

การเตรียมและสมบัติของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตผสมด้วยแกรฟีนดัดแปร



นายธีรวัฒน์ เย็นเพชร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND PROPERTIES OF POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE)
MIXED WITH MODIFIED GRAPHENE

Mr. Teerawat Yenphet



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

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและสมบัติของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟ แทเลตผสมด้วยแกรฟีนดัดแปร
โดย	นายธีรวัฒน์ เย็นเพชร
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

ธีรวัฒน์ เย็นเพชร : การเตรียมและสมบัติของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลตผสมด้วยแกรฟีนดัดแปร (PREPARATION AND PROPERTIES OF POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) MIXED WITH MODIFIED GRAPHENE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: รศ. ดร.ประณัฐ โพธิยะราช, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต ด้วยการนำมาทำคอมพอสิตโดยใช้แกรฟีนดัดแปรเป็นตัวเติมเสริมแรง เริ่มจากนำแกรไฟต์มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและสั่นด้วยคลื่นความถี่สูงให้กลายเป็นแกรฟีนออกไซด์ จากนั้นดัดแปรแกรฟีนออกไซด์ด้วยสารคู่ควบไซเลน ได้แก่ เฮกซะเดกซิลไทรเมทอกซีไซเลน ได้เป็นแกรฟีนออกไซด์ดัดแปร ก่อนที่จะนำมาரிตักชั้นให้กลายเป็นแกรฟีนดัดแปร นำแกรฟีนดัดแปรที่ได้มาเตรียมเป็นมาสเตอร์แบตช์กับพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลตด้วยการตกตะกอนร่วมในเมทานอล แล้วนำมาผสมมาผสมกับพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลตที่อัตราส่วนต่างๆ ในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ นำคอมพาวนด์ที่ได้มาขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดหล่อฟิล์ม ทดสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มที่เตรียมขึ้น ผลการทดลองพบว่าแกรฟีนดัดแปรมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงดีกว่าแกรฟีนที่ไม่ได้ดัดแปร เนื่องจากแกรฟีนดัดแปรสามารถเข้ากับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี ทำให้การกระจายตัวสม่ำเสมอลดการเกาะตัวเป็นก้อน ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติด้านแรงดึง ความทนแรงฉีกขาดที่ดีกว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลตและฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิต ส่วนความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิตมีค่าต่ำที่สุด แต่ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตก็ยังสามารถต้านไฟฟ้าสถิตได้

ภาควิชา วัสดุศาสตร์
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และ ทยมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
เทคโนโลยีสิ่งทอ

ปีการศึกษา 2558

5772018223 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS: POLYBUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE / NANOCOMPOSITE / GRAPHENE

TEERAWAT YENPHET: PREPARATION AND PROPERTIES OF POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) MIXED WITH MODIFIED GRAPHENE. ADVISOR: ASSOC. PROF. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., 96 pp.

This research aims at enhancing physical properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate) films by preparing composites with modified graphene as a reinforcing filler. Initially, graphite was oxidized and sonicated by using sonicator to obtain graphene oxide. Then, graphene oxide was modified with a silane coupling agent, that are hexadecyltrimethoxysilane. The modified graphene oxide was then reduced to obtain modified graphene. The modified graphene was used to prepare masterbatch of poly(butylene adipate-co-terephthalate) by co-precipitation technique in methanol. The masterbatch was then mixed with poly(butylene adipate-co-terephthalate) at various ratios in a twin-screw extruder. The obtained compounds were processed into films using a chill-roll cast extruder. The films were then tested for their properties. The results indicated that modified graphene had better reinforcing efficiency than that of unmodified as the modified graphene is more compatible with polymer matrix thus improved distribution as well as reduced agglomeration. The obtained films from poly(butylene adipate-co-terephthalate)/modified graphene had better tensile strength and tear strength than from poly(butylene adipate-co-terephthalate) and from poly(butylene adipate-co-terephthalate)/graphene. Although the electrical resistance of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/modified graphene films were lower than that of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/graphene, but the resistance was still in the acceptable range to be used in antistatic applications.

Department: Materials Science Student's Signature

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

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โปธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยในการทดลอง ค้นคว้าวิจัย และสนับสนุนทั้งด้านคำแนะนำ การทำงาน และงบประมาณมาโดยตลอดจนกระทั่งสำเร็จลงได้ในครั้งนี้ รวมถึงการดูแลเอาใจใส่และเสียสละเวลาในการตรวจสอบ แก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดาที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจ และรองศาสตราจารย์ไพพรรณ สันติสุข ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน เจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวัสดุศาสตร์ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้คำแนะนำความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทางานวิจัย

ขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือในการทางานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจในการทางานวิจัยครั้งนี้ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	3
2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แบ่งตามแหล่งวัตถุดิบ.....	3
2.1.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แบ่งตามชนิดการสลายตัว.....	4
2.1.2.1 พลาสติกชีวภาพชนิดสลายตัวได้ทางชีวภาพ.....	4
2.1.2.2 พลาสติกชีวภาพชนิดสลายตัวไม่ได้ทางชีวภาพ.....	4
2.2 พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต.....	5
2.2.1 ข้อมูลทั่วไปของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต.....	5
2.2.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต.....	5
2.2.3 สมบัติของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต.....	6
2.2.4 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต.....	7
2.2.5 การนำพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตไปใช้ประโยชน์.....	7

2.3 วัสดุคอมพอสิต.....	8
2.3.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ	8
2.3.2 เมทริกซ์.....	9
2.3.3 ตัวเติม	11
2.4 แกรไฟีน	13
2.4.1 การสังเคราะห์แกรไฟีน	14
2.4.2 สมบัติของแกรไฟีน	15
2.5 ไชเลน	17
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	21
3.1 สืบค้นข้อมูลทางวิชาการและทบทวนวรรณกรรม	21
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	22
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	24
3.4.1 การเตรียมแกรไฟีนดัดแปร.....	24
3.4.1.1 การเตรียมแกรไฟีนออกไซด์ด้วยโดยใช้การฮัมเมอร์ดัดแปรและออฟแมน	
[25]	24
3.4.1.2 การสังเคราะห์แกรไฟีนดัดแปร	25
3.4.1.3 การสังเคราะห์แกรไฟีน	25
3.4.2 การเตรียมคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทอเลตเพื่อวิเคราะห์และ	
ทดสอบสมบัติที่แตกต่างกันจากผลของสารเสริมแรงแกรไฟีนดัดแปรและแกรไฟีน .	27
3.4.2.1 การเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทอ	
เลต/แกรไฟีนดัดแปร และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทอเลต/แกรไฟีนคอมพ	
สิต	27

3.4.2.2 การเตรียมพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปร	27
คอมพาวนด์ และพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพาวนด์	27
3.4.2.3 การเตรียมฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต.....	29
3.4.3 การเตรียมพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตเพื่อวิเคราะห์และ	
ทดสอบสมบัติจากผลของปริมาณสารเสริมแรงแกรฟีนดัดแปรที่แตกต่างกัน	30
3.4.3.1 การเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอม	
พอสิต	30
3.4.3.2 การเตรียมพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพาวนด์	31
3.4.3.3 การเตรียมฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต.....	32
3.4.4 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติ	32
3.4.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟรา	
เรดสเปกโทรสโกปี	32
3.4.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์โพโตอิเล็กตรอนสเปก	
โทรสโกปี	33
3.4.4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ..	33
3.4.4.4 วิเคราะห์สัณฐานวิทยา ชนิด ปริมาณ และการกระจายของ.....	34
องค์ประกอบธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	34
3.4.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกน.....	36
นิ่งแคลอริเมทรี.....	36
วิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c).....	36

อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (melting temperature, T_m) และปริมาณผลึก (degree of crystallinity, X_c) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิต ตามมาตรฐาน ASTM D7426 ด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ใช้ภาวการณ์ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 150 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนและเย็นตัวเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศ แก๊สไนโตรเจน	36
3.4.4.6 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง	37
3.4.4.7 การทดสอบความทนแรงฉีกขาด	38
3.4.4.8 การทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้า	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	40
4.1 สมบัติของแกรฟีนออกไซด์	40
4.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	40
4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี	41
4.1.3 สันฐานวิทยาของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์	42
4.2 สมบัติของแกรฟีนดัดแปร	42
4.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	42
4.2.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี	44
4.2.3 โครงสร้างผลึก	46
4.2.4 สันฐานวิทยาของแกรฟีนออกไซด์ แกรฟีน และแกรฟีนดัดแปร	46

