่าอนุภาคของยูเรียมีรูปร่างหลายแบบ จึงได้ทำการวัดขนาดอนุภาคเพื่อนำไปศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค โดยผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 (B) พบว่าเมื่อใช้ Normal curve fitting ซึ่งแสดงดังเส้นทึบสีแดง อนุภาคยูเรียที่ผ่านการแยกขนาดมีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคเท่ากับ  $321.91 \pm 109.55$  ไมโครเมตร



รูปที่ 4.1 (A) รูป FE-SEM ของยูเรียที่กำลังขยาย 50 เท่าและ (B) ฮิสโตแกรมของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคยูเรีย

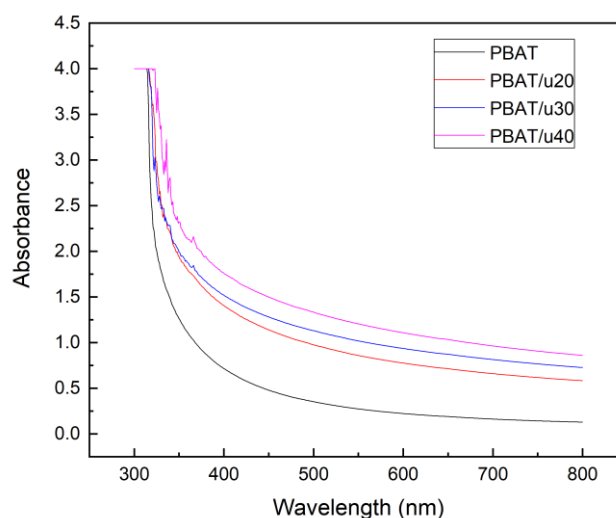


รูปที่ 4.2 รูป FE-SEM ของพื้นที่หน้าตัดของซีท (A) PBAT, (B) PBAT/u20, (C) PBAT/u30 และ (D) PBAT/u40 ที่กำลังขยาย 150 เท่า

ลักษณะวิทยาของซีทที่ขึ้นรูปได้แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นรูป FE-SEM ของพื้นที่หน้าตัดของซีท PBAT และซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรียต่าง ๆ โดยชิ้นงานที่นำมาศึกษาจะได้อามาจากการหักชิ้นงานในสภาวะเย็นยิ่งยวด (cryogenic fracture) จากรูปที่ 4.2 (A) พบว่าลักษณะ

สัณฐานวิทยาของซีท PBAT มีลักษณะที่ไม่เรียบโดยแสดงริ้วรอยขรุขระปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน บ่งบอกว่าซีท PBAT ยังแสดงพฤติกรรมที่เป็นวัสดุที่มีความเหนียว (ductile) อยู่ เมื่อพิจารณาซีทคอมพอสิต PBAT/urea พบว่ามียูเรียกระจายอยู่ใน PBAT ดังรูปที่ 4.2 (B-D) สังเกตเห็นได้ว่าบริเวณพื้นที่หน้าตัดมีลักษณะที่ขรุขระในบริเวณที่ยูเรียแทรกอยู่ในเนื้อของซีท PBAT ส่วนบริเวณที่เป็นเนื้อของ PBAT แสดงการแตกหักที่มีความเรียบเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อปริมาณยูเรียที่ผสมไปใน PBAT เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ซีทมีบริเวณที่มีลักษณะขรุขระมากขึ้น อันเนื่องมาจากยูเรียมีการรวมกลุ่มกันมากขึ้นและปรากฏให้เห็นอนุภาคของยูเรียอยู่บริเวณพื้นผิวของซีทมากขึ้น โดยปกติแล้วความเข้ากันระหว่างเมทริกซ์และฟิลเลอร์สามารถสังเกตจากการยึดติดกันระหว่างเมทริกซ์และฟิลเลอร์ ซึ่งจากการศึกษาซีทคอมพอสิต PBAT/urea พบว่า PBAT และยูเรียเข้ากันได้ไม่ดี โดยจะพบช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส PBAT และยูเรีย สาเหตุของการเข้ากันที่ไม่ดีเนื่องจาก ยูเรียเป็นสารที่มีขี้และมีความชอบน้ำมาก (hydrophilic) [30] ส่วน PBAT เป็นพอลิเมอร์ซึ่งมีขี้ต่ำ [31] และมีความชอบน้ำที่น้อยกว่ายูเรีย

#### 4.1.1.2 การทดสอบความทึบแสงของซีทคอมพอสิต



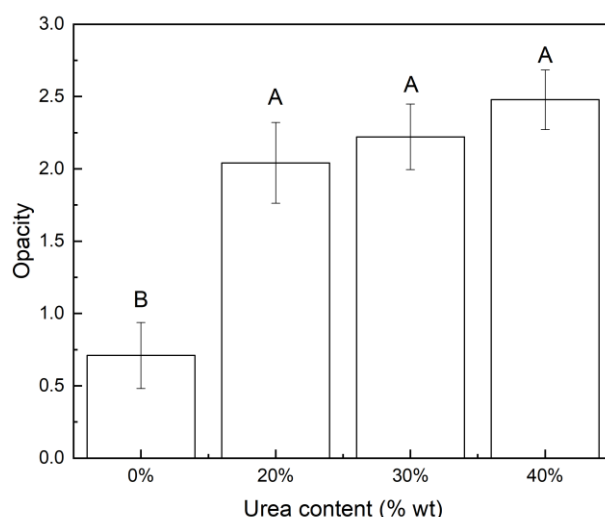
รูปที่ 4.3 UV-vis spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt



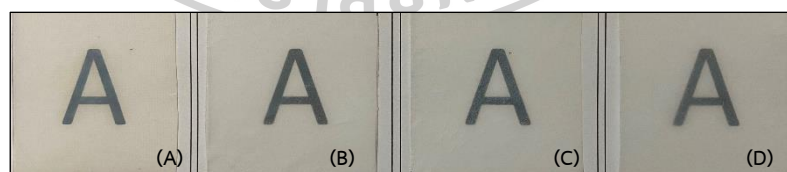
ตารางที่ 4.1 ความทึบแสง (Opacity) ของซีท PBAT และ PBAT/urea สูตรต่าง ๆ

Sample	Opacity
PBAT	0.71±0.23 <sup>B</sup>
PBAT/u20	2.04±0.28 <sup>A</sup>
PBAT/u30	2.22±0.23 <sup>A</sup>
PBAT/u40	2.48±0.21 <sup>A</sup>

\*หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )



รูปที่ 4.4 ความทึบแสงของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt



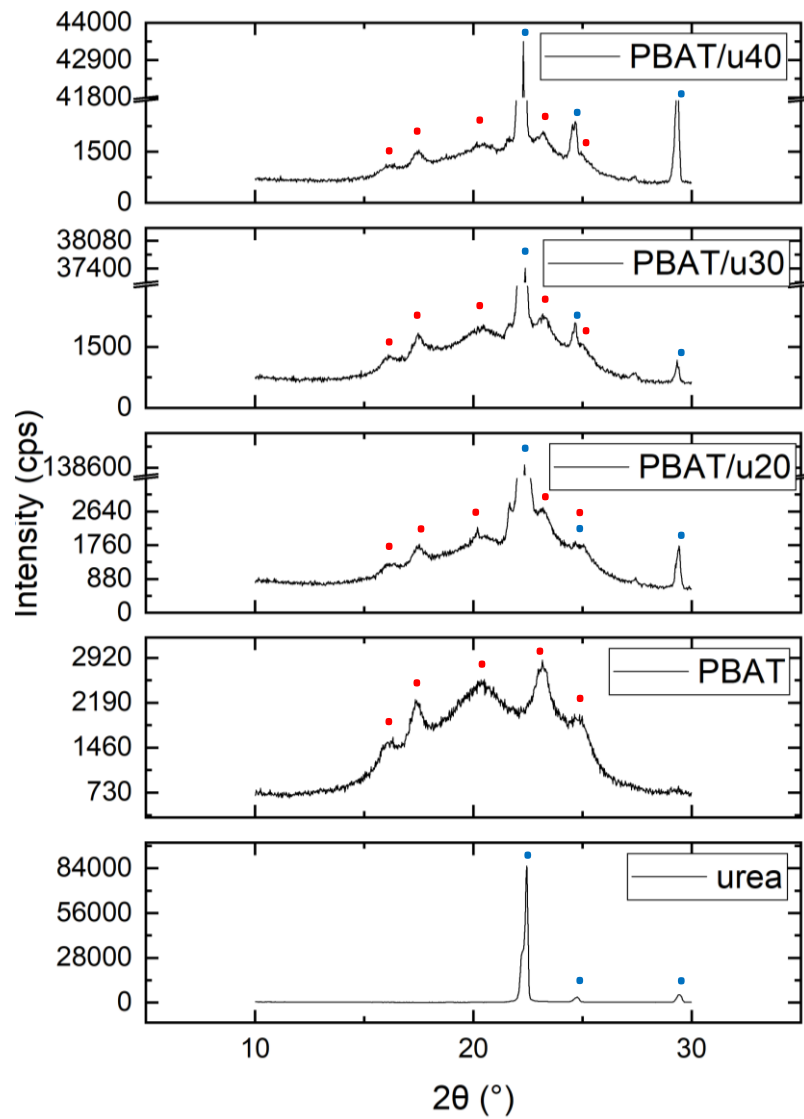
รูปที่ 4.5 ลักษณะปรากฏของซีทคอมพอสิต (a) PBAT (b) PBAT/u20 (c) PBAT/u30 และ (d) PBAT/u40

ความทึบแสงของซีทมีความสำคัญต่อการนำซีทไปประยุกต์ใช้งานเพื่อทำเป็นซีทที่ใช้งานด้านเกษตรกรรมคือ ซีทคลุมหน้าดินจะต้องมีการพิจารณาการทะลุผ่านของแสงไปยังพืชด้วย ดังนั้นจึงทำการศึกษาความทึบแสงของซีทเพื่อวิเคราะห์ว่าค่าความทึบแสงของซีท PBAT มีการเปลี่ยนแปลงไป

อย่างไรเมื่อมีการผสมยูเรียเข้าไปในซีท PBAT โดยการวัดการดูดกลืนแสงในช่วง UV-visible คือตั้งแต่ความยาวคลื่น 300–800 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร [32-34] มาคำนวณหาค่าความทึบแสงของซีท PBAT และ PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 20 30 และ 40%wt UV-vis spectra ของซีท PBAT/urea ที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยค่าความทึบแสงที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4 จากตารางพบว่า PBAT มีค่าความทึบแสงเท่ากับ  $0.71 \pm 0.23$  ส่วนซีทคอมพอสิต PBAT/u20 PBAT/u30 และ PBAT/u40 มีค่าความทึบแสงเท่ากับ  $2.04 \pm 0.28$   $2.22 \pm 0.23$  และ  $2.48 \pm 0.21$  ตามลำดับ โดยเมื่อปริมาณยูเรียเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความทึบแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่าซีท PBAT ซึ่งผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับลักษณะปรากฏของซีทที่เตรียมได้ (รูปที่ 4.5) โดยซีทจะมีลักษณะทางกายภาพที่ขาวทึบมากขึ้นตามลักษณะทางกายภาพของยูเรียที่มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวและซีทจะมีความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยูเรียเพิ่มขึ้น

#### 4.1.1.3 การศึกษาองค์ประกอบและผลึกของซีทคอมพอสิต

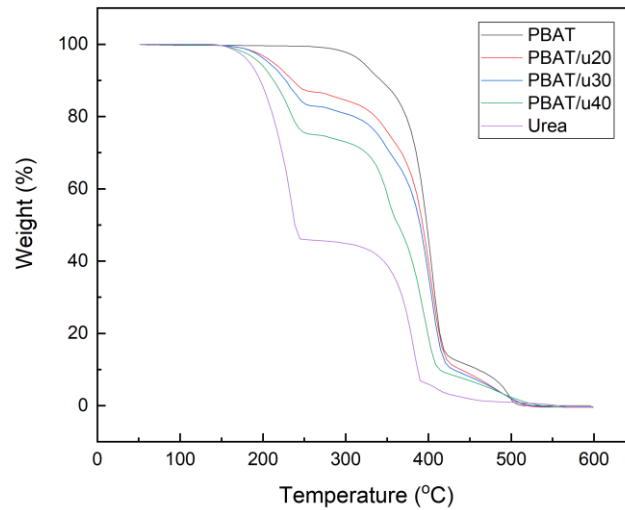
ทำการศึกษาคโครงสร้างผลึกของซีท PBAT และซีทคอมพอสิต PBAT/urea ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) จากผลการทดสอบซึ่งแสดงออกมาเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือ XRD pattern แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าในช่วงมุม  $2\theta$  ระหว่าง  $10-30^\circ$  PBAT มีรูปแบบการเลี้ยวเบนเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง  $16.31^\circ$   $17.33^\circ$   $20.35^\circ$   $23.15^\circ$  และ  $24.98^\circ$  ซึ่งจากงานวิจัยของ Xujuan Li และคณะ [29] ได้นิยามไว้ว่าพิกเอกลักษณ์เหล่านี้สอดคล้องกับระนาบ (011) (010) (110) (100) และ (111) ตามลำดับ โดยบ่งชี้ให้เห็นว่าเป็นการสะท้อนของระนาบอะตอมจากหน่วยเซลล์ระบบไตรคลินิก ซึ่งเป็นผลึก  $\alpha$ -form ของ PBAT ในขณะที่ยูเรียมีรูปแบบการเลี้ยวเบนเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง  $22.45^\circ$   $24.74^\circ$  และ  $29.47^\circ$  เมื่อทำการผสม PBAT และยูเรียเข้าด้วยกัน จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ทุกสูตรจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่คล้ายคลึงกันคือจะปรากฏพิกเอกลักษณ์ของทั้ง PBAT และยูเรียที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  ใกล้เคียงกับตำแหน่งเดิม ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าการผสมยูเรียเข้าไปใน PBAT ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกของ PBAT นอกเหนือจากนี้ ความเข้มของพิกยูเรียที่ตำแหน่ง  $22.46^\circ$  ในซีทคอมพอสิต PBAT/urea จะมีความเข้มพิกเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ PBAT/u20 PBAT/u40 และ PBAT/u30 โดยจากพิกเอกลักษณ์ของยูเรียพิกที่ตำแหน่งนี้ จะมีความเข้มพิกสูงสุด และพิกอีกตำแหน่งหนึ่งที่  $29.44^\circ$  พบว่าความเข้มพิกเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ PBAT/u40 PBAT/u20 และ PBAT/u30 จากผลการทดสอบนี้ทำให้กล่าวได้ว่าความเข้มของพิกไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณยูเรียที่ผสมเข้าไปในซีทแต่ละสูตร



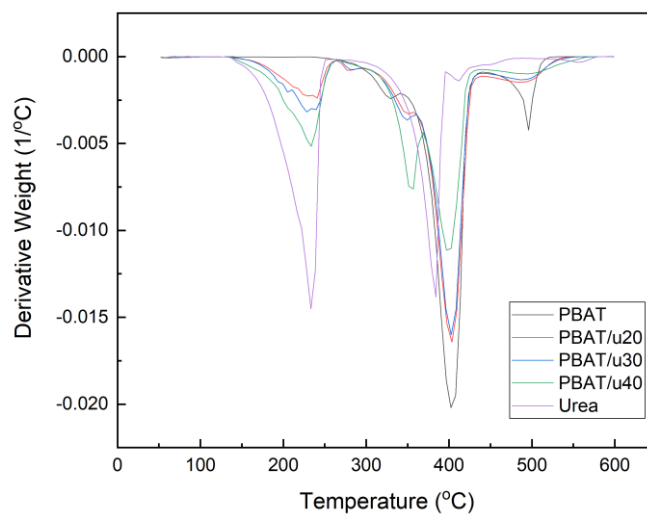
รูปที่ 4.6 XRD pattern ของซีท PBAT และ PBAT/urea สูตรต่าง ๆ ในช่วงมุม  $2\theta$  ระหว่าง  $10-30^\circ$

#### 4.1.2 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT และ PBAT/urea

##### 4.1.2.1 การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน



รูปที่ 4.7 TGA thermogram ของซีท PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน



รูปที่ 4.8 DTG thermogram ของซีท PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

**ตารางที่ 4.2** ผลการทดสอบ TGA ของซีท PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

Sample	T <sub>5%</sub> (°C)	Urea		PBAT		
		T <sub>d1</sub> (°C)	T <sub>d2</sub> (°C)	T <sub>d1</sub> (°C)	T <sub>d2</sub> (°C)	T <sub>d3</sub> (°C)
Urea	183.80	236.30	383.61	-	-	-
PBAT	320.43	-	-	327.87	403.83	496.65
PBAT/u20	212.25	240.62	-	346.48	403.68	494.20
PBAT/u30	206.61	237.12	-	346.01	403.91	493.36
PBAT/u40	195.56	234.36	-	354.03	400.63	499.06

รูปที่ 4.7 ซึ่งเป็น TGA thermogram จากการทดสอบ TGA ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน พบว่ายูเรียมีการสลายตัวทั้งหมด 4 ชั้น [35] โดยในชั้นแรกจะเป็นการสลายตัวของยูเรียได้ไบยูเรต (biuret) และแอมมีไลด์ (ammelide) ชั้นที่สองจะเป็นการสลายตัวของไบยูเรตได้กรดไซยานูริก (cyanuric acid) ชั้นที่สามเป็นการสลายตัวของกรดไซยานูริก ในขณะที่เดียวกันจะเกิดแอมมีไลด์ แอมมีลีน (ammeline) และเมลามีน (melamine) ขึ้นมา และขั้นสุดท้ายเป็นการสลายตัวของแอมมีไลด์ แอมมีลีน และเมลามีน [36] PBAT มีการสลายตัวทั้งหมด 3 ชั้นดังนี้ ชั้นแรกในช่วงอุณหภูมิ 310-327°C ชั้นที่สองในช่วงอุณหภูมิ 183-415°C และขั้นสุดท้ายในช่วงอุณหภูมิ 490-501°C [37] ส่วนซีทคอมพอสิต PBAT/u20 PBAT/u30 และ PBAT/u40 มีการสลายตัวทั้งหมด 4 ชั้น ซึ่งชั้นการสลายตัวที่เพิ่มเข้ามาเกิดจากการผสมยูเรียเข้าไป จึงทำให้มีชั้นการสลายตัวของยูเรียเพิ่มขึ้นมาจากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนจากตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจาก DTG thermogram ดังรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อพิจารณาจากอุณหภูมิที่น้ำหนักของสารหายไป 5% หรือ T<sub>5%</sub> การผสมยูเรียใน PBAT จะทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของ PBAT ต่ำลง โดยเมื่อปริมาณของยูเรียในซีทคอมพอสิต PBAT/urea ยิ่งมากขึ้น อุณหภูมิ T<sub>5%</sub> ก็จะลดลงตามปริมาณยูเรียที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการผสมยูเรียซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำกว่า PBAT เข้าไปในเมทริกซ์ PBAT จะส่งผลให้เสถียรภาพของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ได้ต่ำลง นอกเหนือจากนี้ พิจารณาค่าอุณหภูมิการสลายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ จากตารางที่ 4.2 พบว่า T<sub>d1</sub> ของยูเรียในซีท PBAT/urea มีค่าใกล้เคียงกับยูเรียเช่นเดียวกันกับ T<sub>d2</sub> และ T<sub>d3</sub> ของ PBAT ในซีท PBAT/urea ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับ PBAT ส่วนค่า T<sub>d2</sub> ของยูเรียในซีทคอมพอสิต PBAT/urea จะไม่ปรากฏพีกเนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวชั้นที่สองของยูเรียและอุณหภูมิการสลายตัวชั้นที่สองของ PBAT อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ซ้อนทับกัน นอกเหนือจากนี้ อุณหภูมิ T<sub>d1</sub> ของ PBAT ในซีทคอมพอสิต PBAT/urea มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ

ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 600°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สิ้นสุดการทดสอบ จาก TGA thermogram ของทั้งยูเรีย ซีท PBAT และซีทคอมพอสิต PBAT/urea พบว่าจะไม่มีน้ำหนักที่เหลืออยู่เลยเนื่องจากการทดสอบนี้ทำการทดสอบภายใต้สภาวะออกซิเจน จึงทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ สามารถสลายตัวไปได้จนหมด

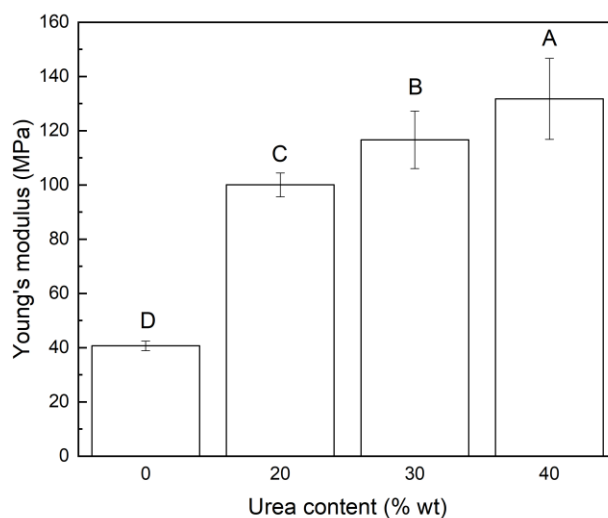
#### 4.1.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4.3 ค่า Young's modulus, Tensile strength และ % Elongation at break ของซีท PBAT และ PBAT/urea สูตรต่าง ๆ

Sample	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break (%)
PBAT	40.66±1.81 <sup>D</sup>	21.75±1.49 <sup>A</sup>	1,078.56±59.47 <sup>A</sup>
PBAT/u20	100.04±4.38 <sup>C</sup>	5.39±0.42 <sup>B</sup>	149.22±39.57 <sup>B</sup>
PBAT/u30	116.63±10.61 <sup>B</sup>	3.46±0.45 <sup>C</sup>	88.19±24.19 <sup>C</sup>
PBAT/u40	131.70±14.93 <sup>A</sup>	2.42±0.55 <sup>D</sup>	61.92±18.67 <sup>C</sup>

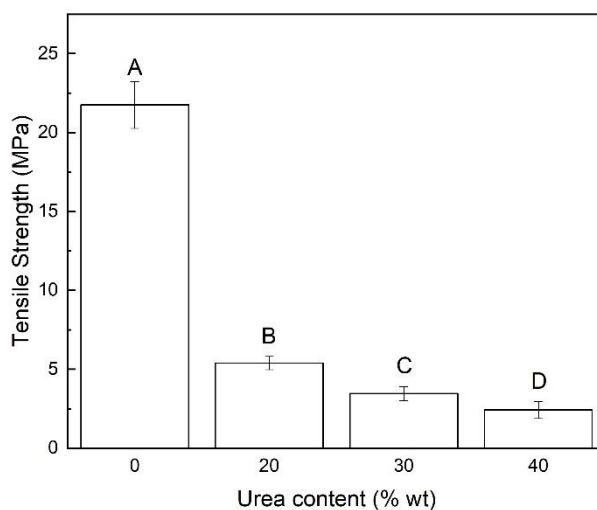
\*หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

การทดสอบสมบัติเชิงกลของซีท PBAT และ PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรียต่าง ๆ จะทำการทดสอบโดยใช้มาตรฐาน ASTM D882 ซึ่งชิ้นงานจะอยู่ในรูปแบบฟิล์มหรือแผ่นซีทบาง โดยจากการทดสอบจะได้ผลการทดสอบดังนี้ จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อมีการผสมยูเรียเข้าไปใน PBAT จะส่งผลให้ค่า Young's modulus ของซีทคอมพอสิต PBAT/urea มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับซีท PBAT บริสุทธิ์ จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่า Young's modulus ของซีท PBAT จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 40.66±1.81 เป็น 100.04±4.38 116.63± 10.61 และ 131.70±14.93 สำหรับซีทคอมพอสิต PBAT/u20 PBAT/u30 และ PBAT/u40 ตามลำดับ โดยเมื่อปริมาณยูเรียในซีทคอมพอสิต PBAT/urea เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการผสมอนุภาคของแข็งของยูเรียที่มีความแข็งเกร็ง (stiffness) ลงไปในพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนนุ่ม และปริมาณ PBAT ที่ลดลงเมื่อปริมาณของยูเรียเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ซีทคอมพอสิต PBAT/urea มีความแข็งเกร็งที่มากขึ้น [38]



**รูปที่ 4.9** Young's modulus ของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt

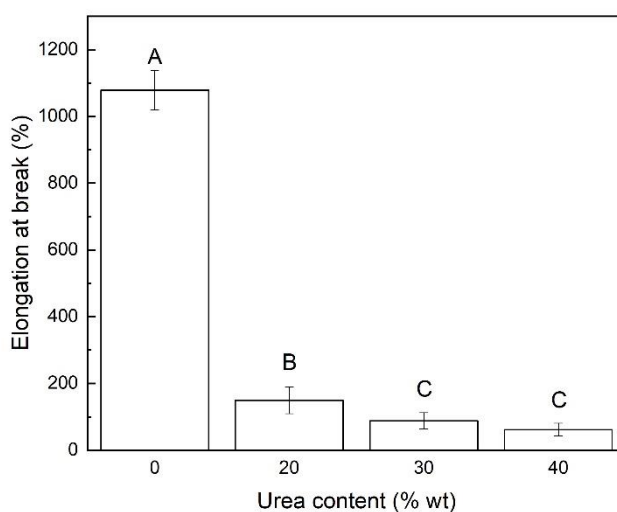
เมื่อผสมยูเรียเข้าไปในเมทริกซ์ PBAT จะส่งผลต่อค่า Tensile strength ของ PBAT ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.10 คือ ค่า Tensile strength ของซีทคอมพอสิต PBAT/urea มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับซีท PBAT โดยเมื่อปริมาณของยูเรียมากขึ้นจะส่งผลให้ค่า Tensile strength มีค่าลดลง จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่า Tensile strength จะมีการลดลงมากที่สุดเมื่อมีการผสมยูเรีย 40%wt ซึ่งจะมีค่า Tensile strength เท่ากับ  $2.42 \pm 0.55$  การลดลงของค่า Tensile strength ของซีทคอมพอสิต PBAT/urea มีสาเหตุมาจาก อันตรกิริยาระหว่างฟิลเลอร์-ฟิลเลอร์ที่มากขึ้น โดยเมื่อมีการให้แรงดึงแก่ชิ้นงาน แรงที่จะเกิดการถ่ายโอนจากเฟสต่อเนื่องคือ PBAT ไปยังยูเรียซึ่งเป็นเฟสกระจาย ดังนั้นค่า Tensile strength จึงมีความเกี่ยวข้องกับการยึดติดระหว่าง PBAT และยูเรีย [39] เมื่อปริมาณยูเรียมากขึ้นและปริมาณ PBAT ลดลงจะทำให้เมทริกซ์ PBAT ไม่สามารถเปียกผิว (wetting) ยูเรียได้หมด [40, 41] และจากความไม่เข้ากันระหว่าง PBAT และยูเรีย อันตรกิริยาระหว่างฟิลเลอร์-ฟิลเลอร์จึงมากขึ้นเมื่อปริมาณยูเรียเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันของยูเรีย ส่งผลให้พื้นที่การยึดติดระหว่างเฟสของ PBAT และยูเรียลดลงซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกหักขึ้นมา [38, 42] นอกเหนือจากนี้ จากรูปที่ 4.2 (B-D) ซึ่งเป็นรูป FE-SEM พื้นที่หน้าตัดของซีทคอมพอสิต PBAT/urea สูตรต่าง ๆ จากภาพจะปรากฏช่องว่างระหว่างเฟสของ PBAT และยูเรีย จะส่งผลให้การส่งผ่านแรงที่ได้รับระหว่างเฟสเกิดได้ไม่ดีนัก บริเวณนั้นจึงกลายเป็นจุดศูนย์รวมแรงเค้นซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นทำให้เกิดการแตกหักของซีท



รูปที่ 4.10 Tensile strength ของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt

จากรูปที่ 4.11 พบว่าในซีทคอมพอสิต PBAT/urea เมื่อมีปริมาณยูเรียมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ของซีทคอมพอสิต PBAT/urea มีค่าลดลง เนื่องจากยูเรียซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PBAT ไปตามแรงดึงที่ให้ [42] ผลการทดสอบนี้จะสอดคล้องกับรูป FE-SEM ดังรูปที่ 4.2 คือเมื่อผสมยูเรียเข้าไปในเมทริกซ์ PBAT จะส่งผลให้บริเวณที่เป็นเมทริกซ์ PBAT มีความเปราะ (brittle) มากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 4.2 (B-D) โดยจากในภาพจะปรากฏบริเวณราบเรียบเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับซีท PBAT บริสุทธิ์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 (A)





รูปที่ 4.11 Elongation at break ของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt

#### 4.1.2.3 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle)

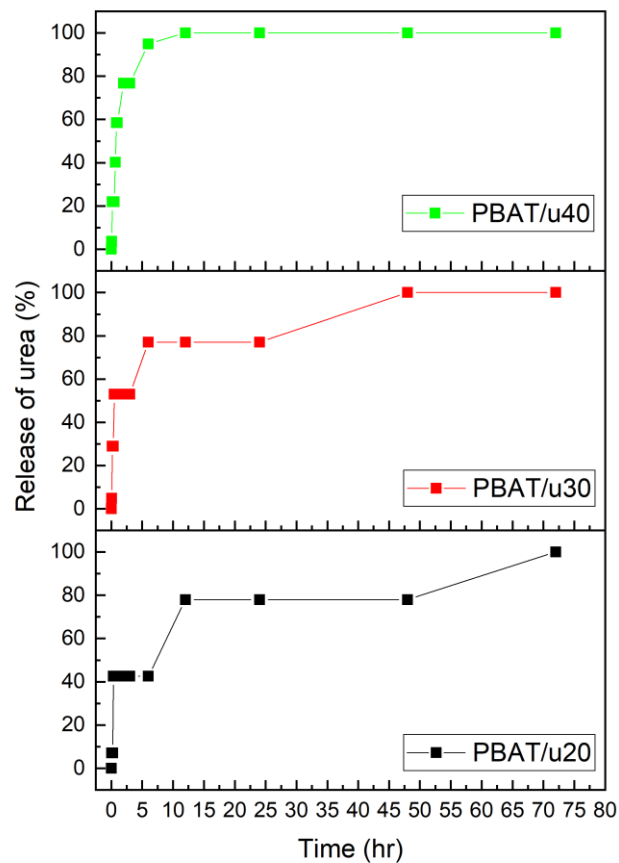
ตารางที่ 4.4 มุมสัมผัสของหยดน้ำ (contact angle) ที่เวลา 0 ถึง 2 วินาทีของซีท PBAT/urea สูตรต่าง ๆ

Sample	มุมสัมผัสของหยดน้ำ (°)				
	0.0s	0.5s	1.0s	1.5s	2.0s
PBAT	76.0	76.0	76.0	76.0	76.0
PBAT/u20	47.2	47.2	47.3	47.4	47.4
PBAT/u30	44.1	44.2	44.4	44.1	44.4
PBAT/u40	40.1	40.3	40.2	40.6	40.8

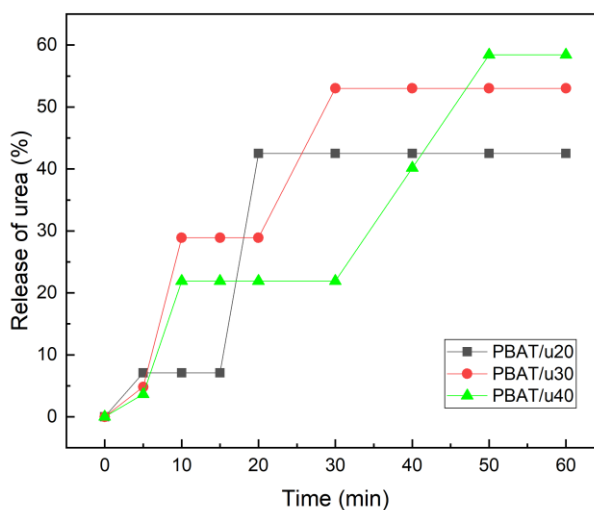
การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนผิวซีทสามารถบ่งบอกความสามารถในการเปียกผิว (wettability) ของพื้นผิวซีทได้ โดยจากผลการทดสอบซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่า PBAT มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำในแต่ละเวลาซึ่งเริ่มตั้งแต่วินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 2 เท่ากับ 76° ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความชอบน้ำ (hydrophilic) ของ PBAT เนื่องจากในการทดสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำจะนิยามไว้ว่าพื้นผิวที่มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำน้อยกว่า 90° จะมีความชอบน้ำ [43] โดยค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่ามากขึ้นจะบ่งบอกถึงความชอบน้ำที่ลดลง เมื่อทำการผสมยูเรียและ PBAT เข้าด้วยกันพบว่าค่ามุม

สัมพัทธ์ของหยดน้ำของซีทคอมพอสิต PBAT/urea มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับซีท PBAT โดยเมื่อปริมาณยูเรียเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่ามุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมีค่าลดลงมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความชอบน้ำที่มากขึ้นของพื้นผิวซีท เพราะยูเรียเป็นสารที่มีสมบัติชอบน้ำ [30] และสามารถละลายในน้ำได้ดี ดังนั้นเมื่อมีการผสมยูเรียเข้าไปในซีท PBAT เพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นผิวของซีท PBAT มีความชอบน้ำที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้นจาก 0.00 เป็น 2.00 วินาที พบว่าค่ามุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมีค่าแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง

#### 4.1.2.4 การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีท PBAT



รูปที่ 4.12 เปอร์เซนต์การปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/urea สูตรต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/urea สูตรต่าง ๆ ในช่วงเวลา 0 ถึง 60 นาที

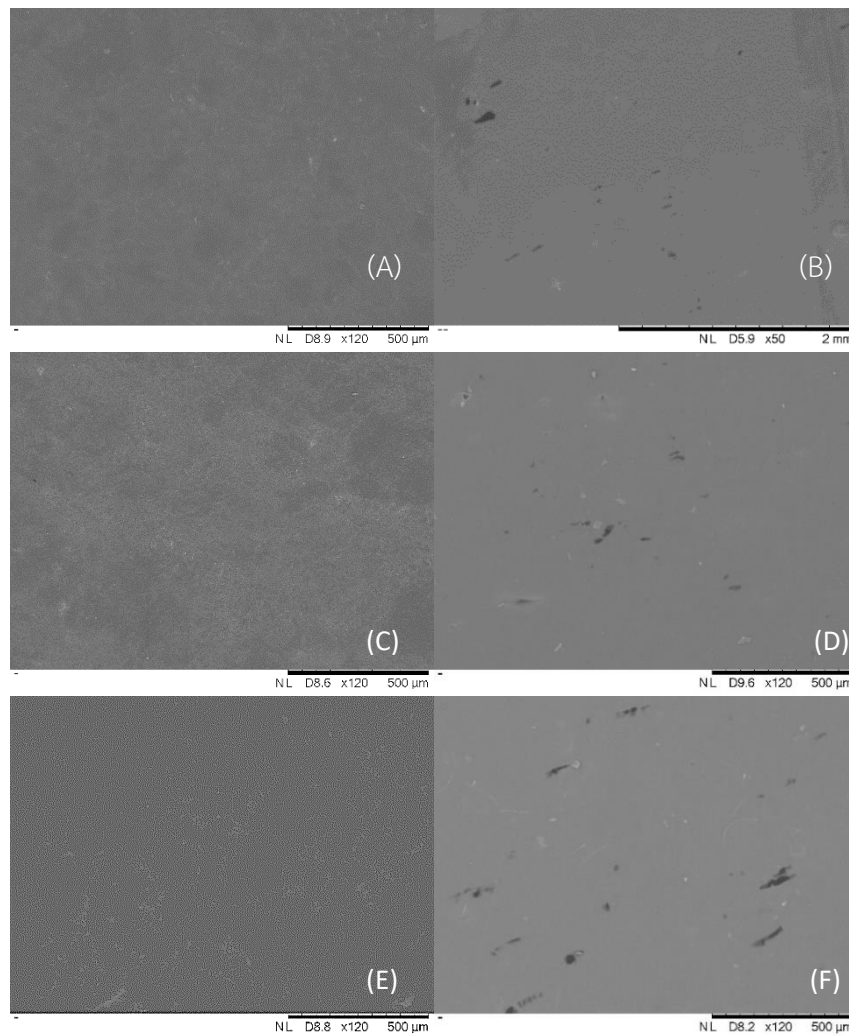
ผลการทดสอบความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของซีท PBAT แสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/urea สูตรต่าง ๆ ที่ได้มาจากการวัดค่าดัชนีหักเหของแสง โดยความเข้มข้นของยูเรียที่เวลาต่าง ๆ จะสามารถหาได้จากการวัดค่าดัชนีหักเหของสารละลายยูเรียที่ได้จากการนำซีทสูตรต่าง ๆ ไปแช่ในน้ำ จากนั้นนำค่าดัชนีหักเหไปเทียบค่ากับกราฟเทียบมาตรฐาน (calibration curve) ของสารละลายยูเรียมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.13 พบว่าซีทคอมพอสิต PBAT/u20 มีพฤติกรรมการปลดปล่อยยูเรียเป็นดังนี้คือ ในช่วงแรกจะเกิดการปลดปล่อยอย่างรวดเร็วเนื่องจากน้ำจะชะยูเรียที่อยู่บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานที่ถูกตัดมาทดสอบออกมา หลังจากเวลาในการทดสอบผ่านไป 20 นาที จะมีเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียออกมา 42.52% จากนั้นจากรูปที่ 4.12 พบว่าเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียจะคงที่ไปจนถึงเวลา 6 ชั่วโมง โดยเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียที่คงที่ที่เกิดเนื่องจากน้ำต้องใช้เวลาในการแพร่ผ่าน PBAT ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีค่า  $T_g$  ต่ำจึงบ่งบอกถึงการมี Free volume ที่มาก โดยน้ำจะแพร่ผ่าน Free volume เพื่อเข้าไปชะยูเรียออกมา จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียจะเพิ่มขึ้นเป็น 77.96% และคงที่ไปจนกระทั่งเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง ยูเรียถูกปลดปล่อยจนหมดเมื่อเวลาผ่านไป 72 ชั่วโมง

ซีทคอมพอสิต PBAT/u30 จะมีการปลดปล่อยยูเรียออกมาอย่างรวดเร็วเช่นกันในช่วงแรก โดยเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที จะมีการปลดปล่อยยูเรียออกมา 53.01% ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 4.13 และเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียจะคงที่ไปจนกระทั่งเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง (รูปที่ 4.12) จากนั้นเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียจะเพิ่มขึ้นเป็น 77.11% เมื่อเวลาในการทดสอบผ่านไป 6 ชั่วโมงแล้ว เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียจะคงที่ไปจนเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง โดยจะปลดปล่อยยูเรียออกมา 100% เมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง

ซีทคอมพอสิต PBAT/u40 จะมีการปลดปล่อยยูเรียออกมาอย่างรวดเร็วในทุกช่วง โดยยูเรียที่ถูกชะออกมาในช่วงแรกที่เวลาน้อย ๆ จะเป็นยูเรียที่อยู่บริเวณผิวหน้าของซีทคอมพอสิตโดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.2 (B-D) และจากรูปที่ 4.2 (D) พบว่าเมื่อผสมยูเรียเข้าไปปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้มียูเรียไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของซีทคอมพอสิตมากขึ้น โดยจากรูปที่ 4.12 ซีทสูตรนี้จะปลดปล่อยยูเรียจนหมดเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง พฤติกรรมการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิตแต่ละสูตรแตกต่างกันเนื่องจากปริมาณของยูเรียที่ไม่เท่ากันในซีทคอมพอสิตแต่ละสูตร โดยซีทคอมพอสิตที่มีปริมาณยูเรียมากที่สุด เมื่อยูเรียที่อยู่บริเวณผิวหน้าถูกชะออกไปจะทำให้ น้ำสามารถเข้ามาชะยูเรียที่อยู่บริเวณด้านในซีทได้ง่ายขึ้น ซึ่งผลที่ได้คือจะทำให้เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/u40 มีค่าที่มากเมื่อเทียบกับ PBAT/u20 และ PBAT/u30 ในเวลาที่เท่ากัน

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของซีท PBAT คือค่ามัมสัมผัสน้ำของซีทคอมพอสิต PBAT/u20 มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับ PBAT/u30 และ PBAT/u40 ดังนั้นน้ำจึงสามารถเปียกผิวซีทคอมพอสิตสูตร PBAT/u20 ได้ยากที่สุด รองลงมาคือ PBAT/u30 และ PBAT/u40 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/urea สูตรต่าง ๆ พบว่า PBAT/u20 PBAT/u30 และ PBAT/u40 จะปลดปล่อยยูเรียออกมา 100% ที่เวลา 72 48 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ หลังจากทำการทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/urea แล้ว จะนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับซีทโดยใช้ SEM ซึ่งผลการศึกษาด้วย SEM แสดงดังรูปที่ 4.14 จากรูปพบว่าซีทที่ผ่านการทดสอบแล้วจะมีรูเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับซีทที่ยังไม่ผ่านการทดสอบที่มีลักษณะเรียบ เนื่องจากเกิดการละลายออกของยูเรีย ดังนั้นจากลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปของซีทจึงเป็นการยืนยันว่ามียูเรียอยู่ในซีทและยูเรียสามารถถูกน้ำชะออกจากซีทได้ ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fernando Gomes Souza Jr และคณะ [3] ซึ่งทำการเตรียมซีท PBS/urea พบว่าเมื่อศึกษารูป SEM หลังจากการทดสอบการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียในน้ำพบว่า บริเวณพื้นผิวของซีทจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปคือจะมีลักษณะขรุขระขึ้นและไม่สมบูรณ์เนื่องจากมีรูปรากฏบริเวณพื้นผิวซีท



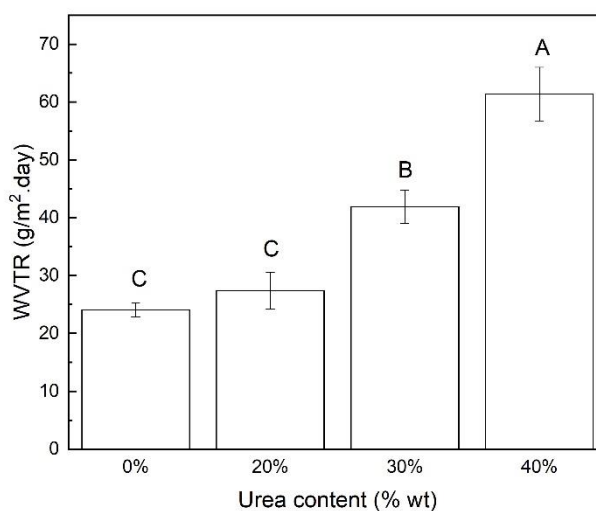
รูปที่ 4.14 รูป SEM พื้นผิวของซีท (A,B) PBAT/u20 (C,D) PBAT/u30 และ (E,F) PBAT/u40 (ซ้าย) ก่อนและ (ขวา) หลังจากผ่านการทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีท PBAT

