



การเตรียมแผ่นโพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต และแป้งมัน
สำปะหลัง



โดย
นางสาววราพร สุดตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การเตรียมแผ่นโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต
และแป้งมันสำปะหลัง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

PREPARATION OF FOAM SHEET FROM POLYMER BLEND BETWEEN
POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) AND CASSAVA STARCH



By

MISS Warabhorn SUDTA

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 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ การเตรียมแผ่นโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิ-
เปต-โค-เทรฟทาเลต และแป้งมันสำปะหลัง
โดย วราพร สุดตา
สาขาวิชา วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา
มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุตศิริ เหมศรี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

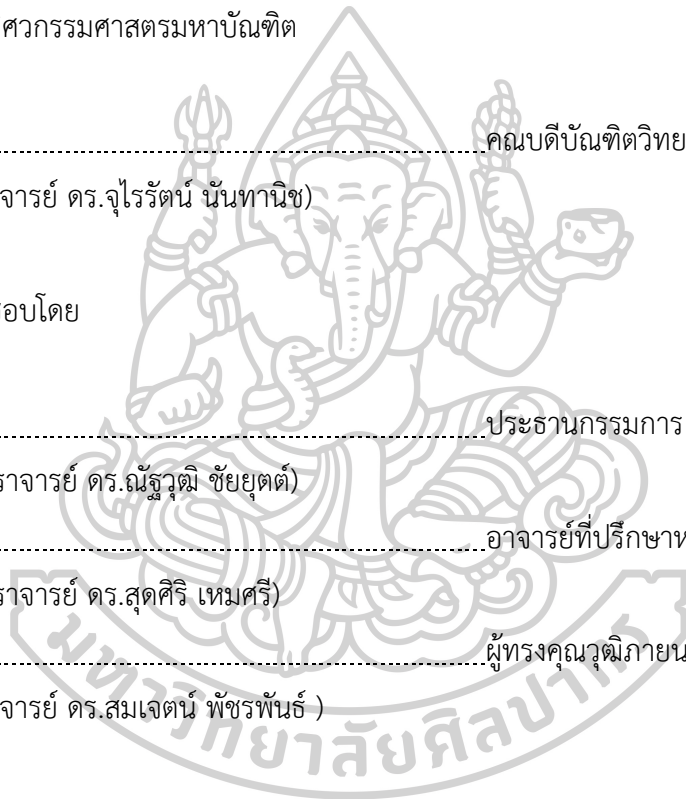
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุตศิริ เหมศรี)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเจตน์ พ็ชรพันธ์)



61402219 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
คำสำคัญ : พอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต, เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่ผ่านการดัดแปร
โครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์, พอลิเมอร์ผสม, โฟมพอลิเมอร์, ซีพีโอไลต์

นางสาว วราพร สุดตา: การเตรียมแผ่นโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิ
เปต-โค-เทเรพทาเลต และแป้งมันสำปะหลัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร. สุศศิรี เหมศรี

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการเตรียมแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิ
เปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิก
แอนไฮไดรด์ (MTPS) โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ตอน ตอนที่ 1 เตรียมแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม
อัตราส่วนอัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนักทั้งที่ไม่มีและมีการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิ
เปต-โค-เรพทาเลตที่ถูกดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBAT-g-MA) พบว่าการเพิ่ม
ปริมาณ MTPS และการเติม PBAT-g-MA ส่งผลให้แผ่นซีทมีความเข้ากันได้มากขึ้น ทำให้แผ่นซีทพ
อลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น ตอนที่ 2 เตรียมแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสม
อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ที่มีการเติม PBAT-g-MA และมีการเติม 4,4'-
Oxydibenzene-sulfonyl Hydrazide (OBSH) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารฟองปริมาณ 10, 15 และ 20 phr
พบว่าการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้โฟมพอลิเมอร์ผสมมีความหนาแน่น ความสามารถในการกักอัด
และความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาอิทธิพลของ OBSH พบว่าการเพิ่มปริมาณ OBSH ส่งผลให้เซลล์
โฟมมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้แผ่นโฟมมีความหนาแน่นลดลง จึงมีความสามารถในการกักอัด และความ
แข็งลดลง จากงานวิจัยตอนที่ 2 ผู้วิจัยได้ทำการเลือกโฟมพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน 80/20/10 ที่มีการ
เติม OBSH 15 phr เพื่อดำเนินงานวิจัยต่อไปในตอนที่ 3 ซึ่งได้ทำการศึกษาอิทธิพลการเติม Sepiolite
ที่มีผลต่อสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ผสม โดยเติม Sepiolite ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr พบว่าการเพิ่ม
ปริมาณ Sepiolite ส่งผลให้เซลล์โฟมมีขนาดเล็กลง โฟมจึงมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น รวมถึงมี
ความสามารถในการกักอัด และความแข็งของแผ่นโฟมเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ Sepiolite
เป็น 5 phr ค่า Compressive strength และค่า Compressive modulus มีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผล
มาจาก Sepiolite เกิดการรวมตัวกันเป็นจุดรวมความเค้น จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย
เทคนิค DSC พบว่าค่า T_c แปรผันตามปริมาณ Sepiolite เนื่องจาก Sepiolite ประพฤติตัวเป็น
Nucleating agent

61402219 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : Poly(butylene adipate-co-terephthalate), Maleated thermoplastic starch, Polymer blend, Polymer foam, Sepiolite

MISS WARABHORN SUDTA : PREPARATION OF FOAM SHEET FROM POLYMER BLEND BETWEEN POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) AND CASSAVA STARCH THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR SUDSIRI HEMSRI, Ph.D.

This research was aimed to study the preparation of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and maleated thermoplastic starch (MTPS) foam. The study was divided into three parts. The first part prepared the PBAT/MTPS sheet in various ratios of 90/10, 80/20 and 70/30 by weight with and without maleic anhydride grafted PBAT (PBAT-g-MA). The effect of MTPS content and PBAT-g-MA on various sheet properties is discussed. An increased amount of MTPS and the additions of PBAT-g-MA resulted in better compatibility. This allows the polymer sheet have better mechanical and thermal properties. In the second part prepared the PBAT/MTPS foam in ratios of 90/10, 80/20 and 70/30 by weight with additions PBAT-g-MA 10wt% and 4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide (OBSH) 10, 15 and 20 phr. The effect of MTPS content and OBSH content on various foam properties is discussed. Increasing MTPS content resulted in smaller cell size, and consequently the density, compressive strength, compressive modulus and hardness were increased. Considering the influence of OBSH content, it was found that an increased amount of OBSH resulted in larger cell size, and consequently the density, compressive strength, compressive modulus and hardness were decreased. The researcher selected 80/20/10 foam with OBSH 15 phr to continue the research in the third part, the effect of sepiolite content on the properties of polymer foam was studied by adding 1, 3 and 5 phr of sepiolite. When the amount of sepiolite increased, cell size of foam is smaller, and consequently the density, compressive strength, compressive modulus and hardness of polymer foam were increased. On the contrary, when adding the sepiolite 5 phr, the compressive strength and the compressive modulus were decreased due to the sepiolite agglomeration as a stress concentration. DSC technique revealed that increasing sepiolite content resulted in T_c was increased because sepiolite acts as a nucleating agent.

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุกศิริ เหมศรีหรืออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวดี ชัยยุตต์ และรองศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ พิชรพันธ์ ที่สละเวลามาเป็นประธานและคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ตลอดจนให้ คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการสอบวิทยานิพนธ์และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้และสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนวิจัยในการ ดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ และคุณไพโรจน์ ตั้งศุภวัช วิศวกรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดเตรียมอุปกรณ์สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานวิจัย ตลอดจนวิธีการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณคุณลูกกวาง อุ่นศิริ สำหรับการติดต่อและประสานงานระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บริษัท เคมีอินโนเวชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide) (OBSH) และ 2,5-Bis(tert-butylperoxy)-2,5-dimethylhexane (Luperox® 101) สำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวรัญญา จันทอม บริษัท เมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่อง DSC และเครื่อง TGA ที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัย

ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโท ตลอดจนเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจ จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จตามที่วางแผนไว้ สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวที่อบรม สั่งสอน เลี้ยงดูและคอยให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจที่สำคัญในเรื่องต่างๆ ทั้งเรื่องการเรียนและการดำรงชีวิต ตลอดจนการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

วราพร สุดตา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลต (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) [6].....	3
2.2 แป้ง (Starch) [15].....	5
2.2.1 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	5
2.2.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง.....	8
2.2.3 คุณสมบัติของแป้ง.....	10
2.2.4 แป้งมันสำปะหลัง [18].....	15
2.3 โฟมพลาสติก [10].....	16
2.2.1 ประเภทของโฟมที่จำแนกตามลักษณะของเซลล์.....	16

2.2.2 ประเภทของโฟมที่จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ	17
2.2.3 ประเภทของโฟมที่จำแนกตามประเภทของพลาสติก.....	17
2.3.4 กระบวนการเกิดโฟม (Foam formation).....	17
2.4 สารฟู (Blowing agents) [19]	20
2.4.1 สารฟูทางกายภาพ (Physical Blowing Agents : PBAs).....	20
2.4.2 สารฟูทางเคมี (Chemical Blowing Agent : CBAs)	21
2.5 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide) (OBSH) [19]	21
2.6 ซีพิโอไลต์ (Sepiolite) [20].....	22
2.7 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	33
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	34
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	34
3.2.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) จากแป้งมันสำปะหลัง.....	35
3.2.2 การทดสอบด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD).....	35
3.2.3 การเตรียมพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลตที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBAT-g-MA) [28, 29].....	37
3.2.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ PBAT-g-MA ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR) [28, 29].....	37
3.2.5 เตรียมพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเรต (PBAT) ที่ถูกเชื่อมขวางด้วย Luperox101 (Cured PBAT).....	38
3.2.6 การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮ	

ไตรด์ (MTPS) ที่ไม่มีและมีการเติมพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลตที่ผ่านการตัด แปรรูปโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBAT-g-MA).....	39
3.2.7 ขึ้นรูปแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding)	39
3.2.8 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology).....	40
3.2.9 การทดสอบสมบัติเชิงกลต้านการดึงยึดของวัสดุ (Tensile testing).....	40
3.2.10 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry.....	41
3.2.11 การเตรียมโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรรูปโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮ ไดรด์ (MTPS) ที่มีการเติมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ (Compatibilizer).....	43
3.2.12 การเตรียมโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรรูปโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮ ไดรด์ (MTPS) ที่มีการเติม Sepiolite เพื่อทำหน้าที่เป็น Foam nucleating agent.	45
3.3 การศึกษาสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ผสม.....	47
3.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology).....	47
3.3.2 การศึกษาความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสม.....	47
3.3.3 การศึกษาความสามารถในการกดอัดของโฟมพอลิเมอร์ผสม.....	47
3.3.4 การศึกษาความแข็งของโฟมพอลิเมอร์ผสม.....	47
3.3.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสม	48
3.3.6 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสม.....	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	50
4.1 การเตรียมและสมบัติพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรรูปโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่ ไม่มีและมีการเติมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้.....	51
4.1.1 การทดสอบเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรรูปโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮ ไดรด์ (MTPS) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD).....	52

4.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PBAT-g-MA ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR).....	54
4.1.3 การศึกษาการศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม	58
4.1.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม	61
4.1.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม	64
4.2 การเตรียมและสมบัติของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่มีการเติมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้	70
4.2.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์ผสม	71
4.2.2 การศึกษาความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสม	74
4.2.3 การศึกษาความสามารถในการกักตัวของโฟมพอลิเมอร์ผสม	76
4.2.4 การศึกษาความแข็งของโฟมพอลิเมอร์ผสม	79
4.2.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสม	81
4.2.6 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสม	85
4.3 ศึกษาอิทธิพลของการเติม Sepiolite ที่มีผลต่อสมบัติของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS)	87
4.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite.....	88
4.3.2 การศึกษาความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite	91
4.3.3 การศึกษาความสามารถในการกักตัวโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite.....	92
4.3.4 การศึกษาความแข็งของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite	94
4.3.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite	95
4.3.6 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite	99
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	102
5.1 สรุปผลการวิจัย	102

5.2 ข้อเสนอแนะ 105

ภาคผนวก..... 106

 ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ 107

 ภาคผนวก ข การนำเสนอผลงานวิจัย 161

รายการอ้างอิง 170

ประวัติผู้เขียน 175



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในแป้งแต่ละชนิด [15]	7
ตารางที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด [17]	10
ตารางที่ 2.3 อัตราการคั่วตัวของแป้งแต่ละชนิด [15]	14
ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPS/PBAT และวัสดุคอมพอสิต [24].....	27
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการผสม PBAT และ MTPS ที่มีและไม่มีการเติม PBAT-g-MA.....	40
ตารางที่ 4.1 ร้อยละความเป็นผลึกของแป้งมันสำปะหลัง และ MTPS.....	54
ตารางที่ 4.2 ค่า Chemical shift ที่สัมพันธ์กับโครงสร้างของ PBAT และ PBAT-g-MA	57
ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม.....	63
ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน First heat	66
ตารางที่ 4.5 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน Cooling.....	69
ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน Second heating	70
ตารางที่ 4.7 ขนาดของเซลล์โฟมพอลิเมอร์ผสม	73
ตารางที่ 4.8 ความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสม.....	75
ตารางที่ 4.9 สมบัติการกักอัดของโฟมพอลิเมอร์ผสม	77
ตารางที่ 4.10 ค่าความแข็งของแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสม	80
ตารางที่ 4.11 สมบัติทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน First heating	82
ตารางที่ 4.12 สมบัติทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน Cooling.....	83
ตารางที่ 4.13 สมบัติทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน Second heating	84
ตารางที่ 4.14 เสถียรภาพทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสม	86
ตารางที่ 4.15 ขนาดของเซลล์โฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite.....	90
ตารางที่ 4.16 ความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite.....	92

ตารางที่ 4.17 ความสามารถในการกักอัดโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite	94
ตารางที่ 4.18 ความแข็งของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite	95
ตารางที่ 4.19 สมบัติทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ในขั้นตอน First heating	97
ตารางที่ 4.20 สมบัติทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ในขั้นตอน Cooling	98
ตารางที่ 4.21 สมบัติทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ในขั้นตอน Second heating	99
ตารางที่ 4.22 เสถียรภาพทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite	101



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ของ Adipic acid [6].....	3
ภาพที่ 2.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ของ Dimethyl terephthalate (DMT) [6].....	3
ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยา Transesterification ระหว่าง พอลิเอสเทอร์ของ Adipic acid และพอลิเอสเทอร์ ของ Dimethyl terephthalate (DMT) [6]	4
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลส [16]	5
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [16]	6
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างผลึกแบบ A และแบบ B [17].....	8
ภาพที่ 2.7 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน [17].....	9
ภาพที่ 2.8 การพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน [17].....	11
ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม [15].....	11
ภาพที่ 2.10 ระยะในการเกิดเจลลาติโนเซชันของเม็ดแป้ง [15]	12
ภาพที่ 2.11 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [15].....	14
ภาพที่ 2.12 สันฐานโครงสร้างของโฟม	16
ภาพที่ 2.13 แผนภาพขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการเกิดโฟม [10].....	20
ภาพที่ 2.14 ปฏิกิริยาการสลายตัวของ 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide).....	22
ภาพที่ 2.15 โครงสร้างของซีพีโอไลต์ [21].....	23
ภาพที่ 2.16 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PBAT/MTPS ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	24
ภาพที่ 2.17 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PBAT/MTPS ที่อัตราส่วนต่างๆ	24
ภาพที่ 2.18 สมบัติเชิงกลของ PBAT/TPS ที่ปริมาณต่างๆ [22].....	25
ภาพที่ 2.19 สันฐานวิทยาของ PBAT/TPS ที่ปริมาณต่างๆ [22].....	26
ภาพที่ 2.20 สมบัติเชิงกลของ PBAT/TPS ที่มีการเติม Compatibilizer ชนิดต่างๆ [23]	27

ภาพที่ 2.21 Tensile strength และ Young's Modulus ของพอลิเมอร์ผสม PBS และ TPS [25]	28
ภาพที่ 2.22 Melt flow index ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS และ TPS [25]	28
ภาพที่ 2.23 ความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PBS และ TPS [25]	29
ภาพที่ 2.24 Expansion ratio ของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PBS และ TPS [25]	29
ภาพที่ 2.25 สมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม OBSH ที่ปริมาณแตกต่างกัน [26]	30
ภาพที่ 2.26 โครงสร้างของเซลล์โพลีเมอร์ที่มีการเติมซีพีโอไลต์ชนิดต่างๆ	31
ภาพที่ 2.27 โครงสร้างของเซลล์โพลีเมอร์ PS ที่มีการเติมซีพีโอไลต์ที่ปริมาณต่างๆ	32
ภาพที่ 2.28 อิทธิพลของปริมาณซีพีโอไลต์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน [13]	32
ภาพที่ 3.1 แผนภูมิการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS)	36
ภาพที่ 3.2 แผนภูมิการเตรียม PBAT-g-MA	38
ภาพที่ 3.3 แผนภูมิการเตรียม Cured PBAT	38
ภาพที่ 3.4 แผนภูมิการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS	42
ภาพที่ 3.5 แผนภูมิการเตรียมและศึกษาสมบัติของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS	44
ภาพที่ 3.6 แผนภูมิการเตรียมและศึกษาสมบัติของโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติม Sepiolite	46
ภาพที่ 4.1 ปฏิกริยาการเกิด MTPS ผ่านกระบวนการ Reactive extrusion [30]	51
ภาพที่ 4.2 แสดงรูปแบบพีค (XRD pattern) ของแป้งมันสำปะหลัง และแผ่นซีท MTPS	53
ภาพที่ 4.3 กลไกการเกิดปฏิกริยาการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงบน PBAT	55
ภาพที่ 4.4 ¹ H-NMR spectra ของ PBAT	56
ภาพที่ 4.5 ¹ H-NMR spectra ของ PBAT ที่ตัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์	56
ภาพที่ 4.6 ¹ H-NMR spectra ช่วง 3.5-5.0 ppm	57
ภาพที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นซีท PBAT และแผ่นซีท MTPS ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	58
ภาพที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า	60

ภาพที่ 4.9 Tensile strength ของพอลิเมอร์ผสม.....	62
ภาพที่ 4.10 Elongation at break ของพอลิเมอร์ผสม	62
ภาพที่ 4.11 Young's modulus ของพอลิเมอร์ผสม.....	63
ภาพที่ 4.12 โครงสร้างของ PBAT ที่ประกอบด้วย BT Segment และ BA Segment [36].....	64
ภาพที่ 4.13 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน First heating	65
ภาพที่ 4.14 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน Cooling.....	68
ภาพที่ 4.15 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน Second heating.....	69
ภาพที่ 4.16 สัณฐานทางวิทยาของแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสมที่กำลังขยาย 50 เท่า	72
ภาพที่ 4.17 ขนาดของเซลล์โฟมพอลิเมอร์ผสม	73
ภาพที่ 4.18 ความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสม	75
ภาพที่ 4.19 ความต้านทานของการกดอัด (Compressive strength) ของแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสม	77
ภาพที่ 4.20 มอดูลัสกดอัด (Compressive modulus) ของแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสม	77
ภาพที่ 4.21 ค่าความแข็งของแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสม.....	79
ภาพที่ 4.22 DSC thermogram ของโฟมพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน First heating.....	82
ภาพที่ 4.23 DSC thermogram ของโฟมพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน Cooling.....	83
ภาพที่ 4.24 DSC thermogram ของโฟมพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน Second heating	84
ภาพที่ 4.25 TGA thermogram ของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ OBSH แตกต่างกัน	85
ภาพที่ 4.26 DTG thermogram ของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ OBSH แตกต่างกัน.....	86
ภาพที่ 4.27 แบบจำลองการเกิดฟองแก๊สในกระบวนการเกิดโฟม	88
ภาพที่ 4.28 ภาพ SEM ของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepioliteที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	89
ภาพที่ 4.29 ขนาดของเซลล์โฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite.....	90
ภาพที่ 4.30 ความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite.....	91
ภาพที่ 4.31 Compressive strength ของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite	93
ภาพที่ 4.32 Compressive modulus ของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite.....	93

ภาพที่ 4.33 ความแข็งของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite.....	94
ภาพที่ 4.34 DSC thermogram ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ในขั้นตอน First heating	96
ภาพที่ 4.35 DSC thermogram ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ในขั้นตอน Cooling	97
ภาพที่ 4.36 DSC thermogram ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ในขั้นตอน Second heating	98
ภาพที่ 4.37 TGA thermogram ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite.....	100
ภาพที่ 4.38 DTG thermogram ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite	100



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการใช้โฟมพลาสติกเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์เพื่อปกป้องผิวสินค้าจากการกระแทก การเสียดสีรวมถึงรอยขีดข่วนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการขนส่งอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปโฟมดังกล่าวมักผลิตมาจากพอลิเอทิลีนซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์เพื่อป้องกันความเสียหายของสินค้า นอกจากนี้ยังมีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการขนส่ง เนื่องจากโฟมที่ได้จากพอลิเอทิลีนมีน้ำหนักเบา [1] อย่างไรก็ตามโฟมดังกล่าวไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกในปัจจุบัน ส่งผลให้คณะรัฐมนตรีได้ประกาศรับทราบแผนปฏิบัติการด้านการจัดการขยะพลาสติกซึ่งจะมีการยกเลิกการใช้ถุง โฟม แก้ว และหลอดที่ทำมาจากพลาสติก จำพวกพอลิโพรพิลีน (PP) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ภายในปีพ.ศ. 2565 [2] จึงมีนักวิจัยศึกษาการเตรียมโฟมจากพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น พอลิแลคติกแอซิด (PLA) [3] พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) [4] และพอลิบิวทิลีนอะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) [5] โดย PBAT เป็นพลาสติกที่มีสมบัติที่ดีหลายประการ คือมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่นสูงสามารถใช้ทดแทนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ได้ [6] อย่างไรก็ตาม PBAT ยังมีราคาค่อนข้างสูง นักวิจัยหลายคนจึงแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการผสม PBAT เข้ากับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) [7-9] สำหรับการเตรียมโฟมพลาสติกโดยทั่วไปมีการเติมสารฟู (Blowing agent) ลงไปในพอลิเมอร์ และมีการให้อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้สารฟูเกิดการสลายตัวเป็นแก๊ส และกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของพอลิเมอร์ [10] นอกจากนี้ในการเตรียมโฟมพลาสติก เช่น โฟมพลาสติกจากพอลิสไตรีน (PS) อาจมีการเติมตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic filler) จำพวกนาโนซิลิกา (Nano silica) [11] มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) [12] และซีพิโอไลต์ (Sepiolite) [13] เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยก่อฟองอากาศ (Foaming nucleating agent) ส่งผลให้ขนาดของเซลล์โฟมมีการกระจายตัวสม่ำเสมอยิ่งขึ้น ทำให้โฟมที่ได้มีสมบัติเชิงกล และมีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้นอีกด้วย [13]

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการเตรียมโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่ได้จากแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์กันกระแทก โดยการผสม PBAT และ MTPS เข้าด้วยกัน โดยใช้ 4, 4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide (OBSH) เป็นสารฟู (Blowing agent) พร้อมทั้งเติมซีพิโอไลต์ (Sepiolite) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยก่อฟองอากาศ (Foam nucleating agent)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของ 4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide (OBSH) ที่มีผลต่อขนาดของเซลล์โฟม สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของซีพิโอไลต์ (Sepiolite) ที่มีผลต่อขนาดของเซลล์โฟม สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1. พอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) ที่มีชื่อทางการค้าว่า Ecoflex®เกรด F Blend C1200 ความหนาแน่น 1.25 - 1.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) อยู่ในช่วง 2.7 - 4.9 g/10 min เมื่อทดสอบโดยใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 190 °C และมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 110 - 120 °C

1.3.2 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS)

1.3.3 4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide (OBSH) ที่มีชื่อทางการค้าว่า Supercell-EW จากบริษัท A.F. Supercell จากบริษัท เพื่อทำหน้าที่เป็นสารฟู (Blowing agent)

1.3.4 ซีพิโอไลต์ (Sepiolite) จากบริษัท SIGMA-ALDRICH ทำหน้าที่เป็นสารช่วยก่อฟองอากาศ (Foam nucleating agent)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงอิทธิพลของการเติม 4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide (OBSH) ที่มีผลต่อขนาดของเซลล์โฟม สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS

1.4.2 ทราบถึงผลของการเติมซีพิโอไลต์ (Sepiolite) ที่มีต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา ขนาดของเซลล์โฟม ความหนาแน่น สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS

1.4.3 สามารถนำโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่เตรียมได้มาใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์กันกระแทก

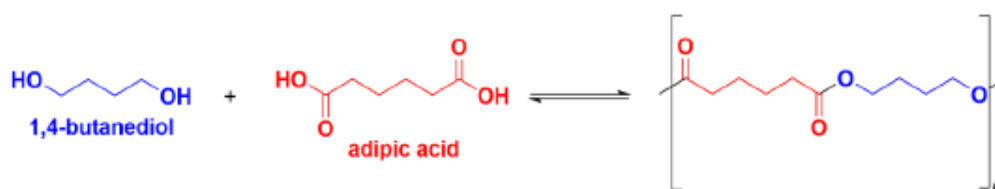
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลต (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) [6]

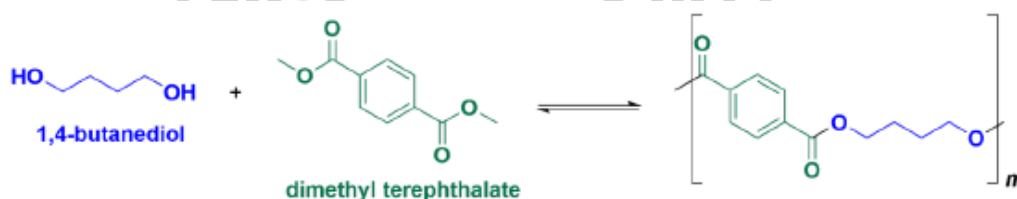
พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลต (Polybutylene Adipate-co-Terephthalate : PBAT) จัดเป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) ซึ่งได้จากแหล่งปิโตรเคมี (Petroleum-based Plastics) ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation polymerization) ของ monomer 3 ชนิด คือ Terephthalic acid, Adipic acid และ 1,4-Butanediol ซึ่งมีกระบวนการสังเคราะห์ 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 สังเคราะห์พอลิเอสเทอร์จาก Adipic acid และ 1,4-Butanediol โดยจะเติม 1,4-Butanediol ที่มากเกินไปเพื่อควบคุมให้ความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ได้สั้นดังภาพที่ 2.1



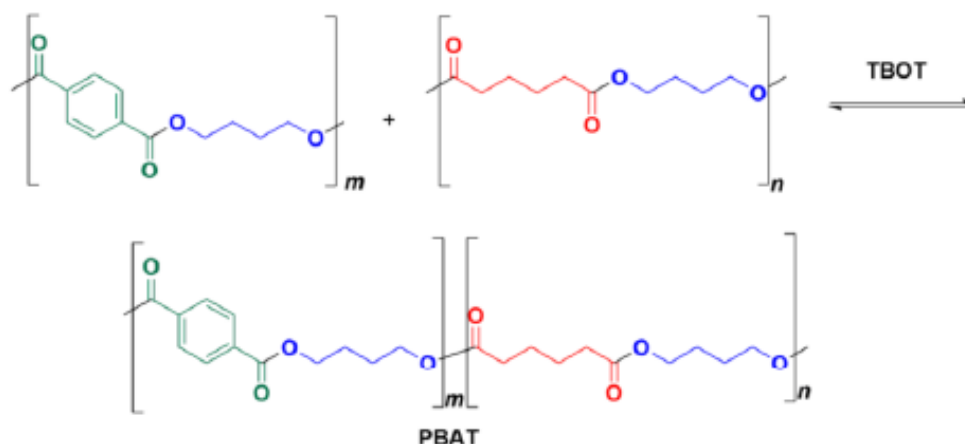
ภาพที่ 2.1 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ของ Adipic acid [6]

ขั้นที่ 2 สังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ของ Dimethyl terephthalate (DMT) โดยใช้ 1,4-Butanediol และ Dimethyl terephthalate (DMT) ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ของ Dimethyl terephthalate (DMT) [6]

ขั้นที่ 3 นำเอาพอลิเอสเทอร์ของ Adipic acid และ Dimethyl terephthalate (DMT) ที่ได้จากขั้นตอนการสังเคราะห์ขั้นที่ 1 และ 2 มาทำปฏิกิริยา Transesterification โดยใช้ Tetrautoxytitanium (TBOT) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยา Transesterification ระหว่าง พอลิเอสเทอร์ของ Adipic acid และพอลิเอสเทอร์ของ Dimethyl terephthalate (DMT) [6]

จากโครงสร้างของ PBAT ที่สังเคราะห์ได้ดังภาพที่ 2.3 จะเห็นว่า PBAT เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มที่มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และมีวงอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบบนสายโซ่หลัก (Synthetic aliphatic-aromatic polyester) จึงมีลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) มีความแข็งแรง เหนียว สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีความยืดหยุ่นสูงคล้ายกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene : LDPE) จากสมบัติดังกล่าวทำให้นิยมนำเอา PBAT มาผลิตเป็นฟิล์มประเภทต่างๆ ได้แก่ ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ และฟิล์มทางการแพทย์ รวมถึงนำมาใช้เป็นสารเคลือบกันน้ำสำหรับวัสดุอื่นๆ อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม PBAT ยังมีราคาค่อนข้างสูงจึงนิยมผสม PBAT เข้ากับพอลิเมอร์ที่มีราคาถูกกว่า เช่น เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch : TPS), พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid : PLA), พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate) : PBS) ซึ่งนอกจากจะช่วยลดต้นทุนการผลิตแล้วยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพลาสติกเชิงประกอบให้ดียิ่งขึ้น [14]

2.2 แป้ง (Starch) [15]

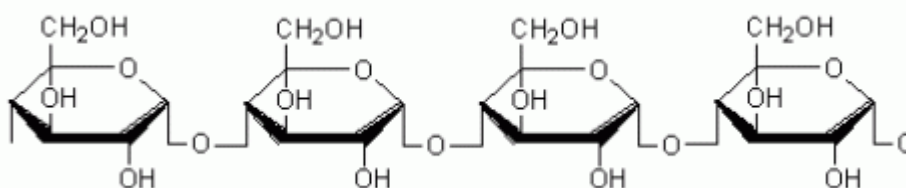
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูงที่พบในคลอโรพลาสต์ และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัวซึ่งพบในพืชต่างๆ ได้แก่ ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง นิยมนำมาใช้เป็นองค์ประกอบของอาหารสำหรับทุกชนชาติ นอกจากนี้ยังมีการนำแป้งมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมกาว และอุตสาหกรรมแป้งตัดแปรรูป เป็นต้น

2.2.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้ง คือ คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ และมีสิ่งอื่นๆ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ เจือปนอยู่ในปริมาณน้อยมาก โดยทั่วไปจะเรียกแป้งที่มีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่ว่าฟลาวัวร์ (Flour) แต่เมื่อมีการสกัดเอาสิ่งเจือปนออกไป จนเหลือเป็นแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่จะเรียกว่าแป้งสตาร์ช (Starch) ซึ่งนิยมเรียกแป้งสตาร์ชที่ยังไม่ตัดแปรรูปว่าแป้งดิบ (Raw starch) ส่วนแป้งที่นำมาตัดแปรรูปแล้ว จะถูกเรียกว่าโมดิไฟด์สตาร์ช (Modified starch) หรือแป้งตัดแปรรูป

แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ที่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่มีหน่วยของกลูโคส (Glucose unit) ที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group โดยแป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิดได้แก่

1. อะไมโลส (Amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ชนิด α -1,4 ดังภาพที่ 2.4

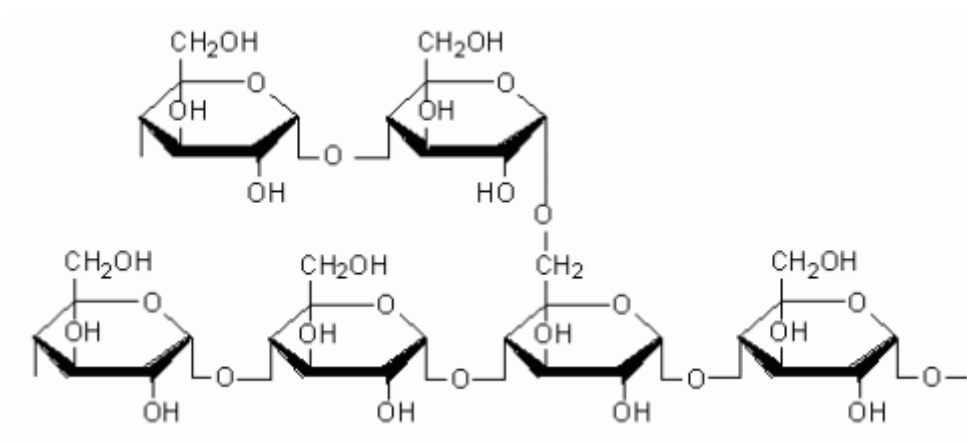


ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลส [16]

โดยทั่วไปอะไมโลสจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100,000 ถึง 1,000,000 ดาลตัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช ซึ่งในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังจะมีอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 – 6,000 ดาลตัน สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีที่น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสประมาณ

200 – 1,200 นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสที่ยาวกว่าจะมีแนวโน้มในการคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation) ลดลง

2. อะไมโลเพคติน (Amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ที่ประกอบไปด้วยกลูโคสส่วนที่เป็นเส้นตรงซึ่งเป็นส่วนที่กลูโคสจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสายสั้นซึ่งส่วนนี้กลูโคสจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [16]

โดยทั่วไปจะมีหน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 ประมาณ 5% ของหน่วยกลูโคส ในอะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส และมีอัตราการคืนตัวต่ำเนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะเป็นกิ่ง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินพบว่าอะไมโลเพคตินมีความสำคัญมากกว่าอะไมโลสทั้งในด้านโครงสร้าง และการนำไปใช้ โดยแป้งที่มีจากแหล่งที่แตกต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแตกต่างกันดังตารางที่ 2.1 ส่งผลให้แป้งจากแหล่งต่างๆ มีสมบัติ และการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในแป้งแต่ละชนิด [15]

แหล่งที่มาของแป้ง	อะไมโลส (%น้ำหนักแห้ง)	อะไมโลเพคติน (%น้ำหนักแห้ง)
แป้งสาลี	28	72
แป้งข้าวโพด	28	72
แป้งข้าวเจ้า	17	83
แป้งมันสำปะหลัง	17	79
แป้งมันฝรั่ง	21	83

นอกจากอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแล้วภายในเม็ดแป้งยังมีส่วนประกอบด้วยส่วนอื่นๆ ได้แก่

1. ไขมัน มักพบทั้งบริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง และกระจายอยู่ทั่วไปภายในเม็ดแป้งในปริมาณที่น้อยกว่า 1% ของแป้ง โดยแป้งแต่ละชนิดจะมีปริมาณไขมันที่แตกต่างกัน สำหรับแป้งจากพืชหัวและจากถั่วจะไม่มีไขมันภายในเม็ดแป้ง ส่วนแป้งจากธัญพืชจะมีไขมันภายในเม็ดแป้ง ซึ่งการมีอยู่ของไขมันภายในแป้งนี้จะส่งผลให้ความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกับน้ำของแป้งลดลง นอกจากนี้กรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่บริเวณพื้นผิวเม็ดแป้งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ส่งผลให้แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี จะมีกลิ่นแรงกว่าแป้งข้าวโพด แป้งข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง เนื่องจากแป้งจากธัญพืชมีไขมันเป็นองค์ประกอบมากกว่า

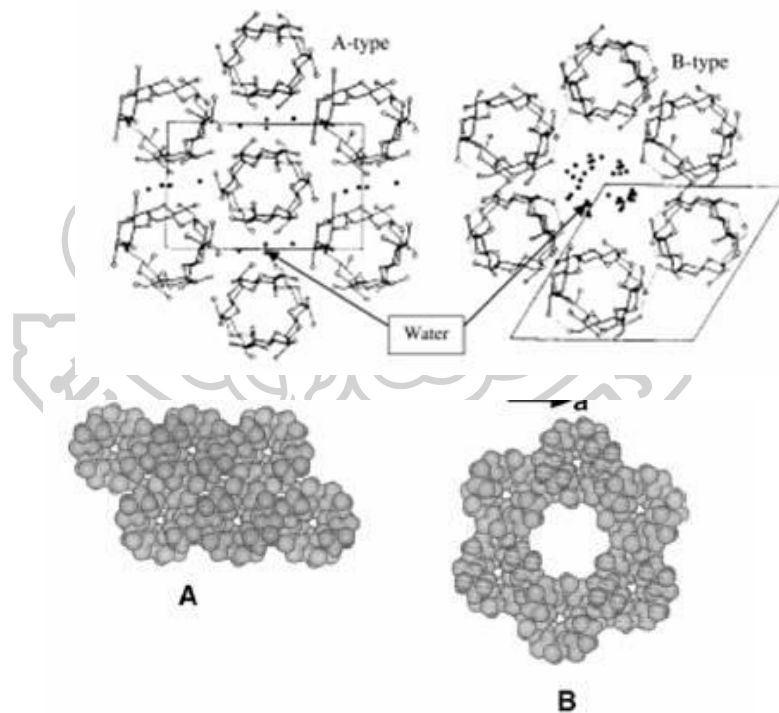
2. ไนโตรเจน (โปรตีน) มักจะเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งในปริมาณที่ต่ำกว่า 1% ส่งผลให้เกิดประจุลบบนพื้นผิวของเม็ดแป้ง ซึ่งส่งผลต่อการกระจายตัวของเม็ดแป้ง ทำให้อัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลลาทีนซ์ของแป้งเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดระหว่างการทำปฏิกิริยาของกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิง ส่งผลให้สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป

3. ฟอสฟอรัส มักพบอยู่ในแป้งด้วยปริมาณที่น้อยกว่า 0.1% โดยการมีอยู่ของฟอสฟอรัสจะส่งผลให้พื้นผิวของแป้งมีประจุเป็นลบ จึงเกิดแรงผลักระหว่างประจุลบส่งผลให้แป้งที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ เช่น แป้งมันฝรั่งจะเกิดการพองตัวง่าย และมีความหนืดสูงกว่าแป้งชนิดอื่นๆ

2.2.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง

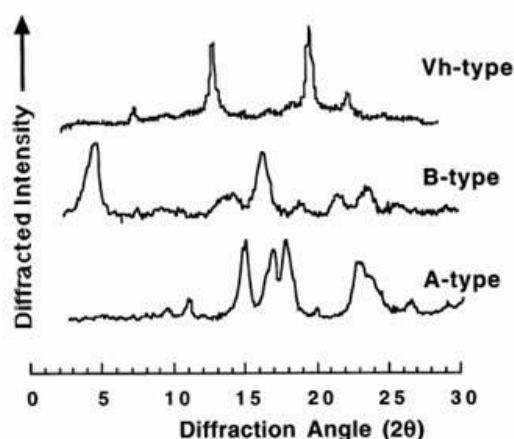
เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ Semi-crystalline โดยสายโซ่สั้นของอะไมโลเพคติน จะจัดเรียงตัวเป็นเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วน อสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของอะไมโลส และสายโซ่ยาวของอะไมโลเพคติน ซึ่ง ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งจะมีอยู่ 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของ เกลียวคู่ ได้แก่

1. ผลึกแบบ A เกิดจากการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่อย่างหนาแน่นมาก ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ซึ่งมักพบในแป้งจากธัญพืชต่างๆ
2. ผลึกแบบ B เกิดจากการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่อย่างหลวมๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ซึ่งมักพบในแป้งจากพืชหัว
3. ผลึกแบบ C เกิดจากการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ทั้งแบบ A และแบบ B รวมกัน มักพบใน แป้งจากพืชตระกูลถั่ว



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างผลึกแบบ A และแบบ B [17]

โครงสร้างผลึกที่ต่างกันจะให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของแป้งได้ด้วยเทคนิครังสีเอ็กซ์เรย์ โดยจะพบว่าแป้งที่ได้จากธัญพืช เช่น ข้าวโพดและข้าวเจ้า ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ A จะพบพีคที่ 17 และ 17.9° แต่ไม่มีพีคที่ 5.6° ส่วนแป้งที่ได้จากพืชหัว เช่น แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ B จะให้พีคที่ 5.6 และ 17.2° แต่ไม่มีพีคที่ 17.9° นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งที่ได้จากพืชตระกูลถั่วซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ A และแบบ B อยู่ร่วมกัน เรียกว่าโครงสร้างผลึกแบบ C จะมีพีคที่ 5.6 และ 17.9° ซึ่ง X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันแสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน [17]

แป้งบางชนิดอาจมีลักษณะของผลึกได้มากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลังซึ่งมีลักษณะผลึกทั้งแบบ A และ C นอกจากนี้โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งดิบในธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับการทำ Treatment ต่อเม็ดแป้ง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

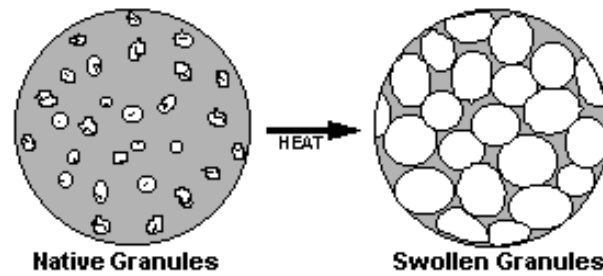
ตารางที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด [17]

ชนิดแป้ง	ความเป็นผลึก (%)	อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีโนเซชัน (°C)	ปริมาณอะไมโลส (%)
โครงสร้าง A			
ข้าวโอ๊ต	33	60.7	23
ข้าวสาลี	36	63.5	23
ข้าวเหนียว	37	64.5	-
ข้าวฟ่าง	37	72.2	25
ข้าวเจ้า	38	70.0	17
ข้าวโพด	40	71.3	27
โครงสร้าง B			
Amylomaize	15 – 22	86.0	55 – 75
สาคุ	26	70.5	28
มันฝรั่ง	28	67.3	22
โครงสร้าง C			
มันเทศ	38	70.0	20
มันสำปะหลัง	38	66.0	18

2.2.3 คุณสมบัติของแป้ง

2.2.3.1 การพองตัวและการละลาย [17]

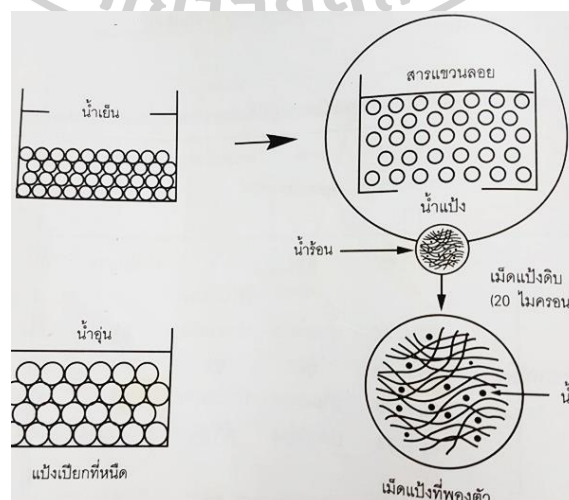
โดยทั่วไปแป้งจะไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีการจัดเรียงตัวระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดแป้ง ส่งผลให้ส่วนที่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบและหนาแน่น (Crystalline) ทำหน้าที่ในการป้องกันการกระจายตัวและทำให้แป้งไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนที่มีการเกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบ และมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก (Amorphous) จะสามารถเกิดปฏิกิริยา Hydration ได้บ้างในน้ำเย็น และเมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิมากกว่า 60 °C พบว่าส่วน Crystalline จะเริ่มคลายตัวออกจากกัน และส่วน Amorphous จะจับกับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน [17]

2.2.3.2 การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization) [15]

ในโมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติเป็น Hydrophilic แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในร่างแห (Micelles) เม็ดแป้งจึงละลายได้ยากในน้ำเย็น แป้งที่อยู่ในน้ำเย็นจึงดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะค่อยๆ คลายตัวลง เม็ดแป้งจึงสามารถดูดน้ำและพองตัว ดังภาพที่ 2.9 ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้น และใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งน้อยลง เม็ดแป้งจึงเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นส่งผลให้เกิดความหนืด ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การเกิดเจลาตินในเซชัน” อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า “อุณหภูมิเริ่มเจลาตินในซ์” เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืด มักจะเรียกจุดนี้ว่า “อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด” (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด แป้งจากหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่งจะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาตินในซ์ต่ำกว่าอุณหภูมิจากแป้งธัญพืช

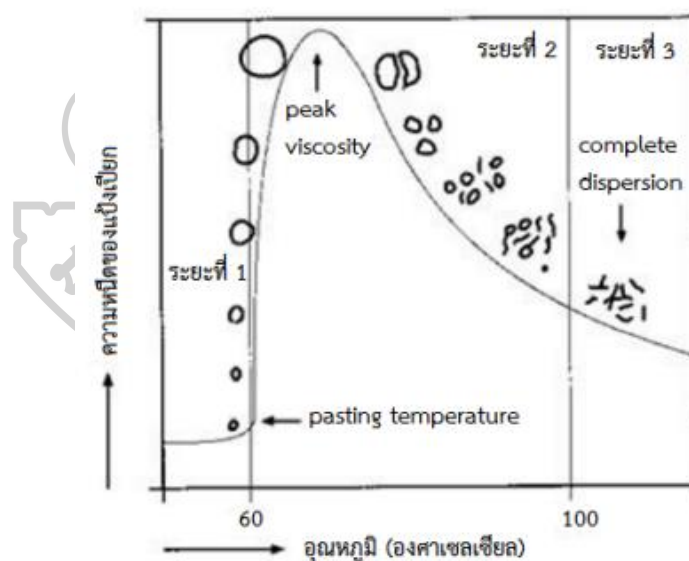


ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม [15]

การเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ดังภาพที่ 2.10 ระยะ คือ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัด และเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ ระหว่างร่างแห และระหว่าง Micelles ยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่าง และโครงสร้างได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่าง และโครงสร้างได้ เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้งประมาณ 65 °C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง)

เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ร่างแหระหว่าง Micelles ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามาก และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้เรียกว่า “การเกิดเจลาตินในเซชัน” เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา

เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างของเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะมากขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีขึ้นอีกด้วย



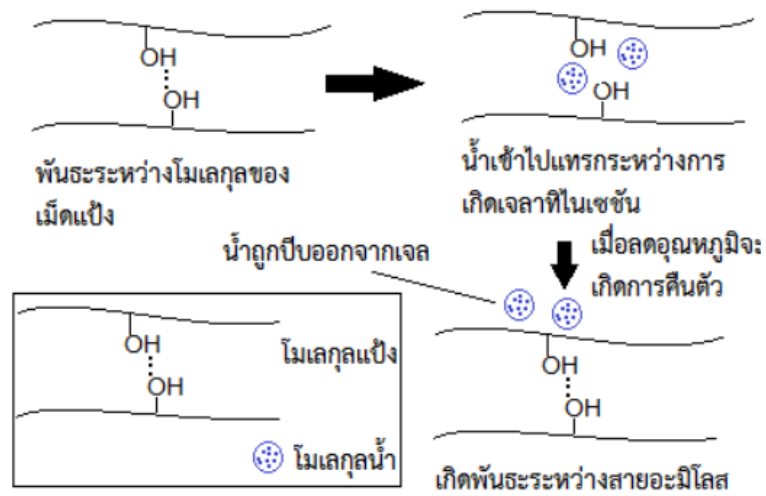
ภาพที่ 2.10 ระยะในการเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดแป้ง [15]

2.2.3.3 การคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation) [15]

เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำแป้งดิบจนเกิดเจลาตินในเซชันจากนั้นให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วเม็ดแป้งจะแตกออก ส่งผลให้โมเลกุลของอะไมโลส ขนาดเล็กกระจายตัวออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลของอะไมโลส ที่กระจายตัวอยู่ยู่ยั้นจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นร่างแหสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก ความหนืดจึงมีความคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การเกิดรีโทรโกลเดชัน” หรือ “การคืนตัว” เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการจับเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาจนเจล เรียกว่า “Syneresis” ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขรุขระและมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.11

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง โดยสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก เช่น แคลเซียมไนเตรท และยูเรีย

ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีอิทธิพลต่อการคืนตัวของแป้ง โดยแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง ซึ่งอัตราในการคืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำสุด) เมื่อขนาดของโมเลกุล (Degree of polymerization) ของอะไมโลสเท่ากับ 100-200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะไมโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะไมโลสที่คืนตัวแล้วกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100-160 °C โดยอะไมโลเพคตินจะทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน โดยแป้งสาลีและแป้งข้าวโพดจะมีอัตราการคืนตัวสูงกว่าแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากในแป้งธัญพืชมีปริมาณอะไมโลสสูง (ประมาณ 28%) ในแป้งข้าวโพดเหนียวจะมีอัตราการคืนตัวของแป้งต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีอะไมโลสในแป้งข้าวโพดเหนียว ดังแสดงในตารางที่ 2.3



ภาพที่ 2.11 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [15]

ตารางที่ 2.3 อัตราการคืนตัวของแป้งแต่ละชนิด [15]

ชนิดของแป้ง	% การตกตะกอนของส่วนที่ไม่ละลาย		
	5 วัน	10 วัน	30 วัน
แป้งมันฝรั่ง	10	15	20
แป้งข้าวโพด	37	48	62
แป้งสาลี	45	48	52
แป้งมันสำปะหลัง	11	12	13
แป้งข้าวโพดเหนียว	0.2	0.5	1

2.2.4 แป้งมันสำปะหลัง [18]

เป็นแป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง ลักษณะของแป้งมีสีขาว เนื้อเนียน ลื่นเป็นมัน เมื่อทำให้สุกด้วยการกวนกับน้ำไฟอ่อนปานกลาง แป้งจะละลายง่าย สุกง่าย แป้งเหนียวติดภาชนะ หนืดข้นขึ้นเรื่อยๆ ไม่มีการรวมตัวเป็นก้อน เหนียวเป็นใย ติดกันหมด เนื้อแป้งใสเป็นเงา พอเย็นแล้วจะติดกันเป็นก้อนเหนียว ติดภาชนะ ใช้ทำลอดช่องสิงคโปร์ ครอบแครงแก้ว เป็นต้น และยังถูกใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมกาว เป็นต้น

2.2.4.1 คุณภาพของแป้งมันสำปะหลัง [15]

คุณลักษณะเด่นของแป้งมันสำปะหลังคือมีความบริสุทธิ์สูง มีสิ่งปนเปื้อนต่ำ จัดเป็นแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสค่อนข้างต่ำ (18-23%) จึงเกิดการพองตัวได้ดี และมีค่าความสามารถในการละลายค่อนข้างสูง

เมื่อเม็ดแป้งที่พองตัวได้รับความร้อนเม็ดแป้งจะเปลี่ยนไปอยู่ในสภาพของแป้งเปียกที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเมื่อแป้งเปียกเย็นตัวลงจะเกิดเป็นเจลขึ้น อย่างไรก็ตามลักษณะความหนืดของแป้งเปียกและการเกิดเจลในแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน เมื่อแป้งมันสำปะหลังได้รับอุณหภูมิสูงจะมีค่ากำลังการพองตัวสูงขึ้น ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นด้วย แต่แป้งเปียกของแป้งมันสำปะหลังจะไม่คงตัวมากนัก จึงเป็นข้อจำกัดในการใช้แป้งมันสำปะหลังในการใช้เป็นสารให้ความหนืดในผลิตภัณฑ์บางชนิด ดังนั้นจึงมีการดัดแปรแป้งเพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวของแป้งเปียก เมื่อแป้งเปียกของแป้งมันสำปะหลังเย็นตัวลง ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีอะไมโลสค่อนข้างต่ำ ทำให้เกิดการจับกันของหมู่ไฮดรอกซิลของอะไมโลสระหว่างเย็นตัวต่ำ แป้งมันสำปะหลังจึงเป็นแป้งที่เกิดการคืนตัวต่ำ และทำให้ลักษณะของแป้งเปียกที่ใส ไม่ทึบแสงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่น

2.3 โฟมพลาสติก [10]

โฟมพลาสติก คือพลาสติกที่การเติมสารฟู่ (Blowing agent) ลงไปในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ส่งผลให้มีวัฏภาคของแก๊สกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของพลาสติก พลาสติกดังกล่าวจึงเกิดการขยายตัวและได้ผลิตภัณฑ์โฟมที่มีความหนาแน่นโดยรวม และน้ำหนักลดลง นอกจากนี้ในบางกรณีอาจมีการเติมสารอื่นลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโฟม เช่น สารเสริมแรง และสารตัวเติม

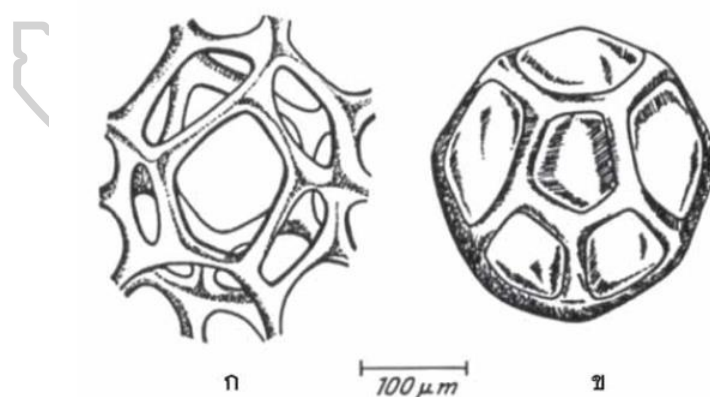
2.2.1 ประเภทของโฟมที่จำแนกตามลักษณะของเซลล์

1) โฟมเซลล์เปิด (Open-cell foam)

เป็นโฟมที่เตรียมโดยใช้เทคนิคความดันต่ำ (Low-pressure technique) ภายใต้สภาวะบรรยากาศ เซลล์โฟมที่ได้จึงเชื่อมต่อกันทั้งหมด ส่งผลให้ก๊าซที่อยู่ภายในเนื้อโฟมสามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างเซลล์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 (ก) โฟมแบบนี้จึงมีความยืดหยุ่นเหมาะสำหรับใช้ผลิตเป็นเบาะนั่ง ที่นอน บรรจุกัมภ์ และวัสดุกันกระแทก

2) โฟมเซลล์ปิด (Close-cell foam)

เป็นโฟมที่เตรียมโดยใช้เทคนิคความดันสูง (High-pressure technique) ภายใต้สภาวะบรรยากาศ ส่งผลให้เซลล์โฟมที่ได้มีผนังเซลล์ กั้นไม่ให้ก๊าซที่อยู่ภายในเนื้อโฟมสามารถผ่านไปมาระหว่างเซลล์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 (ข) โฟมแบบนี้จะมีความแข็งแรงเหมาะสำหรับใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อน และทุ่นลอย



ภาพที่ 2.12 สัณฐานโครงสร้างของโฟม(ก) เซลล์เปิด (ข) เซลล์ปิด [4]

ในทางปฏิบัติการขึ้นรูปโฟมจะได้โฟมที่มีลักษณะเป็นเซลล์เปิด และเซลล์ปิดอยู่ร่วมกัน ดังนั้นสมบัติเชิงกลของโฟมจึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของโฟมเซลล์เปิดต่อโฟมเซลล์ปิด ถ้าโฟมมีสัดส่วนของเซลล์ปิดสูงจะทำให้โฟมที่ได้มีค่าความแข็งตึง (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength) ที่สูง

2.2.2 ประเภทของโฟมที่จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

1) โฟมยืดหยุ่น (Flexible foam)