4.2.5 การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบธาตุของแกรไฟีนออกไซด์ แกรไฟีน และแกรไฟีนดัดแปร.....	48
4.3 สมบัติของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลต/แกรไฟีนดัดแปรคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลต/แกรไฟีนคอมพอสิต	48
4.3.1 สันฐานวิทยา.....	48
4.3.2 โครงสร้างผลึก	50
4.3.3 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลต/แกรไฟีนดัดแปรคอมพอสิต และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลต/แกรไฟีนคอมพอสิต.....	51
4.3.4 สมบัติด้านแรงดึง	52
4.3.5 ความทนแรงฉีกขาด.....	56
4.3.6 สมบัติทางไฟฟ้า	57
4.4 สมบัติของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลตคอมพอสิต.....	58
4.4.1 สันฐานวิทยา.....	58
4.4.2 โครงสร้างผลึก	60
4.4.3 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลตคอมพอสิต	61
4.4.4 สมบัติด้านแรงดึง	62
4.4.5 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลตคอมพอสิต.....	67
4.4.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลต/แกรไฟีน	68
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	70
5.1 สรุปผลการทดลอง	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	71

รายการอ้างอิง	72
ภาคผนวก ก.....	77
ภาคผนวก ข.....	89
ภาคผนวก ค.....	91
ภาคผนวก ง	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	96



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2. 1	วงจรชีวิตของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	3
รูปที่ 2. 2	โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต.....	5
รูปที่ 2. 3	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต.....	6
รูปที่ 2. 4	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต.....	6
รูปที่ 2. 5	การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของ.....	9
รูปที่ 2. 6	สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ.....	10
รูปที่ 2. 7	วัสดุคอมพอสิตตามประเภทลักษณะของตัวเสริมแรงชนิดต่างๆ.....	13
รูปที่ 2.8	โครงสร้างของอนุภาคแกรไฟีน.....	14
รูปที่ 2.9	โครงสร้างของอนุภาคคาร์บอน.....	14
รูปที่ 2.10	วิธีการสังเคราะห์แกรไฟีน.....	15
รูปที่ 2.11	แสดงแถบพลังงานของแกรไฟีนโดยแกนตั้งเป็นพลังงาน และแกนนอนเป็นโมเมนตัม ซึ่งโครงสร้างแถบพลังงานมีลักษณะคล้ายกรวยหกจุด.....	16
รูปที่ 2.12	สูตรโครงสร้างทางเคมีและการเข้าทำปฏิกิริยาของสารไซเลน.....	17
รูปที่ 3. 1	เครื่องปั่นเหวี่ยง ของ Med inter รุ่น TD5M-WS.....	24
รูปที่ 3. 2	เครื่องอัลตราโซนิก ของ Nisd laboratory instruments รุ่น WUC-D06H.....	25
รูปที่ 3. 3	ชุดเตรียมแกรไฟีนตัดแปรด้วยเฮกซะเดกซิลไตรเมทอกซีไซเลนและกรดแอล แอสคอร์บิก.....	26
รูปที่ 3. 4	การกรองแกรไฟีนตัดแปรด้วยชุดกรองบุชเนอร์แบบสุญญากาศ.....	26
รูปที่ 3. 5	เครื่องอัลทริตสกรูคูของ Thermo Prism รุ่น DSR-28.....	29
รูปที่ 3. 6	เครื่องตัดเม็ดพลาสติกของ Labtech Engineering รุ่น LZ-80/VS.....	29
รูปที่ 3. 7	เครื่องรีดหล่อฟิล์มของ Labtech Engineering รุ่น LCR-300HDCO-EX.....	30
รูปที่ 3. 8	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของ Thermo Scientific.....	33
รูปที่ 3. 9	เครื่องสเปกโตรสโกปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ ของ Kratos Analytical รุ่น AXIS Ultra DLD.....	33

รูปที่ 3. 10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึก ของ Bruker AXS รุ่น D8 Advance.....	34
รูปที่ 3. 11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ของ JEOL รุ่น JSM-6400LV.....	35
รูปที่ 3. 12 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของ Mettler Toledo รุ่น DSC/1STER ^e	37
รูปที่ 3. 13 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของ LLOYD รุ่น LR100K.....	38
รูปที่ 3. 14 เครื่องวัดทดสอบไฟฟ้า (picoammeter/voltage source) ของ KEITHLEY รุ่น 487.....	39
รูปที่ 4. 1 อินฟราเรดสเปกตรัมของแกรไฟต์และ แกรฟีนออกไซด์.....	40
รูปที่ 4. 2 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์.....	41
รูปที่ 4. 3 สันฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของแกรไฟต์ (1) แกรฟีนออกไซด์ (2).....	42
รูปที่ 4. 4 ปฏิกิริยาที่ใช้ในการเตรียมแกรฟีนดัดแปร.....	43
รูปที่ 4. 5 อินฟราเรดสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ (GO) แกรฟีนออกไซด์ดัดแปร (F-GO).....	43
รูปที่ 4. 6 เอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ แกรฟีนออกไซด์ดัดแปร.....	45
รูปที่ 4. 7 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ แกรฟีน และแกรฟีนดัดแปร.....	46
รูปที่ 4. 8 สันฐานวิทยาบริเวณพื้นที่ภาคตัดขวางของ แกรฟีนออกไซด์ (1)(2).....	47
รูปที่ 4. 9 สันฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์(1) พอลิ บิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต (2) พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแท เลต/แกรฟีนคอมพอสิต(3) และสันฐานวิทยาบริเวณพื้นที่ภาคตัดขวางของพอลิบิวทิลีนแอดิเพต โคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์(4) พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต(5)(7) พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต(6)(8).....	50
รูปที่ 4. 10 โครงสร้างผลึกของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มพอลิ บิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแท เลต/.....	50
รูปที่ 4. 11 ความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต.....	52

รูปที่ 4. 12 ความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตใน ทิศทางขวางแนวเครื่องจักร.....	52
รูปที่ 4. 13 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มคอมพอสิต ของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีน และฟิล์มคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนแอดิเพต โคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรในทิศทางตามแนวเครื่องจักร.....	53
รูปที่ 4. 14 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ พอลิบิวทิลีน แอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกร ฟีนคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร.....	53
รูปที่ 4. 15 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ พอลิ บิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแท เลต/แกรฟีนคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร.....	54
รูปที่ 4. 16 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ พอลิ บิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแท เลต/แกรฟีนคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร.....	55
รูปที่ 4. 17 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ พอลิบิว ทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/ แกรฟีนคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร.....	56
รูปที่ 4. 18 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ พอลิบิว ทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/ แกรฟีนคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร.....	56
รูปที่ 4. 19 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปร คอมพอสิต(PBAT/0.5%FG) และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต (PBAT/0.5%FG).....	57
รูปที่ 4. 20 สันฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีน ดัดแปรคอมพอสิต(1-10) และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์.....	60
รูปที่ 4. 21 แสดงโครงสร้างผลึกของแกรฟีนดัดแปร และ พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแท เลตคอมพอสิต.....	61

รูปที่ 4. 22 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร.....	62
รูปที่ 4. 23 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร.....	63
รูปที่ 4. 24 โมดูลัสของยังของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร.....	64
รูปที่ 4. 25 โมดูลัสของยังของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร.....	64
รูปที่ 4. 26 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร.....	66
รูปที่ 4. 27 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร.....	66
รูปที่ 4. 28 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร.....	67
รูปที่ 4. 29 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต ในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร.....	68
รูปที่ 4. 30 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต.....	69