#### 4.1.2.5 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission; WVT)

ตารางที่ 4.5 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของซีท PBAT และซีทคอมพอสิต PBAT/urea สูตรต่าง ๆ

Sample	Water vapor transmission rate (g/m <sup>2</sup> .day)
PBAT	24.08±1.23 <sup>C</sup>
PBAT/u20	27.39±3.18 <sup>C</sup>
PBAT/u30	41.91±2.86 <sup>B</sup>
PBAT/u40	61.37±4.61 <sup>A</sup>

\*หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่ต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)



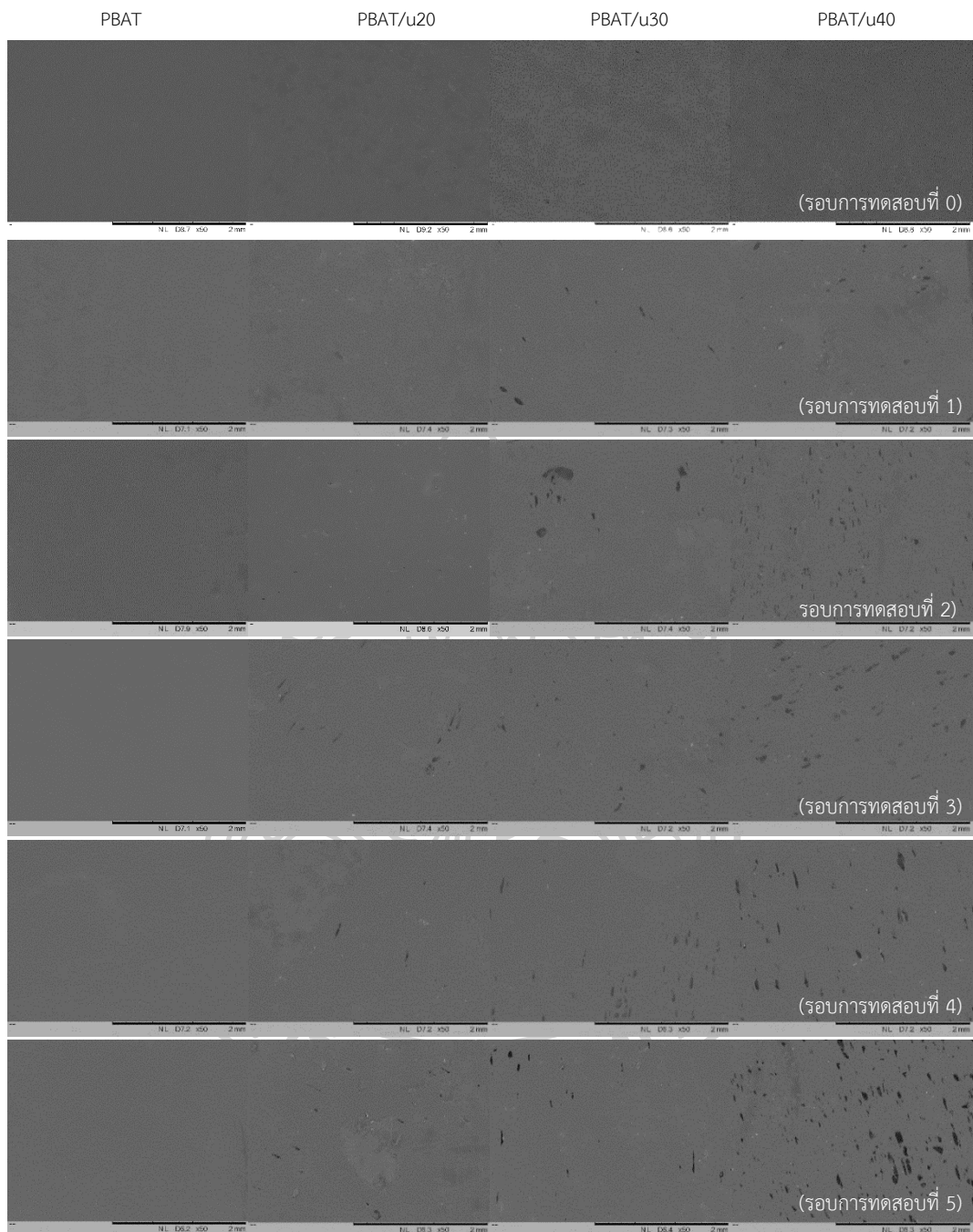
รูปที่ 4.15 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของซีทคอมพอสิต PBAT/urea ที่ปริมาณยูเรีย 0 20 30 และ 40%wt

ทำการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission; WVT) โดยใช้วิธี Cup method ซึ่งจะบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของซีทเทียบกับเวลา แล้วนำค่าความชันของกราฟไปคำนวณหาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission rate: WVTR) ค่า WVTR ที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.15 จากการทดสอบพบว่าซีทคอมพอสิต PBAT/urea มีค่า WVTR เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับซีท PBAT บริสุทธิ์ โดยเมื่อปริมาณยูเรียที่อยู่ในเมทริกซ์ PBAT เพิ่มขึ้น

จะส่งผลให้ WVTR มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งซีทที่มีปริมาณยูเรีย 40% จะมีค่า WVTR สูงที่สุด การเพิ่มขึ้นของค่า WVTR เมื่อมีการผสมยูเรียเข้าไปนั้นเกิดจากสมบัติชอบน้ำของยูเรีย (hydrophilic) จึงทำให้ยูเรียดูดไอน้ำเข้ามาสู่ซีทจากนั้นความชื้นหรือไอน้ำจะเคลื่อนที่ผ่านยูเรียไปยังอีกฝั่งหนึ่งของซีท ซึ่งเมื่อปริมาณยูเรียมากขึ้นจะส่งผลให้ยูเรียปริมาณที่มากขึ้นก็จะดูดไอน้ำเข้ามาได้มากขึ้น จากรูปที่ 4.2 (B-D) พบว่าเมื่อปริมาณยูเรียเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันของยูเรียและก่อให้เกิดช่องว่างขึ้น ซึ่งการเกิดการรวมกลุ่มกันของยูเรียและการเกิดช่องว่าง [44] เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่า WVTR เนื่องจากไอน้ำสามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างนั้นได้ โดยผลการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำจะสอดคล้องกับการทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรีย โดยซีทคอมพอสิต PBAT/u20 ซึ่งมีค่า WVTR ต่ำที่สุดจะสามารถควบคุมการปลดปล่อยยูเรียได้นานที่สุด เนื่องจากซีทสูตรนี้มีปริมาณยูเรียน้อยที่สุด แต่มีปริมาณ PBAT มากที่สุด

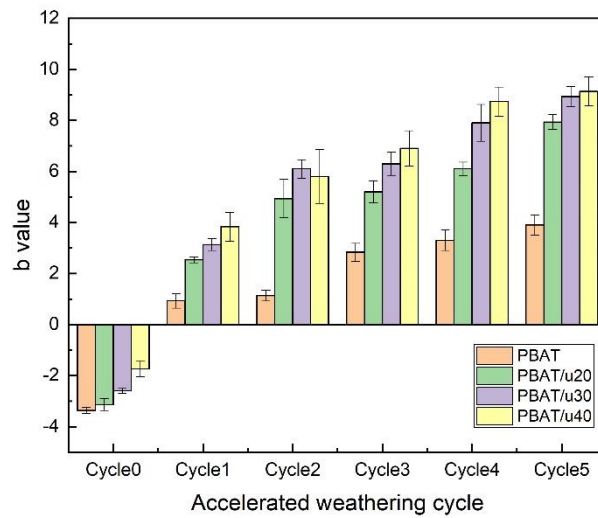
#### 4.1.2.6 การทดสอบการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลอง (weathering testing)

ทำการทดสอบการทนทานต่อสภาพแวดล้อมเพื่อทดสอบว่าการผสมยูเรียและ PBAT เข้าด้วยกันจะส่งผลต่อซีทคอมพอสิต PBAT/urea อย่างไรเมื่ออยู่ภายใต้การจำลองสภาวะ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบทั้งหมด 5 รอบการทดสอบ แต่ละรอบการทดสอบจะใช้เวลาทดสอบ 8 ชั่วโมงซึ่งเทียบเท่ากับระยะเวลาจริงได้ 1.46 วัน โดยคำนวณเทียบจากการทดสอบกลางแจ้งจริงที่รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นเวลา 1 ปี ซึ่งการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข [45] จากรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นซีท PBAT ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่จำนวนรอบการทดสอบต่าง ๆ และซีทที่ยังไม่ผ่านการเร่งสภาวะ พบว่าซีทที่ยังไม่ผ่านการจำลองสภาวะ (รอบการทดสอบ 0) จะมีลักษณะผิวซีทที่เรียบในทุกสูตร เมื่อทำการจำลองสภาวะพบว่าซีท PBAT มีลักษณะที่ไม่ต่างไปจากเดิม เมื่อสังเกตจากรูป SEM ส่วนซีทคอมพอสิต PBAT/urea สูตรต่าง ๆ จะมีรูเกิดขึ้นบนผิวของซีทเนื่องจากการละลายออกของยูเรีย โดยเมื่อปริมาณยูเรียเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณรูบนผิวซีทมีปริมาณที่เยอะขึ้น การละลายออกของยูเรียจากการจำลองสภาวะเกิดขึ้นเพราะสภาวะที่ใช้ในการทดสอบมีการควบคุมไอน้ำควบแน่นที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จึงทำให้น้ำที่ไปควบแน่นบริเวณผิวซีทไปทำการละลายยูเรียออกมา จากลักษณะทางกายภาพของซีท (ตารางที่ 4.6) พบว่าซีทที่ทดสอบจะมีสีที่เหลืองขึ้นเมื่อทำการทดสอบที่จำนวนรอบการทดสอบที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบที่เกิดขึ้นนี้จะยืนยันได้ด้วยการวัดสีด้วยเครื่องวัดสีที่ผิวซีทในระบบสี CIE L\*a\*b\* จากรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อจำนวนรอบการทดสอบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า b มีค่าเพิ่มขึ้นไปทางบวก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสีของซีทจะมีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น การที่ซีทมีสีที่เหลืองขึ้นเกิดจากการฉายรังสียูวีให้แก่ชิ้นงานจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวด้วยแสง (photodegradation) ซึ่งเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานเกิดสีเหลือง [46]



รูปที่ 4.16 รูป SEM พื้นผิวของซีทคอมพอลิทีสเตรต่าง ๆ ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ



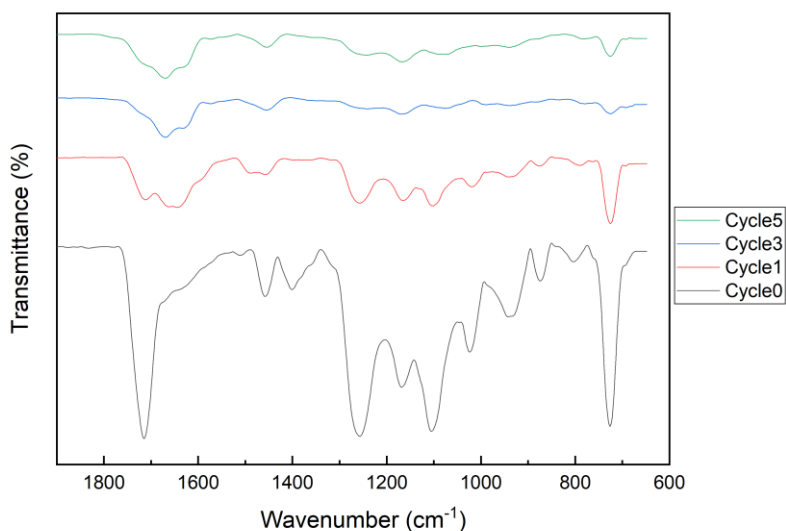


รูปที่ 4.17 ค่า b ในระบบการวัดสี CIE L\*a\*b\* ของซีท PBAT และ PBAT/urea ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ

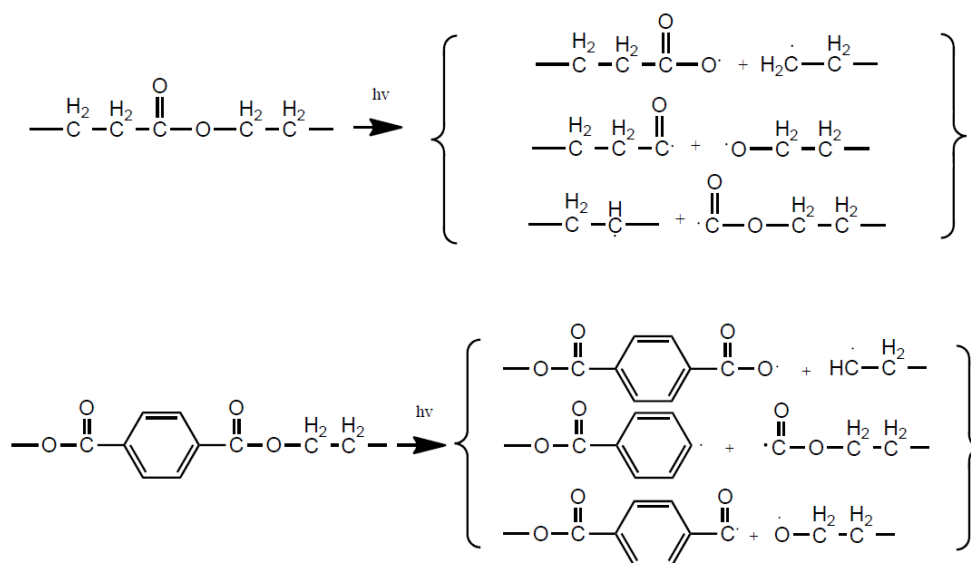
ตารางที่ 4.6 ลักษณะทางกายภาพของซีท PBAT และ PBAT/urea ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ

Sample	รอบการทดสอบ					
	0	1	2	3	4	5
PBAT						
PBAT/u20						
PBAT/u30						
PBAT/u40						

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของซีท PBAT เมื่อผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 5 ด้วยเทคนิค ATR-FTIR แสดงดังรูปที่ 4.18 จาก ATR-FTIR spectra ของ PBAT ที่ยังไม่ผ่านการจำลองสภาวะ (รอบการทดสอบที่ 0) จะพบพีกการสั่นของหมู่ C=O symmetric stretching ที่เลขคลื่น  $1714.66\text{ cm}^{-1}$  [46-48] พีกที่เลขคลื่น  $1023.68\ 1257.44\ 1167.71$  และ  $1103.36\text{ cm}^{-1}$  จะแสดงถึงหมู่เอสเทอร์ (-CO- stretching) [49] พีกที่เลขคลื่น  $725.99\text{ cm}^{-1}$  จะแสดงถึงหมู่เมทิลีน (-CH<sub>2</sub>- stretching) ในขณะที่  $875.44$  และ  $1456.28\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงวงเบนซีน [46, 47] หลังจากผ่านการจำลองสภาวะแล้วในรอบการทดสอบที่ 5 พีกที่กล่าวมาข้างต้นจะมีความเข้มของพีกลดลง และพีกของหมู่คาร์บอนิลปรากฏขึ้นมาในลักษณะที่เป็น Broad peak ในช่วงเลขคลื่น  $1850\text{-}1550\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดการตัดสายโซ่ของหมู่เอสเทอร์ และยังพบพีกที่มีลักษณะเป็นไหล่พีกที่เลขคลื่น  $1713.25\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดหมู่คาร์บอนิล (C=O) อิสระ ในขณะที่ไหล่พีกทางด้านขวาปรากฏที่เลขคลื่น  $1627.01\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการเกิดสารประเภทเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งการเกิดทั้งหมู่คาร์บอนิลอิสระและเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะเกิดจากการตัดสายโซ่ของหมู่เอสเทอร์ผ่านกระบวนการที่เรียกว่า Norrish-I type chain scission reaction [46, 50] ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.19



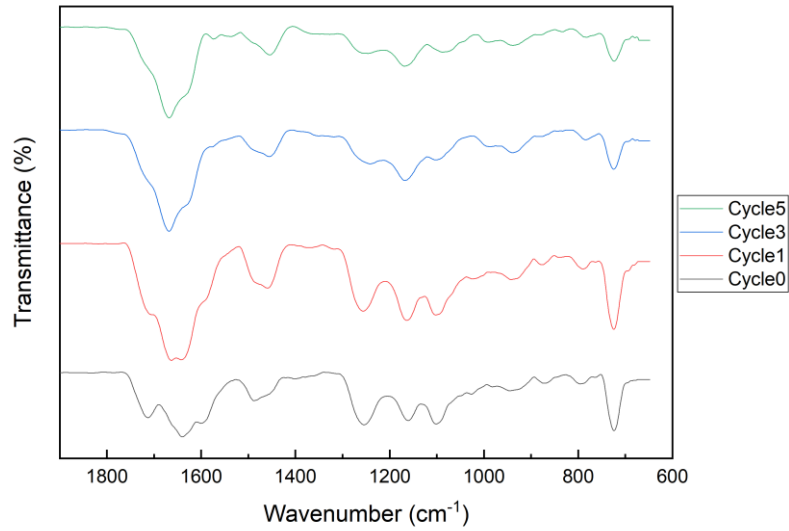
รูปที่ 4.18 ATR-FTIR Spectra ของซีท PBAT ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5



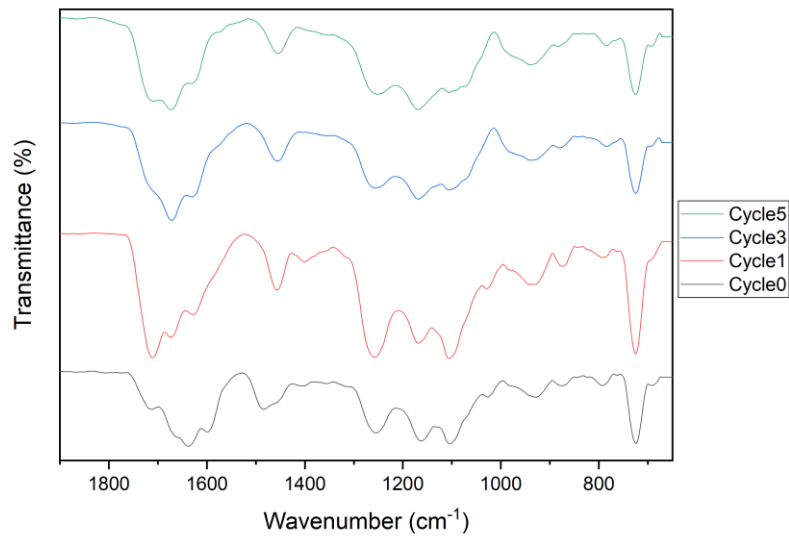
รูปที่ 4.19 ปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยแสง (photodegradation) ที่เป็นไปได้ของ PBAT โดยผ่านกระบวนการ Norrish type I [49]

ทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/urea สูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการจำลองสถานะซึ่งผลการศึกษาดูด้วยเทคนิค ATR-FTIR แสดงดังรูปที่ 4.20 ถึง 4.22 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างซีท PBAT และซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/urea ที่ยังไม่ผ่านการเร่งสถานะพบว่า ซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/urea จะมีพีคการสั่นของพันธะ N-H เพิ่มขึ้นมาที่เลขคลื่น 1639.16 1637.68 1639.07  $\text{cm}^{-1}$  ปรากฏในซีทที่มีการผสมยูเรีย 20 30 และ 40%wt ตามลำดับ และยังปรากฏพีคการสั่นของ  $\text{NH}_2$  bending [48] ที่เลขคลื่น 1595.12 1598.46 1600.64  $\text{cm}^{-1}$  ในซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u20 PBAT/u30 และ PBAT/u40 ตามลำดับ เมื่อนำซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/urea สูตรต่าง ๆ ไปผ่านการจำลองสถานะพบว่า การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันกับซีท PBAT ที่รอบการทดสอบที่ 5 คือมีการเกิดไพล์ฟีกทางด้านซ้ายในช่วงเลขคลื่น 1722.40 1717.32 1711.35  $\text{cm}^{-1}$  ในซีทคอมพอลิเมอร์ที่มีการผสมยูเรีย 20 30 และ 40%wt ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดหมู่คาร์บอนิล ( $\text{C}=\text{O}$ ) อิสระ ในขณะที่ไพล์ฟีกทางด้านขวาที่ในช่วงเลขคลื่น 1627.01 1625.59 1627.15  $\text{cm}^{-1}$  ในซีทคอมพอลิเมอร์ที่มีการผสมยูเรีย 20 30 และ 40%wt ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการเกิดสารประเภทเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ [46] จึงกล่าวได้ว่ายูเรียไม่ส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมีของซีท PBAT และไม่ส่งผลต่อการต่อทนสภาพแวดล้อมของ PBAT ในเชิงเคมี เนื่องจาก ATR-FTIR spectra ของซีท

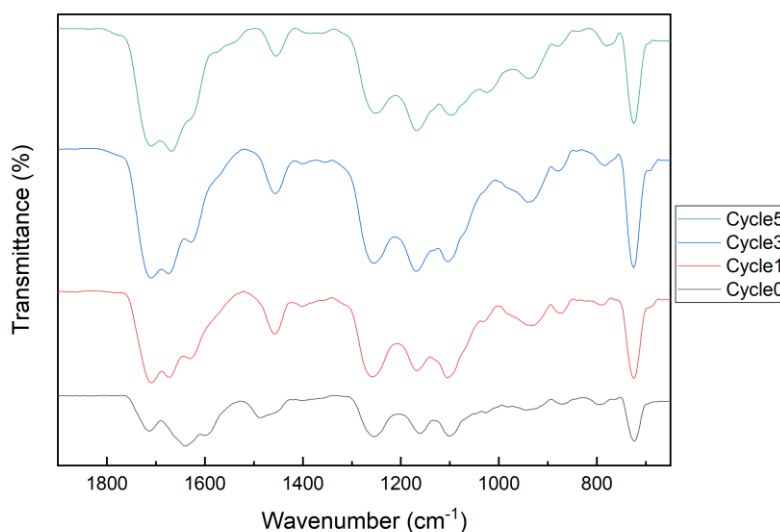
คอมพอลิเมอร์ PBAT/urea ที่รอบการทดสอบที่ 5 มีลักษณะคล้ายกับ ATR-FTIR spectra ของซีที PBAT ที่ผ่านการเร่งสภาวะมา 5 รอบการทดสอบเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.20 ATR-FTIR Spectra ของซีทีคอมพอลิเมอร์ PBAT/u20 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5



รูปที่ 4.21 ATR-FTIR Spectra ของซีทีคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5



รูปที่ 4.22 ATR-FTIR Spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/u40 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5

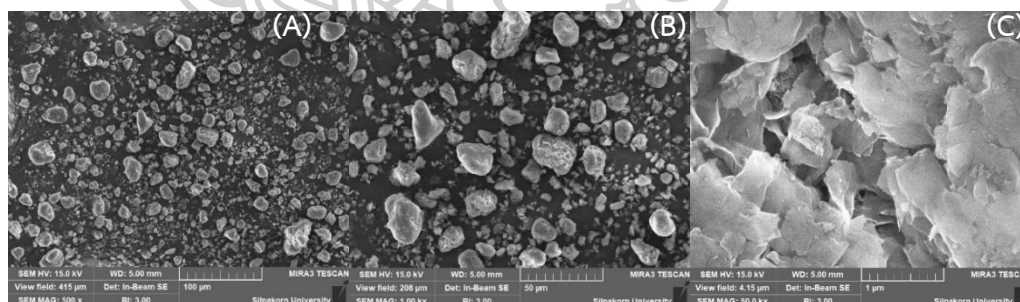
จากการวิเคราะห์สมบัติของซีทด้านต่าง ๆ พบว่าซีทคอมพอสิตสูตร PBAT/u30 ซึ่งประกอบด้วย PBAT 70%wt และยูเรีย 30%wt เป็นสูตรที่เหมาะสมในการนำไปศึกษาต่อในตอนที่ 2 ซึ่งจะเป็นการศึกษาผลของการเตรียมซีทคอมพอสิต PBAT/urea/OMMT เพราะเมื่อพิจารณาจากการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียพบว่า ซีทคอมพอสิต PBAT/u30 สามารถควบคุมการปลดปล่อยยูเรียไปได้จนถึง 48 ชั่วโมงและมีพฤติกรรมการปลดปล่อยยูเรียคล้ายกับซีทคอมพอสิต PBAT/u20 ซึ่งสามารถควบคุมการปลดปล่อยยูเรียได้ถึง 72 ชั่วโมง นอกเหนือจากนี้ จากรูป FE-SEM พื้นทีหน้าตัดของซีทแต่ละสูตร พบว่าซีทคอมพอสิตสูตร PBAT/u40 มียูเรียกระจายอยู่บริเวณผิวหน้าของซีท ส่วนซีทคอมพอสิต PBAT/u30 และ PBAT/u20 มียูเรียกระจายอยู่บริเวณภายในซีท จึงทำให้ยังมีเนื้อเมทริกซ์ PBAT ให้ทำการเติม OMMT เข้าไปเพิ่มได้ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบต่าง ๆ และความเป็นไปได้ในการใช้งานซีทคอมพอสิตซึ่งโดยปกติแล้วควรเลือกซีทคอมพอสิตสูตรที่มีปริมาณยูเรียที่มาก แต่ยังสามารถในการควบคุมการปล่อยยูเรีย ซีทคอมพอสิตสูตร PBAT/u30 จึงเป็นสูตรที่เหมาะสมในการนำไปศึกษาต่อในตอนที่ 2

## 4.2 ตอนที่ 2 การเตรียมซีทคอมพอลิตจาก PBAT ยูเรียและ OMMT และการทดสอบสมบัติ

ในตอนที 2 จะทำการนำซีทสูตรที่ดีที่สุดจากตอนที่ 1 คือซีทคอมพอลิต PBAT/u30 มาทำการศึกษาต่อโดยการนำมาผสมกับแรมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงแล้วหรือ Organomontmorillonite (OMMT) ซึ่งอัตราส่วนในการผสมคือ 1 3 และ 5 phr ทำการขึ้นรูปผ่าน 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย (solvent casting) และจากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปทำการขึ้นรูปต่อในขั้นตอนที่สอง โดยจะขึ้นรูปซีทด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding) แล้วนำซีทคอมพอลิต PBAT/urea/OMMT ที่ได้ไปทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ คือ สันฐานวิทยา องค์ประกอบและโครงสร้างของคอมพอลิต สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล การควบคุมการปลดปล่อยยูเรีย สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ และการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลอง นอกเหนือจากนี้ ทำการเตรียมซีทคอมพอลิตอีกระบบหนึ่งคือ PBAT/OMMT ที่ปริมาณ OMMT ต่าง ๆ โดยใช้วิธีการเดียวกับการเตรียม PBAT/urea/OMMT เพื่อนำไปศึกษาผลของการผสม OMMT เข้าไปในซีท PBAT โดยจะใช้เป็นระบบอ้างอิงในการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบ

### 4.2.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ซีทคอมพอลิต PBAT/OMMT และ PBAT/urea/OMMT

#### 4.2.1.1 การศึกษาสันฐานวิทยาของคอมพอลิต

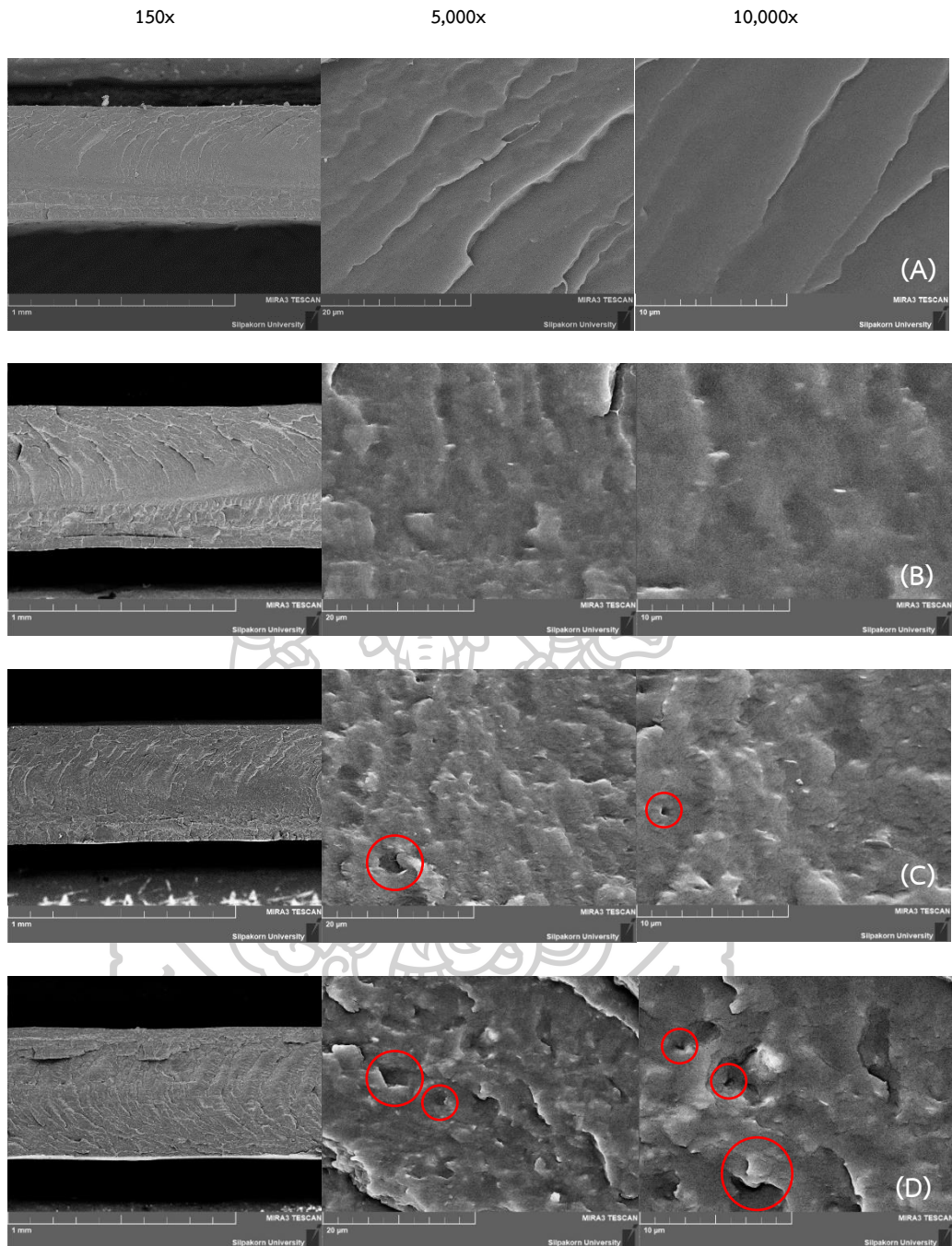


รูปที่ 4.23 รูป FE-SEM ของ Organomontmorillonite (OMMT) ที่กำลังขยาย (A) 500 เท่า (B) 1,000 เท่า และ (C) 50,000 เท่า

รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะทางกายภาพของแรมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงหรือ Organomontmorillonite (OMMT) โดย OMMT ที่นำมาศึกษามีชื่อทางการค้าว่า Nanomer I.28E ซึ่งได้จากการนำแรมอนต์มอริลโลไนต์ไปทำการปรับปรุงด้วย Octadecyl trimethyl ammonium หรือ Trimethyl stearyl ammonium [51, 52] จากรูปที่ 4.23 (A-B) พบว่าอนุภาคของ OMMT มีลักษณะเป็นก้อนที่มีขนาดแตกต่างกัน เมื่อศึกษาสันฐานวิทยาของ OMMT ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

(รูปที่ 4.23 C) พบว่า OMMT มีลักษณะที่เป็นแผ่นซ้อนกันเป็นชั้น ๆ เช่นเดียวกับลักษณะทางกายภาพของแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์โดยทั่วไป [52, 53]

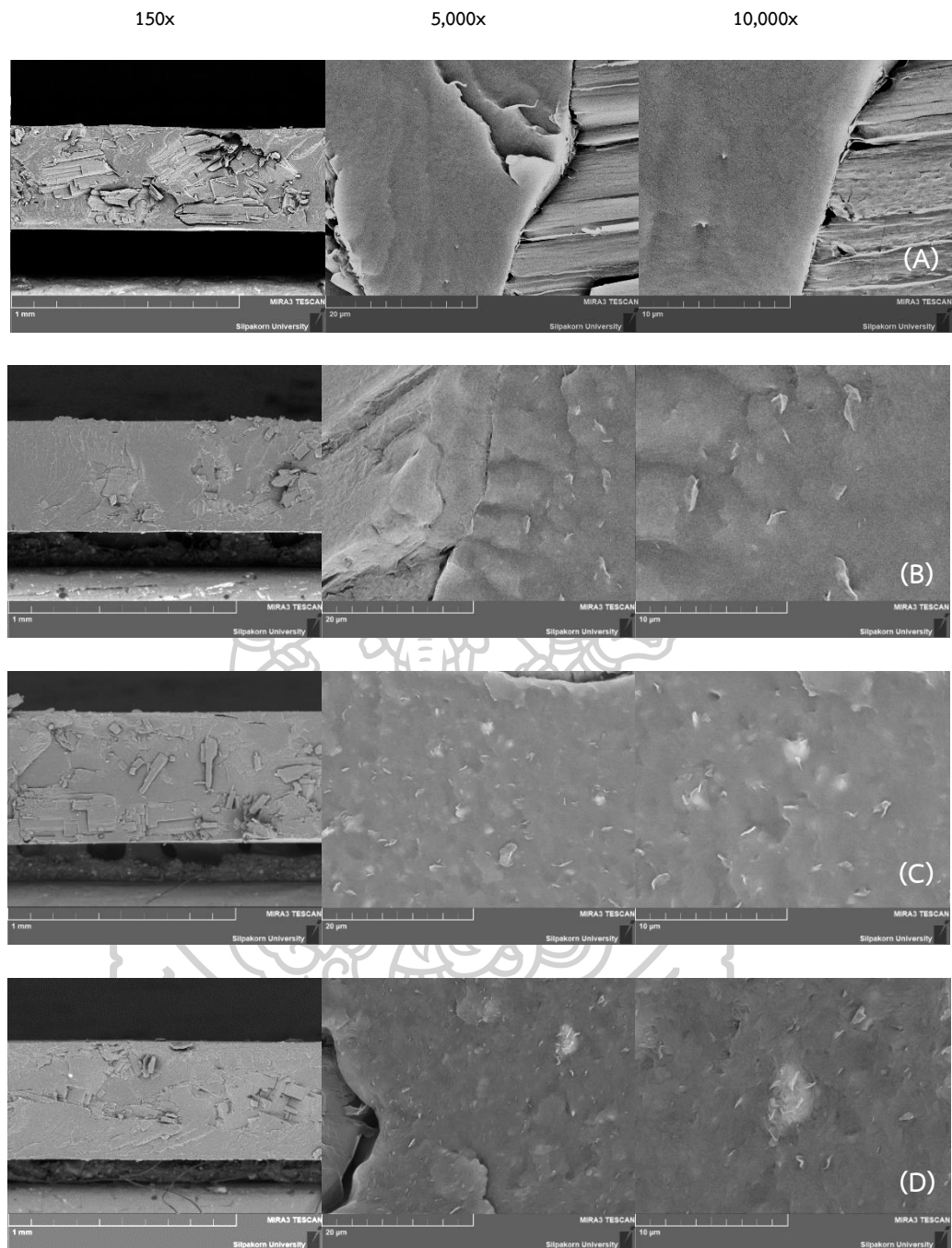
ในการทดลองส่วนนี้จะทำการผสม OMMT กับ PBAT เพื่อเตรียมเป็นซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT โดยปริมาณ OMMT ที่ผสมคือ 1 3 และ 5 phr จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของซีทคอมพอสิตที่เตรียมได้พบว่าที่กำลังขยาย 150 เท่า (รูปที่ 4.24) ซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT ยังคงปรากฏลักษณะที่เป็นริ้วให้เห็นอย่างชัดเจนซึ่งเหมือนกับซีท PBAT จึงเป็นการบ่งบอกว่าซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT ยังแสดงพฤติกรรมที่เป็นวัสดุที่มีความเหนียว (ductile) อยู่ถึงแม้ว่าจะมีการผสม OMMT ปริมาณมากถึง 5 phr เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาที่กำลังขยายสูงขึ้น จากรูป 4.24 (A) ซึ่งเป็นซีทคอมพอสิต PBAT/O1 พบว่าจะสังเกตเห็น OMMT ที่มีลักษณะเป็นแถบสีขาวแทรกอยู่ในเนื้อ PBAT โดยเมื่อปริมาณ OMMT มากขึ้นคือ 3 และ 5 phr พบว่าจะมี OMMT ปรากฏให้เห็นในปริมาณที่มากขึ้นในเนื้อ PBAT และมีกลุ่มของ OMMT ปรากฏให้เห็นเป็นบริเวณสีขาวดังแสดงในรูปที่ 4.24 (B-C) นอกเหนือจากนี้ เมื่อกำลังขยายสูงขึ้นเป็น 10,000 เท่าพบว่า OMMT ยึดติดกับเมทริกซ์ PBAT ได้อย่างดี ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันที่ดีระหว่างเมทริกซ์ PBAT และ OMMT แต่เมื่อปริมาณของ OMMT เพิ่มขึ้นจะปรากฏการรวมกลุ่มกัน (agglomerate) ของ OMMT มากขึ้น โดยปกติแล้วเมื่อผสม OMMT เข้าไปในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันของ OMMT กลายเป็น Agglomerate [54-56] เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาดึงดูด (attractive interaction) ที่แข็งแรงระหว่างฟิลเลอร์-ฟิลเลอร์ [57] นอกจากนี้เมื่อปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้นจะพบเห็นจุดสีดำซึ่งแสดงดั่งวงกลมสีแดงบนพื้นผิวที่เกิดการแตกหักมากขึ้น จุดสีดำเหล่านี้บ่งบอกถึงการเริ่มแตกหัก (crack initiation point) ของชิ้นงาน โดยจะเกิดขึ้นบริเวณที่พบการรวมกลุ่มของ OMMT ซึ่งเป็นบริเวณที่เป็นศูนย์รวมของความเค้น (stress concentration)



รูปที่ 4.24 รูป FE-SEM ของพื้นที่หน้าตัดของซีทคอมพอลิิต (A) PBAT (B) PBAT/O1 (C) PBAT/O3 และ (D) PBAT/O5 ที่กำลังขยาย (ซ้าย) 150 (กลาง) 5,000 และ (ขวา) 10,000 เท่า

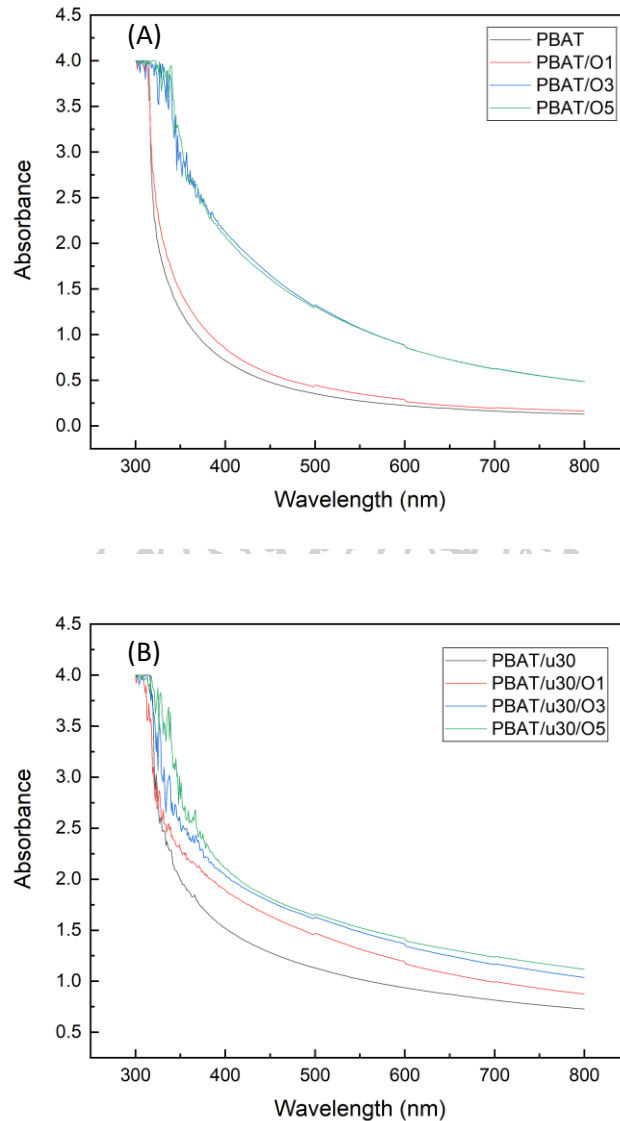


รูปที่ 4.25 เป็นสัณฐานวิทยาของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/urea/OMMT ที่ปริมาณยูเรีย 30 %wt และ OMMT 1 3 และ 5 phr เมื่อเปรียบเทียบกับซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/OMMT และซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/OMMT ดังรูปที่ 4.24 ที่กำลังขยายเท่ากับ 150 เท่า จะพบว่าเมทริกซ์ PBAT ในซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/OMMT ปรากฏบริเวณที่มีลักษณะที่เรียบมากขึ้น ซึ่งลักษณะที่เรียบขึ้นนี้แสดงให้เห็นลักษณะการแตกหักแบบเปราะ [58] ในขณะที่ยังคงปรากฏช่องว่างระหว่างเฟสของ PBAT และยูเรียดังเช่นที่แสดงในรูป 4.2 (B-D) ดังนั้นยังคงเกิดการเข้ากันที่ไม่ดีระหว่างเมทริกซ์ PBAT และยูเรีย เมื่อทำการศึกษาสัณฐานวิทยาที่กำลังขยายสูงขึ้นคือที่ 5,000 เท่าพบว่าจะปรากฏบริเวณแถบสีขาวของ OMMT กระจายอยู่ในเมทริกซ์ PBAT และเมื่อปริมาณของ OMMT ที่ผสมเข้าไปมากขึ้นจะปรากฏบริเวณกลุ่มของ OMMT ที่มารวมกลุ่มกันซึ่งมีลักษณะเป็นบริเวณสีขาวในรูปที่ 4.25 (B-C) โดยซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/O5 จะมีบริเวณกลุ่มก้อนของ OMMT ปรากฏอยู่ชัดเจนเนื่องจากปริมาณของ OMMT มากขึ้นจะส่งผลให้มีแนวโน้มที่จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างฟิลเลอร์-ฟิลเลอร์ จึงทำให้ OMMT เกิดการรวมกลุ่มกัน (agglomeration) [54-56] นอกเหนือจากนี้ จากรูป FE-SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่าพบว่า ในซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/O1 จะปรากฏเฟส PBAT และ OMMT ยึดติดกันได้อย่างดี ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันที่ดีระหว่างเมทริกซ์ PBAT และ OMMT เมื่อปริมาณของ OMMT เพิ่มขึ้นจะปรากฏ Agglomerate ของ OMMT ให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้น โดยจุดสีดำที่ปรากฏชัดเจนในเนื้อของ PBAT ดังแสดงในรูปที่ 4.24 จะพบได้น้อยลงอย่างมากในรูปที่ 4.25 เนื่องจากบริเวณที่เป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักจะเกิดขึ้นที่ระหว่างเฟสของ PBAT กับยูเรียที่ไม่มีความเข้ากันได้นั่นเอง