เป็นโฟมที่มีลักษณะอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น สามารถคืนตัวได้ง่ายเมื่อถูกกด เนื่องจากพอลิเมอร์เมทริกซ์มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (Glass transition temperature : T_g) ต่ำ

2) โฟมชนิดแข็ง (Rigid Foam)

เป็นโฟมที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ไม่สามารถคืนตัวได้เมื่อถูกกด พอลิเมอร์เมทริกซ์จะอยู่ในสถานะผลึก (Crystalline state) หรือถ้าอยู่ในสถานะอสัณฐาน (Amorphous state) จะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วค่อนข้างสูง

3) โฟมชนิดกึ่งแข็ง (Semi-Rigid Foam)

เป็นโฟมจะมีพฤติกรรมทางความเค้น-ความเครียด (Stress-strain behavior) คล้ายโฟมชนิดยืดหยุ่น แต่จะมีค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมากกว่าโฟมชนิดยืดหยุ่น

2.2.3 ประเภทของโฟมที่จำแนกตามประเภทของพลาสติก

1) โฟมเทอร์โมเซต (Thermoset foam) เป็นโฟมที่เตรียมจากพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต ต้องใช้กระบวนการทางเคมีที่ซับซ้อนในการนำมารีไซเคิล

2) โฟมเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic foam) เป็นโฟมที่เตรียมจากพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ง่าย

2.3.4 กระบวนการเกิดโฟม (Foam formation)

กระบวนการเกิดโฟมที่นิยมใช้ คือ วิธีการขยายตัว (Expansion process) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

2.3.4.1 ขั้นตอนการเกิดฟอง (Bubble formation or Initiation)

ขั้นตอนการเกิดฟอง หรือการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเกิดโฟม ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่

- 1) การเกิดนิวเคลียสในตนเอง (Self-nucleation) เป็นการเกิดฟองแก๊สในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2) กระบวนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation process) เป็นกระบวนการที่เกิดฟองแก๊สที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งกับของเหลว (Liquid-solid interphase) ซึ่งในกระบวนการนี้ จำเป็นต้องมีของแข็งทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent)

อย่างไรก็ตามการทำให้เกิดฟองแก๊สในโครงสร้างโฟมมีหลายวิธี ดังนี้

- 1) การสลายตัวทางความร้อนของสารฟูทางเคมี (Chemical blowing agents) การเกิดฟองแก๊สด้วยวิธีนี้เป็นทำให้ความร้อนกับของผสมระหว่างสารฟูทางเคมี (Chemical blowing agents) และพอลิเมอร์ จากนั้นสารฟูจะเกิดการสลายตัวเป็นแก๊ส เช่น แก๊สไนโตรเจน (N_2) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น
- 2) การเกิดฟองแก๊สเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นการเกิดฟองแก๊สเมื่อนำสารเคมีตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาทำปฏิกิริยากัน ซึ่งการเกิดฟองวิธีนี้จะเกิดขึ้นพร้อมกับการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) และการเชื่อมขวาง
- 3) การลดความดัน เป็นการลดความดันในระบบพอลิเมอร์ เพื่อให้แก๊สในเนื้อพอลิเมอร์เกิดการขยายตัว
- 4) การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในเนื้อพลาสติก ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อน หรือการให้ความร้อนกับสารฟูที่เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น ฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) และเมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride)
- 5) การใช้ตัวเติมชั่วคราว เป็นการใช้ออนุภาคของแข็งผสมกับพอลิเมอร์ แล้วขึ้นรูปเป็นพลาสติกแข็ง จากนั้นจึงใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม (Leach) สารตัวเติมที่เป็นอนุภาคของแข็งออก จากขั้นตอนดังกล่าวจะเห็นว่าวิธีการนี้จะไม่มีการผลิตแก๊สขึ้น
- 6) การกักเก็บก๊าซเชิงกล เป็นการทำให้เกิดฟองแก๊สในพอลิเมอร์หลอมเหลวด้วยการกวนเชิงกล จากนั้นจะใช้สารเร่งปฏิกิริยาและ/หรือความร้อน เพื่อทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวแข็งตัว ส่งผลให้เนื้อพอลิเมอร์สามารถกักเก็บแก๊สไว้ในเนื้อพอลิเมอร์ได้
- 7) การเติมไมโครสเฟียร์ เป็นการเติม Hollow microsphere ซึ่งอาจเป็นเม็ดแก้ว หรือเม็ดพลาสติกลงในพอลิเมอร์ โดยส่วนมากนิยมผสมเม็ดฟีนอลิก (Phenolic spheres) ลงในพอลิเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) ในขณะที่เกิดการบ่ม (Curing)

2.3.4.2 ขั้นตอนการเพิ่มขนาดของฟอง (Bubble growth)

การเพิ่มขนาดของฟองแก๊สในขั้นตอนการเกิดโฟมจะอาศัยการแพร่ของแก๊สจากเฟสของเหลว หรือพอลิเมอร์หลอมเหลวไปยังฟองแก๊สที่มีลักษณะเป็นทรงกลมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก ทำให้ฟองแก๊สเกิดการขยายตัวออกไปภายใต้สภาวะที่กำหนด การขยายตัวของฟองแก๊สสามารถควบคุมได้โดยอาศัยความแตกต่างของค่าความดันระหว่างภายในและภายนอกฟองแก๊ส หรือเซลล์โฟม (ΔP) แรงตึงผิวที่สัมผัส (γ) และรัศมีของฟอง (r) ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (1)$$

ฟองที่มีขนาดเล็กจะมีค่าความแตกต่างของความดันมาก และมีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความแตกต่างของความดันเท่ากันได้โดยขยายตัว การแตกของผนังเซลล์ หรือการแพร่ของสารจากฟองที่มีขนาดเล็กไปยังฟองที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\Delta P_{1,2} = 2\gamma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

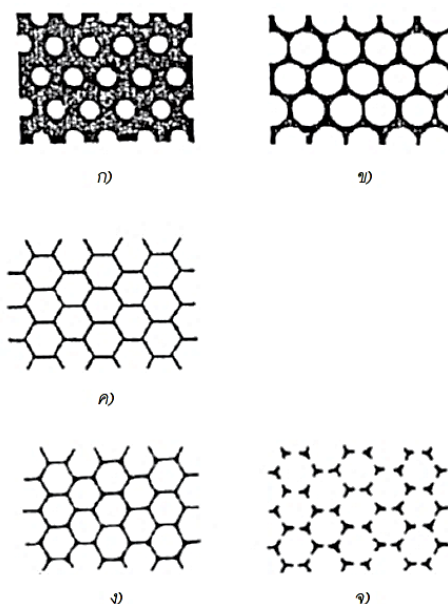
เมื่อ $\Delta P_{1,2}$ คือ ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างฟอง 2 ฟอง โดยที่ขนาดรัศมีของฟองเท่ากับ r_1 และ r_2 ตามลำดับ

2.3.4.3 ขั้นตอนการการเสถียรหรือการคงรูปของฟอง (Bubble stability)

ขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการเกิดโฟม เนื่องจากฟองที่เกิดขึ้นในเฟสของเหลวหรือพอลิเมอร์หลอมเหลวอาจจะไม่เสถียรและเกิดการยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วงได้หากไม่ผ่านขั้นตอนนี้ หนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อความเสถียรของโครงสร้างโฟม คือการถ่ายเท (Drainage) ของของเหลวจากผนังเซลล์ไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์ (Cell junction) ในขณะที่ฟองเกิดการขยายตัวจะเกิดการสัมผัสกันของเซลล์โฟมทำให้เกิดผนังเซลล์และสัน (Ribs) ของเซลล์โฟมขึ้น และเมื่อของเหลวเกิดการขยายตัวต่อไปจะทำให้เกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ หากทำให้ระบบโฟมในขณะนี้เสถียรจะทำให้ได้โฟมพลาสติกแบบเซลล์ปิด

การป้องกันไม่ให้เกิดรอยแตกของผนังเซลล์สามารถทำได้โดยทำให้ระบบโฟมเกิดการเสถียร ก่อนที่จะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ ซึ่งการทำให้ระบบโฟมเสถียรในระบบโฟมพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืดของเฟสพอลิเมอร์หลอมเหลว นอกจากนี้ยังสามารถทำให้โฟมเสถียรได้ด้วยวิธีทางเคมี เช่น การทำให้เทอร์โมพลาสติกที่ขยายตัวเย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการไหลของพอลิเมอร์

จากขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการเกิดโฟมดังที่ได้กล่าวไปในข้างต้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่



ภาพที่ 2.13 แผนภาพขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการเกิดโฟม [10]

- ก) การเกิดฟองรูปร่างทรงกลมในระบบพอลิเมอร์หลอมเหลว
- ข) ฟองแก๊สเกิดการขยายตัว ทำให้ได้โฟมที่มีความหนาแน่นลดลง
- ค) ฟองแก๊สเกิดการขยายตัวจนไปสัมผัสกันระหว่างฟองแก๊สทำให้รูปร่างของฟองเปลี่ยนเป็นทรงสิบสองหน้า ซึ่งแต่ละหน้าเป็น 5 เหลี่ยม (Pentagonal dodecahedron) แต่หากมองเป็น 2 มิติ จะเป็น 6 เหลี่ยมลักษณะคล้ายรังผึ้ง (Hexagonal honey comb)
- ง) โฟมพลาสติกที่ได้มีลักษณะเป็นแบบเซลล์ปิด
- จ) โฟมพลาสติกที่ผนังเซลล์ของฟองเกิดการแตก ส่งผลให้โครงสร้างของโฟมเป็นแบบเซลล์เปิด

2.4 สารฟู (Blowing agents) [19]

สารฟู คือ สารที่ทำให้เกิดฟองแก๊สกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นโฟม สามารถแบ่งประเภทตามกลไกการเกิดฟองแก๊สได้ 2 ประเภท ได้แก่ สารฟูทางกายภาพ (Physical Blowing Agents : PBAs) และสารฟูทางเคมี (Chemical Blowing Agent : CBAs)

2.4.1 สารฟูทางกายภาพ (Physical Blowing Agents : PBAs)

สารฟูทางกายภาพ คือ สารที่เติมลงไปในช่วงกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และก่อให้เกิดฟองแก๊ส ส่วนใหญ่มักเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ และสามารถกระจายตัวได้ดีในเนื้อพอลิเมอร์ มักเป็นของเหลวที่มีราคาถูก เมื่อเป็นแก๊สจะไม่หลงเหลือ

ส่วนที่เป็นของแข็งซึ่งอาจส่งผลต่อสีและสมบัติของพอลิเมอร์ แต่เนื่องจากสารฟู่ทางกายภาพต้องอาศัยอุปกรณ์พิเศษในการกักเก็บจึงต้องมีอุปกรณ์ที่เฉพาะเจาะจง หรือต้องมีการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปสำหรับการผลิตโฟม โดยสารฟู่ทางกายภาพมี 2 ประเภท ได้แก่

1) การฉีดแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สไนโตรเจน (N_2) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เข้าไปในพอลิเมอร์ที่มีความดันสูง จากนั้นพองขยายตัวออกเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลออกจากหัวดาย เนื่องจากความดันของระบบลดลง

2) การเติมของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น ไฮโดรคาร์บอน ฮาโลจีเนตไฮโดรคาร์บอน (ประกอบด้วย Freons และ CFC) และอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ลงไปในพอลิเมอร์

2.4.2 สารฟู่ทางเคมี (Chemical Blowing Agent : CBAs)

สารฟู่ทางเคมี คือ สารที่เติมลงไปในช่วงกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้ได้ฟองแก๊สออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ โดยจะต้องเลือกสารฟู่ทางเคมีที่มีอุณหภูมิการสลายตัวใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นงาน เพื่อให้สารฟู่ทางเคมีเกิดการสลายตัวออกมาเป็นแก๊สที่อุณหภูมิดังกล่าว สารฟู่ทางเคมีแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.4.2.1 Inorganic blowing agents

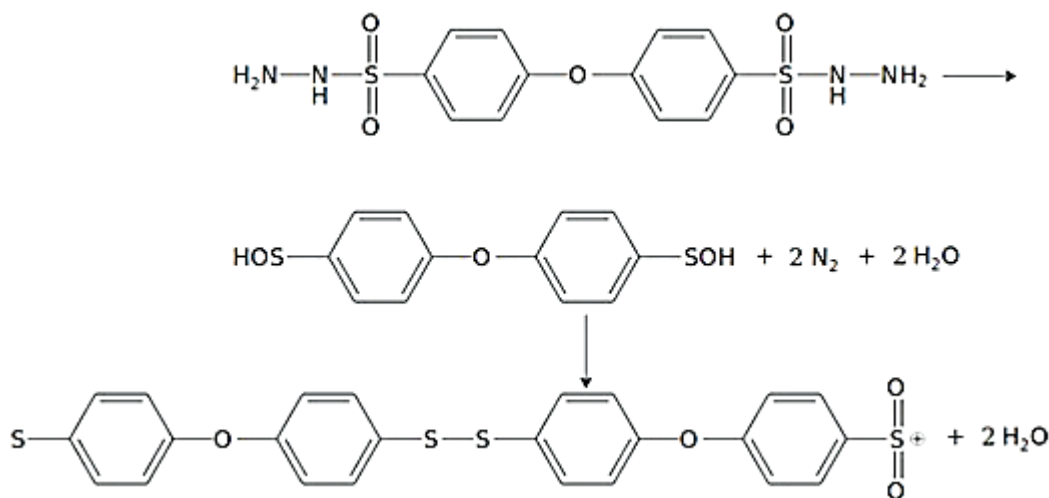
Inorganic Blowing Agents เป็นสารฟู่ทางเคมีที่มีปฏิกิริยาการสลายตัวที่สามารถผันกลับได้ ซึ่งการผันกลับจะเกิดในขณะที่มีการลดลงของแก๊สในระบบ เช่น Sodium hydrogen carbonate ($NaHCO_3$)

2.4.2.2 Organic blowing agents

Organic Blowing Agents เป็นสารฟู่ทางเคมีที่มีปฏิกิริยาการสลายตัวที่ไม่สามารถผันกลับได้ เช่น Azodicarbonamide (ACD) และ 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide) (OBSh)

2.5 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide) (OBSh) [19]

4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide) (OBSh) เป็นผลึกของแข็งสีขาว ที่ทำหน้าที่เป็นสารฟู่ที่จะคายความร้อนออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Exothermic chemical foaming agents) เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิในช่วง $150-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเกิดการสลายตัวออกมาเป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) และน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 ปฏิกิริยาการสลายตัวของ 4,4'-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide)(OBSH) [19]

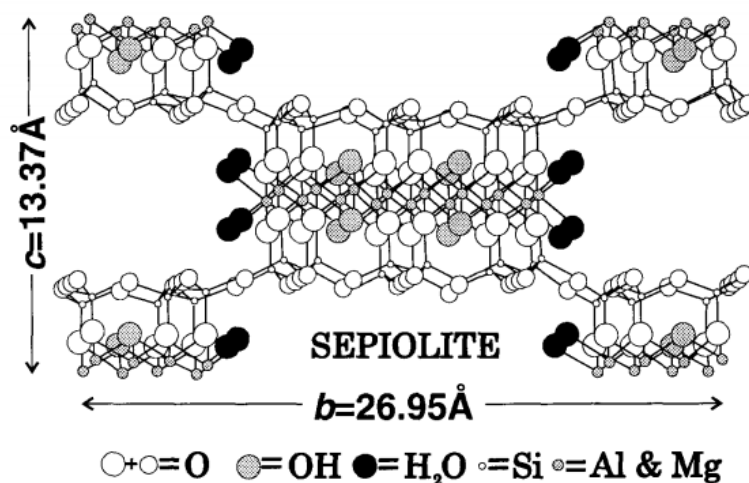
2.6 ซีพิโอไลต์ (Sepiolite) [20]

ซีพิโอไลต์ หรือที่รู้จักกันในชื่อ Meerschaum เป็นแร่ดินเหนียว (Clay mineral) ที่เป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ อลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrous aluminium silicate) ที่มีสูตรเคมีคือ $\text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{OH})_4$ จัดอยู่ในกลุ่มไอโนซิลิเกต (Inosilicate) ซึ่งมีโครงสร้างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ (Chain structure) ดังแสดงในภาพที่ 2.15 อนุภาคจึงมีลักษณะคล้ายเข็ม (Needle-like particles) แตกต่างจากแร่ดินเหนียวชนิดอื่นที่มีโครงสร้างคล้ายจาน (Dish-like particles) ซีพิโอไลต์มีคุณสมบัติเด่นดังนี้

1) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET, N_2) ประมาณ $300 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) เป็นจำนวนมากจึงมีสมบัติความเป็น Hydrophilic

2) อนุภาคมีขนาดเล็กคือมีความยาวเฉลี่ย $1-2 \mu\text{m}$ มีความกว้าง $0.01 \mu\text{m}$ และมีช่องเปิด (Open channels) ที่มีขนาด $3.6 \text{ \AA} \times 10.6 \text{ \AA}$ อยู่ตามแนวแกน X ของอนุภาค โดยอนุภาคของซีพิโอไลต์จะมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ส่งผลให้ซีพิโอไลต์มีสมบัติความเป็นรูพรุนสูงจึงสามารถนำมาใช้ในการดูดซับ หรือดูดซึมไอระเหย กลิ่น รวมถึงน้ำ หรือของเหลวอื่นๆ ได้อีกด้วย

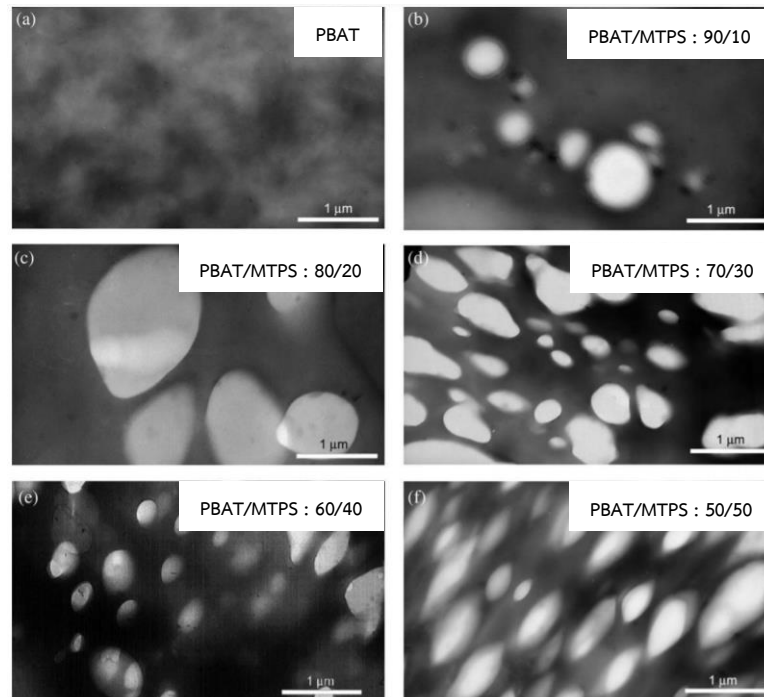
3) ไม่เกิดการบวมตัว หรือละลายแม้ว่าจะอิมมัลชันไปด้วยของเหลว ซีพิโอไลต์กระจายตัวได้ดีในน้ำ หรือของเหลวอื่นๆ เมื่อซีพิโอไลต์กระจายตัวอยู่ในของเหลวมักจะก่อตัวเป็นอนุภาคที่มีโครงสร้างเป็นร่างแหแบบสุ่ม เนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างน้ำและอนุภาคของซีพิโอไลต์ ดังนั้นการเติมซีพิโอไลต์ลงในของเหลวจะส่งผลให้ของเหลวมีความหนืดมากขึ้น จึงสามารถนำซีพิโอไลต์มาใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด (Suspending agent) ได้



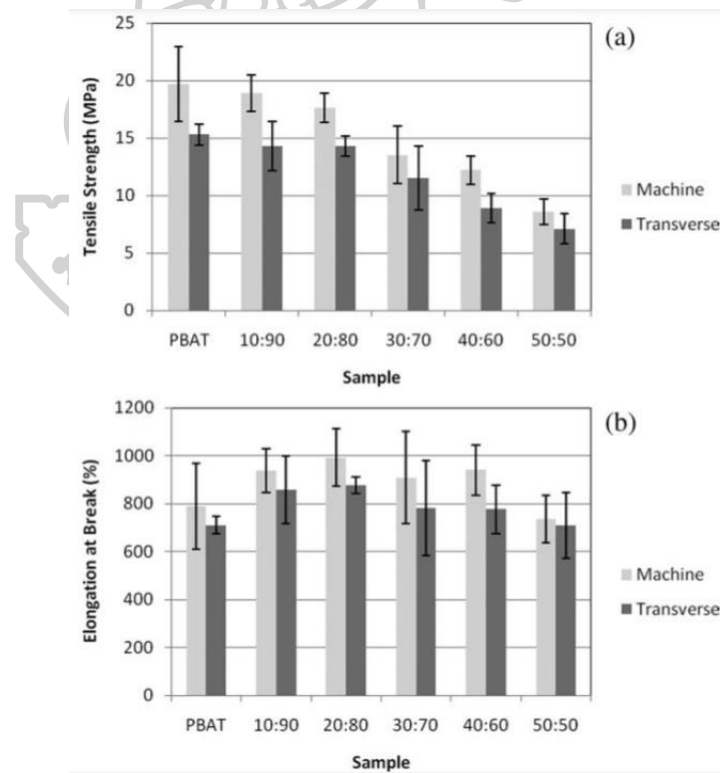
ภาพที่ 2.15 โครงสร้างของซีพีโอไลต์ [21]

2.7 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Jacqueline Stagner และคณะ [9] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS จากแป้งข้าวโพดที่อัตราส่วนต่างๆ โดยเริ่มจากการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรรูปโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ด้วยการผสมแป้งข้าวโพดเข้ากับกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และ Luperox 101 ที่ปริมาณ 2% และ 0.1% โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิ 25/95/125/145/160/165/165/165/150/145 °C โดยใช้ความเร็วรอบ 125 rpm จากนั้นจะผสม PBAT เข้ากับ MTPS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิ 25/125/135/140/145/150/150/150/145/135 °C โดยใช้ความเร็วรอบ 100 rpm จากนั้นจะนำฟิล์มที่ได้มาศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า MTPS มีลักษณะเป็นทรงกลมกระจายตัวอยู่ในภูมิภาคต่อเนื่องของ PBAT โดยขนาดทรงกลมของ MTPS จะมีขนาดเล็กลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ MTPS ดังแสดงในภาพที่ 2.16 นอกจากนี้ยังได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวพบว่าการเพิ่มปริมาณ MTPS จะส่งผลให้ Tensile strength และ Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.17

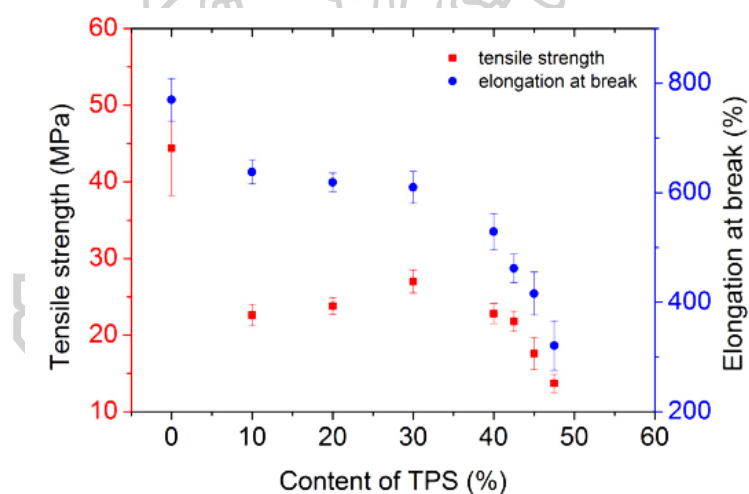


ภาพที่ 2.16 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PBAT/MTPS ที่อัตราส่วนต่างๆ

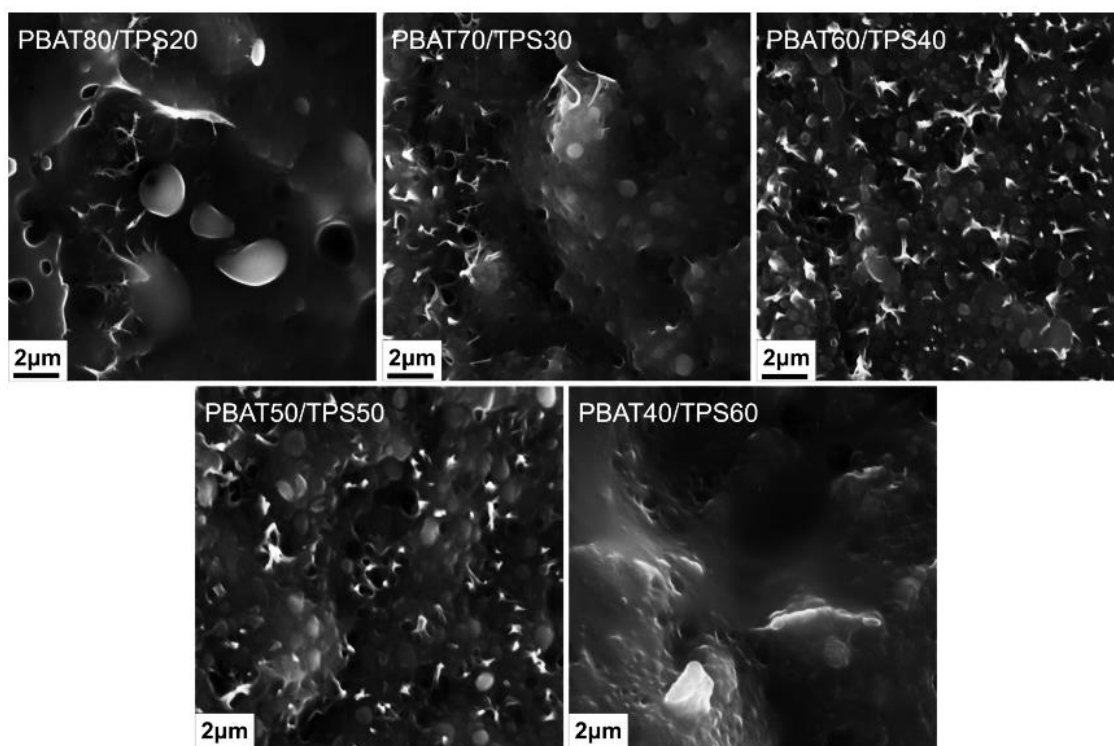


ภาพที่ 2.17 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PBAT/MTPS ที่อัตราส่วนต่างๆ

งานวิจัยของ Dafu Wei และคณะ [22] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ TPS จากแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วนต่างๆ โดยเริ่มจากการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งมันฝรั่งด้วยการผสมแป้งมันฝรั่งปริมาณ 100 กรัม เข้ากับน้ำ และกลีเซอรอลปริมาณ 30 และ 20 กรัมตามลำดับ ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิ 80/100/120/135/155/175/165 °C โดยใช้ความเร็วรอบ 150 rpm จากนั้นจะผสม PBAT เข้ากับ TPS ที่ได้จากแป้งมันฝรั่งที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 และ 40/60 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่อง Blown film extruder ที่อุณหภูมิ 90/110/130/155/170/180/170°C จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาศึกษาสมบัติสมบัติเชิงกล และสัญญาณวิทยา พบว่าเมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ Elongation at break มีค่าลดลง แต่การเติม TPS ที่ปริมาณ 10-30 wt% จะส่งผลให้ Tensile strength มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามหากเติม TPS มากกว่า 30wt% ค่า Tensile strength ก็จะมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.18 ซึ่งผลดังกล่าวจะสอดคล้องกับสัญญาณวิทยา ที่พบว่าอนุภาคของ TPS จะมีขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวได้ดีในวัฏภาคของ PBAT เมื่อเติม TPS ที่ปริมาณ 10-30wt% ดังภาพที่ 2.19

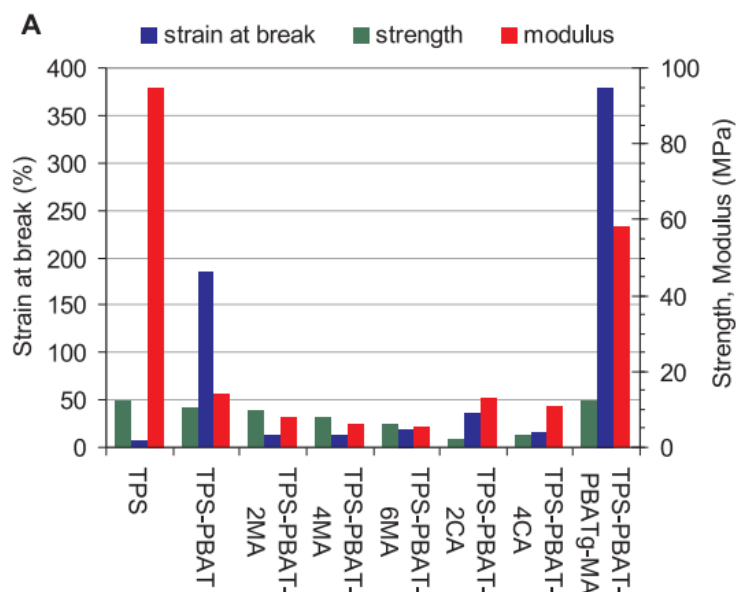


ภาพที่ 2.18 สมบัติเชิงกลของ PBAT/TPS ที่ปริมาณต่างๆ [22]



ภาพที่ 2.19 สัณฐานวิทยาของ PBAT/TPS ที่ปริมาณต่างๆ [22]

จากงานวิจัยของ Yesmine Fourati และคณะ [23] ได้ศึกษาการเตรียมและปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ TPS จากแป้งมันฝรั่งด้วยการเติม Maleic anhydride (MA), Citric acid (CA) และ PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็น Compatibilizer โดยเริ่มจากการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันฝรั่งด้วยการผสมแป้งมันฝรั่งเข้ากับกลีเซอรอล 20wt% ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิ 110/110/120/120/130/130/120 °C โดยใช้ความเร็วรอบ 200 rpm จากนั้นจึงเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPS และ PBAT ที่อัตราส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งเติม Compatibilizer ชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิ 120/130/145/150/150/140/130/120 °C โดยใช้ความเร็วรอบ 120 rpm จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวไปศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าการเติม PBAT-g-MA ปริมาณ 2wt% ลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPS และ PBAT ส่งผลให้ Tensile strength เพิ่มขึ้นจาก 10 MPa ไปเป็น 12 MPa, ส่วนค่า Strain at break เพิ่มขึ้นจาก 185% เป็น 380% และค่า Modulus เพิ่มขึ้นจาก 14 MPa เป็น 58 MPa ดังแสดงในภาพที่ 2.20



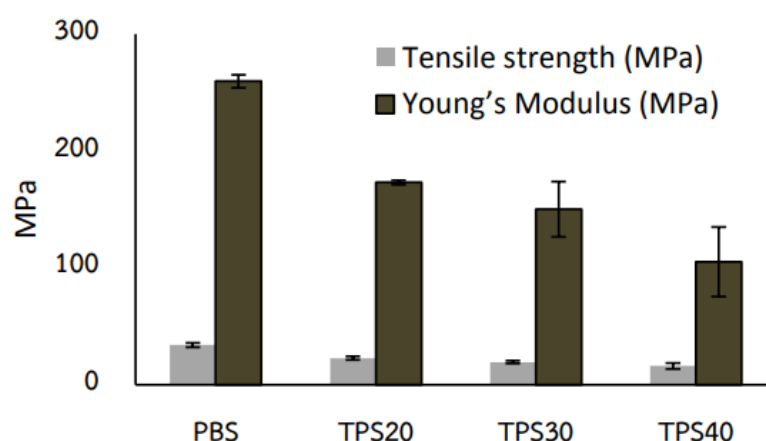
ภาพที่ 2.20 สมบัติเชิงกลของ PBAT/TPS ที่มีการเติม Compatibilizer ชนิดต่างๆ [23]

จากงานวิจัยของ Juliana Olivato และคณะ [24] ได้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPS ที่ได้จากแป้งมันสำปะหลัง และ PBAT พร้อมทั้งมีการเสริมแรงด้วยซีพีโอไลต์ (Sepiolite) จากนั้นนำวัสดุคอมพอสิตดังกล่าวมาศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน พบว่า การเติมซีพีโอไลต์ส่งผลให้ค่า Tensile strength และ Elongation at break ลดลง แต่จะส่งผลให้ค่า Modulus เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.4 และไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิต

ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPS/PBAT และวัสดุคอมพอสิต [24]

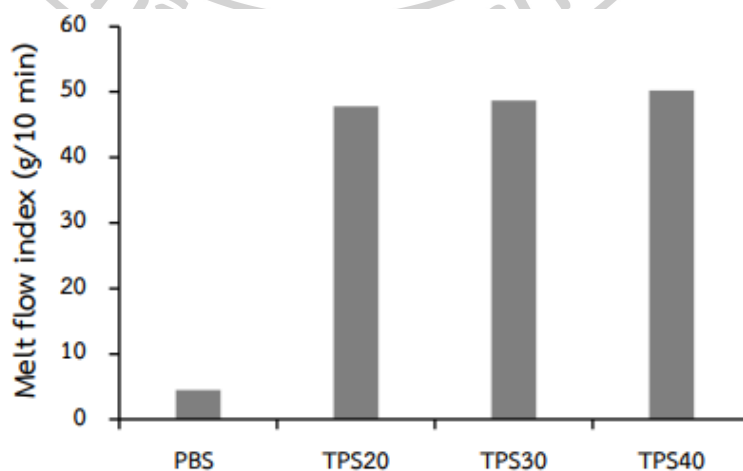
Sample	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)
TPS	2.3 ± 0.4	55.7 ± 20.3	51.7 ± 11.1
TPS/S	3.6 ± 0.6	60.0 ± 15.4	179.2 ± 50.9
PBAT	12.7 ± 0.5	> 600	41.0 ± 1.3
PBAT/S	14.0 ± 1.1	569.7 ± 30.1	57.9 ± 3.6
50/50/0	6.2 ± 0.2 ^a	284.1 ± 16.6 ^a	52.4 ± 1.1 ^d
50/50/1	5.3 ± 0.1 ^a	120.5 ± 17.2 ^b	58.0 ± 2.1 ^c
50/50/3	5.4 ± 0.2 ^a	54.9 ± 17.2 ^c	69.5 ± 2.3 ^b
50/50/5	5.6 ± 0.3 ^a	15.1 ± 1.7 ^d	117.1 ± 5.3 ^a
80/20/0	3.2 ± 0.2 ^b	37.1 ± 2.4 ^a	49.2 ± 0.7 ^c
80/20/1	3.2 ± 0.1 ^b	25.6 ± 1.9 ^a	72.2 ± 4.7 ^{b,c}
80/20/3	3.4 ± 0.2 ^{a,b}	25.4 ± 2.0 ^a	82.3 ± 7.9 ^{a,b}
80/20/5	4.0 ± 0.1 ^a	27.8 ± 5.7 ^a	102.1 ± 4.2 ^a

จากงานวิจัยของ วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน [25] ได้ทำการเตรียมวัสดุกันกระแทกจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และ TPS จากแป้งมันสำปะหลัง โดยผสม PBS เข้ากับ TPS จากแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 100/0, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งมีการเติม Blowing agent และ Talc ปริมาณ 5 และ 0.5 phr จากการศึกษาพอลิเมอร์ผสมที่ยังไม่ได้ขึ้นรูปเป็นโฟมพบว่า ค่า Tensile strength และ Young's Modulus มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.21



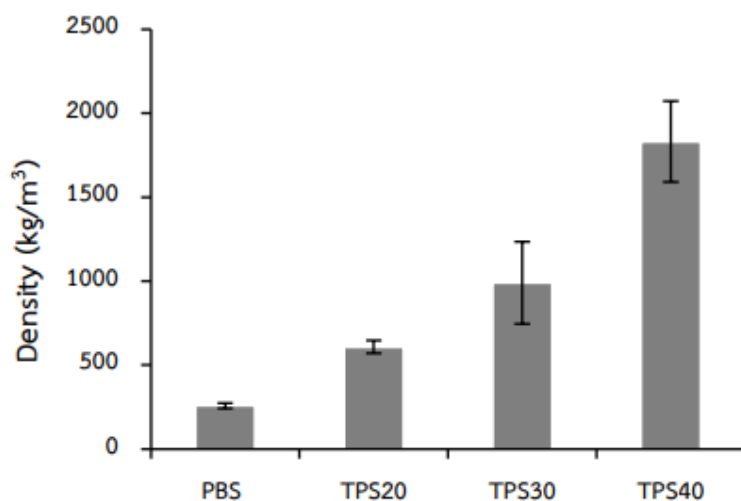
ภาพที่ 2.21 Tensile strength และ Young's Modulus ของพอลิเมอร์ผสม PBS และ TPS [25]

เมื่อทำการหาค่า Melt flow index ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS และ TPS พบว่าเมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า Melt flow index มีแนวโน้มลดลง นั่นแสดงว่าการเติม TPS ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความหนืดลดลง ดังภาพที่ 2.22 ซึ่งการลดลงของความหนืดอาจส่งผลต่อกระบวนการผลิตโฟม ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยความหนืดของพอลิเมอร์เพื่อให้พอลิเมอร์มีการต้านแรงยกของแก๊สต่อผนังเซลล์โฟม ไม่ทำให้แก๊สละลายผ่านพอลิเมอร์ก่อนจะเกิดเป็นโฟม

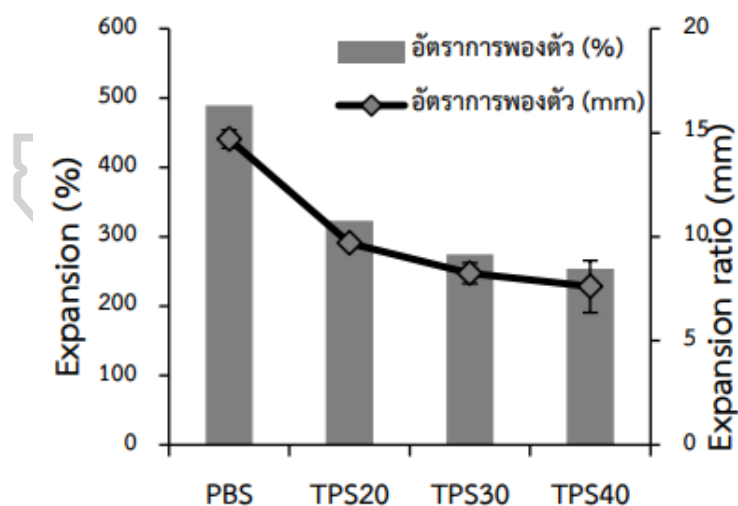


ภาพที่ 2.22 Melt flow index ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS และ TPS [25]

เมื่อขึ้นรูปให้เป็นโฟมแล้วจะนำโฟมที่ได้มาศึกษาความหนาแน่น และ Expansion ratio พบว่าเมื่อ TPS มีปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ได้โฟมที่มีความหนาแน่นมากขึ้นดังภาพที่ 2.23 นั้นแสดงว่าการเพิ่มปริมาณ TPS ทำให้อัตราการขยายตัวของโฟม (Expansion ratio) ลดลง ดังภาพที่ 2.24

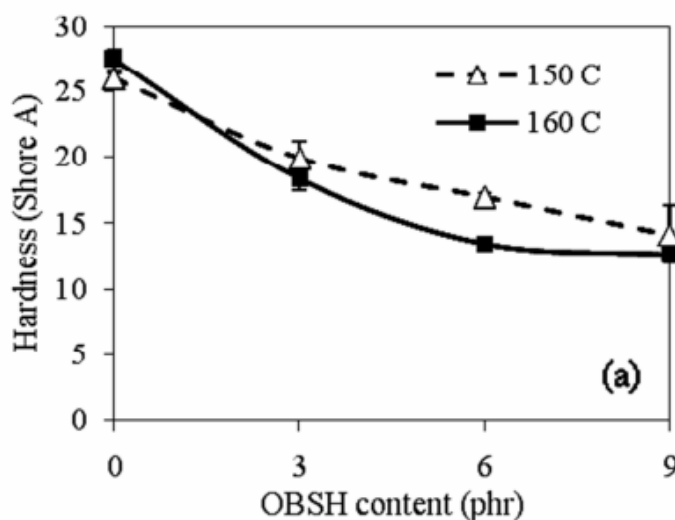


ภาพที่ 2.23 ความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS และ TPS [25]



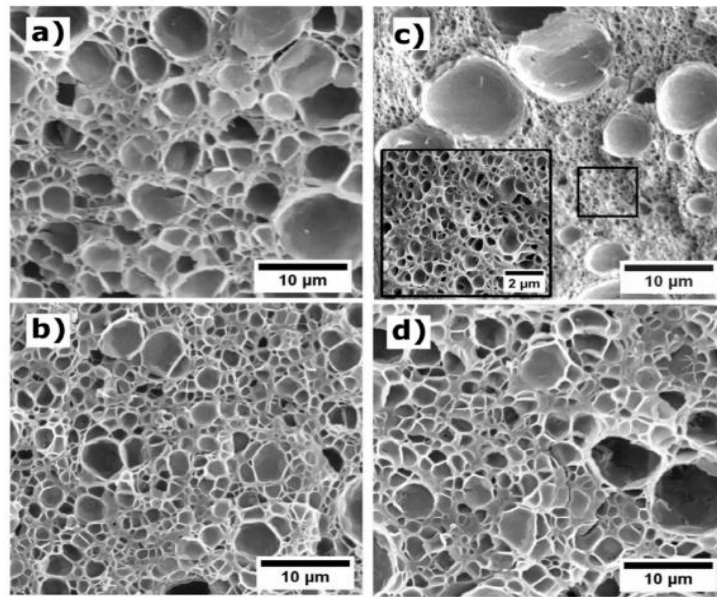
ภาพที่ 2.24 Expansion ratio ของโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS และ TPS [25]

จากงานวิจัยของ Worawan Pechurai และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์จากยางธรรมชาติ เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมสารฟลูออโรที่มีผลต่อความแข็งที่ผิวของโพลีเมอร์ธรรมชาติ จากการทดสอบพบว่า เมื่อปริมาณ OBSH เพิ่มขึ้นความแข็งที่ผิว (Hardness) ของโพลีเมอร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเติม OBSH จะส่งผลให้เกิดฟองแก๊สกระจายตัวอยู่ในวัสดุของยางธรรมชาติมากขึ้น โพลีเมอร์ธรรมชาติจึงมีรูพรุนมากขึ้น ความแข็งที่ผิวจึงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติม OBSH นอกจากนี้ยังพบว่าโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C จะมีความแข็งที่ผิว (Hardness) น้อยกว่าโพลีเมอร์ที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เนื่องจากที่อุณหภูมิ 160 °C จะมีโอกาสเกิดฟองแก๊สมากกว่า โพลีเมอร์ที่ได้จึงมีการขยายออกมากกว่า และมีความแข็งที่ผิวน้อยกว่าโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิ 150 °C ดังแสดงในภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 สมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ธรรมชาติที่มีการเติม OBSH ที่ปริมาณแตกต่างกัน [26]

จากงานวิจัยของ Victoria Bernardo และคณะ [27] ได้ศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์จากพอลิเมทาคริลเลต (PMMA) ที่มีการเติมซีฟิโอล์ดที่ยังไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิว (S-N), ซีฟิโอล์ดที่มีการดัดแปรพื้นผิวด้วย Quaternary ammonium salt (S-QAS) และซีฟิโอล์ดที่มีการดัดแปรพื้นผิวด้วย silane (S-S) พบว่าการเติมซีฟิโอล์ดทั้ง 3 ชนิดจะส่งผลให้เซลล์โพลีเมอร์มีขนาดเล็กดังภาพที่ 2.26

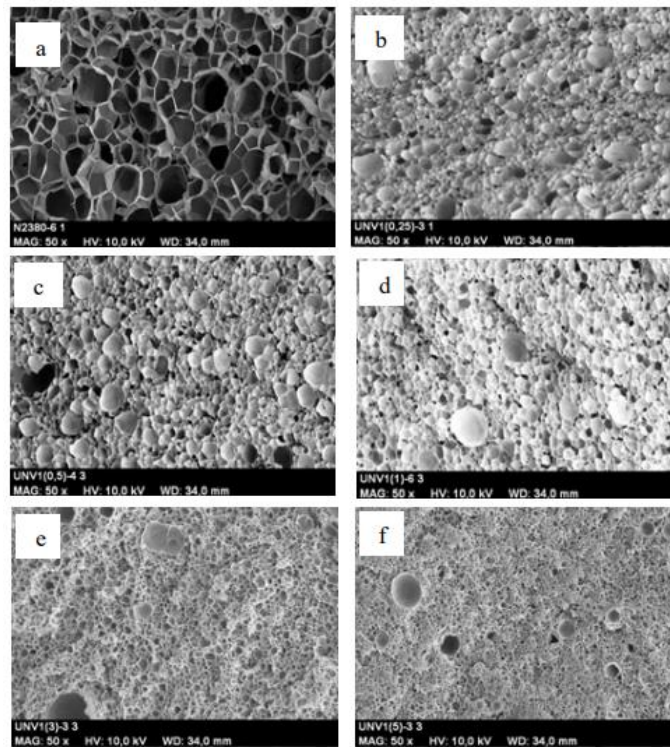


ภาพที่ 2.26 โครงสร้างของเซลล์โฟมที่มีการเติมซีฟิโไลต์ชนิดต่างๆ
a) S-N, b) S-QAS และ c) S-S [27]

จากงานวิจัยของ Antonio Esteban-Cubillo และคณะ [13] ได้ศึกษาอิทธิพลของการเติมซีฟิโไลต์ (Sepiolite) ในกระบวนการเตรียมโฟมจากพอลิสไตรีน (PS) ด้วยกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ (Batch foaming process) พบว่า เมื่อปริมาณซีฟิโไลต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เซลล์โฟมมีขนาดเล็กลง และมีเซลล์โฟมจำนวนมากขึ้น ดัง

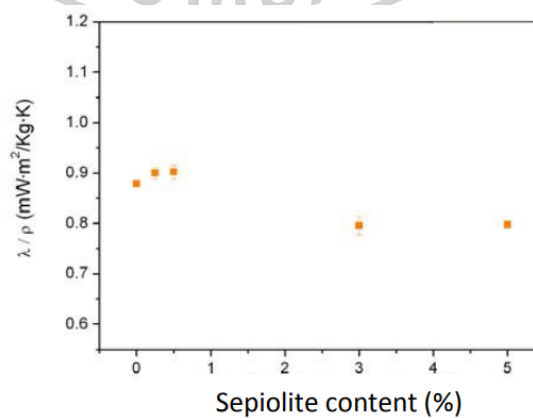
ภาพที่ 2.27





ภาพที่ 2.27 โครงสร้างของเซลล์โฟม PS ที่มีการเติมซีพีโอไลต์ที่ปริมาณต่างๆ a) PS, b) PS+0.25%, c) PS+0.5%, d) PS+1%, e) PS+3%, f) PS+5% [13]

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณซีพีโอไลต์มากขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณซีพีโอไลต์มากขึ้นจะส่งผลให้ฟองอากาศซึ่งมีความสามารถในการนำความร้อนได้ต่ำภายในเนื้อโฟมเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 อิทธิพลของปริมาณซีพีโอไลต์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน [13]

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิบิวทิลีนอะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT)

ผู้ผลิต : บริษัท BASF

เกรด : Ecoflex® F Blend C1200

Melt flow index : 2.7 - 4.9 g/ 10 min

Melting point : 110 - 120 °C

2. แป้งมันสำปะหลัง ตราปลามังกร

3. 2,5-Bis(tert-butylperoxy)-2,5-dimethylhexane (Luperox® 101) จากบริษัท อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด ใช้สำหรับเป็นสารเชื่อมขวางใน PBAT

4. 4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide (OBSH) ที่มีชื่อทางการค้าว่า Supercell-EW จากบริษัท อินโนเวชั่น เทคโนโลยี จำกัด ทำหน้าที่เป็นสารฟู (Blowing agent)

5. ซีพิโอไลต์ (Sepiolite) จากบริษัท SIGMA-ALDRICH ทำหน้าที่เป็น Foam nucleating agent

6. กลีเซอรอล จากบริษัท Ajax Finechem PTY Ltd ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์สำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS)

7. น้ำรีเวอร์สออสโมสิส (RO) ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์สำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS)

8. อะซิโตน ใช้เป็นตัวทำละลายมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และ Luperox® 101

9. เมทานอล (Methanol, CH₃OH) ใช้เป็น non-solvent สำหรับการตกตะกอนของพอลิบิวทิลีนอะดิเปต-โค-เทเรพทาเลตที่ถูกดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBAT-g-MA)

10. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane, CH₂Cl₂) ใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับพอลิบิวทิลีนอะดิเปต-โค-เทเรพทาเลตที่ถูกดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBAT-g-MA) เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR)

11. มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) จากบริษัท SIGMA-ALDRICH ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างของ PBAT และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. ตู้อบ (Hot air oven) ของบริษัท BINDER
2. เครื่อง Twin screw extrusion รุ่น SHJ-25 ของบริษัท Yongteng ประเทศจีน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู 25 มิลลิเมตร ยาว 360 เซนติเมตร และมีค่า L/D เป็น 14.4
3. เครื่อง Compression molding machine ของบริษัท Labtech Engineering Co., Ltd. (Scientific)
4. เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) รุ่น TM3030 ของ HITACHI, Japan
5. เครื่อง Two-roll mill machine ของบริษัท Labtech Engineering Co., Ltd. (Scientific)
6. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ยี่ห้อ Mettler-Toledo รุ่น DSC1
7. เครื่อง Thermal gravimetric analyser (TGA) ยี่ห้อ Mettler-Toledo รุ่น TGA1
8. เครื่อง Universal testing machine ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 5900 series
9. เครื่อง Hardness tester จากบริษัท Pacific Transducer Corp.
10. เครื่อง Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer (NMR) ของบริษัท Bruker Corporation
11. เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น XRD-6100

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่ไม่มีและมีการเติมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

ตอนที่ 2 การเตรียมและสมบัติของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS)

ตอนที่ 3 ศึกษาอิทธิพลของการเติม Sepiolite ที่มีผลต่อสมบัติของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS)

ตอนที่ 1 : การเตรียมและสมบัติพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่ไม่มีและมีการเติมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้

3.2.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) จากแป้งมันสำปะหลัง

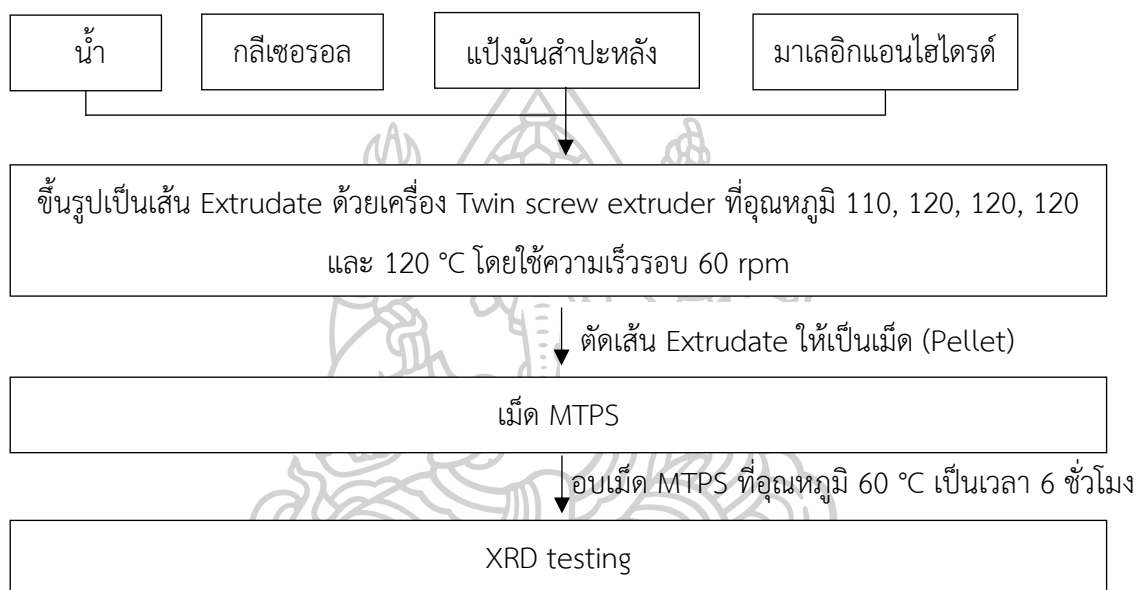
เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) โดยเริ่มจากการแบ่งแป้งมันสำปะหลังปริมาณ 1,000 กรัมไว้ในกะละมังอะลูมิเนียม จากนั้นบดมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ปริมาณ 10 กรัม (1 phr ของแป้งมันสำปะหลัง) ให้เป็นผงด้วยโกร่งบดสารผสมมาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้ากับพลาสติกไซเซออร์ 2 ชนิดได้แก่ น้ำ และกลีเซอรอลอย่างละ 300 กรัม (30 phr ของแป้งมันสำปะหลัง) จากนั้นผสมให้เข้ากันในบีกเกอร์ แล้วจึงเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ผสมเข้ากันดีกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์แล้วลงในแป้งมันสำปะหลังที่ละเอียด พร้อมทั้งคลุกเคล้าให้ส่วนผสมเข้ากันด้วยมือ และบ่มของผสมดังกล่าวไว้ในถุงซิปล็อคเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้วจะนำไปขึ้นรูปให้เป็นเส้น Extrudate ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิ 90, 100, 110, 120, 120, 120, 120 และ 110 °C ตามลำดับ โดยใช้ความเร็วรอบ 60 rpm จากนั้นนำเส้น Extrudate ที่ได้ไปตัดให้เป็นเม็ด (Pellet) แล้วนำเม็ด MTPS ที่ได้ไปอบด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งาน

3.2.2 การทดสอบด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD)

ทดสอบเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) เพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกใน MTPS เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง โดยเริ่มจากการเตรียมแผ่นซีทจาก MTPS ด้วยกระบวนการ Compression molding ที่อุณหภูมิ 160 °C และความดัน 1,500 psi เป็นเวลา 3 นาที โดยจะมีการให้ความร้อนก่อน (Preheat) เป็นเวลา 30 วินาที มีการระบายแก๊สออก (Venting) เป็นเวลา 1 นาที และทำให้แผ่นซีทที่ได้เย็นลง (Cooling) เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำแผ่นซีทที่ได้ไปติดกับกระจกสไลด์เพื่อนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV และใช้กระแสไฟฟ้า 20 mA ซึ่งจะเลือกโหมดการสแกนให้ทั้งตัวอย่างและเครื่องตรวจจับมุม (2Theta/Theta) ด้วยความเร็ว 5°/min และมีช่วงมุมการสแกน 3° - 35° จากนั้นจะนำข้อมูลดิบที่ได้จากเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) มาสร้างกราฟด้วยโปรแกรม OriginPro 8.5 และคำนวณร้อยละความเป็นผลึกของ MTPS และแป้งมันสำปะหลังดังสมการ

$$\text{Crystallinity (\%)} = \frac{\text{Area of crystalline peaks}}{\text{Area of all peaks}} \times 100$$

โดยที่	Crystallinity	คือ ร้อยละความเป็นผลึก
	Area of crystalline peaks	คือ พื้นที่ใต้พีคส่วนที่เป็นผลึก
	Area of all peaks	คือ พื้นที่ใต้พีคทั้งหมด