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3. 1	อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการเตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพาวนด์.....	28
ตารางที่ 3. 2	อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต.....	30
ตารางที่ 3. 3	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพาวนด์.....	31
ตารางที่ 3. 4	อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต.....	32
ตารางที่ 4. 1	เปอร์เซ็นต์องค์ประกอบธาตุของแกรฟีนออกไซด์ แกรฟีน และแกรฟีนดัดแปร ...	48
ตารางที่ 4. 2	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีน และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปร	51
ตารางที่ 4. 3	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผลิตภัณฑ์พลาสติกส่วนใหญ่ผลิตจากวัตถุดิบทางปิโตรเคมี ก่อให้เกิดปัญหาปริมาณขยะพลาสติกสะสมเพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ขณะที่พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำเมื่อนำไปฝังกลบในสภาพแวดล้อมทางชีวภาพที่เหมาะสม พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพบางชนิดยังสามารถสังเคราะห์จากแหล่งทรัพยากรที่สามารถสร้างใหม่ทดแทนได้อีกด้วย

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ในปัจจุบันมีจำหน่ายทางการค้าและได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งจากนักอุตสาหกรรมและนักวิชาการ คือ พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate) ซึ่งเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์ มีสมบัติยืดหยุ่นและเหนียว สมบัติการขึ้นรูปคล้ายพอลิเอทิลีน อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต ยังค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทบรรจุภัณฑ์บางประเภท จุดด้อยเหล่านี้สามารถปรับปรุงได้ด้วยการนำพอลิเมอร์มาทำเป็นคอมพอสิตกับตัวเติมที่มีความแข็งแรง และเมื่อเร็วๆ นี้มีงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งเน้นการพัฒนาตัวเติมที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงให้สูงขึ้น

แกรฟีนเป็นอนุภาคของคาร์บอนชั้นเดียวในระดับนาโนเมตร มีสมบัติการนำความร้อนและไฟฟ้าสูง มีพื้นที่ผิวมากและความแข็งแรงเชิงกลที่ดี แต่มีข้อด้อยคือ แกรฟีนมีแรงแวนเดอร์วาลส์ที่แข็งแรงระหว่างแผ่น ทำให้เป็นการยากสำหรับแกรฟีนเพื่อให้กระจายเป็นแผ่นเดียวในชั้นเมทริกซ์ ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาปรับปรุงบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพให้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อนเหมาะกับการใช้งาน และมีสมบัติในการต้านไฟฟ้าสถิตได้ โดยการปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต ด้วยการทำเป็นคอมพอสิตโดยใช้แกรฟีนเป็นตัวเติม แต่เนื่องจากแกรฟีนกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ไม่ดึน จึงมีแนวคิดในการปรับปรุงพื้นผิวของแกรฟีนด้วยสารคู่ควบ เพื่อให้แกรฟีนกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ คอมพอสิตที่ได้จะถูกนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการนำไฟฟ้าเพื่อประเมินทางเลือกที่เหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เตรียมแกรฟีนดัดแปรโดยใช้สารคู่ควบไซเลนเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้และการกระจายตัว

1.2.2 ศึกษาผลของปริมาณแกรฟีนดัดแปรที่ใช้เป็นสารตัวเติมในฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตที่เตรียมได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

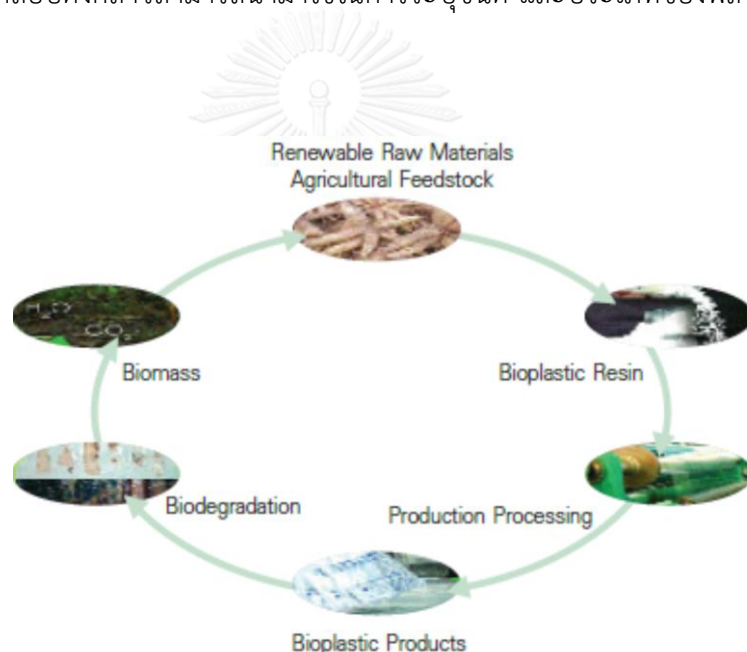
ได้ฟิล์มนาโนคอมพอสิตพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตเสริมแรงด้วยแกรฟีนดัดแปร ที่มีสมบัติเชิงกล และสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี



บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ คือพลาสติกที่ออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะและการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวต้องเกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ เป็นสาเหตุให้สมบัติบางประการของพลาสติกมีแนวโน้มลดลง โดยสามารถวัดการย่อยสลายได้จากวิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับกับพลาสติกและการใช้งาน ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการระบุชนิด และประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ [1]



รูปที่ 2. 1 วงจรชีวิตของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [1]

2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แบ่งตามแหล่งวัตถุดิบ
วัตถุดิบที่ใช้ผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

2.1.1.1 แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้

แหล่งธรรมชาติ (Biological Source) คือวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ ซึ่งสามารถหาหรือปลูกทดแทนได้ (Renewable Source) ได้แก่ พืชจำพวกแป้งและน้ำตาล เช่น มันฝรั่ง อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด เป็นต้น ตัวอย่างพลาสติกย่อยสลายในกลุ่มนี้ เช่น

- พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) ผลิตโดยนำแป้ง หรือน้ำตาลมาผ่านกระบวนการหมัก ด้วยจุลินทรีย์ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดเป็นกรดแลคติก เพื่อใช้เป็นมอนอเมอร์ (Monomer) ในขั้นตอนการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์
- พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate, PBS) เป็นพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 4 ผลิตจากกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล ซึ่งมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี และจากวัตถุดิบธรรมชาติ โดยผ่านกระบวนการหมักแป้งและน้ำตาลได้เป็นกรดซัคซินิก เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต 1,4-บิวเทนไดออล ผ่านการเตรียมเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์

2.1.1.2 แหล่งวัตถุดิบจากปิโตรเลียม

แหล่งวัตถุดิบจากปิโตรเลียม เป็นแหล่งวัตถุดิบที่ไม่สามารถหาทดแทนได้ และถูกใช้เป็นทั้งแหล่งให้พลังงาน และแหล่งวัตถุดิบในกระบวนการผลิต แหล่งวัตถุดิบดังกล่าว เช่น วัตถุดิบที่มาจากน้ำมันดิบหรือแก๊สธรรมชาติ โดยที่พลาสติกชีวภาพในกลุ่มนี้ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly Vinyl Alcohol, PVA) หรือพอลิคาร์โพลแลคโตน (Polycaprolactone, PCL) [2]

2.1.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แบ่งตามชนิดการสลายตัว

2.1.2.1 พลาสติกชีวภาพชนิดสลายตัวได้ทางชีวภาพ

พลาสติกสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Compostable Plastics) คือ พลาสติกที่เมื่อนำไปผ่านกระบวนการหมักทางชีวภาพในโรงปุ๋ยหมัก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอินทรีย์ มวลชีวภาพ และต้องไม่มีสิ่งแปลกปลอมโดยมีแหล่งกำเนิดได้จากวัตถุดิบชีวมวล (Biomass) หรือวัตถุดิบทางการเกษตร ที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ (Renewable or bio-based) หรือวัตถุดิบที่มาจากปิโตรเคมี (Nonrenewable or petro-based)

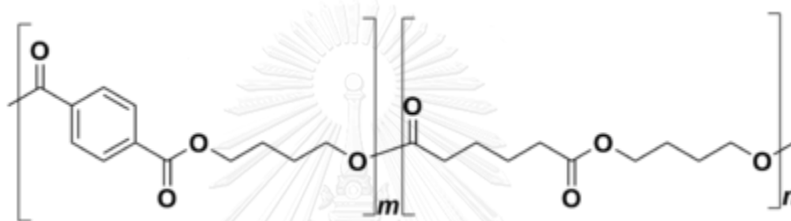
2.1.2.2 พลาสติกชีวภาพชนิดสลายตัวไม่ได้ทางชีวภาพ