รูปที่ 4.25 FE-SEM ของพื้นที่หน้าตัดของซีทคอมพอสิต (A) PBAT/u30 (B) PBAT/u30/O1 (C) PBAT/u30/O3 และ (D) PBAT/u30/O5 ที่กำลังขยาย (ซ้าย) 150 (กลาง) 5,000 และ (ขวา) 10,000 เท่า

#### 4.2.1.2 การทดสอบความทึบแสงของซีท



รูปที่ 4.26 UV-vis spectra ของซีทคอมพอลิเมอร์ (A) PBAT/OMMT และ (B) PBAT/u30/OMMT ที่ ปริมาณ OMMT 1 3 5 phr

UV-vis spectra ของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/OMMT และ PBAT/u30/OMMT ที่ได้จากการทดสอบการวัดการดูดกลืนแสงในช่วง UV-visible คือตั้งแต่ความยาวคลื่น 300–800 นาโนเมตรแสดงดังรูปที่ 4.26 (A) และรูปที่ 4.26 (B) ตามลำดับ ค่าความทึบแสงที่คำนวณได้จากการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรแสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.27 พบว่าซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/O1 จะมีค่าความทึบแสงใกล้เคียงกับซีท PBAT ส่วนซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/O3 และ PBAT/O5 มีความทึบ

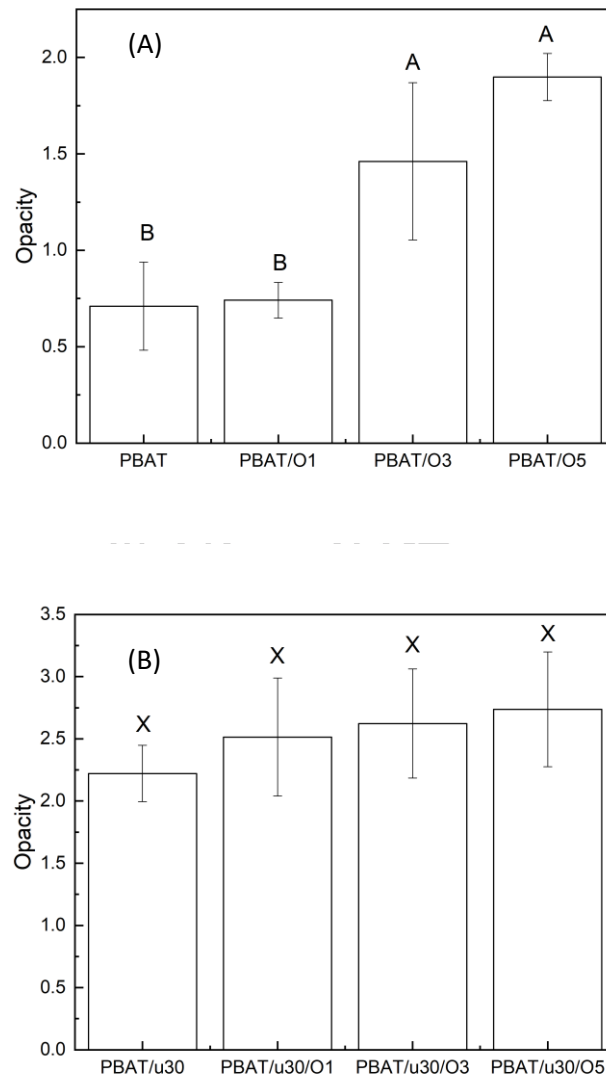
แสงที่เพิ่มขึ้น จากเดิมแล้วซีท PBAT มีค่าเท่ากับ  $0.71\pm 0.23$  จะเพิ่มไปเป็น  $1.46\pm 0.41$  และ  $1.90\pm 0.12$  ตามลำดับ นอกเหนือจากนี้ ซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT จะมีค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/u30 โดยค่าความทึบแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ OMMT ที่มากขึ้น

**ตารางที่ 4.7** ความทึบแสง (Opacity) ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ

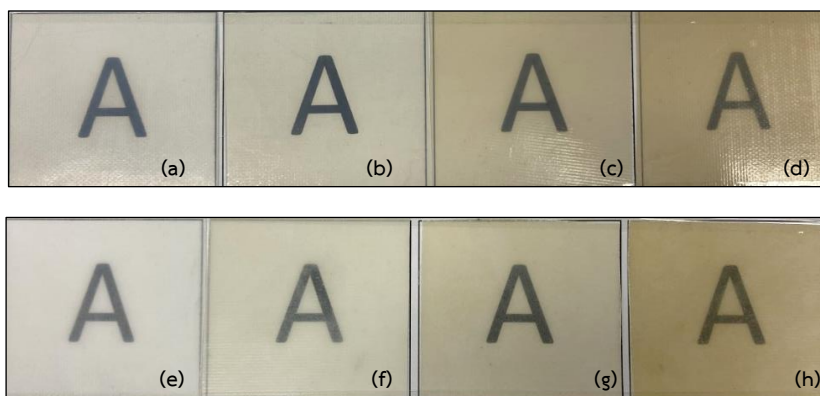
Sample	Opacity
PBAT	$0.71\pm 0.23^B$
PBAT/O1	$0.74\pm 0.09^B$
PBAT/O3	$1.46\pm 0.41^A$
PBAT/O5	$1.90\pm 0.12^A$
PBAT/u30	$2.22\pm 0.23^X$
PBAT/u30/O1	$2.52\pm 0.47^X$
PBAT/u30/O3	$2.62\pm 0.44^X$
PBAT/u30/O5	$2.74\pm 0.46^X$

\*หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

ผลการวัดค่าความทึบแสงจะมีความสอดคล้องกับรูปที่ 4.28 ซึ่งแสดงลักษณะทางกายภาพของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ พบว่าเมื่อมีการผสม OMMT เข้าไปในซีท PBAT จะส่งผลให้ซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/u30/OMMT มีสีน้ำตาลมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีท PBAT และซีทคอมพอสิต PBAT/u30 เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว OMMT เป็นสารที่มีสีน้ำตาล และเมื่อปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้น จะทำให้ซีทมีสีน้ำตาลที่เข้มขึ้น ลักษณะของซีทที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้จะมีสีคล้ายกับฟิล์มในงานวิจัยของ Gabriella A. M. Falcão และคณะ [59] ซึ่งทำการเตรียมฟิล์ม PBAT/OMMT ชนิด C20A พบว่าเมื่อผสม C20A เข้าไปใน PBAT จะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีสีน้ำตาลมากขึ้น โดยเมื่อปริมาณ C20A ที่ผสมมากขึ้น จะส่งผลให้ฟิล์มที่เตรียมได้มีสีค่อนข้างไปทางสีน้ำตาลมากขึ้น



รูปที่ 4.27 ความทึบแสงของซีทคอมพอสิต (A) PBAT/OMMT และ (B) PBAT/urea/OMMT สูตรต่าง ๆ

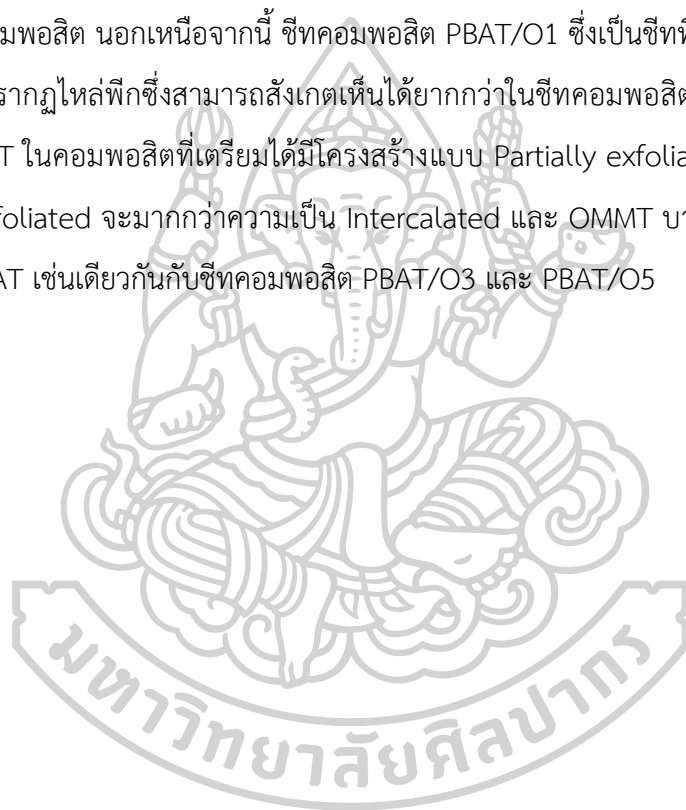


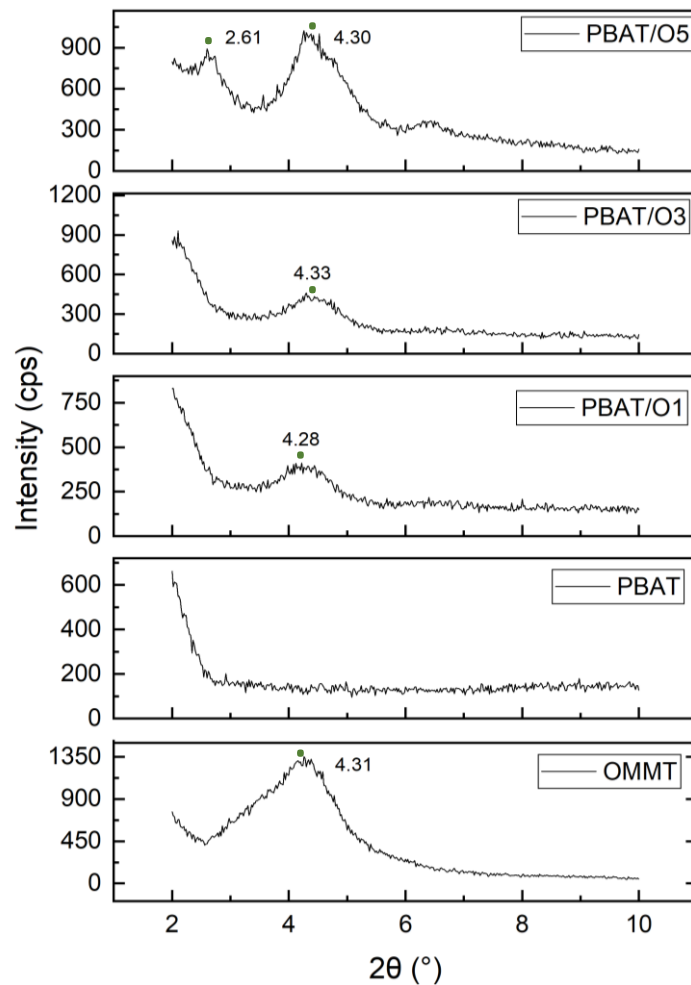
รูปที่ 4.28 ลักษณะปรากฏของซีท (a) PBAT (b) PBAT/O1 (c) PBAT/O3 (d) PBAT/O5 (e) PBAT/u30 (f) PBAT/u30/O1 (g) PBAT/u30/O3 และ (h) PBAT/u30/O5

#### 4.2.1.3 การศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างของคอมพอลิเมอร์

การศึกษาโครงสร้างของซีทคอมพอลิเมอร์ที่เตรียมขึ้นมาจาก PBAT และ OMMT มีความสำคัญต่อการศึกษสมบัติด้านอื่น ๆ ของซีทคอมพอลิเมอร์ฐาน PBAT เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน เป็นต้น ดังนั้นจึงนำซีทคอมพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ไปศึกษาโครงสร้างที่เกิดขึ้นโดยใช้เทคนิค XRD ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงออกมาในรูปแบบ XRD pattern โดย XRD pattern ของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/OMMT ในช่วงมุม  $2\theta$  ระหว่าง  $2-10^\circ$  แสดงดังรูปที่ 4.29 และในช่วงมุม  $2\theta$  ระหว่าง  $10-30^\circ$  แสดงดังรูปที่ 4.30 ซึ่งจาก XRD pattern ที่ทดสอบได้พบว่าแรมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีฟีกเอกลักษณ์ปรากฏที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $4.31^\circ$  ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า d-spacing หรือระยะห่างระหว่างชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งคำนวณได้จากการสะท้อนของระนาบ (001) ได้เท่ากับ 2.05 นาโนเมตร โดยปกติแล้ว OMMT ชนิดนี้จะมีระยะห่างระหว่างชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์ประมาณ 2.4-2.5 นาโนเมตร [51, 60, 61] ในขณะเดียวกันโครงสร้างคอมพอลิเมอร์ระหว่าง PBAT และ OMMT เกิดเป็นคอมพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบไมโคร-นาโนคอมพอลิเมอร์ (micro-nano composite) ซึ่งเมื่อศึกษาซีท PBAT/O5 พบว่าส่วนที่เป็นนาโนคอมพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบ Partially exfoliated/intercalated [62] โดยสามารถสังเกตได้จากปรากฏของฟีกที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $4.30^\circ$  ซึ่งจะมีความเป็น Intercalated มากกว่าความเป็น Exfoliated การปรากฏของมุม  $2\theta$  ที่มีค่าต่ำลงบ่งบอกถึงระยะห่างระหว่างชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์มีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งค่าที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 4.8 เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการสอดแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์จึงทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์มีค่าเพิ่มขึ้น [63, 64] และ OMMT บางส่วนเกิดโครงสร้างแบบไมโครคอมพอลิเมอร์ซึ่งสังเกตได้จากการปรากฏฟีกของ OMMT ที่ตำแหน่ง

ใกล้เคียงกับตำแหน่งพิกัดเดิม ส่วนซีทคอมพอสิต PBAT/O3 ซึ่งเป็นซีทที่มีการเติม OMMT เข้าไป 3 phr พบว่าปรากฏไหล่พิกที่บริเวณมุม 2θ น้อย ๆ ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่า OMMT เกิดโครงสร้างแบบ Partially exfoliated/intercalated โดยความเป็น Exfoliated จะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/O5 เนื่องจากเมื่อผสม OMMT เข้าไปในปริมาณที่ลดลง โอกาสในการเกิดโครงสร้างแบบ Exfoliated ก็คงยิ่งเพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกันกับซีทคอมพอสิต PBAT/O5 จะปรากฏพิกเอกลักษณะของ OMMT ที่มุม 2θ ใกล้เคียงกับมุม 2θ ของ OMMT ที่ไม่ได้นำมาเตรียมเป็นคอมพอสิต ซึ่งจะเกิดเป็นโครงสร้างแบบแยกวัฏภาคหรือ Phase separated structure โดยโครงสร้างแบบนี้จะจัดว่าเป็นแบบไมโครคอมพอสิต นอกเหนือจากนี้ ซีทคอมพอสิต PBAT/O1 ซึ่งเป็นซีทที่มีปริมาณ OMMT น้อยที่สุด พบว่าปรากฏไหล่พิกที่สามารถสังเกตเห็นได้ยากกว่าในซีทคอมพอสิต PBAT/O3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า OMMT ในคอมพอสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบ Partially exfoliated/intercalated โดยความเป็น Exfoliated จะมากกว่าความเป็น Intercalated และ OMMT บางส่วนยังเกิดไมโครคอมพอสิตกับ PBAT เช่นเดียวกันกับซีทคอมพอสิต PBAT/O3 และ PBAT/O5

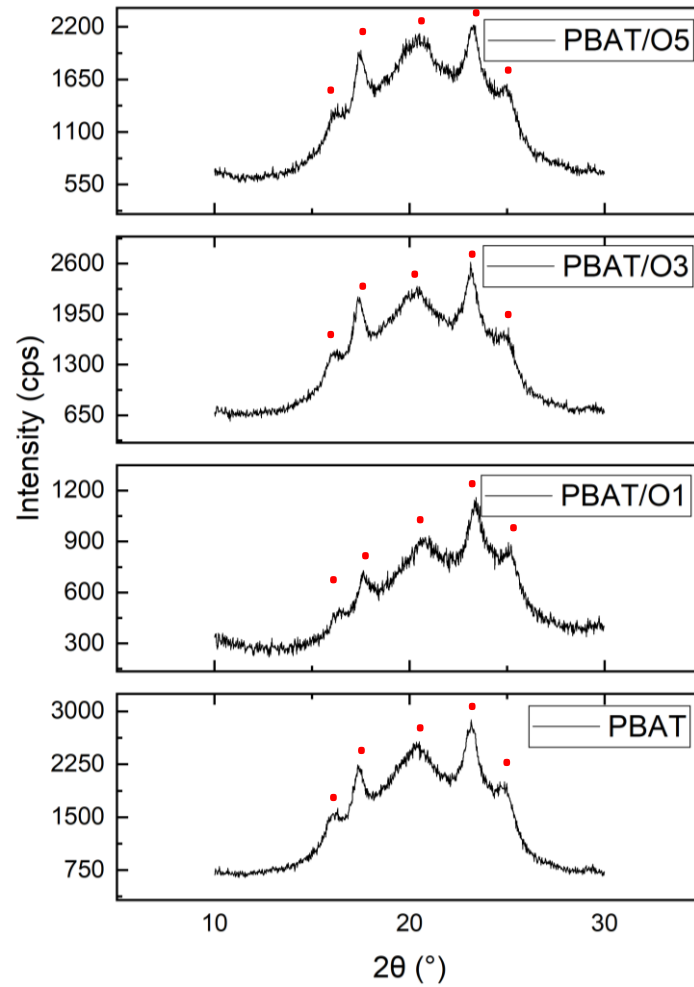




รูปที่ 4.29 XRD pattern ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT สูตรต่าง ๆ ในช่วงมุม  $2\theta$  ระหว่าง  $2-10^\circ$

เมื่อพิจารณาผลของ OMMT ต่อโครงสร้างผลึกของ PBAT พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนเอกลักษณ์ของ PBAT ในซีท PBAT/OMMT มีรูปแบบใกล้เคียงกับ PBAT บริสุทธิ์ซึ่งกล่าวได้ว่าการผสม OMMT เข้าไปจะไม่รบกวนการเกิดโครงสร้างผลึกแบบ  $\alpha$ -form [29] ของ PBAT ถึงแม้ว่าจะมีการผสม OMMT เข้าไปมากถึง 5 phr ก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.30



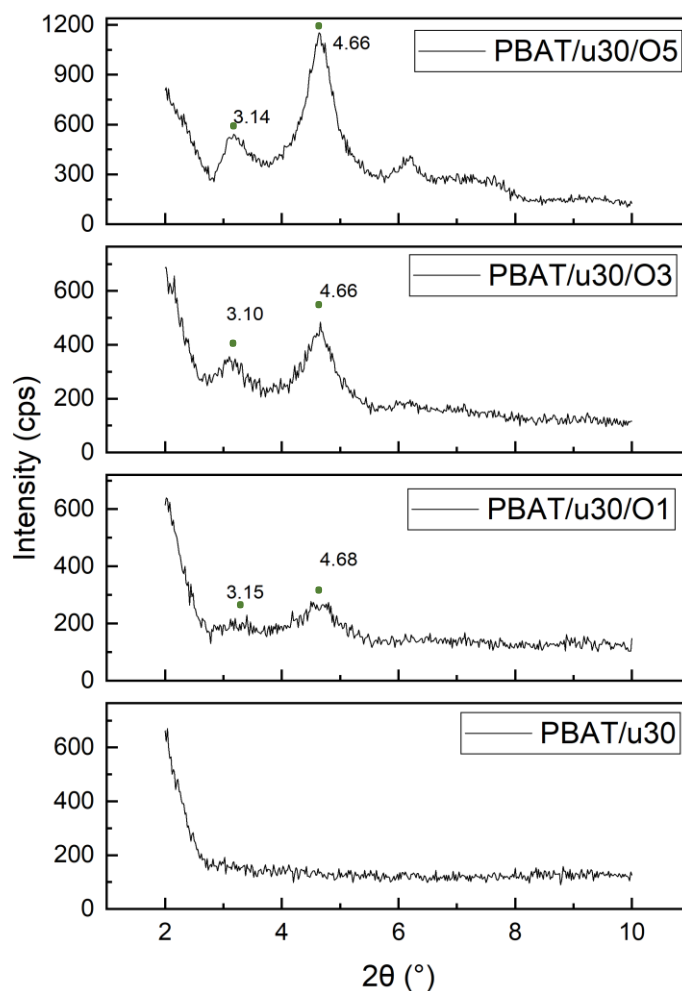


รูปที่ 4.30 XRD pattern ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT สัดส่วนต่าง ๆ ในช่วงมุม  $2\theta$  ระหว่าง  $10^{\circ}$ - $30^{\circ}$

**ตารางที่ 4.8** ค่า d-spacing ของ OMMT และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (degree of crystallinity;  $X_c$ ) ของ PBAT ในซีทแต่ละสูตร

Sample	$d_{001}$ ของ OMMT (nm)	$X_c$ (%)
OMMT	2.05	-
PBAT	-	18.20
PBAT/O1	2.06	17.10
PBAT/O3	4.20, 2.04	17.60
PBAT/O5	3.38, 2.05	15.93

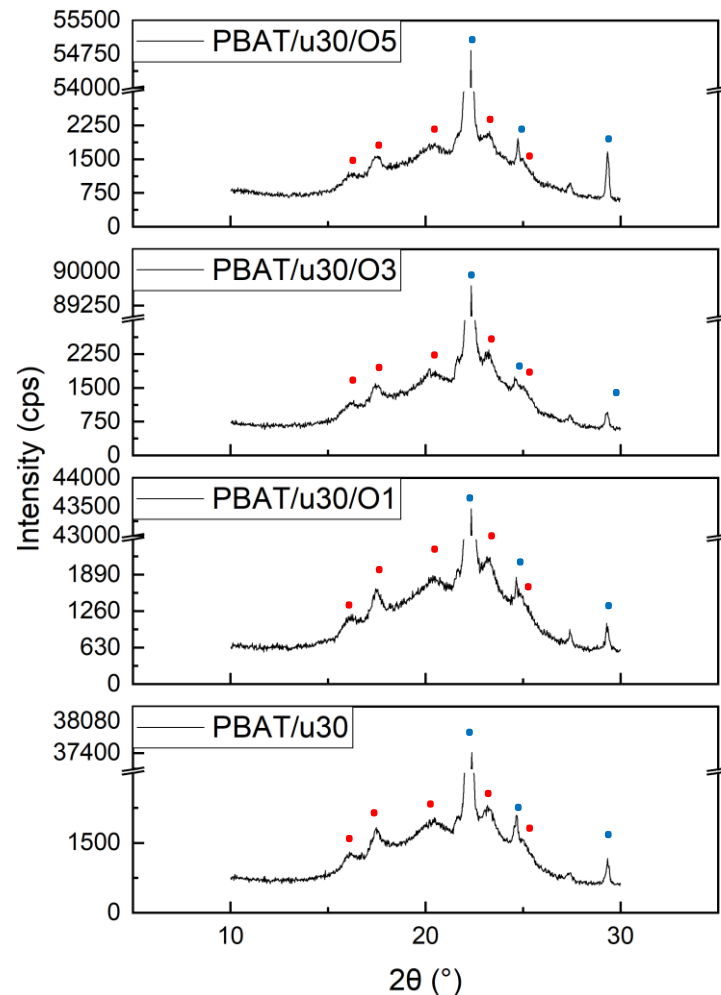
เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (degree of crystallinity;  $X_c$ ) ของซีทคอมพอลิเมอร์แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า PBAT มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเท่ากับ 18.20 ซึ่งโดยปกติแล้ว PBAT จะมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกต่ำคือมีค่าประมาณ 15% [65] ซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/OMMT จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PBAT ลดลง โดยการผสม OMMT ปริมาณน้อย ๆ คือ 1 และ 3 phr จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PBAT มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อผสม OMMT ปริมาณมากขึ้นคือ 5 phr ส่งผลให้ปริมาณผลึกของ PBAT ลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากการรวมกลุ่มกันเองของ OMMT ทำให้ OMMT มีพื้นที่ผิวลดลง ทำให้สามารถเหนี่ยวนำให้ PBAT เกิดผลึกได้น้อยลง จากรูปที่ 4.24 (C) ซึ่งเป็นรูป FE-SEM ของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/O5 จะปรากฏบริเวณกลุ่มขนาดใหญ่ของ OMMT เป็นผลให้เกิดการขัดขวางการเข้ามารวมกันของสายโซ่ PBAT เพื่อเกิดผลึก จากงานวิจัยของ Frédéric Chivrac และคณะ [66] ได้ทำการศึกษาปริมาณผลึกของ PBAT เมื่อนำไปทำเป็นคอมพอลิเมอร์ PBAT/MMT จากการศึกษาพบว่า MMT ที่ผสมเข้าไปจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PBAT มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ PBAT บริสุทธิ์เนื่องจาก MMT จะไปขัดขวางการเกิดผลึกของ PBAT ดังนั้นการผสม OMMT ซึ่งถือว่าเป็นฟิลเลอร์ชนิดหนึ่งจึงเป็นที่มาของการลดลงของเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.31 XRD pattern ของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ในช่วงมุม  $2\theta$  ระหว่าง  $2-10^\circ$

ตารางที่ 4.9 ค่า  $d_{001}$  ของ OMMT

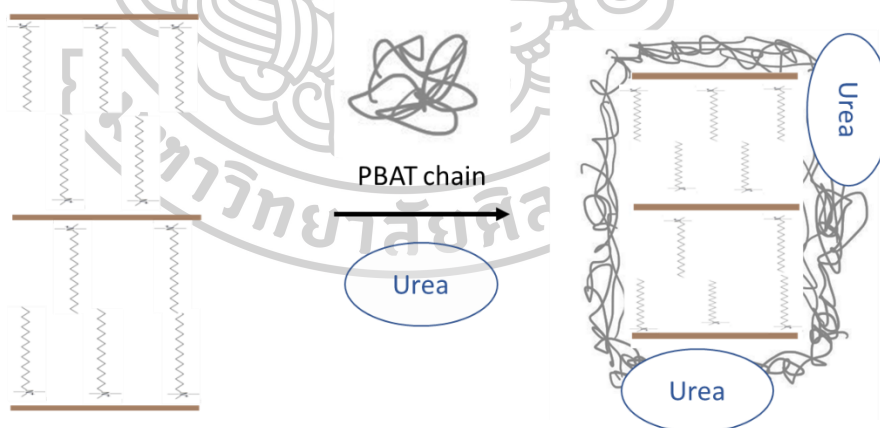
Sample	$d_{001}$ ของ OMMT (nm)
PBAT/u30	-
PBAT/u30/O1	2.80, 1.89
PBAT/u30/O3	2.85, 1.89
PBAT/u30/O5	2.81, 1.89



รูปที่ 4.32 XRD pattern ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ในช่วงมุม  $2\theta$  ระหว่าง  $10-30^\circ$

เมื่อนำ PBAT OMMT และยูเรียมาเตรียมเป็นซีทคอมพอสิตแล้วนำไปศึกษาโครงสร้างของคอมพอสิตที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการทดสอบในช่วงมุม  $2\theta$  ระหว่าง  $2-10^\circ$  แสดงดังรูปที่ 4.31 และในช่วงมุม  $2\theta$  ระหว่าง  $10-30^\circ$  แสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่าซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ปรากฏพีกเอกลักษณ์ของ OMMT เลื่อนมุม  $2\theta$  มาที่มุมต่ำลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอมพอสิตที่เกิดขึ้นเป็นคอมพอสิตแบบ Intercalated โดยซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 PBAT/u30/O3 และ PBAT/u30/O5 จะปรากฏพีก  $2\theta$  ของ OMMT ที่มุม  $3.15^\circ$   $3.10^\circ$  และ  $3.14^\circ$  ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณค่า d-spacing ได้เท่ากับ 2.80 2.85 และ 2.81 นาโนเมตรตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า d-spacing เมื่อเทียบกับค่า d-spacing ของ OMMT ที่ไม่ผ่านการนำมาทำเป็นคอมพอสิตสามารถบ่งบอกได้ว่า

คอมพอสิตที่เกิดขึ้นเป็นแบบ Intercalated โดยในส่วนนี้จะจัดว่าเป็นนาโนคอมพอสิต และยังมี OMMT บางส่วนที่เกิดโครงสร้างคอมพอสิตแบบแยกวัฏภาคหรือ Phase separated structure ซึ่งจัดว่าเป็นไมโครคอมพอสิต โดยสังเกตจากพีกเอกลักษณ์ของ OMMT ที่ปรากฏที่มุม  $2\theta$  เลื่อนไปที่มุมที่มีค่ามากขึ้น คือ  $4.68^\circ$   $4.66^\circ$  และ  $4.66^\circ$  ในซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 PBAT/u30/O3 และ PBAT/u30/O5 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่า d-spacing ของ OMMT มีค่าลดลง จากการทดสอบ XRD ยังพบอีกว่าเมื่อปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้นจะยิ่งส่งผลให้ส่วนที่เป็นไมโครคอมพอสิตเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่า d-spacing จากตารางที่ 4.9 กับ d-spacing ของ OMMT ในซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า OMMT ในซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT จะมีค่า d-spacing ลดลง อาจกล่าวได้ว่ายูเรียที่ผสมเข้าไปมีผลต่อค่า d-spacing ของ OMMT โดยยูเรียซึ่งเป็นฟิลเลอร์ที่มีความแข็งเกร็งและเติมในปริมาณมากถึง 30%wt เมื่ออยู่ในระหว่างกระบวนการผสมและขึ้นรูปอาจจะทำให้ OMMT ได้รับแรงกดที่ผิวของอนุภาค ส่งผลให้ OMMT แต่ละชั้นขยับมาใกล้กันมากขึ้น เพราะ OMMT แต่ละชั้นนั้นจะถูกปรับปรุงด้วยสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange process) ที่มีลักษณะเป็นไฮโดรคาร์บอนสายยาว ซึ่ง OMMT แต่ละชั้นจะมีสารอินทรีย์ที่มีประจุบวกประกบอยู่ทั้งสองด้าน ดังนั้นไฮโดรคาร์บอนสายยาวของ OMMT อีกชั้นหนึ่งจะไปผลักให้ชั้นของ OMMT ที่อยู่ติดกัน เคลื่อนที่เข้าชิดกันมากขึ้น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้แสดงดังรูปที่ 4.33



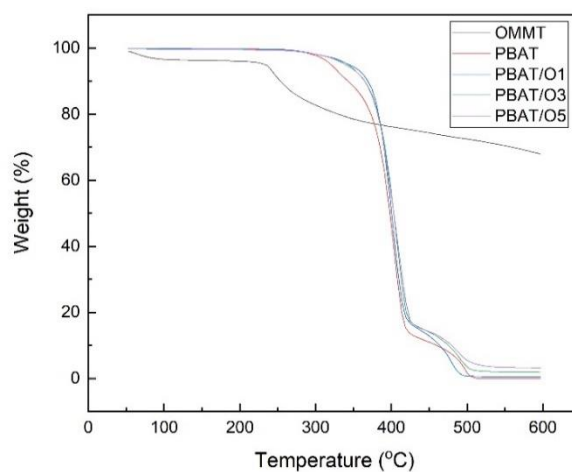
รูปที่ 4.33 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของซีท PBAT/u30/OMMT ที่ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของ OMMT แคบลง

เมื่อพิจารณาผลของ OMMT ต่อโครงสร้างผลึกของ PBAT ซึ่งศึกษาได้จากรูปที่ 4.32 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนเอกลักษณ์ของ PBAT ในซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT มีลักษณะใกล้เคียง

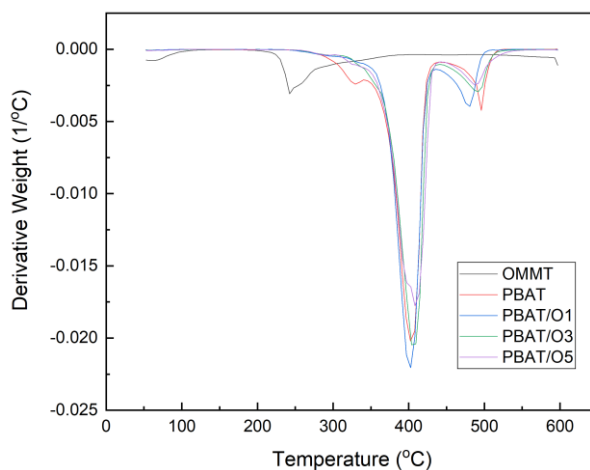
กับ PBAT บริสุทธิ์ จึงกล่าวได้ว่าการผสม OMMT เข้าไปจะไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกของ PBAT ซึ่งยังคงเป็นผลึกแบบ  $\alpha$ -form [29]

#### 4.2.2 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/urea/OMMT

##### 4.2.2.1 การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน



รูปที่ 4.34 TGA thermogram ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน



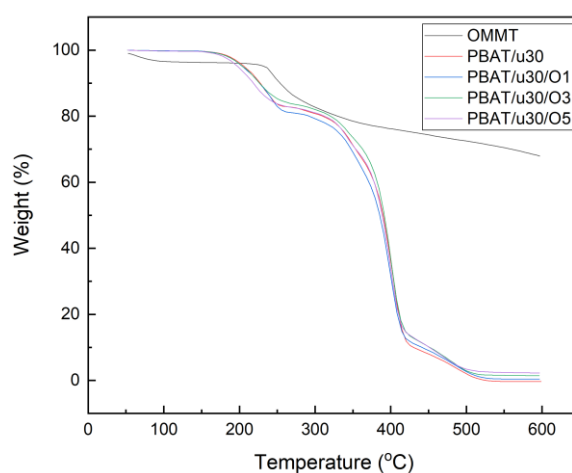
รูปที่ 4.35 DTG thermogram ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

**ตารางที่ 4.10** ผลการทดสอบ TGA ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

Sample	T <sub>5%</sub> (°C)	OMMT Td <sub>1</sub> (°C)	PBAT			Residue at 600°C (%)
			Td <sub>1</sub> (°C)	Td <sub>2</sub> (°C)	Td <sub>3</sub> (°C)	
OMMT	233.16	242.31	-	-	-	67.89
PBAT	320.43	-	327.87	403.83	496.65	0.00
PBAT/O1	344.08	-	-	401.34	479.18	0.45
PBAT/O3	342.61	-	-	406.23	492.60	1.86
PBAT/O5	339.07	-	-	409.82	489.06	3.18

เสถียรภาพทางความร้อนของซีทคอมพอสิตที่เตรียมขึ้นมาได้นั้นสามารถศึกษาได้จากเทคนิค Thermogravimetry analysis หรือ TGA ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.34 จาก TGA thermogram ของ OMMT ชนิด I.28E พบว่า OMMT ชนิดนี้มีการสลายตัวทั้งหมด 2 ชั้นในช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 600°C ในขั้นแรกที่มีการลดลงของน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 54-85°C เป็นการคายความชื้น [67] และการระเหยของไอน้ำออกจาก OMMT [68] ส่วนการลดลงของน้ำหนักในขั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของ Octadecyl trimethyl ammonium [51] ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการปรับปรุงแรมอนต์มอริลโลไนต์ที่แทรกอยู่ในแต่ละชั้นของแรมอนต์มอริลโลไนต์โดยจะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 233 ถึง 280°C จากตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นข้อมูลที่รวบรวมมาจาก TGA thermogram และจาก DTG thermogram ดังรูปที่ 4.35 พบว่าการผสม OMMT เข้าไปในเมทริกซ์ PBAT จะช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของ PBAT ให้ดีขึ้น คืออุณหภูมิที่น้ำหนักของสารหายไป 5% หรือ T<sub>5%</sub> ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT จะมีค่าสูงกว่าซีท PBAT บริสุทธิ์ เนื่องจาก OMMT จะทำหน้าที่เป็นตัวขวางกั้นความร้อนในช่วงแรกของการเกิดการสลายตัวทางความร้อน และยังทำให้การระเหยของสารโมเลกุลเล็กเกิดการระเหยได้ช้าลง [51, 69] ซึ่งผลการทดสอบนี้จะสอดคล้องกับผลการทดสอบ XRD คือ OMMT จะเกิดโครงสร้างคอมพอสิตแบบไมโคร-นาโนซึ่งจะส่งผลให้เกิดการปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของซีท PBAT/OMMT ขึ้น นอกเหนือจากนี้ เมื่อปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้น อุณหภูมิ T<sub>5%</sub> ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT จะลดลงตามปริมาณของ OMMT ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณ OMMT มากขึ้นส่งผลให้จะมี Octadecyl trimethyl ammonium ปริมาณมากขึ้น ซึ่งสารนี้จะมีอุณหภูมิในการสลายตัวที่ต่ำกว่า PBAT จึงทำให้เมื่อปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้น เสถียรภาพทางความร้อนของซีท PBAT/OMMT จึงแย่งลง นอกเหนือจากนี้ ทำการศึกษาค่าอุณหภูมิการสลายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ จากตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจาก DTG thermogram T<sub>d2</sub> ของ PBAT ใน

ซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสม OMMT เข้าไปในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิ  $T_{d2}$  นี้เป็นขั้นการสลายตัวหลักของ PBAT ดังนั้นผลของการสลายตัวของ Octadecyl trimethyl ammonium จึงแสดงผลออกมาน้อยกว่าการทำหน้าที่ของ OMMT ในการเป็นตัวขวางกั้นความร้อนและขวางกั้นการระเหยของสารโมเลกุลเล็ก เมื่อพิจารณาถึงน้ำหนักที่เหลือที่อุณหภูมิ  $600^{\circ}\text{C}$  OMMT มีน้ำหนักที่เหลือคือ 67.89% ส่วนซีท PBAT มีน้ำหนักเหลืออยู่ 0.00% เมื่อผสม OMMT เข้าไปใน PBAT จะส่งผลให้ซีทคอมพอสิต PBAT/O1 PBAT/O3 และ PBAT/O5 มีน้ำหนักที่เหลือเท่ากับ 0.45 1.86 และ 3.18 ซึ่งน้ำหนักที่เหลือจะมีค่ามากขึ้นตามปริมาณ OMMT ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิ  $600^{\circ}\text{C}$  OMMT ยังไม่เกิดการสลายตัวไปจนหมด

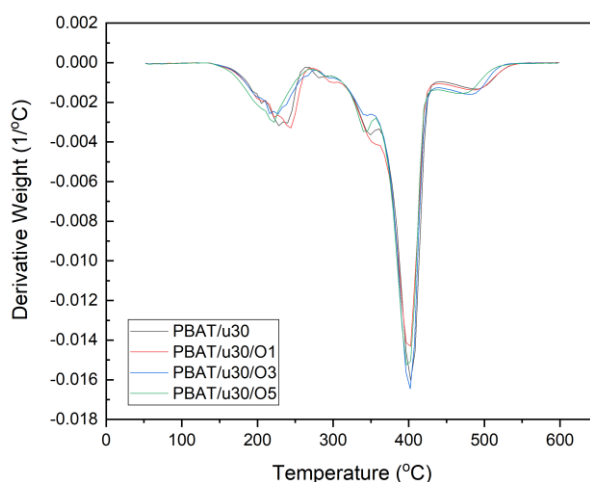


รูปที่ 4.36 TGA thermogram ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบ TGA ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

Sample	$T_{5\%}$ (°C)	Urea	PBAT			Residue at 600°C (%)
		$T_{d1}$ (°C)	$T_{d1}$ (°C)	$T_{d2}$ (°C)	$T_{d3}$ (°C)	
PBAT/u30	206.61	230.22	346.01	403.91	493.36	0.00
PBAT/u30/O1	204.21	242.00	347.68	400.80	490.03	0.39
PBAT/u30/O3	204.62	226.17	340.11	401.11	486.11	1.43
PBAT/u30/O5	197.82	220.36	341.43	400.05	477.28	2.23



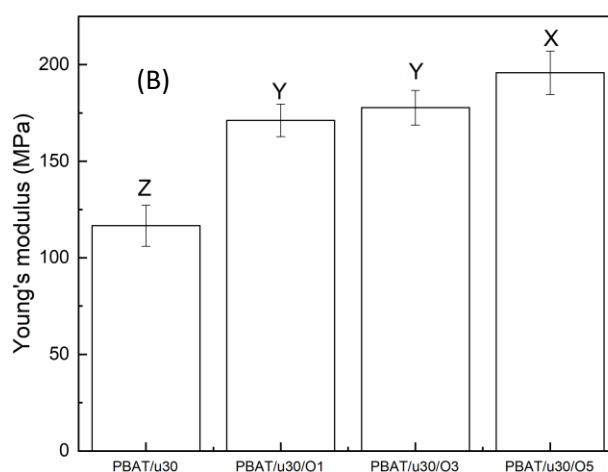
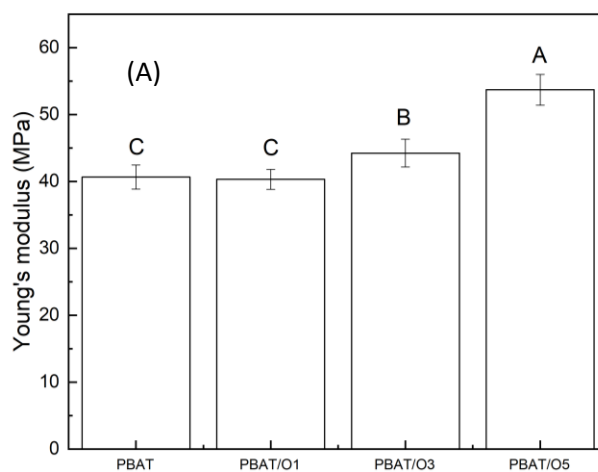


**รูปที่ 4.37** DTG thermogram ของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

เสถียรภาพทางความร้อนของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/OMMT ที่ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนสามารถศึกษาได้จาก TGA thermogram ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.36 และ DTG thermogram ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.37 ข้อมูลที่รวบรวมได้มาจากทั้ง TGA และ DTG thermogram จะถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 4.11 พบว่าซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/OMMT มีค่าอุณหภูมิที่น้ำหนักของสารหายไป 5% หรือ  $T_{5\%}$  ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30 โดยจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของ OMMT ในซีทคอมพอลิเมอร์มากขึ้น เพราะเมื่อปริมาณ OMMT มากขึ้นส่งผลให้จะมีสารที่ใช้ปรับปรุง OMMT ซึ่งมีลักษณะเป็นไฮโดรคาร์บอนสายยาวในปริมาณมากขึ้น ซึ่งสารนี้จะมีอุณหภูมิในการสลายตัวที่ต่ำกว่า PBAT จึงทำให้เมื่อปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้นเสถียรภาพทางความร้อนของซีท PBAT/OMMT จึงแย่งลง นอกเหนือจากนี้ทำการศึกษาค่าอุณหภูมิการสลายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ จากตารางที่ 4.11 ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจาก DTG thermogram อุณหภูมิ  $T_{d1}$  ของยูเรียในซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/OMMT จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยเมื่อปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มลดลง ในขณะเดียวกัน อุณหภูมิ  $T_{d1}$  และ  $T_{d3}$  ของ PBAT ในซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/OMMT จะมีค่าลดลงเมื่อมีการผสม OMMT เข้าไปในซีท PBAT เพราะอิทธิพลของการสลายตัวของ Octadecyl trimethyl ammonium ซึ่งเป็นสารที่อยู่ระหว่างแต่ละชั้นของ OMMT โดยเมื่อปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้น สารนี้จะมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนอุณหภูมิ  $T_{d2}$  ของ PBAT ในซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/OMMT จะมีค่าใกล้เคียงกับ  $T_{d2}$  ของ PBAT ในซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30 เมื่อเปรียบเทียบซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/OMMT (ตารางที่ 4.10) และซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/OMMT (ตารางที่ 4.11) พบว่าค่าอุณหภูมิที่น้ำหนักของสารหายไป 5% หรือ  $T_{5\%}$  ของ