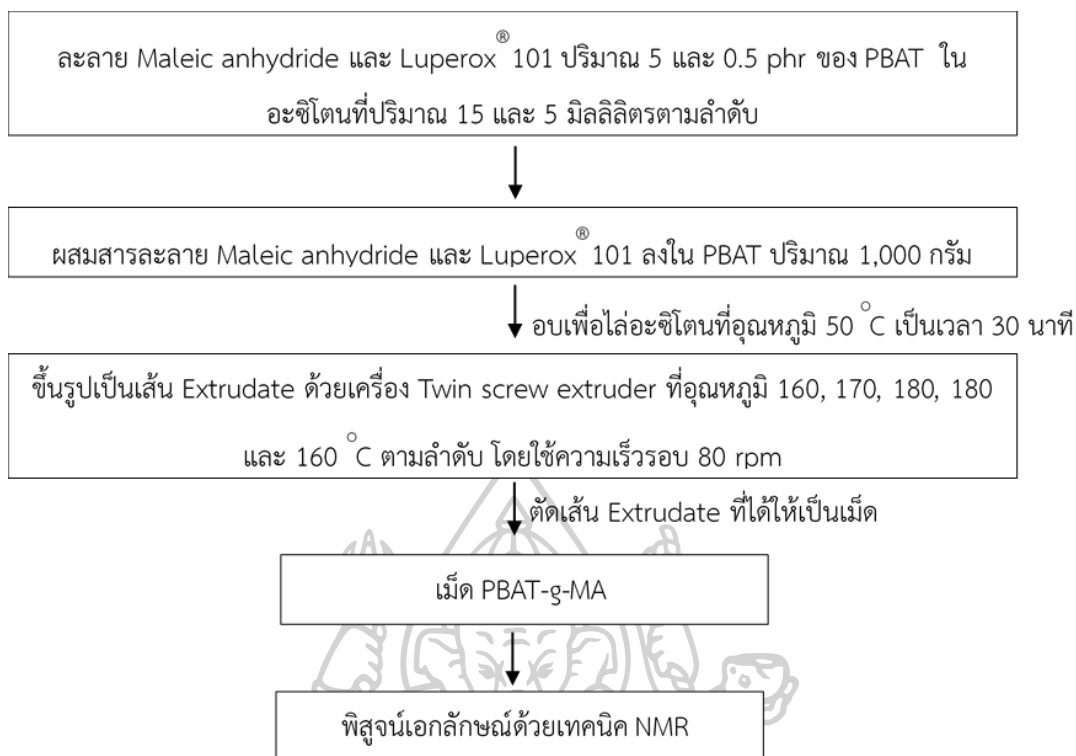
ภาพที่ 3.1 แผนภูมิการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรรูปโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS)

3.2.3 การเตรียมพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลตที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBAT-g-MA) [28, 29]

ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลตที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBAT-g-MA) เพื่อทำหน้าที่เป็น Compatibilizer ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS โดยนำมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr และ Luperox®101 ปริมาณ 0.5 phr มาละลายในอะซิโตนที่ปริมาณ 15 และ 5 มิลลิลิตรตามลำดับ จากนั้นจึงนำของผสมดังกล่าวมาผสมเข้ากับ PBAT ปริมาณ 1,000 กรัม แล้วจึงนำของผสมที่ได้ไปอบเพื่อไล่อะซิโตนออกที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงนำของผสมที่อบแล้วไปขึ้นรูปเป็นเส้น Extrudate ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิตั้งแต่ Hopper ถึงหัว Die คือ 130, 140, 150, 160, 170, 170, 170 และ 160°C ตามลำดับ โดยใช้ความเร็วรอบ 60 rpm หลังจากนั้นจะนำเส้น Extrudate ที่ได้ไปตัดให้เป็นเม็ด แล้วนำเม็ด PBAT-g-MA ที่ได้ไปอบด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งาน

3.2.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ PBAT-g-MA ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR) [28, 29]

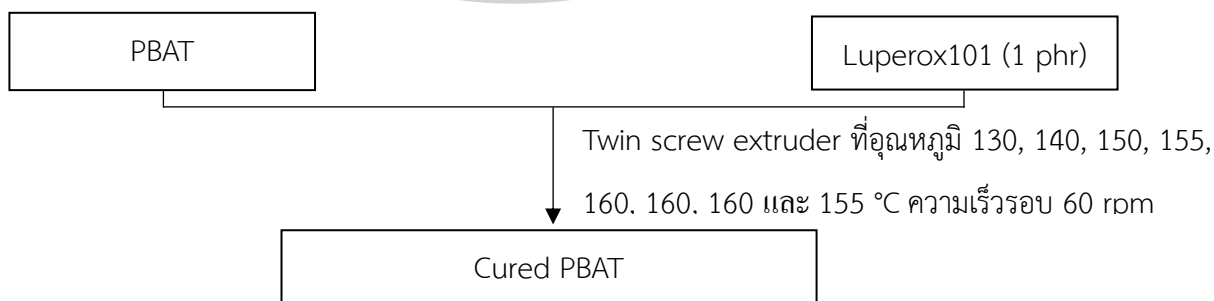
พิสูจน์เอกลักษณ์โดยนำ PBAT-g-MA ที่เตรียมได้ มาละลายใน Dichloromethane หลังจากนั้นนำไปกรอง เพื่อแยก PBAT ที่เกิดการเชื่อมขวางและ MA ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกไป จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาตกตะกอนใน Methanol เพื่อให้ได้ตะกอนของ PBAT-g-MA แล้วทำการกรองตะกอนด้วยกรวยกรองสุญญากาศ (Buchner funnel) หลังจากนั้นจึงนำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อระเหย Dichloromethane และ Methanol ที่ตกค้างอยู่ออกไป จะได้ PBAT-g-MA ที่บริสุทธิ์ออกมา เพื่อนำไปใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR) โดยใช้ความถี่ 300 MHz จากนั้นจะทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำ PBAT-g-MA บริสุทธิ์ปริมาณ 3 มิลลิกรัม ละลายใน Deuterated chloroform 1 มิลลิลิตร แล้วบรรจุใน NMR tube จากนั้นนำไปทดสอบและวิเคราะห์ผลเทียบกับ PBAT



ภาพที่ 3.2 แผนภูมิการเตรียม PBAT-g-MA

3.2.5 เตรียมพอลิบิวทีลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเรต (PBAT) ที่ถูกเชื่อมขวางด้วย Luperox101 (Cured PBAT)

เตรียม Cure PBAT โดยเริ่มจากการผสม PBAT เข้ากับ Luperox101 ปริมาณ 1 phr ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิ 130, 140, 150, 155, 160, 160, 160 และ 155 °C โดยใช้ความเร็วรอบ 60 rpm หลังจากนั้นจะนำเส้น Extrudate ที่ได้ไปตัดให้เป็นเม็ด (Pellet) แล้วนำเม็ด Cure PBAT ที่ได้ไปอบด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งาน



ภาพที่ 3.3 แผนภูมิการเตรียม Cured PBAT

3.2.6 การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่ไม่มีและมีการเติมพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลตที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBAT-g-MA)

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่ไม่มีและมีการเติมพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลตที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBAT-g-MA) โดยเริ่มผสม Cured PBAT เข้ากับ MTPS ที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 0/100 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งเติม PBAT-g-MA ที่ปริมาณ 0 และ 10% โดยน้ำหนักของ Cured PBAT ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิ 120, 140, 150, 150, 155, 155, 160 และ 150 °C โดยใช้ความเร็วรอบ 60 rpm จากนั้นนำเส้น Extrudate ที่ได้ไปตัดให้เป็นเม็ด (Pellet) การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS จะใช้อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.2.7 ขึ้นรูปแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding)

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 160 °C และความดัน 1,500 psi เป็นเวลา 3 นาที โดยจะมีการให้ความร้อนก่อน (Preheat) เป็นเวลา 30 วินาที มีการระบายแก๊สออก (Venting) เป็นเวลา 1 นาที และทำให้แผ่นซีทที่ได้เย็นลง (Cooling) เป็นเวลา 1 นาที

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการผสม PBAT และ MTPS ที่มีและไม่มีกรเติม PBAT-g-MA

อัตราส่วน PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (%wt)	ปริมาณ PBAT (g)	ปริมาณ MTPS (g)	ปริมาณ PBAT-g-MA (g)
100/0	100	0	0
90/10	90	10	
80/20	80	20	
70/30	70	30	
90/10/10	81	10	9
80/20/10	72	20	8
70/30/10	63	30	7
0/100	0	100	0

3.2.8 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

เตรียมชิ้นงานสำหรับศึกษาสัณฐานวิทยาโดยนำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปให้เป็นแผ่นซีทด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อนมาแช่ในไนโตรเจนเหลวเพื่อให้แผ่นซีทแข็งตัวเป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงหักชิ้นงานแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม จากนั้นเคลือบพื้นผิวบริเวณที่แตกหักของชิ้นงานโดยใช้เทคนิค Sputtering ด้วยทองคำเพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานนำไฟฟ้าได้ แล้วจึงนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.2.9 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้านการดึงยึดของวัสดุ (Tensile testing)

เตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติการดึงยึดโดยตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง 1 นิ้ว ยาว 4 นิ้ว โดยแบ่งออกเป็นความยาวเกจ (Gauge length) 2 นิ้ว และพื้นที่สำหรับหนีบชิ้นงานข้างละ 1 นิ้ว ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D882 จากนั้นนำชิ้นงานเก็บไว้ในภาชนะปิดที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 50%RH เป็นเวลา 48 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ด้วยอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 5 mm/min และใช้ load cell ขนาด 50 kN และทำการวิเคราะห์ค่า Young's modulus, Maximum tensile strength และ Elongation at break

3.2.10 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry

เตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยการตัดแผ่นซีทให้มีน้ำหนักประมาณ 5-10 มิลลิกรัม จากนั้นนำชิ้นงานบรรจุใน Aluminium sample pan แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter ที่อุณหภูมิในช่วง $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยโหมดการทดสอบแบบ Heat-Cool-Heat ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ซึ่งการทดสอบมี 7 ขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 : Hold ที่อุณหภูมิ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 นาที
- ขั้นตอนที่ 2 : ให้ความร้อน (Heat) จากอุณหภูมิ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึง $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- ขั้นตอนที่ 3 : Hold ที่อุณหภูมิ $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 นาที
- ขั้นตอนที่ 4 : ลดอุณหภูมิ (Cool) จากอุณหภูมิ $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึง $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- ขั้นตอนที่ 5 : Hold ที่อุณหภูมิ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 นาที
- ขั้นตอนที่ 6 : ให้ความร้อน (Heat) จากอุณหภูมิ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึง $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- ขั้นตอนที่ 7 : Hold ที่อุณหภูมิ $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 นาที

จากนั้นวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมจากลักษณะของกราฟที่ได้เพื่อหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melt crystallization temperature, T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c) และปริมาณผลึกของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมดังสมการ

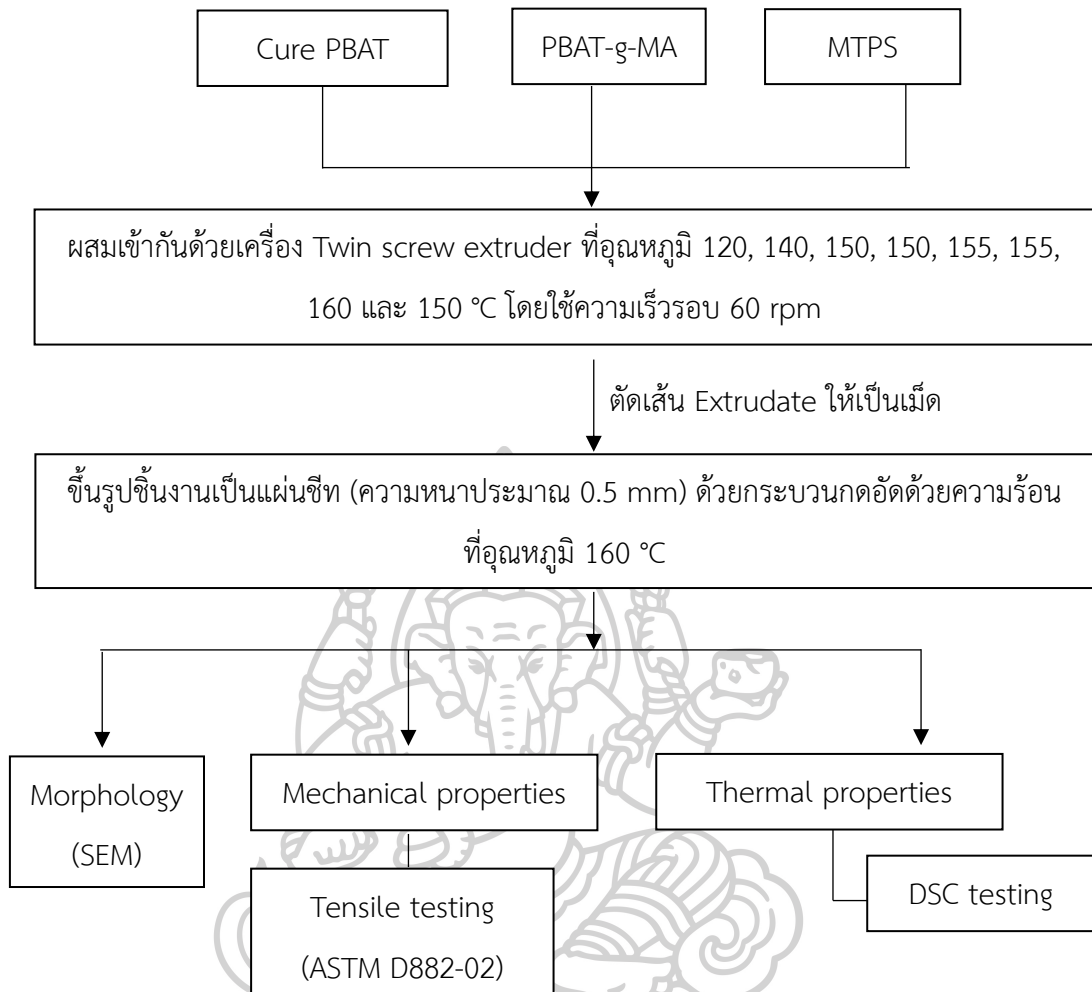
$$\%X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_f} \times \frac{100}{W}$$

โดย $\%X_c$ คือ ปริมาณผลึก (%)

ΔH_m คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก (J/g)

ΔH_f คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก (J/g) สำหรับพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 114 J/g สำหรับ PBAT

W คือ สัดส่วนของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมทั้งหมด



ภาพที่ 3.4 แผนภูมิการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS

ตอนที่ 2 : การเตรียมและสมบัติของโพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่มีการเติมสารสภาพความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

3.2.11 การเตรียมโพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่มีการเติมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

เตรียมโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่มีการเติม PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ (Compatibilizer) โดยเริ่มจากการผสม Cured PBAT เข้ากับ MTPS ในอัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งเติม PBAT-g-MA ปริมาณ 10% โดยน้ำหนักของ Cured PBAT ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิ 120, 140, 150, 150, 155, 155, 160 และ 150°C โดยใช้ความเร็วรอบ 60 rpm

จากนั้นนำโพลีเมอร์ผสมที่ได้มาผสมเข้ากับ 4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide (OBSH) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารฟู (Blowing agent) ในปริมาณ 10, 15 และ 20 phr ของปริมาณโพลีเมอร์ผสมด้วยเครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill mixer) โดยเริ่มจากการหลอมโพลีเมอร์ผสมที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิของลูกกลิ้งทั้งสองลงไปที่ 120 °C เพื่อผสม OBSH เข้ากับโพลีเมอร์ผสมที่หลอมเหลวแล้วเป็นเวลา 3 นาที เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ OBSH เกิดการสลายตัวเป็นแก๊สไนโตรเจนและน้ำในระหว่างการหลอมผสม

ในขั้นตอนสุดท้ายจะนำโพลีเมอร์ผสมที่ผ่านการเติม OBSH ที่ปริมาณต่างๆ ไปขึ้นรูปให้เป็นแผ่นโพลีเมอร์ ด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 160 °C และความดัน 1,500 psi เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ OBSH เกิดการสลายตัวเป็นแก๊สไนโตรเจนและน้ำในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปแผ่นโพลีเมอร์ จากนั้นจะทำให้แผ่นโพลีเมอร์ที่ได้นั้นเย็นตัวลง (Cooling) โดยปราศจากการกดอัดเป็นเวลา 3 นาที

ศึกษาสมบัติของโพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ดังนี้

- ศึกษาลักษณะพื้นฐานทางวิทยา และขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) รุ่น TM3030 ของ HITACHI, Japan
- หาค่าความหนาแน่นของโพลีเมอร์ (Density) ด้วยชุดตรวจวัดความหนาแน่น (Density measurement kit)

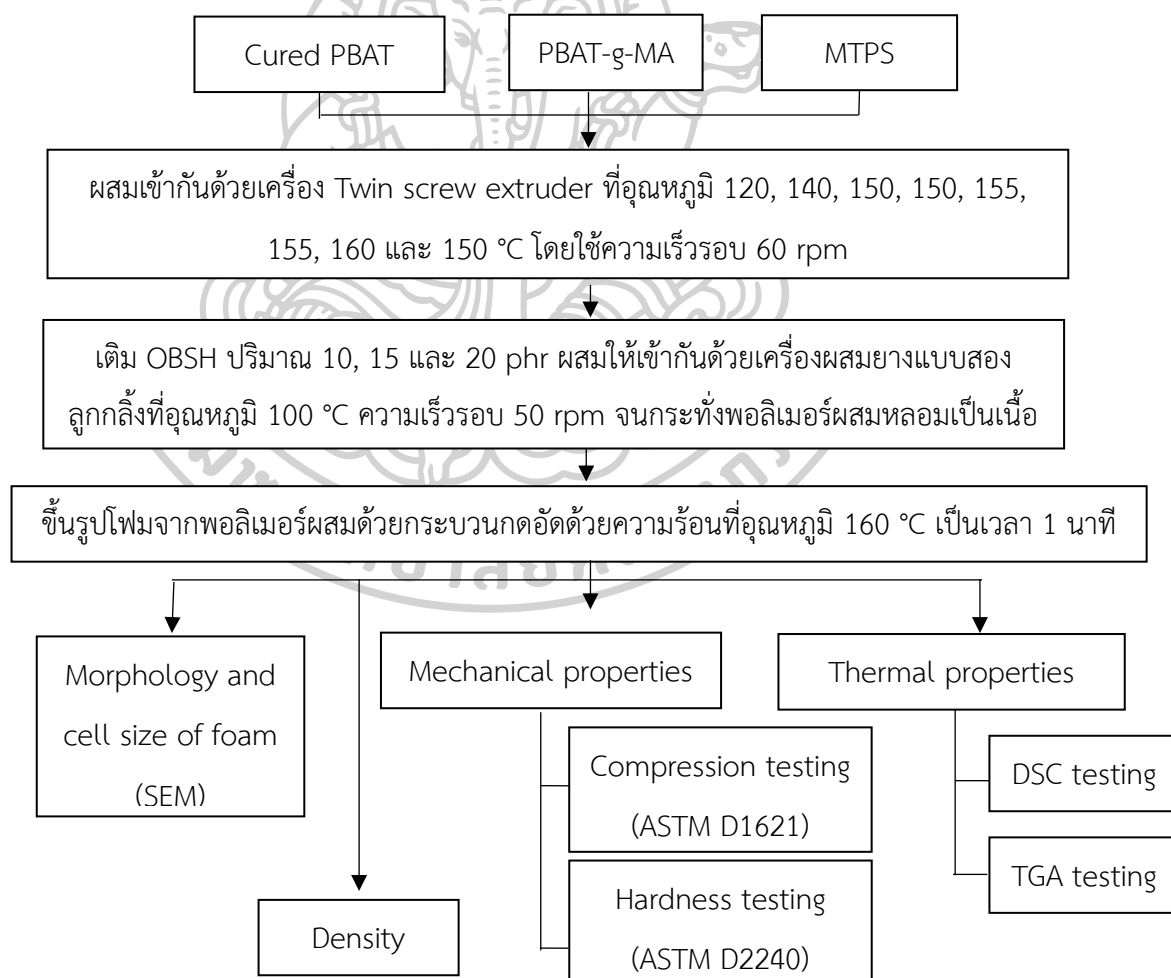
- ศึกษาความสามารถในการกดอัดของโฟมด้วยเครื่อง Universal testing machine ยี่ห้อ INSTRON ตามมาตรฐาน ASTM D1621

- หาค่าความแข็งที่ผิวของโฟมด้วยเครื่อง Hardness tester ตามมาตรฐาน ASTM D2240

- ศึกษาสมบัติทางความร้อนของโฟมที่ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ยี่ห้อ Mettler-Toledo รุ่น DSC1

- ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโฟมด้วยเครื่อง Thermal gravimetric analyser (TGA) ยี่ห้อ Mettler-Toledo รุ่น TGA1

จากการศึกษาในตอนต้นที่ 2 จะเลือกโฟมจากพอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติที่ดี โดยพิจารณาจากความสม่ำเสมอของขนาดเซลล์โฟม ความหนาแน่น และความสามารถในการกดอัดโฟมเพื่อนำไปใช้ในการเตรียมโฟมในตอนต้นที่ 3 ต่อไป



ภาพที่ 3.5 แผนภูมิการเตรียมและศึกษาสมบัติของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS

ตอนที่ 3 : ศึกษาอิทธิพลของการเติม Sepiolite ที่มีผลต่อสมบัติของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS)

3.2.12 การเตรียมโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่มีการเติม Sepiolite เพื่อทำหน้าที่เป็น Foam nucleating agent

เตรียมโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่มีการเติม Sepiolite เพื่อทำหน้าที่เป็น Foam nucleating agent โดยเริ่มจากการผสม Cured PBAT เข้ากับ MTPS ในอัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งเติม PBAT-g-MA ปริมาณ 10% โดยน้ำหนักของ PBAT ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่ อุณหภูมิ 120, 140, 150, 150, 155, 155, 160 และ 150°C โดยใช้ความเร็วรอบ 60 rpm

จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาผสมเข้ากับ 4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide (OBSH) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารฟู (Blowing agent) ในปริมาณ 15 phr ของปริมาณพอลิเมอร์ผสม ด้วยเครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill mixer) โดยเริ่มจากการหลอมพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นเติม Sepiolite ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr และผสมต่ออีก 4 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิของลูกกลิ้งทั้งสองลงไปที่ 120 °C เพื่อผสม OBSH เข้ากับพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite เป็นเวลา 3 นาที เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้อBSH เกิดการสลายตัวเป็นแก๊สไนโตรเจนและน้ำในระหว่างการหลอมผสม

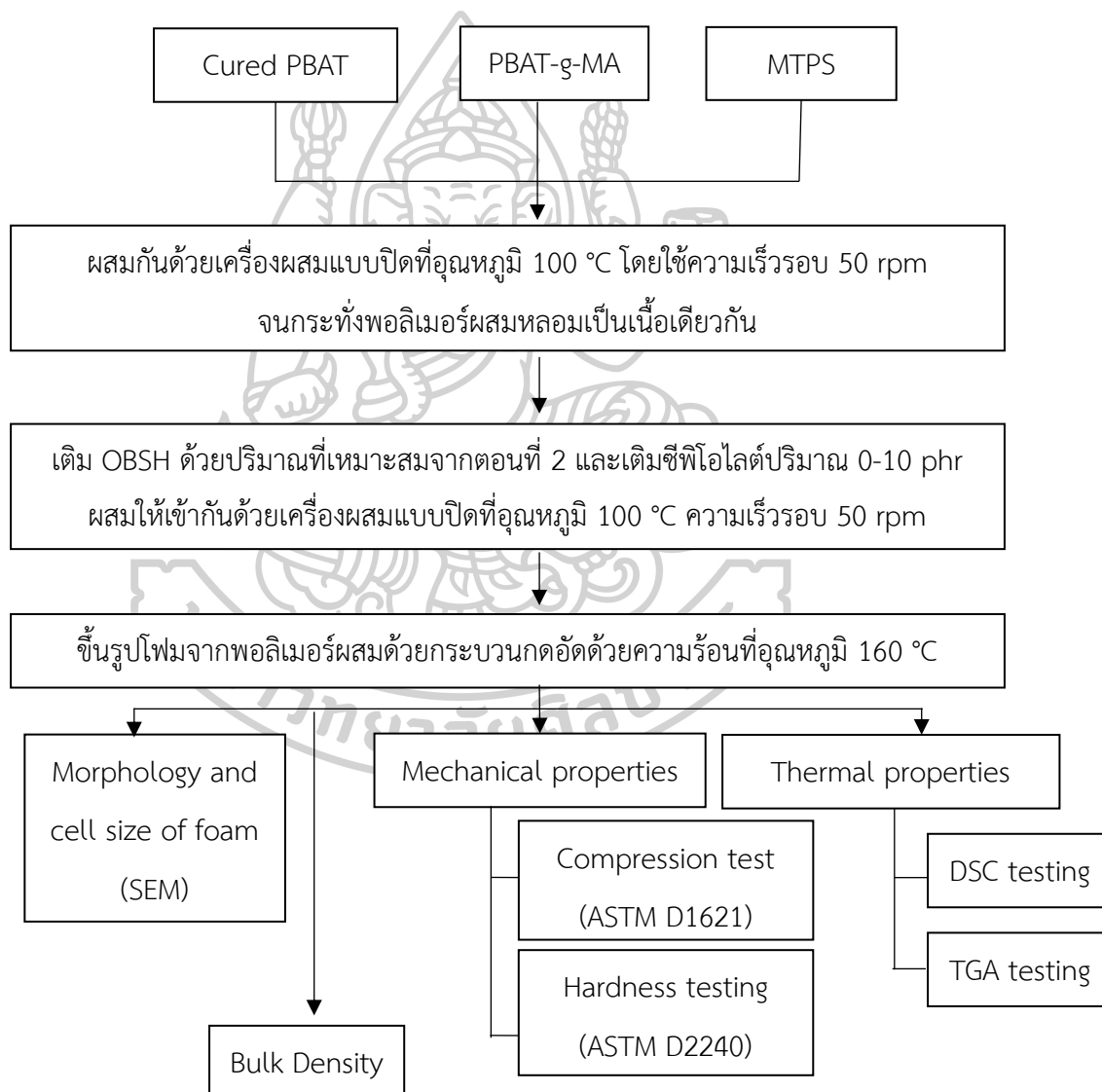
ในขั้นตอนสุดท้ายจะนำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการเติม OBSH ที่ปริมาณต่างๆ ไปขึ้นรูปให้เป็นแผ่นโฟม ด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 160 °C และความดัน 1,500 psi เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ OBSH เกิดการสลายตัวเป็นแก๊สไนโตรเจนและน้ำในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปแผ่นโฟม จากนั้นจะทำให้แผ่นโฟมที่ได้เย็นตัวลง (Cooling) โดยปราศจากการกดอัดเป็นเวลา 3 นาที

ศึกษาสมบัติของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) ที่ได้จากแป้งมันสำปะหลัง ที่มีการเติม Sepiolite ดังนี้

- ศึกษาลักษณะพื้นฐานทางวิทยา และขนาดของเซลล์โฟมด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) รุ่น TM3030 ของ HITACHI, Japan

- หาค่าความหนาแน่นของโฟม (Density) ด้วยชุดตรวจวัดความหนาแน่น (Density measurement kit)

- ศึกษาความสามารถในการกดอัดของโฟมด้วยเครื่อง Universal testing machine ยี่ห้อ INSTRON ตามมาตรฐาน ASTM D1621
- หาค่าความแข็งที่ผิวของโฟมด้วยเครื่อง Hardness tester ตามมาตรฐาน ASTM D2240
- ศึกษาสมบัติทางความร้อนของโฟมที่ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ยี่ห้อ Mettler-Toledo รุ่น DSC1
- ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโฟมด้วยเครื่อง Thermal gravimetric analyser (TGA) ยี่ห้อ Mettler-Toledo รุ่น TGA1



ภาพที่ 3.6 แผนภูมิการเตรียมและศึกษาสมบัติของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติม Sepiolite

3.3 การศึกษาสมบัติของโพลีเมอร์ผสม

3.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

เตรียมชิ้นงานสำหรับศึกษาสัณฐานวิทยาโดยตัดแผ่นโพลีเมอร์ผสมด้วยมีดปากกาให้มีพื้นผิวภายในเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1 cm x 0.5 cm จากนั้นเคลือบพื้นผิวภายในของชิ้นงานโดยใช้เทคนิค Sputtering ด้วยทองคำเพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานนำไฟฟ้าได้ แล้วจึงนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า และนำภาพถ่ายที่ได้มาวิเคราะห์หาขนาดเซลล์โพลีเมอร์ด้วยโปรแกรม Image J

3.3.2 การศึกษาความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสม

เตรียมชิ้นงานสำหรับการหาความหนาแน่นโดยการตัดโพลีเมอร์ผสมให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1 cm x 1 cm x 1 cm จำนวนสุทธละ 3 ชิ้น จากนั้นเก็บชิ้นงานไว้ในภาชนะปิดที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 50%RH เป็นเวลา 48 ชั่วโมงก่อนนำไปหาความหนาแน่นด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำด้วยชุดตรวจวัดความหนาแน่น (Density measurement kit) และหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่น

3.3.3 การศึกษาความสามารถในการกดอัดของโพลีเมอร์ผสม

เตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบโดยการตัดโพลีเมอร์ผสมให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 cm x 2 cm x 1 cm จากนั้นเก็บชิ้นงานไว้ในภาชนะปิดที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 50%RH เป็นเวลา 48 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ในโหมดการกดอัด (Compression test) โดยใช้ Load cell ขนาด 50 kN และทำการทดสอบความสามารถในการกดอัดโพลีเมอร์ผสมตามมาตรฐาน ASTM D1621 ด้วยอัตราเร็วในการกดอัดเท่ากับ 1.3 mm/min และหยุดทดสอบเมื่อมีการกดชิ้นงานลงไป 50% ของความสูงเริ่มต้นของชิ้นงาน และทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานของการกดอัด (Compressive strength) และมอดูลัสกดอัด (Compressive modulus)

3.3.4 การศึกษาความแข็งของโพลีเมอร์ผสม

เตรียมชิ้นงานสำหรับศึกษาความแข็ง (Hardness) ของโพลีเมอร์ผสมโดยเก็บชิ้นงานที่จะทดสอบไว้ในภาชนะปิดที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 50%RH เป็นเวลา 48 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Durometer (Shore A) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยจะวัดความแข็งของโพลีเมอร์ผสมที่ตำแหน่งต่างๆ กัน 5 จุดและหาค่าเฉลี่ย

3.3.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีเอสเตอร์ผสม

เตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยการตัดแผ่นโพลีเอสเตอร์ผสมให้มีน้ำหนักประมาณ 5-10 มิลลิกรัม จากนั้นนำชิ้นงานบรรจุใน Aluminium sample pan แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter ที่อุณหภูมิในช่วง $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยโหมดการทดสอบแบบ Heat-Cool-Heat ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนไนโตรเจน ซึ่งการทดสอบมี 7 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : Hold ที่อุณหภูมิ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 นาที

ขั้นตอนที่ 2 : ให้ความร้อน (Heat) จากอุณหภูมิ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึง $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

ขั้นตอนที่ 3 : Hold ที่อุณหภูมิ $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 นาที

ขั้นตอนที่ 4 : ลดอุณหภูมิ (Cool) จากอุณหภูมิ $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึง $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

ขั้นตอนที่ 5 : Hold ที่อุณหภูมิ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 นาที

ขั้นตอนที่ 6 : ให้ความร้อน (Heat) จากอุณหภูมิ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึง $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

ขั้นตอนที่ 7 : Hold ที่อุณหภูมิ $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 นาที

จากนั้นวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของแผ่นซีทโพลีเอสเตอร์ผสมจากลักษณะของกราฟที่ได้เพื่อหาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melt crystallization temperature, T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c) และปริมาณผลึกของแผ่นซีทโพลีเอสเตอร์ผสมดังสมการ

$$\%X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_f} \times \frac{100}{W}$$

โดย $\%X_c$ คือ ปริมาณผลึก (%)

ΔH_m คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก (J/g)

ΔH_f คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวผลึก (J/g) สำหรับโพลีเอสเตอร์ที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 114 J/g สำหรับ PBAT

W คือ สัดส่วนของ PBAT ในโพลีเอสเตอร์ผสมทั้งหมด

3.3.6 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสม

เตรียมชิ้นงานโพลีเมอร์ผสมสำหรับการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนโดยการตัดชิ้นงานให้มีน้ำหนักประมาณ 5 – 10 มิลลิกรัม และมีขนาดเล็กพอที่จะบรรจุลงในถ้วยเซรามิก (Crucible) ได้โดยที่ความสูงของตัวอย่างไม่เกินครึ่งหนึ่งของความสูงของถ้วยเซรามิก จากนั้นนำไปไปทดสอบด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) ที่อุณหภูมิในช่วง 30 °C ถึง 800 °C ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ซึ่งการทดสอบมี 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : Hold ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 1 นาที

ขั้นตอนที่ 2 : ให้ความร้อน (Heat) จากอุณหภูมิ 30 °C จนถึง 800 °C ด้วยอัตรา 10 °C/min

ขั้นตอนที่ 3 : Hold ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1 นาที

จากนั้นวิเคราะห์ลักษณะของกราฟที่ได้จากการทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัว



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ที่มีการเติม PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ โดยในขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นแผ่นโพลีเมอร์จะมีการเติม 4, 4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide (OBSH) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารฟู (Blowing agent) ปริมาณ 10, 15 และ 20 phr จากนั้นจะเลือกแผ่นโพลีเมอร์ที่มีขนาดของเซลล์โพลีเมอร์สม่ำเสมอ มีสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงร้อนที่ดีมาเติมซีพิโอไลต์ (Sepiolite) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยก่อฟองอากาศ (Nucleating agent) ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr โดยการดำเนินงานของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

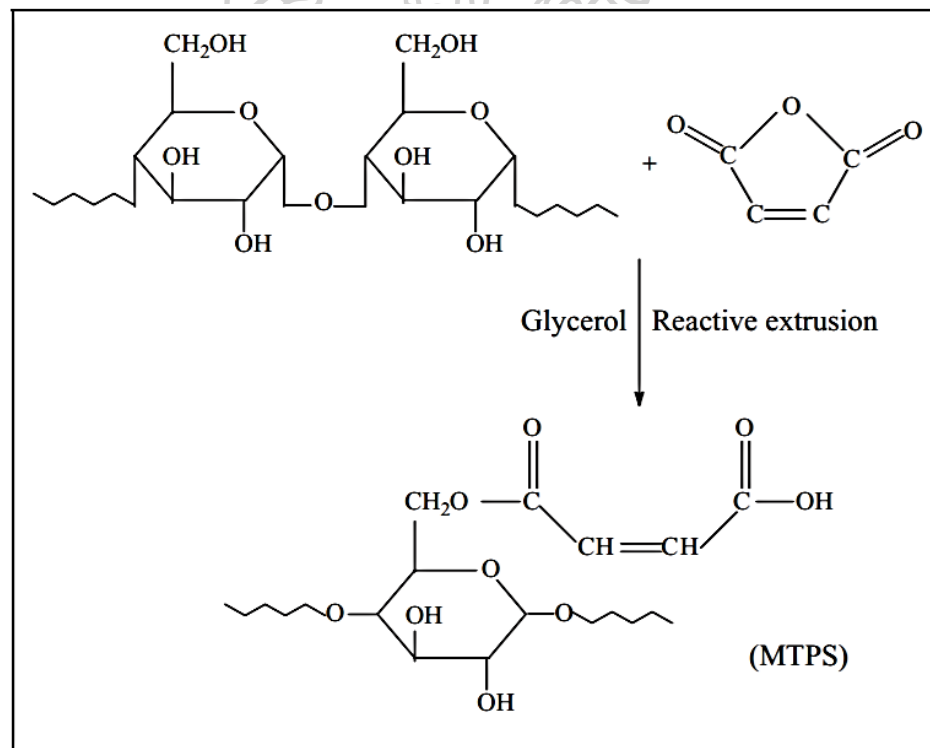
ตอนที่ 1 การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่ไม่มีและมีการเติมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

ตอนที่ 2 การเตรียมและสมบัติของโพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS)

ตอนที่ 3 ศึกษาอิทธิพลของการเติม Sepiolite ที่มีผลต่อสมบัติของโพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS)

4.1 การเตรียมและสมบัติพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่ไม่มีและมีการเติมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้

โดยทั่วไปแป้งไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการทางความร้อนเหมือนพลาสติกทั่วไป เนื่องจากแป้งจะเกิดการไหม้และเสื่อมสภาพก่อนหลอมเหลว จึงจำเป็นต้องนำแป้งมาเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) โดยใช้สารโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำ และกลีเซอรอล เพื่อให้สารโมเลกุลเล็กเหล่านี้เข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งก่อนจะนำไปขึ้นรูป อย่างไรก็ตาม TPS จะยังมีแป้งที่มีสายโซ่โมเลกุลยาว และมีความชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้เข้ากันได้ไม่ดีกับพอลิเมอร์ที่มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic polymer) นักวิจัยหลายท่านจึงได้พยายามแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ลงบนสายโซ่ของแป้งดังปฏิกิริยาในภาพที่ 4.1



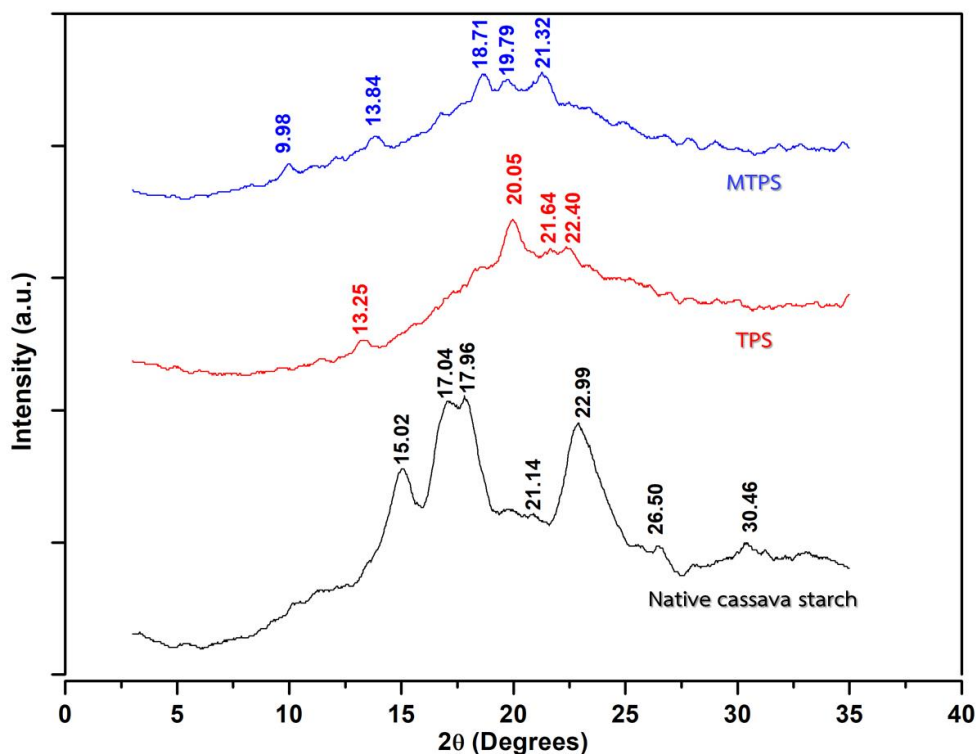
ภาพที่ 4.1 ปฏิกิริยาการเกิด MTPS ผ่านกระบวนการ Reactive extrusion [30]

จากงานวิจัยของ Jean-Marie Raquez และคณะ [31] ได้ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งข้าวโพดด้วยการเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่มีการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณแตกต่างกัน ผ่านกระบวนการ Reactive extrusion จากผลการวัดความหนืดด้วย Ubbelohde viscometer พบว่า MTPS มีความหนืดลดลงมากกว่า TPS เป็นการยืนยันว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของแป้ง MTPS ลดลง นอกจากนี้จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR ยังสามารถยืนยันได้ว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อมติดกับสายโซ่แป้งด้วยปฏิกิริยาการเปิดวงของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ดังภาพที่ 4.1 โดยสมบูรณ์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) เพื่อเป็นการตัดสายโซ่แป้ง และเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนสายโซ่เพื่อให้แป้งสามารถเข้ากันได้ดีกับ PBAT

4.1.1 การทดสอบเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD)

เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างแบบ Semi-crystalline ที่ประกอบด้วยบริเวณที่เป็นผลึก (Crystalline) และบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) โดยส่วน Crystalline เป็นบริเวณที่หมู่ไฮดรอกซิลระหว่างสายโซ่โมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน ทำให้สายโซ่โมเลกุลเรียงชิดกันเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ รวมถึงมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่สั้นของอะไมโลเพคตินเป็นเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ส่วนบริเวณที่เป็นส่วน Amorphous เป็นบริเวณที่หมู่ไฮดรอกซิลระหว่างสายโซ่โมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินไม่เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน (Free hydroxyl group) ทำให้สายโซ่โมเลกุลอยู่ห่างจากกัน และอยู่รวมกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เพื่อให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของแป้งมันสำปะหลัง TPS และ MTPS ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะพิสูจน์เอกลักษณ์แป้งมันสำปะหลัง แผ่นซีท TPS และ MTPS ด้วยเครื่อง X-ray diffraction โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กระแสไฟฟ้า 20 mA ความเร็วของการสแกน 5°/min และช่วงมุมการสแกน ตัวอย่าง 3°-35° พบว่ารูปแบบพีคของแป้งมันสำปะหลัง แผ่นซีท และแผ่นซีท MTPS ที่ได้มีลักษณะดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แสดงรูปแบบพิก (XRD pattern) ของแป้งมันสำปะหลัง และแผ่นซีท MTPS

จากรูปแบบพิกของแป้งมันสำปะหลังพบว่าปรากฏพิกที่มุม 2θ ได้แก่ 15.02° , 17.04° , 17.96° , 21.14° , 22.99° , 26.50° และ 30.64° แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของแป้งมันสำปะหลังเป็นผลึกแบบ A ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่อะไมโลเพคตินเป็นเกลียวม้วนคู่ (Double helices) อย่างหนาแน่นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Peilei Wang และคณะ [32] ที่ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมพอสิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) ที่ได้จากแป้งมันสำปะหลัง ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยพอพบว่ารูปแบบพิกของแป้งมันสำปะหลังจะปรากฏที่มุม 15.2° , 17.1° , 18.1° , 20.1° และ 23.1° ซึ่งมิตำแหน่งการเกิดพิกใกล้เคียงกับที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยนี้

เมื่อพิจารณารูปแบบพิกของ TPS พบว่ามีรูปแบบพิกแตกต่างจากรูปแบบพิกของแป้งมันสำปะหลังกล่าวคือพิกที่มุม 15.02° , 17.04° และ 17.96° ที่พบในแป้งมันสำปะหลังจะหายไป ส่วนพิกที่มุม 18.71° และ 19.79° จะมีความเข้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบของแป้งมันสำปะหลังลดลง เนื่องจากกลีเซอรอลที่เติมลงไปในช่วงขั้นตอนการเตรียม TPS แทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โกลูคอสและโกลูสและโกลูคอสและโกลูคอส ส่งผลให้สายโซ่เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ลดลง ส่งผลให้พิกที่มุมดังกล่าวมีความเข้มลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า TPS จะปรากฏพิกใหม่ที่มุม 13.25° และ 20.05° แสดงถึงการเกิดผลึกแบบ V_A ซึ่งเป็นการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของโกลูคอสและกลีเซอรอลนำไปสู่การเกิดจัดเรียงตัวเป็นเกลียวม้วนเดี่ยว (Single-helical structures)

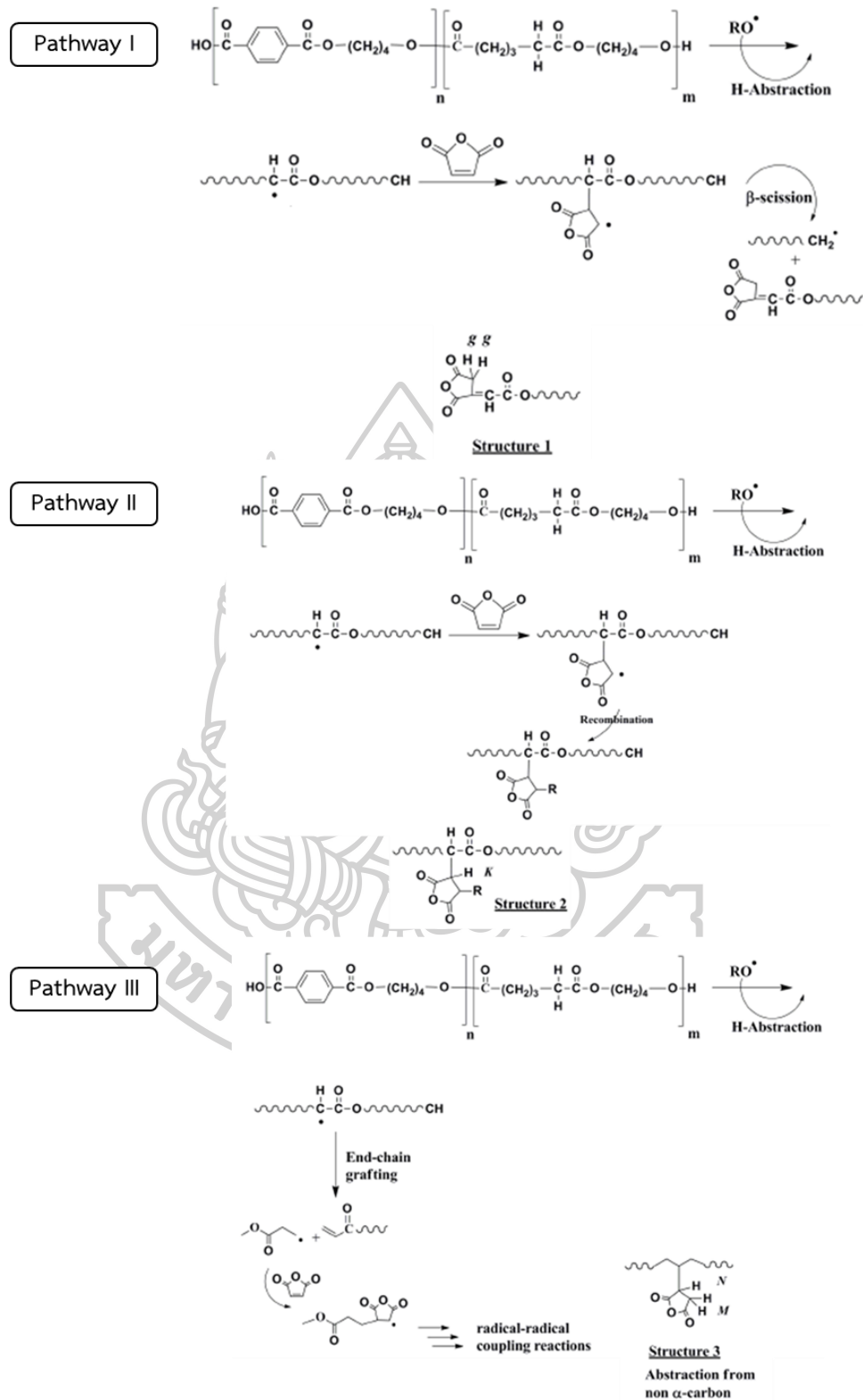
ส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีนมีความแข็งแรงลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yingfeng Zuo และคณะ [30] ที่พบว่ารูปแบบพิกของ TPS ที่ได้จากแป้งข้าวโพดจะปรากฏพิกซ์ที่มุม 13.5° และ 20.8° ซึ่งแสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอะมิโนและกลีเซอรอล ในทำนองเดียวกัน MTPS ก็พบพิกซ์ตำแหน่งเดียวกับ TPS แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์พิกซ์ไม่ส่งผลให้ชนิดของผลึกเปลี่ยนแปลง นั่นแสดงว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์พิกซ์เกิดบริเวณที่เป็นอสัณฐาน อย่างไรก็ตามความเข้มพิกซ์ และร้อยละความเป็นผลึกของ MTPS ดังตารางที่ 4.1 น้อยกว่า TPS แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์พิกซ์ส่งผลให้ปริมาณผลึกลดลง [30]

ตารางที่ 4.1 ร้อยละความเป็นผลึกของแป้งมันสำปะหลัง และ MTPS

Samples	ร้อยละความเป็นผลึก (%)
แป้งมันสำปะหลัง	35.81
TPS	17.50
MTPS	12.56

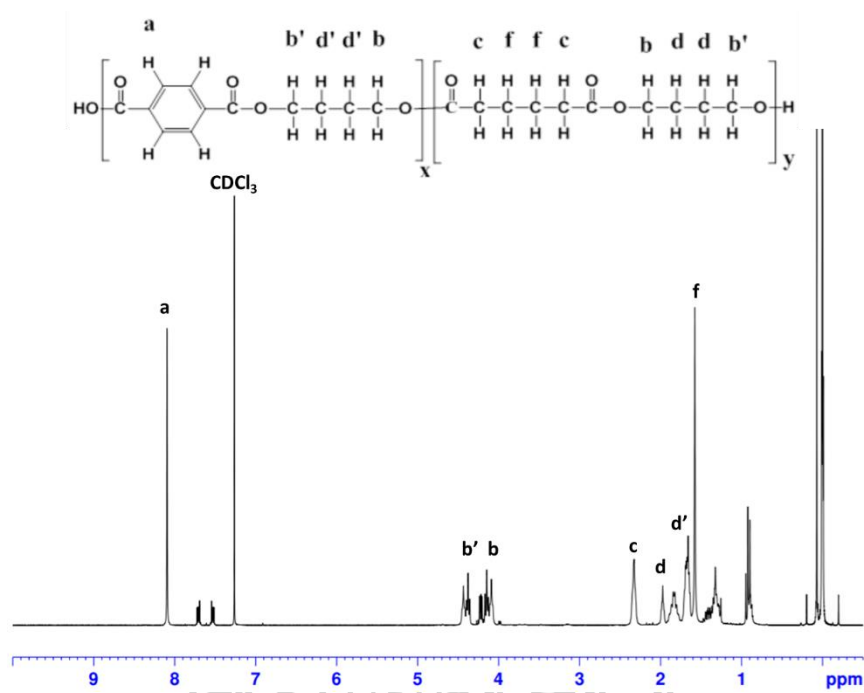
4.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PBAT-g-MA ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR)

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PBAT-g-MA สามารถทำได้ด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR) เพื่อพิสูจน์ว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดการกราฟต์ติดบนสายโซ่ของ PBAT โดยกลไกการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงบนสายโซ่ PBAT จะเกิดผ่านกลไกแบบอนุมูลอิสระ (Free radical) ดังแสดงในภาพที่ 4.3

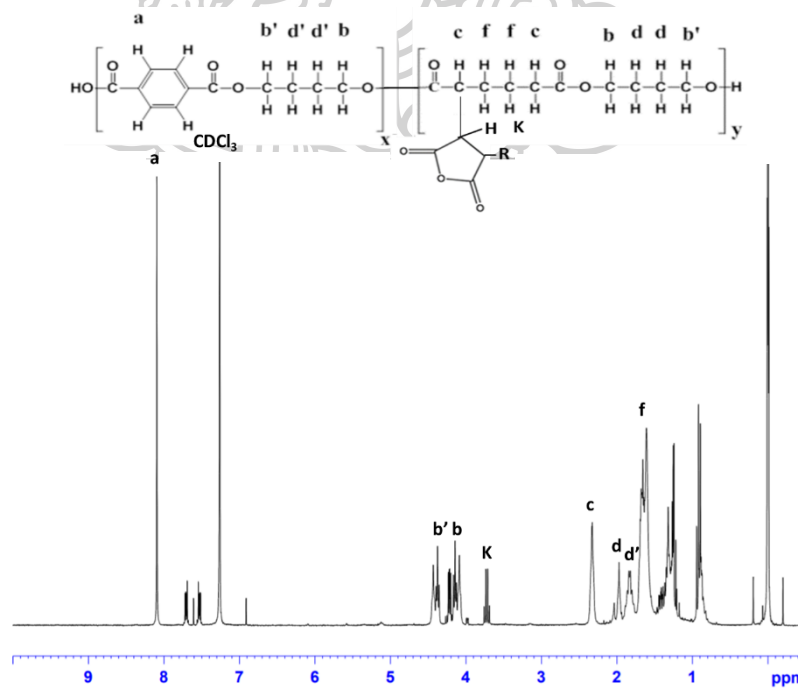


ภาพที่ 4.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงบน PBAT (ดัดแปลงจากงานวิจัย

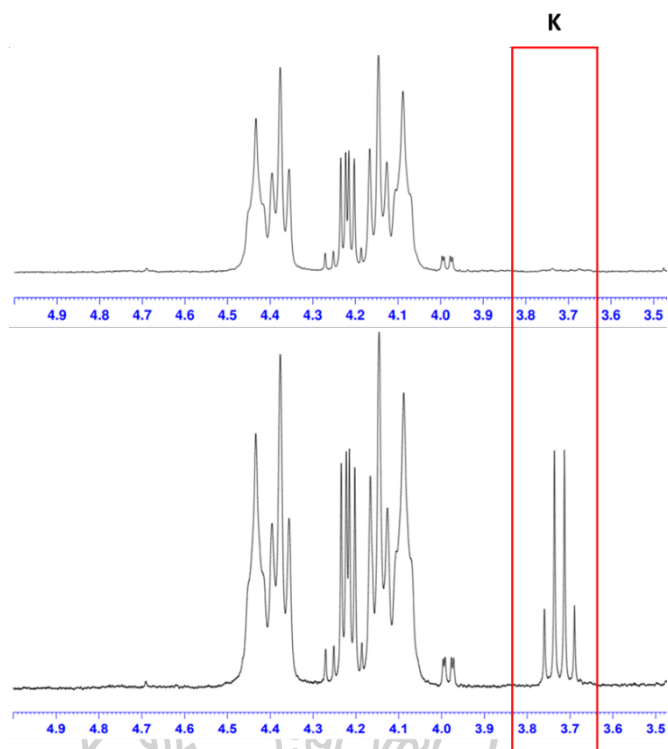
ของ Shahab Kashani Rahimi และคณะ) [33]



ภาพที่ 4.4 $^1\text{H-NMR}$ spectra ของ PBAT



ภาพที่ 4.5 $^1\text{H-NMR}$ spectra ของ PBAT ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBAT-g-MA)



ภาพที่ 4.6 $^1\text{H-NMR}$ spectra ช่วง 3.5-5.0 ppm ของ (a) PBAT และ (b) PBAT ที่ถูกดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PBAT-g-MA)

ตารางที่ 4.2 ค่า Chemical shift ที่สัมพันธ์กับโครงสร้างของ PBAT และ PBAT-g-MA

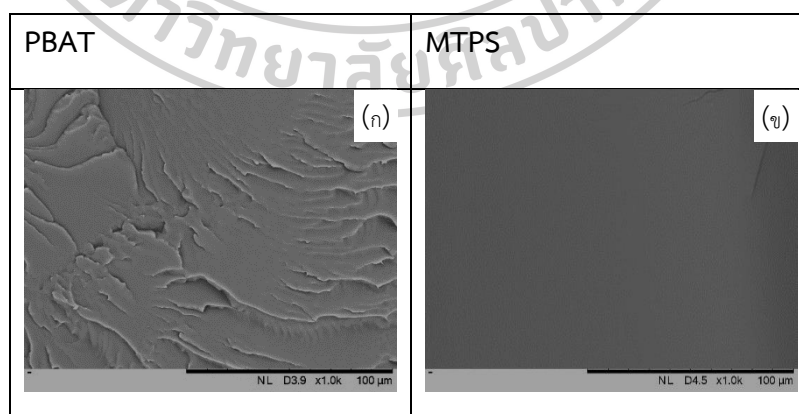
Chemical shift (ppm)	Symbol	Structure unit
1.67, 1.86, 1.97	f, d', d	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$
2.33	c	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \\ \text{H} \end{array}$
4.17, 4.40	b, b'	$\begin{array}{c} \text{b} \quad \text{b}' \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ -\text{O}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{O}- \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$
8.09	a	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{C}=\text{C} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$
3.69-3.76	K	$\begin{array}{c} \text{PBAT} \\ \\ \text{H} \\ \\ \text{C} \\ / \quad \backslash \\ \text{O} \quad \text{R} \\ \backslash \quad / \\ \text{O} \end{array}$