พลาสติกชีวภาพชนิดสลายตัวไม่ได้ทางชีวภาพ (Non-Compostable Plastics) เป็นพลาสติกที่สังเคราะห์ขึ้นจากพืชเท่านั้น เช่น มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวโพด เป็นต้น โดยมีคุณสมบัติเหมือนพลาสติกธรรมดาทั่วไป (Conventional Plastics) ที่ได้จากปิโตรเลียมทุกประการ แต่สลายตัวไม่ได้ทางชีวภาพ (Non-Compostable) คือไม่สลายได้ด้วยจุลินทรีย์ พลาสติกประเภทนี้ถือเป็นแหล่งวัสดุทดแทนพลาสติกธรรมดาทั่วไป อย่างไม่มีการสิ้นสุด (Renewable) ที่มาจากแหล่งน้ำมัน [3]

2.2 พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต

2.2.1 ข้อมูลทั่วไปของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต

พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate, PBAT) หรือ พอลิบิวทิลเรต(Polybutyrate) มีชื่อทางการค้าที่หลากหลายเช่น Ecoflex Ecoworld Eastar Bio และOrigo-Bi เป็นต้น เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ชนิดอะลิฟาติก-อะโรมาติก โคพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2. 2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต

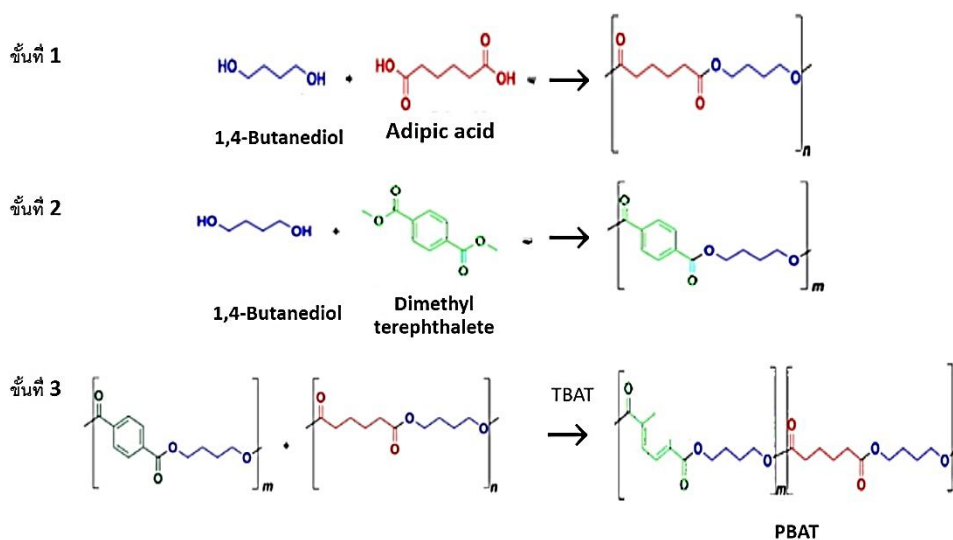
2.2.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต

พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลตสามารถเตรียมได้จากยาปฏิกิริยาการควบแน่นของ บิวทิลีนแอดิเพตพอลิเมอร์ (butylene adipate) และไดเมทิลเทเรพทาเลต (dimethyl terephthalate) กับ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) ดังแสดงใน รูปที่ 2.3

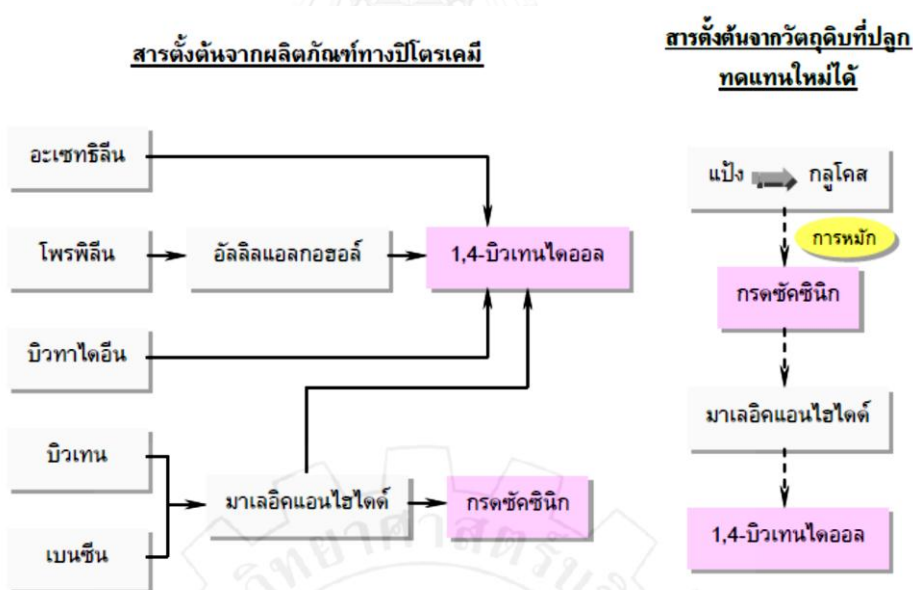
โดยขั้นที่หนึ่ง กรดแอดิพิก (adipic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นบิวทิลีนแอดิเพต พอลิเอสเทอร์พอลิเมอร์ จากนั้นในขั้นที่สอง ไดเมทิลเทเรพทาเลต และ 1,4-บิวเทนไดออล จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็น พอลิเอสเทอร์ชนิดที่สอง ในขั้นตอนที่สามพอลิเอสเทอร์ทั้งสองชนิดจะทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้เป็นพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต [4]

ในปัจจุบันมอนอเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลตสามารถสังเคราะห์ได้จากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีและจากวัตถุดิบที่ปลูกใหม่ทดแทนได้ ไม่ว่าจะเป็นไดเมทิลเทเรพทาเลต ซึ่งเตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี และ 1,4-บิวเทนไดออล ที่เตรียมได้จากทั้งวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้และ ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี โดยผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีเริ่มจากแก้วบิวเทนที่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และถูกเปลี่ยนเป็นกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออลได้ต่อไป นอกจากนี้ 1,4-บิวเทนไดออล สามารถถูกเตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ เช่น แป้ง อ้อย

และมันสำปะหลัง เป็นต้น ผ่านกระบวนการหมักได้เป็นกรดซัคซินิกซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิต 1,4-บิวเทนไดออล ดังแสดงในรูป 2.4 [5]



รูปที่ 2. 3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต



รูปที่ 2. 4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต [1]

2.2.3 สมบัติของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต

พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตมีความหนาแน่น 1.25-1.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีช่วงอุณหภูมิการหลอมผลึก ประมาณ 110-120 องศาเซลเซียส สมบัติเชิงกลมีคุณสมบัติคล้ายพอลิ

เอทิลีน มีความยืดหยุ่นสูงมาก มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง มีความสามารถในการขึ้นรูปง่ายหลายวิธี นิยมนำไปทำการผสมกับพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ เนื่องจากสามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่มีข้อด้อย คือ สมบัติเชิงกลมีความแข็งแรงต่ำ สมบัติเชิงไฟฟ้ามีความสามารถนำไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นในการนำไปขึ้นรูปใช้งานจึงนิยมนำไปปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น วกการทำพอลิเมอร์ผสม หรือ ทำเป็นวัสดุเชิงประกอบ เป็นต้น [6, 7]

2.2.4 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต

การย่อยสลายของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต เกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการ hydro-biodegradable เริ่มจากการย่อยสลายทางชีวภาพโดยผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเกิดขึ้นที่พันธะเอสเทอร์ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้คะตะลิสต์ (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ คะตะลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น ไลเปส(lipases)จาก *Pseudomonas cepacia lipase* และ *Candida cylindracea* [6] ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด(acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล(Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์ บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตลดลง และสามารถเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ต่อไป และหากมีการย่อยสลายที่สมบูรณ์ที่สมบูรณ์จะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ชีวมวล และน้ำ ซึ่งพืชสามารถนำไปสังเคราะห์แสงได้