ซีทสูตรที่มียูเรียจะมีค่าต่ำกว่าซีทที่ไม่มีการผสมยูเรียที่ปริมาณการผสม OMMT เท่ากัน เนื่องจากยูเรียมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่า PBAT เมื่อพิจารณาถึงน้ำหนักที่เหลือที่อุณหภูมิ 600 °C ซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30 มีน้ำหนักเหลืออยู่ 0.00% เมื่อเปรียบเทียบกับซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/OMMT พบว่าซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/O1 PBAT/u30/O3 และ PBAT/u30/O5 มีน้ำหนักที่เหลือเท่ากับ 0.39 1.43 และ 2.23% ซึ่งน้ำหนักที่เหลือจะเป็นส่วนของ OMMT ที่ยังสลายตัวไม่หมดที่อุณหภูมิที่ทำการศึกษา โดยน้ำหนักที่เหลือจะมีค่ามากขึ้นตามปริมาณ OMMT ที่เพิ่มขึ้น

#### 4.2.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล



รูปที่ 4.38 Young's modulus ของซีทคอมพอลิเมอร์ (A) PBAT/OMMT และ (B) PBAT/urea/OMMT

สูตรต่าง ๆ

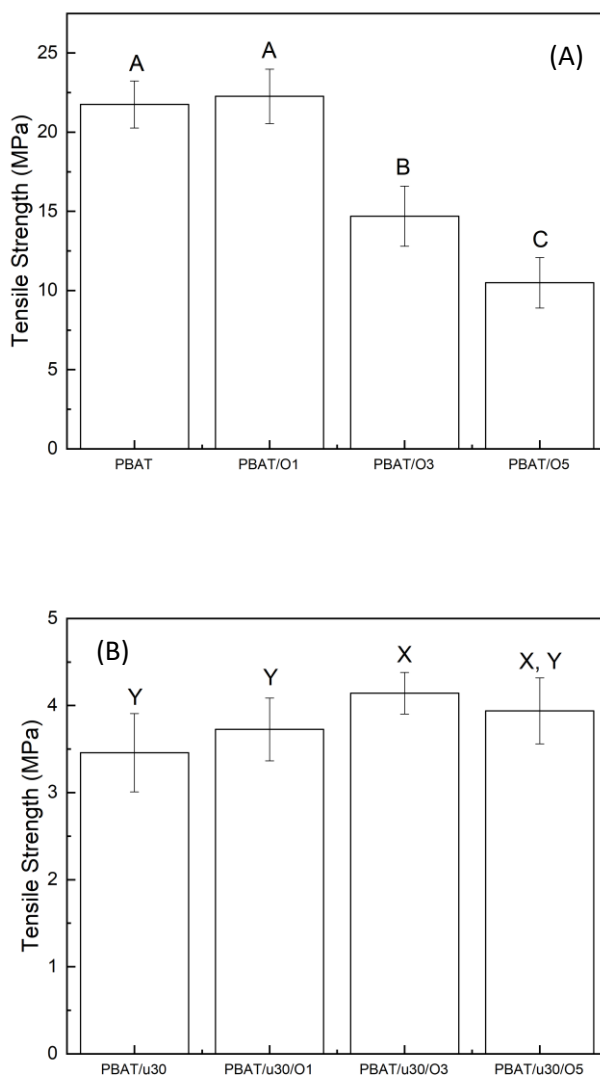
**ตารางที่ 4.12** ค่า Young's modulus, Tensile strength และ % Elongation at break ของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT สูตรต่าง ๆ

Sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	% Elongation at Break (%)
PBAT	40.66±1.81 <sup>C</sup>	21.75±1.49 <sup>A</sup>	1,078.56±59.47 <sup>A</sup>
PBAT/O1	40.31±1.47 <sup>C</sup>	22.27±1.72 <sup>A</sup>	1,128.25±92.49 <sup>A</sup>
PBAT/O3	44.22±2.08 <sup>B</sup>	14.69±1.90 <sup>B</sup>	879.91±133.89 <sup>B</sup>
PBAT/O5	53.69±2.29 <sup>A</sup>	10.49±1.59 <sup>C</sup>	466.38±159.75 <sup>C</sup>
PBAT/u30	116.63±10.61 <sup>Z</sup>	3.46±0.45 <sup>Y</sup>	88.19±24.19 <sup>X</sup>
PBAT/u30/O1	171.11±8.39 <sup>Y</sup>	3.73±0.36 <sup>Y</sup>	58.44±14.60 <sup>Y, Z</sup>
PBAT/u30/O3	177.69±8.90 <sup>Y</sup>	4.14±0.24 <sup>X</sup>	62.57±10.02 <sup>Y</sup>
PBAT/u30/O5	195.76±11.32 <sup>X</sup>	3.94±0.38 <sup>X, Y</sup>	44.86±12.21 <sup>Z</sup>

\*หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/OMMT และ PBAT/urea/OMMT จะได้ผลการทดสอบดังนี้ จากรูปที่ 4.38 (A) พบว่าเมื่อมีการนำ OMMT ไปผสมกับ PBAT จะส่งผลให้ค่า Young's modulus ของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/OMMT มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับซีท PBAT เนื่องจากการผสม OMMT ที่มีความแข็งเกร็ง (rigid) เข้าไปในเมทริกซ์ PBAT ที่มีความอ่อนนุ่มกว่าจึงส่งผลให้ซีท PBAT/OMMT มีความแข็งเกร็งที่มากขึ้น [70] เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.12 พบว่าค่า Young's modulus ของซีท PBAT มีค่าเท่ากับ 40.66±1.81 ส่วนซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/O1 PBAT/O3 และ PBAT/O5 มีค่า Young's modulus เท่ากับ 40.31±1.47 44.22±2.08 และ 53.69±2.29 ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าการผสม OMMT เข้าไปในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า Young's modulus ของซีท PBAT/OMMT มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกเหนือจากนี้ จากการทดสอบ XRD พบว่าโครงสร้างของคอมพอลิเมอร์ PBAT/OMMT บางส่วนเกิดโครงสร้างแบบ Partially exfoliated/intercalated และบางส่วนเกิดโครงสร้างแบบ Phase separated structure ซึ่งโครงสร้างแบบ Exfoliated จะส่งผลให้ค่า Young's modulus ของซีทคอมพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก ค่า Young's modulus จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราส่วนลักษณะ (aspect ratio) ของฟิลเลอร์ โดยเมื่อเกิดโครงสร้างแบบ Exfoliated OMMT จะมีอัตราส่วนลักษณะที่สูงมาก [71] ซึ่ง

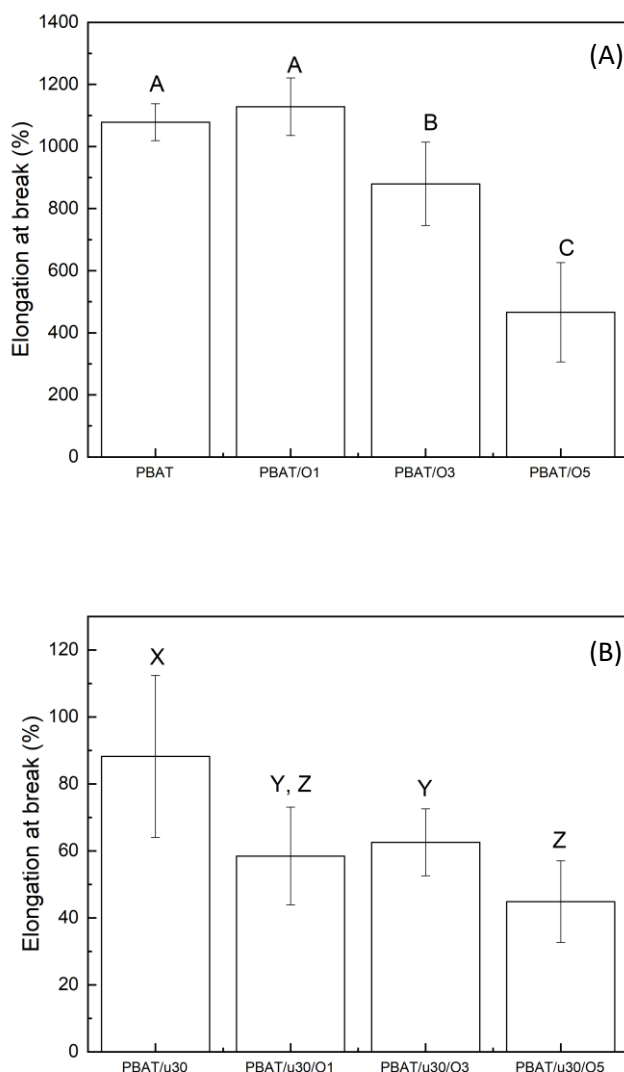
จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวบริเวณที่เกิดการเสริมแรงโดยฟิลเลอร์ [72] และในโครงสร้างที่เป็นแบบ Intercalated สายโซ่ PBAT จะสอดแทรกอยู่ในระหว่างแต่ละชั้นของ OMMT จึงทำให้สายโซ่ PBAT เหล่านั้นถูกจำกัดการเคลื่อนไหว [73] ส่วนซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ซึ่งผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.38 (B) จะมีค่า Young's modulus ที่สูงกว่าซีทคอมพอสิต PBAT/u30 เนื่องจากทั้ง ยูเรียและ OMMT จะทำหน้าที่เป็นฟิลเลอร์ที่แข็งแรง ซึ่งยูเรียและ OMMT จะส่งผลร่วมกันให้ค่า Young's modulus ของซีท PBAT มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า Young's modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.39 Tensile strength ของซีทคอมพอสิต (A) PBAT/OMMT และ (B) PBAT/urea/OMMT

สูตรต่าง ๆ

ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาถึงค่า Tensile strength ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.39 (A) พบว่าค่า Tensile strength ของซีทคอมพอสิต PBAT/O1 มีค่าใกล้เคียงกับซีท PBAT ในขณะที่เดียวกันจากตารางที่ 4.12 พบว่าซีทคอมพอสิต PBAT/O3 และ PBAT/O5 จะมีค่า Tensile strength เท่ากับ  $14.69 \pm 1.90$  และ  $10.49 \pm 1.59$  ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการผสม OMMT เข้าไปในเมทริกซ์ PBAT ปริมาณ 3 และ 5 phr จะส่งผลให้ค่า Tensile strength ของ PBAT มีค่าลดลง เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างฟิลเลอร์-ฟิลเลอร์ที่มากขึ้น จะส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันของ OMMT โดยเมื่อมีการให้แรงดึงแก่ชิ้นงาน แรงที่ให้จะเกิดการถ่ายโอนจากเฟสต่อเนื่องคือ PBAT ไปยัง OMMT ซึ่งเป็นเฟสกระจาย การยึดติดกันระหว่างเฟสของ PBAT และ OMMT ที่ไม่ดีจะส่งผลให้บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสนั้นกลายเป็นจุดศูนย์รวมแรงเค้น (stress concentration) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นทำให้เกิดการแตกหักของซีทขึ้น ชิ้นงานจึงเกิดการทนแรงที่ได้รับน้อยลง [74, 75] เมื่อเปรียบเทียบค่า Tensile strength ระหว่างซีทคอมพอสิต PBAT/O3 และ PBAT/O5 พบว่าเมื่อปริมาณ OMMT ที่ผสมเข้าไปเพิ่มมากขึ้นจะยิ่งส่งผลให้ค่า Tensile strength มีค่าลดลง เนื่องจากการเติม OMMT เข้าไปในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้เกิดแนวโน้มที่ PBAT จะไปเปียกผิว OMMT ทั้งหมดที่ผสมเข้าป็นันเกิดได้ยากขึ้น [41] และจากรูปที่ 4.24 (B-C) ซึ่งเป็นรูป FE-SEM ของซีทคอมพอสิต PBAT/O3 และ PBAT/O5 จะปรากฏบริเวณสีขาวของกลุ่ม OMMT จะเป็นการยืนยันการเกิดอันตรกิริยาระหว่างฟิลเลอร์-ฟิลเลอร์ที่มากขึ้น โดยบริเวณที่เริ่มเกิดการแตกหักจะเริ่มเกิดที่บริเวณที่เกิดการรวมกลุ่มกันของ OMMT จากการทดสอบด้วยเทคนิค XRD พบว่า โครงสร้างคอมพอสิตที่เกิดขึ้นยังมี OMMT บางส่วนที่ยังเกิดเป็นไมโครคอมพอสิตซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงการรวมกลุ่มกันของ OMMT นอกเหนือจากนี้ ค่า Tensile strength ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT จากรูปที่ 4.39 (B) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงการเติม OMMT 1-3 phr และจะลดลงเมื่อเติม OMMT 5 phr แต่ค่า Tensile strength ดังกล่าวแทบจะไม่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ กล่าวคือซีท PBAT ที่มีการผสมยูเรียอยู่แล้ว 30%wt เมื่อมีการผสม OMMT เข้าไปเพิ่มการผสม OMMT ที่ปริมาณ 1 3 และ 5 phr จะไม่ส่งผลต่อค่า Tensile strength ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ซึ่งจากรูปที่ 4.25 (B-C) พบว่าจุดสีดำที่เป็นจุดเริ่มการแตกหักนั้นจะมีปริมาณที่ลดลงเป็นอย่างมาก โดยในระบบนี้การแตกหักจะเกิดที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของ PBAT และยูเรีย



รูปที่ 4.40 Elongation at break ของซีทคอมพอสิต (A) PBAT/OMMT และ (B) PBAT/urea/OMMT สูตรต่าง ๆ

ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT มีค่าลดลงเทียบกับซีท PBAT เพราะเมื่อมีการผสมฟิลเลอร์เข้าไปในพอลิเมอร์ อนุภาคของฟิลเลอร์เหล่านั้นจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ไปตามแรงดึงที่ให้ จึงส่งผลให้การยืดออกของชิ้นงานเกิดได้ยากขึ้น [42, 70] ซึ่ง OMMT ถือเป็นฟิลเลอร์ชนิดหนึ่ง จากผลการทดสอบดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.40 เป็นการยืนยันว่าการผสม OMMT เข้าไปในเมทริกซ์ PBAT จะส่งผลให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของ PBAT มีค่าลดลง แต่ซีทที่มีการเติม OMMT เพียง 1 phr คือซีทคอมพอสิต PBAT/O1 OMMT จะไม่ส่งผลต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาดของ PBAT ในขณะที่เมื่อปริมาณของ

OMMT ที่ผสมเข้าไปมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าระยะยึด ผน จุดขาดมีค่าลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในซีทคอมพอสิต PBAT/O5 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $466.38 \pm 159.75\%$  เนื่องจากการเกิด Aggregation ของ OMMT จะเป็นบริเวณที่เกิดจุดศูนย์รวมแรงเค้นซึ่งจะเป็นบริเวณที่เริ่มเกิดการแตกหัก [76] ในขณะเดียวกันจากตารางที่ 4.12 พบว่าค่าระยะยึด ผน จุดขาดของซีทคอมพอสิต PBAT/urea/OMMT มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30 แต่ค่าที่ลดลงนั้นมีค่าใกล้เคียงกันทั้งในซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 PBAT/u30/O3 และ PBAT/u30/O5 ผลการทดสอบนี้จะสอดคล้องกับรูป FE-SEM ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ คือเมื่อผสมยูเรียเข้าไปในเมทริกซ์ PBAT จะส่งผลให้บริเวณที่เป็นเมทริกซ์ PBAT มีความเปราะ (brittle) มากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากการปรากฏของพื้นผิวที่ราบเรียบมากขึ้น นอกเหนือจากนี้ โครงสร้างคอมพอสิตระหว่าง PBAT OMMT และยูเรียที่เกิดขึ้นยังส่งผลต่อการยึดออกของชิ้นงานในระหว่างการทดสอบ กล่าวคือโครงสร้างแบบ Intercalated ที่เกิดขึ้นทั้งในซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/u30/OMMT จะส่งผลให้สายโซ่ที่สอดแทรกอยู่ภายในชั้นของ OMMT ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเมื่อได้รับแรงดึง จึงทำให้ความสามารถในการยึดออกของชิ้นงานลดลง [73]

#### 4.2.2.3 การวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ (water contact angle)

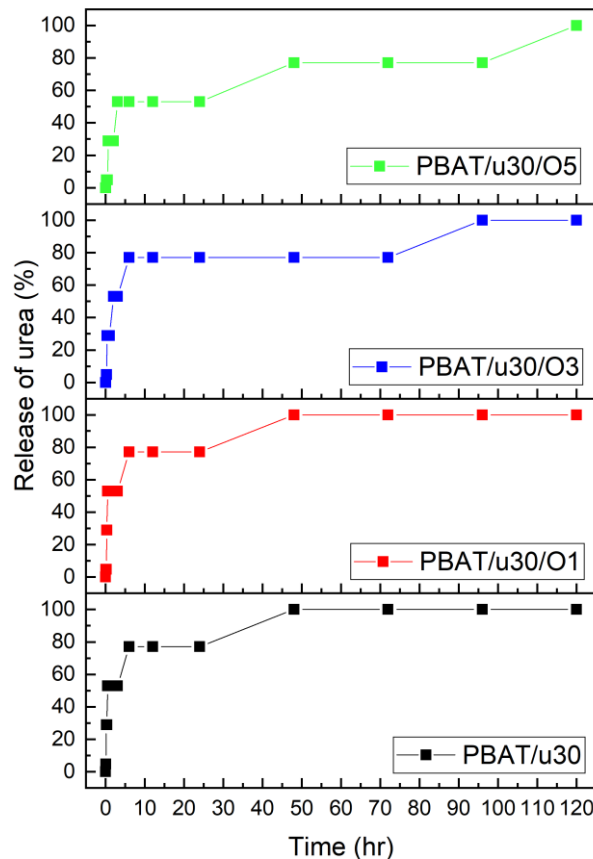
ตารางที่ 4.13 มุมสัมผัสของหยดน้ำ (contact angle) ที่เวลา 0 ถึง 2 วินาทีของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/urea/OMMT สูตรต่าง ๆ

ชิ้นงานตัวอย่าง	มุมสัมผัสของหยดน้ำ (°)				
	0.0s	0.5s	1.0s	1.5s	2.0s
PBAT	76.0	76.0	76.0	76.0	76.0
PBAT/O1	76.8	76.8	76.8	76.8	76.8
PBAT/O3	77.7	77.7	77.7	77.7	77.7
PBAT/O5	80.7	80.7	80.7	80.6	80.6
PBAT/u30	44.1	44.2	44.4	44.1	44.4
PBAT/u30/O1	50.4	45.5	40.8	36.0	32.2
PBAT/u30/O3	55.0	45.5	44.6	43.1	43.0
PBAT/u30/O5	60.6	56.7	56.4	56.3	56.2

มูมสัมผัสของหยดน้ำที่เวลา 0 ถึง 2 วินาทีของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และ PBAT/urea/OMMT สูตรต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.13 เมื่อพิจารณาซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT พบว่าเมื่อมีการผสม OMMT เข้าไปจะส่งผลให้ค่ามูมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าใกล้เคียงกับซีท PBAT ในกรณีที่เป็นซีทคอมพอสิต PBAT/O1 ในขณะที่เดียวกัน ซีทคอมพอสิต PBAT/O3 และ PBAT/O5 พบว่าค่ามูมสัมผัสของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าซีทนั้นมีความชอบน้ำที่ลดลง ซึ่งผลการทดสอบที่ได้นี้บ่งชี้ให้เห็นว่า OMMT มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ เนื่องจาก OMMT ชนิด I.28E จะเป็น MMT ที่ถูกปรับปรุงด้วย Octadecyl trimethyl ammonium ซึ่งทำให้ MMT ที่โดยปกติแล้วจะมีสมบัติชอบน้ำ [77] จะมีส่วนของไฮโดรคาร์บอนสายยาวเพิ่มเข้ามาจากส่วนที่เป็น Octadecyl trimethyl ammonium จึงทำให้ความชอบน้ำของ MMT ที่ผ่านการปรับปรุงแล้วลดลง [78, 79] ด้วยเหตุนี้เมื่อผสม OMMT เข้าไปในเมทริกซ์ PBAT จึงส่งผลให้ค่ามูมสัมผัสของน้ำของซีทที่มีการผสม OMMT เข้าไปมีค่าเพิ่มขึ้น อีกสาเหตุหนึ่งที่เป็นไปได้คือการผสม OMMT เข้าไปจะส่งผลให้พื้นผิวของซีทเกิดความขรุขระเพิ่มขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วย Wenzel หรือ Cassie effect ซึ่งอธิบายสภาวะการเปียกพื้นผิวไว้ว่า น้ำที่หยดลงไปจะกักอากาศไว้อยู่ในช่องว่างของพื้นผิวที่ขรุขระ ผิวสัมผัสระหว่างพื้นผิวของของเหลวและของแข็ง และระหว่างของเหลวกับอากาศจะลดลงส่งผลให้เกิดการก่อดวงของหยดน้ำเป็นทรงกลม ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดการป้องกันการเข้ามาของน้ำเข้ามาในช่องว่าง ดังนั้นปรากฏการณ์นี้จึงสะท้อนออกมาให้เห็นในรูปแบบของความชอบน้ำที่ลดลงของซีท [80] ในกรณีของซีทคอมพอสิต PBAT/urea/OMMT เมื่อเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30 แล้ว พบว่าค่ามูมสัมผัสของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับซีท PBAT/OMMT คือการผสม OMMT เข้าไปจะส่งผลให้ค่ามูมสัมผัสของน้ำของซีทมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อปริมาณของ OMMT ที่ผสมเข้าไปมากขึ้นจะส่งผลให้ค่ามูมสัมผัสของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ OMMT ที่เพิ่มขึ้น นอกเหนือจากนี้ เมื่อพิจารณามูมสัมผัสของน้ำที่เวลาต่าง ๆ ของซีท คอมพอสิต PBAT/OMMT จะพบว่าที่เวลาต่าง ๆ ค่าที่ทดสอบได้มีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ในทางตรงกันข้าม ค่ามูมสัมผัสของน้ำของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่ามูมสัมผัสของน้ำที่เวลาต่างกัน 0.5 วินาทีดังตารางที่ 4.13 กล่าวได้ว่า OMMT ในซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT จะส่งผลให้หยดน้ำที่ทำการทดสอบจะเกิดการแผ่ออกจึงเป็นผลให้ค่ามูมสัมผัสของน้ำที่วัดได้ที่เวลาที่มากขึ้นมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อมีเพิ่มเฟส OMMT เข้ามา จะส่งผลให้มีรอยต่อระหว่างเฟสของ PBAT และ OMMT เพิ่มเข้ามา ซึ่งอาจก่อให้เกิดบริเวณที่น้ำสามารถแทรกเข้าไปบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสนี้ได้ แต่เมื่อเติม OMMT เพิ่มขึ้น อัตราการลดลงของมูมสัมผัสของหยดน้ำจะช้าลง เมื่อเปรียบเทียบค่ามูมสัมผัสของหยดน้ำที่ 0.00 และ 2.00 วินาที



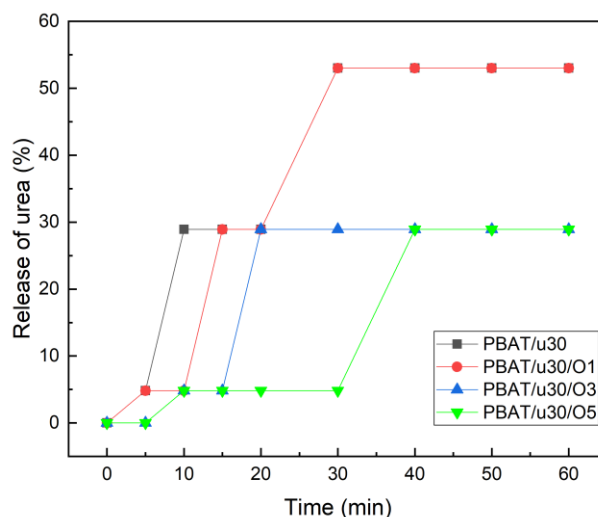
#### 4.2.2.4 การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีท PBAT



รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/urea/OMMT สูตรต่างๆ เมื่อเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30

ทำการศึกษาความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิตโดยการนำซีทคอมพอสิต PBAT/urea/OMMT มาทดสอบการปลดปล่อยยูเรียในน้ำ ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 4.41 และรูปที่ 4.42 พบว่าเมื่อเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30 แล้ว ซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT สามารถควบคุมการปลดปล่อยยูเรียออกไปได้จนถึง 120 ชั่วโมง ซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 จะมีผลการทดสอบที่คล้ายกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30 โดยจากรูปที่ 4.42 พบว่าในช่วงเวลาการทดสอบ 0 ถึง 60 นาที ซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 จะสามารถหน่วงการปลดปล่อยยูเรียได้ดีกว่าซีทคอมพอสิต PBAT/u30 เล็กน้อย และจากรูปที่ 4.41 พบว่าจะสามารถหน่วงเวลาการปลดปล่อยยูเรียจนมีการปลดปล่อย 100% ออกไปได้ 48 ชั่วโมงหรือ 2 วัน ส่วนซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O3 จะมีการหน่วงการปลดปล่อยยูเรียในช่วงแรกออกไปอีกเมื่อเทียบกับซีท

PBAT/u30/O1 (รูปที่ 4.42) และจากรูปที่ 4.41 จะมีเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยที่ 77.11% เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงจนถึงชั่วโมงที่ 72 หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 100% ที่เวลาการทดสอบ 96 ชั่วโมง



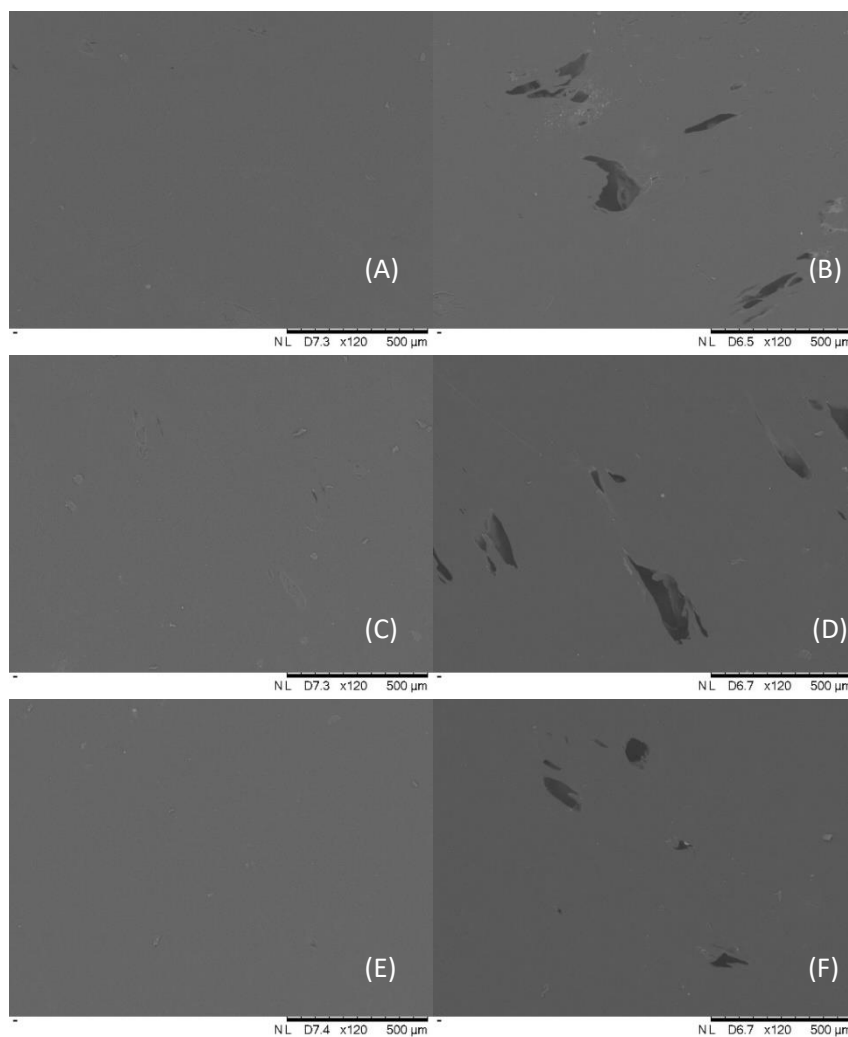
**รูปที่ 4.42** เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ในช่วงเวลา 0 ถึง 60 นาที

ซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O5 จะมีการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียในอัตราเร็วที่ช้ากว่าซีทสูตรอื่น ๆ ทั้งตลอดช่วงการทดสอบ โดยเมื่อพิจารณาที่เวลาทดสอบในช่วง 0 ถึง 60 นาทีแรก พบว่าจะเกิดช่วงที่เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยคงที่ต่ำกว่าสูตรอื่น ๆ เนื่องจากการเปียกผิวซีทของน้ำจะเกิดได้ยากกว่าซีทสูตรอื่น ๆ จากนั้นในรูปที่ 4.41 พบว่าจะมีเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยที่ 53.01% เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมงจนถึงชั่วโมงที่ 24 หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 77.11% ที่เวลาการทดสอบ 48 ชั่วโมงแล้วคงที่ไปจนถึงชั่วโมงที่ 96 โดยซีทสูตรนี้จะปลดปล่อยยูเรียออกมา 100% เมื่อเวลาในการทดสอบผ่านไป 120 ชั่วโมงหรือ 5 วัน

จากการทดสอบสรุปได้ว่า OMMT สามารถหน่วงการปลดปล่อยยูเรียได้เนื่องจาก OMMT จะไปทำหน้าที่เป็นตัวขวางกั้นทางกายภาพ (physical barrier) [26] โดยจะทำหน้าที่ป้องกันการแพร่เข้าของน้ำเพื่อเข้ามาละลายยูเรีย และกั้นการแพร่ออกของสารละลายยูเรีย และจากปริมาณ OMMT ที่มากขึ้นในเมทริกซ์ PBAT ซึ่งส่งผลให้การแพร่เข้าของน้ำและการแพร่ออกของสารละลายยูเรียเกิดได้ยากขึ้น เพราะการแพร่เข้าออกต้องใช้ระยะทางที่มากขึ้น [81] หรือใช้เส้นทางที่คดเคี้ยวขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างของคอมพอสิตที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.31 พบว่าโครงสร้างคอมพอสิตบางส่วนที่เกิดขึ้นของซีทคอมพอสิต PBAT/urea/OMMT ที่

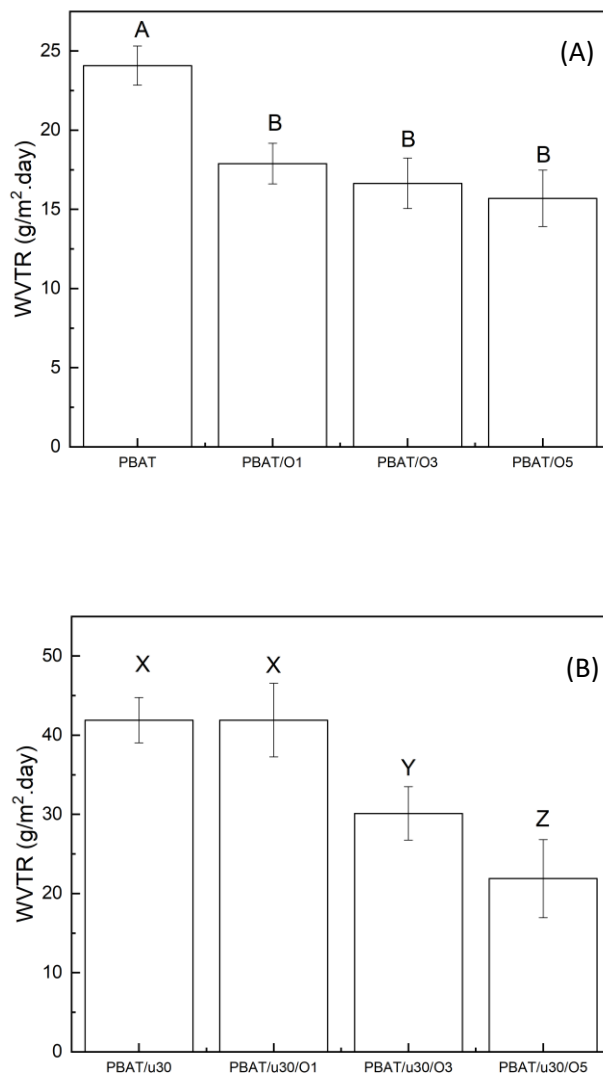
ปริมาณ OMMT 1 3 และ 5 phr คือโครงสร้างคอมพอสิตแบบ Intercalated ซึ่งเป็นโครงสร้างคอมพอสิตที่สายโซ่พอลิเมอร์สามารถแทรกเข้าไปในชั้นของ OMMT ได้ และบางส่วนยังเป็น Phase separated structure ดังนั้นโครงสร้างคอมพอสิตแบบนี้จึงก่อให้เกิดเส้นทางที่คดเคี้ยวในการแพร่ของน้ำเข้ามาในเมทริกซ์ PBAT ซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะสังเกตได้จากบริเวณที่เกิดการรวมกลุ่มกันของ OMMT ที่ปรากฏในรูป FE-SEM ดังรูปที่ 4.25 (B-C) [82] นอกเหนือจากนี้ เนื่องจากค่ามุมสัมผัสของน้ำของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O5 มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 และซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O3 จึงทำให้น้ำสามารถเปียกผิวซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O5 ได้ยากกว่าซีทอีกสองสูตร ดังนั้นความสามารถในการเปียกพื้นผิวซีทจึงเป็นสาเหตุประการหนึ่งส่งผลต่อการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT หลังจากการทดสอบการปลดปล่อยยูเรียในน้ำพบว่าพื้นผิวของซีทมีการเปลี่ยนแปลงไปคือเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.43 (B, D, E) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับซีทที่ยังไม่ผ่านการทดสอบดังรูปที่ 4.43 (A, C, F) จะพบว่ามียูเรียปรากฏบริเวณผิวหน้าของซีท ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่และการกระจายตัวของยูเรียในซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT เมื่อพิจารณาลักษณะของซีทหลังจากผ่านการทดสอบเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.14 (D) พบว่าซีทที่ผสม OMMT เข้าไปส่งผลให้เกิดรูขนาดใหญ่ที่เกิดจากการหลุดออกของยูเรีย เมื่อนำมาพิจารณาควบคู่กับผลการทดสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำจะสรุปได้ว่า การผสม OMMT เข้าไปส่งผลให้ยูเรียที่อยู่บริเวณผิวซีทเกิดการละลายออกได้ง่ายขึ้น

จากการศึกษาความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยพบว่าซีทคอมพอสิตสูตร PBAT/u30/O5 สามารถควบคุมการปลดปล่อยยูเรียได้ 5 วัน ซึ่งในการทดสอบจะทำการแช่แผ่นซีทคอมพอสิตลงในน้ำโดยจะมีการสัมผัสน้ำตลอดเวลา แต่ในสภาวะการใช้งานจริงซีทคอมพอสิตที่เตรียมได้ไม่ได้มีการสัมผัสน้ำตลอดเวลา ซีทคอมพอสิตที่เตรียมได้จึงอาจสามารถยืดระยะเวลาควบคุมการปลดปล่อยยูเรียได้ออกไปยาวนานขึ้น



รูปที่ 4.43 รูป SEM พื้นผิวของซีทคอมพอสิต (A,B) PBAT/u30/O1 (C,D) PBAT/u30/O3 และ (E,F) PBAT/u30/O5 (ซ้าย) ก่อนและ (ขวา) หลังจากผ่านการทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT

#### 4.2.2.5 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission; WVT)



รูปที่ 4.44 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของซีทคอมพอสิต (A) PBAT/OMMT และ (B) PBAT/urea/OMMT สูตรต่าง ๆ

**ตารางที่ 4.14** อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission rate) ของซีทคอมพอลิเมอร์ฐาน PBAT สูตรต่าง ๆ

Sample	Water vapor transmission rate (g/m <sup>2</sup> .day)
PBAT	24.08±1.23 <sup>A</sup>
PBAT/O1	17.89±1.29 <sup>B</sup>
PBAT/O3	16.64±1.59 <sup>B</sup>
PBAT/O5	15.69±1.78 <sup>B</sup>
PBAT/u30	41.91±2.86 <sup>X</sup>
PBAT/u30/O1	41.91±4.64 <sup>X</sup>
PBAT/u30/O3	30.11±3.37 <sup>Y</sup>
PBAT/u30/O5	21.89±4.93 <sup>Z</sup>

\*หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

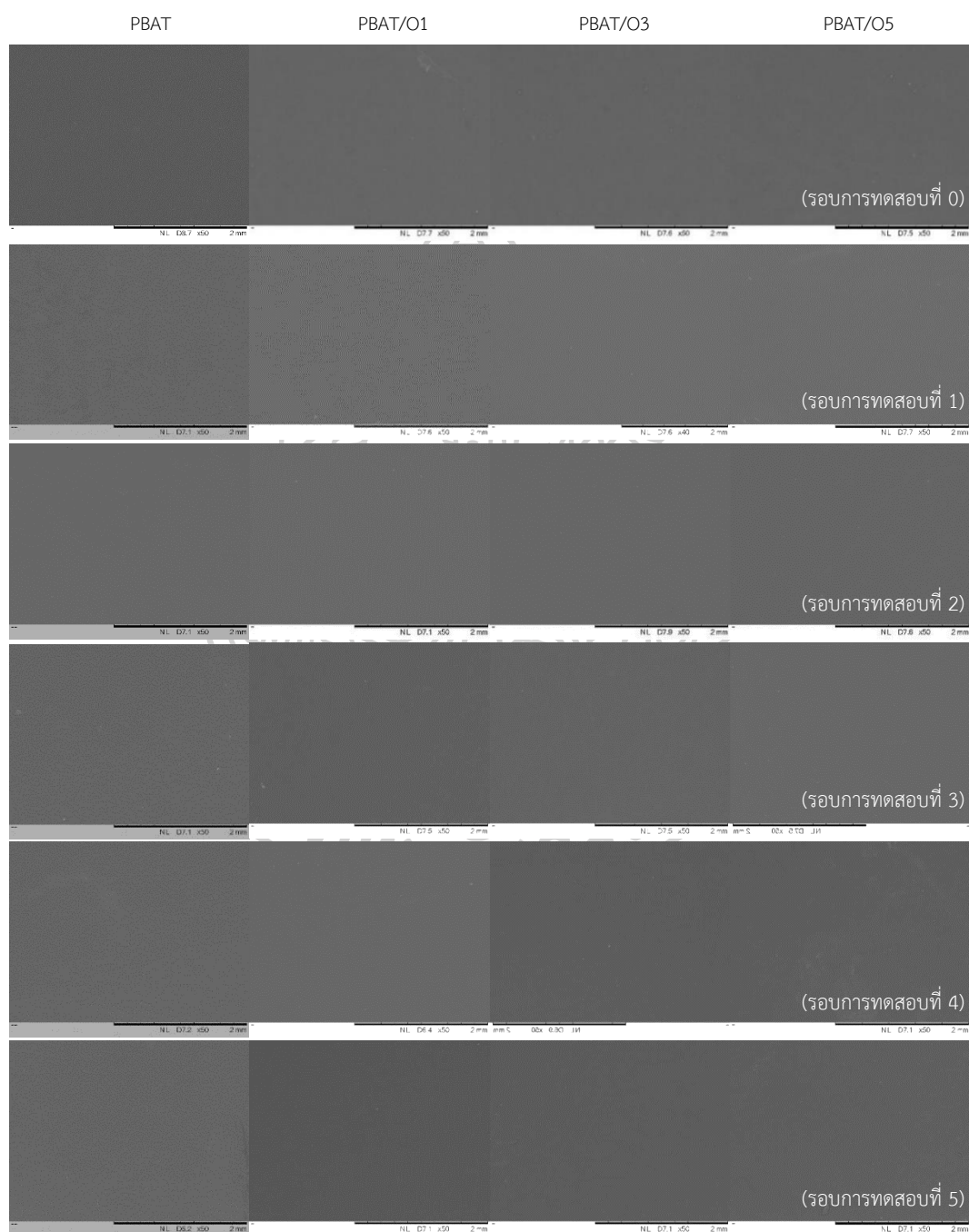
ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/OMMT และ PBAT/urea/OMMT สูตรต่าง ๆ ซึ่งได้มาจากการคำนวณมาจากการทดสอบโดยวิธี Cup method แสดงดังตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.44 เมื่อพิจารณาซีท PBAT/OMMT เทียบกับซีท PBAT บริสุทธิ์พบว่า เมื่อมีการผสม OMMT เข้าไปในเมทริกซ์ PBAT จะส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของซีท PBAT มีค่าลดลงซึ่งแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงสมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ การลดลงของค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเมื่อมีการผสม OMMT เข้าไปใน PBAT เกิดเนื่องจากคอมพอลิเมอร์ระหว่าง PBAT และ OMMT จะเกิดเป็นไมโคร-นาโนคอมพอลิเมอร์โดยบางส่วนเกิดโครงสร้างแบบ Partially exfoliated/intercalated โดยยังมีบางส่วนยังเกิดโครงสร้างแบบ Phase separated structure ซึ่งสรุปได้จากผลการศึกษาโครงสร้างของคอมพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.29 โดยโครงสร้างที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้ไอน้ำต้องใช้เส้นทางที่คดเคี้ยวมากขึ้นในการเดินทางผ่านซีทคอมพอลิเมอร์นี้ กล่าวได้ว่า OMMT จะทำหน้าที่เป็นตัวขวางกั้นซึ่งสามารถจำกัดการซึมผ่านของไอน้ำได้ [69, 83] เมื่อปริมาณของ OMMT ที่ผสมเข้าไปมากขึ้นจะส่งผลให้ซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/OMMT มีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาซีทคอมพอลิเมอร์ สูตร PBAT/u30/O1 เทียบกับซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30 พบว่าค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30 มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยยะกับซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/O1 ในขณะที่ซีทคอมพอลิเมอร์ PBAT/u30/O3 และ