เมื่อพิจารณา $^1\text{H-NMR}$ spectra ของ PBAT ดังภาพที่ 4.4 จะพบสัญญาณ $^1\text{H-NMR}$ ที่สำคัญ 4 ช่วงความถี่ ได้แก่ ช่วงความถี่ 1.6-1.97 ppm (f, d', d) ซึ่งแสดงถึง Methylene protons ($-\text{C}(\text{CH}_2)_2-\text{C}-$) ที่ตำแหน่งความถี่ 2.33 ppm (c) แสดงถึงโปรตอนที่ติดอยู่กับหมู่คาร์บอนิล ที่ช่วงความถี่ 4.17-4.40 ppm (b, b') ซึ่งแสดงถึงโปรตอนที่ติดอยู่กับหมู่เอสเทอร์ และพีคสุดท้ายคือที่ตำแหน่งความถี่ 8.09 ppm (a) ซึ่งแสดงถึง Phenyl group บนสายโซ่ PBAT

เมื่อพิจารณา $^1\text{H-NMR}$ spectra ของ PBAT-g-MA ดังภาพที่ 4.5 จะพบสัญญาณ $^1\text{H-NMR}$ ที่สำคัญ 5 ช่วงความถี่ ได้แก่ ช่วงความถี่ 1.6-1.97 ppm (f, d', d) ซึ่งแสดงถึง Methylene protons ($-\text{C}(\text{CH}_2)_2-\text{C}-$) ที่ตำแหน่งความถี่ 2.33 ppm (c) แสดงถึงโปรตอนที่ติดอยู่กับหมู่คาร์บอนิล ที่ช่วงความถี่ 4.17-4.40 ppm (b, b') ซึ่งแสดงถึงโปรตอนที่ติดอยู่กับหมู่เอสเทอร์ ที่ตำแหน่งความถี่ 8.09 ppm (a) ซึ่งแสดงถึง Phenyl group จะเห็นว่าสัญญาณทั้ง 4 เป็นสัญญาณเดียวกันกับที่พบใน PBAT นอกจากนี้ใน PBAT-g-MA จะพบพีคที่สำคัญที่แสดงถึงโปรตอนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ติดกับ α -carbon ของสายโซ่ PBAT ที่ช่วงความถี่ 3.69-3.76 ppm ดังภาพที่ 4.6 จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดการกราฟต์ติดบนสายโซ่ PBAT

4.1.3 การศึกษาการศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาสัณฐานวิทยาของ PBAT และ MTPS ได้นำเอาแผ่นซีท PBAT และแผ่นซีท MTPS ที่ได้จากการหักชิ้นงานภายใต้สภาวะความเย็นยิ่งยวด (Cryogenic fracture surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นซีท PBAT และแผ่นซีท MTPS ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

ก) PBAT ข) MTPS

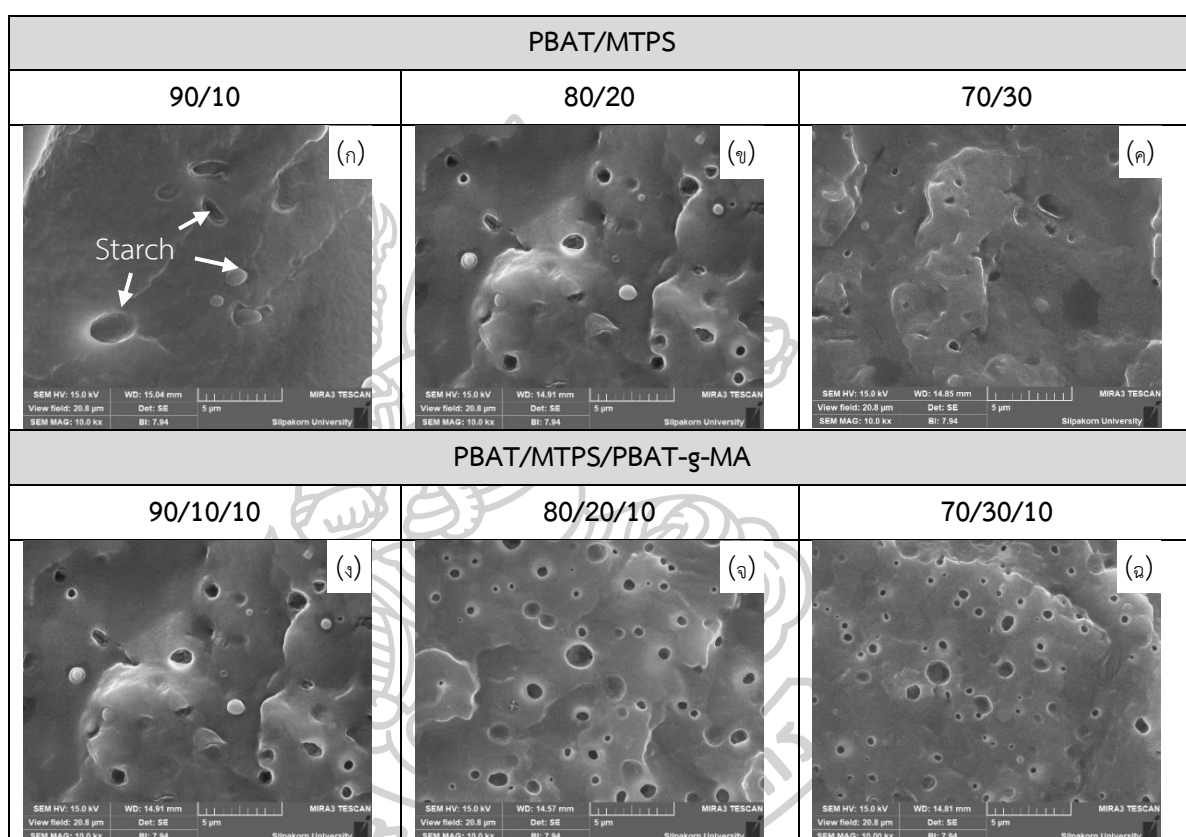
จากภาพ SEM ของพื้นผิวที่เกิดจากการหักชิ้นงานด้วยไนโตรเจนเหลวดังภาพที่ 4.7 พบว่าพื้นผิวของ MTPS มีลักษณะเป็นผิวเรียบ แสดงให้เห็นถึงการแตกหักแบบเปราะ (Brittle behavior) ในขณะที่พื้นผิวของ PBAT มีลักษณะเป็นผิวขรุขระไม่เรียบ แสดงให้เห็นถึงการแตกหักแบบเหนียว (Ductile behavior)

งานวิจัยนี้ศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมทั้งสูตรที่ไม่มีและมีการเติม PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะการกระจายตัวของแต่ละวัฏภาค และความเข้ากันได้ของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม และนำไปสู่ความเข้าใจถึงคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติทางความร้อนของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมต่อไป โดยภาพพื้นผิวย่อยแตกของชิ้นงานที่ได้จากการหักแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมภายใต้สภาวะความเย็นยิ่งยวด (Cryogenic fracture surface) ในไนโตรเจนเหลวแสดงดังภาพที่ 4.8

จากสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนของ MTPS 10wt%, 20wt และ 30wt% ทั้งสูตรที่ไม่มีและมีการเติม PBAT-g-MA ดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ก) – (ง) จะเห็นว่าลักษณะพื้นผิวย่อยแตกของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมในทุกๆ สูตรมี PBAT เป็นวัฏภาคหลัก และมี MTPS เป็นวัฏภาครอง และสังเกตเห็นการแยกกันของวัฏภาค PBAT และวัฏภาค MTPS อย่างชัดเจน โดย MTPS จะมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคหลักของ PBAT เมื่อพิจารณาแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมที่มีสัดส่วนของ MTPS 10wt%, 20wt% และ 30wt% ที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA ดังภาพที่ 4.8 (ก) – (ค) พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ MTPS จะส่งผลให้อนุภาคทรงกลมของ MTPS ที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคหลักของ PBAT มีขนาดเล็กลง ทำให้อนุภาคของ MTPS มีการกระจายตัวในวัฏภาคของ PBAT ได้ดีขึ้น แสดงว่าการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ray Anne G และคณะ [34] ที่ได้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน 80/20, 60/40 และ 40/60 โดยน้ำหนักด้วยเครื่อง Blown film extruder พบว่าอนุภาคของ TPS ที่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของ PBAT จะมีขนาดเล็กลงจาก 0.3–4.5 μm เป็น 0.2–1.3 μm เมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้นจาก 20wt% เป็น 40wt% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณ TPS จะส่งผลให้อนุภาคของ TPS ในวัฏภาคของ PBAT มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้มีการเติม PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ไนโตรเจนในพอลิเมอร์ผสม จากการเติม PBAT-g-MA พบว่าอนุภาคของ MTPS กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคหลักของ PBAT ได้ดีมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.8 เนื่องจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่อยู่ใน PBAT-g-MA สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลของ PBAT และหมู่ไฮดรอกซิลของ MTPS ได้ ส่งผลให้ PBAT และ MTPS มีการยึดติดกันได้ดีกว่าตอนที่ยังไม่เติม PBAT-g-MA สอดคล้องกับ

งานวิจัยของ Mohamed D และคณะ [35] ที่ได้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ TPS ที่อัตราส่วน 80/20, 60/40 และ 40/60 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิ 120-150 °C จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของงานวิจัยดังกล่าวพบว่าอนุภาค TPS ในแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ TPS ที่มีการเติม PBAT-g-MA ลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ จะมีการกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของ PBAT ได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

ก) PBAT/MTPS10% ข) PBAT/MTPS20% ค) PBAT/MTPS30%

ง) PBAT/MTPS10%PBAT-g-MA จ) PBAT/MTPS20%PBAT-g-MA

ฉ) PBAT/MTPS30%PBAT-g-MA

4.1.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาสมบัติการดึงยึดของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมทั้งสูตรที่มีการเติมและไม่มีการเติม PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D882 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) โดยใช้อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 5 mm/min และใช้ load cell ขนาด 50 kN จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่า Tensile strength, Elongation at break และ Young's modulus ดังแสดงในภาพที่ 4.9 ถึง ภาพที่ 4.11 และตารางที่ 4.3

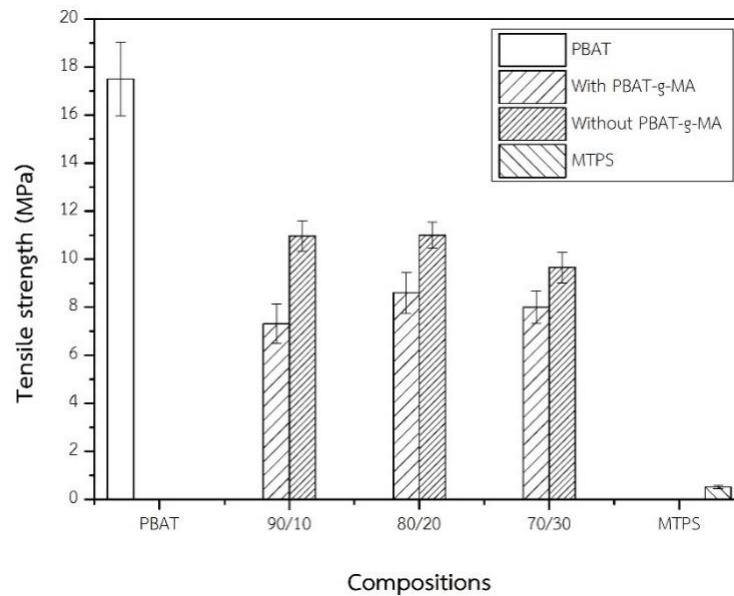
เมื่อพิจารณาค่า Tensile strength ของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม PBAT และ MTPS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ดังข้อมูลในภาพที่ 4.9 และตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ MTPS จาก 10wt% เป็น 20wt% จะส่งผลให้ค่า Tensile strength มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ก)-(ค) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jacqueline Stagner และคณะ [9] ที่พบว่าการเพิ่มปริมาณ MTPS จะส่งผลให้ Tensile strength และ Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาค่า Elongation at break ของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม PBAT และ MTPS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ดังข้อมูลในภาพที่ 4.10 และตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ MTPS จะส่งผลให้ค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ก)-(ค)

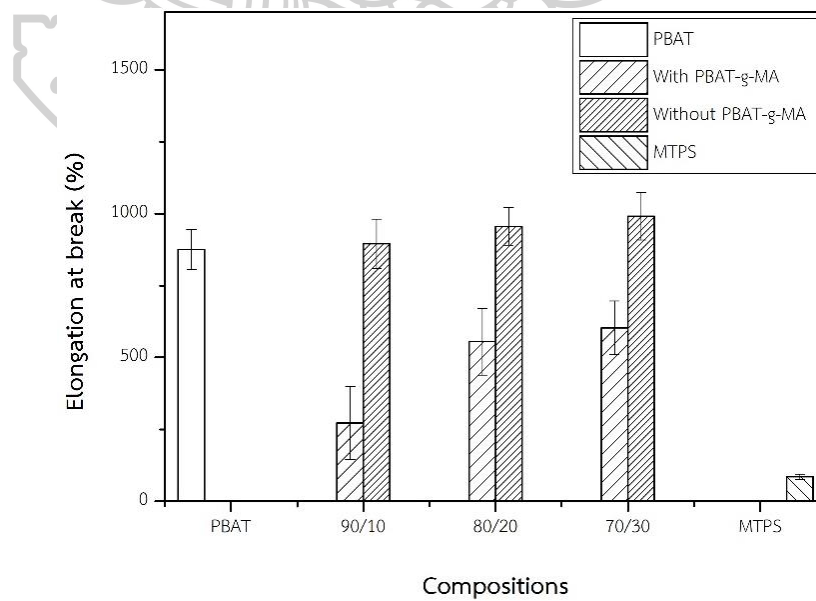
นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติม PBAT-g-MA มีค่า Tensile strength และ Elongation at break มากกว่าสูตรที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่อยู่ใน PBAT-g-MA สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลของ PBAT และหมู่ไฮดรอกซิลของ MTPS ได้ ส่งผลให้ PBAT และ MTPS มีการยึดติดกันได้ดีกว่าตอนที่ยังไม่เติม PBAT-g-MA สอดคล้องกับหลักฐานทางวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่พบว่าอนุภาคของ MTPS ในสูตรที่มีการเติม PBAT-g-MA มีการกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคหลักของ PBAT ได้ดีมากขึ้นดังภาพที่ 4.8

เมื่อพิจารณาค่า Young's modulus ของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม PBAT และ MTPS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ดังข้อมูลในภาพที่ 4.11 และตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ MTPS จะส่งผลให้ค่า Young's modulus มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก MTPS เป็นวัสดุที่มีความเปราะ แตกหักได้ง่ายกว่า PBAT ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมสูตรที่มี MTPS มากขึ้นมีความสามารถในการต้านทานการเสียรูปได้ลดลง ค่า Young's modulus จึงมีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน [25] ที่ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS และ TPS ที่อัตราส่วน 80/20, 70/30 และ 60/40 พบว่าเมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้นจะ

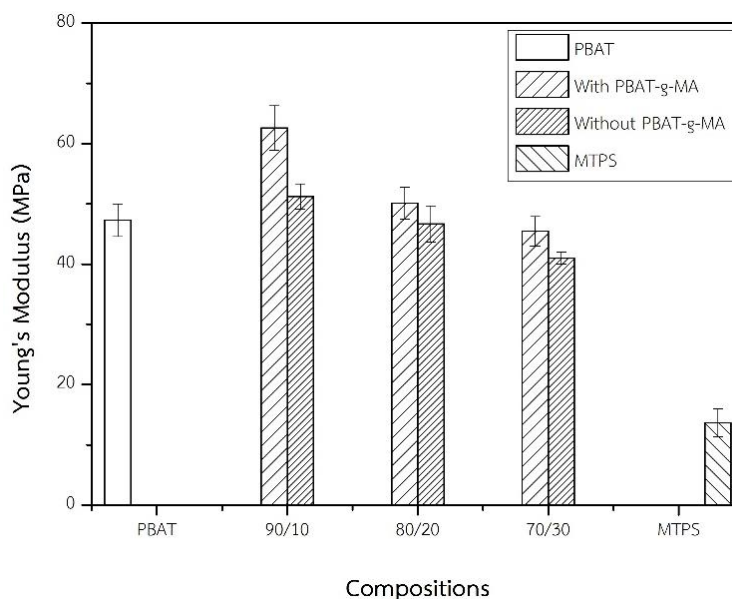
ส่งผลให้ค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติม PBAT-g-MA มีค่า Young's modulus น้อยกว่าสูตรที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.9 Tensile strength ของพอลิเมอร์ผสม



ภาพที่ 4.10 Elongation at break ของพอลิเมอร์ผสม



ภาพที่ 4.11 Young's modulus ของพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

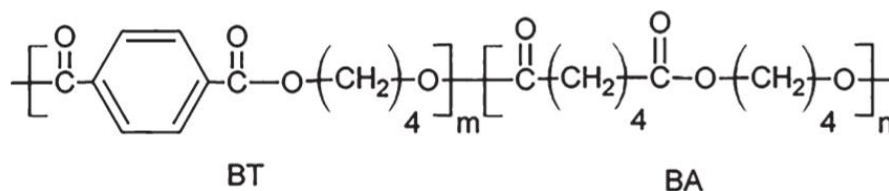
Samples	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Young's Modulus (MPa)
PBAT	17.50±1.54 ^a	875.44±69.75 ^b	47.32±2.72 ^{cd}
PBAT/MTPS (90/10)	7.30±0.82 ^e	273.07±127.37 ^d	62.61±3.68 ^a
PBAT/MTPS (80/20)	8.60±0.85 ^{cd}	555.07±115.87 ^c	50.11±2.68 ^{bc}
PBAT/MTPS (70/30)	7.99±0.68 ^{de}	602.52±93.51 ^c	45.46±2.46 ^d
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	10.97±0.63 ^b	895.51±86.10 ^{ab}	51.25±2.10 ^b
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	11.01±0.53 ^b	955.66±64.89 ^{ab}	46.70±2.99 ^{cd}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	9.66±0.64 ^c	990.83±82.08 ^a	40.10±0.98 ^e
MTPS	0.52±0.06 ^f	85.98±8.67 ^e	13.62±2.35 ^f

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.1.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม

การศึกษสมบัติทางความร้อนของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมโดยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ที่อุณหภูมิในช่วง $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราการให้ความร้อน $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ด้วยโหมดการทดสอบแบบ Heat-Cool-Heat ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ซึ่งการให้ความร้อนครั้งแรกจะเป็นการลบประวัติทางความร้อนของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูป ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melt crystallization temperature, T_m) และปริมาณผลึกจาก DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 และ 2 พร้อมทั้งวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c) จาก DSC thermogram ในขั้นตอนการการเย็นตัว (Cooling scan)

โดยทั่วไปสายโซ่โพลีเมอร์ PBAT ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ 2 หน่วย ได้แก่ บิวทิลีน เทเรฟทาเลต (Butylene Terephthalate, BT Segment) และบิวทิลีน อะดิเปต (Butylene Adipate, BA Segment) ดังภาพที่ 4.12 ส่งผลให้ PBAT มีค่าอุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) 2 ค่า ได้แก่ อุณหภูมิการหลอมผลึกของสายโซ่ส่วน BA (T_{m1}) และอุณหภูมิการหลอมผลึกของสายโซ่ส่วน BT (T_{m2})

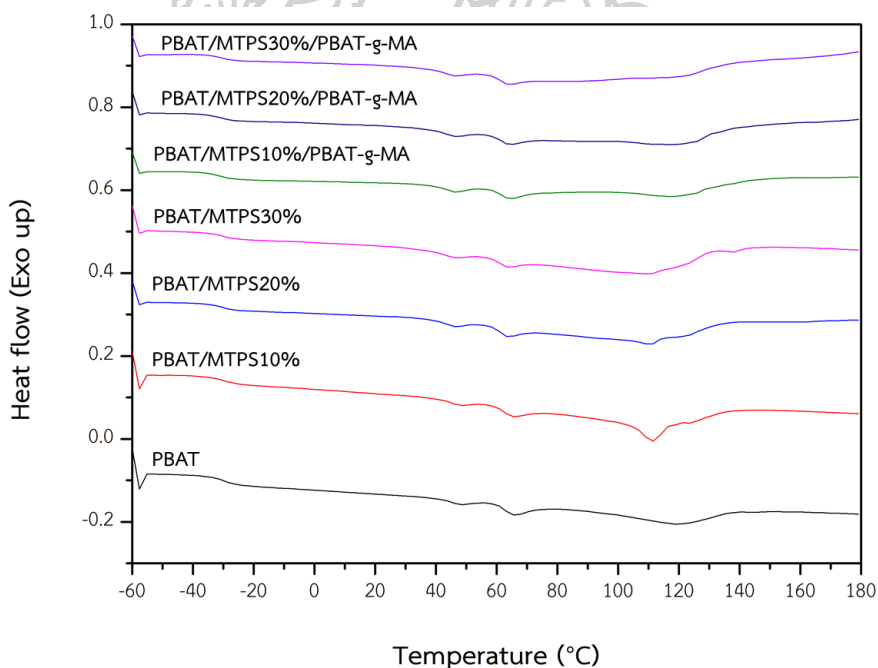


ภาพที่ 4.12 โครงสร้างของ PBAT ที่ประกอบด้วย BT Segment และ BA Segment [36]

จากสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 4.13 และตารางที่ 4.4 พบว่าค่า PBAT และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ทั้งสูตรที่มีและไม่มีการเติม PBAT-g-MA มีค่าอุณหภูมิการหลอมผลึกของสายโซ่ส่วน BA (T_{m1}) อยู่ในช่วง $46.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $48.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยการเพิ่มปริมาณ MTPS และการเติม PBAT-g-MA จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตามการเติม MTPS ปริมาณ 10wt%, 20wt% และ 30wt% ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการหลอมผลึกของสายโซ่ส่วน (T_{m2}) ลดลงจาก 119.58 °C เป็น 110.92-112.25 °C เมื่อเทียบกับ PBAT เนื่องจาก MTPS ขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของสายโซ่ส่วน BT สอดคล้องกับงานวิจัยของ Paula Gonzalez Seligra และคณะ [37] ที่ศึกษาการเตรียมแผ่นฟิล์มจาก PBAT และอนุภาคของ TPS ในระดับนาโน (TPS nanoparticles) พบว่าการเติม TPS nanoparticles ส่งผลให้ค่า T_{m2} มีค่าลดลงจาก 143 °C เป็น 117 °C เมื่อเทียบกับ PBAT เนื่องจาก TPS nanoparticles ขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของสายโซ่ส่วน BT จึงทำให้ค่า T_{m2} ลดลงเมื่อมีการเติม Nanoparticles ของ TPS

เมื่อพิจารณาค่า T_g และปริมาณผลึก พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ทั้งสูตรที่มีและไม่มี การเติม PBAT-g-MA มีค่า T_g ของวัสดุของ PBAT อยู่ในช่วง -30.58 °C ถึง -28.49 °C ส่วนปริมาณผลึกของสายโซ่ส่วน BA อยู่ในช่วง 0.75-2.06% ส่วนปริมาณผลึกของสายโซ่ส่วน BT อยู่ในช่วง 4.85-16.60% โดยการเพิ่มปริมาณ MTPS และการเติม PBAT-g-MA ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า T_g และปริมาณผลึกอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.13 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน First heating

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน First heat

Samples	T_g (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	Crystallinity (%)
PBAT	-29.56	48.18	119.58	10.01
PBAT/MTPS (90/10)	-30.58	47.85	112.25	16.60
PBAT/MTPS (80/20)	-31.12	46.22	110.92	7.63
PBAT/MTPS (70/30)	-29.76	46.22	110.92	14.09
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	-31.74	46.23	119.25	6.91
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	-30.92	46.23	121.55	8.08
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/20/10)	-34.03	46.23	120.55	4.85

จากสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ DSC thermogram ในขั้นตอนการหล่อเย็น ดังแสดงในภาพที่ 4.14 และตารางที่ 4.5 พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ทั้งสูตรที่มีการเติม PBAT-g-MA และสูตรที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA มีค่าอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อยู่ในช่วง 94.29 °C ถึง 94.75 °C แสดงให้เห็นว่า MTPS และ PBAT-g-MA ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า T_c

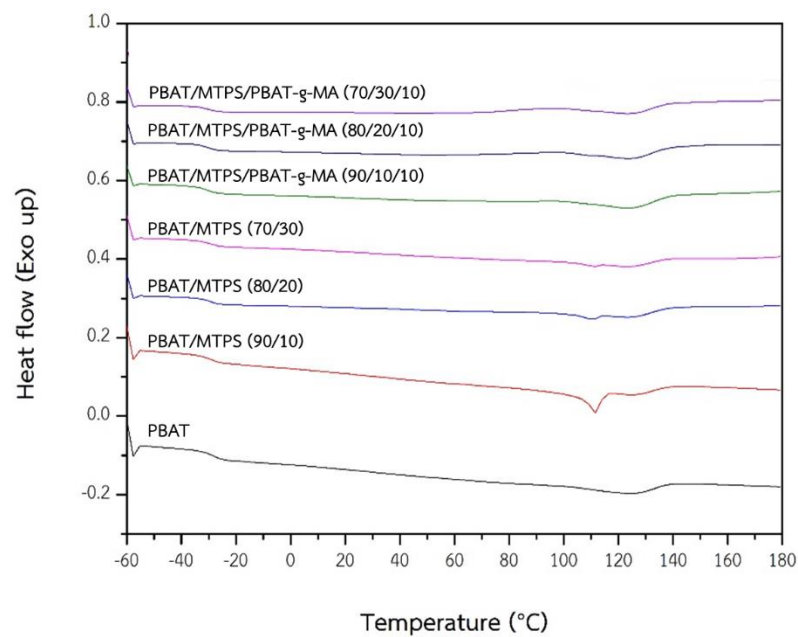
จากสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4.15 และตารางที่ 4.6 พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อยู่ในช่วง -29.03 °C ถึง -28.49 °C ซึ่งแสดงถึงการสั้นและเคลื่อนไหวของสายโซ่ PBAT เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ MTPS ที่ส่งผลต่อค่า T_g ของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อปริมาณ MTPS เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า T_g เพิ่มขึ้น เนื่องจาก MTPS ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PBAT ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ต้องใช้พลังงานในการสั้นและเคลื่อนไหวมากขึ้น ค่า T_g จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MTPS สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ray Anne G และคณะ [34] ที่ได้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PBAT และ TPS อัตราส่วน 80/20, 60/40 และ 40/60 โดยน้ำหนักด้วยเครื่อง Blown film extruder พบว่าค่า T_g แปรผันตามปริมาณ TPS เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเติม PBAT-g-MA พบว่าพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติม PBAT-g-MA จะมีค่า T_g อยู่ในช่วง -28.98 ถึง -28.49 °C ซึ่งมีค่ามากกว่าสูตรที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA เนื่องจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่อยู่ใน

PBAT-g-MA สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิล ของ PBAT และหมู่ไฮดรอกซิลของ MTPS ได้ ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติม PBAT-g-MA มีการยึดติดกันได้ดีกว่าสูตรที่ไม่ได้เติม PBAT-g-MA ทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น ปริมาณผลึกจึงมากขึ้น โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่ยึดสายโซ่พอลิเมอร์ (Physical crosslink) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการสั่นและเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์จึงต้องใช้พลังงานในการสั่นและเคลื่อนไหวมากขึ้น ดังนั้นค่า T_g ของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติม PBAT-g-MA จึงมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA สอดคล้องกับงานวิจัยของ Smita Mohanty และ Sanjay K. Nayak [37] ที่พบว่าการเติม PBAT-g-MA ส่งผลให้ค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นจาก $-39.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็น $-37.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก มีปริมาณผลึกอยู่ในช่วง 13.06% ถึง 15.98% โดยปริมาณผลึกแปรผันตามปริมาณ MTPS เนื่องจาก MTPS ประพฤติตัวเป็น Nucleating agent เหนี่ยวนำให้สายโซ่ PBAT ที่อยู่โดยรอบเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ MTPS จึงส่งผลให้มีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเติม PBAT-g-MA ต่อปริมาณผลึก พบว่าพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติม PBAT-g-MA มีปริมาณผลึกอยู่ในช่วง 13.38% ถึง 15.03% ซึ่งมีค่ามากกว่าปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA เนื่องจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่อยู่ใน PBAT-g-MA สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลของ PBAT และหมู่ไฮดรอกซิลของ MTPS ได้ ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติม PBAT-g-MA มีการยึดติดกันได้ดีกว่าสูตรที่ไม่ได้เติม PBAT-g-MA ทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PBAT สามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น ปริมาณผลึกจึงมากขึ้นเมื่อมีการเติม PBAT-g-MA สอดคล้องกับงานวิจัยของ Smita Mohanty และ Sanjay K. Nayak [37] ที่พบว่าการเติม TPS ปริมาณ 30wt% ส่งผลให้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นจาก 10.6% เป็น 11.34% เมื่อเทียบกับ PBAT ในทำนองเดียวกันการเติม PBAT-g-MA ส่งผลให้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นจาก 11.34% เป็น 12.89% เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA

จากการพิจารณาค่า T_m ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ไม่พบค่าอุณหภูมิการหลอมของสายโซ่ส่วน BA (T_{m1}) แสดงให้เห็นว่าสายโซ่ส่วน BA เกิดผลึกได้ยาก เนื่องจากเกิดการสลายตัวที่บริเวณ BA unit [38] อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 จะยังพบค่าอุณหภูมิการหลอมผลึกของสายโซ่ส่วน BT (T_{m2}) โดยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก มีค่า T_{m2} เท่ากับ $111.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ เท่ากันทุกอัตราส่วน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเติม PBAT-g-MA ต่อค่า T_{m2} พบว่าพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติม PBAT-g-MA มีค่า T_{m2} อยู่ในช่วง $124\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $125.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติม PBAT-g-MA มีการยึดติดกันได้ดีกว่าสูตรที่

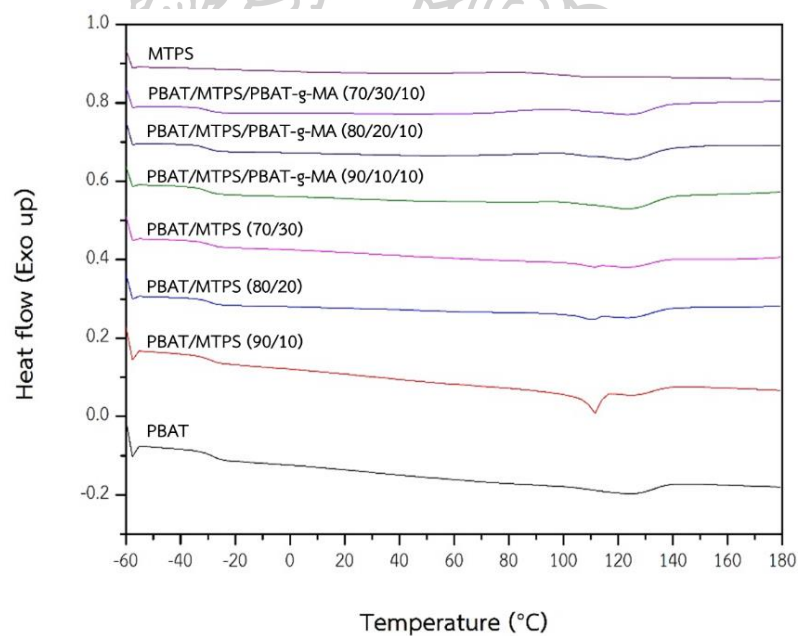
ไม่ได้เติม PBAT-g-MA ดังแสดงในภาพที่ 4.8 ทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น ปริมาณผลึกจึงมากขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึก (T_m) ของวัสดุภาค PBAT ในพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PBAT-g-MA จึงมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA สอดคล้องกับงานวิจัยของ Smita Mohanty และ Sanjay K. Nayak [37] ที่พบว่า การเติม PBAT-g-MA ส่งผลให้ค่า T_m ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นจาก 111.30 °C เป็น 120.53 °C เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม PBAT-g-MA



ภาพที่ 4.14 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน Cooling

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน Cooling

Samples	T_c (°C)
PBAT	96.08
PBAT/MTPS (90/10)	94.29
PBAT/MTPS (80/20)	94.40
PBAT/MTPS (70/30)	94.40
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	94.42
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	94.50
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	94.75



ภาพที่ 4.15 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน Second heating

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมในขั้นตอน Second heating

Samples	T _g (°C)	T _{m2} (°C)	Crystallinity (%)
PBAT	-28.22	123.92	11.75
PBAT/MTPS (90/10)	-29.03	111.20	13.06
PBAT/MTPS (80/20)	-28.91	111.20	13.41
PBAT/MTPS (70/30)	-28.58	111.20	15.98
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	-28.98	124.00	13.38
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	-28.66	124.67	14.05
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	-28.49	125.20	15.03

4.2 การเตรียมและสมบัติของโฟมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปรรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS) ที่มีการเติมสารเสริมสภาพความเข้ากันได้

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมโฟมจากพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ โดยเริ่มจากการผสม PBAT เข้ากับ MTPS ในอัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งเติม PBAT-g-MA ปริมาณ 10% โดยน้ำหนักของ PBAT ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิ 120, 140, 150, 150, 155, 155, 160 และ 150 °C โดยใช้ความเร็วรอบ 60 rpm จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาผสมเข้ากับ 4,4'-Oxydibenzenesulfonyl Hydrazide (OBSH) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารฟู (Blowing agent) ในปริมาณ 10, 15 และ 20 phr ของปริมาณพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill mixer) โดยจะเริ่มหลอมพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วนต่างๆ ที่อุณหภูมิ 140 °C จากนั้นลดอุณหภูมิลูกกลิ้งเป็น 120 °C เติม OBSH ลงในพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลวแล้วเพื่อป้องกันไม่ให้ OBSH เกิดการแตกตัวเป็นฟองแก๊สในขั้นตอนนี้ จากนั้นขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมให้เป็นแผ่นโฟมด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 160 °C และความดัน 1,500 psi เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ OBSH เกิดการแตกตัวเป็นฟองแก๊สกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ผสม ในขั้นตอนถัดไปจะทำให้พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวเย็นตัวลง (Cooling) โดยปราศจากการให้แรงดันเป็น

เวลา 3 นาที เพื่อให้ฟองแก๊สเกิดการขยายตัวและดันเนื้อพอลิเมอร์ออกจนกลายเป็นเซลล์โฟม กระจายตัวอยู่ในแผ่นโฟม ขั้นตอนสุดท้ายนำแผ่นโฟมที่ได้ไปศึกษาสัณฐานวิทยาเพื่อวิเคราะห์ขนาดของเซลล์โฟม และความหนาแน่นของเซลล์โฟม ศึกษาความหนาแน่นของโฟม ความสามารถในการกักอัด ความแข็งที่ผิว สมบัติทางความร้อน และเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นโฟม

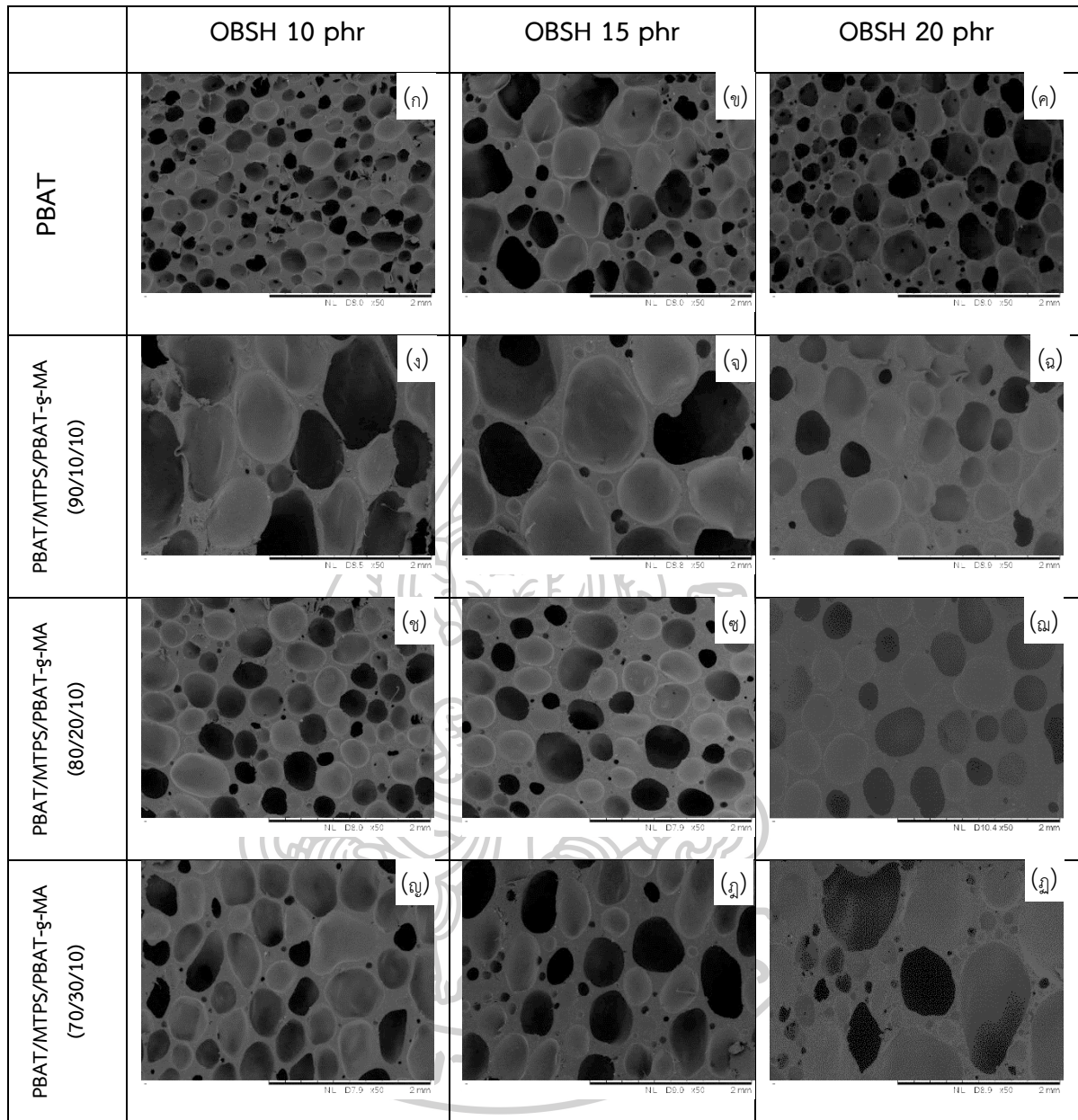
4.2.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมพอลิเมอร์ผสมทำได้โดยการตัดแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสมด้วยมีดปากกา จากนั้นเคลือบพื้นผิวภายในของชิ้นงานด้วยทองคำโดยใช้เทคนิค Sputtering และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 50 เท่า เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของเซลล์โฟมด้วยโปรแกรม imageJ

จากสัณฐานวิทยาของแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสม PBAT และ MTPS ที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ที่มีการเติม OBSH เพื่อทำหน้าที่เป็นสารฟู (Blowing agent) ปริมาณ 10, 15 และ 20 phr ดังภาพที่ 4.16 พบว่าโฟมพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีเซลล์โฟมเป็นรูปทรงกลม และทรงรีที่มีขนาดเซลล์โฟม (Cell size) แตกต่างกันตามปริมาณ MTPS และปริมาณ OBSH

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ MTPS ที่ส่งผลต่อขนาดของเซลล์โฟมโดยเปรียบเทียบขนาดของเซลล์โฟมที่มีการเติม OBSH ในปริมาณเท่ากันดังภาพที่ 4.17 และตารางที่ 4.7 พบว่าการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้ขนาดของเซลล์โฟมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก MTPS ไม่มีความสามารถในการกักเก็บฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางความร้อนของ OBSH ดังนั้นโฟมพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีปริมาณ MTPS เพิ่มขึ้นจึงกักเก็บแก๊สที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการขึ้นรูปได้น้อยลง ส่งผลให้อัตราการขยายตัวของโฟมพอลิเมอร์ลดลง

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ OBSH ที่ส่งผลต่อขนาดของเซลล์โฟมโดยเปรียบเทียบขนาดของเซลล์โฟมที่มีอัตราส่วน PBAT/MTPS เท่ากันดังภาพที่ 4.17 และตารางที่ 4.7 พบว่าขนาดของเซลล์โฟมสูตรที่มีการเติม OBSH ปริมาณเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มใหญ่ขึ้น เนื่องจากมีปริมาณ OBSH ที่สามารถแตกตัวเป็นฟองแก๊สได้มากกว่า



ภาพที่ 4.16 สัณฐานทางวิทยาของแผ่นโพลิเมอร์ผสมที่กำลังขยาย 50 เท่า

ก) PBAT/OBSH10phr ข) PBAT/OBSH15phr ค) PBAT/OBSH20phr

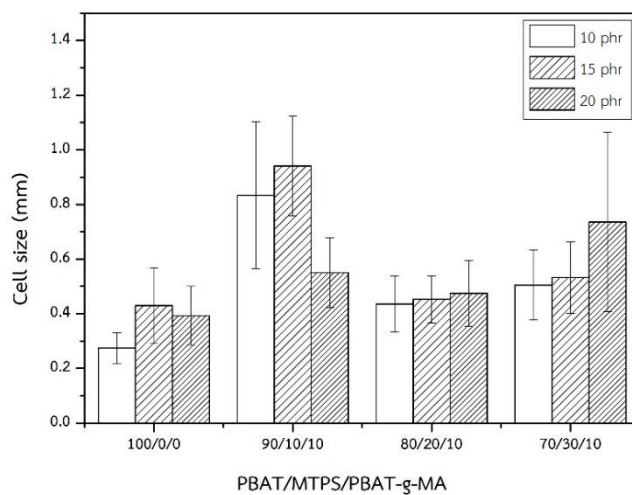
ง) PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH10phr จ) PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH15phr

ฉ) PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH20phr ช) PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH10phr

ซ) PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr ฌ) PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH20phr

ญ) PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH10phr ฎ) PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH15phr

ฏ) PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH20phr



ภาพที่ 4.17 ขนาดของเซลล์โพลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.7 ขนาดของเซลล์โพลิเมอร์ผสม

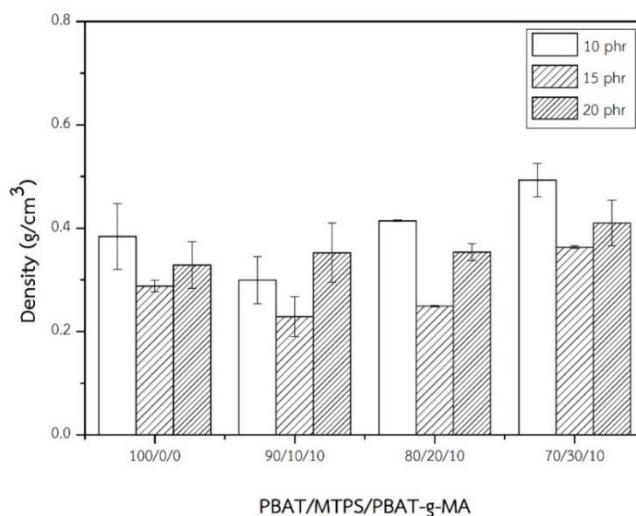
Samples	OBSH (phr)	Cell size (mm)
PBAT	10	0.28±0.06 ^s
PBAT	15	0.43±0.14 ^{ef}
PBAT	20	0.39±0.11 ^f
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	10	0.83±0.27 ^b
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	15	0.94±0.18 ^d
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	20	0.55±0.13 ^{ef}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	10	0.44±0.10 ^{ef}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	15	0.45±0.08 ^{ef}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	20	0.47±0.12 ^{de}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	10	0.50±0.13 ^{de}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	15	0.53±0.13 ^d
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	20	0.7363±0.3289 ^c

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.2.2 การศึกษาความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์ผสม

งานวิจัยนี้ศึกษาความหนาแน่นของแผ่นโพลีเอสเตอร์ผสมด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองแสดงในภาพที่ 4.18 และตารางที่ 4.8 พบว่าความหนาแน่นของแผ่นโพลีเอสเตอร์ผสมที่มีการเติม MTPS ปริมาณ 10wt% อยู่ในช่วง 0.2287-0.3527 g/cm³ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าโพลีเอสเตอร์ PBAT ที่มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.2880-0.3840 g/cm³ เนื่องจากโพลีเอสเตอร์ผสมสูตรที่มีการเติม MTPS ปริมาณ 10wt% มีขนาดเซลล์โพลีเมอร์ใหญ่กว่าโพลีเอสเตอร์ PBAT ดังแสดงในภาพที่ 4.16 (ก)-(ฉ) และตารางที่ 4.7 โพลีเอสเตอร์ดังกล่าวจึงมีเนื้อโพลีเมอร์น้อยลง ส่งผลให้ความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์สูตรนี้มีค่าน้อยกว่าโพลีเอสเตอร์ PBAT

เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์ที่มีการเติม OBSH 10 phr เท่ากัน พบว่าการเพิ่มปริมาณ MTPS จาก 10wt% เป็น 20wt% ส่งผลให้โพลีเอสเตอร์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากเซลล์โพลีเมอร์มีขนาดลดลงดังแสดงในภาพที่ 4.16 (ง) และ (ข) ในทำนองเดียวกันเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ MTPS จาก 20wt% เป็น 30wt% ส่งผลให้โพลีเอสเตอร์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยขนาดของเซลล์โพลีเมอร์และขนาดของผนังเซลล์ดังแสดงในภาพที่ 4.16 (ข) และ (ญ) จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่าแม้การเพิ่มปริมาณ MTPS จาก 20wt% เป็น 30wt% ส่งผลให้เซลล์โพลีเมอร์มีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่โพลีเอสเตอร์มีผนังเซลล์หนากว่าจึงมีปริมาณเนื้อโพลีเมอร์มากกว่า และมีความหนาแน่นมากกว่า ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์ที่มีการเติม OBSH 15 และ 20 phr ก็พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ MTPS จาก 10wt% เป็น 20wt% และ 30wt% ก็พบว่ามีผลไปในทางเดียวกัน นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเนื่องจากปริมาณ MTPS อาจเป็นผลมาจากการที่สายโซ่ MTPS ไม่สามารถกักเก็บฟองแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของ OBSH ได้ ดังนั้นโพลีเอสเตอร์ผสมสูตรที่มีปริมาณ MTPS เพิ่มขึ้นจึงกักเก็บแก๊สที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการขึ้นรูปได้น้อยลง ส่งผลให้อัตราการขยายตัวของโพลีเอสเตอร์ลดลง ซึ่งผลการทดลองในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของวีระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน [25] ที่ได้ทำการศึกษารเตรียมโพลีเอสเตอร์ผสมระหว่าง PBS และ TPS ที่อัตราส่วน 100/0, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนักด้วยเครื่อง Single screw extruder ที่อุณหภูมิ 90-140 °C และที่ความเร็วรอบ 35 rpm พบว่าความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์มีค่าแปรผันตามปริมาณของแป้งที่ผสมในสูตรคอมพาวด์ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งในสูตรคอมพาวด์ให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้โพลีเอสเตอร์มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถบ่งชี้ได้ว่าการเพิ่มปริมาณแป้งในสูตรคอมพาวด์จะส่งผลให้อัตราการขยายตัวของโพลีเอสเตอร์ (Expansion ratio) มีค่าลดลง



ภาพที่ 4.18 ความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.8 ความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสม

Samples	OBSH (phr)	Density (g/cm ³)
PBAT	10	0.38±0.06 ^{bc}
PBAT	15	0.29±0.01 ^{cde}
PBAT	20	0.33±0.04 ^{cde}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	10	0.30±0.04 ^{cde}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	15	0.23±0.04 ^e
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	20	0.35±0.06 ^{bcd}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	10	0.41±0.00 ^{ab}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	15	0.25±0.00 ^{de}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	20	0.35±0.02 ^{bcd}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	10	0.49±0.03 ^a
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	15	0.36±0.00 ^{bc}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	20	0.41±0.04 ^{ab}

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ OBSH ต่อความหนาแน่นของแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ OBSH จาก 10 phr เป็น 15 phr จะส่งผลให้ความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงจาก 0.2993-0.4930 g/cm³ เป็น 0.2289-0.3633 g/cm³ เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ OBSH จาก 10 phr เป็น 15 phr จะส่งผลให้เซลล์โฟมมีขนาดใหญ่ขึ้น

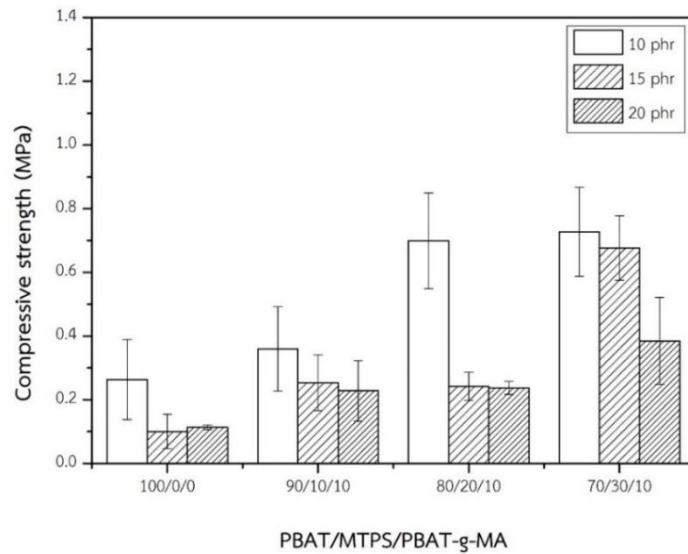
อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณการเติม OBSH จาก 15 phr เป็น 20 phr พบว่าความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.2287-0.3633 g/cm³ เป็น 0.3527-0.4100 g/cm³ เนื่องจากการเติม OBSH ที่ปริมาณ 20 phr ส่งผลให้ผนังเซลล์ของโฟมหนากว่าสูตรที่มีการเติม OBSH 15 phr และอาจเป็นผลมาจากในขั้นตอนการทำให้แผ่นโฟมเกิดการเย็นตัวในงานวิจัยนี้เป็นการปล่อยให้แผ่นโฟมเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องซึ่งไม่สามารถควบคุมให้โฟมพอลิเมอร์เกิดการเย็นตัวในสภาวะที่เท่ากันได้ จึงทำให้โฟมที่ได้ในแต่ละรอบการขึ้นรูปมีเนื้อพอลิเมอร์ในแผ่นโฟมไม่เท่ากัน

4.2.3 การศึกษาความสามารถในการกดอัดของโฟมพอลิเมอร์ผสม

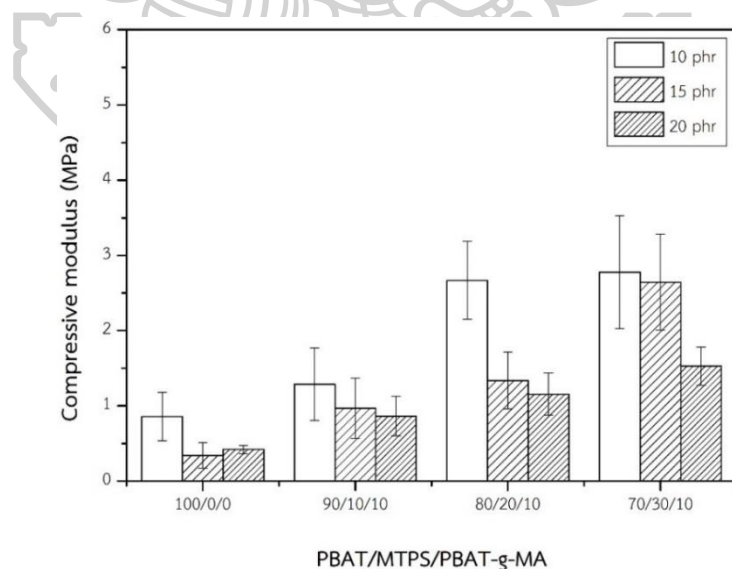
การศึกษาศักยภาพในการกดอัดของโฟมพอลิเมอร์ผสมดำเนินการด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D1621 โดยจะทำการกดขึ้นงานลงไป 50% ของความสูงเริ่มต้นของชิ้นงาน และทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานของการกดอัด (Compressive strength) และมอดูลัสกดอัด (Compressive modulus) ดังแสดงในภาพที่ 4.19 - ภาพที่ 4.20 และตารางที่ 4.9

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ MTPS ต่อความสามารถในการกดอัด พบว่าค่า Compressive strength และค่า Compressive modulus แปรผันตามปริมาณ MTPS เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้โฟมพอลิเมอร์ผสมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4.18 และตารางที่ 4.8 โฟมจึงมีส่วนที่เป็นเนื้อพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกดที่กระทำต่อแผ่นโฟมมากขึ้น โดยทั่วไปโฟมที่มีความหนาแน่นสูง และมีผนังเซลล์โฟมหนาจะมีความสามารถในการต้านทานการเสียรูปได้ดีกว่าโฟมที่มีความหนาแน่นน้อย และมีผนังเซลล์โฟมบาง ดังนั้นความสามารถในการกดอัดของโฟมจะแปรผันตามความหนาแน่นของโฟม [39] ซึ่งผลการทดลองในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของวีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน [25] ที่ได้ทำการศึกษาศักยภาพการเตรียมโฟมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS และ TPS ที่อัตราส่วน 100/0, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยนำหนักด้วยเครื่อง Single screw extruder พบว่าโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ TPS เพิ่มขึ้นจะมีค่า Compressive strength เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณ TPS 40% มีค่า Compressive strength สูงที่สุด และปริมาณ TPS 0% มีค่า Compressive strength ต่ำสุดที่ 16.24 และ 10.60 MPa ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ OBSH ต่อความสามารถในการกดอัด พบว่าค่า Compressive strength และค่า Compressive modulus แปรผกผันกับปริมาณ OBSH เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ OBSH ส่งผลให้ขนาดของเซลล์โพลีเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4.16 และตารางที่ 4.7 แผ่นโพลีเมอร์ผสมจึงมีส่วนที่เป็นเนื้อโพลีเมอร์ที่ทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกดที่กระทำต่อแผ่นโพลีเมอร์น้อยลง ความสามารถในการต้านแรงกดที่กระทำต่อโพลีเมอร์จึงลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ OBSH



ภาพที่ 4.19 ความต้านทานของการกดอัด (Compressive strength) ของแผ่นโพลีเมอร์ผสม



ภาพที่ 4.20 มอดุลัสกดอัด (Compressive modulus) ของแผ่นโพลีเมอร์ผสม ตารางที่ 4.9 สมบัติการกดอัดของโพลีเมอร์ผสม