2.2.5 การนำพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตไปใช้ประโยชน์

พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต สามารถนำไปขึ้นรูปใช้แทนที่พอลิโอเลฟินได้ เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลความยืดหยุ่นสูง มีความเหนียว และขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ง่าย จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง พิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร อุปกรณ์

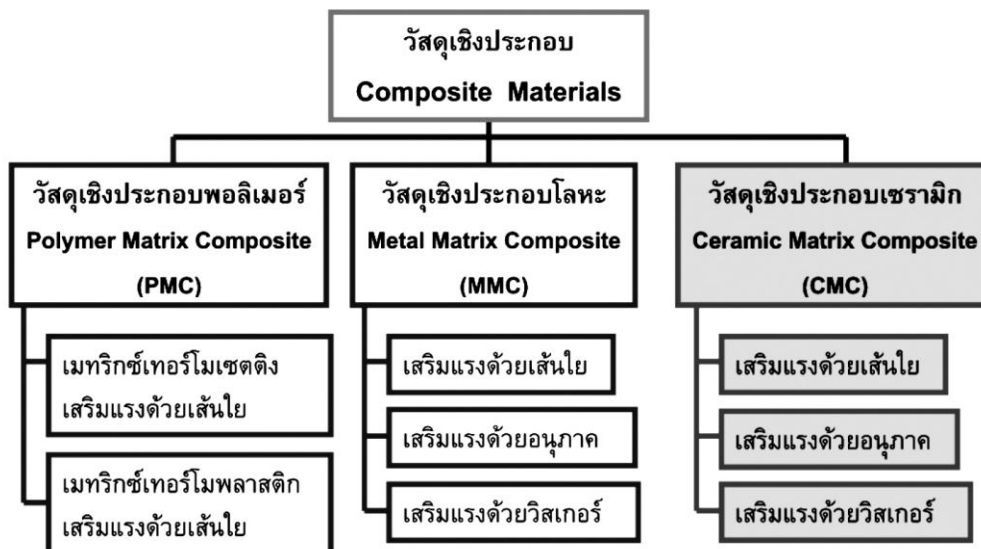
อิเล็กทรอนิกส์ พัลส์คลุมดินสำหรับการเกษตร วัสดุห่อหุ้ม และปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ย เป็นต้น [8]

2.3 วัสดุคอมโพสิต

วัสดุเชิงประกอบหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite materials) คือ วัสดุที่เกิดจากการรวมตัวของวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปแล้วทำให้สมบัติของวัสดุรวมดีขึ้น หรือในความหมายเชิงวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ วัสดุที่เป็นเนื้อหลักและเป็นเฟสต่อเนื่อง เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) ขณะที่วัสดุส่วนที่เหลือที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลัก จะเรียกว่า ตัวเติมเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ปกคลุมตัวเติมเสริมแรงและทำให้วัสดุเชิงประกอบเป็นรูปร่างขึ้น ขณะที่ตัวเติมเสริมแรงมีหน้าที่ปรับปรุงสมบัติให้เมทริกซ์และส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามต้องการ [9]

2.3.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ มีองค์ประกอบสำคัญ คือ เมทริกซ์และตัวเติมเสริมแรง ฉะนั้น ถ้าจำแนกวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์ สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC) วัสดุเชิงประกอบ โลหะ (Metal matrix composite, MMC) และ วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (Ceramic matrix composite, CMC) และสามารถจำแนกย่อย ต่อไปได้อีกตามลักษณะของตัวเติมเสริมแรง ได้แก่ อนุภาค (Particle) เส้นใย (Fiber) และวิสเกอร์ (Whisker)



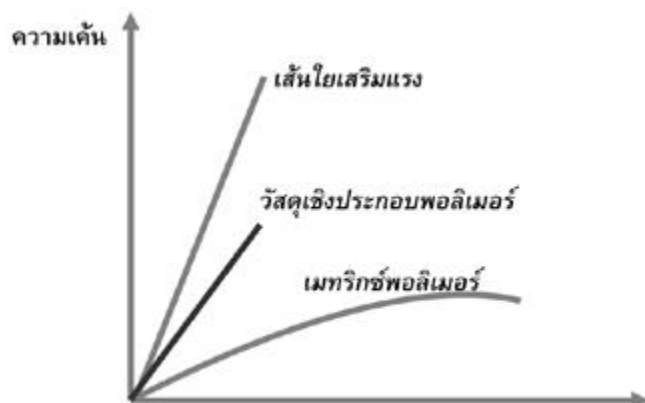
รูปที่ 2.5 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์และลักษณะของตัวเติมเสริมแรง [9]

2.3.2 เมทริกซ์

เมทริกซ์สามารถเป็นได้ทั้งโลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์ ซึ่งมีความเหนียวสูง ทำหน้าที่ยึดตัวเติมเสริมแรงไว้ด้วยกัน และทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งต่อผ่านแรงกระทำไปยังตัวเติมเสริมแรง นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเสียหายของตัวเติมเสริมแรง จากการขีดถูหรือปฏิกิริยาเคมีของพันธะยึดติดระหว่างตัวเติมเสริมแรงกับเมทริกซ์ ฉะนั้นเมทริกซ์จึงควรมีค่าสูงพอต่อการป้องกันการถูกดึงหลุดออกจากเมทริกซ์ของตัวเติมเสริมแรง [10]

2.3.2.1 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์

พอลิเมอร์เป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำ มีการเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาว ส่งผลให้ความแข็งแรงไม่สูงนัก ความหนาแน่นต่ำ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อน การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงมากขึ้น การเสริมแรงนี้ทำให้เมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง ดังแสดงรูปที่ 2.6 ที่แสดงถึงสมบัติเชิงกลอย่างง่ายของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เมื่อให้แรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใย



รูปที่ 2. 6 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับวัสดุองค์ประกอบ [9]

สำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยออกเป็นเมทริกซ์เทอร์โมเซตติง (Thermosetting matrix) และเมทริกซ์เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic matrix) ซึ่งมีความแตกต่างกันในพฤติกรรมเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ โดยเทอร์โมเซตติงเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบร่างแห และมีสมบัติแข็งเปราะ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุล ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขณะที่ส่วนเทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบสายโซ่ สามารถหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อนเหนืออุณหภูมิหลอมเหลว สมบัติทางความร้อนนี้จะส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ ดังนั้นการที่จะเลือกใช้เมทริกซ์ชนิดใดจึงขึ้นกับสมบัติในการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญ [11]

2.3.2.2 วัสดุเชิงประกอบโลหะ

วัสดุเชิงประกอบโลหะได้พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงความสามารถในการทนทานต่อความล้าของโลหะให้ดีขึ้น ตัวเติมเสริมแรงอาจอยู่ในลักษณะของอนุภาค เส้นใย หรือวิสเกอร์ก็ได้ นอกจากนี้ตัวเติมเสริมแรงสำหรับโลหะต้องมีความแข็งแรงสูง และทนความร้อนสูงด้วย เนื่องจากโลหะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากในการขึ้นรูป และสารเสริมแรงที่ใช้ต้องไม่เกิดการกัดกร่อนกับเมทริกซ์โลหะ จากข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้ตัวเติมเสริมแรงอนินทรีย์และเส้นใยแก้วไม่สามารถใช้เสริมแรงให้กับเมทริกซ์โลหะได้ ดังนั้น ตัวเติมเสริมแรงที่สามารถใช้ได้ควรเป็นตัวเติมเสริมแรงเซรามิก หรือตัวเติมเสริมแรงโลหะ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ อะลูมินา เส้นใยโบรอน เป็นต้น ซึ่งการเสริมแรงส่งผลให้เมทริกซ์โลหะมีความทนทานต่อความล้าสูงขึ้นมา และปรับปรุงอายุการใช้งานให้นานขึ้น รวมทั้งความหนาแน่นของตัวเติมเสริมแรงที่น้อยกว่าโลหะส่งผลให้ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบลดลง

โดยทั่วไปวัสดุเชิงประกอบโลหะจะนำไปใช้งานในลักษณะเดียวกับโลหะ ตัวเติมเสริมแรงที่เติมเข้าไป จะเป็นการปรับปรุงสมบัติของเมทริกซ์โลหะให้ดียิ่งขึ้น และมีอายุการใช้งานนานขึ้น