PBAT/u30/O5 จะมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30 โดยเมื่อปริมาณ OMMT ยิ่งมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำยิ่งมีค่าลดลง โดยผลการทดสอบที่ได้จะสอดคล้องกับการทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียเพราะ OMMT จะไปทำหน้าที่เป็นตัวขวางกั้นทางกายภาพ ซึ่งจะส่งผลให้การเดินทางผ่านซีทของไอน้ำต้องใช้ระยะทางและเส้นทางที่คดเคี้ยวมากขึ้น และเนื่องจากพื้นผิวซีทที่มีความชอบน้ำที่น้อยลงเมื่อเทียบกับซีท PBAT จึงทำให้ไอน้ำจะมีแนวโน้มที่จะผ่านบริเวณพื้นผิวของซีทได้น้อยลง จากรูปที่ 4.31 ซึ่งเป็นผลการทดสอบ XRD ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ สามารถสรุปได้ว่าซีทที่มี 3 องค์ประกอบนี้เกิดโครงสร้างคอมพอสิตแบบ Intercalated ซึ่งสายโซ่พอลิเมอร์สามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นของ OMMT ได้ และบางส่วนยังเป็นไมโครคอมพอสิต โดยสาเหตุนี้จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดเส้นทางในการเดินทางผ่านของไอน้ำที่คดเคี้ยวมากขึ้น เมื่อพิจารณาซีท PBAT/u30/O5 พบว่าค่า WVTR มีค่าใกล้เคียงกับซีท PBAT จึงกล่าวได้ว่าการผสม OMMT เข้าไปในปริมาณ 5 phr เป็นการปรับปรุงซีทคอมพอสิต PBAT/u30 ให้มีค่า WVTR ลดลงซึ่งจะมีค่าลดลงไม่ต่างจากซีท PBAT บริสุทธิ์

#### 4.2.2.6 การทดสอบการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลอง (weathering testing)

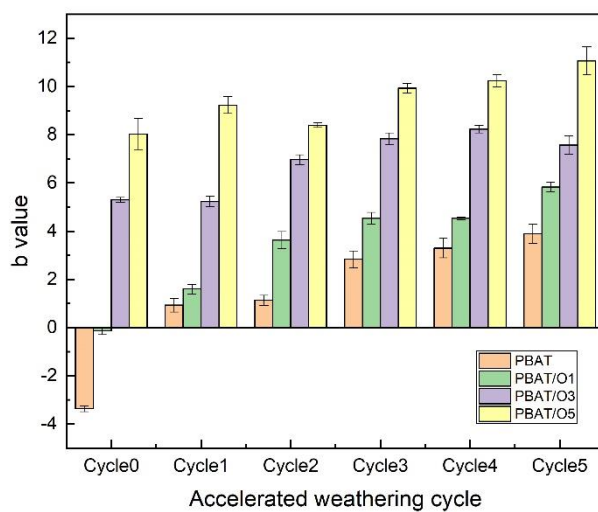
ทำการทดสอบการทนทานต่อสภาวะจำลองของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT และซีทคอมพอสิต PBAT/urea/OMMT เพื่อพิจารณาผลของ OMMT และยูเรียต่อการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลองของซีท PBAT ซึ่งรูป SEM พื้นผิวของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการจำลองสภาวะแสดงดังรูปที่ 4.45 เมื่อพิจารณาซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT ที่ยังไม่ผ่านการจำลองสภาวะพบว่าซีทคอมพอสิตทุกสูตรมีลักษณะพื้นผิวของซีทที่ไม่แตกต่างกันคือมีหน้าของซีทคอมพอสิตมีลักษณะเรียบ และเมื่อเปรียบเทียบกับซีทคอมพอสิตที่ผ่านการทดสอบการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ พบว่า เมื่อรอบการทดสอบเพิ่มขึ้น พื้นผิวของซีทคอมพอสิตยังคงมีลักษณะเช่นเดิม เนื่องจากการศึกษาด้วยเทคนิค SEM ไม่สามารถบอกความแตกต่างของสีที่ปรากฏของซีทคอมพอสิตได้อย่างชัดเจนนักจึงทำการศึกษาจากภาพถ่ายลักษณะปรากฏของซีทคอมพอสิตที่ผ่านการเร่งสภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.15 ควบคู่กับค่า b จากรูปที่ 4.46 ซึ่งค่า b จะเป็นค่าที่แสดงความเป็นสีน้ำเงิน-เหลือง โดยถ้าค่า b เป็นลบแสดงว่าสิ่งที่ทำการวัดมีค่าสีค่อนข้างไปทางสีน้ำเงิน ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่า b มีค่าเป็นบวกแสดงว่าสิ่งที่ทำการวัดมีค่าสีค่อนข้างไปทางสีเหลือง เมื่อพิจารณาค่า b จากรูป 4.46 พบว่าเมื่อทำการผสม OMMT เข้าไปในซีท PBAT จะส่งผลให้ซีท PBAT มีค่า b ที่มากขึ้นซึ่งค่า b ที่เพิ่มขึ้นนี้มีความสอดคล้องกับลักษณะปรากฏของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT ดังตารางที่ 4.15 คือซีทที่ได้มีสีค่อนข้างไปทางสีเหลืองมากขึ้นซึ่งเกิดจากสีโดยธรรมชาติของ OMMT นอกเหนือจากนี้เมื่อปริมาณ OMMT ที่เติมเข้าไปมีค่ามากขึ้น ค่า b จะมีค่ามากขึ้นและซีทคอมพอสิต ที่ได้จะมีสีที่เหลืองขึ้น เมื่อพิจารณาผลของการจำลองสภาวะต่อซีทคอมพ

ลิต PBAT/OMMT พบว่าค่า  $b$  ของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT ทุกสูตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อรอบการทดสอบเพิ่มขึ้น การที่ซีทคอมพอสิต มีสีที่เหลืองขึ้นเกิดจากการฉายรังสียูวีให้แก่ชิ้นงาน ซึ่งการแผ่รังสียูวีให้แก่ชิ้นงานจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวด้วยแสง (photodegradation) ซึ่งเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานเกิดสีเหลือง [46]







รูปที่ 4.45 รูป SEM พื้นผิวของซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการจำลองสถานะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ

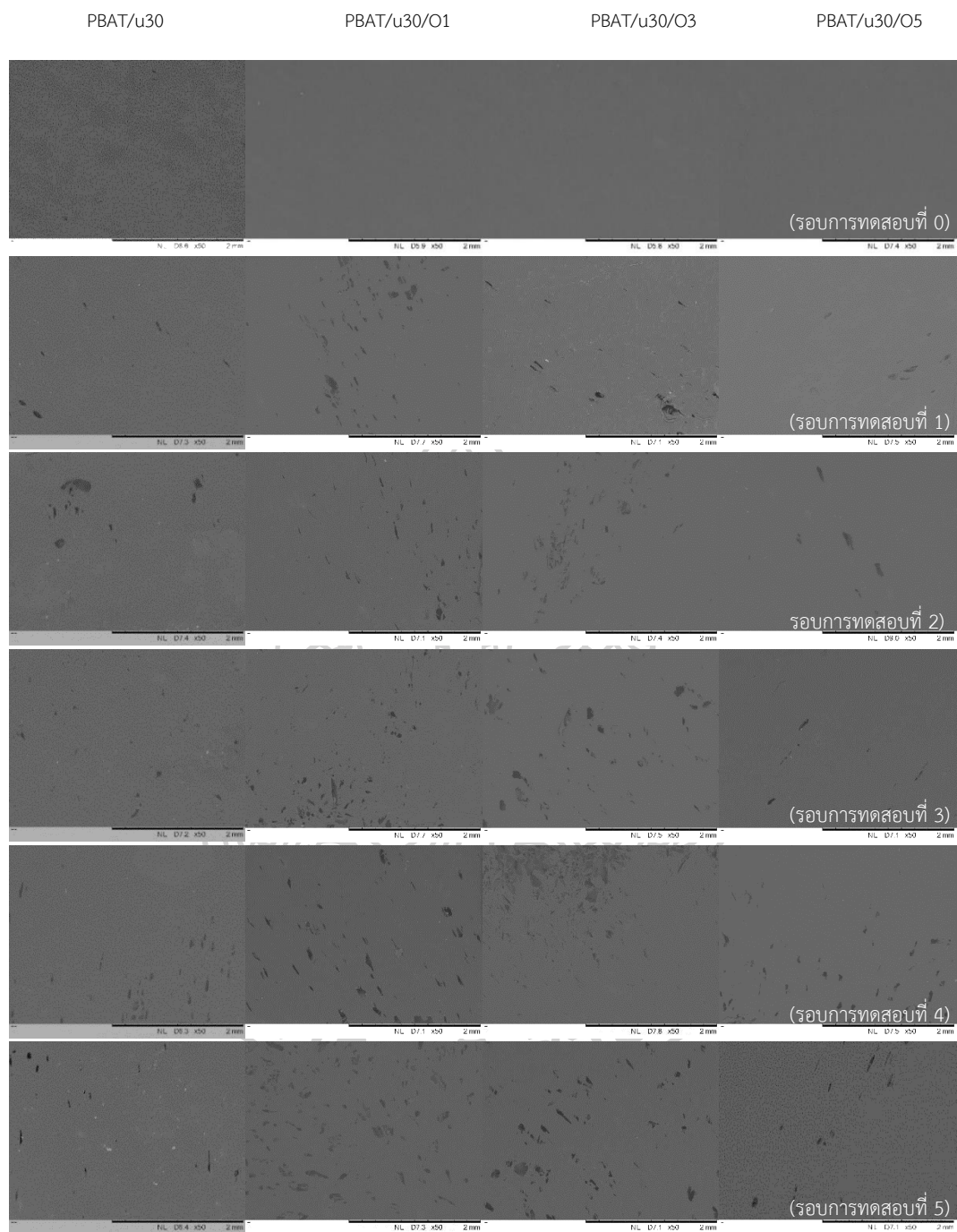




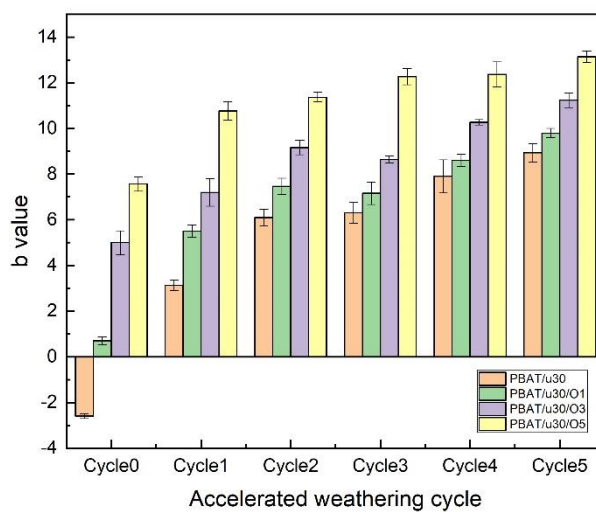
รูปที่ 4.46 ค่า b ในระบบการวัดสี CIE L\*a\*b\* ของซีทคอมพอสิตที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ

ตารางที่ 4.15 ลักษณะทางกายภาพของซีทคอมพอสิตที่รอบการทดสอบต่าง ๆ

Sample	รอบการทดสอบ					
	0	1	2	3	4	5
PBAT/O1						
PBAT/O3						
PBAT/O5						



รูปที่ 4.47 รูป SEM พื้นผิวของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการจำลอง  
สภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ



รูปที่ 4.48 ค่า b ในระบบการวัดสี CIE L\*a\*b\* ของซีทคอมพอสิตที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบต่าง ๆ

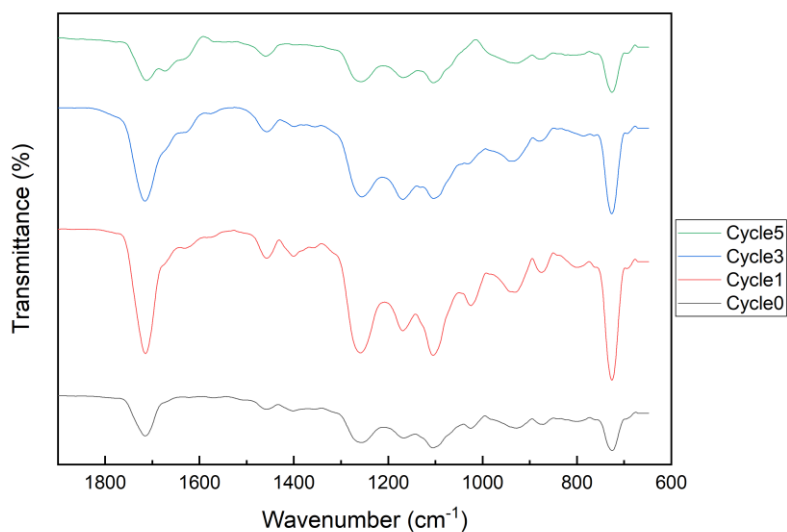
ตารางที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพของซีทที่รอบการทดสอบต่าง ๆ

Sample	รอบการทดสอบ					
	0	1	2	3	4	5
PBAT/u30/O1						
PBAT/u30/O3						
PBAT/u30/O5						

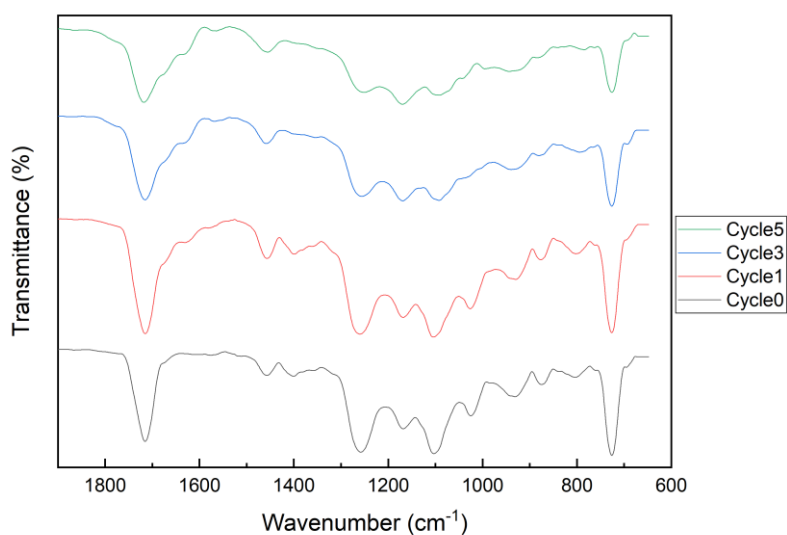
ในขณะเดียวกัน เมื่อพิจารณาการทนทานต่อสภาวะจำลองของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT จากรูป SEM ดังรูปที่ 4.47 พบว่าเมื่อพิจารณาการทดสอบที่ 0 คือซีทที่ยังไม่ผ่านการเร่งสภาวะพบว่าซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ทุกสูตรมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ ในขณะที่เมื่อรอบการทดสอบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้บริเวณพื้นผิวของซีทมีรูที่เพิ่มขึ้นเมื่อรอบการทดสอบเพิ่มขึ้น ซึ่งรูที่เกิดขึ้นเกิดจากการหลุดออกของยูเรียจากการจำลองสภาวะเกิดขึ้นเพราะสภาวะที่ใช้ในการทดสอบมีการควบคุมไอน้ำควบแน่นที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จึงทำให้น้ำที่ไปควบแน่นบริเวณผิวซีทไปทำการละลายยูเรียออกมา ในขณะเดียวกันค่า  $b$  ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.48 มีค่าเพิ่มขึ้นตามรอบการทดสอบที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยค่า  $b$  ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O5 จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 และ PBAT/u30/O3 ที่รอบการทดสอบเดียวกัน ค่า  $b$  ที่วัดได้จะสอดคล้องกับลักษณะปรากฏของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.16 คือ เมื่อปริมาณ OMMT ที่ผสมในซีท PBAT/u30/OMMT เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ซีทคอมพอสิตมีสีที่ค่อนข้างดำมากขึ้นเนื่องจากสีตามธรรมชาติของ OMMT ที่มีสีน้ำตาล เมื่อนำซีทคอมพอสิตไปผ่านการจำลองสภาวะพบว่าเมื่อรอบการทดสอบเพิ่มขึ้น ซีทคอมพอสิตที่ผ่านการทดสอบจะมีสีที่เหลืองขึ้น เพราะจะเกิดการสลายตัวด้วยแสง (photodegradation) [46] ซึ่งมีสาเหตุมาจากการฉายรังสียูวีแก่ขึ้นในระหว่างการทดสอบ โดยเมื่อรอบการทดสอบเพิ่มขึ้น การย่อยสลายด้วยแสงก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น ด้วยสาเหตุนี้ซีทที่ผ่านการทดสอบทั้งสิ้น 5 รอบการทดสอบ ชิ้นงานจึงมีสีที่เหลืองมากที่สุด

นอกเหนือจากนี้ ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของซีทคอมพอสิตโดยใช้เทคนิค ATR-FTIR จากรูปที่ 4.49 ซึ่งเป็น ATR-FTIR spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/O1 ที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5 เมื่อเทียบกับ ATR-FTIR spectra ของ PBAT ในช่วงเลขคลื่น 1900-650  $\text{cm}^{-1}$  (รูปที่ 4.18) แล้วจะไม่ปรากฏพีคการสั่นของพันธะอื่น ๆ เพิ่มมาจากพีคการสั่นของพันธะที่พบใน PBAT ซึ่งโดยปกตินั้น OMMT จะปรากฏพีคการสั่นของ Al-O stretching และ Si-O bending จะอยู่ในช่วงเลขคลื่น 400-600  $\text{cm}^{-1}$  [84] เช่นเดียวกับกับซีทคอมพอสิต PBAT/O3 และ PBAT/O5 จากรูปที่ 4.50 และ 4.51 ตามลำดับ เมื่อพิจารณา ATR-FTIR spectra ที่ได้จากรอบการทดสอบที่ 5 พบว่าลักษณะของสเปกตรัมที่ทดสอบได้จากซีทคอมพอสิต PBAT/O1 PBAT/O3 และ PBAT/O5 มีลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมของซีท PBAT ที่ผ่านการทดสอบที่รอบการทดสอบที่ 5 คือปรากฏไหล่พิคทางด้านขวาที่เลขคลื่น 1673.11 1676.15 1671.49  $\text{cm}^{-1}$  ในซีทคอมพอสิต PBAT/O1 PBAT/O3 และ PBAT/O5 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการเกิดสารประเภทเอสเทอร์ที่มีโมเลกุลต่ำ [46] และปรากฏพิคทางด้านซ้ายที่เลขคลื่น 1711.63 1717.83 และ 1716.21  $\text{cm}^{-1}$  ในซีทคอมพอสิต PBAT/O1 PBAT/O3 และ PBAT/O5 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการเกิดหมู่คาร์บอนิลอิสระ การเกิดเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและหมู่คาร์บอนิลอิสระจะเกิดจากการตัดสายโซ่ของหมู่เอสเทอร์ผ่านกระบวนการ

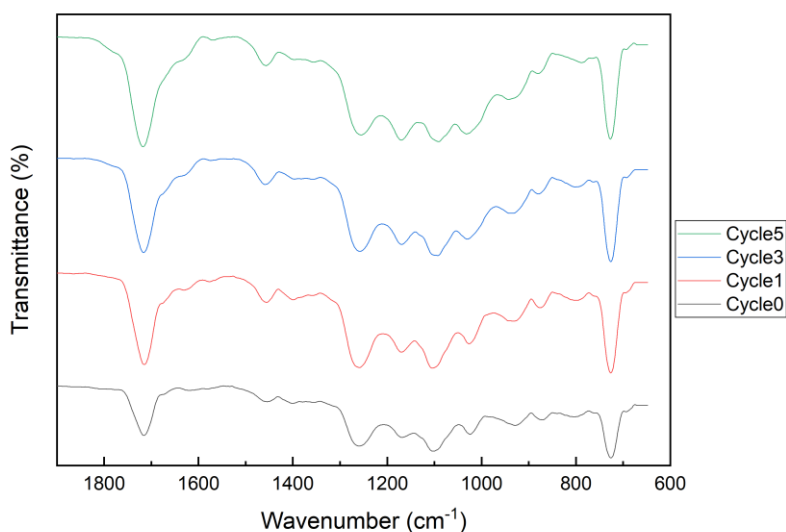
ที่เรียกว่า Norrish-I type chain scission reaction [46, 50] ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.19 จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าการผสม OMMT เข้าไปในเมทริกซ์ PBAT จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของ PBAT เมื่อผ่านการจำลองสภาวะ



รูปที่ 4.49 ATR-FTIR spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/O1 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5

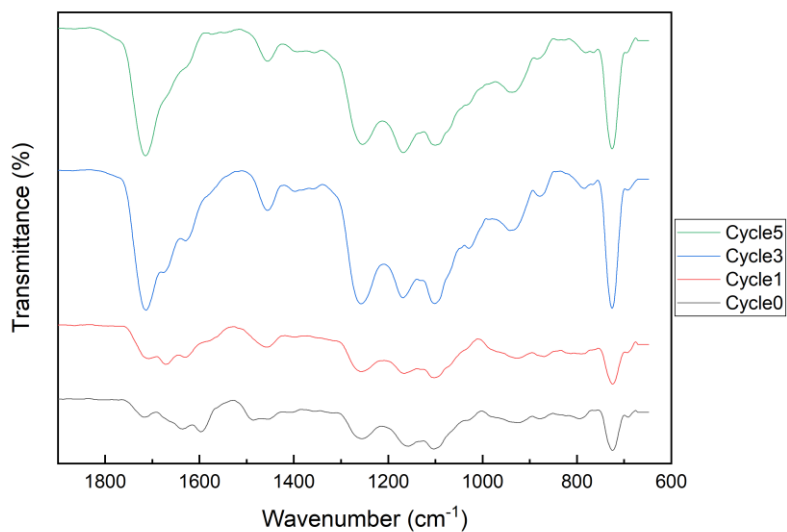


รูปที่ 4.50 ATR-FTIR spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/O3 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5

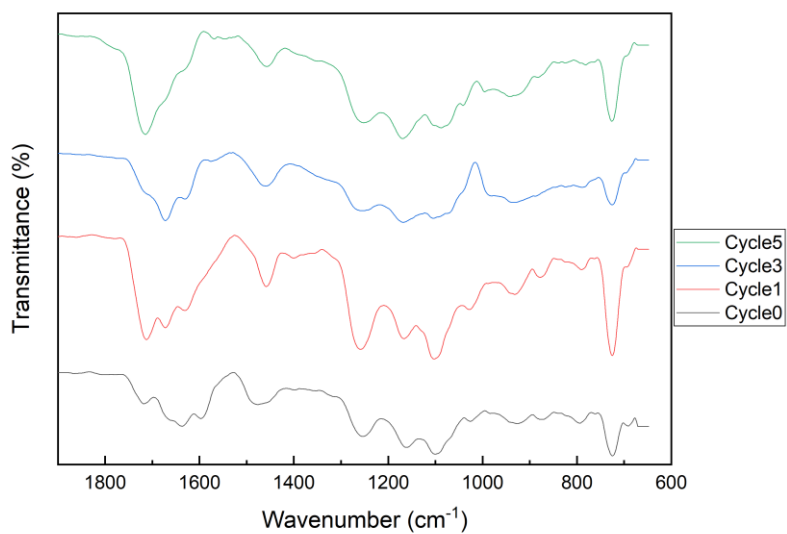


รูปที่ 4.51 ATR-FTIR spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/O5 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5

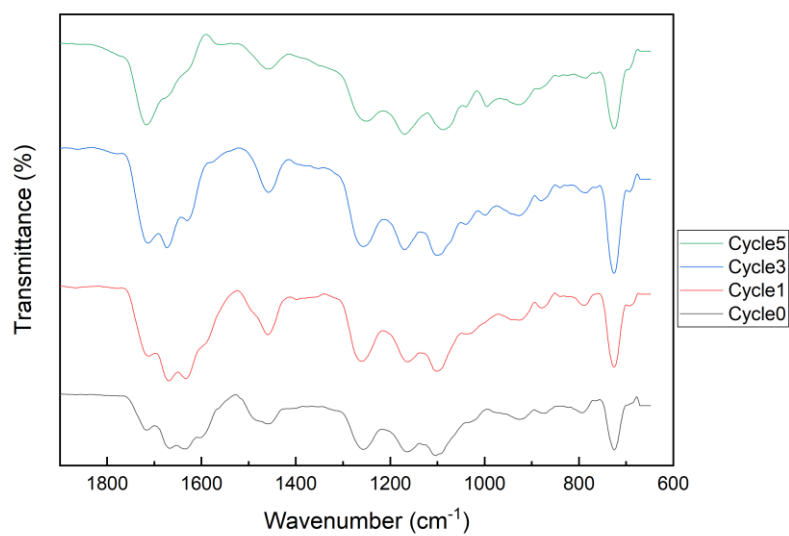
เมื่อพิจารณาซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ จากรูปที่ 4.52-4.54 พบว่าที่รอบการทดสอบที่ 5 ของซีททุกสูตรพบว่าพีกการสั่นของสารประเภทเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งปรากฏเป็นไหล่พีกทางด้านขวาของพีกของหมู่คาร์บอนิลที่บริเวณเลขคลื่น  $1850-1550\text{ cm}^{-1}$  ไหล่พีกที่เกิดขึ้นปรากฏที่เลขคลื่น  $1669.32\text{ cm}^{-1}$ ,  $1667.70\text{ cm}^{-1}$  และ  $1666.36\text{ cm}^{-1}$  ในซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 PBAT/u30/O3 และ PBAT/u30/O5 ตามลำดับ การเกิดสารประเภทเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะเกิดจากการตัดสายโซ่ของหมู่เอสเทอร์ผ่านกระบวนการที่เรียกว่า Norrish-I type chain scission reaction [46, 50] ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.19 นอกจากนี้ยังปรากฏพีกทางด้านซ้ายที่เลขคลื่น  $1714.59\text{ cm}^{-1}$ ,  $1716.21\text{ cm}^{-1}$  และ  $1714.59\text{ cm}^{-1}$  ในซีท PBAT/u30/O1 PBAT/u30/O3 และ PBAT/u30/O5 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการเกิดหมู่คาร์บอนิล (C=O) อิสระโดยจะเกิดจากกระบวนการ Norrish-I type chain scission reaction เช่นเดียวกันกับการเกิดสารประเภทเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ [46, 50] เมื่อพิจารณาซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ เทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30 พบว่าซีทคอมพอสิต PBAT/u30 เกิดไหล่พีกด้านซ้ายที่เลขคลื่น  $1717.32\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดหมู่คาร์บอนิล (C=O) อิสระ และพบไหล่พีกทางด้านขวาที่เลขคลื่น  $1625.59\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการเกิดสารประเภทเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ [46] ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการผสม OMMT เข้าไปในซีทคอมพอสิต PBAT/urea/OMMT จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของ PBAT หลังผ่านการทดสอบการทนทานต่อสภาวะจำลอง



รูปที่ 4.52 ATR-FTIR spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบ การทดสอบที่ 0 1 3 และ 5



รูปที่ 4.53 ATR-FTIR spectra ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O3 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบ การทดสอบที่ 0 1 3 และ 5



รูปที่ 4.54 ATR-FTIR spectra ของซีท PBAT/u30/O5 ที่ผ่านการจำลองสภาวะที่รอบการทดสอบที่ 0 1 3 และ 5





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์มที่ใช้งานในด้านเกษตรกรรมจากพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย (solvent casting) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของฟิล์ม PBAT และฟิล์มคอมพอสิต PBAT/OMMT และเพื่อศึกษาสัญญาณวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ และการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลองของฟิล์มคอมพอสิตฐาน PBAT ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ประสบความสำเร็จในการเตรียมฟิล์ม PBAT/urea และฟิล์ม PBAT/urea/OMMT ด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลาย (solvent casting) เนื่องจากฟิล์มที่เตรียมได้มีการกระจายตัวที่ไม่ดีและการควบคุมสถานะการขึ้นรูปฟิล์มทำได้ยาก จึงได้เปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปโดยการเตรียมเป็นฟิล์มก่อนด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อขึ้นรูปโดยใช้ตัวทำละลายแล้วจึงนำมาขึ้นรูปต่อด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding) จนได้ชิ้นงานตัวอย่างออกมาในรูปแบบซีท PBAT/urea และซีท PBAT/urea/OMMT จากนั้นนำซีทที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบต่าง ๆ ตามข้อเสนอโครงการวิจัย จากผลการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 ตอนที่ 1 การเตรียมซีทคอมพอสิตจาก PBAT และยูเรีย และการทดสอบสมบัติ

จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ของซีทคอมพอสิตที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค SEM พบว่าการผสมยูเรียเข้าไปในเมทริกซ์ PBAT จะส่งผลให้ปรากฏบริเวณที่มีความขรุขระขึ้นในเมทริกซ์ PBAT ซึ่งบริเวณนั้นคือยูเรียที่แทรกอยู่โดยเมื่อปริมาณยูเรียเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มียูเรียรวมกลุ่มกันอยู่บริเวณผิวของซีทมากขึ้น และยูเรียยังเพิ่มความเปราะ (brittle) ให้กับเมทริกซ์ PBAT อีกด้วย จากศึกษาสัญญาณของซีทคอมพอสิตยังพบอีกว่า PBAT และยูเรียเข้ากันได้ไม่ดี เนื่องจากเกิดช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส PBAT และยูเรีย นอกเหนือจากนี้ปริมาณยูเรียยังส่งผลให้ซีทคอมพอสิตที่เตรียมได้มีความชุ่มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจากลักษณะปรากฏนี้จะสอดคล้องกับความทึบแสงของซีทที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมยูเรียเข้าไปในปริมาณที่มากขึ้นโดยจะไม่เกิดส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของ PBAT ซึ่งพิสูจน์ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ทดสอบได้จากซีทคอมพอสิต PBAT/urea สูตรต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม การผสมยูเรียเข้าไปใน PBAT จะส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของ PBAT ลดลง เพราะยูเรียมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำกว่า PBAT เมื่อพิจารณาผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ PBAT คือยูเรียจะส่งผลให้ค่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามค่า Tensile

strength และ % Elongation at break จะมีค่าลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงไปของค่าตัวแปรเชิงกลนี้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามปริมาณของยูเรียที่ผสมเข้าไป โดย Young's modulus จะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดและ Tensile strength และ % Elongation at break จะมีค่าลดลงต่ำสุดเมื่อผสมยูเรียในอัตราส่วน 40%wt การศึกษาความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/urea พบว่าเมื่อปริมาณยูเรียเพิ่มมากขึ้นพบการปลดปล่อยยูเรียออกมาเพิ่มขึ้นด้วย โดยซีทคอมพอสิต PBAT/u20 PBAT/u30 และ PBAT/u40 จะปลดปล่อยยูเรียออกมาได้ 100% ที่เวลา 72 48 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะสามารถสรุปได้ว่าซีทคอมพอสิต PBAT/urea มีความสามารถควบคุมการปลดปล่อยของยูเรียได้ ผลการทดสอบการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียที่ทดสอบได้สอดคล้องกับผลการทดสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำคือ เมื่อผสมยูเรียเข้าไปในซีท PBAT ในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้มุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวซีทมีค่าลดลง ส่วนอัตราการซึมผ่านของไอน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น จากการทดสอบการทนทานต่อสภาวะจำลองพบว่าซีทที่ผ่านการทดสอบจะมีสีที่เหลืองมากขึ้นตามรอบการทดสอบที่เพิ่มขึ้น และจะมีรูซึ่งเกิดจากการหลุดออกของยูเรียปรากฏบนพื้นผิวซีท จากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปของซีทคอมพอสิตที่ผ่านรอบการทดสอบต่าง ๆ ด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่ายูเรียไม่ส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมีของซีท PBAT จากการวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของซีทคอมพอสิต โดยพิจารณาซีทคอมพอสิตสูตรที่มีปริมาณยูเรียที่มากแต่ยังมีความสามารถในการควบคุมการปล่อยยูเรีย ดังนั้นซีทคอมพอสิตสูตร PBAT/u30 จึงเป็นสูตรที่เหมาะสมที่จะนำไปศึกษาต่อในตอนที่ 2

### 5.1.2 ตอนที่ 2 การเตรียมซีทคอมพอสิตจาก PBAT ยูเรียและ OMMT และการทดสอบสมบัติ

เมื่อผสม OMMT เข้าไปในซีทคอมพอสิต PBAT/u30 จะปรากฏ OMMT แทรกอยู่ในเมทริกซ์ PBAT ซึ่งมีลักษณะเป็นแถบสีขาวโดยเมื่อปริมาณของ OMMT ที่ผสมเข้าไปมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันของ OMMT อย่างไรก็ตามซีทคอมพอสิตที่เตรียมได้จะมีสีที่ค่อนข้างน้ำตาลมากขึ้นเมื่อมีการผสม OMMT ในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากธรรมชาติของ OMMT ที่มีสีน้ำตาล นอกเหนือจากนี้ซีทคอมพอสิตที่เตรียมได้มีแนวโน้มค่าความทึบแสงที่มากขึ้นตามปริมาณ OMMT ที่เพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาโครงสร้างของซีทคอมพอสิตที่เตรียมขึ้นมาได้พบว่าซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT มีโครงสร้างของ OMMT แบบ Intercalated และยังมี OMMT บางส่วนที่เกิดโครงสร้างเป็นไมโครคอมพอสิต โดยค่า d-spacing หรือระยะห่างระหว่างชั้นของแรมอนต์มอริลโล-ไนต์มีการขยับเข้ามาชิดกันมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ OMMT บริสุทธิ์

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดจากยูเรีย เนื่องจากเมื่อพิจารณาเทียบกับระบบที่เป็นซีทคอมพอสิต PBAT/OMMT แล้ว พบว่าในระบบที่ไม่มียูเรียค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ OMMT จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ OMMT บริสุทธิ์ ซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30 เนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารที่ใช้ปรับปรุง OMMT ที่มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่า PBAT จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT มีค่า Young's modulus ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30 โดยเกิดจากผลร่วมกันของยูเรียและ OMMT ในทางตรงกันข้าม OMMT จะไม่สามารถปรับปรุงค่า Tensile strength และ % Elongation at break ได้เนื่องจากทั้งสองค่านี้จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ OMMT มากขึ้น อันเนื่องมาจากสัณฐานวิทยาของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT คือเมื่อปริมาณของ OMMT เพิ่มขึ้นจะสังเกตเห็นบริเวณที่เป็นกลุ่มของ OMMT ซึ่งบริเวณนั้นจะเป็นจุดศูนย์รวมแรงเค้นที่ก่อให้เกิดการเริ่มต้นแตกหักขึ้นมา เมื่อพิจารณาความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยของซีทคอมพอสิตพบว่าซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O3 จะสามารถควบคุมการปลดปล่อยยูเรียออกไปได้ 96 ชั่วโมง แต่ในซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 OMMT จะไม่ช่วยปรับปรุงการควบคุมการปลดปล่อยยูเรีย ส่วนซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O5 จะมีการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียในอัตราเร็วที่ช้ากว่าซีทสูตรอื่น ๆ และสามารถควบคุมการปลดปล่อยยูเรียออกไปได้ 120 ชั่วโมง เนื่องจากค่ามัมสัมผัสของน้ำของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O5 มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 และ PBAT/u30/O3 จึงทำให้น้ำสามารถเปียกผิวซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O5 ได้ยากกว่าซีทอีกสองสูตร โดยซีท PBAT/u30/O3 น้ำสามารถเปียกผิวซีทได้ยากกว่าซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1 ดังนั้นความสามารถในการเปียกพื้นผิวซีทจึงเป็นสาเหตุประการหนึ่งส่งผลต่อการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT นอกเหนือจากนี้ OMMT ยังช่วยปรับปรุงค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ด้วย คือค่า WVTR จะมีค่าลดลงเมื่อมีการผสม OMMT เข้าไปในซีทคอมพอสิต โดยซีทคอมพอสิตสูตร PBAT/u30/O5 ซึ่งเป็นสูตรที่มีค่ามัมสัมผัสของน้ำของซีทสูงที่สุดจะมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับซีทคอมพอสิตที่มีปริมาณ OMMT น้อย ๆ โดยค่า WVTR ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O5 นั้นมีค่าใกล้เคียงกับซีท PBAT บริสุทธิ์ ในการนำซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ไปประยุกต์ใช้งานในด้านเกษตรกรรม จำเป็นต้องทำการทดสอบการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของซีทหลังจากที่ซีทได้ผ่านการจำลองสภาวะ จากการทดสอบพบว่า OMMT ไม่

ส่งผลต่อการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลองของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ในทางกายภาพ คือซีทที่ผ่านการทดสอบจะสีเหลืองเพิ่มขึ้นตามรอบการทดสอบที่เพิ่มขึ้น และยังคงปรากฏรูซึ่งเกิดจากการละลายออกของยูเรียบนพื้นผิวซีท โดย OMMT ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/OMMT ด้วยคือจะยังคงปรากฏพีกหมู่คาร์บอนิลอิสระและสารประเภทเอสเทอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำจากการสลายตัวด้วยแสงของ PBAT จากการศึกษาด้วยเทคนิค ATR-FTIR

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ในงานวิจัยนี้ จะทำการขึ้นรูปซีทโดยใช้กระบวนการทางความร้อน จึงทำให้มียูเรียบางส่วนเกิดการหลอมเหลวในขณะที่ทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด เนื่องจากยูเรียมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ใกล้เคียงกับ PBAT ดังนั้นสัดส่วนของยูเรียที่มีอยู่ในซีทจึงน้อยกว่าปริมาณที่ผสมจริง ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ปุ๋ยไนโตรเจนชนิดอื่นที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่าช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวของ PBAT
- 5.2.2 การศึกษาความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของซีท PBAT และ PBAT/OMMT ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบโดยใช้การวัดค่าดัชนีหักเหแสงของสารละลายยูเรีย ซึ่งเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหแสงที่ใช้จะสามารถอ่านค่าทัศนียมตำแหน่งที่ 4 ได้เพียงสองค่าคือ 0 และ 5 จึงส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายยูเรียที่คำนวณได้จากค่าดัชนีหักเหแสงมีความละเอียดไม่มากนัก ดังนั้นจึงควรเลือกใช้สารที่สามารถวัดค่าได้ด้วยเทคนิคที่มีความละเอียดมากกว่าเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เช่นเทคนิค UV-vis spectrophotometry
- 5.2.3 จากการศึกษาความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยพบว่าซีทคอมพอสิตสูตร PBAT/u30/O5 สามารถควบคุมการปลดปล่อยยูเรียได้ 5 วัน ซึ่งในการทดสอบจะทำการแช่แผ่นซีทคอมพอสิตลงในน้ำโดยจะมีการสัมผัสน้ำตลอดเวลา แต่ในสภาวะการใช้งานจริงซีทคอมพอสิตที่เตรียมได้ไม่ได้มีการสัมผัสน้ำตลอดเวลา ซีทคอมพอสิตที่เตรียมได้จึงอาจสามารถยืดระยะเวลาควบคุมการปลดปล่อยยูเรียได้ออกไปยาวนานขึ้น
- 5.2.4 ซีทคอมพอสิตที่เตรียมจะมีลักษณะแข็งกระด้างและยืดหยุ่นน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุคลุมหน้าดินที่เกษตรกรนำมาใช้งานจริง ดังนั้นซีทคอมพอสิตที่เตรียมได้จึงยังไม่เหมาะสมแก่การนำไปทำเป็นวัสดุคลุมหน้าดิน โดยจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงความแข็งกระด้างและความยืดหยุ่นของซีท

- 5.2.5 ในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุคลุมหน้าดินจะต้องมีการพิจารณาถึงปริมาณแสงแดดที่ผ่านซีทเข้าไปยังบริเวณที่ปลูกพืช ซึ่งปริมาณแสงแดดจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของวัชพืช ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณของแสงแดดที่ผ่านซีทโดยอาจเพิ่มความทึบแสงหรือเพิ่มการสะท้อนแสงของซีท
- 5.2.6 อาจปรับเปลี่ยนรูปแบบการใช้งานโดยการนำไปใช้เป็นปุ๋ยแผ่นหรือปุ๋ยเกล็ดเพื่อนำไปโรยบริเวณโคนต้นพืชแทน ซึ่งสภาวะการใช้งานจริงปุ๋ยแผ่นหรือปุ๋ยเกล็ดนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำตลอดเวลา จึงส่งผลให้การควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยสามารถยืดเวลาออกไปได้นานขึ้นและลดการสูญเสียปุ๋ยไปจากการชะของน้ำได้มากขึ้น
- 5.2.7 ในการยืดระยะเวลาในการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียให้ยาวนานกว่าเดิม อาจทำการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้สารที่สามารถดูดซับได้มาเป็นตัวดูดซับปุ๋ย จากนั้นจึงนำไปผสมในพอลิเมอร์
- 5.2.8 ถึงแม้ว่า PBAT จะมีข้อดีคือสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและความยืดหยุ่นที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับวัสดุคลุมหน้าดินที่ใช้ในปัจจุบัน แต่ด้วยราคาที่ยังคงสูงอยู่ ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาต่อโดยการผสมหรือการทำให้เป็นโคพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดอื่น

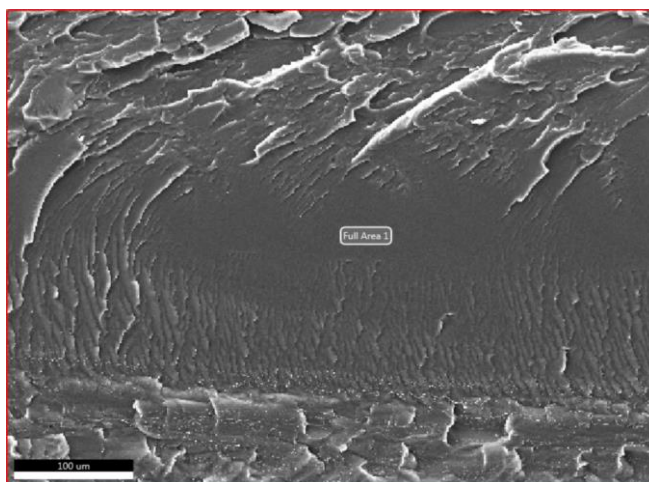






ก.1 ตอนที่ 1 การเตรียมซีทฐาน PBAT จาก PBAT และยูเรีย และการทดสอบสมบัติของซีทที่เตรียมได้

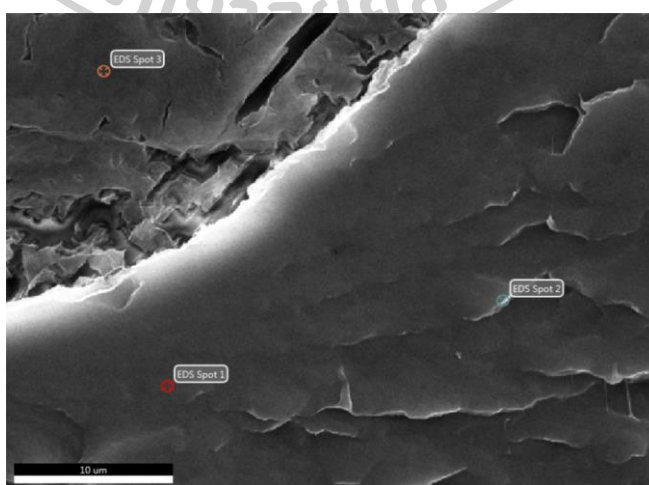
### ก.1.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา



รูปที่ ก.1 รูป FE-SEM ของซีท PBAT

ตารางที่ ก.1 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 1 ของซีท PBAT

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	60.61	67.21	336.64	5.20	0.4399	1.0195	0.7117	1.0000
O K	39.39	32.79	106.90	11.51	0.0916	0.9687	0.2401	1.0000



รูปที่ ก.2 รูป FE-SEM ของซีทคอมพอสิต PBAT/u20



ตารางที่ ก.2 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 1 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u20

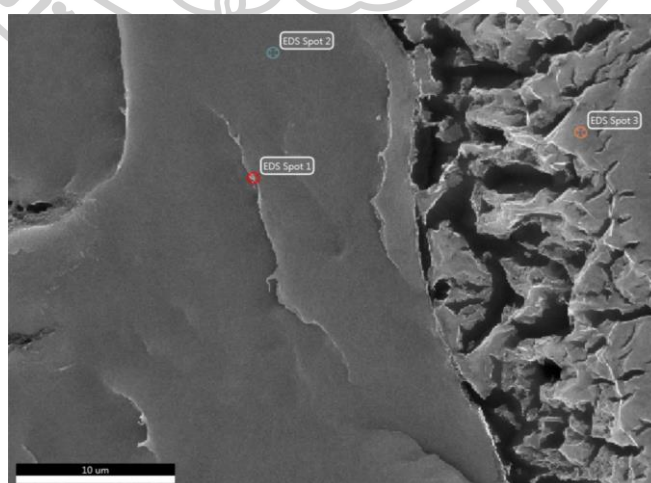
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	62.98	69.39	262.99	5.21	0.4653	1.0183	0.7254	1.0000
O K	37.02	30.61	71.51	12.31	0.0831	0.9676	0.2319	1.0000

ตารางที่ ก.3 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 2 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u20

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	71.32	76.81	275.69	4.68	0.5608	1.0141	0.7756	1.0000
O K	28.68	23.19	42.48	14.13	0.0567	0.9635	0.2053	1.0000

ตารางที่ ก.4 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 3 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u20

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	19.07	22.43	132.43	6.51	0.1270	1.0295	0.6470	1.0000
N K	48.68	49.10	191.98	9.32	0.1689	1.0021	0.3461	1.0000
O K	32.25	28.48	82.95	12.55	0.0522	0.9785	0.1655	1.0000



รูปที่ ก.3 รูป FE-SEM ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30

ตารางที่ ก.5 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 1 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30

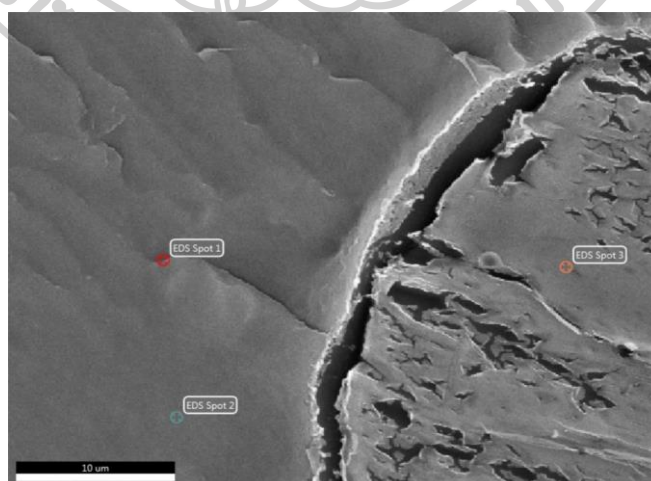
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	64.39	70.66	460.96	4.83	0.4800	1.0176	0.7328	1.0000
O K	35.61	29.34	114.27	11.83	0.0780	0.9669	0.2267	1.0000

ตารางที่ ก.6 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 2 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	67.53	73.47	380.67	4.72	0.5160	1.0160	0.7519	1.0000
O K	32.47	26.53	76.24	12.56	0.0678	0.9653	0.2162	1.0000

ตารางที่ ก.7 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 3 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	20.26	23.78	232.47	6.06	0.1353	1.0292	0.6490	1.0000
N K	47.57	47.87	294.68	9.18	0.1572	1.0018	0.3299	1.0000
O K	32.17	28.34	136.78	11.90	0.0522	0.9782	0.1660	1.0000



รูปที่ ก.4 รูป FE-SEM ของซีทคอมพอสิต PBAT/u40

**ตารางที่ ก.8** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 1 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u40

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	75.52	80.43	150.90	4.75	0.6142	1.0120	0.8034	1.0000
O K	24.48	19.57	17.06	15.99	0.0456	0.9614	0.1936	1.0000

**ตารางที่ ก.9** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 2 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u40

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	66.67	72.71	352.69	4.78	0.5059	1.0164	0.7467	1.0000
O K	33.33	27.29	74.99	12.23	0.0706	0.9658	0.2194	1.0000

**ตารางที่ ก.10** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 3 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u40

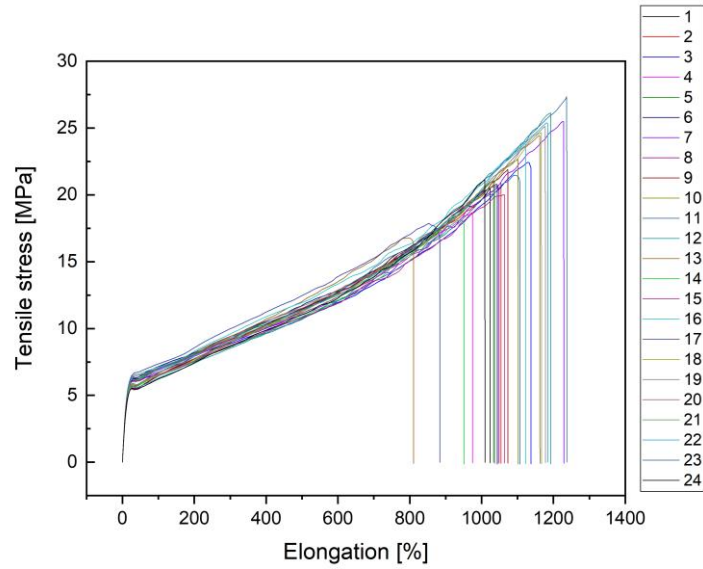
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	19.60	23.03	186.86	6.23	0.1308	1.0294	0.6480	1.0000
N K	48.16	48.53	254.89	9.18	0.1635	1.0020	0.3388	1.0000
O K	32.23	28.44	113.83	12.15	0.0523	0.9784	0.1658	1.0000

### ก.1.2 การทดสอบความทึบแสงของซีท

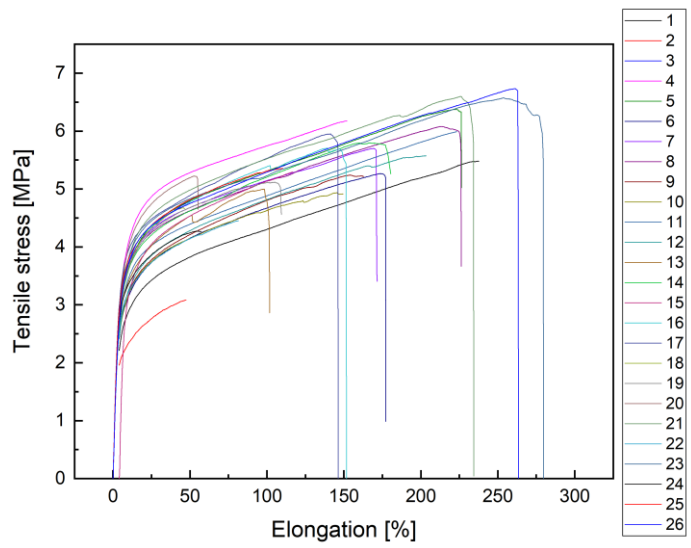
ตารางที่ ก.11 ค่าการดูดกลืนแสง ความหนา และค่าความทึบแสงของซีทสูตรต่าง ๆ

Position	1	2	3	Average	L	T	Average	SD
Sample								
PBAT_1	0.22386	0.23079	0.23145	0.22870	0.40	0.57	0.71	0.23
PBAT_2	0.22827	0.24425	0.22963	0.23405	0.40	0.59		
PBAT_3	0.42514	0.38853	0.35448	0.38938	0.40	0.97		
PBAT/u20_1	0.77641	0.71286	0.77104	0.75344	0.40	1.88	2.04	0.28
PBAT/u20_2	0.93164	0.79912	0.80324	0.84467	0.45	1.88		
PBAT/u20_3	1.20750	1.08864	1.03622	1.11079	0.47	2.36		
PBAT/u30_1	1.19537	0.95738	1.13708	1.09661	0.49	2.24	2.22	0.23
PBAT/u30_2	0.91147	0.83467	0.93643	0.89419	0.45	1.99		
PBAT/u30_3	1.31047	1.26431	1.08420	1.21966	0.50	2.44		
PBAT/u40_1	1.10880	1.22879	1.21815	1.18525	0.49	2.42	2.48	0.21
PBAT/u40_2	1.11328	0.86917	1.13251	1.03832	0.45	2.31		
PBAT/u40_3	1.41159	1.56810	1.48729	1.48899	0.55	2.71		

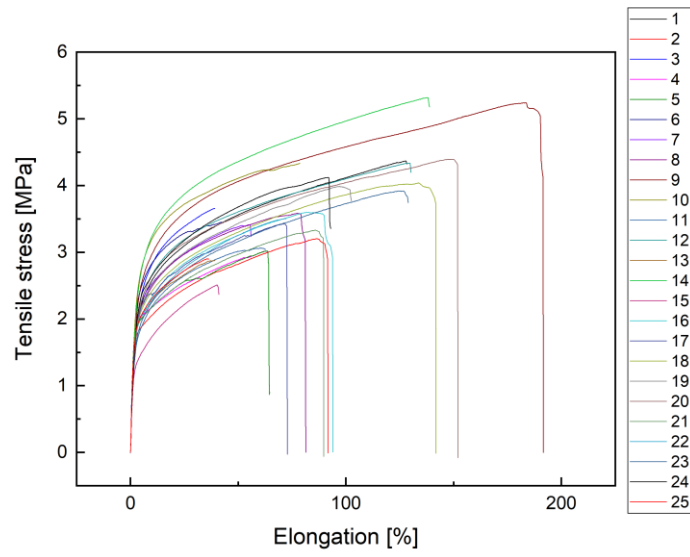
ก.1.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล



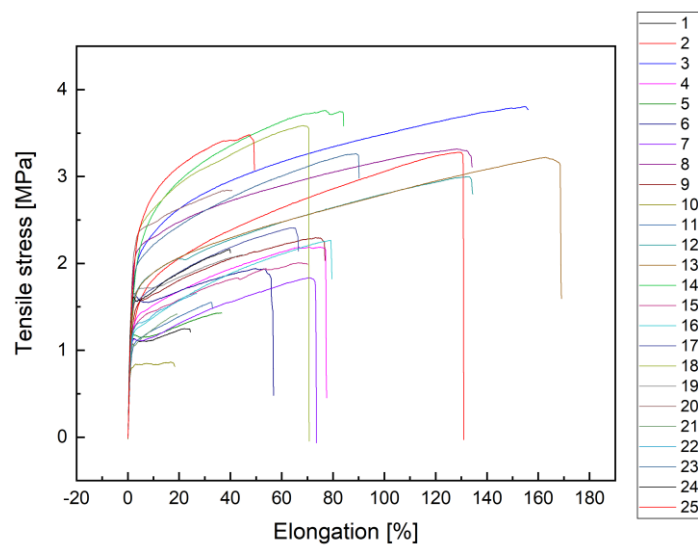
รูปที่ ก.5 Stress – elongation curve ของ PBAT



รูปที่ ก.6 Stress – elongation curve ของ PBAT/u20



รูปที่ ก.7 Stress - elongation curve ของ PBAT/u30



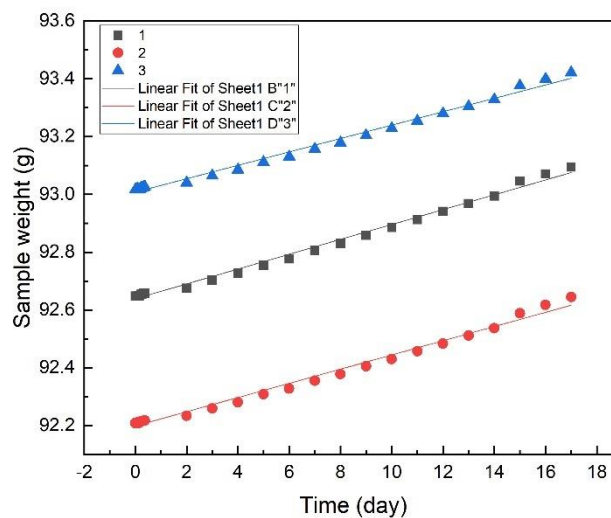
รูปที่ ก.8 Stress - elongation curve ของ PBAT/u40

### ก.1.4 การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของซีท PBAT

ตารางที่ ก.12 ค่าดัชนีหักเหของแสงของซีท PBAT/urea สูตรต่าง ๆ ที่เวลาต่าง ๆ

Sample	PBAT/u20			PBAT/u30			PBAT/u40		
	RF	c	%	RF	c	%	RF	c	%
0.00	1.3350	0.00	0.00	1.3350	0.00	0.00	1.3350	0.00	0.00
0.08	1.3355	0.01	7.09	1.3355	0.01	4.82	1.3355	0.01	3.65
0.17	1.3355	0.01	7.09	1.3360	0.07	28.92	1.3360	0.07	21.91
0.25	1.3355	0.01	7.09	1.3360	0.07	28.92	1.3360	0.07	21.91
0.33	1.3360	0.07	42.52	1.3360	0.07	28.92	1.3360	0.07	21.91
0.50	1.3360	0.07	42.52	1.3365	0.13	53.01	1.3360	0.07	21.91
0.67	1.3360	0.07	42.52	1.3365	0.13	53.01	1.3365	0.13	40.16
0.83	1.3360	0.07	42.52	1.3365	0.13	53.01	1.3370	0.19	58.42
1.00	1.3360	0.07	42.52	1.3365	0.13	53.01	1.3370	0.19	58.42
2.00	1.3360	0.07	42.52	1.3365	0.13	53.01	1.3375	0.25	76.67
3.00	1.3360	0.07	42.52	1.3365	0.13	53.01	1.3375	0.25	76.67
6.00	1.3360	0.07	42.52	1.3370	0.19	77.11	1.3380	0.31	94.93
12.00	1.3365	0.13	77.96	1.3370	0.19	77.11	1.3385	0.37	100.00
24.00	1.3365	0.13	77.96	1.3370	0.19	77.11	1.3385	0.37	100.00
48.00	1.3365	0.13	77.96	1.3375	0.25	100.00	1.3385	0.37	100.00
72.00	1.3370	0.19	100.00	1.3375	0.25	100.00	1.3385	0.37	100.00
96.00	1.3370	0.19	100.00	1.3375	0.25	100.00	1.3385	0.37	100.00

### ก.1.5 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission; WVT)

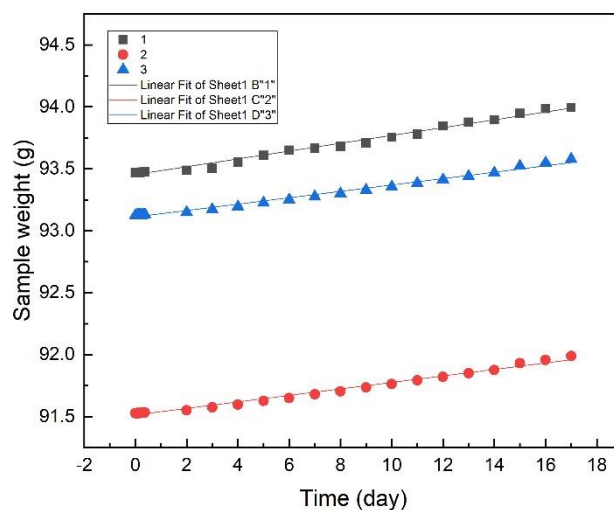


รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและเวลาของซีท PBAT

ตารางที่ ก.13 พารามิเตอร์ต่าง ๆ เกิดจากการ Fitting curve ของซีท PBAT

Equation	$y = a + b*x$		
Plot	1	2	3
Weight	No Weighting		
Intercept	$92.63897 \pm 0.00354$	$92.19892 \pm 0.00414$	$93.008 \pm 0.00351$
Slope	$0.02569 \pm 4.27854E-4$	$0.02456 \pm 5.00179E-4$	$0.02316 \pm 4.23122E-4$
Residual Sum of Squares	0.00384	0.00525	0.00375
Pearson's r	0.99669	0.99506	0.99602
R-Square (COD)	0.99339	0.99015	0.99206
Adj. R-Square	0.99311	0.98973	0.99172

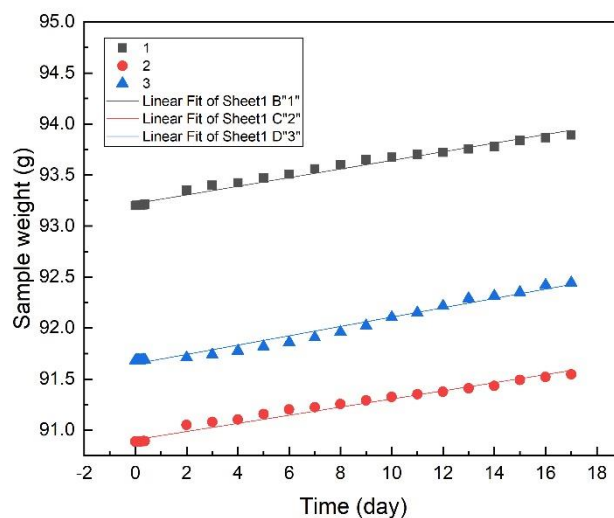




รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและเวลาของซีท PBAT/u20

ตารางที่ ก.14 พารามิเตอร์ต่าง ๆ เกิดจากการ Fitting curve ของซีท PBAT/u20

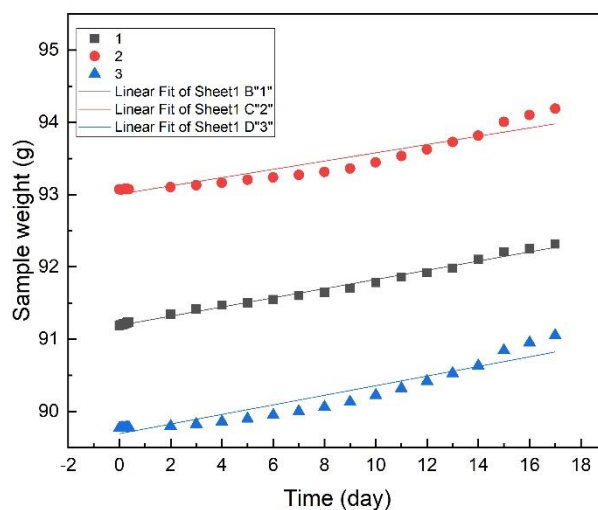
Equation	$y = a + b \cdot x$		
Plot	1	2	3
Weight	No Weighting		
Intercept	$93.45393 \pm 0.00532$	$91.51348 \pm 0.0045$	$93.1116 \pm 0.00438$
Slope	$0.03156 \pm 6.42399E-4$	$0.02622 \pm 5.42574E-4$	$0.02579 \pm 5.28443E-4$
Residual Sum of Squares	0.00865	0.00617	0.00586
Pearson's r	0.99506	0.9949	0.995
R-Square (COD)	0.99015	0.98982	0.99003
Adj. R-Square	0.98974	0.9894	0.98961



รูปที่ ก.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและเวลาของซีท PBAT/u30

ตารางที่ ก.15 พารามิเตอร์ต่าง ๆ เกิดจากการ Fitting curve ของซีท PBAT/u30

Equation	$y = a + b \cdot x$		
Plot	1	2	3
Weight	No Weighting		
Intercept	$93.22016 \pm 0.00925$	$90.90583 \pm 0.0095$	$91.64985 \pm 0.01057$
Slope	$0.0423 \pm 0.00112$	$0.03986 \pm 0.00115$	$0.04572 \pm 0.00128$
Residual Sum of Squares	0.02612	0.02758	0.03414
Pearson's r	0.99175	0.99021	0.99078
R-Square (COD)	0.98357	0.98052	0.98165
Adj. R-Square	0.98288	0.97971	0.98089



รูปที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและเวลาของซีท PBAT/u30

ตารางที่ ก.16 พารามิเตอร์ต่าง ๆ เกิดจากการ Fitting curve ของซีท PBAT/u30

Equation	$y = a + b*x$		
Plot	1	2	3
Weight	No Weighting		
Intercept	$91.19131 \pm 0.00927$	$93.00654 \pm 0.02905$	$89.69187 \pm 0.03265$
Slope	$0.0635 \pm 0.00112$	$0.05725 \pm 0.00351$	$0.06649 \pm 0.00394$
Residual Sum of Squares	0.02624	0.25791	0.32562
Pearson's r	0.9963	0.9578	0.96034
R-Square (COD)	0.99261	0.91739	0.92225
Adj. R-Square	0.9923	0.91394	0.91901

### ก.1.6 การทดสอบการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลอง (Weathering testing)

ตารางที่ ก.17 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีทิสเตอร์ต่าง ๆ ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ

Sample	PBAT			PBAT/urea20			PBAT/urea30			PBAT/urea40		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	63	1.3	-5.3	66.9	-0.5	-2.6	66.6	-0.2	-2.4	69.7	-0.2	-1.1
2	63	3.5	-6.4	61.4	4.8	-5.6	64.3	2.8	-1.6	66.4	3.3	-1.1
3	64.3	0	-4.9	67.4	-0.2	-2.5	66.4	0	-1.2	68.8	0	-0.6
Average	63.4	1.6	-5.5	65.2	1.4	-3.6	65.8	0.9	-1.7	68.3	1.0	-0.9
S.D.	0.8	1.8	0.8	3.3	3.0	1.8	1.3	1.7	0.6	1.7	2.0	0.3

ตารางที่ ก.18 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีทิสเตอร์ต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 1

Sample	PBAT			PBAT/urea20			PBAT/urea30			PBAT/urea40		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	64.2	-0.5	1.4	69.2	-2.3	1.2	66.7	-2	2.2	73	0.1	3.1
2	62.5	1.2	0.6	70.7	0	3.2	63.3	-0.1	-1	69.9	1.6	3.7
3	63.1	0.1	1.8	68.8	-0.7	0.8	62.7	0.5	2	72	0.6	4.7
Average	63.3	0.3	1.3	69.6	-1.0	1.7	64.2	-0.5	1.1	71.6	0.8	3.8
S.D.	0.9	0.9	0.6	1.0	1.2	1.3	2.2	1.3	1.8	1.6	0.8	0.8

ตารางที่ ก.19 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีทิสเตอร์ต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 2

Sample	PBAT			PBAT/urea20			PBAT/urea30			PBAT/urea40		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	66.5	-3.6	3.2	68.9	-1.6	2	73.8	-1.6	5.5	74	-0.6	4.3
2	66.6	-1.9	5.8	70	-1.5	6.5	74.6	-1.1	9	74.5	-1.1	7
3	66.3	-1.5	4.9	68.1	-1.9	5.4	67.9	-1.6	5.5	76.1	-0.7	8.2
Average	66.5	-2.3	4.6	69.0	-1.7	4.6	72.1	-1.4	6.7	74.9	-0.8	6.5
S.D.	0.2	1.1	1.3	1.0	0.2	2.3	3.7	0.3	2.0	1.1	0.3	2.0

ตารางที่ ก.20 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีทิสูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 3

Sample	PBAT			PBAT/urea20			PBAT/urea30			PBAT/urea40		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	63.5	-1.6	5.1	65	-3.8	2.5	64.8	-2.2	3.5	69.3	-0.9	10
2	65.4	-1.7	6.2	65.6	-1.7	6.6	68.8	-1.6	5.6	71.4	-0.3	10.3
3	61.9	0.9	2.3	63.7	-2	3.2	71.6	-1	7.7	72.3	-0.1	10.2
Average	63.6	-0.8	4.5	64.8	-2.5	4.1	68.4	-1.6	5.6	71.0	-0.4	10.2
S.D.	1.8	1.5	2.0	1.0	1.1	2.2	3.4	0.6	2.1	1.5	0.4	0.2

ตารางที่ ก.21 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีทิสูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 4

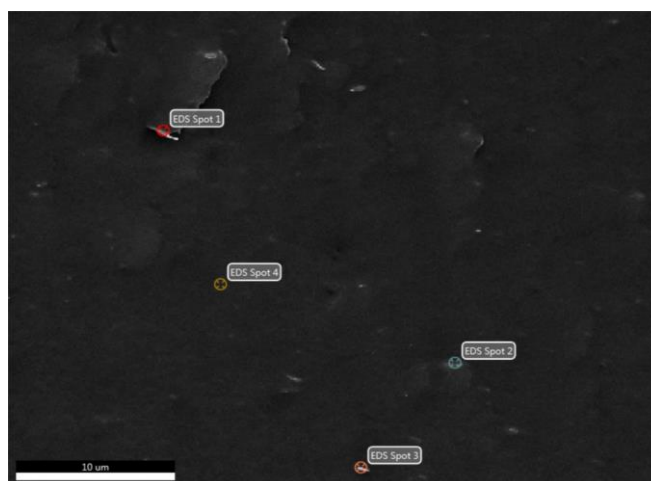
Sample	PBAT			PBAT/urea20			PBAT/urea30			PBAT/urea40		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	65.2	-2.1	5.7	66.8	-1.3	6.8	72.3	-1.5	7.7	73.1	-1	10.6
2	65.6	-2.4	5.6	73.8	-0.9	9.2	73.1	-1	6.8	69	-0.5	9
3	65.6	-1.9	5.6	65.7	-0.5	4.8	74.6	-1	8	73.4	-1	11
Average	65.5	-2.1	5.6	68.8	-0.9	6.9	73.3	-1.2	7.5	71.8	-0.8	10.2
S.D.	0.2	0.3	0.1	4.4	0.4	2.2	1.2	0.3	0.6	2.5	0.3	1.1

ตารางที่ ก.22 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีทิสูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 5

Sample	PBAT			PBAT/urea20			PBAT/urea30			PBAT/urea40		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	62.8	-0.6	5.9	67	-1.2	8	71.3	-0.8	9.1	74.9	-1.2	11.11
2	65.3	-1.7	7.3	69.8	-1.8	9.9	74.2	-0.8	9.9	73.2	-0.7	10.5
3	65.7	-2.8	8.2	65.3	-0.5	5.9	70.8	-0.8	8.9	76.3	-1	12.1
Average	64.6	-1.7	7.1	67.4	-1.2	7.9	72.1	-0.8	9.3	74.8	-1	11.2
S.D.	1.6	1.1	1.2	2.3	0.7	2.0	1.8	0.0	0.5	1.6	0.3	0.8

ก.2 ตอนที่ 2 การเตรียมซีทคอมพอลิฐาน PBAT จาก PBAT ยูเรียและ OMMT และการทดสอบสมบัติของซีท

ก.2.1 การศึกษาพื้นฐานวิทยา



รูปที่ ก.13 รูป FE-SEM ของซีทคอมพอลิฐาน PBAT/O1

ตารางที่ ก.23 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 1 ของซีทคอมพอลิฐาน PBAT/O1

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	69.14	80.39	343.77	5.85	0.4683	1.0486	0.6459	1.0000
O K	20.87	18.22	46.09	14.27	0.0413	0.9985	0.1981	1.0000
AlK	0.81	0.42	6.87	21.21	0.0059	0.8812	0.8302	1.0009
SiK	0.74	0.37	6.80	24.58	0.0060	0.8995	0.9005	1.0015
AuM	8.44	0.60	24.70	18.61	0.0648	0.5659	1.3590	0.9980

**ตารางที่ ก.24** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 2 ของซีทคอมพอสิต PBAT/O1

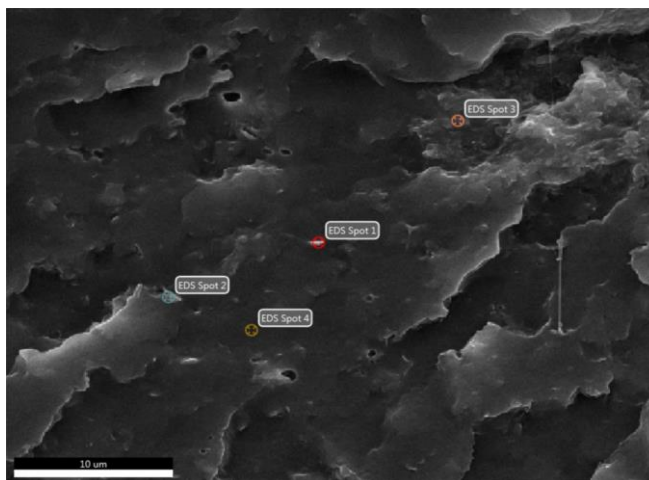
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	57.96	66.79	300.52	7.80	0.2743	1.0290	0.4599	1.0000
O K	33.20	28.73	127.50	11.23	0.0765	0.9782	0.2356	1.0000
MgK	1.09	0.62	12.51	15.64	0.0071	0.8956	0.7186	1.0041
AlK	2.30	1.18	28.39	8.73	0.0165	0.8609	0.8281	1.0057
SiK	5.45	2.68	72.01	6.00	0.0428	0.8783	0.8908	1.0031

**ตารางที่ ก.25** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 3 ของซีทคอมพอสิต PBAT/O1

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	65.25	72.70	296.58	6.74	0.3801	1.0218	0.5702	1.0000
O K	29.57	24.74	73.98	12.85	0.0624	0.9712	0.2172	1.0000
MgK	0.94	0.52	7.72	19.80	0.0061	0.8889	0.7261	1.0034
AlK	1.33	0.66	11.75	15.83	0.0096	0.8544	0.8358	1.0049
SiK	2.90	1.38	27.56	8.96	0.0230	0.8717	0.9041	1.0039

**ตารางที่ ก.26** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 4 ของซีทคอมพอสิต PBAT/O1

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	68.42	74.90	212.02	6.01	0.4610	1.0180	0.6618	1.0000
O K	29.08	23.90	41.50	13.86	0.0593	0.9673	0.2109	1.0000
AlK	1.31	0.64	6.85	19.90	0.0095	0.8509	0.8445	1.0041
SiK	1.20	0.56	6.72	22.87	0.0095	0.8681	0.9110	1.0047



รูปที่ ก.14 รูป FE-SEM ของซีทคอมพอสิต PBAT/O3

ตารางที่ ก.27 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 1 ของซีทคอมพอสิต PBAT/O3

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	61.76	69.54	375.25	6.86	0.3435	1.0238	0.5433	1.0000
O K	33.03	27.92	121.23	11.64	0.0728	0.9731	0.2265	1.0000
AlK	1.50	0.75	18.59	11.41	0.0108	0.8562	0.8355	1.0054
SiK	3.71	1.79	49.52	7.50	0.0294	0.8735	0.9030	1.0037

ตารางที่ ก.28 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 2 ของซีทคอมพอสิต PBAT/O3

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	55.33	63.69	418.63	7.27	0.2815	1.0280	0.4947	1.0000
O K	38.45	33.23	211.38	10.49	0.0932	0.9772	0.2481	1.0000
AlK	1.37	0.70	22.91	10.85	0.0097	0.8599	0.8241	1.0057
SiK	4.85	2.38	87.75	5.65	0.0382	0.8773	0.8955	1.0034

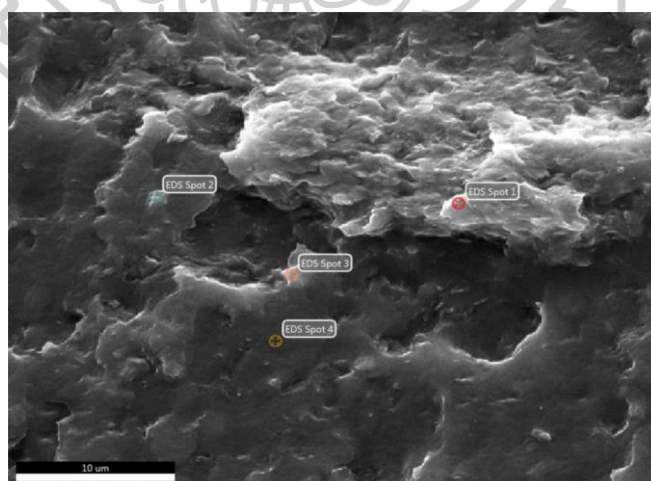


ตารางที่ ก.29 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 3 ของซีทคอมพอสิต PBAT/O3

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	61.24	70.69	235.07	8.50	0.2582	1.0301	0.4093	1.0000
O K	26.95	23.35	79.73	12.29	0.0575	0.9793	0.2177	1.0000
MgK	1.06	0.61	10.46	16.02	0.0071	0.8966	0.7368	1.0048
AlK	2.52	1.30	26.54	8.80	0.0184	0.8619	0.8423	1.0069
SiK	8.22	4.06	91.61	5.34	0.0652	0.8794	0.8991	1.0027

ตารางที่ ก.30 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 4 ของซีทคอมพอสิต PBAT/O3

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	75.83	81.55	259.66	5.64	0.5190	1.0149	0.6745	1.0000
O K	21.02	16.97	29.18	14.34	0.0383	0.9643	0.1888	1.0000
AlK	1.57	0.75	9.11	15.48	0.0115	0.8482	0.8621	1.0046
SiK	1.58	0.73	9.79	15.41	0.0127	0.8653	0.9217	1.0047



รูปที่ ก.15 รูป FE-SEM ของซีทคอมพอสิต PBAT/O5

**ตารางที่ ก.31** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 1 ของซีทคอมพอสิต PBAT/O5

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	49.85	60.32	457.77	8.41	0.1942	1.0407	0.3743	1.0000
O K	35.98	32.68	329.86	9.96	0.0918	0.9897	0.2577	1.0000
MgK	1.08	0.64	26.13	11.20	0.0068	0.9066	0.6960	1.0035
AlK	3.10	1.67	81.93	6.41	0.0220	0.8716	0.8095	1.0050
SiK	8.10	4.19	229.01	4.36	0.0629	0.8893	0.8707	1.0027
FeK	1.90	0.49	10.42	16.14	0.0157	0.7330	1.0129	1.1134

**ตารางที่ ก.32** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 2 ของซีทคอมพอสิต PBAT/O5

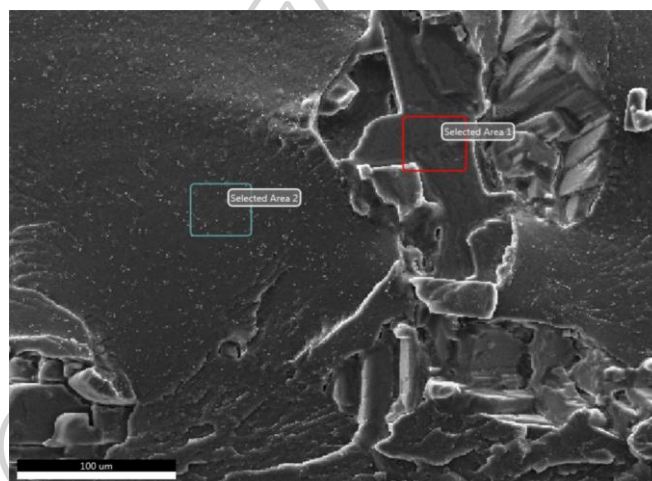
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	63.15	70.13	784.52	5.61	0.4079	1.0205	0.6331	1.0000
O K	34.42	28.70	221.75	10.94	0.0756	0.9698	0.2265	1.0000
AlK	0.74	0.37	16.13	15.08	0.0053	0.8531	0.8311	1.0044
SiK	1.68	0.80	39.65	8.66	0.0133	0.8704	0.9059	1.0045

**ตารางที่ ก.33** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 3 ของซีทคอมพอสิต PBAT/O5

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	62.27	69.72	834.71	6.07	0.3704	1.0224	0.5817	1.0000
O K	33.60	28.25	254.53	10.74	0.0741	0.9717	0.2268	1.0000
MgK	0.56	0.31	13.03	16.17	0.0036	0.8893	0.7121	1.0031
AlK	0.94	0.47	23.80	11.10	0.0067	0.8549	0.8287	1.0048
SiK	2.63	1.26	72.43	6.13	0.0208	0.8722	0.9023	1.0040

ตารางที่ ก.34 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 4 ของซีทคอมพอสิต PBAT/O5

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	68.58	75.72	482.90	6.39	0.4029	1.0202	0.5757	1.0000
O K	26.40	21.88	96.01	12.59	0.0525	0.9695	0.2052	1.0000
AlK	1.67	0.82	23.08	10.69	0.0122	0.8529	0.8503	1.0054
SiK	3.35	1.58	49.43	7.25	0.0267	0.8702	0.9123	1.0039



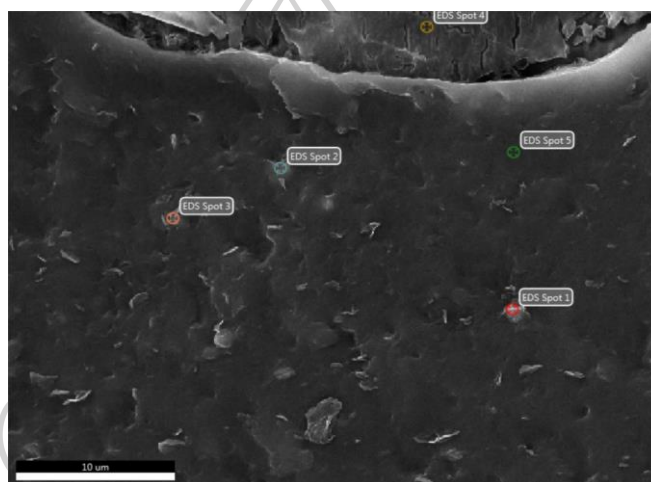
รูปที่ ก.16 รูป FE-SEM ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1

ตารางที่ ก.35 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Selected Area 1 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	17.33	20.45	114.03	6.85	0.1151	1.0301	0.6445	1.0000
N K	50.17	50.76	202.36	8.98	0.1876	1.0027	0.3730	1.0000
O K	32.51	28.80	79.53	12.41	0.0529	0.9791	0.1661	1.0000

ตารางที่ ก.36 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Selected Area 2 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O1

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	61.62	68.46	468.99	5.44	0.4205	1.0203	0.6690	1.0000
O K	37.04	30.90	143.67	11.21	0.0849	0.9696	0.2363	1.0000
AlK	0.66	0.33	8.21	17.82	0.0047	0.8529	0.8269	1.0036
SiK	0.67	0.32	9.06	19.68	0.0053	0.8701	0.9033	1.0048



รูปที่ ก.17 รูป FE-SEM ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O3

ตารางที่ ก.37 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 1 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O3

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	68.88	75.39	603.56	5.61	0.4546	1.0179	0.6483	1.0000
O K	28.36	23.30	115.13	13.11	0.0568	0.9672	0.2070	1.0000
AlK	0.85	0.41	12.89	15.58	0.0061	0.8508	0.8444	1.0048
SiK	1.91	0.89	31.38	9.06	0.0153	0.8680	0.9148	1.0045

**ตารางที่ ก.38** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 2 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O3

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	52.33	61.19	474.97	7.70	0.2396	1.0313	0.4441	1.0000
O K	39.46	34.64	299.14	10.09	0.0988	0.9804	0.2555	1.0000
MgK	0.46	0.27	9.35	21.63	0.0029	0.8976	0.6976	1.0039
AlK	1.03	0.54	22.99	10.84	0.0073	0.8628	0.8177	1.0065
SiK	6.72	3.36	162.76	4.38	0.0530	0.8803	0.8933	1.0030

**ตารางที่ ก.39** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 3 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O3

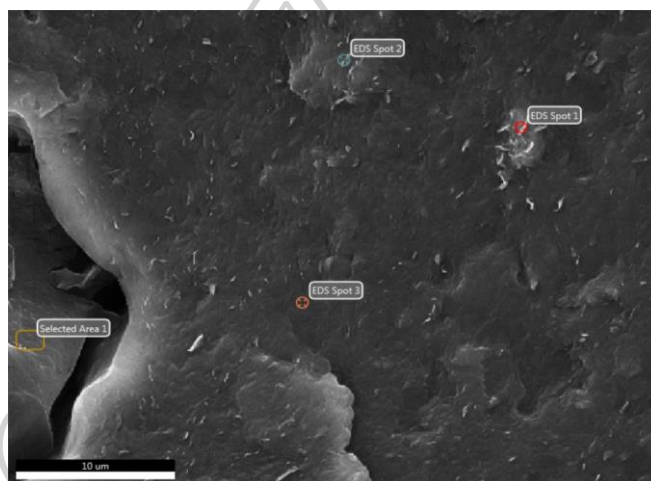
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	72.06	78.30	554.69	5.56	0.4798	1.0167	0.6550	1.0000
O K	24.60	20.07	83.02	13.84	0.0470	0.9661	0.1979	1.0000
MgK	0.80	0.43	9.88	16.75	0.0052	0.8841	0.7365	1.0030
AlK	0.78	0.38	10.38	16.15	0.0057	0.8498	0.8457	1.0046
SiK	1.75	0.82	25.07	9.76	0.0140	0.8670	0.9161	1.0046

**ตารางที่ ก.40** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 4 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O3

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	20.42	23.98	222.55	6.30	0.1321	1.0296	0.6281	1.0000
N K	48.81	49.16	290.91	9.25	0.1581	1.0022	0.3231	1.0000
O K	30.01	26.46	121.72	12.10	0.0473	0.9786	0.1611	1.0000
AlK	0.45	0.24	8.24	19.94	0.0031	0.8610	0.7922	1.0031
SiK	0.31	0.15	6.22	27.13	0.0024	0.8784	0.8795	1.0046

ตารางที่ ก.41 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 5 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O3

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	65.04	71.83	410.54	5.73	0.4280	1.0195	0.6456	1.0000
O K	32.61	27.04	101.67	11.71	0.0694	0.9688	0.2197	1.0000
AlK	0.90	0.44	9.76	16.53	0.0064	0.8522	0.8346	1.0043
SiK	1.45	0.69	17.11	10.76	0.0115	0.8695	0.9073	1.0046



รูปที่ ก.18 รูป FE-SEM ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O5

ตารางที่ ก.42 ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 1 ของซีทคอมพอสิต PBAT/u30/O5

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	44.60	55.03	233.55	9.47	0.1443	1.0426	0.3104	1.0000
O K	39.43	36.52	261.16	9.93	0.1056	0.9916	0.2702	1.0000
AlK	0.98	0.54	18.28	11.56	0.0071	0.8732	0.8246	1.0088
SiK	14.99	7.91	301.70	3.67	0.1202	0.8909	0.8984	1.0020

**ตารางที่ ก.43** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 2 ของซีทคอมพอลิสด PBAT/u30/O5

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	66.28	73.26	434.01	6.10	0.4133	1.0199	0.6113	1.0000
O K	30.20	25.06	100.27	12.39	0.0625	0.9693	0.2135	1.0000
AlK	1.20	0.59	14.46	12.19	0.0087	0.8527	0.8404	1.0048
SiK	2.32	1.09	29.96	9.32	0.0184	0.8699	0.9090	1.0043