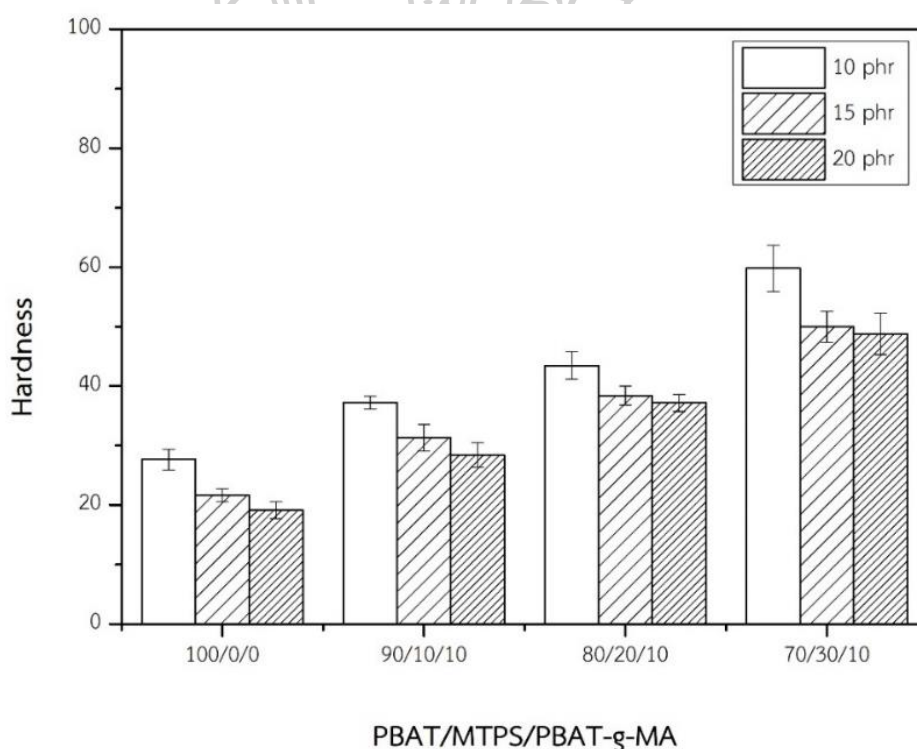
Samples	OBSH (phr)	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (MPa)
PBAT	10	0.2629±0.1253 ^{bc}	0.86±0.32 ^{bc}
PBAT	15	0.1003±0.0539 ^c	0.34±0.17 ^c
PBAT	20	0.1133±0.0073 ^{bc}	0.42±0.05 ^c
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	10	0.3592±0.1325 ^{bc}	1.29±0.48 ^{bc}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	15	0.2531±0.0874 ^{bc}	0.97±0.40 ^{bc}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	20	0.2277±0.0955 ^{bc}	0.86±0.26 ^{bc}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	10	0.6992±0.1503 ^a	2.67±0.48 ^a
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	15	0.2416±0.1503 ^{bc}	1.34±0.38 ^{bc}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	20	0.2368±0.0206 ^{bc}	1.16±0.28 ^{bc}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	10	0.7269±0.1399 ^a	2.78±0.75 ^a
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	15	0.6763±0.1399 ^a	2.64±0.64 ^a
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	20	0.3842±0.1371 ^b	1.53±0.25 ^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.2.4 การศึกษาความแข็งของโพลีเมอร์ผสม

การศึกษาความแข็งของแผ่นโพลีเมอร์ผสมทำด้วยเครื่อง Durometer (Shore A) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 และวิเคราะห์ค่าความแข็งของแผ่นโพลีเมอร์ได้ดังภาพที่ 4.21 และตารางที่ 4.10 พบว่าค่าความแข็งของแผ่นโพลีเมอร์ผสมแปรผันตามปริมาณ MTPS เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ MTPS ทำให้แผ่นโพลีเมอร์ผสมมีความหนาแน่นมากขึ้นดังภาพที่ 4.18 และตารางที่ 4.8 แผ่นโพลีเมอร์ผสมจึงมีเนื้อโพลีเมอร์ที่ทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกดที่กระทำต่อแผ่นโพลีเมอร์มากขึ้น ดังนั้นแผ่นโพลีเมอร์จึงมีความแข็งมากขึ้น

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ OBSH ต่อค่าความแข็งของแผ่นโพลีเมอร์ผสมพบว่าค่าความแข็งของแผ่นโพลีเมอร์ผสมแปรผกผันกับปริมาณ OBSH เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ OBSH ส่งผลให้ขนาดเซลล์โพลีเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4.16 และตารางที่ 4.7 แผ่นโพลีเมอร์ผสมจึงมีส่วนที่เป็นเนื้อโพลีเมอร์ที่ทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกดที่กระทำต่อแผ่นโพลีเมอร์น้อยลง ดังนั้นแผ่นโพลีเมอร์ผสมจึงมีความแข็งลดลง



ภาพที่ 4.21 ค่าความแข็งของแผ่นโพลีเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.10 ค่าความแข็งของแผ่นโพลิเมอร์ผสม

Samples	OBSH (phr)	Hardness
PBAT	10	27.67±1.72 ^f
PBAT	15	21.67±1.10 ^g
PBAT	20	19.13±1.42 ^g
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	10	37.20±1.11 ^e
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	15	31.33±1.11 ^f
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	20	28.40±2.08 ^f
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	10	43.47±2.32 ^{cd}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	15	38.40±2.32 ^{de}
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	20	37.20±1.44 ^e
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	10	59.80±3.89 ^a
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	15	50.00±3.89 ^b
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	20	48.80±3.47 ^{bc}

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

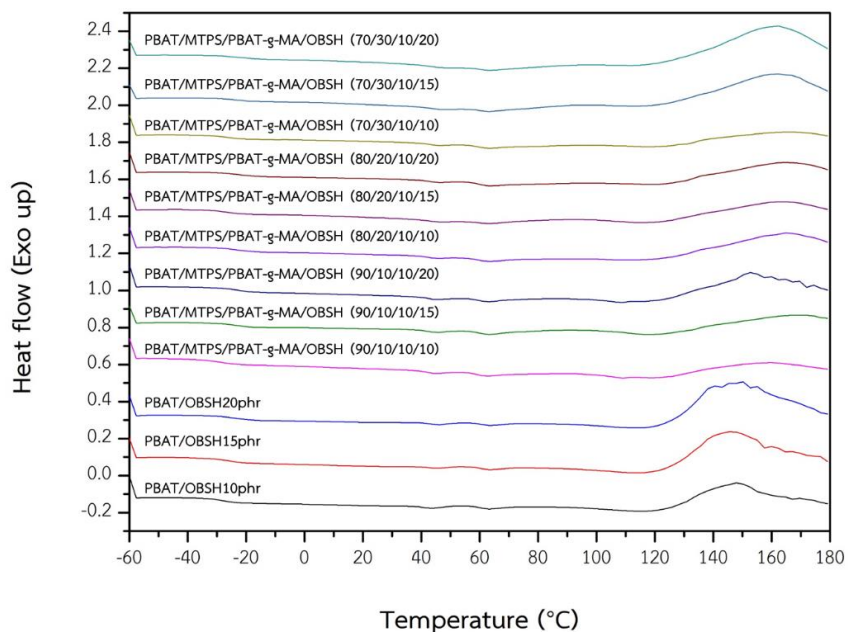
4.2.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสม

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นโพลีเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยใช้สภาวะในการทดสอบเช่นเดียวกับการศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นซีทโพลีเมอร์ผสมในตอนต้นที่ 1 จากนั้นวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melt crystallization temperature, T_m) และปริมาณผลึกจาก DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 และ 2 พร้อมทั้งวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c) จาก DSC thermogram ในขั้นตอนการการเย็นตัว (Cooling scan)

จากสมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 4.22 และตารางที่ 4.11 พบว่าค่า T_g อยู่ในช่วง -28.94 ถึง -25.10 °C ส่วนค่า T_{m1} อยู่ในช่วง 44.50 ถึง 45.80 °C และค่า T_{m2} อยู่ในช่วง 109.95 ถึง 116.80 °C นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณผลึกมีค่าอยู่ในช่วง 10.48 ถึง 13.83% ตามลำดับ โดยการเพิ่มปริมาณ MTPS และการเติม PBAT-g-MA ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ

จากสมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ DSC thermogram ในขั้นตอนการหล่อเย็น ดังแสดงในภาพที่ 4.23 และตารางที่ 4.12 พบว่าค่า T_c อยู่ในช่วง 94.17 ถึง 97.20 °C โดยการเพิ่มปริมาณ MTPS และ OBSH ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า T_c

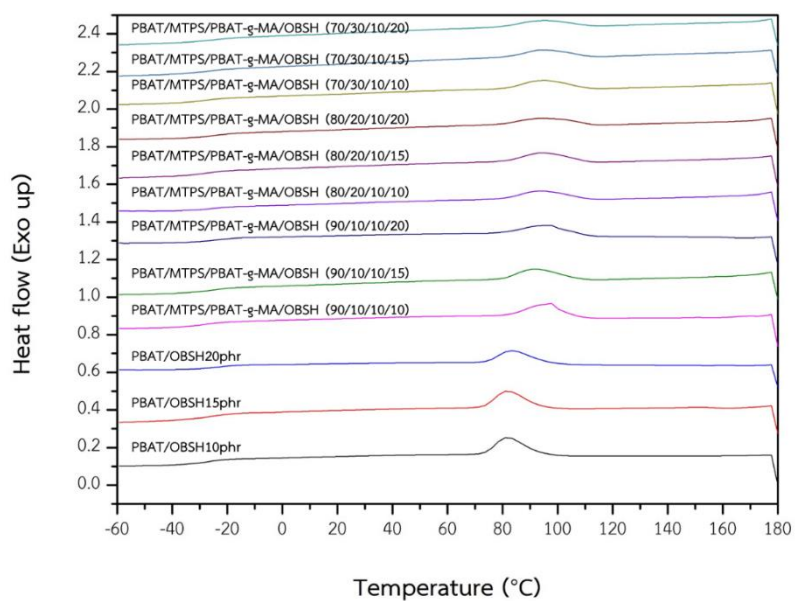
จากสมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.13 พบว่าค่า T_g ของ PBAT ในโพลีเมอร์ผสมอยู่ในช่วง -26.15 ถึง -25.32 °C ส่วนค่า T_{m2} อยู่ในช่วง 122.75 ถึง 124.40 °C และร้อยละความเป็นผลึกอยู่ในช่วง 9.78 ถึง 14.27% โดยการเพิ่มปริมาณ MTPS และ OBSH ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าว นอกจากนี้ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ไม่พบค่าอุณหภูมิการหลอมของสายโซ่ส่วน BA (T_{m1}) แสดงให้เห็นว่าสายโซ่ส่วน BA เกิดผลึกได้ยากเนื่องจากเกิดการสลายตัวที่บริเวณ BA unit [38]



ภาพที่ 4.22 DSC thermogram ของโพลิเมอร์ผสมในชั้นตอน First heating

ตารางที่ 4.11 สมบัติทางความร้อนของโพลิเมอร์ผสมในชั้นตอน First heating

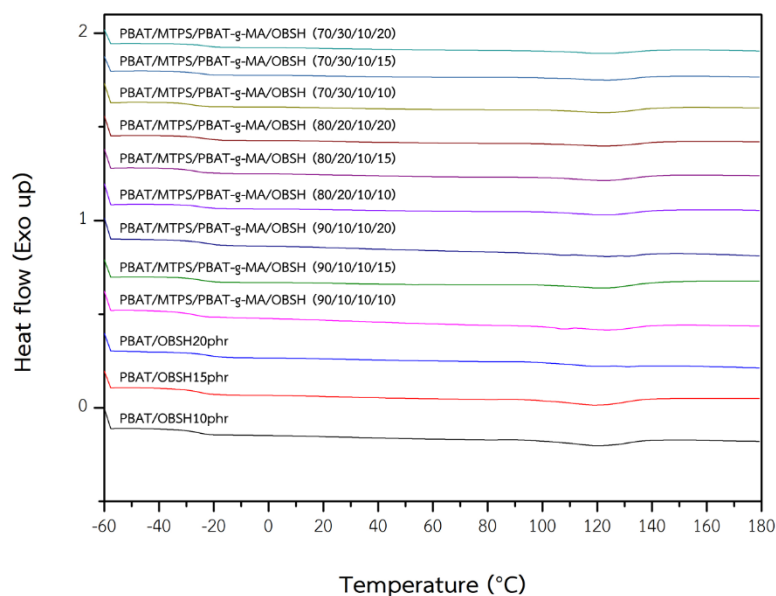
Sample	OBSH (phr)	T_g (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	Crystallinity (%)
PBAT	10	-24.17	43.42	116.12	6.45
PBAT	15	-25.78	44.92	115.70	6.47
PBAT	20	-25.53	45.83	115.15	6.52
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	10	-28.94	44.50	114.83	10.72
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	15	-25.56	45.42	116.76	11.56
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	20	-25.10	45.00	109.95	10.54
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	10	-25.21	44.92	114.75	12.43
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	15	-25.46	44.39	114.36	11.72
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	20	-25.85	45.80	116.80	13.83
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	10	-25.79	45.47	116.40	11.88
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	15	-25.65	45.60	115.53	11.67
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	20	-25.49	45.92	115.57	10.48



ภาพที่ 4.23 DSC thermogram ของโพลีเมอร์ผสมในขั้นตอน Cooling

ตารางที่ 4.12 สมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสมในขั้นตอน Cooling

Sample	OBSH (phr)	T _c (°C)
PBAT	10	81.75
PBAT	15	81.20
PBAT	20	83.42
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	10	97.17
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	15	91.75
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	20	96.80
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	10	94.42
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	15	93.60
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	20	97.20
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	10	94.40
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	15	94.17
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	20	94.50



ภาพที่ 4.24 DSC thermogram ของโพลีเอสเตอร์ผสมในชั้นตอน Second heating

ตารางที่ 4.13 สมบัติทางความร้อนของโพลีเอสเตอร์ผสมในชั้นตอน Second heating

Sample	OBSH (phr)	T _g (°C)	T _{m2} (°C)	Crystallinity (%)
PBAT	10	-26.45	120.40	6.76
PBAT	15	-27.50	119.58	6.52
PBAT	20	-25.57	119.58	4.78
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	10	-25.92	123.00	11.88
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	15	-26.15	122.75	9.78
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	20	-25.42	123.17	10.77
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	10	-25.32	123.86	12.74
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	15	-25.68	123.20	10.59
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	20	-25.36	123.58	13.37
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	10	-25.61	124.00	13.88
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	15	-25.54	123.67	12.32
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	20	-25.44	124.40	14.27

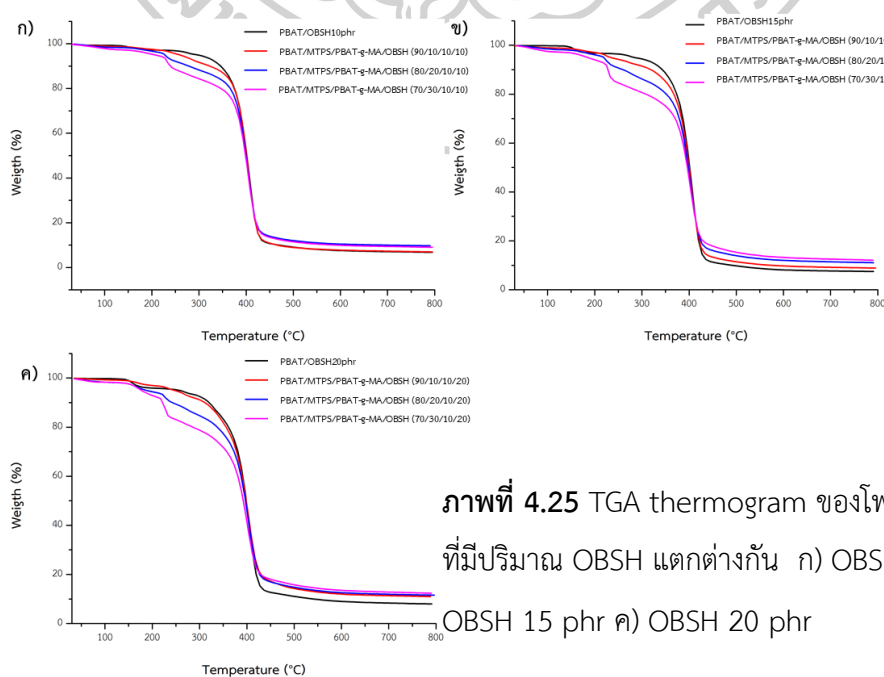
4.2.6 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโพลีเอสเตอร์ผสม

ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโพลีเอสเตอร์ผสมด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) ที่อุณหภูมิช่วง 30 °C ถึง 800 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน จากนั้นวิเคราะห์ TGA thermogram และ DTG thermogram ของโพลีเอสเตอร์ผสมได้ดังภาพที่ 4.25 – 4.26 และตารางที่ 4.14

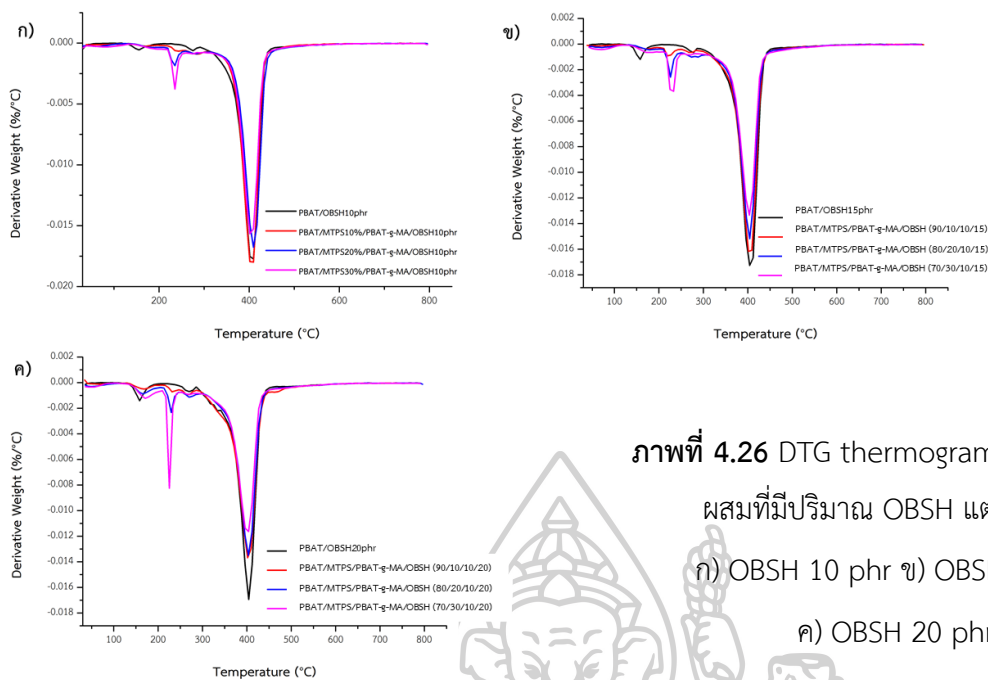
จาก TGA thermogram และ DTG thermogram ของโพลีเอสเตอร์ผสม PBAT ดังภาพที่ 4.25 และ 4.26 พบว่าโพลีเอสเตอร์ผสม PBAT มีการสลายตัวทางความร้อน 2 ขั้นตอน ขั้นที่ 1 ปรากฏที่อุณหภูมิช่วง 138 ถึง 154 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ OBSH เกิดการแตกตัวเป็นฟองแก๊ส และขั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวทางความร้อนของ PBAT ที่อุณหภูมิช่วง 287 ถึง 485 °C

เมื่อพิจารณา TGA thermogram และ DTG thermogram ของโพลีเอสเตอร์ผสมดังภาพที่ 4.25 และ 4.26 พบว่าโพลีเอสเตอร์ผสมมีการสลายตัวทางความร้อน 3 ขั้นตอน โดยขั้นที่ 1 ปรากฏที่อุณหภูมิช่วง 107 ถึง 185 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ OBSH เกิดการแตกตัวเป็นฟองแก๊ส ขั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวทางความร้อนของกลีเซอรอลและแป้งที่อุณหภูมิช่วง 213 ถึง 249 °C และขั้นที่ 3 เป็นการสลายตัวทางความร้อนของ PBAT ที่อุณหภูมิช่วง 275 ถึง 553 °C

พิจารณาอิทธิพลของปริมาณ MTPS และ OBSH ต่อเสถียรภาพทางความร้อนพบว่า การเพิ่มปริมาณ MTPS และ OBSH ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุ PBAT และวัสดุ PBAT นั้นคือปริมาณ MTPS และ OBSH ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพทางความร้อน



ภาพที่ 4.25 TGA thermogram ของโพลีเอสเตอร์ผสมที่มีปริมาณ OBSH ต่างกัน ก) OBSH 10 phr ข) OBSH 15 phr ค) OBSH 20 phr



ภาพที่ 4.26 DTG thermogram ของพอลิเมอร์

ผสมที่มีปริมาณ OBSH แตกต่างกัน

ก) OBSH 10 phr ข) OBSH 15 phr

ค) OBSH 20 phr

ตารางที่ 4.14 เสถียรภาพทางความร้อนของโพลิเมอร์ผสม

Samples	OBSH (phr)	Degradation temperature (°C)	
		MTPS	PBAT
PBAT	10	-	406.89
PBAT	15	-	404.11
PBAT	20	-	403.75
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	10	238.05	404.98
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	15	222.92	404.21
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (90/10/10)	20	231.65	404.04
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	10	229.80	403.97
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	15	223.67	403.81
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (80/20/10)	20	227.30	403.48
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	10	232.78	403.34
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	15	228.60	402.61
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA (70/30/10)	20	225.56	401.71

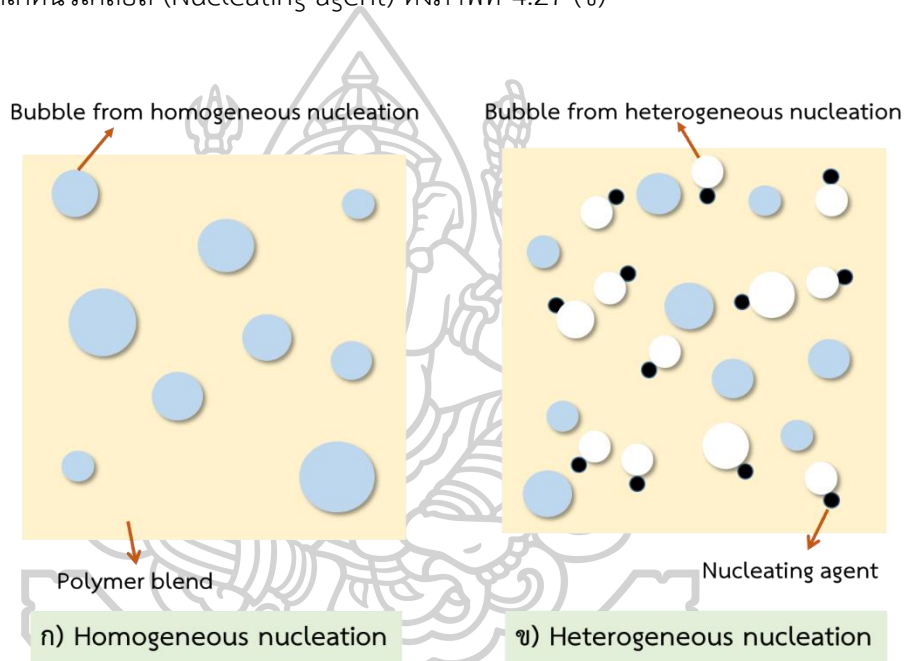
4.3 ศึกษาอิทธิพลของการเติม Sepiolite ที่มีผลต่อสมบัติของโพลีเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) และเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MTPS)

งานวิจัยนี้ส่วนนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการเติม Sepiolite ที่มีต่อสมบัติของโพลีเมอร์ผสม โดยผู้วิจัยเลือกโพลีเมอร์ผสม PBAT/MTPS/PBAT-g-MA อัตราส่วน 80/20/10 ที่มีการเติม OBSH ปริมาณ 15 phr ซึ่งมีขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ผสม และมีความหนาแน่นต่ำ มาศึกษาอิทธิพลของการเติม Sepiolite โดยเริ่มจากการหลอมโพลีเมอร์ผสมดังกล่าวด้วยเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 140 °C เมื่อโพลีเมอร์ผสมหลอมอย่างสมบูรณ์แล้วจึงเติม Sepiolite ที่ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr จากนั้นเมื่อโพลีเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกับ Sepiolite แล้วจึงลดอุณหภูมิลูกกลิ้งเป็น 120 °C แล้วเติม OBSH เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสลายตัวในขั้นตอนนี้ จากนั้นขึ้นรูปโพลีเมอร์ผสมให้เป็นแผ่นโพลีเมอร์ด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อน (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 160 °C และความดัน 1,500 psi เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ OBSH เกิดการสลายตัวเป็นฟองแก๊สกระจายตัวอยู่ในโพลีเมอร์ผสม ในขั้นตอนถัดไปจะทำให้โพลีเมอร์ผสมดังกล่าวเย็นตัวลง (Cooling) โดยปราศจากการให้แรงดันเป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ฟองแก๊สเกิดการขยายตัวและดันเนื้อโพลีเมอร์ออกจนกลายเป็นเซลล์โพลีเมอร์กระจายตัวอยู่ในแผ่นโพลีเมอร์ ขั้นตอนสุดท้ายนำแผ่นโพลีเมอร์ที่ได้ไปศึกษาสัญญาณวิทยาเพื่อวิเคราะห์ขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ และความหนาแน่นของเซลล์โพลีเมอร์ ศึกษาความหนาแน่นของโพลีเมอร์ ความสามารถในการกดอัด ความแข็งที่ผิว สมบัติทางความร้อน และเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นโพลีเมอร์

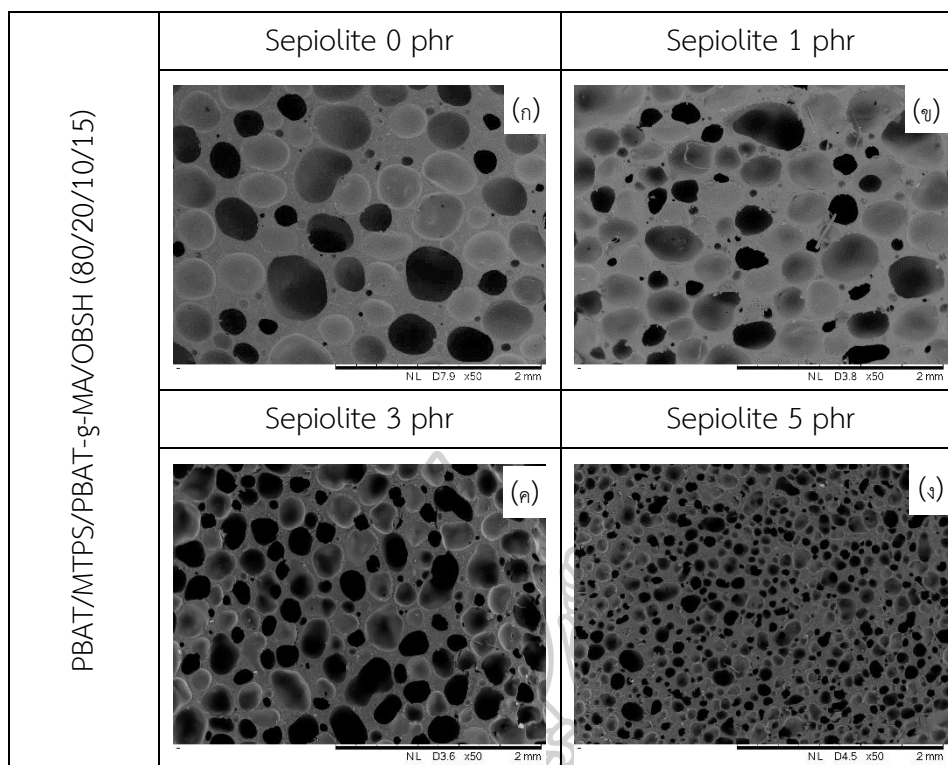
4.3.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

โดยทั่วไปการเกิดฟองแก๊สในกระบวนการขึ้นรูปโพลีเมอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่

- 1) การเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous nucleation) เป็นกระบวนการเกิดฟองแก๊สในขณะที่ยโพลีเมอร์ผสมหลอมเป็นเนื้อเดียวกันดังภาพที่ 4.27 (ก)
- 2) การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous nucleation) เป็นกระบวนการที่ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นบนผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง (Liquid-solid interphase) ซึ่งกระบวนการเกิดฟองแก๊สแบบนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเติมของแข็งที่ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) ดังภาพที่ 4.27 (ข)



ภาพที่ 4.27 แบบจำลองการเกิดฟองแก๊สในกระบวนการเกิดโพลีเมอร์ (ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Chenguang Yang และคณะ) [40]



ภาพที่ 4.28 ภาพ SEM ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ที่กำลังขยาย 50 เท่า

ก) PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr

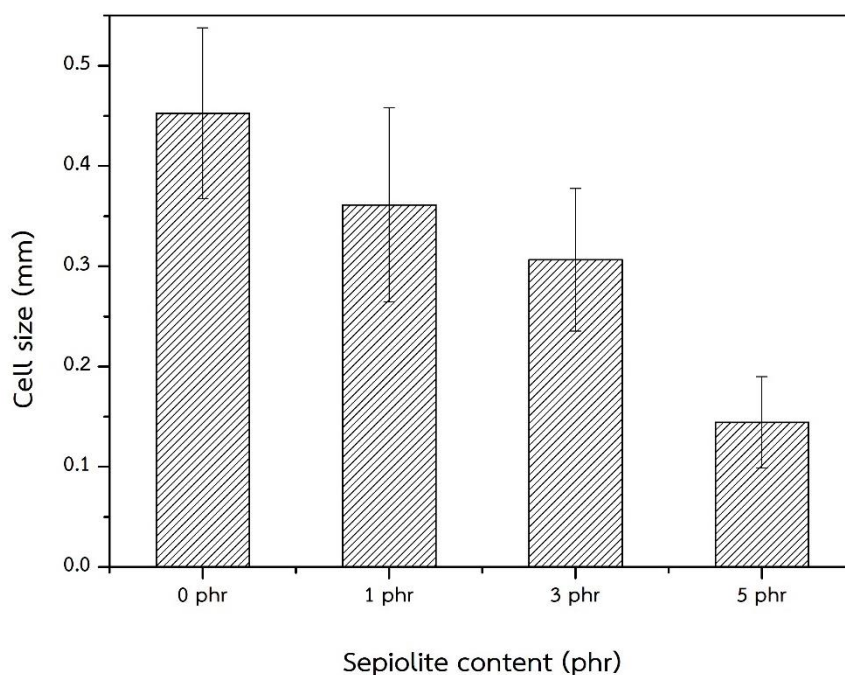
ข) PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite1phr

ค) PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite3phr

ง) PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite5phr

จากภาพ SEM ของแผ่นโพลีเมอร์ผสม PBAT/MTPS/PBAT-g-MA อัตราส่วน 80/20/10 ที่มีการเติม OBSH ปริมาณ 15 phr และมีการเติม Sepiolite ในปริมาณที่แตกต่างกันดังภาพที่ 4.28 พบว่าโพลีเมอร์ผสมมีเซลล์โพลีเมอร์เป็นรูทรงกลม และทรงรีที่มีขนาดแตกต่างกันตามปริมาณ Sepiolite โดยการเพิ่มปริมาณ Sepiolite จะส่งผลให้ขนาดของเซลล์โพลีเมอร์มีขนาดเล็กลงดังแสดงในภาพที่ 4.29 และตารางที่ 4.15 เนื่องจาก Sepiolite ทำหน้าที่เป็น Nucleating agent เหนี่ยวนำให้เกิดฟองแก๊สบนผิวสัมผัสระหว่าง Sepiolite และโพลีเมอร์หลอมเหลว ทำให้ฟองแก๊สในโพลีเมอร์หลอมเหลวมีปริมาณเพิ่มขึ้น ในระหว่างการขยายตัวฟองแก๊สจึงเกิดการชนกันได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ฟองแก๊สมีขนาดเล็กลง ดังนั้นขนาดของเซลล์โพลีเมอร์จึงมีขนาดเล็กลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ Sepiolite สอดคล้องกับงานวิจัยของ Antonio Esteban-Cubillo และคณะ [13] ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของการเติม Sepiolite ปริมาณ 0.25, 0.5, 1, 3 และ 5wt% ในกระบวนการเตรียมโพลีเมอร์จากพอลิสไตรีน (PS) ด้วยกระบวนการ

เกิดโฟมแบบกะ (Batch foaming process) พบว่าเมื่อปริมาณ Sepiolite เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เซลล์โฟมมีขนาดเล็กลง แต่ความหนาแน่นของเซลล์โฟมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณ Sepiolite ยังส่งผลให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเซลล์โฟมลดลง นั่นคือการเพิ่มปริมาณ Sepiolite ส่งผลให้ขนาดของเซลล์โฟมมีความสม่ำเสมอขึ้น



ภาพที่ 4.29 ขนาดของเซลล์โฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

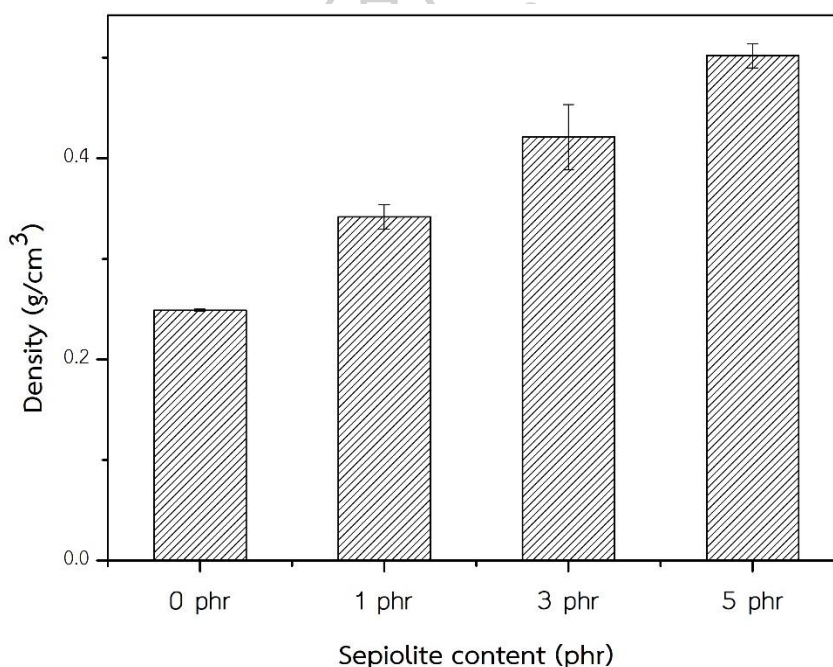
ตารางที่ 4.15 ขนาดของเซลล์โฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

Samples	Sepiolite (phr)	Cell size (mm)
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	0	0.45±0.08 ^a
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	1	0.36±0.10 ^b
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	3	0.31±0.07 ^c
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	5	0.14±0.04 ^d

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.3.2 การศึกษาความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

ผลการศึกษาความหนาแน่นของแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมที่ทดสอบด้วยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำแสดงในภาพที่ 4.30 และตารางที่ 4.16 พบว่าความหนาแน่นแปรผันตามปริมาณ Sepiolite เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ Sepiolite ส่งผลให้เซลล์โฟมมีขนาดเล็กลง โฟมจึงมีเนื้อพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Sepiolite สอดคล้องกับงานวิจัยของ Antonio Esteban-Cubillo และคณะ [13] ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของการเติม Sepiolite ปริมาณ 0.25, 0.5, 1, 3 และ 5wt% ในกระบวนการเตรียมโฟมจากพอลิสไตรีน (PS) ด้วยกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ (Batch foaming process) พบว่าความหนาแน่นของโฟมจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Sepiolite



ภาพที่ 4.30 ความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

ตารางที่ 4.16 ความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

Samples	Sepiolite (phr)	Density (g/cm ³)
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	0	0.25±0.01 ^d
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	1	0.34±0.01 ^c
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	3	0.42±0.03 ^b
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	5	0.50±0.01 ^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

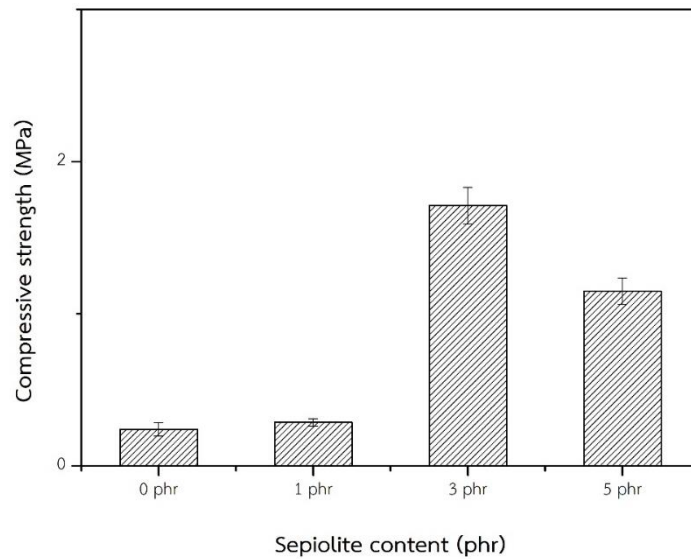
4.3.3 การศึกษาความสามารถในการกดอัดโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

การศึกษาความสามารถในการกดอัดของโพลีเมอร์ผสมทำด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D1621 โดยจะทำการกดชิ้นงานลงไป 50% ของความสูงเริ่มต้นของชิ้นงาน และทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานของการกดอัด (Compressive strength) และมอดูลัสกดอัด (Compressive modulus) ดังแสดงในภาพที่ 4.31 – 4.32 และตารางที่ 4.17

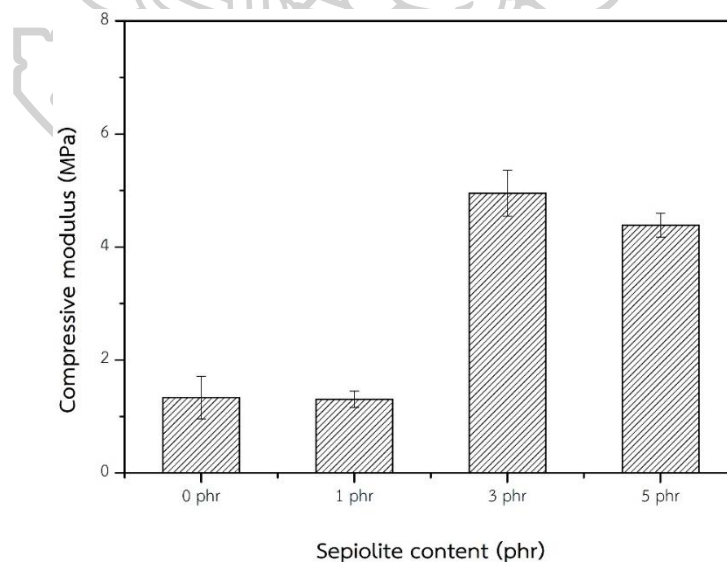
จากการวิเคราะห์ค่าความต้านทานของการกดอัด (Compressive strength) ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ดังภาพที่ 4.31 และตารางที่ 4.17 พบว่าโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite จนถึง 3 phr มีค่า Compressive strength เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ Sepiolite ส่งผลให้ความหนาแน่นของโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4.30 และตารางที่ 4.16 โพลีเมอร์ที่มีเนื้อโพลีเมอร์ที่ทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกดที่กระทำต่อแผ่นโพลีเมอร์มากขึ้น ส่งผลให้แผ่นโพลีเมอร์มีความสามารถในการต้านแรงกดได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ Sepiolite เป็น 5 phr ค่า Compressive strength มีค่าลดลง เนื่องจาก Sepiolite อาจเกิดการรวมตัวกันเป็นจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ทำให้แผ่นโพลีเมอร์มีความสามารถในการต้านทานการเสีรูปเนื่องจากการกดอัดได้ลดลง ค่า Compressive modulus จึงมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาค่ามอดูลัสกดอัด (Compressive modulus) ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ดังแสดงในภาพที่ 4.32 และตารางที่ 4.17 พบว่าโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite จนถึง 3 phr มีค่า Compressive strength เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ Sepiolite ส่งผลให้ความหนาแน่นของโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น แผ่นโพลีเมอร์จึงมีส่วนที่เป็นเนื้อโพลีเมอร์ที่ทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกดที่กระทำต่อแผ่นโพลีเมอร์มากขึ้น ส่งผลให้แผ่นโพลีเมอร์ผสมมีความสามารถในการต้านทาน

การเสีรूपเนื่องจากการกดอัดได้มากขึ้น ค่า Compressive modulus จึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ Sepiolite เป็น 5 phr ค่า Compressive Modulus มีค่าลดลง เนื่องจาก Sepiolite อาจเกิดการรวมตัวกันเป็นจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ทำให้แผ่นโพลีเมอร์มีความสามารถในการต้านทานการเสีรूपเนื่องจากการกดอัดได้ลดลง ค่า Compressive modulus จึงมีค่าลดลง



ภาพที่ 4.31 Compressive strength ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite



ภาพที่ 4.32 Compressive modulus ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

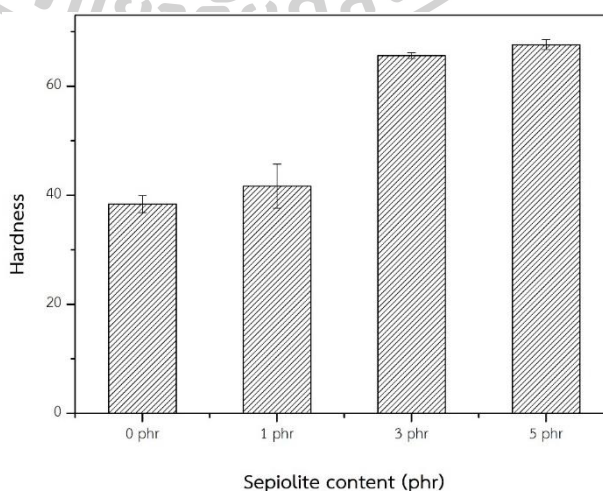
ตารางที่ 4.17 ความสามารถในการกดอัดโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

Samples	Sepiolite (phr)	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (MPa)
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/15)	0	0.24±0.04 ^c	1.34±0.38 ^b
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/15)	1	0.29±0.02 ^c	1.30±0.14 ^b
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/15)	3	1.71±0.12 ^b	4.95±0.41 ^a
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/15)	5	1.15±0.09 ^a	4.39±0.21 ^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.3.4 การศึกษาความแข็งของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

การศึกษาความแข็งของแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสมทำด้วยเครื่อง Durometer (Shore A) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 และวิเคราะห์ค่าความแข็งของแผ่นโฟมได้ดังภาพที่ 4.33 และตารางที่ 4.18 พบว่าค่าความแข็งของแผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสมแปรผันตามปริมาณ Sepiolite เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ Sepiolite ทำให้แผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสมมีความหนาแน่นมากขึ้นดังภาพที่ 4.30 แผ่นโฟมพอลิเมอร์ผสมจึงมีเนื้อพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกดที่กระทำต่อแผ่นโฟมมากขึ้น ส่งผลให้แผ่นโฟมมีความแข็งมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.33 ความแข็งของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

ตารางที่ 4.18 ความแข็งของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

Samples	Sepiolite (phr)	Hardness
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	0	38.40±1.56 ^b
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	1	41.67±4.02 ^b
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	3	65.60±0.53 ^a
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	5	67.60±0.92 ^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.3.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

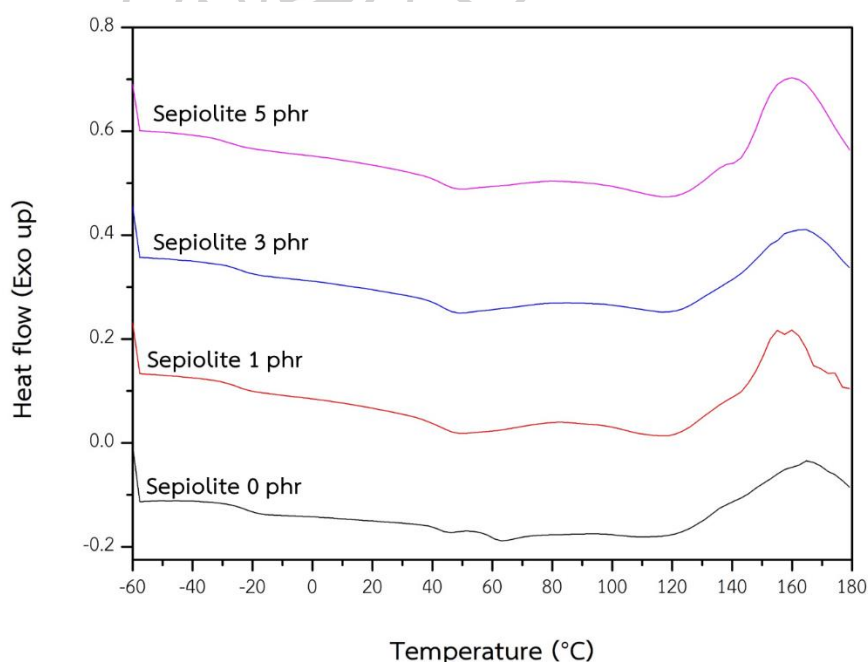
การศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ทำด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยใช้สภาวะในการทดสอบเช่นเดียวกับการศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นซีทโพลีเมอร์ผสมในตอนต้นที่ 1 และตอนที่ 2 จากนั้นวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melt crystallization temperature, T_m) และปริมาณผลึกจาก DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 และ 2 พร้อมทั้งวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c) จาก DSC thermogram ในขั้นตอนการการเย็นตัว (Cooling scan)

จากสมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ดังภาพที่ 4.34 ตารางที่ 4.19 พบว่าการเติม Sepiolite ส่งผลให้ค่า T_{m1} , T_{m2} , และปริมาณการเกิดผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโพลีเมอร์ผสมสูตรที่ไม่มีการเติม Sepiolite เนื่องจาก Sepiolite ทำหน้าที่เป็น Nucleating agent เหนี่ยวนำให้สายโซ่ PBAT ที่อยู่โดยรอบเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Smita Mohanty และ Sanjay K. Nayak [37] ที่พบว่าการเติมเคลย์ C30B ปริมาณ 3wt% ส่งผลให้โพลีเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ TPS มีค่า T_{m2} เพิ่มขึ้นจาก 120.53 °C เป็น 132.28 °C ส่วนปริมาณการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 12.89% เป็น 13.64% เมื่อเทียบกับโพลีเมอร์ผสมสูตรที่ไม่มีการเติมเคลย์ C30B

นอกจากนี้ยังพบว่าค่า T_g ของวัสดุภาค PBAT ในโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite อยู่ในช่วง -25.92 ถึง -25.46 °C โดยการเพิ่มปริมาณ Sepiolite ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า T_g อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) จาก DSC thermogram ในขั้นตอนการการเย็นตัว (Cooling scan) ดังภาพที่ 4.35 และตารางที่ 4.20 พบว่าการเพิ่มปริมาณ Sepiolite ส่งผลให้แผ่น โฟมพอลิเมอร์ผสมมีค่า T_c เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Sepiolite ทำหน้าที่เป็น Nucleating agent หนึ่ยวนำให้สายโซ่ PBAT ที่อยู่โดยรอบเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้เร็วขึ้น ค่า T_c จึงมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Smita Mohanty และ Sanjay K. Nayak [37] ที่พบว่า การเติมเคลย์ C30B ส่งผลให้ค่า T_c เพิ่มขึ้นจาก 75.30 °C เป็น 77.92 °C เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมเคลย์

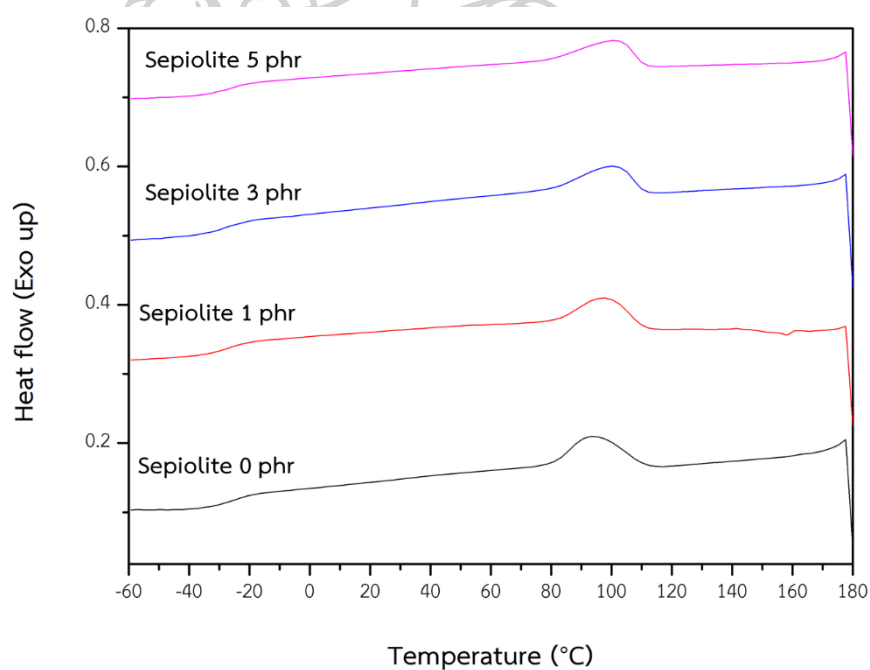
จากสมบัติทางความร้อนของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการวิเคราะห์ DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4.36 และตารางที่ 4.21 ไม่พบค่าอุณหภูมิการ หลอมของสายโซ่ส่วน BA (T_{m1}) แสดงให้เห็นว่าสายโซ่ส่วน BA เกิดผลึกได้ยาก เนื่องจากเกิดการ สลายตัวที่บริเวณ BA unit [38] อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 พบค่า T_g และค่า อุณหภูมิการหลอมของสายโซ่ส่วน BT (T_{m2}) อยู่ในช่วง -25.23 ถึง -23.63 °C และ 124.25 ถึง 125.20 °C ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าร้อยละความเป็นผลึกของโพนดังกล่าวอยู่ในช่วง 11.24 ถึง 13.92% โดยการเพิ่มปริมาณ Sepiolite ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเหล่านี้มากนัก



ภาพที่ 4.34 DSC thermogram ของโฟมพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ในขั้นตอน First heating

ตารางที่ 4.19 สมบัติทางความร้อนของโพลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ในขั้นตอน First heating

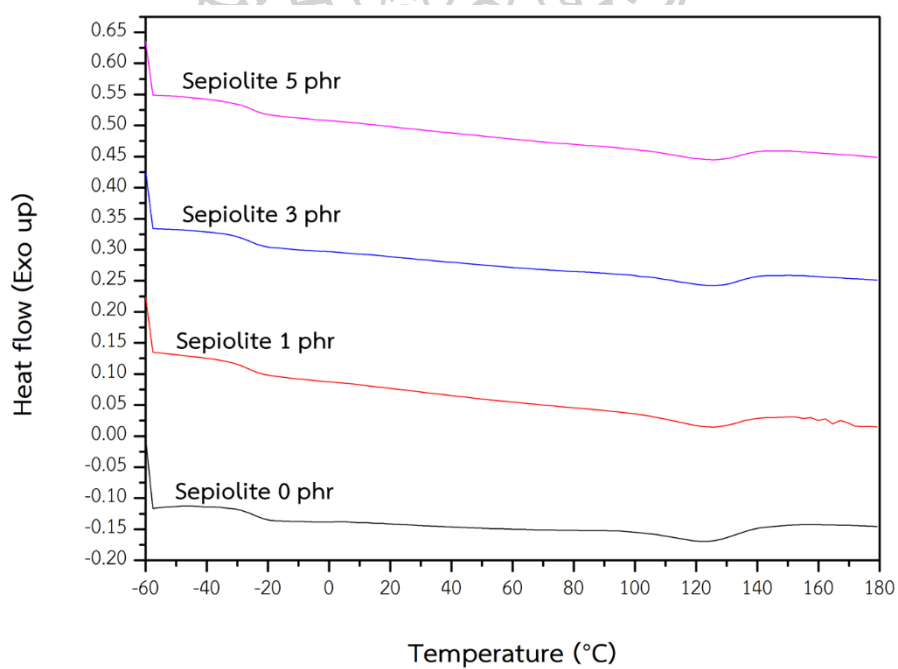
Samples	Sepiolite (phr)	T_g (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	Crystallinity (%)
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	0	-25.46	44.39	114.36	11.72
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	1	-25.46	46.84	118.04	11.54
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	3	-25.92	46.80	118.21	12.85
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	5	-25.85	48.58	119.45	13.64



ภาพที่ 4.35 DSC thermogram ของโพลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ในขั้นตอน Cooling

ตารางที่ 4.20 สมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ในขั้นตอน Cooling

Samples	Sepiolite (phr)	T _c (°C)
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	0	93.60
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	1	97.46
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	3	100.46
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	5	102.44



ภาพที่ 4.36 DSC thermogram ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ในขั้นตอน Second heating

ตารางที่ 4.21 สมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ในขั้นตอน

Second heating

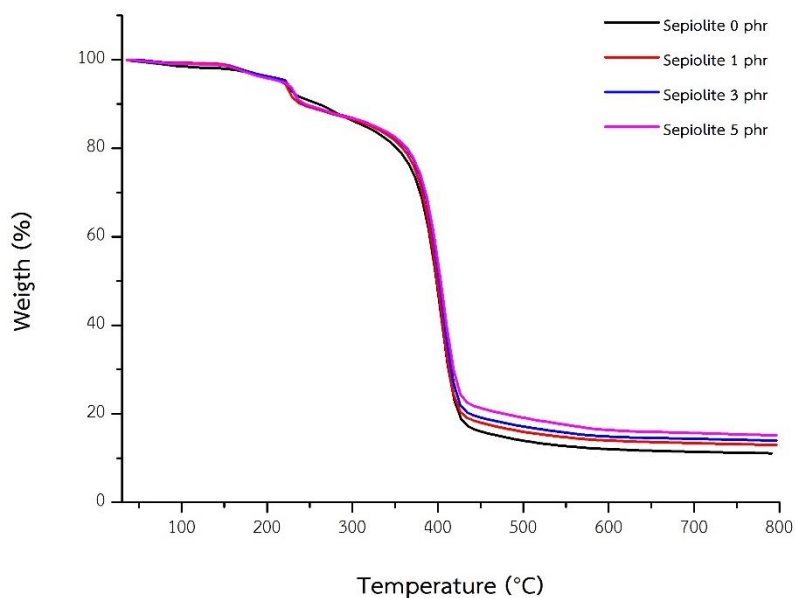
Samples	Sepiolite (phr)	T _g (°C)	T _{m2} (°C)	Crystallinity (%)
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	0	-25.68	123.20	10.59
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	1	-25.23	124.25	11.24
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	3	-24.63	125.02	12.76
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	5	-23.63	125.20	13.92

4.3.6 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

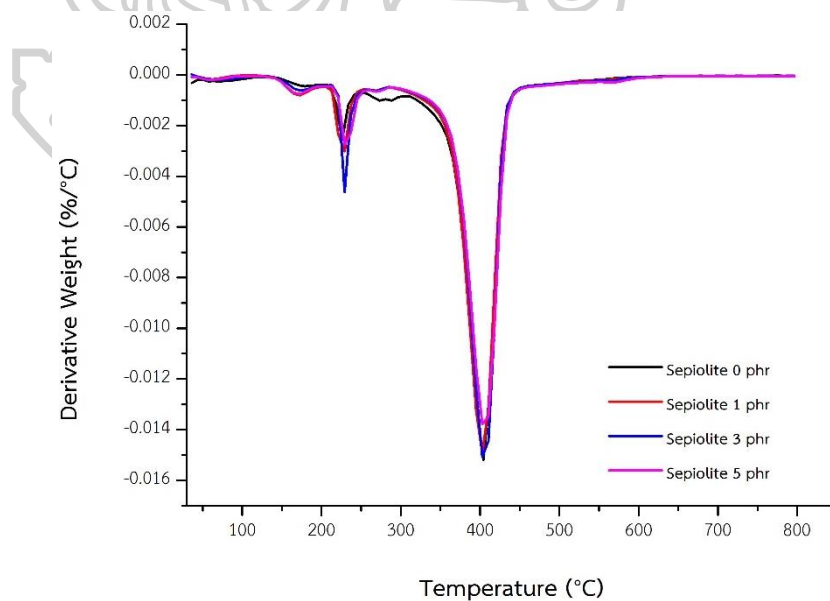
การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ทำได้โดยการทดสอบด้วยเทคนิค TGA เช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 2 จาก TGA thermogram และ DTG thermogram ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite ดังภาพที่ 4.37 และ 4.38 พบว่าโพลีเมอร์มีการสลายตัวทางความร้อน 3 ขั้นตอน โดยขั้นที่ 1 ปรากฏที่อุณหภูมิช่วง 146 ถึง 194 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้ OBSH เกิดการแตกตัวเป็นฟองแก๊ส ขั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวทางความร้อนของกลีเซอรอลที่อยู่ใน MTPS ที่อุณหภูมิช่วง 215 ถึง 278 °C และขั้นที่ 3 เป็นการสลายตัวทางความร้อนของ PBAT ที่อุณหภูมิช่วง 365 ถึง 432 °C