2.3.2.3 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก

เซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการ ใช้งานที่อุณหภูมิสูง ไม่นำความร้อน ทนทานต่อ การกัดกร่อน และอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เมื่อได้รับความร้อนต่ำมาก เซรามิกจึง นำมาใช้ใน งานที่ต้องการความทนทานต่ออุณหภูมิสูง และในสภาวะที่มีการกัดกร่อนสูง แต่ข้อเสีย ของ เซรามิก คือ เปราะและแตกหักง่าย เมื่อเกิดรอยแตกแล้วไม่สามารถซ่อมแซมได้โดยง่าย การ เสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกเป็นการปรับปรุงสมบัติให้ วัสดุเชิงประกอบมี ความเหนียวและทนทาน มากขึ้น ตัวเติมเสริมแรง จะเข้าไปขวางการแพร่ของรอยแตกที่อาจเกิดขึ้น ระหว่างการใช้งาน เมื่อวัสดุ เชิงประกอบได้รับ แรงจะไม่เกิดการเปราะแตกในทันทีเนื่องจาก รอยแยกจะถูกหน่วงด้วยสาร เสริมแรงเนื่องจาก สมบัติที่เรียกว่า ความเหนียวแบบเทียม (Pseudo ductile) ดังนั้น เสริมแรงเข้าไป จะทำให้วัสดุเชิงประกอบเซรามิกที่ได้มีความเหนียวทนทานมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่ายังมีการใช้งาน อย่างจำกัด เนื่องจากต้นทุนในกระบวนการผลิตที่สูง

2.3.3 ตัวเติม

ตัวเติม (Filler) เป็นสารเติมแต่งซึ่งเป็นของแข็งที่ใส่ในพอลิเมอร์ เพื่อลดต้นทุนการผลิตหรือ ปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ สำหรับฟิลเลอร์ที่ใช้เพื่อเพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนเป็นหลัก มีชื่อ เรียกว่า เอกเทนเดอร์ (extenders) ขณะที่ตัวเติมที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลหรือสมบัติอื่นๆ เช่น การนำไฟฟ้า การนำความร้อน เป็นต้น เรียกว่า ฟังก์ชันแนลฟิลเลอร์ (functional fillers) และเรียก ตัวเติมที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ เรียกว่า ตัวเติมเสริมแรง (reinforcements) [12]

2.3.3.1 ตัวเติมเสริมแรง

ตัวเติมเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบสามารถจำแนกตามลักษณะเป็นอนุภาค เส้น ใย และ วิสเกอร์ อนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ด หรือผง เช่น ผงถ่านดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น และถ้าพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อ เส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ถ้าอัตราส่วน ดังกล่าวมากกว่า 100 ขึ้นไปจะเรียกสารเสริมแรง นั้นเป็นเส้นใย ซึ่งอาจจำแนกตามความยาว เป็นเส้น ใยต่อเนื่อง (Continuous fiber) และ เส้นใยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fiber) และยัง สามารถ จำแนกเส้นใยไม่ต่อเนื่องตามอัตราส่วน ระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็นเส้นใยยาว (Long fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนมากกว่า 1,000 ขึ้นไป และเส้นใยสั้น (Short fiber) ซึ่งมีอัตราส่วนน้อย กว่า 1.000 เส้นใยมีทั้งที่เป็นเส้นใยอินทรีย์และเส้นใยอนินทรีย์ตัวอย่างเส้นใยอินทรีย์ เช่น เส้นใยอะ

รามีด เส้นใยเซลลูโลสเป็นต้น ส่วนเส้นใยอนินทรีย์อาจเป็นเส้นใยแก้วเส้นใยคาร์บอน หรือเส้นใยโลหะ เช่น เส้นใยโบรอน เส้นใยทองแดง เป็นต้น ส่วนวิสเกอร์เป็นลักษณะของเส้นใยขนาดเล็กมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยไมโครเมตรและมีความยาวเพียงไม่กี่มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการก่อตัวทางยาวของผลึกเดี่ยว (Elongated single crystal) จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกสมบูรณ์ที่ปราศจากการเคลื่อน (Dislocation) ทำให้วิสเกอร์มีความแข็งแรงสูงมาก เช่น วิสเกอร์ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น [12]

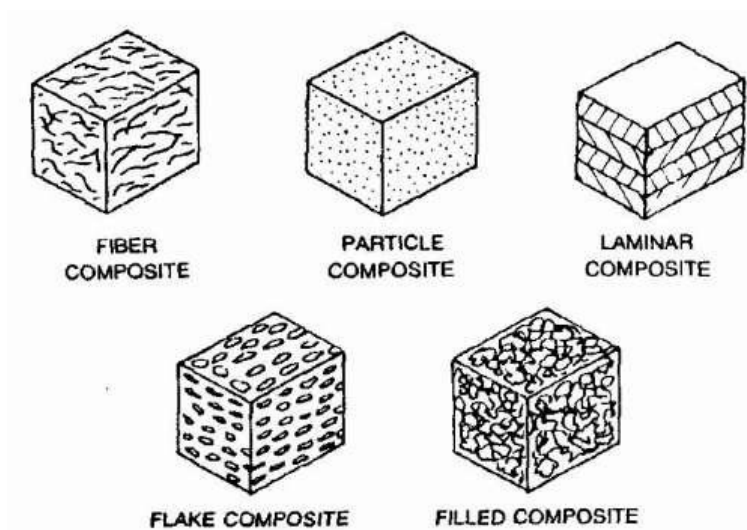
2.3.3.2 ผลของตัวเติมเสริมแรง [13]

การใช้ตัวเติมเสริมแรงจะช่วยปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกดังต่อไปนี้

- ความทนแรงดึง ความทนแรงอัด เพิ่มขึ้น
- อีลาสติคโมดูลัส และความแข็งดึง (stiffness) เพิ่มขึ้น
- การหดตัวลดลง
- ความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นบางส่วน

การเติมตัวเติมเสริมแรงจะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ยังขึ้นกับลักษณะต่างๆของตัวเติมเสริมแรง ดังนี้

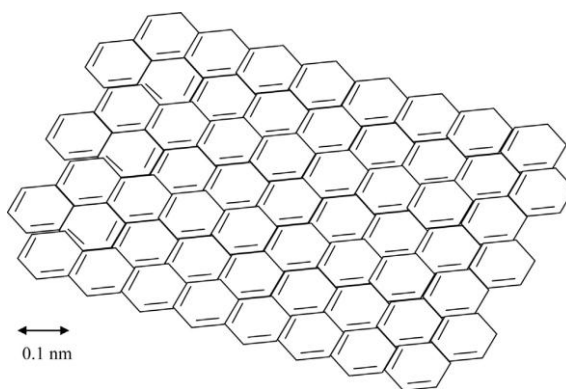
- ขนาดและการกระจายของขนาดอนุภาคตัวเติมเสริมแรง
- ความพรุนและรูปร่างของอนุภาคตัวเติมเสริมแรง
- ธรรมชาติทางเคมีที่พื้นผิวของอนุภาคตัวเติมเสริมแรง
- สารเจือปนในสารตัวเติม



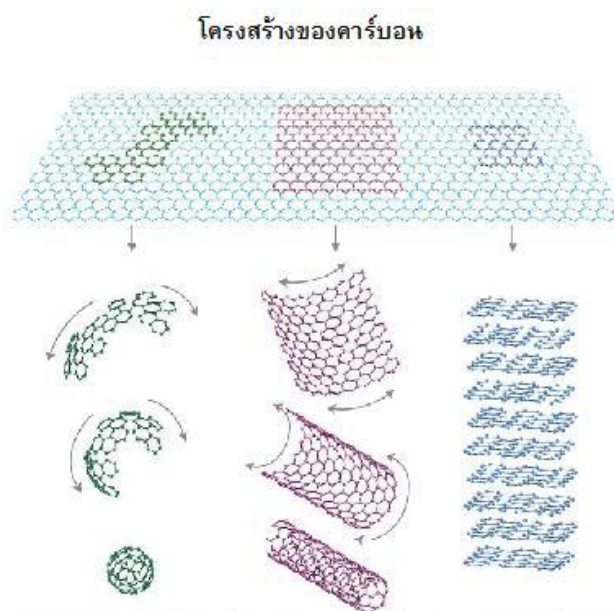
รูปที่ 2.7 วัสดุคอมพอสิตตามประเภทลักษณะของตัวเสริมแรงชนิดต่างๆ [11]