**ตารางที่ ก.44** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Spot 3 ของซีทคอมพอลิสด PBAT/u30/O5

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	65.54	72.52	323.32	6.08	0.4128	1.0201	0.6173	1.0000
O K	31.18	25.90	78.25	11.68	0.0654	0.9694	0.2163	1.0000
AlK	1.33	0.65	11.84	13.00	0.0095	0.8528	0.8381	1.0045
SiK	1.96	0.93	18.83	11.62	0.0155	0.8701	0.9064	1.0043

**ตารางที่ ก.45** ธาตุต่าง ๆ ที่พบในบริเวณ Selected area 1 ของซีทคอมพอลิสด PBAT/u30/O5

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	20.24	23.80	237.63	6.11	0.1341	1.0295	0.6439	1.0000
N K	46.14	46.53	293.94	9.19	0.1519	1.0021	0.3285	1.0000
O K	33.62	29.68	150.74	11.77	0.0557	0.9785	0.1693	1.0000

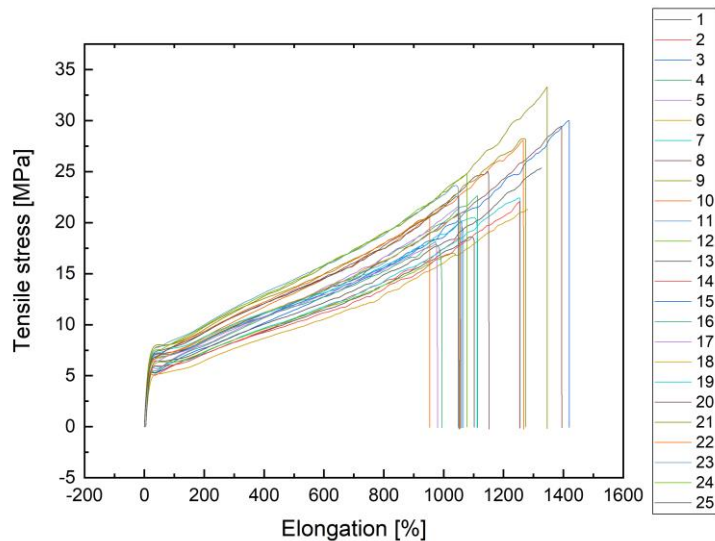
### ก.2.2 การทดสอบความทึบแสงของซีท

ตารางที่ ก.46 ค่าการดูดกลืนแสง ความหนา และค่าความทึบแสงของซีทสูตรต่าง ๆ

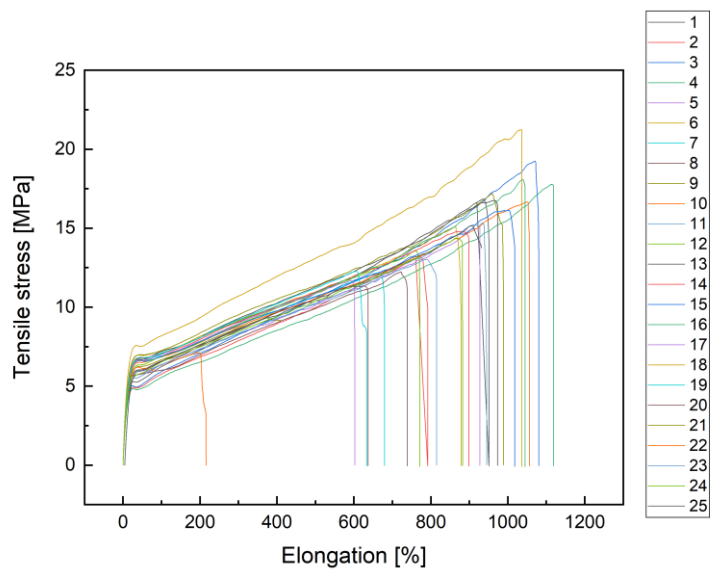
Position	1	2	3	Average	L	T	Average	SD
Sample								
PBAT/O1_1	0.21292	0.20819	0.19443	0.20518	0.32	0.64	0.74	0.09
PBAT/O1_2	0.24071	0.28682	0.23868	0.25540	0.31	0.82		
PBAT/O1_3	0.22864	0.22861	0.2254	0.22755	0.30	0.76		
PBAT/O3_1	0.88358	0.64568	0.59251	0.70726	0.45	1.57	1.46	0.41
PBAT/O3_2	0.38942	0.41096	0.41107	0.40382	0.40	1.01		
PBAT/O3_3	0.64966	0.95338	0.72122	0.77475	0.43	1.80		
PBAT/O5_1	0.88179	0.93196	0.86189	0.89188	0.47	1.90	1.90	0.12
PBAT/O5_2	0.696	0.72098	0.87479	0.76392	0.43	1.78		
PBAT/O5_3	0.79129	0.99861	0.99896	0.92962	0.46	2.02		
PBAT/u30/O1_1	0.86043	0.883	0.92679	0.89007	0.43	2.07	2.51	0.47
PBAT/u30/O1_2	1.51862	1.60007	1.40045	1.50638	0.50	3.01		
PBAT/u30/O1_3	1.15990	1.19344	1.19009	1.18114	0.48	2.46		
PBAT/u30/O3_1	1.33775	1.31277	1.36453	1.33835	0.46	2.91	2.62	0.44
PBAT/u30/O3_2	0.90311	1.02986	0.92848	0.95382	0.45	2.12		
PBAT/u30/O3_3	1.07489	1.06647	1.35359	1.16498	0.41	2.84		
PBAT/u30/O5_1	1.17610	1.13588	1.26952	1.19383	0.43	2.78	2.74	0.46
PBAT/u30/O5_2	0.94818	0.90546	0.85457	0.90274	0.40	2.26		
PBAT/u30/O5_3	1.35884	1.32321	1.4167	1.36625	0.43	3.18		



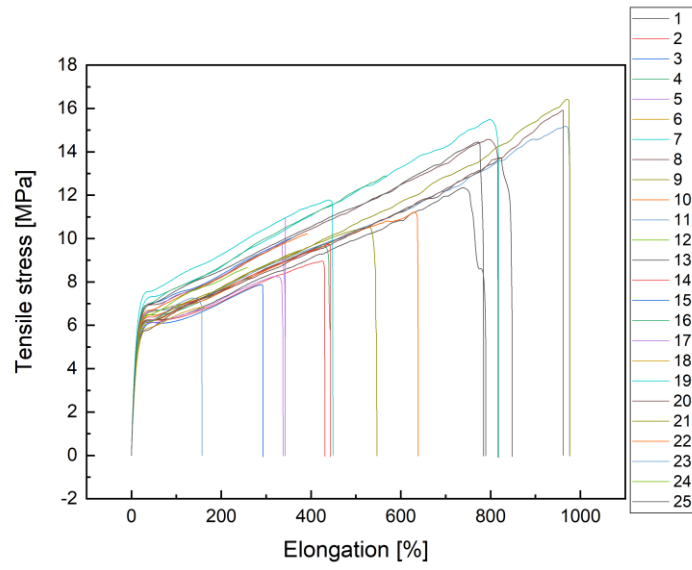
ก.2.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล



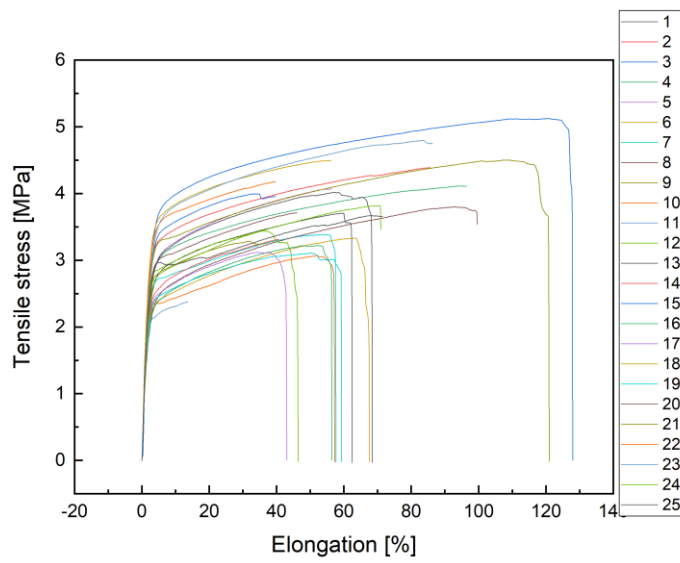
รูปที่ ก.19 Stress – elongation curve ของ PBAT/O1



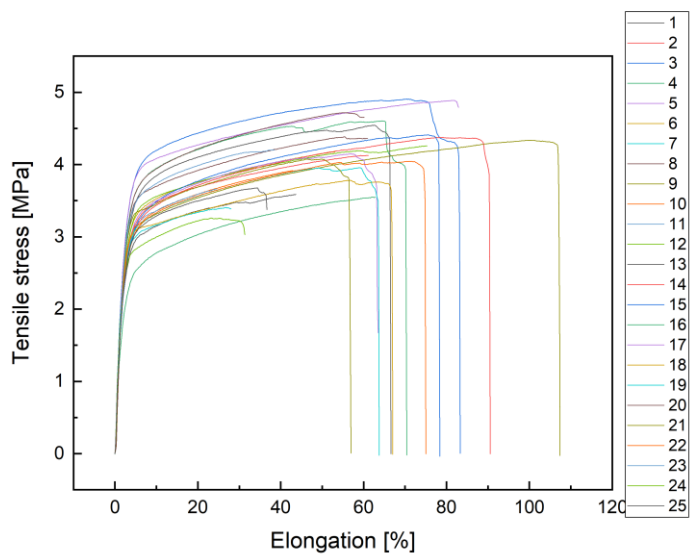
รูปที่ ก.20 Stress – elongation curve ของ PBAT/O1



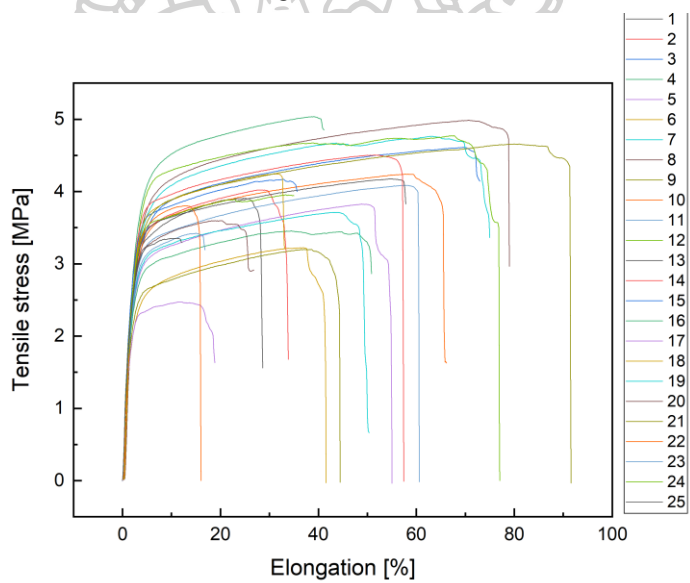
รูปที่ ก.21 Stress – elongation curve ของ PBAT/O5



รูปที่ ก.22 Stress – elongation curve ของ PBAT/u30/O1



รูปที่ ๓.๒๓ Stress – elongation curve ของ PBAT/u30/O3



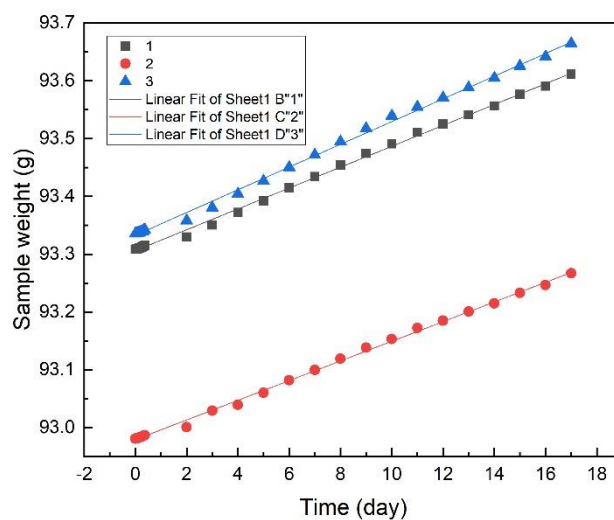
รูปที่ ๓.๒๔ Stress – elongation curve ของ PBAT/u30/O5

### ก.2.4 การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยยูเรียของฟิล์ม PBAT

ตารางที่ ก.47 ค่าดัชนีหักเหของแสงของซีท PBAT/urea สูตรต่าง ๆ ที่เวลาต่าง ๆ

Sample	PBAT/u30/O1			PBAT/u30/O3			PBAT/u30/O5		
	RF	c	%	RF	c	%	RF	c	%
0.08	1.3355	0.012	4.82	1.3350	0.00	0.00	1.3350	0.00	0.00
0.17	1.3355	0.01	4.82	1.3355	0.01	4.82	1.3355	0.01	4.82
0.25	1.3360	0.07	28.92	1.3355	0.01	4.82	1.3355	0.01	4.82
0.33	1.3360	0.07	28.92	1.3360	0.07	28.92	1.3355	0.01	4.82
0.50	1.3365	0.13	53.01	1.3360	0.07	28.92	1.3355	0.01	4.82
0.67	1.3365	0.13	53.01	1.3360	0.07	28.92	1.3360	0.07	28.92
0.83	1.3365	0.13	53.01	1.3360	0.07	28.92	1.3360	0.07	28.92
1.00	1.3365	0.13	53.01	1.3360	0.07	28.92	1.3360	0.07	28.92
2.00	1.3365	0.13	53.01	1.3365	0.13	53.01	1.3360	0.07	28.92
3.00	1.3365	0.13	53.01	1.3365	0.13	53.01	1.3365	0.13	53.01
6.00	1.3370	0.19	77.11	1.3370	0.19	77.11	1.3365	0.13	53.01
12.00	1.3370	0.19	77.11	1.3370	0.19	77.11	1.3365	0.13	53.01
24.00	1.3370	0.19	77.11	1.3370	0.19	77.11	1.3365	0.13	53.01
48.00	1.3375	0.25	100.00	1.3370	0.19	77.11	1.3370	0.19	77.11
72.00	1.3375	0.25	100.00	1.3370	0.19	77.11	1.3370	0.19	77.11
96.00	1.3375	0.25	100.00	1.3375	0.25	100.00	1.3370	0.19	77.11
120.00	1.3375	0.25	100.00	1.3375	0.25	100.00	1.3375	0.25	100.00

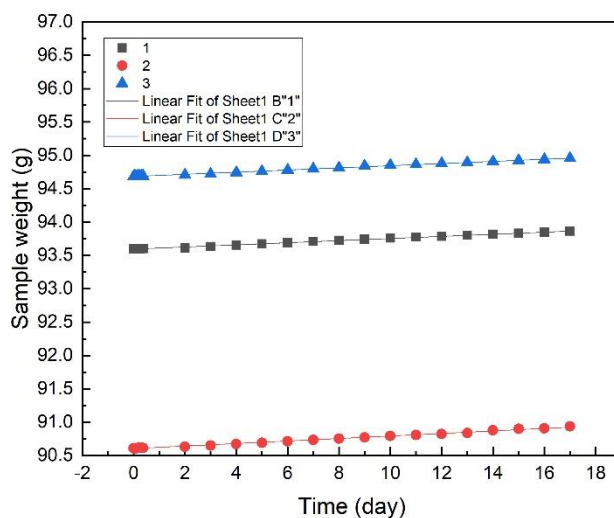
### ก.2.5 การทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission; WVT)



รูปที่ ก.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและเวลาของซีท PBAT/O1

ตารางที่ ก.48 พารามิเตอร์ต่าง ๆ เกิดจากการ Fitting curve ของซีท PBAT/O1

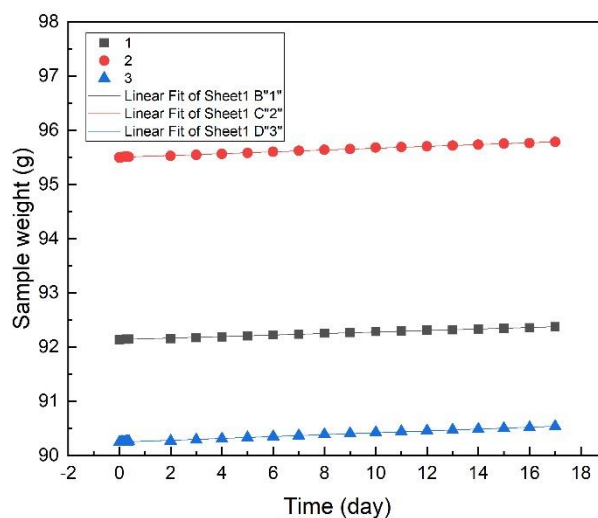
Equation	$y = a + b \cdot x$		
Plot	1	2	3
Weight	No Weighting		
Intercept	$93.3062 \pm 0.00128$	$92.97924 \pm 0.00112$	$93.33295 \pm 0.00151$
Slope	$0.01805 \pm 1.53963E-4$	$0.01701 \pm 1.34866E-4$	$0.01964 \pm 1.82852E-4$
Residual Sum of Squares	4.97E-04	3.81E-04	7.01E-04
Pearson's r	0.99913	0.99925	0.99896
R-Square (COD)	0.99826	0.99849	0.99792
Adj. R-Square	0.99818	0.99843	0.99784



รูปที่ ก.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและเวลาของซีท PBAT/O3

ตารางที่ ก.49 พารามิเตอร์ต่าง ๆ เกิดจากการ Fitting curve ของซีท PBAT/O3

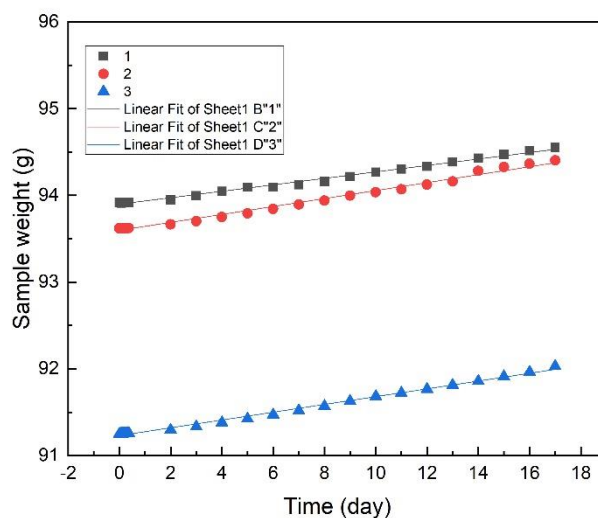
Equation	$y = a + b*x$		
Plot	1	2	3
Weight	No Weighting		
Intercept	$93.59531 \pm 0.0012$	$90.60502 \pm 0.00203$	$94.68399 \pm 0.0014$
Slope	$0.01585 \pm 1.44998E-4$	$0.01884 \pm 2.44885E-4$	$0.01614 \pm 1.68924E-4$
Residual Sum of Squares	$4.41E-04$	$0.00126$	$5.98E-04$
Pearson's r	0.999	0.99798	0.99869
R-Square (COD)	0.998	0.99596	0.99738
Adj. R-Square	0.99791	0.99579	0.99727



รูปที่ ก.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและเวลาของซีท PBAT/O5

ตารางที่ ก.50 พารามิเตอร์ต่าง ๆ เกิดจากการ Fitting curve ของซีท PBAT/O5

Equation	$y = a + b \cdot x$		
Plot	1	2	3
Weight	No Weighting		
Intercept	$92.14006 \pm 0.00107$	$95.50426 \pm 0.00122$	$90.2472 \pm 0.00134$
Slope	$0.01393 \pm 1.28631E-4$	$0.01667 \pm 1.47229E-4$	$0.01725 \pm 1.61166E-4$
Residual Sum of Squares	3.47E-04	4.55E-04	5.45E-04
Pearson's r	0.99898	0.99907	0.99895
R-Square (COD)	0.99796	0.99813	0.99791
Adj. R-Square	0.99787	0.99805	0.99782

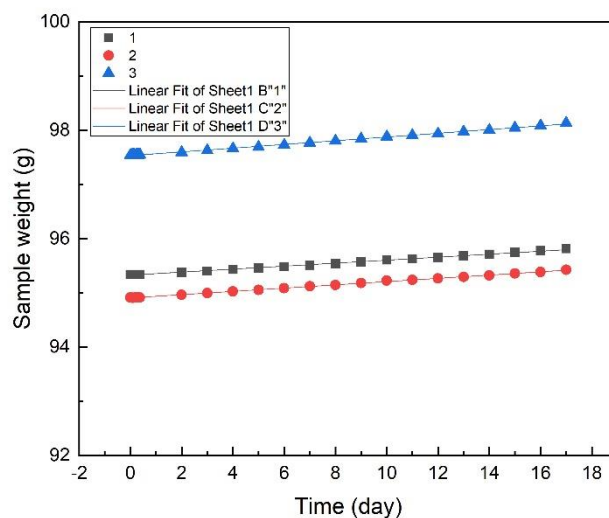


รูปที่ ก.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและเวลาของซีท PBAT/u30/O1

ตารางที่ ก.51 พารามิเตอร์ต่าง ๆ เกิดจากการ Fitting curve ของซีท PBAT/u30/O1

Equation	$y = a + b \cdot x$		
Plot	1	2	3
Weight	No Weighting		
Intercept	$93.89884 \pm 0.00472$	$93.59733 \pm 0.00747$	$91.23012 \pm 0.00535$
Slope	$0.03721 \pm 5.69564E-4$	$0.04584 \pm 9.02241E-4$	$0.04492 \pm 6.45566E-4$
Residual Sum of Squares	0.0068	0.01707	0.00874
Pearson's r	0.9972	0.99538	0.99753
R-Square (COD)	0.99441	0.99079	0.99507
Adj. R-Square	0.99417	0.9904	0.99486

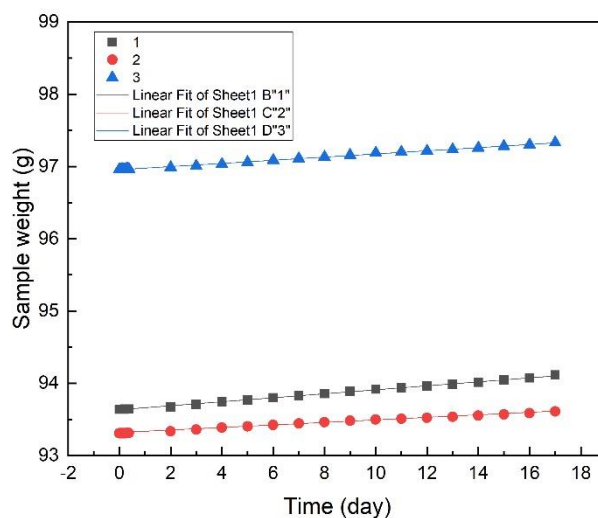




รูปที่ ก.29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและเวลาของซีท PBAT/u30/O3

ตารางที่ ก.52 พารามิเตอร์ต่าง ๆ เกิดจากการ Fitting curve ของซีท PBAT/u30/O3

Equation	$y = a + b \cdot x$		
Plot	1	2	3
Weight	No Weighting		
Intercept	$95.32977 \pm 0.00234$	$94.90841 \pm 0.00139$	$97.53472 \pm 0.00205$
Slope	$0.02752 \pm 2.8203E-4$	$0.03012 \pm 1.67603E-4$	$0.03431 \pm 2.46991E-4$
Residual Sum of Squares	0.00167	5.89055E-4	0.00128
Pearson's r	0.99874	0.99963	0.99938
R-Square (COD)	0.99749	0.99926	0.99876
Adj. R-Square	0.99738	0.99923	0.99871



รูปที่ ก.30 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและเวลาของซีท PBAT/u30/O5

ตารางที่ ก.53 พารามิเตอร์ต่าง ๆ เกิดจากการ Fitting curve ของซีท PBAT/u30/O5

Equation	$y = a + b*x$		
Plot	1	2	3
Weight	No Weighting		
Intercept	$93.63432 \pm 0.00163$	$93.31859 \pm 0.01167$	$96.95582 \pm 0.00173$
Slope	$0.02752 \pm 1.96476E-4$	$0.0175 \pm 0.00141$	$0.02182 \pm 2.0915E-4$
Residual Sum of Squares	8.09E-04	0.04159	9.17E-04
Pearson's r	0.99939	0.93033	0.9989
R-Square (COD)	0.99878	0.86552	0.9978
Adj. R-Square	0.99873	0.85992	0.99771

### ก.2.6 การทดสอบการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลอง (Weathering testing)

ตารางที่ ก.54 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีท PBAT/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ

Sample	PBAT/O1			PBAT/O3			PBAT/O5		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	65.2	-1.2	-0.3	64.5	-0.4	5.3	64.1	0.8	8.7
2	64.2	-1	-0.1	64.6	-0.4	5.4	63.1	0.7	8
3	64.5	-1	0.0	64.3	-0.4	5.2	63.3	0.5	7.4
Average	64.6	-1.1	-0.1	64.5	-0.4	5.3	63.5	0.7	8.0
S.D.	0.5	0.1	0.2	0.2	0.0	0.1	0.5	0.2	0.7

ตารางที่ ก.55 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีท PBAT/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 1

Sample	PBAT/O1			PBAT/O3			PBAT/O5		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	64.4	-1.8	1.4	63.9	-0.7	5	63.6	0.3	8.9
2	64.6	-1.7	1.8	63.6	-0.9	5.3	63.6	0.3	9.2
3	64.3	-1.8	1.6	64.1	-0.9	5.4	63.3	0.4	9.6
Average	64.4	-1.8	1.6	63.9	-0.8	5.2	63.5	0.3	9.2
S.D.	0.2	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1	0.4

ตารางที่ ก.56 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีท PBAT/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 2

Sample	PBAT/O1			PBAT/O3			PBAT/O5		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	64.2	-2	3.6	64	-1	7.2	62.8	-0.2	8.3
2	64.3	-2.1	4	63.9	-1.2	6.9	62.6	-0.2	8.4
3	64.1	-2.1	3.3	64.3	-1.1	6.8	62.8	-0.1	8.5
Average	64.2	-2.1	3.6	64.1	-1.1	7.0	62.7	-0.2	8.4
S.D.	0.1	0.1	0.4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1

ตารางที่ ก.57 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีท PBAT/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 3

Sample	PBAT/O1			PBAT/O3			PBAT/O5		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	64.2	-2	3.6	64	-1	7.2	62.8	-0.2	8.3
2	64.3	-2.1	4	63.9	-1.2	6.9	62.6	-0.2	8.4
3	64.1	-2.1	3.3	64.3	-1.1	6.8	62.8	-0.1	8.5
Average	64.2	-2.1	3.6	64.1	-1.1	7.0	62.7	-0.2	8.4
S.D.	0.1	0.1	0.4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1

ตารางที่ ก.58 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีท PBAT/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 4

Sample	PBAT/O1			PBAT/O3			PBAT/O5		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	64.1	-2.7	4.5	64.3	-1.3	8.2	63.5	-0.2	10
2	63.9	-2.6	4.5	64.2	-1.5	8.4	63	0	10.5
3	64.2	-2.5	4.6	64.2	-1.4	8.1	62.9	0	10.2
Average	64.1	-2.6	4.5	64.2	-1.4	8.2	63.1	-0.1	10.2
S.D.	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.3

ตารางที่ ก.59 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีท PBAT/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 5

Sample	PBAT/O1			PBAT/O3			PBAT/O5		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	64.9	-2.8	5.6	64.5	-0.9	7.3	63.1	-0.4	10.4
2	64.0	-2.7	5.9	64	-1.1	8	62.5	-0.3	11.3
3	63.8	-2.6	6	64.5	-1.0	7.4	63.0	-0.2	11.5
Average	64.2	-2.7	5.8	64.3	-1.0	7.6	62.9	-0.3	11.1
S.D.	0.6	0.1	0.2	0.3	0.1	0.4	0.3	0.1	0.6

ตารางที่ ก.60 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีท PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ

Sample	PBAT/u30/O1			PBAT/u30/O3			PBAT/u30/O5		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	69	-1	0.9	65.2	-0.2	5.3	63.7	0.3	7.7
2	68.3	-1	0.6	65.2	-0.2	5.3	63.8	0.1	7.2
3	67.6	-1	0.6	66.1	-0.3	4.4	64.0	0.4	7.8
Average	68.3	-1.0	0.7	65.5	-0.2	5.0	63.8	0.3	7.6
S.D.	0.7	0.0	0.2	0.5	0.1	0.5	0.2	0.2	0.3

ตารางที่ ก.61 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีท PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 1

Sample	PBAT/u30/O1			PBAT/u30/O3			PBAT/u30/O5		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	73.9	-1.3	5.4	71.5	-0.6	7.6	70.1	0.6	11.9
2	73.1	-1.4	5.8	70.1	-0.7	6.5	69.7	0.8	12.6
3	74.5	-1.1	5.3	70.4	-0.6	7.5	70.4	0.8	12.3
Average	73.8	-1.3	5.5	70.7	-0.6	7.2	70.1	0.7	12.3
S.D.	0.7	0.2	0.3	0.7	0.1	0.6	0.4	0.1	0.4

ตารางที่ ก.62 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีท PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 2

Sample	PBAT/u30/O1			PBAT/u30/O3			PBAT/u30/O5		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	74	-1.6	7.1	72.1	-0.5	9.4	68.8	0	11
2	74.6	-1.8	7.8	73.4	-0.6	9.3	70.4	-0.1	11
3	75.7	-1.6	7.5	72.7	-0.6	8.8	67.8	-0.1	10.3
Average	74.8	-1.7	7.5	72.7	-0.6	9.2	69	-0.1	10.8
S.D.	0.9	0.1	0.4	0.7	0.1	0.3	1.3	0.1	0.4

ตารางที่ ก.63 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีท PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 3

Sample	PBAT/u30/O1			PBAT/u30/O3			PBAT/u30/O5		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	72	-1.8	6.6	68.6	-1	8.8	70.3	0.1	11.6
2	72.5	-1.9	7.4	69.9	-1	8.6	68.3	0.1	11.3
3	73.7	-1.8	7.5	70.6	-1.1	8.5	70.9	-0.1	11.2
Average	72.7	-1.8	7.2	69.7	-1.0	8.6	69.8	0.0	11.4
S.D.	0.9	0.1	0.5	1.0	0.1	0.2	1.4	0.1	0.2

ตารางที่ ก.64 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีท PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 4

Sample	PBAT/u30/O1			PBAT/u30/O3			PBAT/u30/O5		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	73.3	-2	8.3	71.0	-1	10.2	70.2	0.1	13
2	73	-2	8.7	71.3	-1	10.4	69.6	0	12
3	74.4	-1.9	8.8	70.4	-1.1	10.2	68.6	0	12.1
Average	73.6	-2.0	8.6	70.9	-1.0	10.3	69.5	0.0	12.4
S.D.	0.7	0.1	0.3	0.5	0.1	0.1	0.8	0.1	0.6

ตารางที่ ก.65 ค่า  $L^*a^*b$  ของซีท PBAT/u30/OMMT สูตรต่าง ๆ ที่รอบการทดสอบรอบที่ 5

Sample	PBAT/u30/O1			PBAT/u30/O3			PBAT/u30/O5		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b
1	72.6	-2.1	9.6	71.8	-0.9	11.1	69.6	0.2	12.9
2	71.9	-2.2	9.8	71	-1	11.6	68.3	0.1	13.1
3	73.6	-2.1	10	70.7	-0.9	11	70.2	0.1	13.4
Average	72.7	-2.1	9.8	71.2	-0.9	11.2	69.4	0.1	13.1
S.D.	0.9	0.1	0.2	0.6	0.1	0.3	1.0	0.1	0.3



### ข.1 การคำนวณหาค่าความทึบแสงของซีท (Opacity)

นำซีทไปทดสอบโดยใช้เครื่อง UV-Visible spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่นที่ 400-800 นาโนเมตร เพื่อนำค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความทึบแสงของซีท ซึ่งความทึบแสงของซีทสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงและการส่องผ่านของแสงดังนี้

$$\text{Opacity} = \frac{\text{Abs}_{600}}{x} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ  $\text{Abs}_{600}$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของซีทที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

$x$  คือ ความหนาของซีท (มิลลิเมตร)

จากผลการทดสอบในตอนที่ 1 ของชิ้นงานซีท PBAT ตัวอย่างชิ้นที่ 1 ซึ่งจะมีค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ครั้งเท่ากับ 0.22870 ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ความหนาของซีทชิ้นนี้เท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร แทนค่าในสมการที่ ข.1 จะได้

$$\text{Opacity} = \frac{0.22870}{0.40}$$

$$\text{Opacity} = 0.57$$

### ข.2 การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PBAT

การศึกษาผลึกของซีท PBAT ยูเรียและซีท PBAT/urea ที่เตรียมได้จะทำการทดสอบด้วยเครื่อง X-ray diffraction spectrometer (XRD) ( $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ) โดยใช้ความต่างศักย์ 40 kV ในช่วง  $2\theta$  ที่  $10-30^\circ$  และความเร็วในการสแกนที่  $2^\circ/\text{min}$  เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ PBAT สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

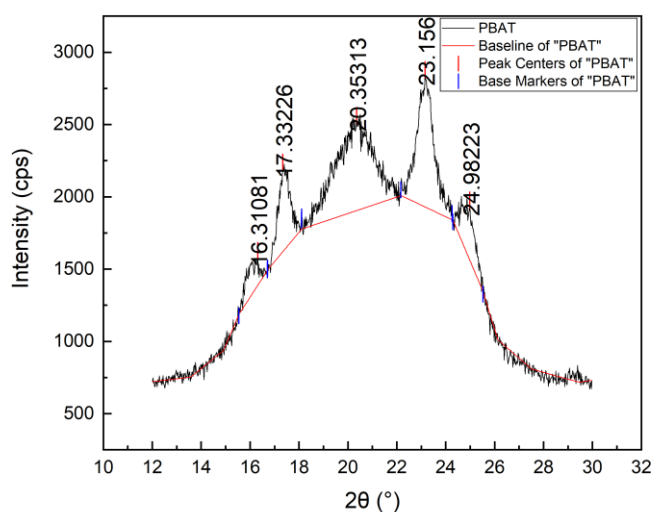
$$X_c = \frac{\sum A_{\text{Crystal}}}{\sum A_{\text{Crystal}} + \sum A_{\text{Amorphous}}} \times 100 \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อ  $A_{\text{Crystal}}$  คือ พื้นที่ใต้พีคส่วนที่เป็นผลึก

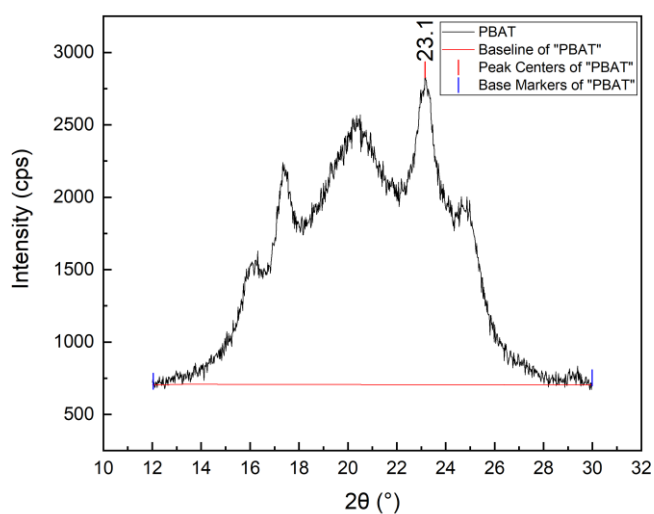
$A_{\text{Amorphous}}$  คือ พื้นที่ใต้พีคส่วนที่เป็นอสัณฐาน



ทำการหาพื้นที่ใต้พีคของบริเวณที่เป็นผลึกด้วยโปรแกรม OriginPro โดยจะทำการสร้าง Baseline เพื่อกำหนดพื้นที่ส่วนที่เป็นผลึกแสดงดังรูปที่ ข.1 จากนั้นทำการอินทิเกรตหาพื้นที่ส่วนที่เป็นผลึก ในขณะที่เดียวกันจะทำการสร้าง Baseline เพื่อกำหนดพื้นที่ส่วนที่เป็นผลึกรวมกับส่วนที่เป็นอสัณฐานให้แยกออกจากบริเวณที่เป็น Background จากนั้นทำการอินทิเกรตหาพื้นที่ส่วนที่เป็นผลึกแสดงดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.1 Baseline ของส่วนที่เป็นผลึกของ PBAT



รูปที่ ข.2 Baseline ของส่วนที่เป็นผลึกรวมกับส่วนที่เป็นอสัณฐานของ PBAT

จากรูปที่ ข.1 และ ข.2 ซึ่งเป็นการกำหนด Baseline เพื่ออินทิเกรตพื้นที่ใต้พีคของ PBAT หลังจากการอินทิเกรตพบว่าพื้นที่ใต้พีคบริเวณที่เป็นผลึกในรูปที่ ข.1 จะมีค่าเท่ากับ 1133.2774 752.7245 339.0997 231.09669 และ 132.14974 ส่วนหลังจากการอินทิเกรตพบว่าพื้นที่ใต้พีค บริเวณที่เป็นผลึกรวมกับส่วนที่เป็นอสัณฐานในรูปที่ ข.2 จะมีค่าเท่ากับ 14223.6 นำค่าที่ได้ไปแทน ค่าในสมการที่ ข.2 ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ส่วนที่เป็นผลึก} &= 1,133.2774+752.7245+339.0997+231.09669+132.14974 \\ &= 2,588.348 \end{aligned}$$

พื้นที่ส่วนที่เป็นผลึกรวมกับส่วนที่เป็นอสัณฐาน = 14,223.6

$$X_c = \frac{\sum A_{\text{Crystal}}}{\sum A_{\text{Crystal}} + \sum A_{\text{Amorphous}}} \times 100$$

$$X_c = \frac{2,588.348}{14,223.6} \times 100$$

$$X_c = 18.20 \%$$

### ข.3 การคำนวณหาค่าระยะห่างของชั้นของแร่ดินที่ผ่านการปรับปรุง

ทำการทดสอบ XRD ในช่วง  $2\theta$  เท่ากับ  $1-30^\circ$  และความเร็วในการสแกนที่  $2^\circ/\text{min}$  ซึ่งสามารถคำนวณหาระยะห่างของชั้นของแร่ดินที่ผ่านการปรับปรุงได้โดยใช้สมการของ Bragg's equation ดังสมการที่ ข.3

$$n\lambda = 2d(\sin\theta) \quad (\text{ข.3})$$

เมื่อ  $n$  = ระยะห่างของชั้นที่พิจารณา

$\theta$  = มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

$\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ( $\lambda = 0.15418 \text{ nm}$  ของ  $\text{CuK}\alpha$ )

จากการทดสอบแร่ดินที่ผ่านการปรับปรุงชนิด I.28E พบว่าปรากฏพีคซึ่งแสดงถึงระนาบ (001) ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $4.34^\circ$  ซึ่งเมื่อนำไปแทนค่าใน Bragg's equation จะได้

$$n\lambda = 2d(\sin\theta)$$

$$d = \frac{n\lambda}{2(\sin \frac{2\theta}{2})}$$

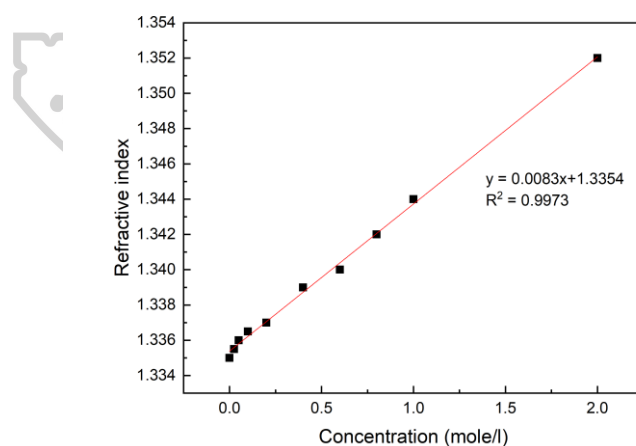
$$d = \frac{1(0.15418)}{2(\sin \frac{4.34}{2})}$$

$$d = 2.03 \text{ nm}$$

#### ข.4 การคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายยูเรียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

##### ข.4.1 กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน

ทำการสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน (calibration curve) โดยการเตรียมสารละลายยูเรียความเข้มข้นต่าง ๆ แล้วนำไปวัดค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index) โดยใช้เครื่องวัดการหักเหของแสง (refractometer) เพื่อนำค่าดัชนีหักเหของแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มาทำการสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นและค่าดัชนีหักเหของแสง จะได้กราฟเส้นตรงที่สามารถนำสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาหาค่าความเข้มข้นได้ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการวัดค่าดัชนีหักเหของแสงของสารละลายยูเรียที่ความเข้มข้น 0 0.025 0.05 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 1 และ 2 โมล/ลิตร



รูปที่ ข.3 กราฟเทียบมาตรฐานของสารละลายยูเรีย

จากการสร้างกราฟเทียบมาตรฐานจะได้กราฟแสดงดังรูปที่ ข.3 ซึ่งจากการทำ fitting curve ด้วยโปรแกรม OriginPro จะได้สมการเส้นตรงคือ

$$y = 0.0083x + 1.3354 \quad (\text{ข.4})$$

#### ข.4.2 ตัวอย่างการคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายยูเรียที่เวลาต่าง ๆ

จากผลการทดสอบในตอนที 1 ของซีท PBAT/u20 ที่เวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งจะวัดค่าดัชนีหักเหของแสงได้เท่ากับ 1.3360 จะสามารถคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายยูเรียได้ดังนี้คือ จากสมการเส้นตรง  $y = 0.0083x + 1.3354$  จะพบว่าค่า  $y$  คือค่าดัชนีหักเหของแสง ส่วนค่า  $x$  คือความเข้มข้นของสารละลายยูเรีย ดังนั้นจึงทำการจัดรูปสมการใหม่เพื่อหาค่าตัวแปร  $x$  ดังนี้

$$x = \frac{y - 1.3354}{0.0083}$$

แทนค่า  $y = 1.3360$  ในสมการ ข.5 จะได้

$$x = \frac{1.3360 - 1.3354}{0.0083} \quad (\text{ข.5})$$

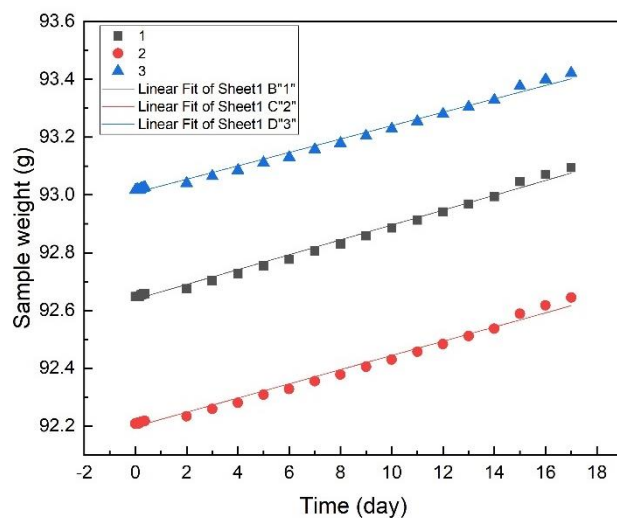
$$x = 0.0720$$

ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายยูเรียที่เวลา 1 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 0.0720 โมล/ลิตร

#### ข.5 การคำนวณหาค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate; WVTR)

ในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิค Cup method แบบการใช้สารดูดความชื้น (desiccant) ในการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ รูปที่ ข.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของถ้วยแก้วบรรจุซิลิกาเจลที่ปิดปากด้วยซีท PBAT เทียบกับเวลาโดยจะทำการทดสอบชิ้นงานสุตรละ 3 ชิ้นงานทำการ Fitting curve ของแต่ละชิ้นงานตัวอย่างเพื่อหาสมการเส้นตรงเพื่อแทนข้อมูลนั้น จากนั้นนำค่าความชันของกราฟที่เกิดจากการ fitting curve ไปคำนวณหาค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำได้ดังนี้

$$\text{WVTR} = \frac{\text{ความชัน (g/day)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของซีท (m}^2\text{)}} \quad (\text{ข.6})$$



รูปที่ ข.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของถ้วยแก้วบรรจุซิลิกาเจลที่ปิดปากด้วยซีท PBAT  
เทียบกับเวลา

ตารางที่ ข.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทำ Linear fitting curve

Equation	$y = a + b*x$		
Plot	1	2	3
Weight	No Weighting		
Intercept	$92.63897 \pm 0.00354$	$92.19892 \pm 0.00414$	$93.008 \pm 0.00351$
Slope	$0.02569 \pm 4.27854E-4$	$0.02456 \pm 5.00179E-4$	$0.02316 \pm 4.23122E-4$
Residual Sum of Squares	0.00384	0.00525	0.00375
Pearson's r	0.99669	0.99506	0.99602
R-Square (COD)	0.99339	0.99015	0.99206
Adj. R-Square	0.99311	0.98973	0.99172

เมื่อพิจารณาเส้นกราฟของชิ้นงานตัวอย่างชิ้นที่ 1 จากตารางที่ ข.1 พบว่าจากการ fitting curve ด้วยโปรแกรม OriginPro จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.02569 ส่วนพื้นที่หน้าตัดมีค่าเท่ากับ 0.001 m<sup>2</sup> แทนค่าความชันและพื้นที่หน้าตัดในสมการที่ ข.6 จะได้

$$WVTR = \frac{\text{ความชัน (g/day)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของซีท (m}^2\text{)}}$$

$$WVTR = \frac{0.02569}{0.001}$$

$$WVTR = 25.261 \text{ g/m}^2\cdot\text{day}$$

#### ข.6 การคำนวณระยะเวลาในการทดสอบการทนทานต่อสภาพแวดล้อมจำลอง (weathering testing)

การคำนวณระยะเวลาที่ทดสอบเทียบกับระยะเวลาจริงจากการทดสอบกลางแจ้งจริงที่รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นเวลา 1 ปี จะคำนวณโดยใช้รังสี UVA [45]

One year in Florida = 280 MJ/m<sup>2</sup> TUV (Total of UV) irradiance

TUV Radiant Dosage J/m<sup>2</sup> = Irradiance (W/m<sup>2</sup>) \* seconds (s)

$$\text{kJ/m}^2 = \text{Irradiance (W/m}^2\text{)} * \text{hours} * 3.6$$

QUV irradiance at 0.71 (W/m<sup>2</sup> nm) ~ 39.16 W/m<sup>2</sup> TUV with UVA lamps

$$280 \text{ MJ/m}^2 = 39.16 \text{ W/m}^2 * X \text{ hours} * 3.6$$

$$280,000 \text{ kJ/m}^2 = 39.16 * X * 3.6$$

$$280,000 \text{ kJ/m}^2 = 140.98 * X$$

$$280,000 \text{ kJ/m}^2 / 140.98 = 1,986 \text{ hours}$$

$$= 83 \text{ days}$$

ซึ่งจะพบว่าผลลัพธ์จากการใช้งานเครื่อง QUV เป็นเวลาเพียง 83 วันเทียบเท่ากับวางชิ้นงานกลางแจ้งที่รัฐฟลอริดา 1 ปี แต่ในงานวิจัยนี้จะมีการใช้ UVB ซึ่งมีพลังงานที่สูงกว่า UVA ดังนั้นอาจจะส่งผลให้ระยะเวลาจริงน้อยกว่าระยะเวลาจริงที่คำนวณได้ โดยจะสามารถคำนวณระยะเวลาจริงได้ดังต่อไปนี้

ระยะเวลาในการทดสอบ 83 วัน เท่ากับระยะเวลาจริง 1 ปี

ระยะเวลาในการทดสอบ  $\frac{8}{24}$  วัน เท่ากับระยะเวลาจริง  $\frac{\frac{8}{24} \times 1}{83} = 0.0040$  ปี

ดังนั้น ระยะเวลาจริง 0.0040 ปี เท่ากับ 1.46 วัน









e-Proceedings

2020  
PPC &  
ETROMAT  
SYMPOSIUM

The 26<sup>th</sup> PPC Symposium on Petroleum,  
Petrochemicals, and Polymers and  
The 11<sup>th</sup> Research Symposium on  
Petrochemical and Materials Technology



JULY 23, 2020  
at The Petroleum and petrochemical college  
Chulalongkorn University

## FABRICATION AND PROPERTIES OF PBAT/UREA SHEETS FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS

*Panida Thaiprasong<sup>a</sup>, Nattawut Chaiyut<sup>\* a</sup>, Bussarin Ksapabutr<sup>a</sup>, Manop Panapoy<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakom University

Keywords: Controlled-release fertilizer, Poly(butylene adipate-co-terephthalate), Urea

### ABSTRACT

The ability of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)-based sheets to control the releasing of urea fertilizer was studied in this work. Additionally, morphology and mechanical properties of the sheets were also investigated. The PBAT/urea sheets were prepared by solution casting and then compression molding. The urea content in the sheets was varied from 20% to 40% by weight. SEM micrographs revealed good interfacial adhesion between PBAT and urea phases. The increment of urea content made the sheets more brittle as well as caused more urea agglomeration which seen on the surface of the sheets. The results of tensile testing demonstrated that the sheets were higher modulus but less strength and elongation in comparison with the PBAT sheet. The urea release study showed that when increased urea content in the sheets, they released a higher amount of urea with a faster-release rate at the maximum release. From before mentioned properties, these PBAT/urea sheets could be utilized for agricultural applications.