พิจารณาอิทธิพลของ Sepiolite ต่อเสถียรภาพทางความร้อนจากภาพที่ 4.37 และ 4.38 และตารางที่ 4.22 พบว่าการเพิ่มปริมาณ Sepiolite ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุภาค MTPS และวัสดุภาค PBAT นั้นแสดงว่าการเติม Sepiolite ในงานวิจัยนี้ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน โดยทั่วไป Sepiolite มักถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ เนื่องจาก Sepiolite ทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อน [41] เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sifat Terma และคณะ [42] ที่ได้ปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของ EPDM ด้วยการเติม Sepiolite ปริมาณ 10, 20, 30 และ 70 phr จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าการเติม Sepiolite ส่งผลให้วัสดุคอมพอสิตที่ได้มีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น เนื่องจาก Sepiolite มีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นใย (Fibrous structure) จึงประพฤติตัวเป็นสิ่งกีดขวาง (Barrier) พลังงานความร้อนที่จะเข้าไปยังสายโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างแบบเส้นใยของ Sepiolite ยังส่งผลให้ Sepiolite กระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ ทำให้ Sepiolite ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ นำไปสู่การหน่วง

กระบวนการสลายตัวทางความร้อน อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มีการเติม Sepiolite สูงสุดที่ปริมาณ 5 phr ซึ่งเป็นปริมาณไม่มากพอที่ทำให้เห็นการปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 4.37 TGA thermogram ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite



ภาพที่ 4.38 DTG thermogram ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

ตารางที่ 4.22 เสถียรภาพทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม Sepiolite

Samples	Sepiolite (phr)	Degradation temperature (°C)	
		MTPS	PBAT
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	0	223.67	403.81
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	1	226.54	403.96
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	3	229.57	405.81
PBAT/MTPS/PBAT-g-MA/OBSH (80/20/10/10)	5	231.85	405.95



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการเตรียมโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS ที่มีการเติม PBAT-g-MA เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ เติมน OBSH เพื่อทำหน้าที่เป็นสารฟลู (Blowing agent) และเติม Sepiolite เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยก่อฟองอากาศ (Nucleating agent) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของ OBSH และ Sepiolite ที่ส่งผลต่อขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์ผสม ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

งานวิจัยตอนที่ 1 การเตรียมโพลีเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนักทั้งที่ไม่มีและมีการเติม PBAT-g-MA จากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ MTPS จะส่งผลให้อนุภาคของ MTPS มีการกระจายตัวในวัฏภาคของ PBAT ได้ดีขึ้น แสดงว่าการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้โพลีเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น ในทำนองเดียวกันเมื่อมีการเติม PBAT-g-MA อนุภาคของ MTPS จะกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคหลักของ PBAT ได้ดีมากขึ้น

จากการทดสอบความสามารถในการดึงยืดของแผ่นซีทโพลีเมอร์ผสม พบว่าการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้โพลีเมอร์ผสมที่ได้มี Tensile strength และ Elongation at break มากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากความเข้ากันได้ดีของโพลีเมอร์ผสม โดยโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติม PBAT-g-MA จะมี Tensile strength และ Elongation at break มากกว่าโพลีเมอร์ผสมสูตรที่ไม่มี การเติม PBAT-g-MA ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม PBAT-g-MA ส่งผลให้โพลีเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณา Young's modulus พบว่าการเพิ่มปริมาณ MTPS จะส่งผลให้ค่า Young's modulus ลดลง เนื่องจาก MTPS มีความเปราะกว่า PBAT นอกจากนี้ยังพบว่า การเติม PBAT-g-MA ยังส่งผลให้ค่า Young's modulus ลดลงด้วยเช่นกัน

จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC พบว่าการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้โพลีเมอร์ผสมมีปริมาณผลึก และค่า T_c เพิ่มขึ้น เนื่องจาก MTPS ประพฤติตัวเป็น Nucleating agent เหนี่ยวนำให้สายโซ่ PBAT ที่อยู่โดยรอบเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่ยึดสาย

โซ่พอลิเมอร์ (Physical crosslink) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการสั้นและเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นส่งผลให้ค่า T_g เพิ่มขึ้น โดยพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติม PBAT-g-MA จะมีการยึดติดกันได้ดีกว่าสูตรที่ไม่ได้เติม ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น ปริมาณผลึกและค่า T_c จึงมากขึ้น โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่ยึดสายโซ่พอลิเมอร์ (Physical crosslink) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการสั้นและเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นค่า T_g และ T_m จึงเพิ่มขึ้น

งานวิจัยตอนที่ 2 การเตรียมโพลีพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBAT และ MTPS อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ที่มีการเติม PBAT-g-MA และมีการเติม OBSH เพื่อทำหน้าที่เป็นสารฟู (Blowing agent) ในปริมาณ 10, 15 และ 20 phr จากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่าการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้ขนาดของเซลล์โพลีมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาอิทธิพลของ OBSH พบว่าการเพิ่มปริมาณ OBSH ส่งผลให้เซลล์โพลีมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ OBSH ทำให้มีปริมาณฟองแก๊สเกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นโพลีมากขึ้น

จากการศึกษาความหนาแน่นพบว่าความหนาแน่นของโพลีพอลิเมอร์ผสมแปรผันตามปริมาณ MTPS เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้โพลีพอลิเมอร์ผสมมีผนังเซลล์กว้างขึ้น เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ OBSH พบว่าการเติม OBSH ปริมาณ 15 phr ทำให้ได้โพลีพอลิเมอร์ผสมที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุด

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าค่า Compressive strength และ Compressive modulus ที่แสดงถึงความสามารถในการกดอัดของโพลีพอลิเมอร์ผสม และค่าความแข็งของโพลีพอลิเมอร์ผสมแปรผันตามปริมาณ MTPS เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ MTPS ส่งผลให้โพลีพอลิเมอร์ผสมมีความหนาแน่นมากขึ้น ในทางตรงข้ามเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณ OBSH พบว่าค่า Compressive strength ค่า Compressive modulus และค่าความแข็งของโพลีพอลิเมอร์ผสมแปรผกผันกับปริมาณ OBSH เป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณ OBSH ส่งผลให้มีฟองแก๊สขนาดใหญ่เกิดขึ้นแผ่นโพลีจึงมีส่วนที่เป็นเนื้อพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกดที่กระทำต่อแผ่นโพลีน้อยลง

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าปริมาณ MTPS และ OBSH ไม่ส่งผลให้ค่า T_g , T_m , T_c เปลี่ยนแปลง

จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าปริมาณ MTPS และ OBSH ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเสถียรภาพทางความร้อน

จากงานวิจัยตอนที่ 2 ผู้วิจัยได้ทำการเลือกโพลีเมอร์ผสมที่มีสมบัติที่ดี โดยพิจารณาจากความสม่ำเสมอของขนาดเซลล์โพลี ความหนาแน่น ซึ่งได้แก่ โพลีเมอร์ผสมอัตราส่วน 80/20/10 ที่มีการเติม OBSH 15phr เพื่อดำเนินงานวิจัยตอนที่ 3

งานวิจัยตอนที่ 3 ศึกษาอิทธิพลของการเติม Sepiolite ที่มีผลต่อสมบัติของโพลีเมอร์ผสมสูตร PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr โดยทำการเติม Sepiolite ที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 1, 3 และ 5 phr จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM และการศึกษาความหนาแน่น พบว่าการเพิ่มปริมาณ Sepiolite ส่งผลให้เซลล์โพลีมีขนาดเล็กลง ความหนาแน่นของโพลีจึงเพิ่มขึ้น เนื่องจาก Sepiolite ทำหน้าที่เป็น Nucleating agent เหนี่ยวนำให้มีฟองแก๊สเกิดบนผิวสัมผัสระหว่าง Sepiolite และโพลีเมอร์หลอมเหลวมากขึ้น ในระหว่างการขยายตัวฟองแก๊สจึงเกิดการชนกันได้เร็วขึ้น

จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าการเพิ่มปริมาณ Sepiolite ส่งผลให้โพลีเมอร์ผสมมีค่า Compressive strength ค่า Compressive modulus และค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ Sepiolite ส่งผลให้โพลีมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โพลีจึงมีเนื้อโพลีเมอร์ที่ทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกดที่กระทำต่อแผ่นโพลีมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ Sepiolite เป็น 5 phr ค่า Compressive strength และค่า Compressive modulus มีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก Sepiolite เกิดการรวมตัวกันเป็นจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ทำให้โพลีมีความสามารถในการต้านทานแรงกดที่กระทำต่อแผ่นโพลีลดลง

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าค่า T_c แปรผันตามปริมาณ Sepiolite เนื่องจาก Sepiolite ประพฤติตัวเป็น Nucleating agent เหนี่ยวนำให้สายโซ่ PBAT ที่อยู่โดยรอบเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น

จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าการเติม Sepiolite ในงานวิจัยนี้ไม่ส่งผลให้โพลีเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น เนื่องจากเติม Sepiolite ในปริมาณที่น้อยเกินไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมแผ่นโพลีเอเธอร์ผสมโดยการเติม OBSH ซึ่งจัดเป็นสารฟลูทิงเอเจนต์ (Chemical blowing agent) ที่มีการสลายตัวทางความร้อนได้แก๊สไนโตรเจนและน้ำที่อุณหภูมิ 150-160 °C ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ซึ่งเป็นระบบผสมแบบปิดส่งผลให้มีความร้อนสะสมอยู่ภายในกระบอกลอม จึงทำให้ OBSH เกิดการสลายตัวเป็นฟองแก๊สในปริมาณที่มากเกินไปทำให้โพลีเอเธอร์ผสมเหลวจนไม่สามารถคงรูปเป็นแผ่นโพลีเอเธอร์ได้ ผู้วิจัยจึงแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการผสม OBSH เข้ากับโพลีเอเธอร์ผสมด้วยเครื่อง Two-roll mill ซึ่งเป็นระบบผสมแบบเปิดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสลายตัวเป็นฟองแก๊สในขั้นตอนนี้ จากนั้นจึงนำโพลีเอเธอร์ผสมที่มีการเติม OBSH ไปขึ้นรูปให้เป็นแผ่นโพลีเอเธอร์ด้วยเครื่อง Compression molding ซึ่งสามารถผลิตแผ่นโพลีเอเธอร์ที่ใส่น้อยไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นหากต้องการต่อยอดงานวิจัยนี้ควรแก้ไขปัญหาดังกล่าวดังนี้

5.2.1 เพื่อให้สามารถเตรียมแผ่นโพลีเอเธอร์ได้ในปริมาณมากๆ (Mass production) ควรเตรียมแผ่นโพลีเอเธอร์ด้วยวิธีการลดความดัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ฟองแก๊สเกิดการก่อตัว (Bubble formation) กระจายในวัฏภาคของโพลีเอเธอร์โดยอาศัยการลดความดัน โดยทั่วไปการเตรียมแผ่นโพลีเอเธอร์ด้วยวิธีการนี้สามารถทำได้โดยฉีดสารฟลูทิงเอเจนต์เข้าไปในโพลีเอเธอร์เหลวที่อยู่ในกระบอกลอมของเครื่อง Twin-screw extruder จากนั้นเมื่อโพลีเอเธอร์เหลวไหลออกจากกระบอกลอมความดันจะลดลง ส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อม (Pressure drop) บริเวณหัวดายนำไปสู่การก่อตัวและการขยายตัวของฟองแก๊สกระจายตัวในวัฏภาคโพลีเอเธอร์

5.2.2 เพื่อให้สามารถนำแผ่นโพลีเอเธอร์ที่เตรียมได้ไปประยุกต์ใช้เป็นโพลีเอเธอร์บรรจุภัณฑ์กันกระแทกจึงควรมีการทดสอบการกระแทกกระดอน (Rebound resilience) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการกลับคืนสู่รูปร่างเดิมของวัสดุหลังจากได้รับแรงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างชั่วคราว



ภาคผนวก

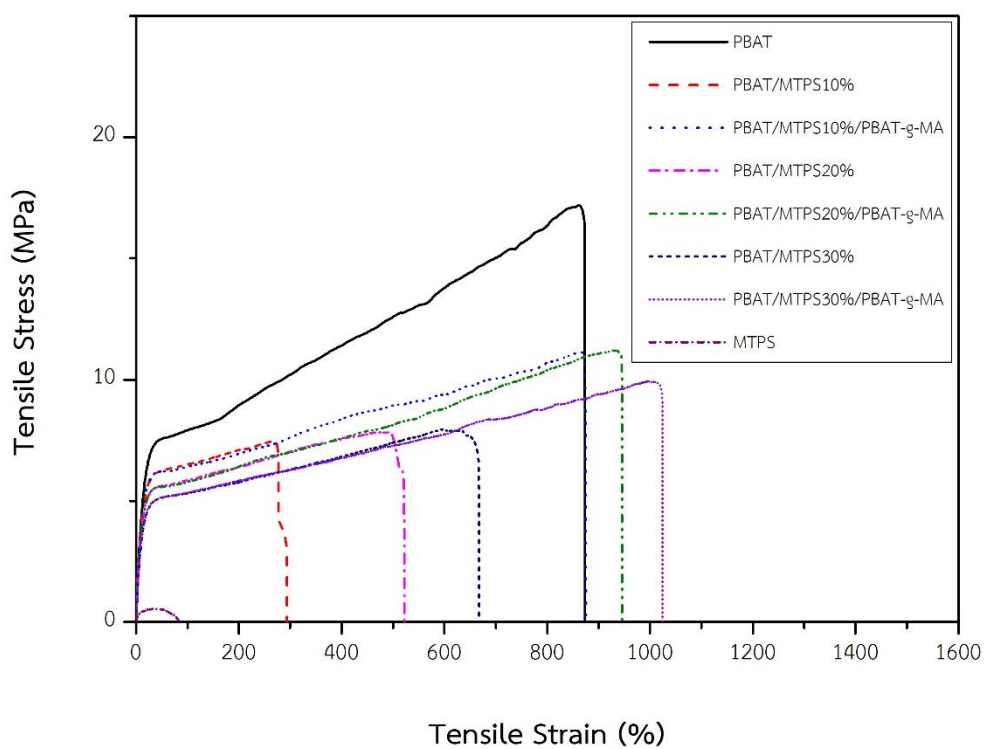


ภาคผนวก ก
ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ

ภาคผนวก ก

ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ

ก.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบสมบัติการดึงยืด (Tensile testing)



ภาพภาคผนวก ก.1 Stress-strain curve ของพอลิเมอร์ผสม

ตารางภาคผนวก ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

Sample	No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT	1	17.12	45.79	962.01
	2	16.99	45.57	827.56
	3	14.81	48.51	588.08
	4	15.70	46.07	770.66
	5	15.42	48.33	840.64
	6	17.18	46.03	873.36
	7	18.79	42.52	915.66
	8	18.45	47.59	907.29
	9	18.24	45.46	883.47
	10	20.40	46.29	1105.30
	11	19.39	46.34	891.99
	12	18.82	47.05	930.40
	13	17.83	51.97	938.31
	14	20.21	43.49	1022.10
	15	16.00	49.24	814.59
	16	13.94	53.59	686.38
	17	19.99	47.38	964.85
	18	18.96	48.41	775.34
	19	19.91	48.03	781.72
	20	15.09	53.11	735.33
	Mean		17.66	47.54
S.D.		1.97	2.84	119.30

Sample	No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/MTPS10%	1	9.60	63.44	578.27
	2	8.75	62.42	435.01
	3	7.59	63.18	303.05
	4	7.44	62.53	309.79
	5	6.37	64.67	181.31
	6	6.38	60.63	131.49
	7	8.65	58.17	465.93
	8	7.24	62.63	297.55
	9	7.71	61.19	415.36
	10	6.82	62.45	127.07
	11	6.64	63.11	151.15
	12	7.43	57.97	293.38
	13	10.46	56.60	723.33
	14	7.79	61.85	356.03
	15	6.17	73.08	82.74
	Mean	7.67	62.26	323.43
	S.D	1.23	3.75	179.78

Sample	No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/MTPS20%	1	9.52	48.51	612.77
	2	9.10	52.86	675.42
	3	9.47	50.63	659.74
	4	7.70	52.97	500.17
	5	7.83	54.34	521.92
	6	8.59	48.94	468.20
	7	8.35	51.70	520.85
	8	9.16	47.43	603.67
	9	7.84	47.08	378.95
	10	7.31	51.71	407.44
	11	6.52	50.08	278.80
	12	6.21	46.76	178.56
	13	9.69	47.92	720.16
	14	9.55	45.66	708.21
	15	7.72	51.68	438.36
		Mean	8.30	49.88
	S.D	1.12	2.63	158.29

Sample	No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/MTPS30%	1	9.08	48.33	761.82
	2	6.08	51.10	275.38
	3	7.86	45.01	511.28
	4	8.89	46.84	696.57
	5	7.38	45.91	584.01
	6	6.43	49.99	344.61
	7	8.82	41.85	642.99
	8	9.76	40.93	903.96
	9	8.25	45.71	675.50
	10	7.95	44.31	667.23
	11	7.59	41.88	592.08
	12	7.05	49.80	524.34
	13	7.40	46.56	487.92
	14	7.69	43.81	484.00
	15	7.03	43.95	416.75
		Mean	7.82	45.73
	S.D	1.01	3.10	162.94

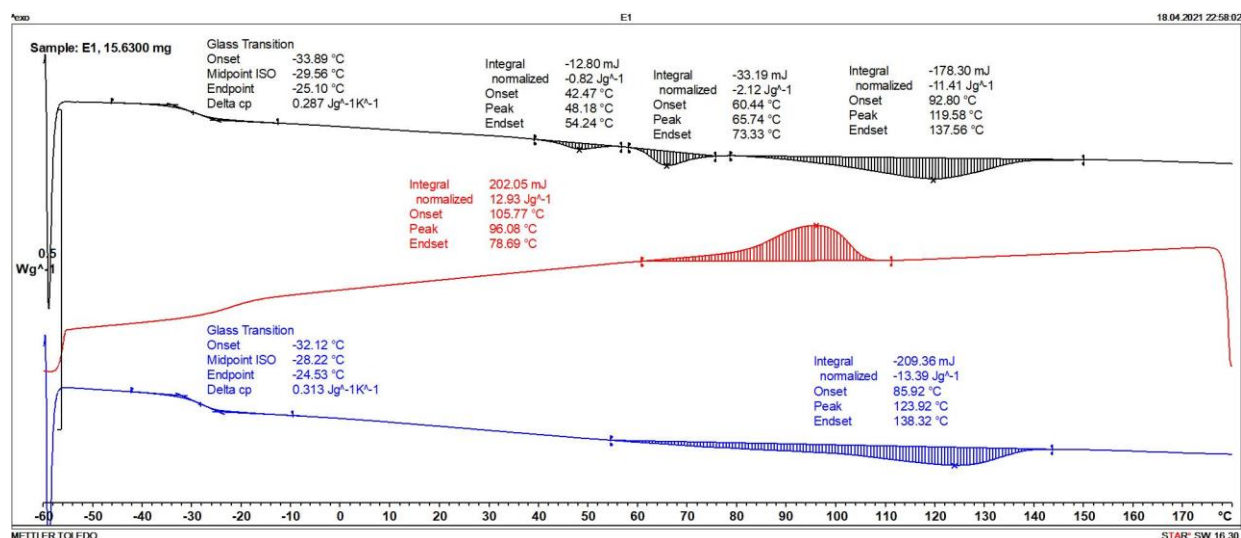
Sample	No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA	1	12.98	49.71	1179.30
	2	11.51	51.76	989.56
	3	9.87	51.57	787.07
	4	9.30	49.81	647.28
	5	11.00	47.90	907.46
	6	12.57	47.11	1157.00
	7	10.68	52.68	837.97
	8	10.14	55.09	739.88
	9	11.46	52.92	965.00
	10	12.54	48.39	1084.30
	11	11.94	50.11	1001.40
	12	11.21	48.64	934.13
	13	11.12	51.06	874.95
	14	7.96	55.47	449.27
	15	10.79	50.73	917.64
		Mean	11.00	50.86
	S.D	1.32	2.46	191.22

Sample	No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA	1	11.54	45.62	1060.80
	2	10.02	47.17	907.73
	3	11.21	45.54	945.77
	4	10.30	39.84	855.34
	5	11.63	41.57	1020.10
	6	10.95	44.39	856.39
	7	11.74	48.61	1021.00
	8	10.73	45.72	886.02
	9	9.34	47.29	702.72
	10	10.37	45.26	917.16
	11	10.21	49.26	836.86
	12	10.31	50.77	947.02
	13	10.24	51.71	968.61
	14	10.45	48.18	919.34
	15	11.15	51.29	982.97
	Mean	10.68	46.81	921.86
	S.D	0.68	3.38	89.19

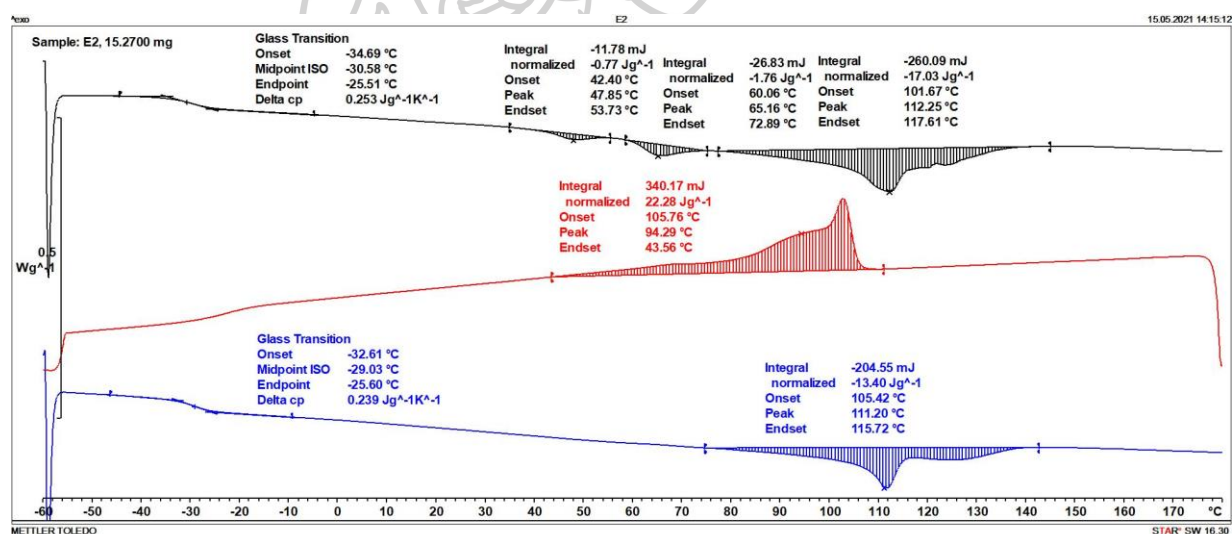
Sample	No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA	1	8.74	40.31	962.95
	2	10.35	39.90	1110.50
	3	6.22	37.59	340.28
	4	10.12	41.19	993.70
	5	9.11	41.26	884.36
	6	9.82	40.90	1031.50
	7	10.22	41.38	1074.90
	8	9.93	41.31	1024.40
	9	9.86	38.96	963.77
	10	9.28	42.71	971.82
	11	7.05	44.10	503.82
	12	8.54	43.38	771.40
	13	10.27	41.46	1052.30
	14	8.54	41.59	828.92
	15	7.43	44.98	625.65
	Mean	9.03	41.40	876.02
	S.D	1.28	1.89	225.44

Sample	No.	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
MTPS	1	9.08	48.33	761.82
	2	6.08	51.10	275.38
	3	7.86	45.01	511.28
	4	8.89	46.84	696.57
	5	7.38	45.91	584.01
	6	6.43	49.99	344.61
	7	8.82	41.85	642.99
	8	9.76	40.93	903.96
	9	8.25	45.71	675.50
	10	7.95	44.31	667.23
	11	7.59	41.88	592.08
	12	7.05	49.80	524.34
	13	7.40	46.56	487.92
	14	7.69	43.81	484.00
	15	7.03	43.95	416.75
	Mean	7.82	45.73	571.23
	S.D	1.01	3.10	162.94

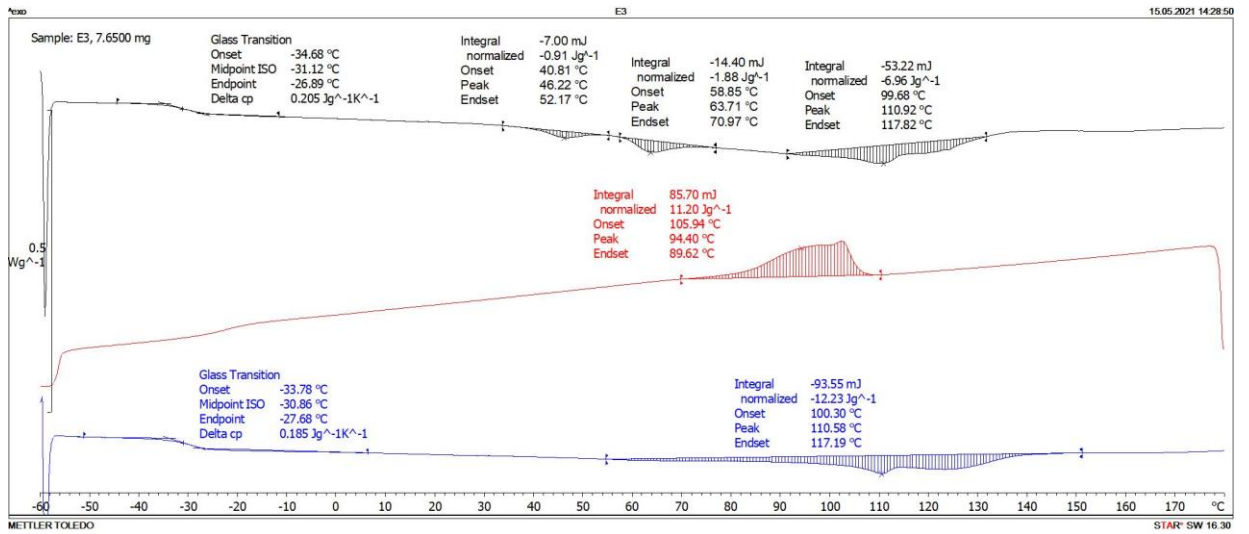
ก.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



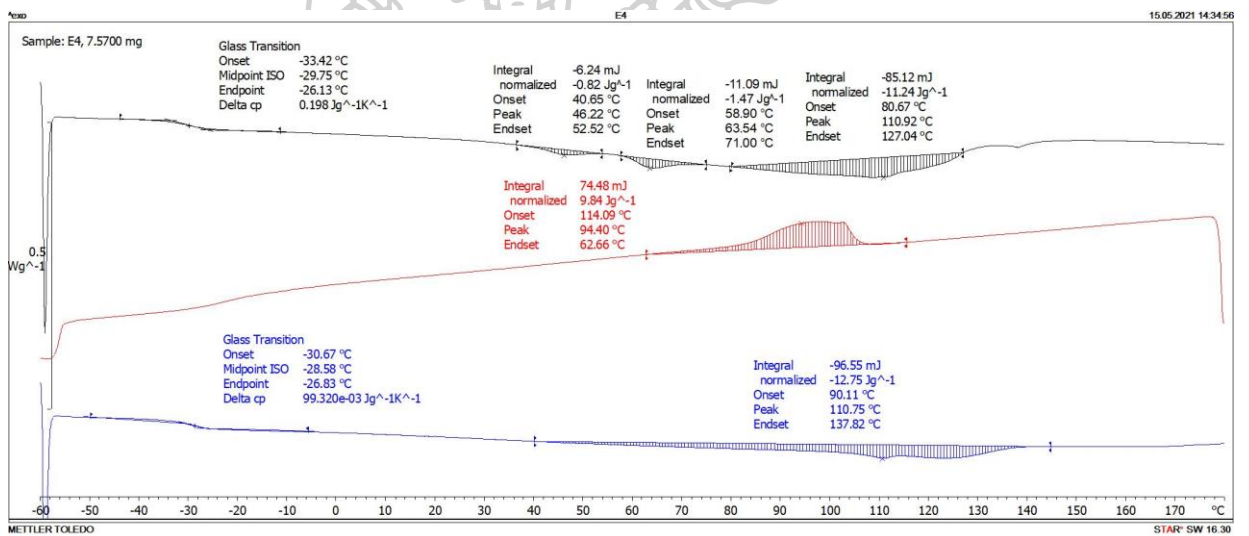
ภาพภาคผนวก ก.2 DSC thermogram ของ PBAT



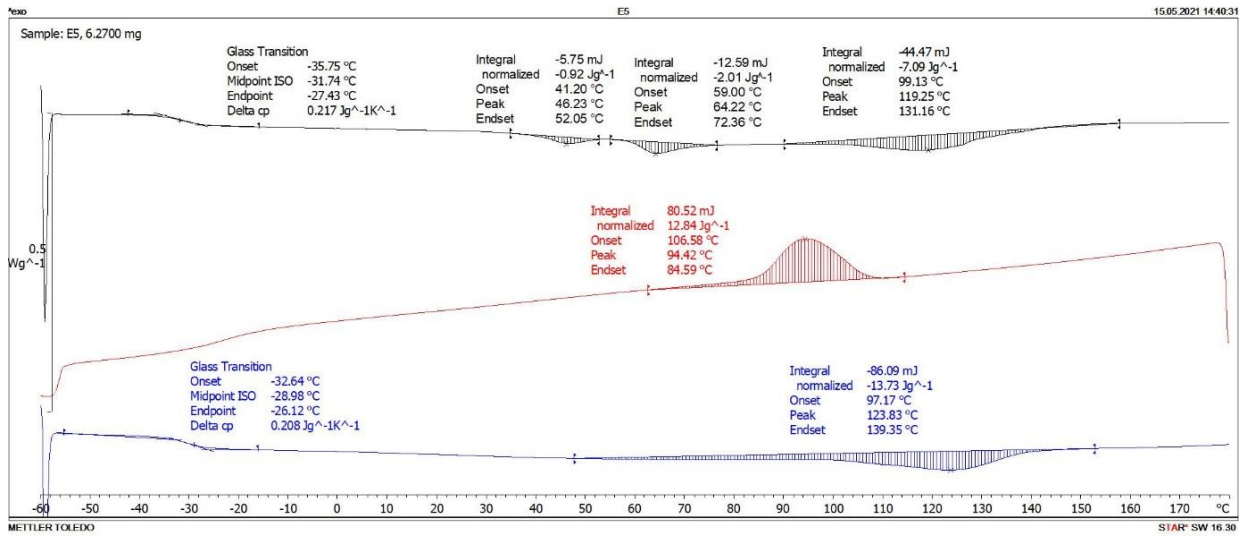
ภาพภาคผนวก ก.3 DSC thermogram ของ PBAT/MTSPS10%



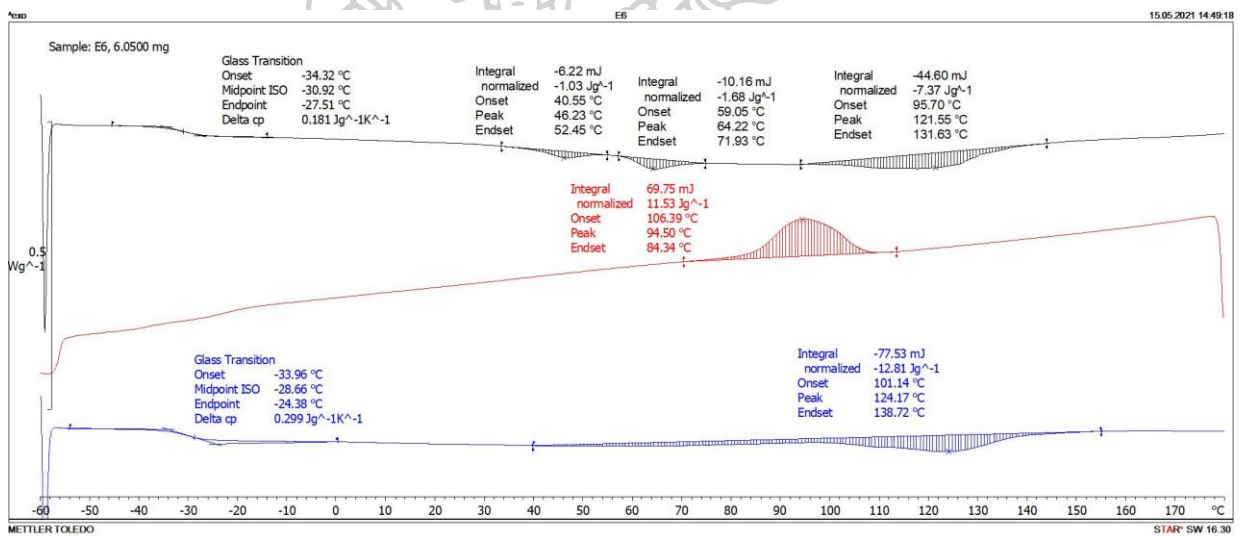
ภาพภาคผนวก ก.4 DSC thermogram ของ PBAT/MTSPS20%



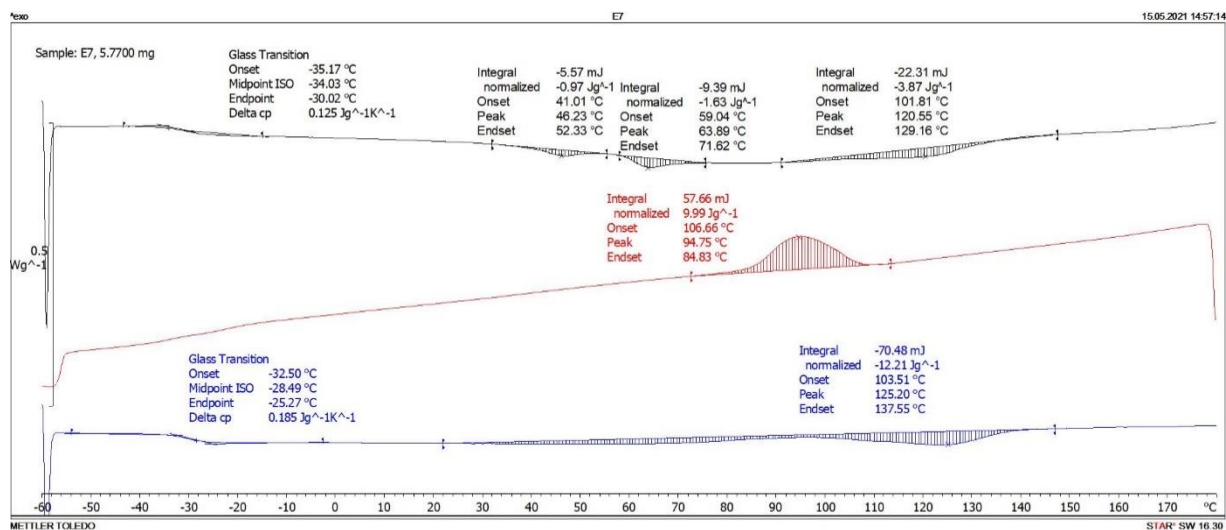
ภาพภาคผนวก ก.5 DSC thermogram ของ PBAT/MTSPS30%



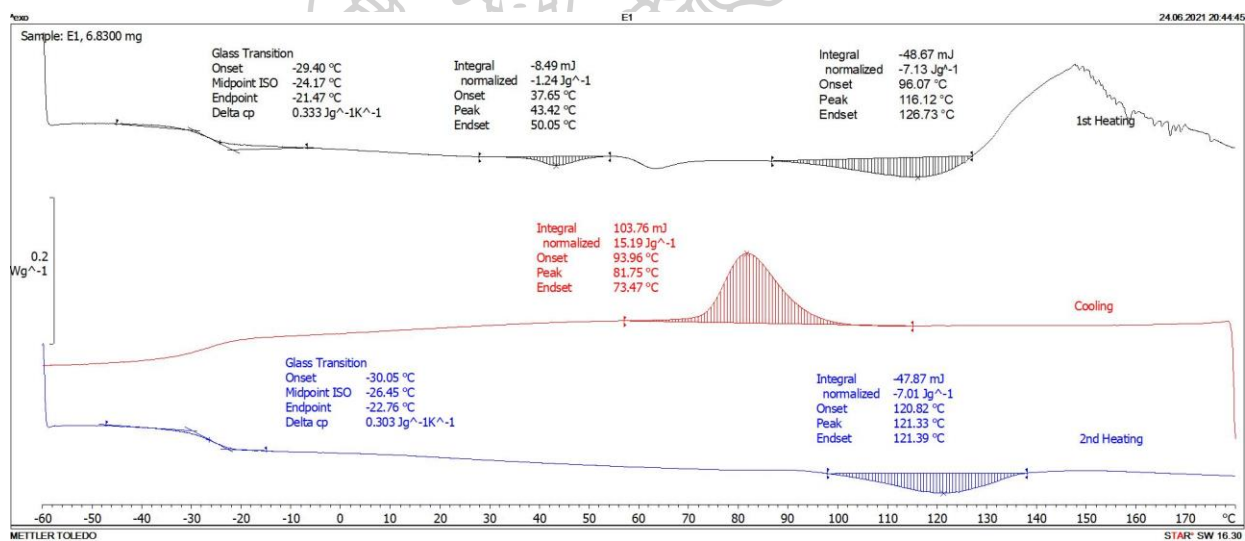
ภาพภาคผนวก ก.6 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA



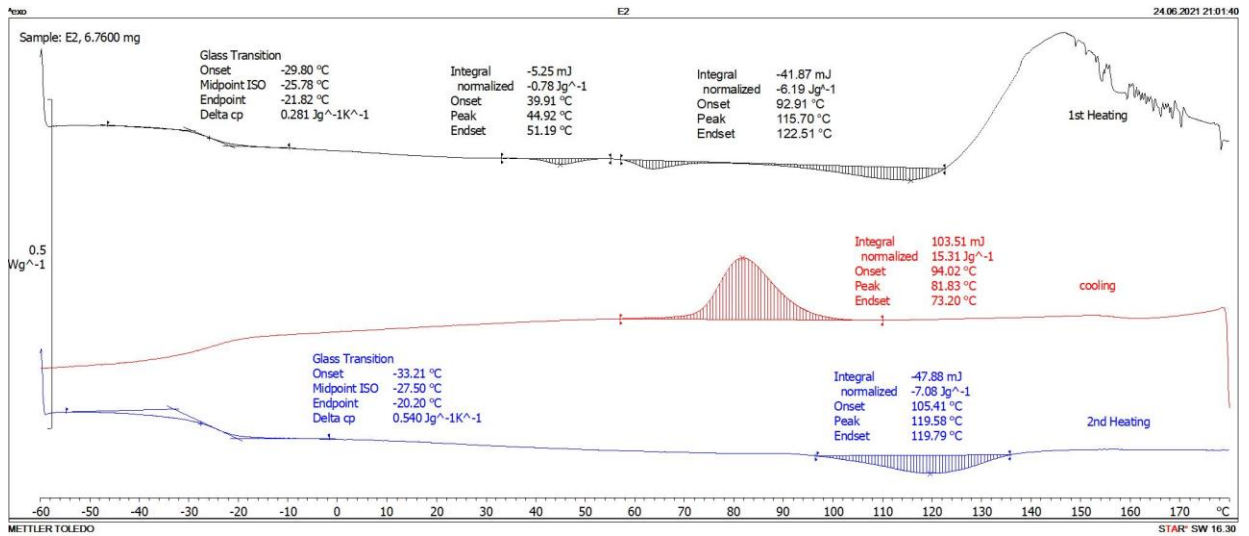
ภาพภาคผนวก ก.7 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA



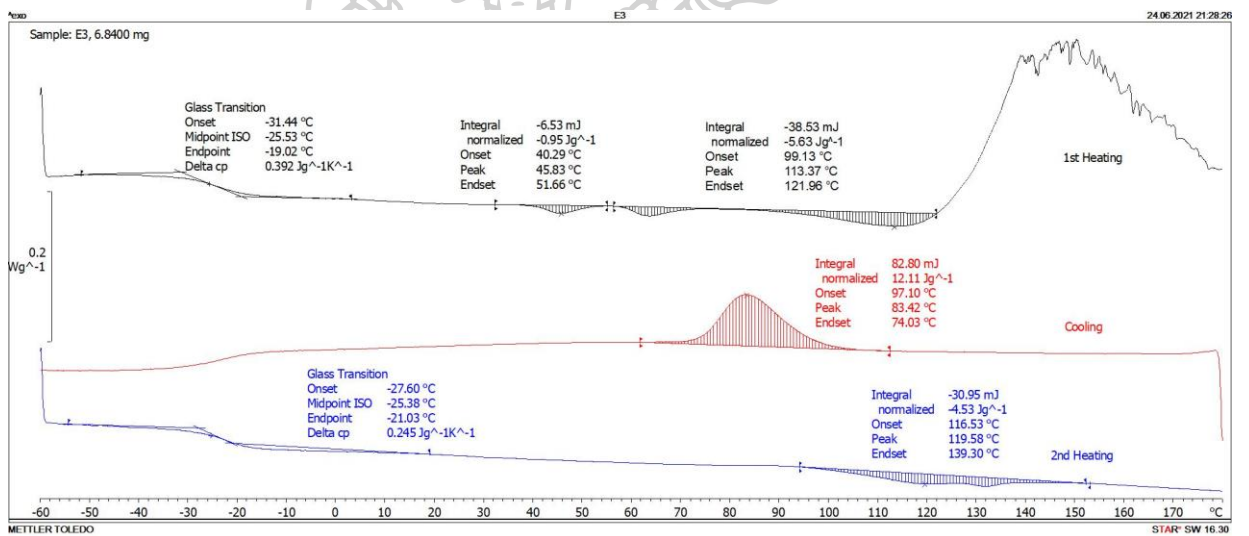
ภาพภาคผนวก ก.8 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA



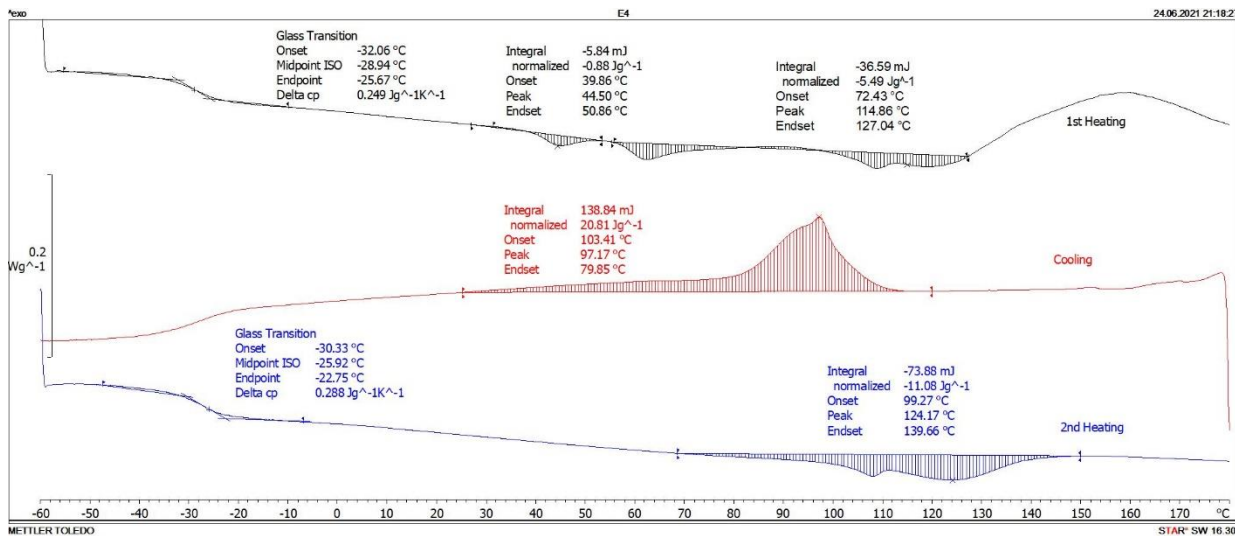
ภาพภาคผนวก ก.9 DSC thermogram ของ PBAT/OBSH10phr



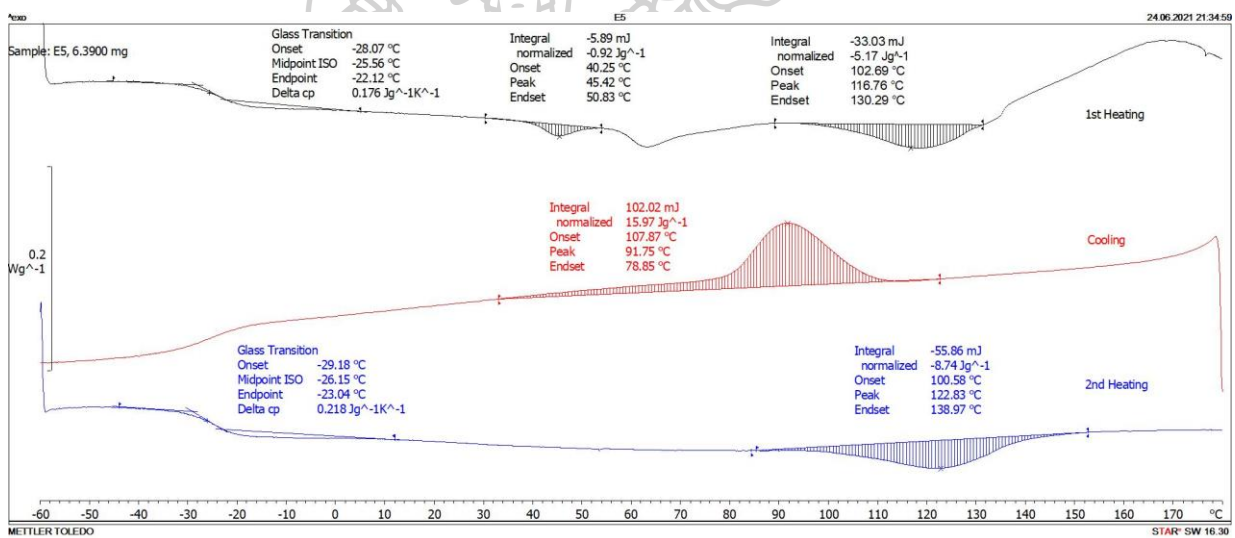
ภาพภาคผนวก ก.10 DSC thermogram ของ PBAT/OBSH15phr



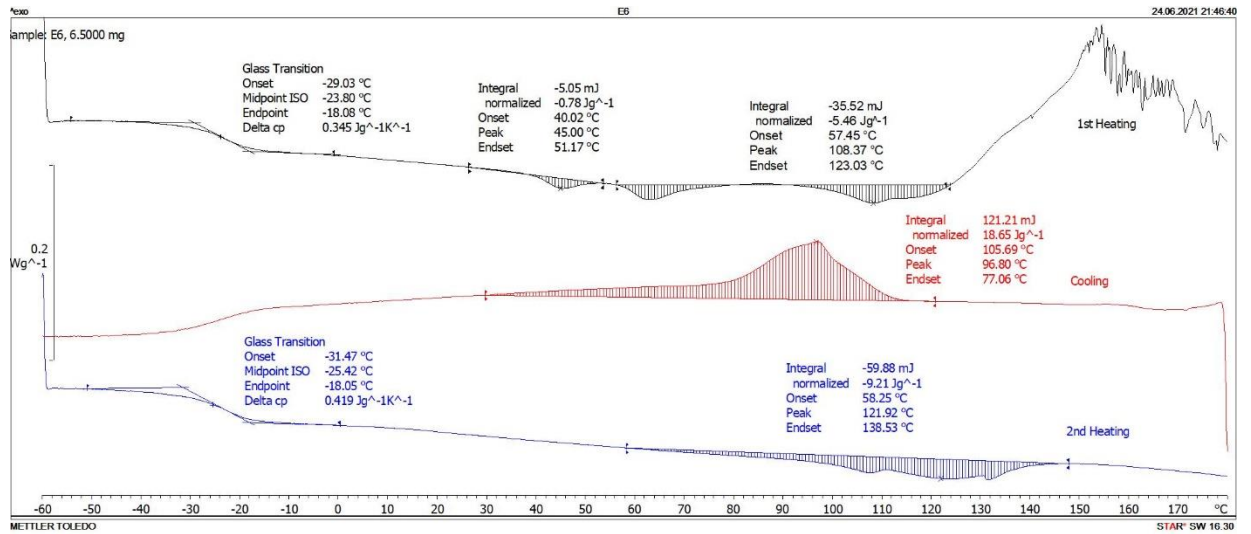
ภาพภาคผนวก ก.11 DSC thermogram ของ PBAT/OBSH20phr



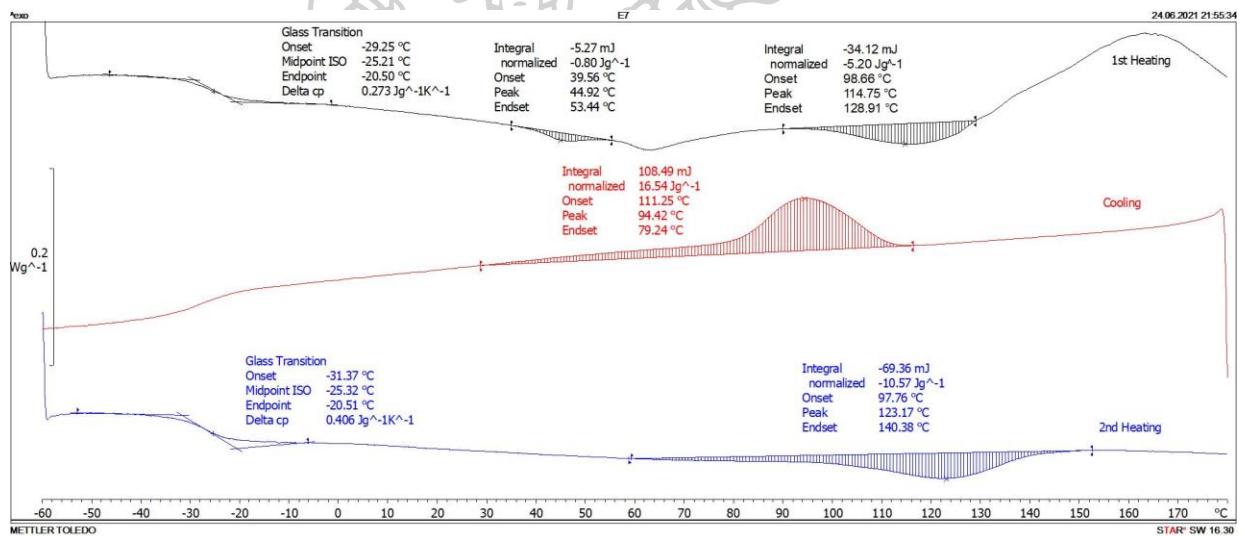
ภาพภาคผนวก ก.12 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH10phr



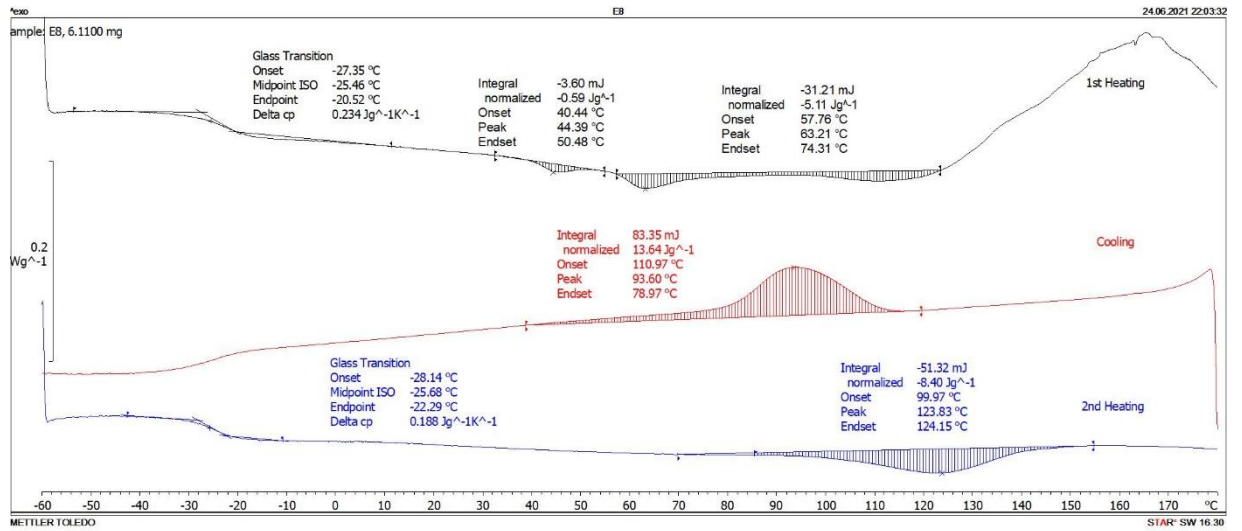
ภาพภาคผนวก ก.13 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH15phr



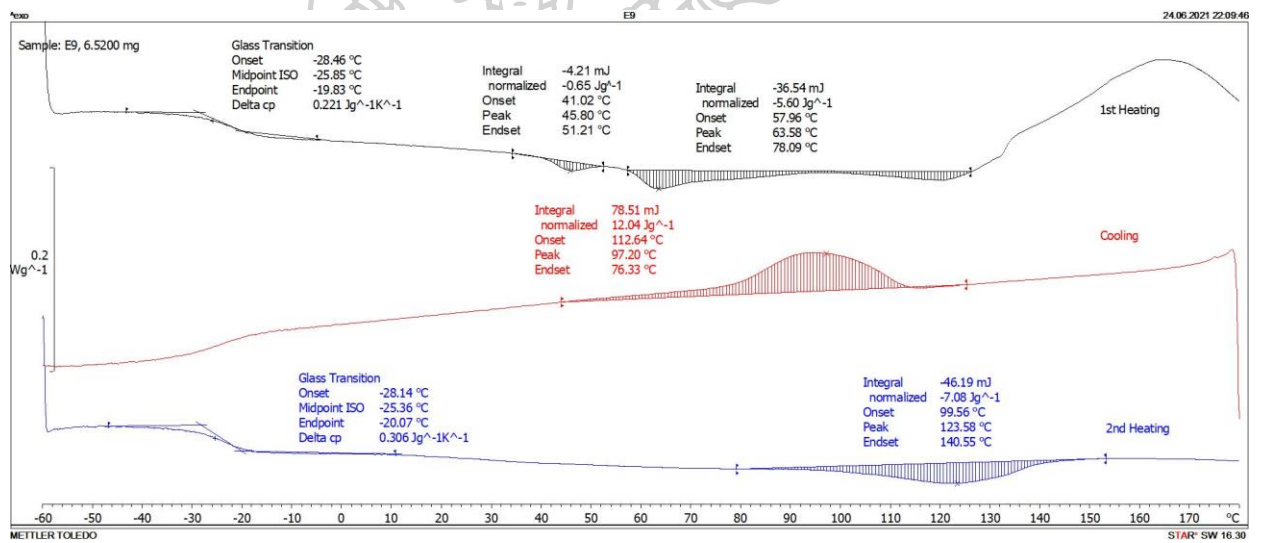
ภาพภาคผนวก ก.14 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH20phr