2.4 แกรฟีน

แกรฟีน (Graphene) เป็นชั้นของคาร์บอนหนึ่งชั้นจากการจัดเรียงอะตอมเป็นพันธะแนวหกเหลี่ยม (รังผึ้ง) โดยหน่วยเซลล์หกเหลี่ยมของแกรฟีน (unit hexagonal cell) ประกอบด้วยอะตอมสองตัวของคาร์บอนบนพื้นที่ 0.052 ตารางนาโนเมตร จึงสามารถคำนวณความหนาแน่นของแกรฟีนได้เป็น 0.77 มิลลิกรัมต่อตารางจากสมมติแปลถวนพบว่า พื้นที่ 1 ตารางเมตร จะทำจากแกรฟีนน้ำหนัก 0.77 มิลลิกรัม โดยมีระยะห่างระหว่างคาร์บอน 0.142 นาโนเมตร ซึ่งเป็นวัสดุผลึกสองมิติที่สามารถเป็นตัวแทนของระดับชั้นของวัสดุสองมิติ (class of 2D materials) อย่างแท้จริงเป็นครั้งแรกโดยตัวอย่างวัสดุชั้นเดียว (single layer) นี้ เช่น โบรอน-ไนไตรด์ (Boron-Nitride: BN) และ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (Molybdenum disulphide : MoS_2) ซึ่งทั้งคู่สามารถผลิตได้หลังจากปี 2004 แกรฟีนสมบัติทางกลและไฟฟ้าที่โดดเด่นจากความสามารถในการคงตัวอยู่ได้ของโครงสร้างที่เกิดจากคาร์บอนเรียงตัวหนาเพียงอะตอม 1 ชั้น (single layer of carbon) แบบสองมิติ (Two-Dimensional: 2D) โดยไม่รวมตัวหรือเปลี่ยนรูปเป็นโครงสร้างใหม่ เช่น ไม้หกตัวเป็นฟูลเลอร์รีนหรือบัคกี้บอล (Fullerene/ Buckminsterfullerene C_{60} : Bucky Ball) ไม้ม้วนตัวกลายเป็นท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes: CNTs) ไม่ซ้อนกันกลายเป็นแกรไฟต์ (Graphite) นอกจากนี้แกรฟีนยังมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง 4 เท่า มีพื้นที่ผิวมากกว่าท่อนาโนคาร์บอน 2 เท่า แข็งแรงกว่าเหล็ก 200 เท่าและแกร่งกว่าเพชร ยึดหยุ่นได้ดี และโปร่งแสงในระดับที่ยอมให้แสงผ่านได้ถึงร้อยละ 97 หน่วยเซลล์หกเหลี่ยมของแกรฟีน (unit hexagonal cell) ประกอบด้วยอะตอมสองตัวของคาร์บอนบนพื้นที่ 0.052 ตารางนาโนเมตร จึงสามารถคำนวณความหนาแน่นของแกรฟีนได้เป็น 0.77 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร จากสมมติแปลถวนพบว่า พื้นที่ 1 ตารางเมตร จะทำจากแกรฟีนน้ำหนัก 0.77 มิลลิกรัม [14, 15]



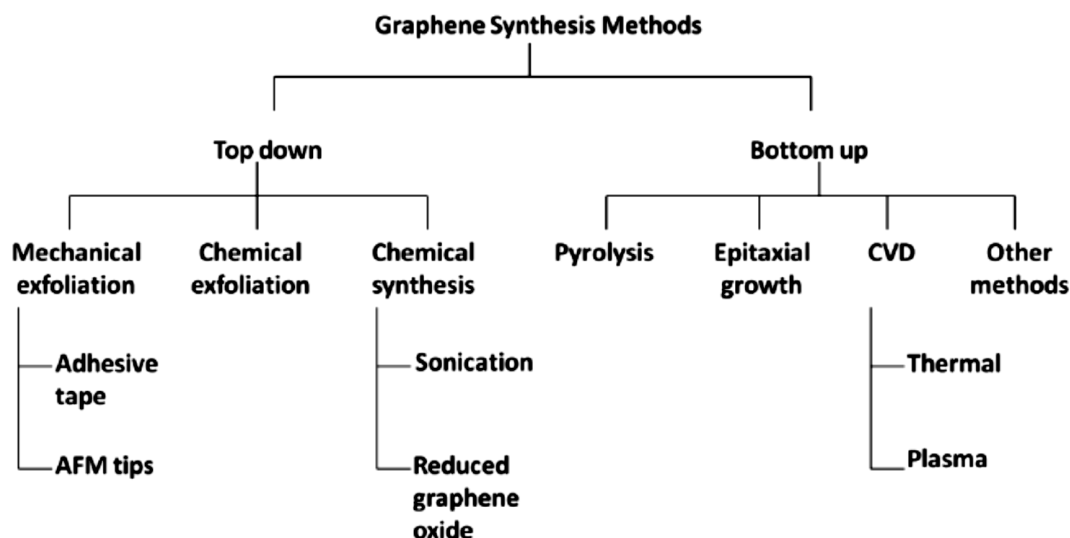
รูปที่ 2. 8 โครงสร้างของอนุภาคแกรฟีน [16]



รูปที่ 2. 9 โครงสร้างของอนุภาคคาร์บอน [17]

2.4.1 การสังเคราะห์แกรฟีน

การสังเคราะห์แกรฟีนสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งสรุปได้ดังภาพที่ 3 แบ่งตามกระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (Top-down) และแบบล่างสู่บน (Bottom-up) ในกระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างแบ่งเป็นการลอกแผ่นแกรฟีนโดยตรง เช่น ใช้สก็อตเทปลอกแผ่นแกรฟีนจากแกรไฟต์บริสุทธิ์ การใช้เข็ม AFM ลากแผ่นแกรฟีนออกมา และการสังเคราะห์ทางเคมี เช่น การ Sonication หรือการสั่นด้วยเสียงความถี่สูง และการรีดิวซ์จากแกรฟีนออกไซด์ ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบล่างสู่บน ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส การปลูกฟิล์มบางแกรฟีนแบบผลึกเดี่ยว การปลูกฟิล์มบางแกรฟีนด้วยไอระเหยทางเคมี เป็นต้น ซึ่งวิธีการสังเคราะห์แบบล่างสู่บนจะเป็นวิธีที่ซับซ้อนยุ่งยาก ต้องใช้เครื่องมือขั้นสูง แต่ให้ปริมาณของแกรฟีนจำนวนมาก ส่วนใหญ่จะทำในระดับอุตสาหกรรม ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างสามารถทำได้ง่ายกว่า สามารถทำในระดับห้องปฏิบัติการและงานวิจัยได้[18]

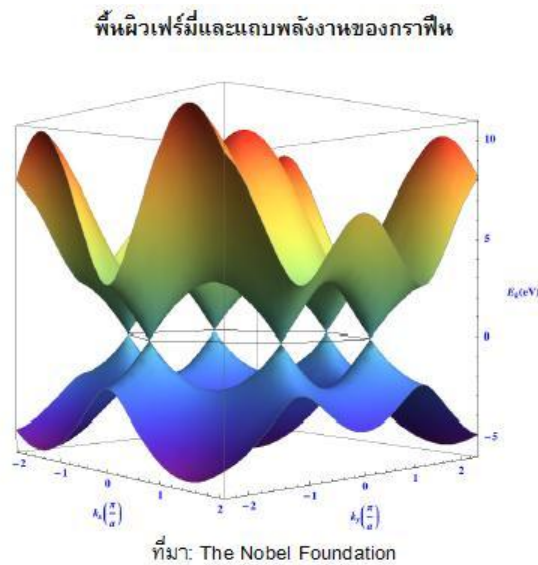


รูปที่ 2. 10 วิธีการสังเคราะห์แกรฟีน [18]