\*chaiyut\_n@su.ac.th

### INTRODUCTION

Urea fertilizer is widely used as a source of nitrogen for plants in an agricultural section. Its essential function is to provide the plants with nitrogen for sustaining the plant's growth and enhancing crop productivity (Zahir, 2014). Unfortunately, urea has a lower nitrogen use efficiency than it should be because the plants can utilize less than half of nitrogen from applied urea. Plants can absorb only nitrogen in the form of ammonium and nitrate ion. Urea's important product from hydrolysis by urease in the soil is ammonium ion. By the way, ammonium ion will convert to nitrate ion via nitrification in aerobic soil. These occurred ions can be leached easily by water so this event causes nutrient loss with water. Moreover, leached ions will remain in the soil and cause environmental problems (Larney & Hao, 2007; Zahir, 2014).

Presently, several researchers have attempted to improve urea fertilizer performance. Their concept bases on prolonging the period of rapid nitrogen uptake in order to decrease the nitrogen losses. It turns out that controlled-release fertilizer has been an interesting alternative idea. Controlled-release fertilizer is a fertilizer which can gradually release nutrient to plants. Materials such as clay, sulfur, polymer, etc., are applied to prepare controlled-release fertilizer (Varadachari & Goertz, 2010). Selecting among alternatives, the use of polymer is recognizing. Baldanza et al. (Baldanza et al., 2018) prepared and characterized PBS/urea/MMT and PBS/urea composites. Their composites were prepared from the melt mixing process and ground by a grinder, respectively. They concluded that the exhaustion of the entrapped urea in PBS/urea occurred after 40 hours. Besides, poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) is one of the attractive biodegradable polymers because of its outstanding ductility and its high elongation at break. According

to its offers properties, it is suitable for film applications such as food packaging and agricultural mulch films (Adrar, Habi, Aji, & Grohens, 2017). Mondal et al. (Mondal et al., 2015) prepared PBAT/sodium benzoate (SB) film from the solution casting technique. They observed that PBAT has reduced the probability of SB release from the film surface.

In this research, we prepared PBAT/urea in the form of sheets by solution casting and then compression molding. The ability of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)-based sheets to control the releasing of urea fertilizer was studied. Additionally, morphology and mechanical properties of the sheets were also investigated.

## EXPERIMENTAL

### A. Materials

Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT with trade name Ecoflex F Blend® C 1200 was supplied by POLYMATS CO., LTD. (Thailand). Urea in the form of powder was purchased from Better Syndicate CO., LTD. (Thailand). It was sieved under a sieve shaker to achieve a particle size in the range of 150-250  $\mu\text{m}$ . Dichloromethane was purchased from RCI LABSCAN CO., LTD. (Thailand).

### B. Preparation of PBAT-based sheets

Pure PBAT and PBAT/urea films with various loadings of urea (0–40 % by weight) were prepared by solution casting technique. Firstly, PBAT and urea were dried in an oven at 60 °C for 12 hours. After that PBAT pellets were dissolved in dichloromethane using a mechanical stirrer at 400 rpm for 2 hours. At the same time, urea was sonicated in dichloromethane using an ultrasonicator for 10 minutes and then added to the previously prepared PBAT solution. The mixture was continuously stirred using a mechanical stirrer at 700 rpm for 3 hours after that it was cast into a glass mold and left for solvent evaporation under an ambient atmosphere for 24 hours. The PBAT/urea film was formed and cut into small pieces and then dried in an oven at 60 °C for 12 hours. The small pieces of PBAT/urea films were compressed into a sheet with 500±100  $\mu\text{m}$  thickness by compression molding (Lp-S-50, Labtech engineering Co. Ltd., Thailand).

### C. Characterization of PBAT-based sheets

#### Morphological study

The cryogenic fractured surface of the sheets was studied using a scanning electron microscope (SEM; Hitachi TM3030, Japan) under vacuum with a secondary electron detector and a voltage of 15 kV.

#### Mechanical test

Tensile testing was performed with a speed of 100 mm/min by a universal testing machine (UTM; Instron 5969, USA). The sheets were cut into strips with a size of 1 x 4  $\text{in}^2$  according to the ASTM-D882 standard.

#### Urea release study

The sheets were cut into circular pieces with a weight of 5 grams and immersed in a beaker containing 100 ml water without stirring at room temperature. These samples were collected for quantitative analysis of releasing urea at 0.083, 0.167, 0.25, 0.333, 0.5, 0.667, 0.833, 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 and 72 hours. Urea concentration at various times was measured by a refractometer (A. KRÜSS Optronic, Germany) and later on calculated with the calibration curve of the urea standard solution.

## RESULTS AND DISCUSSION

### A. Morphological study

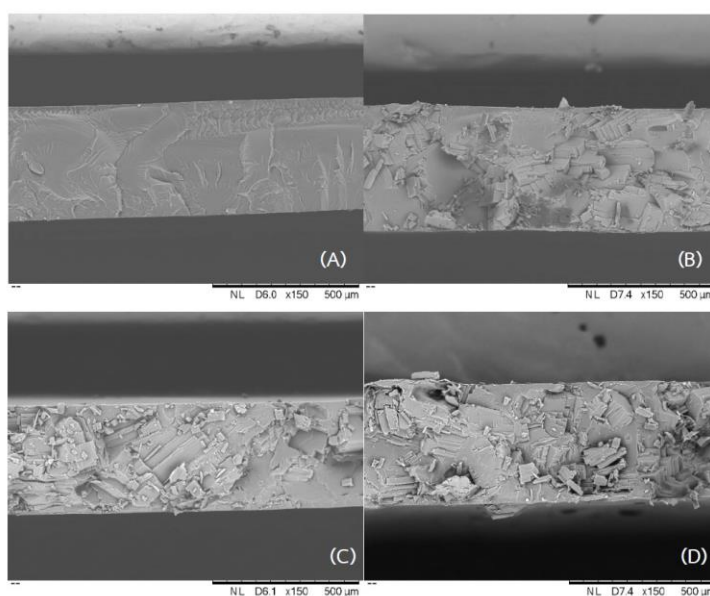


Fig 1. SEM images of cross-sectioned sheets of (A) PBAT, (B) PBAT/urea20, (C) PBAT/urea30, and (D) PBAT/urea40

The cross-sectional morphology of the fabricated sheets is illustrated in Fig 1. The fractured surface of PBAT displays a rough stripe surface (Fig 1A) that is the typical behavior of the ductile polymer. From Fig 1B-D, it turns out that the cross-sectional area of the PBAT/urea sheets is getting rougher. It can be said that the rough area is the agglomeration of urea particles in the PBAT matrix. The higher level of urea agglomeration occurs on the sheet with higher urea loading. Furthermore, the PBAT area on the sheets shows a pretty smooth fractured surface and the interfacial adhesion between PBAT and urea phases is rather good.

### B. Mechanical test

Table 1. Tensile properties of PBAT based-sheets

Sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation At break (%)
PBAT	40.66±1.81	21.75±1.49	1078.56±59.47
PBAT/urea20	100.04±4.38	5.39±0.42	149.22±39.57
PBAT/urea30	116.63±10.61	3.46±0.45	88.19±24.19
PBAT/urea40	131.70±14.93	2.42±0.55	61.92±18.67

The tensile results are summarized in Table 1. These results indicate that an increment of filler content causes a tendency to increase the stiffness of the sheets but weaken their ductility. Young's modulus of the sheets with urea is higher than that of the pure PBAT sheet. Generally, the incorporation of rigid filler into a softer polymer matrix has increased the composite material's stiffness (Çoban, Bora, & Kutluk, 2018). On the contrary, the tensile strength decreases with the higher loading of urea in the sheets. This can be due to the higher degree of urea agglomeration which increases insufficient the wetting of filler particles by the polymer matrix (Rayung et al., 2014). Consequently, the efficiency of the interfacial adhesion between PBAT and urea can be weakened (Çoban et al., 2018; Mehrjerdi, Mengistu, Åkesson, & Skrifvars, 2014). Besides, an insufficient wetting of urea by the matrix also caused a decrement of the tensile strength. The elongation at break of the PBAT-based sheets obviously decreases when they accompany with urea. This situation occurs because urea as a solid particle has restricted polymer chain mobility along with an applied load (Rayung et al., 2014).

### C. Urea release study

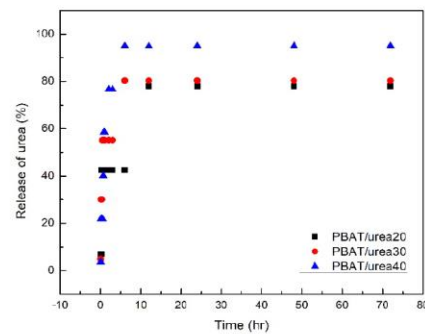


Fig 2. Percentage of urea release by different PBAT/urea sheets

Fig 2 shows the release of urea by PBAT sheets incorporated with various urea contents. The urea release of all sheets is relatively fast at the beginning step (Rychter et al., 2016) because urea particles on the sheet's surface can be leached easily by water especially PBAT/urea40 sheet. After that, the urea release of all sheets is getting delayed, which occurs in a small plateau region after the beginning step. PBAT/urea20 sheet shows the delayed release of urea for almost 12 hours. In addition, the sheets with urea loading of 30% and 40% by weight show the delay for nearly 6 hours. The increment of urea content in the sheets increases the urea release rate at the maximum release since the agglomeration of urea on the sheet's surface becomes higher, according to morphological study results (Fig.2 B-D). Hence, urea at a deeper area of the sheets with high urea content can be leached easier in comparison with the sheets with lower urea content.

## CONCLUSIONS

The fabrication of PBAT/urea sheets and their ability to control the release of urea fertilizer together with their mechanical properties were investigated. Urea particles caused rough areas in PBAT-based sheets. The interfacial adhesion between PBAT and

urea phases exhibited rather good. Besides, the high urea content showed a high probability of urea particles to agglomerate as shown in the SEM images. The tensile properties of the sheets pointed out that the rigid urea increased stiffness, but decreased the ductility of the sheets. The study of the ability of PBAT-based sheets to control the release of urea fertilizer carried out some remarkable results. It was found that the urea loading in the sheets impacted the controlled-release ability of the sheets. Moreover, the sheet with the lowest urea content could delay the release of urea for up to 12 hours. It could conclude that PBAT might be able to control the release of urea. From the PBAT/urea sheet properties, these sheets showed some remarkable properties for use in agricultural applications.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Department of Materials Science and Engineering Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University.

#### REFERENCES

- Adrar, S., Habi, A., Ajjji, A., & Grohens, Y.** (2017). *Combined effect of epoxy functionalized graphene and organomontmorillonites on the morphology, rheological and thermal properties of poly (butylenes adipate-co-terephthalate) with or without a compatibilizer.* *Applied Clay Science*, **146**, 306-315.
- Baldanza, V. A. R., Souza Jr., F. G., Filho, S. T., Franco, H. A., Oliveira, G. E., Caetano, R. M. J., . . . Nazareth Silva, A. L.** (2018). *Controlled-release fertilizer based on poly(butylene succinate)/urea/clay and its effect on lettuce growth.* **135 (47)**, 46858.
- Çoban, O., Bora, M. Ö., & Kutluk, T.** (2018). *Comparative study of volcanic particle and calcium carbonate filler materials in HDPE for thermal and mechanical properties.* **39 (S3)**, E1900-E1907.
- Larney, F. J., & Hao, X.** (2007). *A review of composting as a management alternative for beef cattle feedlot manure in southern Alberta, Canada.* *Bioresource Technology*, **98 (17)**, 3221-3227.
- Mehrjerdi, A. K., Mengistu, B. A., Åkesson, D., & Skrifvars, M.** (2014). *Effects of a titanate coupling agent on the mechanical and thermo-physical properties of talc-reinforced polyethylene compounds.* **131 (13)**.
- Mondal, D., Bhowmick, B., Maity, D., Mollick, M., Rana, D., Rangarajan, V., . . . Chattopadhyay, D.** (2015). *Investigation on Sodium Benzoate Release from Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate)/Organoclay/Sodium Benzoate Based Nanocomposite Film and Their Antimicrobial Activity.* *Journal of Food Science*, **80**.
- Rayung, M., Ibrahim, N., Zainuddin, N., Saad, W., Razak, N., & Chieng, B. W.** (2014). *The Effect of Fiber Bleaching Treatment on the Properties of Poly(lactic acid)/Oil Palm Empty Fruit Bunch Fiber Composites.* *International journal of molecular sciences*, **15**, 14728-14742.
- Rychter, P., Kot, M., Bajer, K., Rogacz, D., Šišková, A., & Kapuśniak, J.** (2016). *Utilization of starch films plasticized with urea as fertilizer for improvement of plant growth.* *Carbohydrate Polymers*, **137**, 127-138.
- Varadachari, C., & Goertz, H.** (2010). *Slow-release and Controlled-release Nitrogen Fertilizers.*
- Zahir, S.** (2014). *Role of Nitrogen Fertilizer in Crop Productivity and Environmental Pollution.* *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, **4(3)**, 201-206.

## รายการอ้างอิง

1. นิษฐา คุหะธรรมคุณ และ สายันต์ แสงสุวรรณ, *ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยยูเรียเพื่อประยุกต์ใช้ในทางเกษตรกรรม*. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2560. **19(3)** p. 32-44.
2. ชินาลัย พริงเพราะ และ เบ็ญจพร กุลนิตย์, *ผลของการเคลือบปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตและผลิตผลของธัญพืช*. วารสารเกษตรพระวรุณ. 2561. **15(1)** p. 1-16.
3. V. A. R. Baldanza, Fernando Gomes de Souza Junior, S. T. Filho, H. A. Franco, Geiza Esperandio de Oliveira, R. M. J. Caetano, Jean-Alexis Robert Hernandez, Selma Gomes Ferreira Leite, Ana Maria Furtado de Sousa, and A. L. Nazareth Silva, *Controlled-release fertilizer based on poly(butylene succinate)/urea/clay and its effect on lettuce growth*. Advanced Science News, 2018. **135(47)**: p. 46858-46868.
4. Janarthanan Pushpamalar, Anand Kumar Veeramachineni, Cally Owh, and Xian Jun Loh, *Biodegradable Polysaccharides for Controlled Drug Delivery*. ChemPlusChem, 2016. **81(6)**: p. 504-514.
5. Marcelo Nobrega, Juliana Olivato, Carmen Müller, and Fabio Yamashita, *Biodegradable Starch-Based Films Containing Saturated Fatty Acids: Thermal, Infrared And Raman Spectroscopic Characterization*. Polimeros, 2012. **22(5)**: p. 475-480.
6. Salima Adrar, Abderrahmane Habi, Abdellah Ajji, and Yves Grohens, *Combined effect of epoxy functionalized graphene and organomontmorillonites on the morphology, rheological and thermal properties of poly (butylenes adipate-co-terephthalate) with or without a compatibilizer*. Applied Clay Science, 2017. **14(6)**: p. 306-315.
7. Adriaan Stephanus Luyt and Sarah Malik, *16 - Can Biodegradable Plastics Solve Plastic Solid Waste Accumulation?*, in *Plastics to Energy*, S. M. Al-Salem, Editor. 2019, William Andrew Publishing. p. 403-423.
8. Filipe Vargas Ferreira, Luciana de Simone Cividanes Coppio, Rubia Figueredo Gouveia, and Liliane Maria Ferrareso Lona, *An overview on properties and*

- applications of poly(butylene adipate-co-terephthalate)-PBAT based composites. Polymer Engineering & Science, 2019. 59(s2): p. E7-E15.*
9. Plastics Institute of Thailand, *การใช้พลาสติกในอุตสาหกรรมการเกษตร*, in *Plastics Foresight*. 2013. **6**(2): p. 18-28.
  10. Musthofa Lutfi, Wahyunanto Nugroho, Huy Vo, Gunomo Djoyowasito, Ary Ahmad, and Sandra Sandra, *Performance test of organic planting bags for woody plant seedlings*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020. **13**: p. 93-98.
  11. Ana Bilck, Juliana Olivato, Fabio Yamashita, and José Souza, *Biodegradable Bags for the Production of Plant Seedlings*. Polimeros, 2014. **24**: p. 547-553.
  12. Roslim Ramli, *NRL Seedling-bag*. Journal of Rubber Research, 2012. **15**(4): p. 243–254
  13. Julie Zundel, What Is Urea? (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <https://study.com/academy/lesson/what-is-urea-structure-formula-uses.html>. [12 มิถุนายน 2562]
  14. Kevin Moran, Li Xinzhu, Slow and Controlled Release and Stabilized Fertilizers for Climate Smart Agriculture. 2016 (ออนไลน์). สืบค้นจาก : [https://www.fertilizer.org/images/Library\\_Downloads/2016\\_Crossroads\\_Singapore\\_LIMORAN.pdf](https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2016_Crossroads_Singapore_LIMORAN.pdf). [ 18 มิถุนายน 2562].
  15. Faculty of Engineering and Green Technology. *The controlled release fertilizer using biodegradable superabsorbent polymers*. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <https://www.utar.edu.my/fegt/index.jsp?fccatid=188&fcontentid=3035&f2ndcontentid=4736>. [ 11 มิถุนายน 2562].
  16. Agnieszka Ubowska, *Montmorillonite as a Polyurethane Foams Flame Retardant*. Archivum Combustionis, 2010. **30**(4) : p. 459-462.
  17. ทรรศพร พิตรูป, 2548. *การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์สำหรับสารเคลือบผิวอะคริลิก*, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
  18. Waseim Ragab Azzam, *Behavior of modified clay microstructure using polymer nanocomposites technique*. Alexandria Engineering Journal, 2014. **53**(1): p. 143-150.
  19. Karina Abigail Hernández- Hernández, *Polymer-Clay Nanocomposites and*



- Composites: Structures, Characteristics, and their Applications in the Removal of Organic Compounds of Environmental Interest*. Medicinal chemistry, 2016. **6**(3).
20. Ravi Babu Valapa, Sravanthi Loganathan, G. Pugazhenthii, Sabu Thomas, and T. O. Varghese, *Chapter 2 - An Overview of Polymer–Clay Nanocomposites*, in *Clay-Polymer Nanocomposites*, Khoulood Jlassi, Mohamed M. Chehimi, and Sabu Thomas, Editors. 2017, Elsevier. p: 29-81.
  21. Ulrich Siemann, *Solvent cast technology - A versatile tool for thin film production*. Progress in Colloid and Polymer Science, 2005. **130**: p. 307-316.
  22. Robert A. Tataru, *17 - Compression Molding*, in *Applied Plastics Engineering Handbook*, Myer Kutz, Editor. 2011, William Andrew Publishing: Oxford. p. 289-309.
  23. G. Kartheek, Ch. V. Subbarao, and D. Sirisha, *Slow Release of Potash Fertilizer Through Polymer Coating*. Progress in Colloid and Polymer Science, 2013. **11**(1): p. 25-30.
  24. Tales da Silva Daitx, Marcelo Giovanela, Larissa Nardini Carli, and Raquel Santos Mauler, *Biodegradable polymer/clay systems for highly controlled release of NPK fertilizer*. Polymer Advanced Technologies, 2019. **30**(3): p. 631-639.
  25. Florencia Versino, Marina Urriza, and María García, *Eco-compatible cassava starch films for fertilizer controlled-release*. International Journal of Biological Macromolecules, 2019. **134**: p. 302-307.
  26. Elaine Pereira, Camila Cruz, Aaron Solomon, Anh Lê, Michel Cavigelli, and Caue Ribeiro, *Novel Slow-Release Nanocomposite Nitrogen Fertilizers: The Impact of Polymers on Nanocomposite Properties and Function*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015. **54**: p. 3717-3725.
  27. Piotr Rychter, Marta Kot, Krzysztof Bajer, Diana Rogacz, Alena Šišková, and Janusz Kapuśniak, *Utilization of starch films plasticized with urea as fertilizer for improvement of plant growth*. Carbohydrate Polymers, 2016. **137**: p. 127-138.
  28. Shiyi Feng, Feng Zhang, Saeed Ahmed, and Yaowen Liu, *Physico-Mechanical*

- and Antibacterial Properties of PLA/TiO<sub>2</sub> Composite Materials Synthesized via Electrospinning and Solution Casting Processes*. *Coatings*, 2019. **9**: p. 525.
29. Xu-Juan Li, Daoyong Tan, Lan Xie, Hongjuan Sun, Shiyong Sun, Ganji Zhong, and Penggang Ren, *Effect of surface property of halloysite on the crystallization behavior of PBAT*. *Applied Clay Science*, 2018. **157**.
  30. Mark Roseman and William Platt Jencks, *Interactions of urea and other polar compounds in water*. *Journal of the American Chemical Society*, 1975. **97**(3): p. 631-640.
  31. Filipe Vargas Ferreira, Luciana de Simone Cividanes Coppio, Rubia Figueredo Gouveia, and Liliane Maria Ferrareso Lona, *An overview on properties and applications of poly(butylene adipate-co-terephthalate)-PBAT based composites*. *Polymer Engineering & Science*, 2019. **59**(s2): p. E7-E15.
  32. Lucas Guimarães Cardoso, Johnson Clay Pereira Santos, Geany Peruch Camilloto, Andrea Lobo Miranda, Janice Izabel Druzian, and Alaise Gil Guimarães, *Development of active films poly (butylene adipate co-terephthalate) – PBAT incorporated with oregano essential oil and application in fish fillet preservation*. *Industrial Crops and Products*, 2017. **108**: p. 388-397.
  33. Maria Pardo-Figuerez, Alex López-Córdoba, Sergio Torres-Giner, and Jose Maria Lagaron, *Superhydrophobic Bio-Coating Made by Co-Continuous Electrospinning and Electro spraying on Polyethylene Terephthalate Films Proposed as Easy Emptying Transparent Food Packaging*. 2018. **8**(10): p. 364.
  34. Sakshi Sukhija, Sukhcharn Singh, and Charanjit Singh Riar, *Analyzing the effect of whey protein concentrate and psyllium husk on various characteristics of biodegradable film from lotus (Nelumbo nucifera) rhizome starch*. *Food Hydrocolloids*, 2016. **60**: p. 128-137.
  35. Jenny Jones and Andrew Rollinson, *Thermogravimetric evolved gas analysis of urea and urea solutions with nickel alumina catalyst*. *Thermochimica Acta*, 2013. **565**: p. 39-45.
  36. Steffen Tischer, Marion Börnhorst, Jonas Amsler, Günter Schoch, and Olaf Deutschmann, *Thermodynamics and reaction mechanism of urea*

- decomposition*. Physical Chemistry Chemical Physics, 2019. **21**(30): p. 16785-16797.
37. Sheng Xiang, Lidong Feng, Xinchao Bian, Gao Li, and Xuesi Chen, *Evaluation of PLA content in PLA/PBAT blends using TGA*. Polymer Testing, 2020. **81**: p. 106211.
  38. Onur Çoban, Mustafa Özgür Bora, and Togayhan Kutluk, *Comparative study of volcanic particle and calcium carbonate filler materials in HDPE for thermal and mechanical properties*. 2018. **39**(S3): p. E1900-E1907.
  39. Adib Kalantar Mehrjerdi, Bemnet Abebe Mengistu, Dan Åkesson, and Mikael Skrifvars, *Effects of a titanate coupling agent on the mechanical and thermo-physical properties of talc-reinforced polyethylene compounds*. 2014. **131**(13).
  40. Reza Arjmandi, Azman Hassan, Khaliq Majeed, and Zainoha Zakaria, *Rice Husk Filled Polymer Composites*. International Journal of Polymer Science, 2015. **2015**: p. 501471.
  41. Salmah Husseinsyah, 2007. *Effect of Compatibilizer on Mechanical Properties and Morphology of Clay Filled Low Density Polyethylene (LDPE) Composites*. Ph.D. Dissertation, University of Malaysia.
  42. Marwah Rayung, Nor Ibrahim, Norhazlin Zainuddin, Wan Saad, Nur Razak, and Buong Woei Chieng, *The Effect of Fiber Bleaching Treatment on the Properties of Poly(lactic acid)/Oil Palm Empty Fruit Bunch Fiber Composites*. International journal of molecular sciences, 2014. **15**: p. 14728-14742.
  43. Manuela Mattone, Silvia Rescic, Fabio Fratini, and Rachel Mangan, *Experimentation of Earth-Gypsum Plasters for the Conservation of Earthen Constructions*. International Journal of Architectural Heritage, 2017. **11**: p. 1-10.
  44. Shuangling Luo, Ping Zhang, and De Gao, *Preparation and Properties of Antimicrobial Poly(butylene adipate-co-terephthalate)/TiO<sub>2</sub> Nanocomposites Films*. Journal of Macromolecular Science, Part B, 2020. **59**: p. 1-14.
  45. H.J.Unkel (Thai) Limited. How many hours in a QUV Weathering Tester equals a year of outdoor exposure? (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <https://www.hjunktai-thailand.com/17751667/how-many-hours-in-a-quv-weathering-tester-equals-a-year-of-outdoorexposure?fbclid=IwAR0A58ic13XSSz7ZAwLIhsPVawShqDyymH>

Mb8Nu97nN37DnHFZOt3JKW00. [5 สิงหาคม2564]

46. Jie-Mao Wang, Hao Wang, Erh-Chiang Chen, Yun-Ju Chen, and Tzong-Ming Wu, *Enhanced Photodegradation Stability in Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Composites Using Organically Modified Layered Zinc Phenylphosphonate*. *Polymers*, 2020. **12**: p. 1968.
47. Thitisilp Kijchavengkul, Rafael Auras, Maria Rubino, Mathieu Ngouajio, and Rodney Thomas Fernandez, *Assessment of aliphatic–aromatic copolyester biodegradable mulch films. Part I: Field study*. *Chemosphere*, 2008. **71**(5): p. 942-953.
48. Venkatesan Chithambaram, Somen Das, Sivakumar Krishnan, Basheer Ahamed, and R. Nambi, *Growth and characterization of urea-oxalic acid crystals by solution growth technique*. *European Physical Journal Applied Physics*, 2013. **64**: p. 20201.
49. Ting Zhang, Weiyao Han, Caili Zhang, and Yunxuan Weng, *Effect of chain extender and light stabilizer on the weathering resistance of PBAT/PLA blend films prepared by extrusion blowing*. *Polymer Degradation and Stability*, 2021. **183**: p. 109455.
50. Maria Mistretta, Francesco La Mantia, Vincenzo Titone, Bartolomeo Megna, Luigi Botta, and Marco Morreale, *Durability of Biodegradable Polymers for the Conservation of Cultural Heritage*. *Frontiers in Materials*, 2019. **6**.
51. Poornima Vijayan P, Debora Puglia, Hanna Maria, Jose Kenny, and Sabu Thomas, *Clay nanostructure and its localisation in epoxy/liquid rubber blend*. *RSC Advances*, 2013.
52. Bruna Menezes, William Cortez-Vega, and Carlos Prentice, *Nanocomposites films obtained from protein isolates of mechanically deboned chicken meat added with montmorillonite*. *Polímeros*, 2017. **27**: p. 75-82.
53. Nazile Ural, *The significance of scanning electron microscopy (SEM) analysis on the microstructure of improved clay: An overview*. *Open Geosciences*, 2021. **13**(1): p. 197-218.
54. Kinjal J. Shah, Atindra D. Shukla, Dinesh O. Shah, and Toyoko Imae, *Effect of organic modifiers on dispersion of organoclay in polymer nanocomposites to*

- improve mechanical properties*. *Polymer*, 2016. **97**: p. 525-532.
55. Raja Nazrul Hakim and Hanafi Ismail, *Comparison of the Effects of Organoclay Loading on the Curing and Mechanical Properties of Organoclay-Filled Epoxidised Natural Rubber Nanocomposites and Organoclay-Filled Natural Rubber Nanocomposites*. *Journal of Physical Science*, 2009. **20**.
56. Uraivan Sookyung, Charoen Nakason, Woothichai Thaijaroen, and Norbert Vennemann, *Effect of organoclay loading level on mechanical properties, thermomechanical behavior, and heat build-up of natural rubber/organoclay nanocomposites*. *Polymer Composites*, 2016. **37**(6): p. 1735-1743.
57. Muhammad Ashraf, Wanxi Peng, Yasser Zare, and Kyong Yop Rhee, *Effects of Size and Aggregation/Agglomeration of Nanoparticles on the Interfacial/Interphase Properties and Tensile Strength of Polymer Nanocomposites*. *Nanoscale Research Letters*, 2018. **13**.
58. S. Farsetti, B. Cioni, and Andrea Lazzeri, *Physico-Mechanical Properties of Biodegradable Rubber Toughened Polymers*. *Macromolecular Symposia*, 2011. **301**: p. 82-89.
59. Gabriella Falcão, Tatiara Almeida, Marcelo Bardi, Laura Carvalho, and Eduardo Canedo, *PBAT/organoclay composite films—part 2: effect of UV aging on permeability, mechanical properties and biodegradation*. *Polymer Bulletin*, 2019. **76**.
60. Jian Teng, Ben Niu, Liang-Qing Zhang, Xu Ji, Ling Xu, Zheng Yan, Jian-Hua Tang, Gan-Ji Zhong, and Zhong-Ming Li, *Confined crystallization of poly(butylene succinate) intercalated into organoclays: role of surfactant polarity*. *RSC Advances*, 2016. **6**(72): p. 68072-68080.
61. Alfred Tcherbi-Narteh, Mahesh Hosur, Eldon Triggs, and Shaik Jelaani, *Effects of Surface Treatments of Montmorillonite Nanoclay on Cure Behavior of Diglycidyl Ether of Bisphenol A Epoxy Resin*. *Journal of Nanoscience*, 2013.
62. Tianxi Liu, Wuiwui Chauhari Tjiu, Chaobin He, Siew Siew Na, and Tai-Shung Chung, *A processing-induced clay dispersion and its effect on the structure and properties of polyamide 6*. *Polymer International*, 2004. **53**(4): p. 392-399.

63. Subhendra Mohanty and Sisir Kumar Nayak, *Biodegradable Nanocomposites of Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and Organically Modified Layered Silicates*. *Journal of Polymers and the Environment*, 2012. **20**(1): p. 195-207.
64. Assia Siham Hadj-Hamou, Sabiha Matassi, Abderrahmane Habi, and Farida Yahiaoui, *Effect of cloisite 30B on the thermal and tensile behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/poly(vinyl chloride) nanoblends*. *Polymer Bulletin*, 2014. **71**: p. 1483-1503.
65. Jokdérlea Sousa, Salim Arruda, Juliana Lima, Renate Wellen, Eduardo Canedo, and Yêda Almeida, *Crystallization kinetics of poly (butylene adipate terephthalate) in biocomposite with coconut fiber*. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 2019. **24**.
66. Frédéric Chivrac, Zuzana Kadlecova, Eric Pollet, and Luc Avérous, *Aromatic Copolyester-based Nano-biocomposites: Elaboration, Structural Characterization and Properties*. *Journal of Polymers and the Environment*, 2006. **14**: p. 393-401.
67. Pankil Singla, Rajeev Mehta, and Siddh Upadhyay, *Clay Modification by the Use of Organic Cations*. *Green and Sustainable Chemistry*, 2012. **2**.
68. Mihai Manitiu, Steven Horsch, Esin Gulari, and Rangaramanujam Arunachala Mada Kannan, *Role of polymer-clay interactions and nano-clay dispersion on the viscoelastic response of supercritical CO<sub>2</sub> dispersed polyvinylmethylether (PVME)-Clay nanocomposites*. *Polymer*, 2009. **50**(15): p. 3786-3796.
69. Jung-Hung Chen and Ming-Chien Yang, *Preparation and characterization of nanocomposite of maleated poly(butylene adipate-co-terephthalate) with organoclay*. *Materials Science and Engineering: C*, 2015. **46**: p. 301-308.
70. Roberto Scaffaro, Andrea Maio, Emmanuel Fortunato Gulino, Marco Morreale, and Francesco Paolo La Mantia, *The Effects of Nanoclay on the Mechanical Properties, Carvacrol Release and Degradation of a PLA/PBAT Blend*. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020. **13**(4): p. 983.
71. Tianxing Chen, Yiming Yang, Yunliang Zhao, Feng Rao, and Shaoxian Song,

- Evaluation of exfoliation degree of montmorillonite in aqueous dispersions through turbidity measurement.* RSC Advances, 2018. **8**(71): p. 40823-40828.
72. Vijay Kumar, Manish Kumar, and G. Pugazhenth, *Effect of nanoclay content on the structural, thermal properties and thermal degradation kinetics of PMMA/organoclay nanocomposites.* International Journal of Nano and Biomaterials, 2014. **5**: p. 27-44.
73. Soo-Tueen Bee, Ahmed Hassan, Chantara Thevy Ratnam, Tiam-Ting Tee, Lee Tin Sin, and David Hui, *Dispersion and roles of montmorillonite on structural, flammability, thermal and mechanical behaviours of electron beam irradiated flame retarded nanocomposite.* Composites Part B: Engineering, 2014. **61**: p. 41-48.
74. Adib Kalantar Mehrjerdi, Bemnet Abebe Mengistu, Dan Åkesson, and Mikael Skrifvars, *Effects of a titanate coupling agent on the mechanical and thermo-physical properties of talc-reinforced polyethylene compounds.* Journal of Applied Polymer Science, 2014. **131**(13).
75. Sadhasivam Balaji, Raja Venkatesan, Loganathan Mugeeth, and Raghavachari Dhamodharan, *Hydrophobic nanocomposites of PBAT with Cl-fn-POSS nanofiller as compostable food packaging films.* Polymer Engineering & Science, 2021. **61**(1): p. 314-326.
76. Xiongang Wang, Lingna Cui, Shuhong Fan, Xia Li, and Yuejun Liu, *Biodegradable Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Antibacterial Nanocomposites Reinforced with MgO Nanoparticles.* Polymers, 2021. **13**(4): p. 507.
77. Alfred Tcherbi-Narteh, Mahesh Hosur, Eldon Triggs, and Shaik Jelaani, *Effects of Surface Treatments of Montmorillonite Nanoclay on Cure Behavior of Diglycidyl Ether of Bisphenol A Epoxy Resin.* Journal of Nanoscience, 2013. **2013**: p. 864141.
78. Rosa Idalia Narro-Céspedes, María Guadalupe Neira-Velázquez, Luis Fernando Mora-Cortes, Ernesto Hernández-Hernández, Adali Oliva Castañeda-Facio, María Cristina Ibarra-Alonso, Yadira Karina Reyes-Acosta, Gustavo Soria-Arguello, and José Javier Borjas-Ramos, *Surface Modification of Sodium Montmorillonite Nanoclay by Plasma Polymerization and Its Effect on the Properties of*

- Polystyrene Nanocomposites*. Journal of Nanomaterials, 2018. **2018**: p. 2480798.
79. Kavosh Zandsalimi, Babak Akbari, Faramarz Mehrnejad, and Reza Bagheri, *Compatibilization of clays and hydrophobic polymers: the case of montmorillonite and polyetheretherketone*. Polymer Bulletin, 2020. **77**(10): p. 5505-5527.
80. Nadzirah Mohd Mokhtar, Woei Jye Lau, Ahmad Fauzi Ismail, and Boon Ching Ng, *Physicochemical study of polyvinylidene fluoride–Cloisite15A® composite membranes for membrane distillation application*. RSC Advances, 2014. **4**(108): p. 63367-63379.
81. Ni Xiaoyu, Wu Yuejin, Wu Zhengyan, Wu Lin, Qiu Guannan, and Yu Lixiang, *A novel slow-release urea fertiliser: Physical and chemical analysis of its structure and study of its release mechanism*. Biosystems Engineering, 2013. **115**(3): p. 274-282.
82. Selvakumar Murugesan and Thomas Scheibel, *Copolymer/Clay Nanocomposites for Biomedical Applications*. Advanced Functional Materials, 2020. **30**: p. 1908101.
83. Jiazhao Xie, Kun Zhang, Jianfeng Wu, Guangfeng Ren, Hongying Chen, and Jing Xu, *Bio-nanocomposite films reinforced with organo-modified layered double hydroxides: Preparation, morphology and properties*. Applied Clay Science, 2016. **126**: p. 72-80.
84. Hiroaki Miyagawa, Michael Rich, and Lawrence Drzal, *Amine-cured epoxy/clay nanocomposites. I. Processing and chemical characterization*. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2004. **42**: p. 4384-4390.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปณิดา ไทยประสงค์
วัน เดือน ปี เกิด	16 สิงหาคม 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดนครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	629/135 หมู่ 6 ตำบลจอหอ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา
ผลงานตีพิมพ์	Panida Thaiprasong, Nattawut Chaiyut, Bussarin Ksapabutr, Manop Panapoy "FABRICATION AND PROPERTIES OF PBAT/UREA SHEETS FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS" Proceeding in The 26th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 11th Research Symposium Petrochemical and Materials Technology. Online by Zoom Application, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, July 23rd, 2020.
รางวัลที่ได้รับ	พ.ศ. 2561-2562 (4 ภาคการศึกษา) ได้รับทุนการศึกษาและทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน จากภาควิชาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