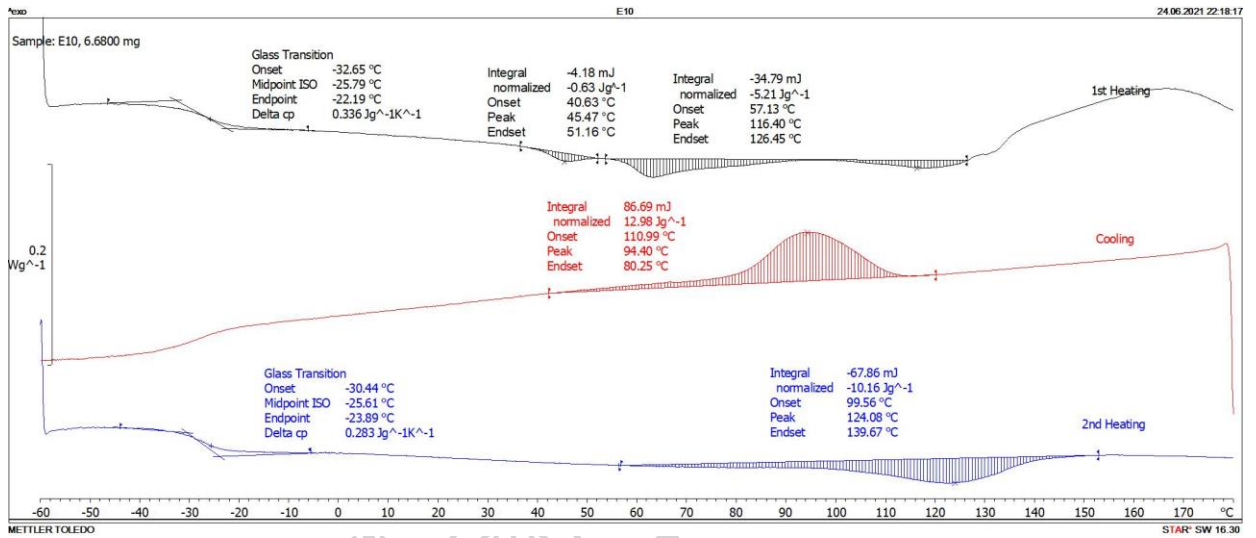
ภาพภาคผนวก ก.15 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH10phr



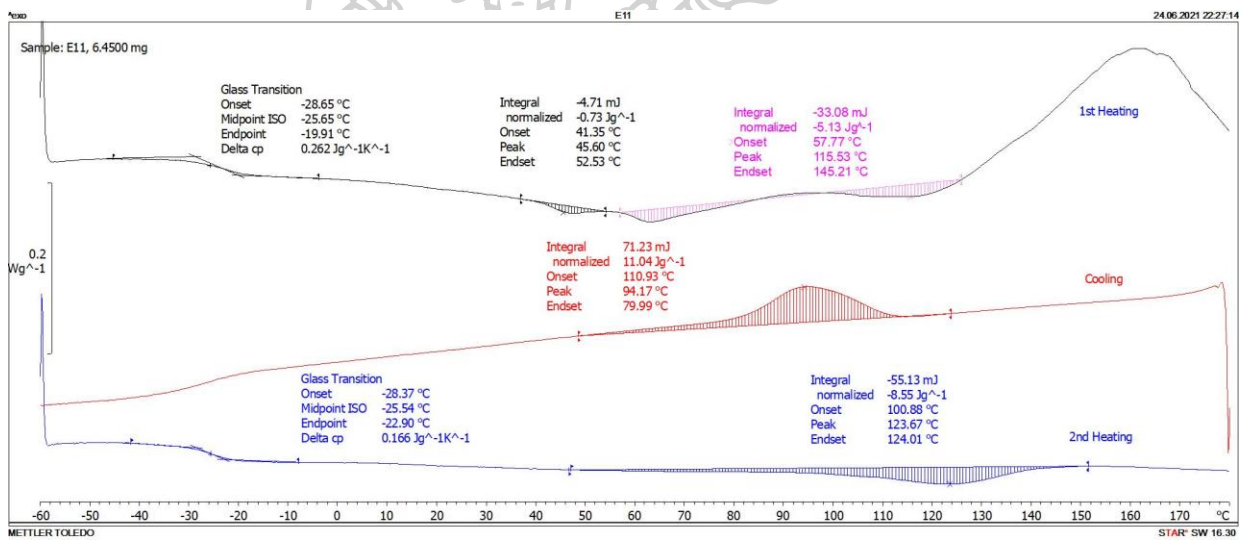
ภาพภาคผนวก ก.16 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr



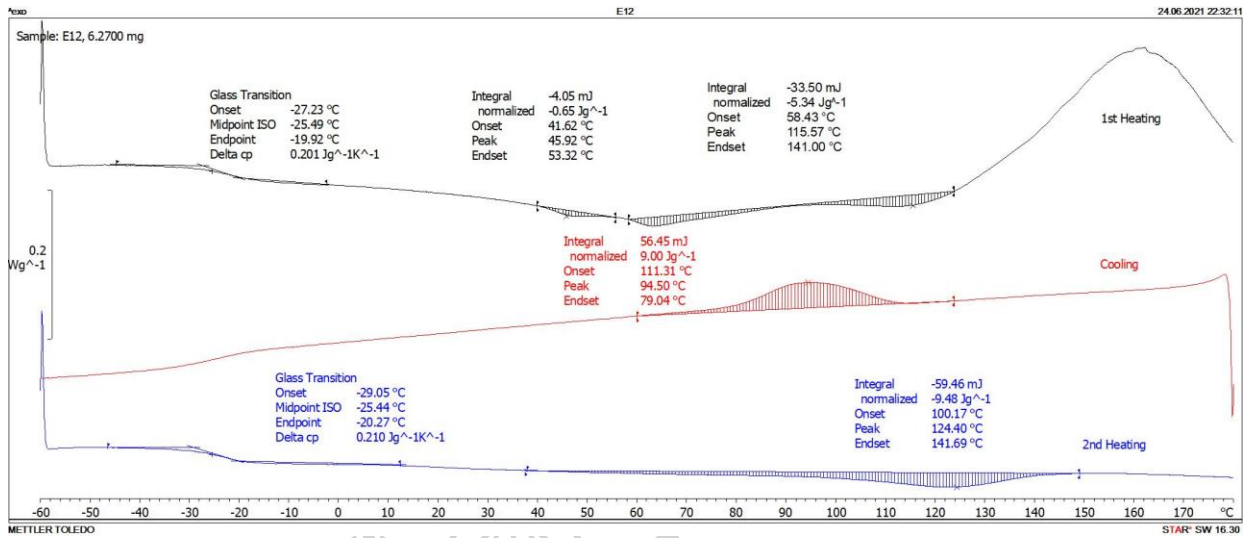
ภาพภาคผนวก ก.17 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH20phr



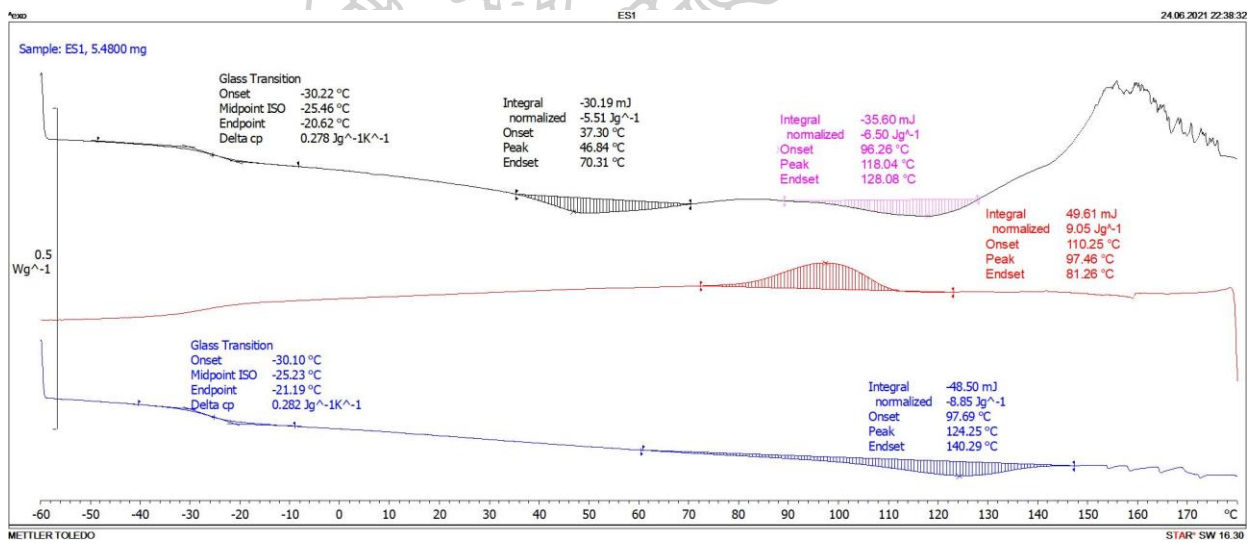
ภาพภาคผนวก ก.18 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH10phr



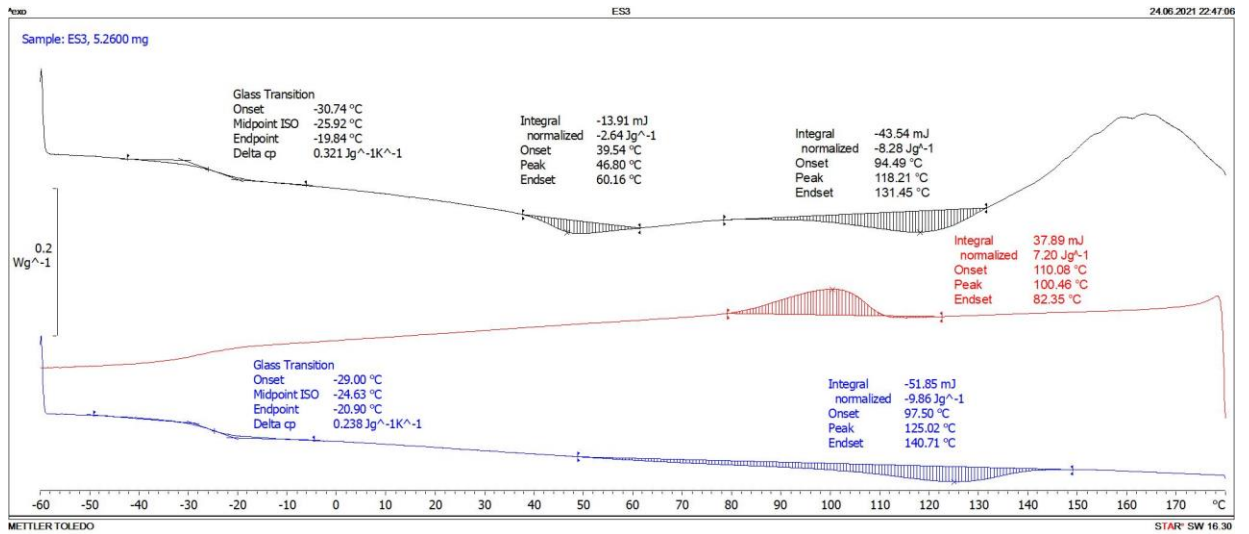
ภาพภาคผนวก ก.19 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH15phr



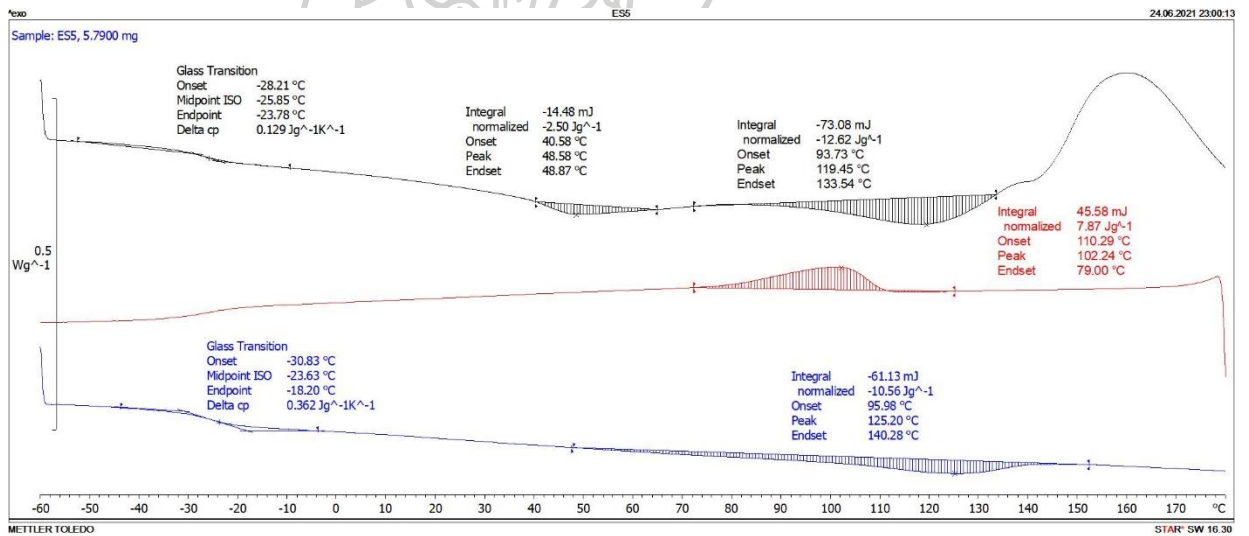
ภาพภาคผนวก ก.20 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH20phr



ภาพภาคผนวก ก.21 DSC thermogram ของ PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite1phr

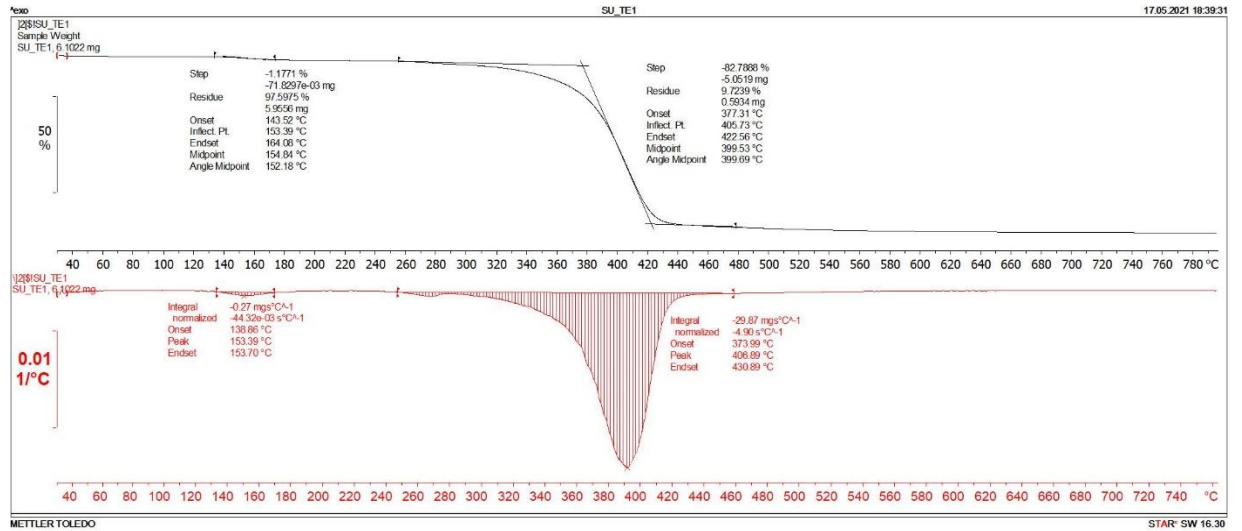


ภาพภาคผนวก ก.22 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS20%/
PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite3phr

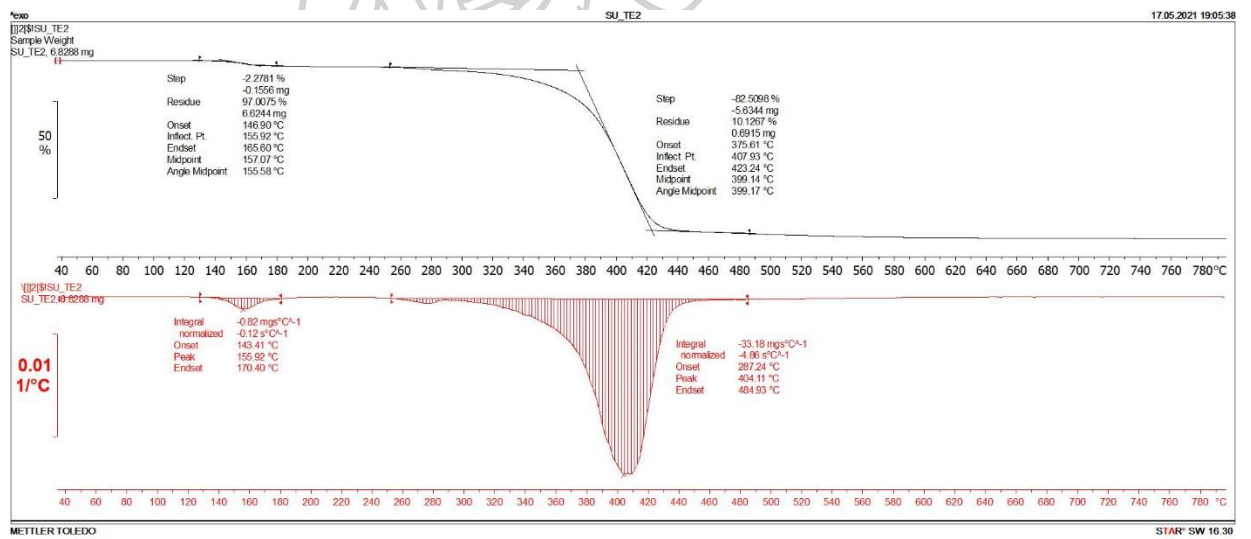


ภาพภาคผนวก ก.23 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS20%/
PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite5phr

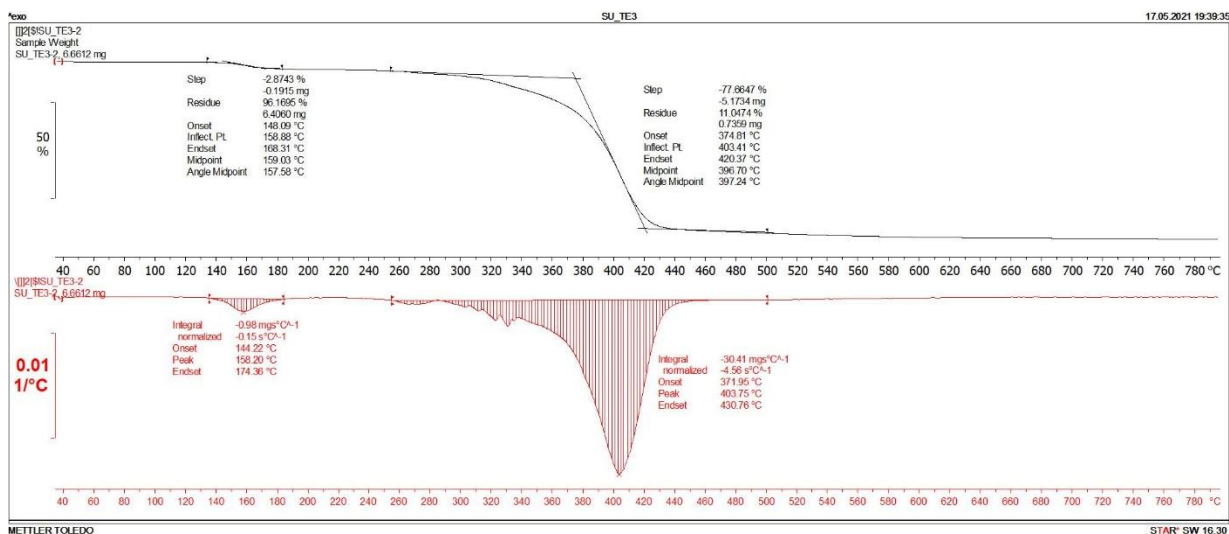
ก.3 ผลการทดสอบสมบัติเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



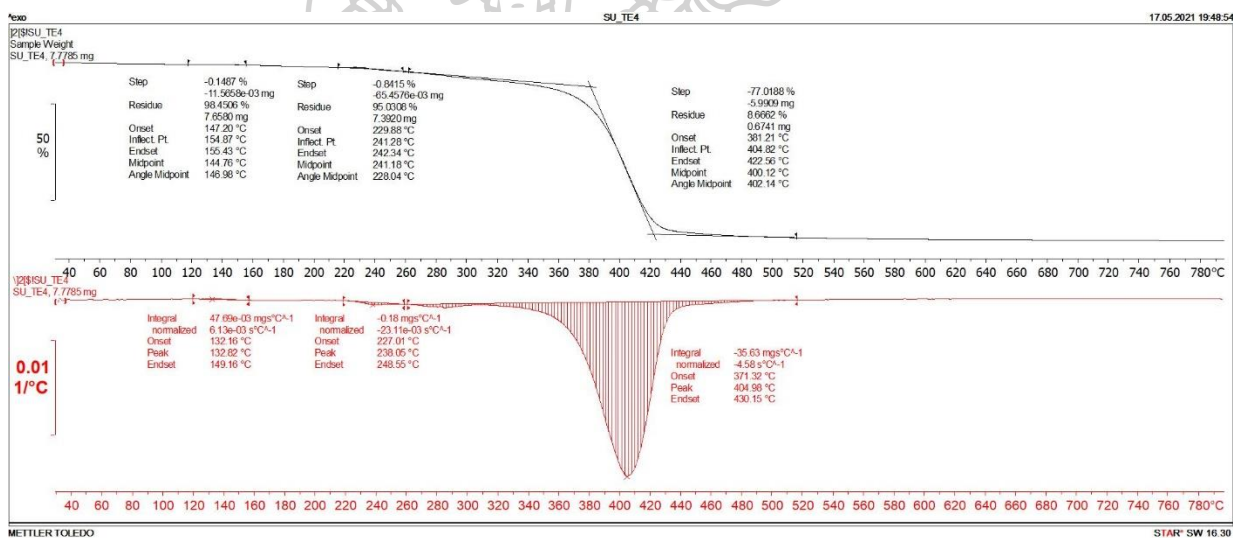
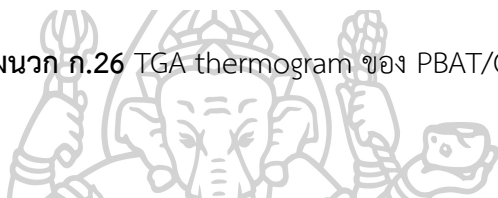
ภาพภาคผนวก ก.24 TGA thermogram ของ PBAT/OBSH10phr



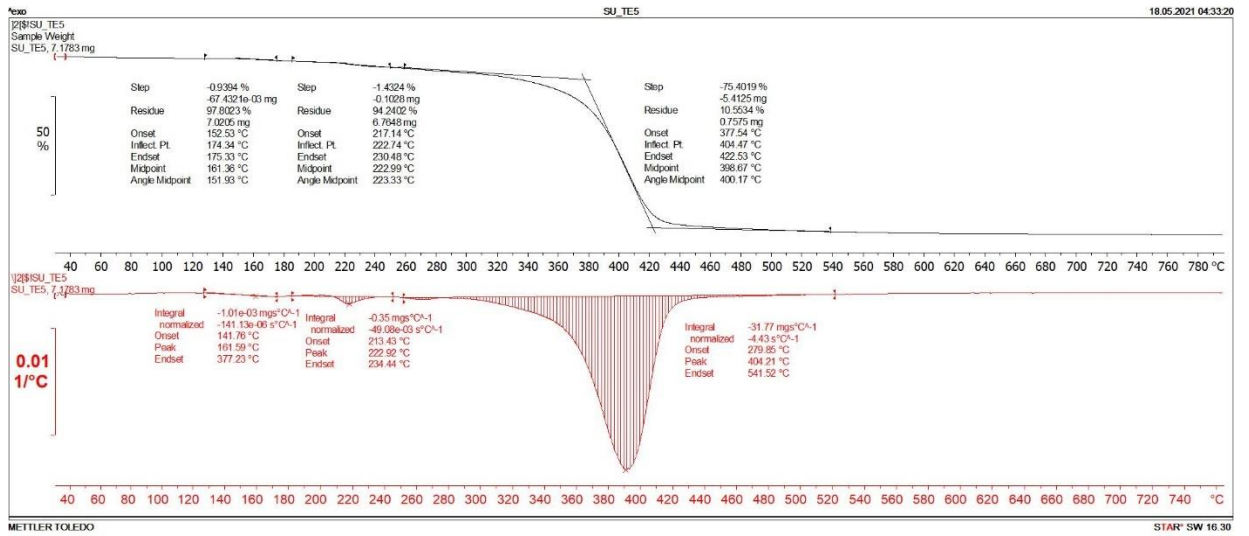
ภาพภาคผนวก ก.25 TGA thermogram ของ PBAT/OBSH15phr



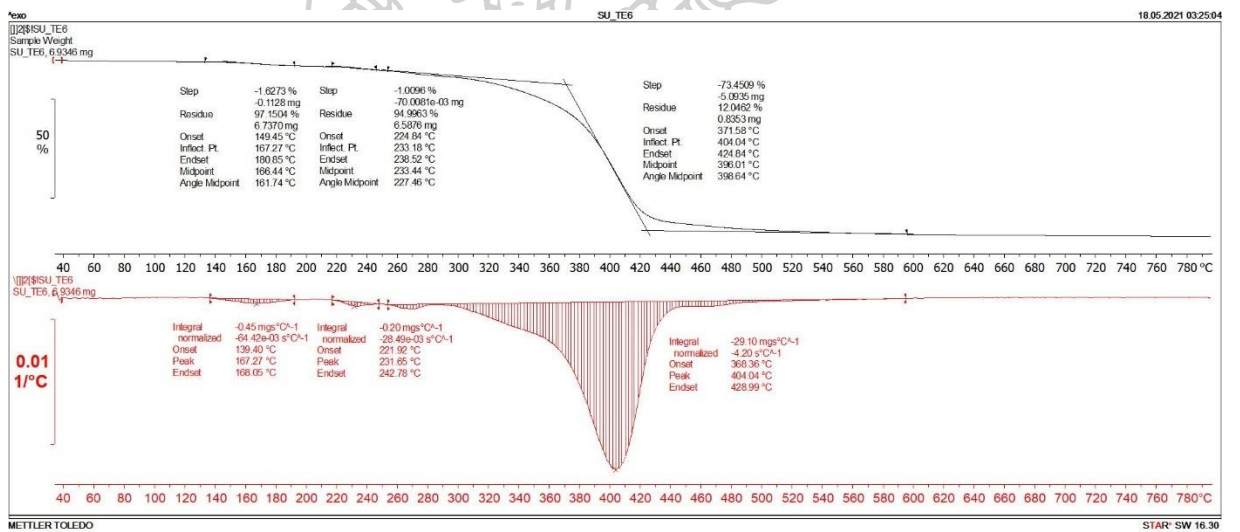
ภาพภาคผนวก ก.26 TGA thermogram ของ PBAT/OBSH20phr



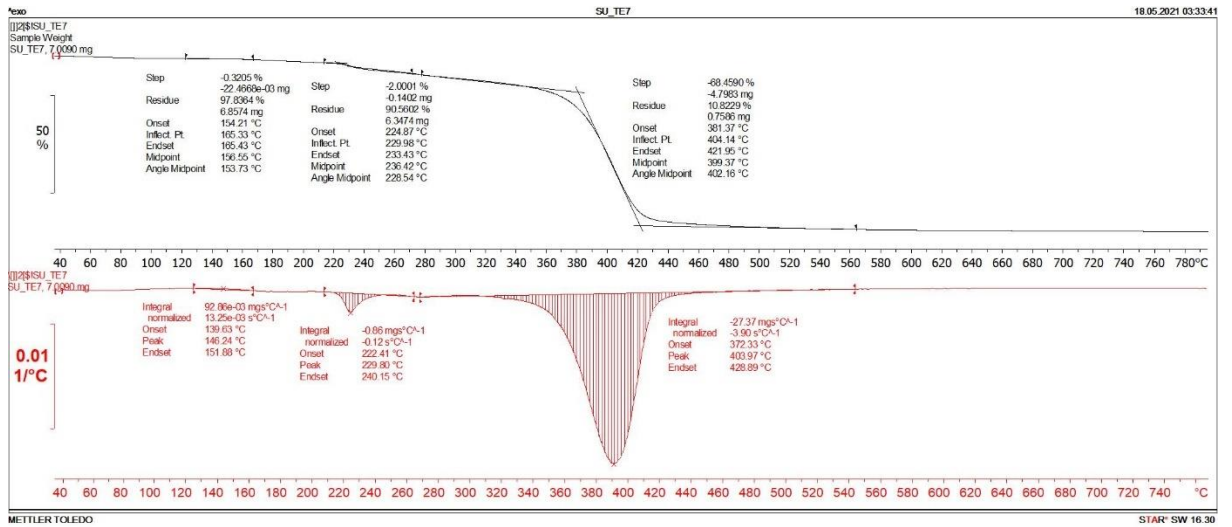
ภาพภาคผนวก ก.27 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH10phr



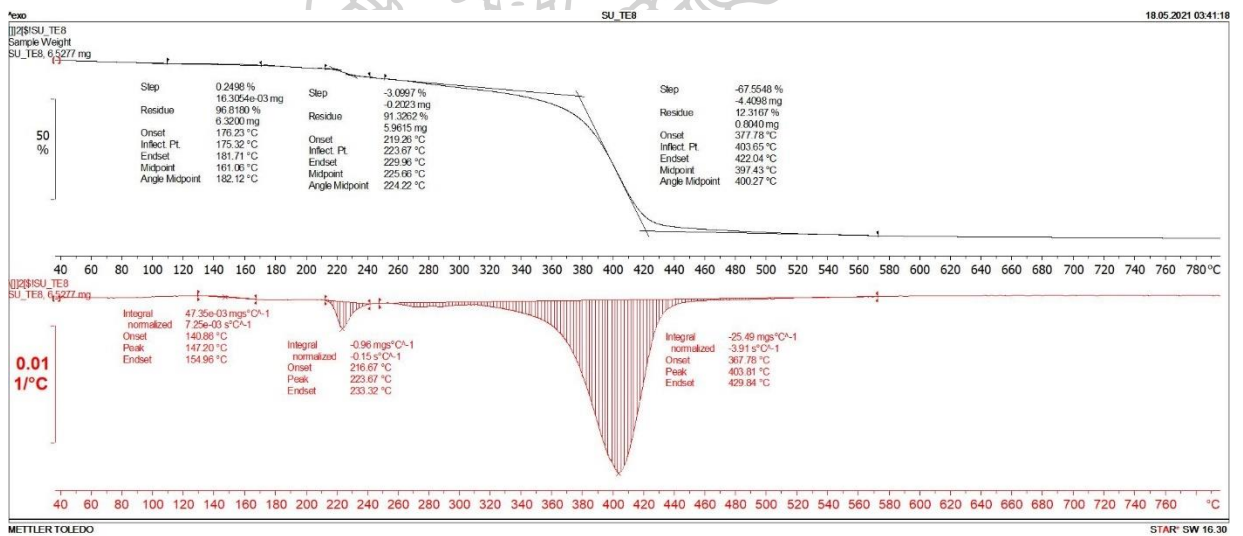
ภาพภาคผนวก ก.28 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH15phr



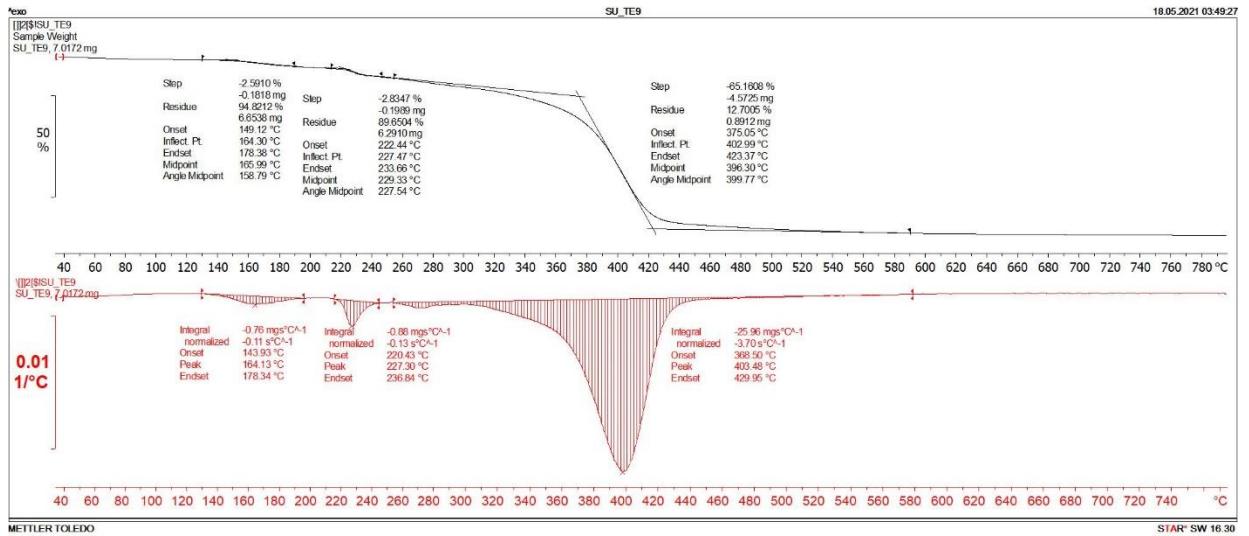
ภาพภาคผนวก ก.29 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH20phr



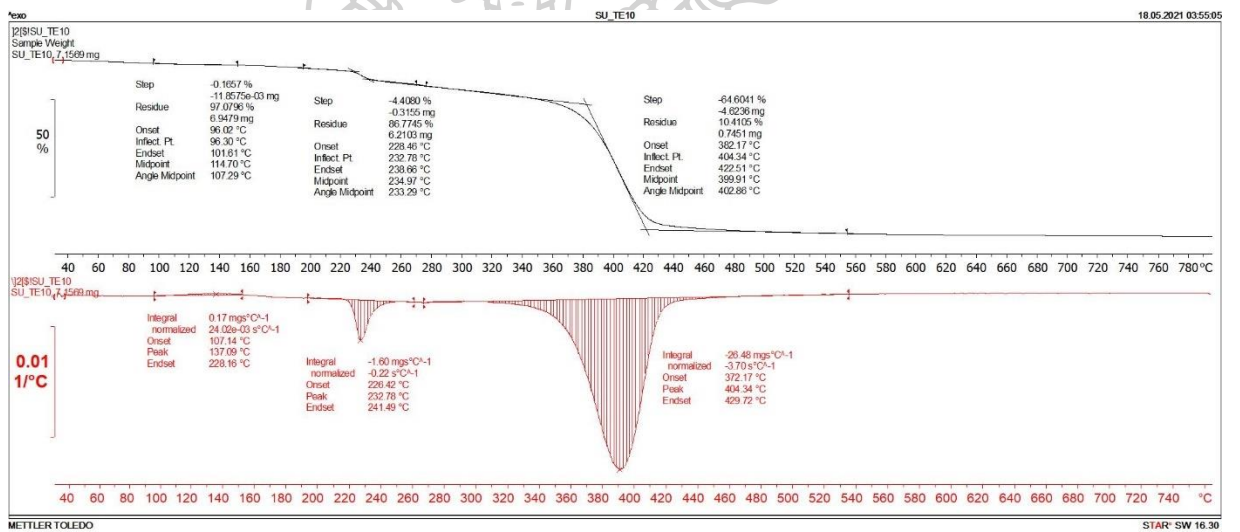
ภาพภาคผนวก ก.30 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH10phr



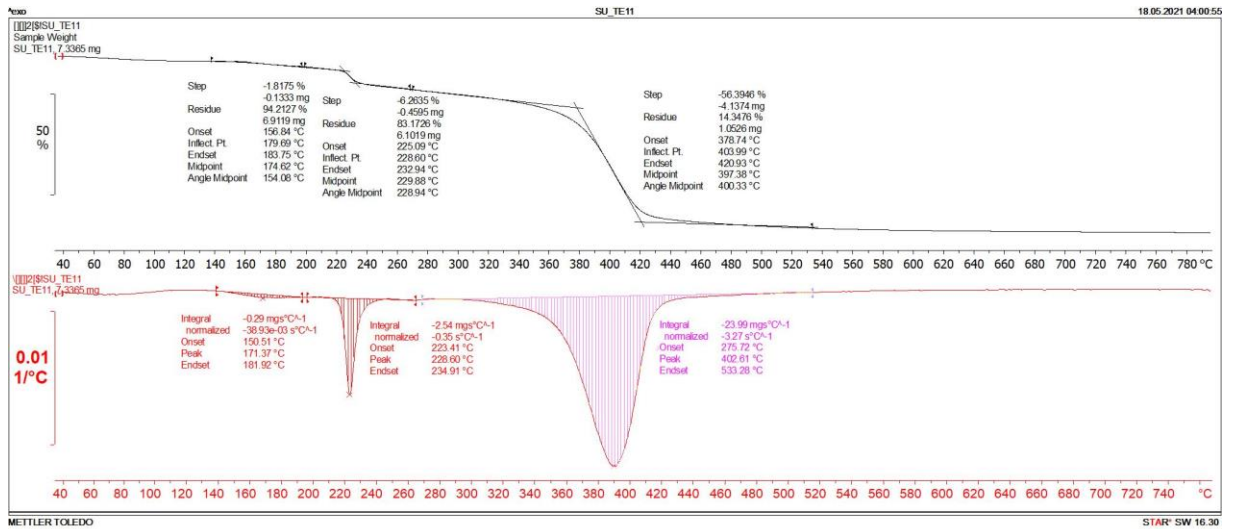
ภาพภาคผนวก ก.31 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr



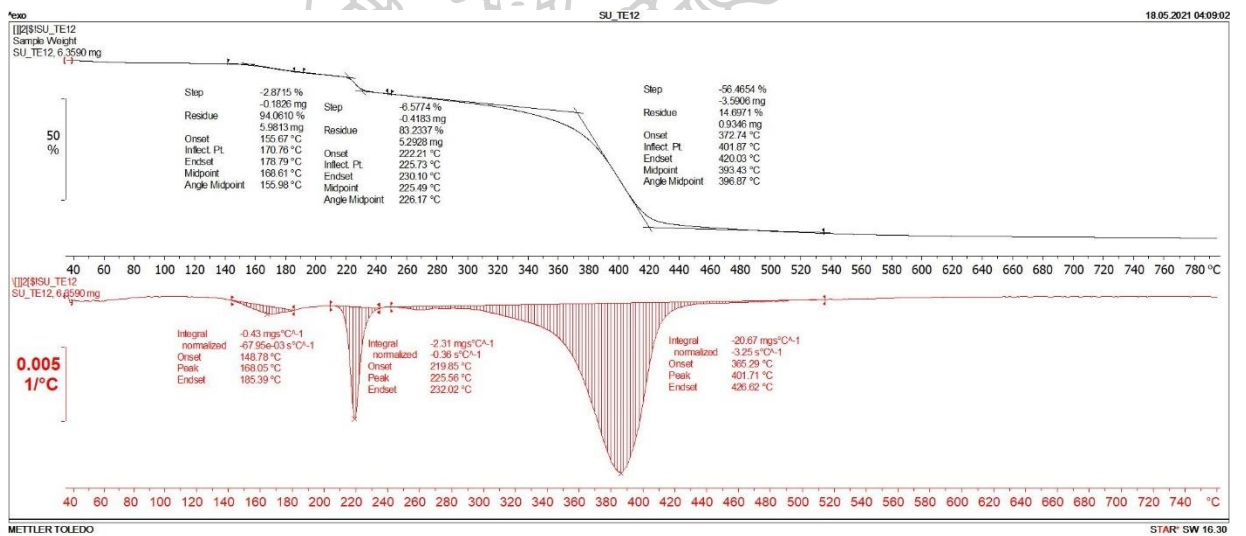
ภาพภาคผนวก ก.32 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH20phr



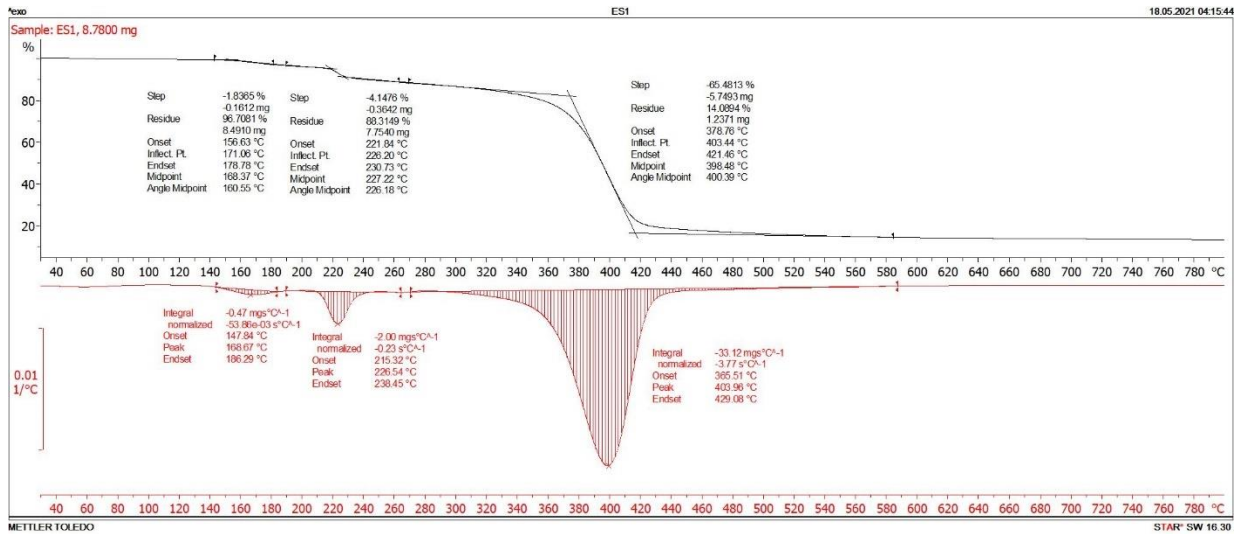
ภาพภาคผนวก ก.33 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH10phr



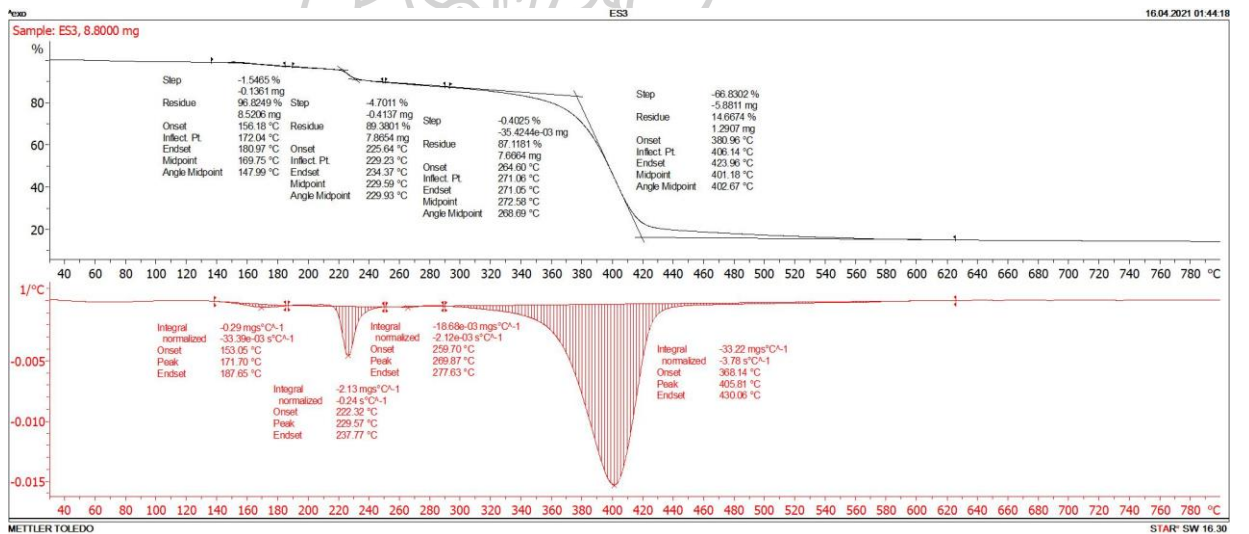
ภาพภาคผนวก ก.34 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH15phr



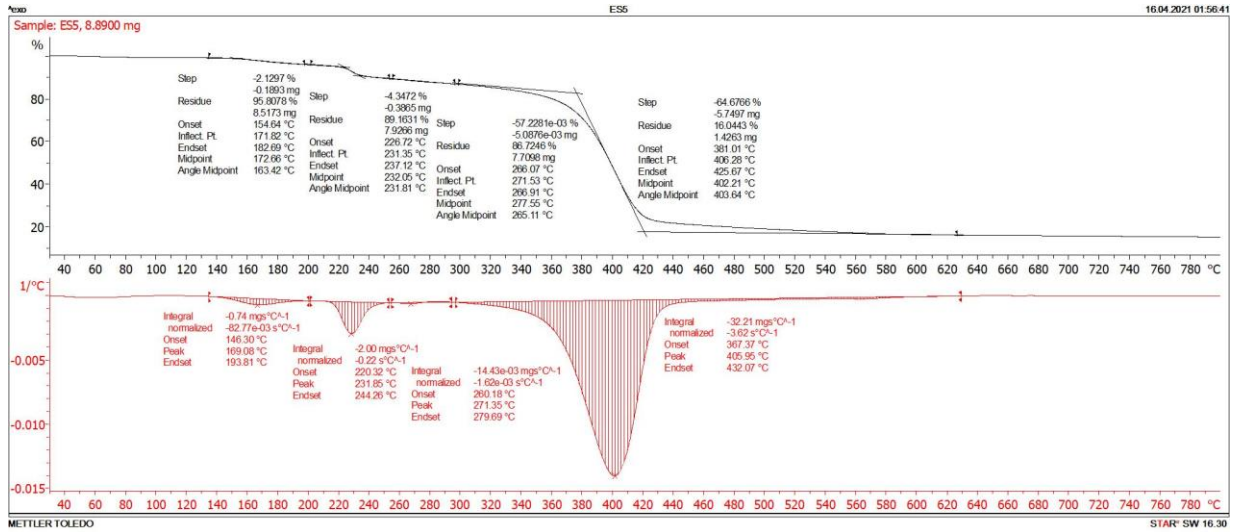
ภาพภาคผนวก ก.35 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH20phr



ภาพภาคผนวก ก.36 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS20%/
PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite1phr



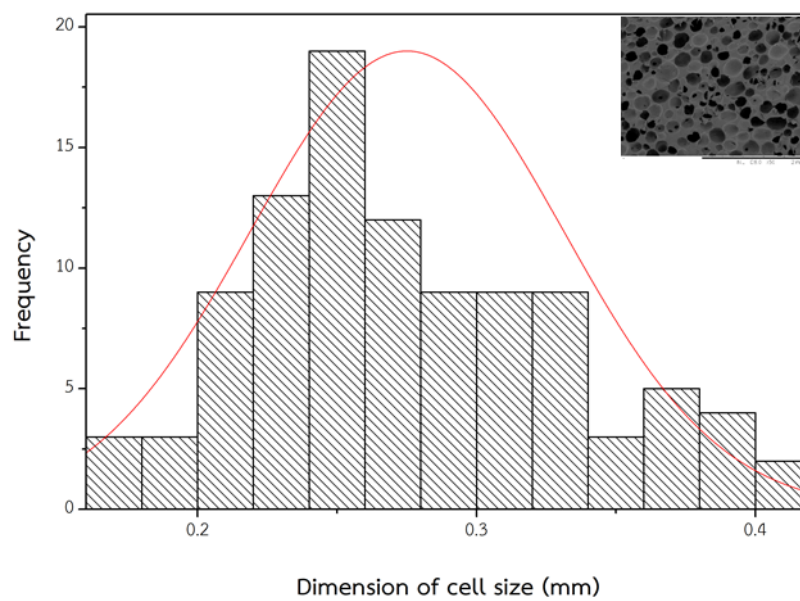
ภาพภาคผนวก ก.37 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS20%/
PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite3phr



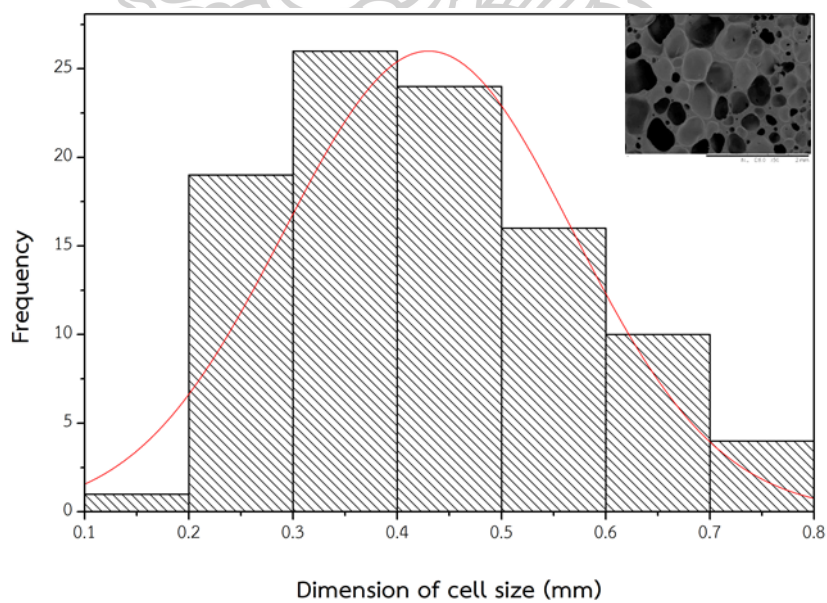
ภาพภาคผนวก ก.38 TGA thermogram ของ PBAT/MTPS20%/
PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite5phr



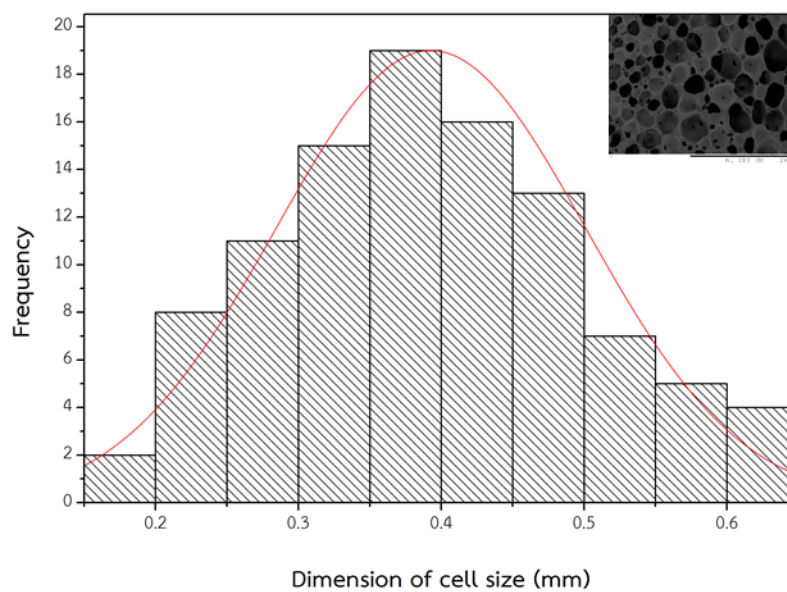
ก.4 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม



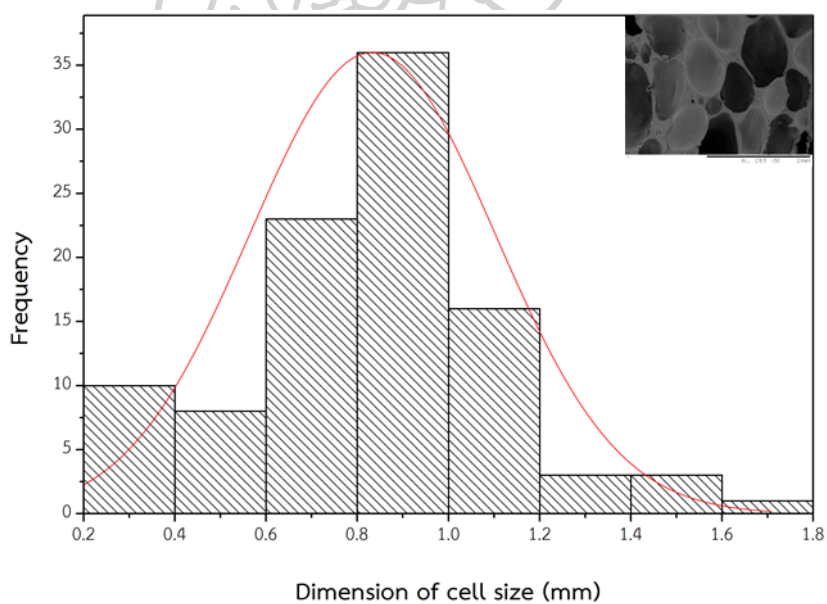
ภาพภาคผนวก ก.39 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBAT/OBSH10phr



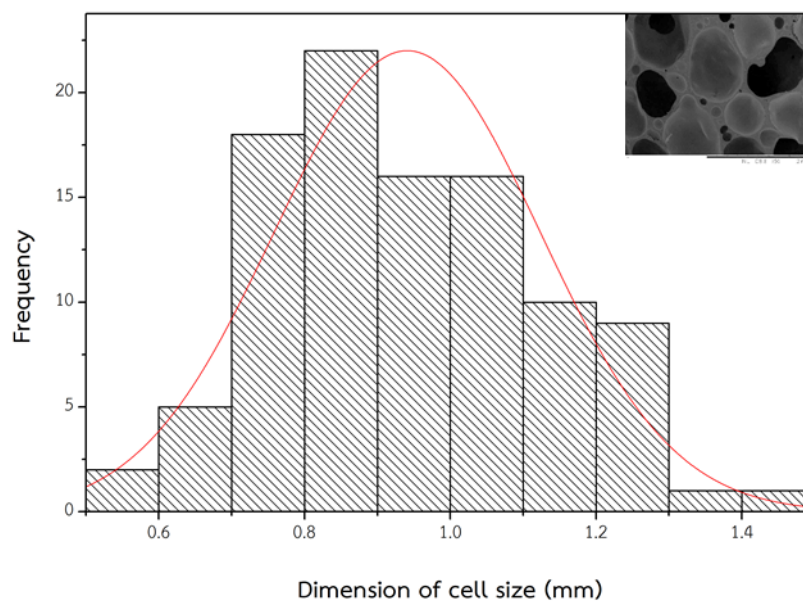
ภาพภาคผนวก ก.40 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBAT/OBSH15phr



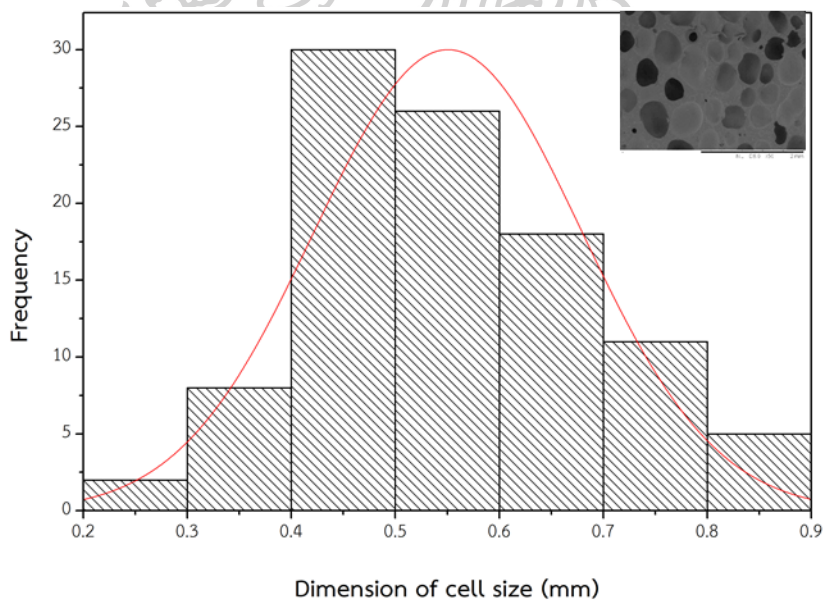
ภาพภาคผนวก ก.41 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBAT/OBSH20phr



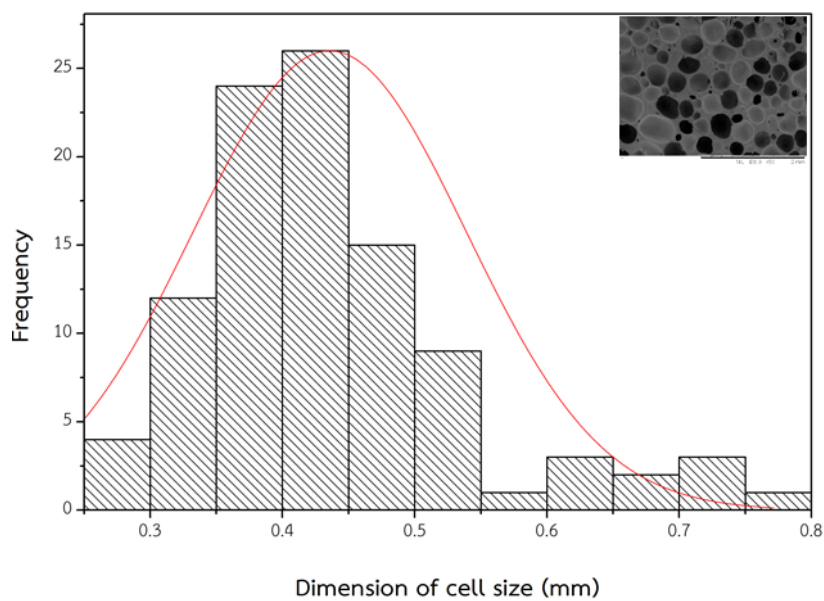
ภาพภาคผนวก ก.42 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBATMTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH10phr



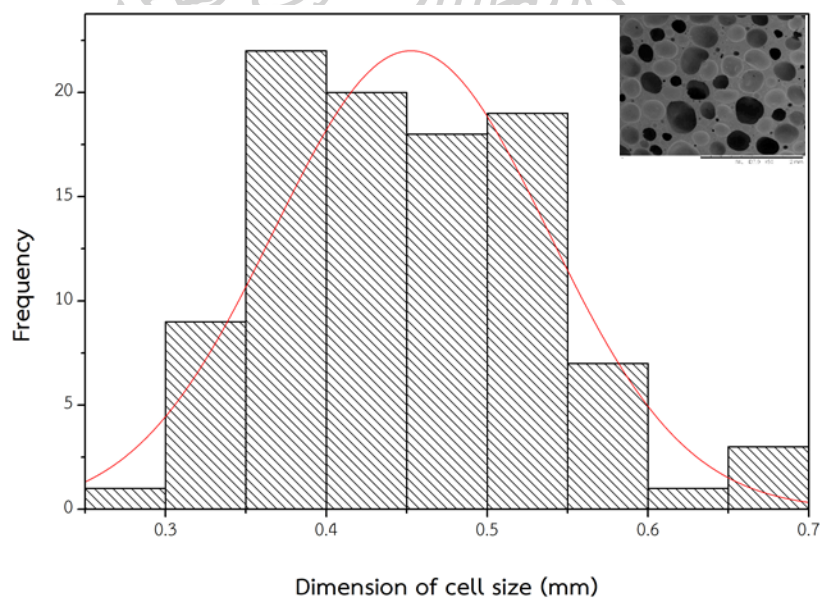
ภาพภาคผนวก ก.43 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBATMTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH15phr



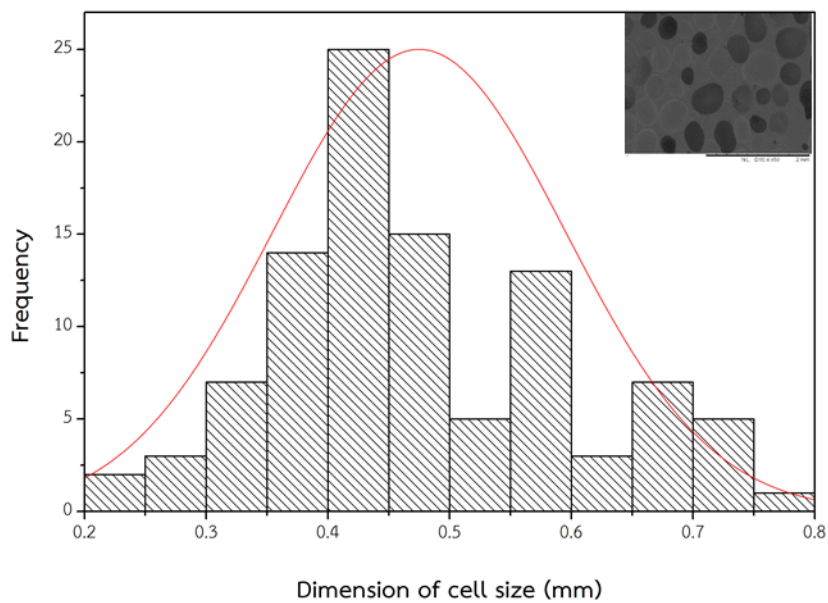
ภาพภาคผนวก ก.44 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBATMTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH20phr



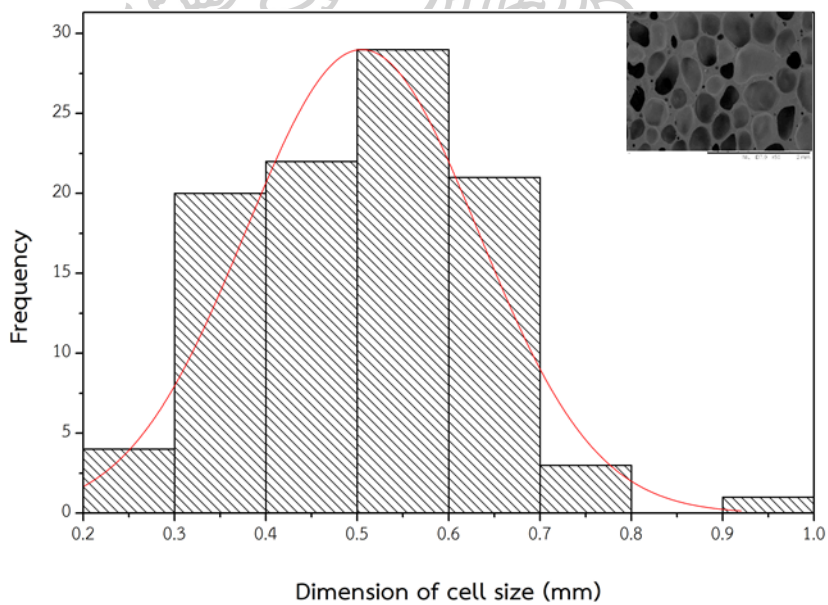
ภาพภาคผนวก ก.45 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBATMTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH10phr



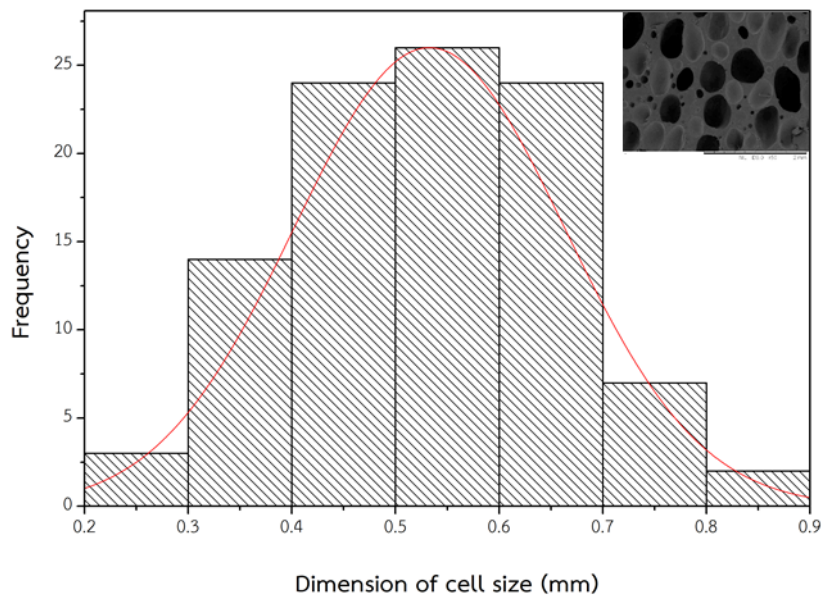
ภาพภาคผนวก ก.46 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBATMTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr



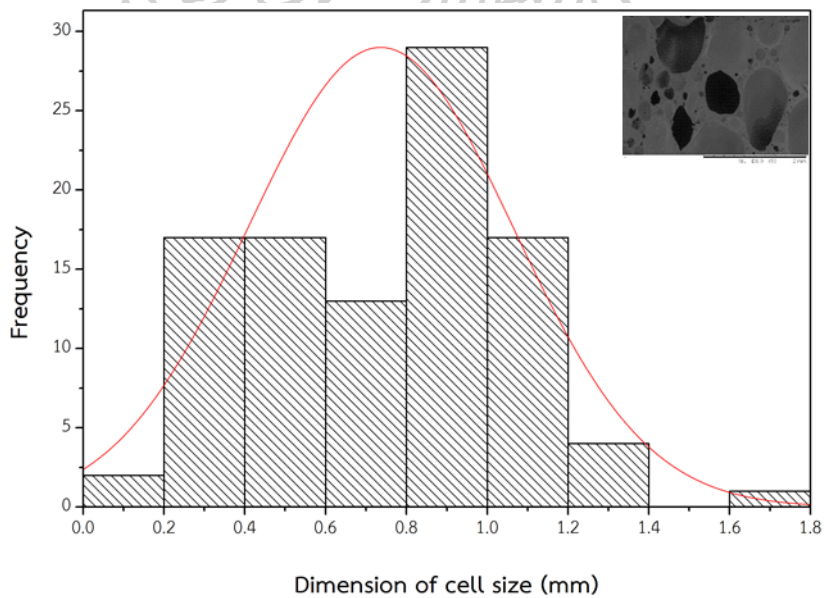
ภาพภาคผนวก ก.47 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBATMTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH20phr



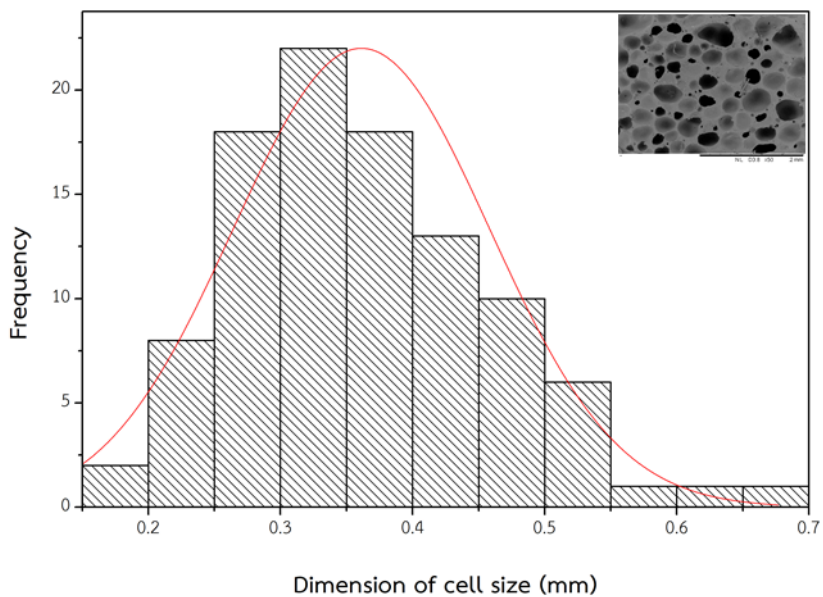
ภาพภาคผนวก ก.48 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBATMTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH10phr



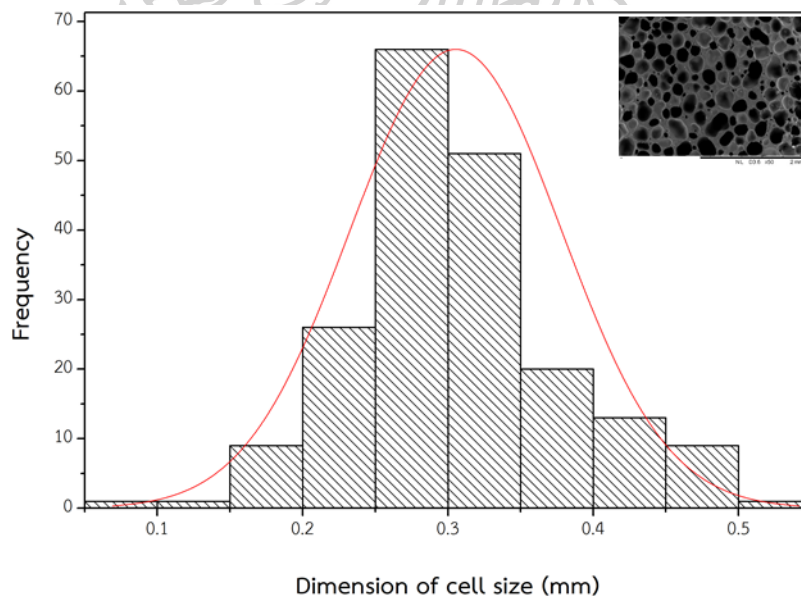
ภาพภาคผนวก ก.49 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBATMTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH15phr



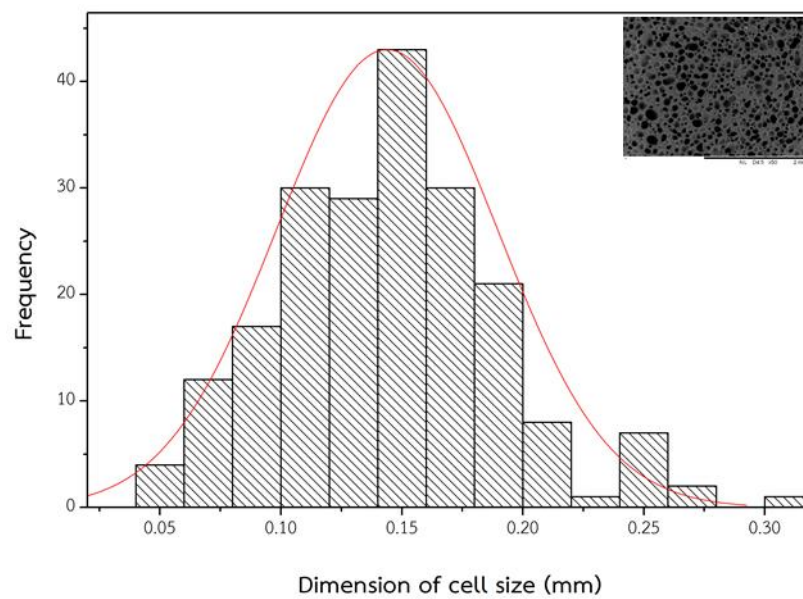
ภาพภาคผนวก ก.50 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBATMTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH20phr



ภาพภาคผนวก ก.51 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBATMTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite1phr



ภาพภาคผนวก ก.52 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม PBATMTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite3phr



ภาพภาคผนวก ก.53 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลีเมอร์ PBATMTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite5phr



ก.5 ความหนาแน่นของโฟม

ตารางภาคผนวก ก.2 ความหนาแน่นของโฟม

Samples	No.	Density (g/cm ³)
PBAT/OBSH10phr	1	0.4110
	2	0.4300
	3	0.3110
	Mean	0.3840
	S.D.	0.0639
PBAT/OBSH15phr	1	0.2910
	2	0.2970
	3	0.2760
	Mean	0.2880
	S.D.	0.0108
PBAT/OBSH20phr	1	0.3100
	2	0.3800
	3	0.2960
	Mean	0.3287
	S.D.	0.0450
PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH10phr	1	0.3030
	2	0.2520
	3	0.3430
	Mean	0.2993
	S.D.	0.0456

Samples	No.	Density (g/cm ³)
PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH15phr	1	0.2730
	2	0.2040
	3	0.2090
	Mean	0.2287
	S.D.	0.0385
PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH20phr	1	0.3720
	2	0.3980
	3	0.2880
	Mean	0.3527
	S.D.	0.0575
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH10phr	1	0.4150
	2	0.4160
	3	0.4130
	Mean	0.4147
	S.D.	0.0015
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr	1	0.2490
	2	0.2480
	3	0.2500
	Mean	0.2490
	S.D.	0.0010

Samples	No.	Density (g/cm ³)
PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH10phr	1	0.4640
	2	0.4880
	3	0.5270
	Mean	0.4930
	S.D.	0.0318
PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH15phr	1	0.3660
	2	0.3630
	3	0.3610
	Mean	0.3633
	S.D.	0.0025
PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH20phr	1	0.3820
	2	0.4610
	3	0.3870
	Mean	0.4100
	S.D.	0.0442
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite1phr	1	0.3390
	2	0.3310
	3	0.3550
	Mean	0.3417
	S.D.	0.0122

Samples	No.	Density (g/cm ³)
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite3phr	1	0.4340
	2	0.4450
	3	0.3840
	Mean	0.4210
	S.D.	0.0325
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite5phr	1	0.5160
	2	0.4950
	3	0.4950
	Mean	0.5020
	S.D.	0.0121

ก.6 ความแข็งของโฟม

ตารางภาคผนวก ก.3 ความแข็งของโฟม

Samples	ครั้งที่	Hardness			Mean	S.D.
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		
PBAT/OBSH10phr	1	29	24	28	27.67	2.16
	2	25	25	29		
	3	30	26	30		
	4	28	27	27		
	5	28	27	32		
PBAT/OBSH15phr	1	21	21	24	21.67	3.02
	2	22	21	25		
	3	24	19	24		
	4	25	25	15		
	5	22	17	20		

Samples	ครั้งที่	Hardness				
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	Mean	S.D.
PBAT/OBSH20phr	1	15	18	15	19.13	2.47
	2	17	19	21		
	3	17	20	20		
	4	19	21	19		
	5	20	24	22		
PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH10phr	1	40	30	39	37.20	7.16
	2	45	30	34		
	3	30	55	29		
	4	35	36	34		
	5	35	41	45		
PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH15phr	1	27	30	28	31.33	3.79
	2	32	32	32		
	3	26	34	36		
	4	34	29	38		
	5	25	35	32		
PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH20phr	1	30	28	25	28.40	3.02
	2	32	30	24		
	3	29	27	26		
	4	32	26	27		
	5	31	25	34		

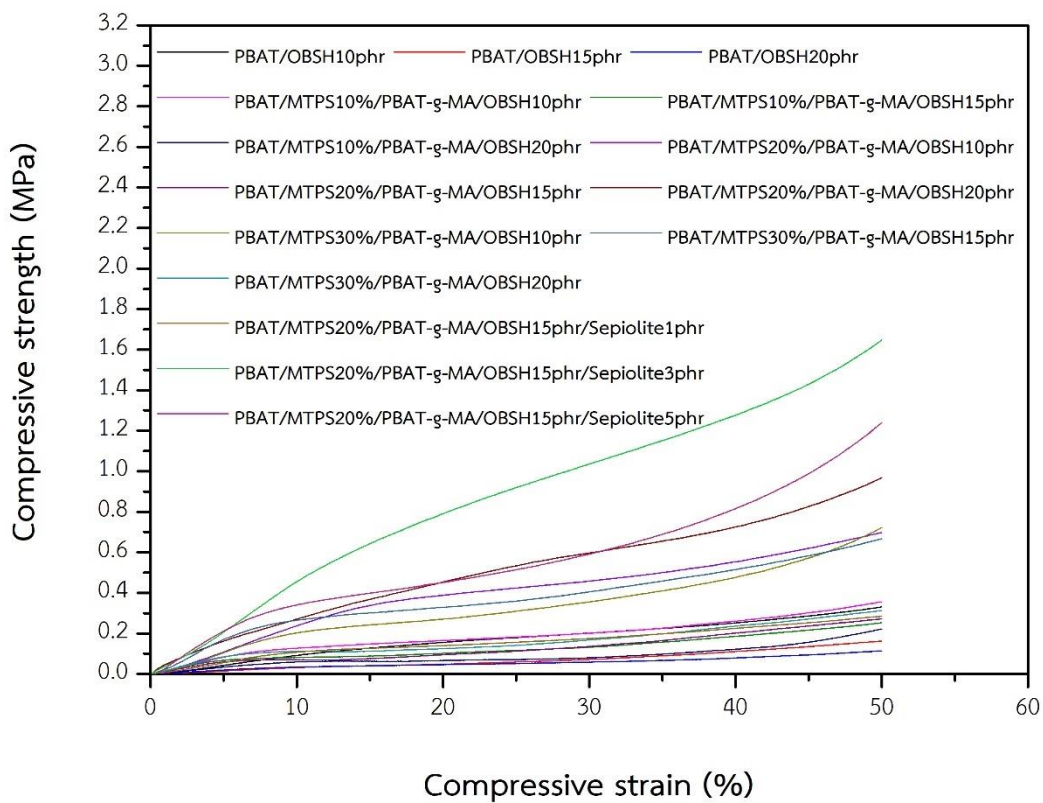
Samples	ครั้งที่	Hardness				
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	Mean	S.D.
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH10phr	1	46	43	39	43.47	4.12
	2	41	38	39		
	3	49	51	43		
	4	39	47	41		
	5	48	46	42		
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr	1	40	45	35	38.40	5.51
	2	29	40	34		
	3	44	35	45		
	4	35	32	38		
	5	39	36	49		
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH20phr	1	34	45	35	37.20	4.54
	2	36	40	34		
	3	39	35	36		
	4	34	32	38		
	5	35	36	49		
PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH10phr	1	45	56	64	59.80	7.37
	2	55	46	63		
	3	56	70	63		
	4	65	67	63		
	5	56	67	61		

Samples	ครั้งที่	Hardness				
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	Mean	S.D.
PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH15phr	1	55	45	55	50.00	5.30
	2	57	50	53		
	3	50	42	50		
	4	42	51	43		
	5	59	49	49		
PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH20phr	1	53	60	43	48.80	5.87
	2	45	55	44		
	3	45	45	48		
	4	46	61	50		
	5	46	43	48		
PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH20phr/Sepiolite1phr	1	37	42	45	41.67	5.04
	2	35	45	47		
	3	37	40	39		
	4	36	49	52		
	5	41	38	42		
PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH20phr/Sepiolite3phr	1	62	71	64	65.60	2.90
	2	63	65	65		
	3	64	68	64		
	4	66	62	66		
	5	70	64	70		

Samples	ครั้งที่	Hardness				
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	Mean	S.D.
PBAT/MTPS30%/PBAT-g- MA/OBSH20phr/Sepiolit e5phr	1	63	69	68	67.60	2.72
	2	67	69	72		
	3	66	71	68		
	4	70	70	64		
	5	68	64	65		



ก.7 ความสามารถในการกดอัดของแผ่นโฟม



ภาพภาคผนวก ก.54 Compressive stress-strain curve ของโฟม



ตารางภาคผนวก ก.4 ความสามารถในการกดอัดของแผ่นโฟม

Samples	No.	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (MPa)	
PBA T/OBSH10phr	1	0.0588	0.1834	
	2	0.0886	0.2827	
	3	0.0859	0.3170	
	4	0.0742	0.2160	
	5	0.3715	1.0749	
	6	0.0999	0.4280	
	7	0.1091	0.4816	
	8	0.3307	1.0079	
	9	0.3653	1.1884	
	10	0.3011	0.9639	
	Mean		0.1885	0.6144
	S.D.		0.1342	0.3963

Samples	No.	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (MPa)
PBAT/OBSH15phr	1	0.0555	0.1745
	2	0.4781	1.5572
	3	0.2310	0.7362
	4	0.1624	0.5301
	5	0.0656	0.1942
	6	0.0833	0.2923
	7	0.8201	2.3896
	8	0.7130	2.1217
	9	0.0730	0.3009
	10	0.0541	0.1638
	Mean	0.2736	0.8461
	S.D.	0.2912	0.8546
PBAT/OBSH20phr	1	0.3929	1.2246
	2	0.1141	0.3604
	3	0.2351	0.7773
	4	0.2294	0.7240
	5	0.5020	1.5259
	6	0.1057	0.4414
	7	0.1209	0.4654
	8	0.1765	0.4944
	9	0.1202	0.4602
	10	0.6445	2.1432
	Mean	0.2641	0.8617
	S.D.	0.1875	0.5890

Samples	No.	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (MPa)
PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH10phr	1	0.3555	1.4597
	2	0.4246	1.2058
	3	0.4730	1.8151
	4	0.1862	0.5119
	5	0.4514	1.4522
	6	0.5569	1.7932
	7	0.2888	1.3606
	8	0.3378	1.4819
	9	0.1585	0.4983
	Mean	0.3592	1.2865
	S.D.	0.1325	0.4828
PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH15phr	1	0.3358	1.7030
	2	0.1235	0.5410
	3	0.2928	0.8388
	4	0.2417	1.0804
	5	0.1876	0.4949
	6	0.2798	0.9886
	7	0.2218	1.0805
	8	0.2533	0.6711
	9	0.4267	1.5450
	10	0.1680	0.7373
	Mean	0.2531	0.9681
	S.D.	0.0874	0.4032

Samples	No.	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (MPa)
PBAT/MTPS10%/PBAT-g-MA/OBSH20phr	1	0.2153	0.8491
	2	0.2215	0.7737
	3	0.1411	0.8376
	4	0.1349	0.6762
	5	0.1470	0.6967
	6	0.2568	1.1450
	7	0.3925	0.8948
	8	0.3799	1.2703
	9	0.2477	1.1244
	10	0.1398	0.3732
	Mean	0.2276	0.8641
	S.D.	0.0955	0.2637
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH10phr	1	0.6012	2.5747
	2	0.4257	2.1245
	3	1.1081	4.8845
	4	0.9107	3.8185
	5	0.6975	2.5231
	6	0.6505	2.6494
	7	0.6940	2.8797
	8	0.8479	2.4827
	9	0.7664	2.2864
	10	1.0946	4.7989
	Mean	0.7796	3.1022
	S.D.	0.2152	1.0243

Samples	No.	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (MPa)
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr	1	0.6721	1.7730
	2	1.2228	4.0336
	3	0.1843	0.8504
	4	1.4181	3.3516
	5	0.2723	1.3829
	6	0.8816	2.4871
	7	1.1191	2.7108
	8	0.2383	1.3384
	9	1.2840	4.8194
	10	0.9740	2.6149
	Mean	0.8267	2.5362
	S.D.	0.4614	1.2626
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH20phr	1	3.7980	9.4412
	2	1.3966	5.2537
	3	1.9243	6.6732
	4	0.9677	2.5988
	5	0.2332	1.2798
	6	0.6178	2.5159
	7	0.5544	1.4564
	8	0.2761	1.0866
	9	0.2610	0.7999
	10	0.6314	3.9412
	Mean	1.0661	3.5047
	S.D.	1.1023	2.8409

Samples	No.	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (MPa)
PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH10phr	1	0.7553	2.7117
	2	0.5227	1.5846
	3	0.7215	2.5835
	4	0.8563	3.3906
	5	0.9012	3.5889
	6	1.5057	7.8714
	7	0.4823	1.7337
	8	0.7589	3.3679
	9	0.8032	3.5026
	10	0.7412	2.5561
	Mean	0.8048	3.2891
	S.D.	0.2794	1.7589
PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH15phr	1	0.7944	2.8457
	2	0.8518	3.5015
	3	0.5938	3.5398
	4	0.9943	4.0378
	5	0.6672	3.0962
	6	0.5779	3.4502
	7	0.7957	2.6007
	8	0.5611	2.2168
	9	0.6613	1.6574
	10	0.9203	4.2140
	Mean	0.7418	3.1160
	S.D.	0.1516	0.8007

Samples	No.	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (MPa)
PBAT/MTPS30%/PBAT-g-MA/OBSH20phr	1	1.7450	5.5612
	2	0.2316	1.3737
	3	1.8960	5.6262
	4	0.4865	1.6528
	5	0.2424	1.1241
	6	0.3124	1.8220
	7	1.4360	5.6554
	8	0.5241	1.7037
	9	0.5082	1.4848
	10	3.1886	11.2261
	Mean	1.0571	3.7230
	S.D.	0.9817	3.2710
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite1phr	1	0.2616	0.7900
	2	0.3113	1.4405
	3	0.2972	1.4089
	4	0.2848	1.2323
	5	0.1901	0.6648
	6	0.2297	0.7218
	7	0.1725	0.5957
	8	0.2402	0.7607
	9	0.2661	1.0422
	10	0.2531	1.1367
	Mean	0.2507	0.9794
	S.D.	0.0444	0.3138

Samples	No.	Compressive strength (MPa)	Compressive modulus (MPa)
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite3phr	1	7.9418	25.6805
	2	1.8496	5.4270
	3	2.8758	8.5949
	4	3.7571	12.6398
	5	9.4329	36.5348
	6	8.5517	28.9900
	7	1.6480	4.7051
	8	2.1731	6.1372
	9	1.6374	4.7312
	10	8.9609	38.9909
	Mean	4.8828	17.2431
	S.D.	3.3827	13.8524
PBAT/MTPS20%/PBAT-g-MA/OBSH15phr/Sepiolite5phr	1	3.6922	13.1140
	2	1.2408	4.4597
	3	1.1491	3.5692
	4	1.0670	4.1496
	5	3.8693	16.2662
	6	1.1351	4.5501
	7	2.7550	8.0766
	8	1.1066	3.5456
	9	1.1873	3.9288
	Mean	1.9114	6.8511
	S.D.	1.1851	4.7159





The image is a conference cover for ICEIT2020. It features a dark blue background with several interlocking gears in shades of blue and cyan. At the top left, there are two circular logos: one for ICEIT and another for the International Conference on Engineering and Industrial Technology. To the right of these logos, the text "Proceedings: ICEIT2020" is written in a white serif font. Below this, the main title "The International Conference on Engineering and Industrial Technology" is displayed in a white sans-serif font. Further down, the dates and format are listed: "6-8 May, 2020 via VDO conference and 11-13 September, 2020 on the International Conference". At the bottom of the main text area, the location "The ZIGN Hotel, Pattaya Thailand" is specified. The bottom of the cover features a horizontal strip containing logos of various sponsors and partners, including Chulalongkorn University, Yamaguchi University, Keio University, and EGAT.

  **Proceedings: ICEIT2020** 

"The International Conference on Engineering and Industrial Technology"

6-8 May, 2020 via VDO conference and
11-13 September, 2020 on the International Conference

The ZIGN Hotel, Pattaya Thailand

The International Conference on Engineering and
Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020

Study on Morphological and Mechanical Properties of Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) and Cassava Starch Blend

W Sudta¹ and S Hemsri^{1,*}

¹ Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

* Corresponding address (Email: sudsirhemari@yahoo.com, +66-34-241708)

HIGHLIGHTS

- Maleated thermoplastic starch (MTPS) was prepared in the twin screw extruder.
- PBAT/MTPS blends were prepared in the twin screw extruder.
- XRD analysis confirmed that the A-type crystals of the cassava starch in MTPS decreased compared with native starch.
- The addition of PBAT-g-MA improved compatibility and mechanical properties of PBAT/MTPS blends.

ABSTRACT

Maleated thermoplastic starch (MTPS) was prepared from cassava starch with glycerol and water as a plasticizer and maleic anhydride (MA) as esterification agent in twin-screw extruder. Poly(butylene adipate-co-terephthalate) PBAT and MTPS in various ratios of 90:10, 80:20 and 70:30 by weight were blended in twin screw extruder to achieve the PBAT/MTPS blends. Moreover, maleic anhydride grafted PBAT (PBAT-g-MA) was used as a compatibilizer. In this study, the effects of MTPS content and PBAT-g-MA content on the morphological and mechanical properties of PBAT/MTPS blends were investigated. XRD diffraction analysis confirmed that the A-type crystals of the native cassava starch in MTPS decreased during the reactive extrusion processing. SEM images showed that the content of MTPS increased, the dispersed phase of MTPS in continuous phase of PBAT matrix become smaller. The better dispersion of MTPS phase in PBAT matrix was observed when PBAT-g-MA was added as compatibilizer. The tensile test revealed that the addition of MTPS at 20 and 30% by weight resulted in an increased in tensile strength and elongation at break in the blends. The incorporation of PBAT-g-MA improved in tensile strength and elongation at break increased in the blends.

Keywords: Poly(butylene adipate-co-terephthalate); Cassava starch; Maleated thermoplastic starch

Acknowledgment

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



The International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020

1. INTRODUCTION

Nowadays, environmental pollution caused by petroleum based plastics has become a global concern about plastic pollution. Thus, many researchers attempted to develop biodegradable polymer to substitute for petroleum-based plastics [1].

Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) is an aliphatic aromatic copolyester based on the 1,4-butanediol, adipic acid, and terephthalic acid. It is a commercially available biodegradable polymer from petrochemical resources with good mechanical properties and easy thermal process. However, the application of PBAT is limited because it is expensive [1]. Many researchers blend natural polymers with PBAT matrix in order to reduce the cost of final product [2-3].

Starch is one of the most promising natural polymers to blend with PBAT to reduce cost because it is a completely biodegradable polymer, inexpensive and can be obtained from renewable source. Unfortunately, the incompatibility between the hydrophobic polyester PBAT and the hydrophilic starch resulted in a poor interfacial adhesion between PBAT and starch blends. To improve interfacial adhesion between them, some researchers prepared maleated thermoplastic starch (MTPS) [4-6]. The maleic anhydride (MA) as an esterification agent can react with starch under heating resulted in a lower viscosity and good dispersion of the starch phase in PBAT matrix.

Although MTPS was good dispersion in PBAT matrix, the PBAT/MTPS blends were poor mechanical properties. Thus, this study also used maleic anhydride grafted PBAT (PBAT-g-MA) as a compatibilizer to improve the mechanical properties of PBAT/MTPS blends.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Materials

PBAT (ecoflex® F Blend C1200) was purchased from BASF Corporation. Cassava starch was supplied from E.T.C. EAIB TONG CHAN CO.,LTD. Glycerol was purchased from Ajax Finechem PTY Ltd. Maleic anhydride (MA) and 2,5-Bis(tertbutylperoxy)-2,5-dimethylhexane (Luperon® 101) were supplied from Sigma-Aldrich, Inc.

2.2. Preparation and characterization of maleated thermoplastic starch (MTPS)

The preparation of MTPS was conducted in a twin-screw extruder. The weight ratio of cassava starch/glycerol/water/maleic anhydride was fixed at 100:30:30:1 by weight. The screw speed was 60 rpm and temperature profile was 90/100/110/120/120/120/120/110 °C from feed zone to die zone. The extruded was cooled in the air and dried in the vacuum oven at 40 °C for 4 hours. All specimens of MTPS were compression-molded at 160 °C with 1,500 psi pressure by compression molding. MTPS were characterized by x-ray diffraction (XRD) (SHIMADZU, Lab X, XRD 6100, Japan) operated at voltage of 30 kV and current of 20 mA. XRD data were collected from 3 to 35° at a scan rate of 5°/min. Finally, the percentage crystallinity was calculated according to equation 1.

$$\text{Crystallinity (\%)} = \frac{\text{Area under crystalline peaks}}{\text{Area under over all}} \times 100 \quad (1)$$

2.3. Preparation of maleic anhydride grafted PBAT (PBAT-g-MA) as a compatibilizer

The preparation of PBAT-g-MA was conducted in a twin-screw extruder. The weight ratio of PBAT/Maleic anhydride/Luperon®101 was fixed at 100:5:0.5 by weight. The screw speed was 60 rpm and temperature profile was 130/140/150/160/170/170/170/160 °C from feed zone to die zone. The extruded was cooled in the air.

The International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020

2.4. Preparation of PBAT/MTPS blends

PBAT, MTPS and PBAT-g-MA were dried in the oven at 60 °C for 12 hours before processing step. The preparation of PBAT/MTPS blends was conducted in a twin-screw extruder. The screw speed was 60 rpm and temperature profile was 120/140/150/150/155/155/160/150 °C from feed zone to die zone. In the case of the compatibilized PBAT/MTPS blends, the PBAT-g-MA with amount of 10 wt% of PBAT was used. The PBAT/MTPS ratios were varied at 90:10, 80:20 and 70:30 by weight. The extruded was cooled in the air and dried in the vacuum oven at 40 °C for 4 hours. All specimens of PBAT/MTPS blends with and without PBAT-g-MA were compression-molded at 160 °C with 1,500 psi pressure by compression molding.

2.5. Morphology analysis

The morphology of PBAT/MTPS blends with and without PBAT-g-MA were investigated by scanning electron microscope (SEM, MIRA3 TESCAN, Australia). All of samples were quenched and fractured in liquid nitrogen, then adhered on carbon tape and stub and finally coated with a thin layer of gold before the SEM investigation.

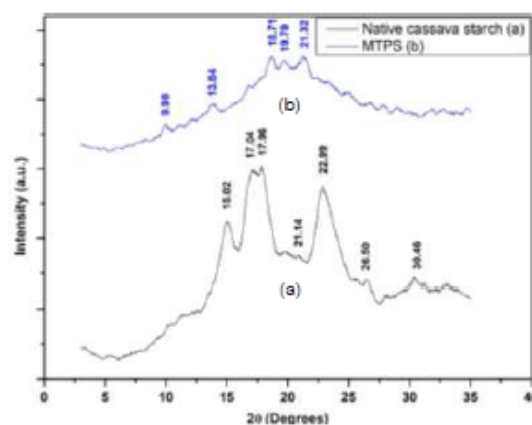
2.6. Mechanical properties

The mechanical properties were investigated using a universal testing machine (Instron 5969, Instron, USA.) at a crosshead speed of 50 mm/min according to ASTM D882. The dimensions of the samples were 50.8 mm x 25.4 mm x 0.50 mm (length, width, and thickness).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. X-ray diffraction (XRD) analysis

The XRD patterns of native cassava starch and MTPS were represented in Figure 1. The XRD patterns of native cassava starch in Figure 1 (a) showed main peak (2 θ) at 15.02°, 17.04°, 17.96°, 21.14°, 22.99°, 26.50° and 30.64° which are characteristic to A-type crystal [7]. The XRD patterns of MTPS are represented in Figure 1 (b). It was found that the peak at 15.02°, 17.04° and 17.96° were absent. Moreover, intensities of peak at 18.71° and 19.79° were low suggesting that the A-type crystals of the native cassava starch was partially destroyed during the reactive extrusion processing. Furthermore, MTPS showed new peak at 13.84° and 21.32°, indicating that the V_H-type crystals of the crystallinity between plasticizer and native cassava starch [8]. The crystallinity of MTPS was lower than native cassava starch from 35.81% to 12.56%, suggesting that MTPS possessed more amorphous structure compared with native cassava starch.



The International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020

Figure 1. XRD patterns of (a) Native cassava starch and (b) MTPS

3.2. Morphology analysis

The SEM micrographs of the PBAT/MTPS and PBAT/MTPS/PBAT-g-MA blends at ratios of 90/10, 80/20 and 70/30 are shown in Figure 2. The SEM images of the PBAT/MTPS blends without adding PBAT-g-MA compatibilizer in Figure 2 (a)-(c), revealed that PBAT was the continuous phase, while MTPS was the dispersed phase in form of spherical droplets [9]. When the amount of MTPS increased, the dispersed phase of MTPS became smaller and better dispersion in continuous phase of PBAT. This result indicated that increasing amount of MTPS improved the compatibility between PBAT and MTPS [2, 9, 10]. Regards to SEM images of the PBAT/MTPS/PBAT-g-MA blends with adding the PBAT-g-MA compatibilizer as shown in Figure 2 (d)-(e), the better dispersion of MTPS phase in continuous phase of PBAT was observed. This is because maleic anhydride on PBAT-g-MA compatibilizer can react with carboxyl group of PBAT and hydroxyl group of MTPS resulting in an improvement of interfacial adhesion between PBAT and MTPS [10].

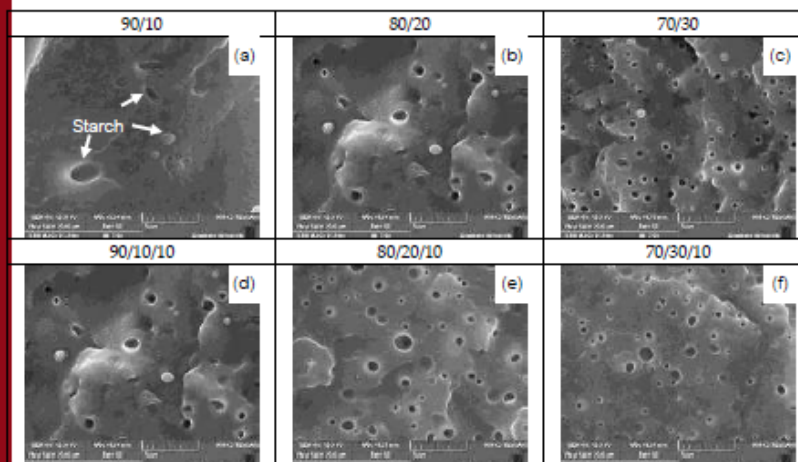


Figure 2. SEM images of the PBAT/MTPS and PBAT/MTPS/PBAT-g-MA blends at magnification $\times 10,000$: (a) 90/10, (b) 80/20, (c) 70/30, (d) 90/10/10, (e) 80/20/10 and (f) 90/10/10

3.3. Mechanical properties

The mechanical properties of PBAT, MTPS, uncompatibilized PBAT/MTPS and compatibilized PBAT/MTPS including tensile strength, elongation at break and young's modulus are represented in Figure 3 (a), (b) and (c) respectively. Regarding tensile strength and elongation at break in Figure 3 (a) and (b), it was found that an increase in MTPS content in the polymer blends led to an increase in tensile strength and elongation at break because of the better dispersion of MTPS phase in the PBAT matrix as showed in Figure 2, resulting in improving in tensile strength and elongation at break in the polymer blends. Comparing to the uncompatibilized PBAT/MTPS blends, the blends with adding PBAT-g-MA showed higher tensile strength and elongation at break because PBAT-g-MA could enhance interfacial adhesion between PBAT and MTPS, leading to better compatibility between PBAT and MTPS. Considering to young's modulus, the increasing content of MTPS as shown in Figure 3 (c) resulted in a reduction of young's modulus because MTPS had more brittle than PBAT. Moreover, the addition of PBAT-g-MA caused a reduction of young's modulus.

The International Conference on Engineering and
Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020

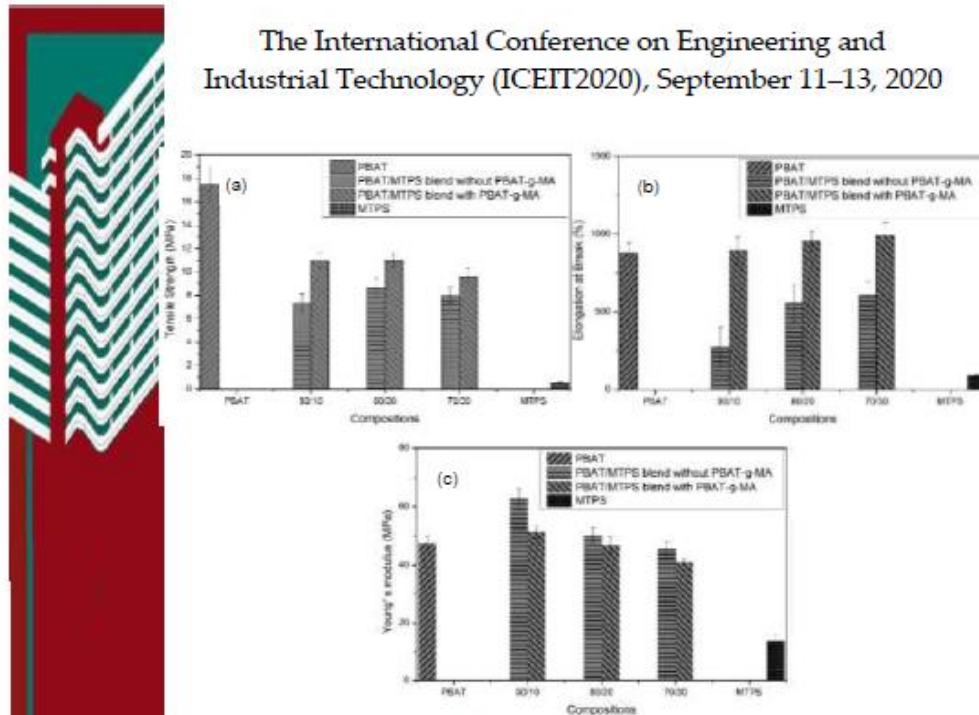


Figure 3. Mechanical properties of PBAT, MIPS, uncompatibilized PBAT/MIPS and compatibilized PBAT/MIPS blends : (a) Tensile strength, (b) Elongation at break and (c) Young's modulus.

4. CONCLUSION

Maleated thermoplastic starch (MIPS) was successfully prepared through reactive extrusion processing. XRD diffraction analysis confirmed that the A-type crystals of the native cassava starch in MIPS was reduced during the reactive extrusion processing. The SEM micrographs revealed that addition of PBAT-g-MA improved the compatibility between PBAT and MIPS. Tensile results showed that tensile strength and elongation at break increased with increasing MIPS content. The PBAT/MIPS/PBAT-g-MA blends provided higher tensile strength and elongation at break than the PBAT/MIPS blends. This indicated that the addition of PBAT-g-MA improved mechanical properties in the PBAT/MIPS blend.


ACKNOWLEDGEMENT

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

REFERENCES

- [1] Zhang S, He Y, Lin Z, Li J and Jiang G Effects of tartaric acid contents on phase homogeneity, morphology and properties of poly (butylenedipate-co-terephthalate)/thermoplastic starch bio-composites. *Polym. Test.* 2019, 76, 385-395.
- [2] Garalde RA, Thipmanee R, Jariyasakoolroj P and Sane A The effects of blend ratio and storage time on thermoplastic starch/poly(butylene adipate-co-terephthalate) films. *Heliyon.* 2019, 5, e01251.

The International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020), September 11–13, 2020

- 
- [3] Brandelero RPH, Grossmann MVE and Yamashita F Effect of the method of production of the blends on mechanical and structural properties of biodegradable starch films produced by blown extrusion. *Carbohydr. Polym.* 2011, 86(3), 1344-50.
- [4] Hablot E, Dewasthale S, Zhao Y, Zhiguan Y, Shi X, Graiver D and Narayan R Reactive extrusion of glycerylated starch and starch-polyester graft copolymers. *Eur. Polym. J.* 2013, 49(4), 873-81.
- [5] Raquez JM, Nabar Y, Narayan R and Dubois P In situ compatibilization of maleated thermoplastic starch/polyester melt-blends by reactive extrusion. *POLYM ENG SCI.* 2008, 48(9), 1747-54.
- [6] Stagner JA, Alves VD and Narayan R Application and performance of maleated thermoplastic starch-poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends for films. *J APPL POLYM SCI.* 2012, 126(S1), E135-E42.
- [7] Wang P, Chen F, Zhang H, Meng W, Sun Y and Liu C Large-scale preparation of jute-fiber-reinforced starch-based composites with high mechanical strength and optimized biodegradability. *STARCH-STARKE.* 2017, 69(11-12), 1700052. [8] Abdolahi A, Hamzah E, Ibrahim Z and Hashim S 2012 *Mater* 5(8) 1487-1494.
- [8] Raquez JM, Nabar Y, Srinivasan M, Shin BY, Narayan R and Dubois P Maleated thermoplastic starch by reactive extrusion. *Carbohydr. Polym.* 2008, 74(2), 159-69.
- [9] Damnak M, Fourati Y, Tarrés Q, Delgado-Aguilar M, Mutjé Pe and Boufi S Blends of PBAT with plasticized starch for packaging applications: Mechanical properties, rheological behaviour and biodegradability. *Ind Crops Prod.* 2020, 144, p. 112061.
- [10] Wei D, Wang H, Xiao H, Zheng A and Yang Y Morphology and mechanical properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/potato starch blends in the presence of synthesized reactive compatibilizer or modified poly(butylene adipate-co-terephthalate). *Carbohydr. Polym.* 2015, 123, 275-82.



รายการอ้างอิง

อ้างอิง

1. จำกัต์, บ.ช.พ. โฟมกันกระแทก (*EPE Foam*). [cited 2021 24 May]; Available from: <http://www.cnplaspac.com/-epe-foam>.
2. Online, S.N. ปีนี้เอาจริง! เลิกใช้พลาสติก 3 ประเภทในไทย. [cited 201 24 May]; Available from: <https://www.springnews.co.th/news/480783>.
3. Kmetty, Á., K. Litauszki, and D. Réti, *Characterization of Different Chemical Blowing Agents and Their Applicability to Produce Poly(Lactic Acid) Foams by Extrusion*. Applied Sciences, 2018. 8(10): p. 1960.
4. Li, G., et al., *Rheological properties and foam preparation of biodegradable poly(butylene succinate)*. Journal of Applied Polymer Science, 2013. 127(5): p. 3586-3594.
5. Song, J., et al., *Chain extension of poly (butylene adipate-co-terephthalate) and its microcellular foaming behaviors*. Polymer Degradation and Stability, 2018. 157.
6. สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, รฐ. *Polybutyrate adipate terephthalate (PBAT)*. [cited 2021 24 May]; Available from: http://packaging.oie.go.th/new/admin_control/file_technology/120763594.pdf.
7. Hablot, E., et al., *Reactive extrusion of glycerylated starch and starch-polyester graft copolymers*. European Polymer Journal, 2013. 49(4): p. 873-881.
8. Raquez, J.-M., et al., *In situ compatibilization of maleated thermoplastic starch/polyester melt-blends by reactive extrusion*. Polymer Engineering & Science, 2008. 48(9): p. 1747-1754.
9. Stagner, J.A., V.D. Alves, and R. Narayan, *Application and performance of maleated thermoplastic starch-poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends for films*. Journal of Applied Polymer Science, 2012. 126(S1): p. E135-E142.

10. พูนศรีไชยสิทธิ์, ช. โฟมพลาสติก. [cited 2021 24 May]; Available from: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/238_74-78.pdf.
11. Zakiyan, S.E., M.H.N. Famili, and M. Ako, *Controlling foam morphology of polystyrene via surface chemistry, size and concentration of nanosilica particles*. Journal of Materials Science, 2014. 49(18): p. 6225-6239.
12. Ogunsona, E., et al., *Thermal and Mechanical Effects in Polystyrene-Montmorillonite Nanocomposite Foams*. Cellular Polymers, 2011. 30: p. 79-94.
13. Esteban, A., et al., *IMPROVING THE CELLULAR STRUCTURE AND THERMAL CONDUCTIVITY OF POLYSTYRENE FOAMS BY USING SEPIOLITE*. 2012.
14. โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ. รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภทพอลิไบิวทีลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท. [cited 2021 24 May]; Available from: http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20180624234830u.pdf.
15. ปิยะจอมขวัญ, ก.ศ.แ., เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพมหานคร.
16. Synapse. *Carbohydrates part 2*. [cited 2021 24 May]; Available from: <https://thebiochemsynapse.wordpress.com/tag/amylopectin>.
17. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี. เคมีและสมบัติของแป้ง. [cited 2021 24 May]; Available from: http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/CT611/Chap2/chap2_intro.htm.
18. วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี. แป้งมันสำปะหลัง. [cited 2021 24 May]; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%81%E0%B8%9B%E0%B9%89%E0%B8>.
19. Pentrakoon, D., *An introduction to plastic foams*. 2005, Chulalongkorn University Press.
20. ima-europe. *Sepiolite*. [cited 2021 24 May]; Available from: <https://www.ima-europe.eu/about-industrial-minerals/industrial-minerals-ima-europe/sepiolite>.
21. Galan, E., *Properties and applications of palygorskite-sepiolite clays*. Clay Minerals, 1996. 31(4): p. 443-453.
22. Wei, D., et al., *Morphology and mechanical properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/potato starch blends in the presence of synthesized reactive compatibilizer or modified poly(butylene adipate-co-terephthalate)*. Carbohydrate Polymers, 2015. 123: p. 275-282.

23. Fourati, Y., et al., *PBAT/thermoplastic starch blends: Effect of compatibilizers on the rheological, mechanical and morphological properties*. Carbohydrate Polymers, 2018. 199: p. 51-57.
24. Olivato, J.B., et al., *Elaboration, morphology and properties of starch/polyester nano-biocomposites based on sepiolite clay*. Carbohydrate Polymers, 2015. 118: p. 250-256.
25. Lertsiriyothin, W., *Development of methodology for the production of biodegradable cushion from tapioca starch*. Thai Society of Agricultural Engineering Journal, 2014. 20: p. 64-71.
26. Pechurai, W., T. Muansupan, and P. Seawlee, *Effect of Foaming Temperature and Blowing Agent Content on Cure Characteristics, Mechanical and Morphological Properties of Natural Rubber Foams*. Advanced Materials Research, 2013. 844: p. 454-457.
27. Bernardo, V., et al., *PMMA-sepiolite nanocomposites as new promising materials for the production of nanocellular polymers*. European Polymer Journal, 2017. 96: p. 10-26.
28. กาญจนพร สารพัฒน์, ร.เ.แ.อ.แ., *พอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลทและกลูเตนจากแป้งสาลีเพื่อประยุกต์ใช้ในทางการเกษตร*. 2018.
29. กัปตัน สมบูรณ์ชนะชัย, ก.โ., และ จิรนนท์ แก้ววิจิตร, *พอลิเมอร์ผสมระหว่างเจลาตินและเอทิลีนไวนิลอะซิเตทสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร*. 2017.
30. Zuo, Y., et al., *Study on the preparation of maleated thermoplastic starch by reactive extrusion*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2016. 29(3): p. 397-409.
31. Raquez, J.-M., et al., *Maleated thermoplastic starch by reactive extrusion*. Carbohydrate Polymers, 2008. 74(2): p. 159-169.
32. Wang, P., et al., *Large-scale preparation of jute-fiber-reinforced starch-based composites with high mechanical strength and optimized biodegradability*. Starch - Stärke, 2017. 69(11-12): p. 1700052.
33. Kashani Rahimi, S., et al., *The structure and biocompatibility of bioabsorbable nanocomposites of aliphatic-aromatic co-polyester and cellulose nanocrystals*. Biomacromolecules, 2017. 18.

34. Garalde, R.A., et al., *The effects of blend ratio and storage time on thermoplastic starch/poly(butylene adipate-co-terephthalate) films*. Heliyon, 2019. 5(3): p. e01251.
35. Dammak, M., et al., *Blends of PBAT with plasticized starch for packaging applications: Mechanical properties, rheological behaviour and biodegradability*. Industrial Crops and Products, 2020. 144: p. 112061.
36. González Seligra, P., et al., *Influence of incorporation of starch nanoparticles in PBAT/TPS composite films*. Polymer International, 2016. 65(8): p. 938-945.
37. Mohanty, S. and S.K. Nayak, *Starch based biodegradable PBAT nanocomposites: Effect of starch modification on mechanical, thermal, morphological and biodegradability behavior*. International Journal of Plastics Technology, 2009. 13(2): p. 163-185.
38. Buaksuntear, K., *PREPARATION OF THERMOPLASTIC VULCANIZATES FROM NATURAL RUBBER AND POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) BLENDS*. 2018.
39. Stagner, J. and R. Narayan, *Preparation and Properties of Biodegradable Foams*. Journal of Polymers and the Environment, 2011. 19(3): p. 598-606.
40. Yang, C., et al., *A new promising nucleating agent for polymer foaming: Effects of hollow molecular-sieve particles on polypropylene supercritical CO₂ microcellular foaming*. RSC Advances, 2018. 8: p. 20061-20067.
41. Chen, H., et al., *Characterization and properties of sepiolite/polyurethane nanocomposites*. Materials Science and Engineering: A, 2007. 445-446: p. 725-730.
42. Zaini, N.A.M., H. Ismail, and A. Rusli, *Tensile, thermal, flammability and morphological properties of sepiolite filled ethylene propylene diene monomer (EDPM) rubber composites*. Iranian Polymer Journal, 2018. 27(5): p. 287-296.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วราพร สุดตา
วัน เดือน ปี เกิด	26 กันยายน 2537
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน
ที่อยู่ปัจจุบัน	178 ม.4 ซอยเทศบาล 13 ถนนเพชรเกษม ต.อ่าทอง อ.เมือง จ.ราชบุรี 70000
ผลงานตีพิมพ์	Warabhorn Sudta and Sudsiri Hemsri “Study on Morphological and Mechanical Properties of Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) and Cassava Starch Blend” Proceeding in The International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020), Pattaya, Thailand, September 11–13, 2020
รางวัลที่ได้รับ	พ.ศ.2561-2562 (4 ภาคการศึกษา) ได้รับทุนการศึกษาและทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