2.4.2 สมบัติของแกรฟีน

2.4.2.1 สมบัติทางไฟฟ้า

โครงสร้างทางไฟฟ้าของแกรฟีนค่อนข้างแตกต่างจากวัสดุอื่น โดยมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำมาก สามารถเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี โดยพื้นผิวของแกรฟีนโดยใช้การแสดงผลแบบแกรฟฟิคตามการคำนวณพื้นผิวเฟอร์มี (Fermi surface) จะพบว่า มีลักษณะเป็นกรวยหกคู่เชื่อมกัน (six double cones) ดังรูปที่ 2.11 โดยแสดงภาพของแกรฟีนบริสุทธิ์ (undoped graphene) เนื่องจากสถานะความหนาแน่นของวัสดุที่จุดเชื่อมในแต่ละกรวยมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของแกรฟีนในต่ำมาก(15) และส่งผลให้อิเล็กตรอนมีความสามารถในการเคลื่อนที่สูงมาก ซึ่งเป็นไปตามสูตรของควอนตัมสกี้อกระแสไฟฟ้า (conductance quantum) $\sigma \sim e^2 / h$



http://static.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/sciback_phy_10.pdf

รูปที่ 2. 11 แสดงแถบพลังงานของแกรฟีนโดยแกนตั้งเป็นพลังงาน และแกนนอนเป็นโมเมนตัม ซึ่งโครงสร้างแถบพลังงานมีลักษณะคล้ายกรวยหกจุด [17]

2.4.2.2 สมบัติเชิงกล

ค่าความแข็งแรงด้านการแตกหัก (breaking strength) สูงถึง 42 นิวตันต่อเมตร ซึ่งเหล็กมีความแข็งแรงในช่วง 250-1200 MPa = 0.25 - 1.2x10⁹ N/m² จากการตั้งสมมุติฐาน แผ่นเหล็กกล้าที่มีความหนาเท่ากับแผ่นแกรฟีน (ซึ่งสามารถแทนค่าด้วย 3.35Å = 3.35x10⁻¹⁰ m คือความหนาของชั้นในแกรไฟท์) จะให้ค่าความแข็งแรงดึงขาดในสองมิติ (2D breaking strength) อยู่ที่ 0.084 - 0.40 N / m ดังนั้นแกรฟีนจึงมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้า 100 เท่า ค่าความเครียดเชิงกล ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) สูงถึง 1 เทระปาสกาล และค่าความแข็งแรงภายใน (intrinsic strength) สูงถึง 130 กิกะปาสกาล จึงสรุปได้ว่าแกรฟีนมีความแข็งแรง มีสภาพยืดหยุ่นสูง สามารถบิดงอ ม้วน หรือพับได้โดยไม่ทำให้โมเลกุลเสียหาย [14]

2.4.2.3 สมบัติการสั่น และสมบัติทางความร้อน

โดยปกติแล้วเมื่อมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นจะส่งผลให้แลตทิซของของแข็งเกิดการสั่น (lattice vibration) และมีการปลดปล่อยพลังงานโฟนอน(phonon) หรือควอนตัมของคลื่นแลตทิซหรืออาจเรียกว่าควอนตัมเดียวของพลังงานการสั่น โดยโฟนอนจะแพร่ผ่านวัสดุด้วยความเร็วเสียง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้เราสามารถศึกษาสมบัติ ทางความร้อน เช่น ความจุความร้อนหรือการนำความร้อนของของแข็งได้แกรฟีนแสดงสมบัติของอะคูสติก

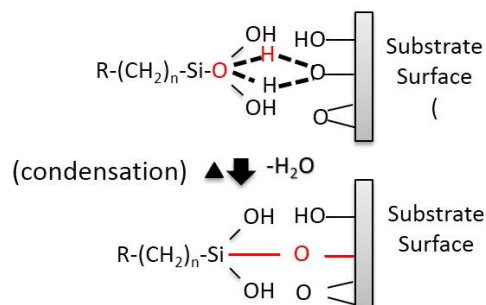
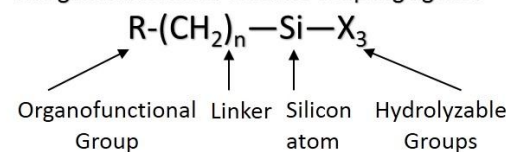
โฟนอน (acoustic phonon) โดยค่าการนำความร้อน (thermal conductivity, **K**) ของแกรฟีนแบบชั้น เดียวส่วนใหญ่เป็นผลมาจากอะคูสติคโฟนอน จากการศึกษาพบว่าความเร็วโฟนอน (phonon velocity) หรือความเร็วเสียงในแกรฟีนมีค่าสูงมากซึ่งความเร็ว โฟนอนจะแปรผันโดยตรงกับค่าการนำความร้อน ดังนั้นยิ่งความเร็วโฟนอนมีค่าสูงมากเท่าใดยิ่งส่งผลให้ค่าการนำความร้อนสูงมากตามไปด้วยเท่านั้นนอกจากนั้นค่าการนำ ความร้อนในแกรฟีนยังเป็นตัวชี้วัดถึงความสมบูรณ์ในโครงสร้างผลึกได้อีกด้วยโดยค่าการนำความร้อนในแกรฟีนที่มากขึ้นแสดงถึงความบกพร่องในโครงสร้างผลึกที่น้อยลง การที่แกรฟีนมีค่าการนำความร้อนที่สูงจึงถูกเลือกมาใช้เป็นตัวช่วยระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ จากการศึกษาพบว่าค่าการนำความร้อนของแกรฟีนเหนือกว่าท่อนาโนคาร์บอน เพชรและสารกึ่งตัวนำ 1 สำหรับทองแดงมีค่าการนำความร้อนประมาณ 4 W/cm·K ที่ อุณหภูมิห้องแกรฟีน จึงนำความร้อนได้ดีกว่าทองแดงมากกว่า 10 เท่า [14]

2.5 ซิลเลน

สารคู่ควบ (coupling agent) เป็นสารเติมแต่งประเภทหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับตัวเติมโดยการสร้างพันธะที่แข็งแรงทำให้การยึดระหว่างเฟสดีขึ้น

ซิลเลน (Silane) เป็นสารคู่ควบชนิดหนึ่งที่ยอมรับใช้ มีสูตรทั่วไปคือ $R-(CH_2)_n-Si(X)_3$ โดย X เป็น Hydrolyzable group (เช่น $-OCH_3$, $-OC_2H_5$) จะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดพันธะเป็นรูปแบบของ Silanol group กับพื้นผิวตัวเติม ขณะที่หมู่ R (เช่น หมู่ไวนิล หมู่อะมิโน หมู่อีพอกซี เป็นต้น) จะทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ซึ่งมีผลทำให้ตัวเติมยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น [12]

The general formula of silane coupling agent :



รูปที่ 2. 12 สูตรโครงสร้างทางเคมีและการเข้าทำปฏิกิริยาของสารซิลเลน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาของ Ryszard F. และคณะ ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดเป็น วัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีนกับพอลิเมอร์ จากแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide, GO) โดยใช้กระบวนการผสมเพียงขั้นตอนเดียว ซึ่งเดิมที่ได้ทำการทดลองผลิตเพื่อผลิตแกรฟีน โดยวิธีการ Thermally Reduced Graphene (TRD) จาก GO ที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก โลหะ ซึ่งก่อนหน้านี้ขั้นตอนนี้ได้อธิบายวิธีการสังเคราะห์ GO โดยใช้วิธีการปรับปรุงวิธีของ Hammers and Offemen ได้ผลิตภัณฑ์เป็น GO ที่หมู่ฟังก์ชันออกไซด์บนพื้นผิว ซึ่งต่อมาได้เสนอให้การกระจาย ตัว GO ในตัวทำละลาย โดยมี Dimethyl phthalate (DMP) เป็นตัวช่วยในการกระจายตัวและเมื่อ ทำการใช้คลื่นความถี่สูง (Sonicated) จะทำให้ DMP มีคุณสมบัติในการเป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับพอลิเมอร์ต่างๆได้ ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงมีบทบาทในการประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบโดยใช้ กระบวนการผลิตเพียงขั้นตอนเดียว และสามารถเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของ GO ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งช่วยให้วัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติที่ดีขึ้น [19]

จากการศึกษาของ Vikas Mittal และคณะ ได้ศึกษาผลของตัวเติมระดับนาโนของ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้แก่ พอลิแล็กติกแอซิด (poly(L-lactic acid), PLA) พอลิเอไมด์ ชีวภาพ (bio-polyamide) และ พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต เปรียบเทียบกับปริมาณที่ ต่างกันของตัวเติม Thermally Reduced Graphene (TRD) พบว่า TRD ไม่ได้ทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ TRD ส่งผลให้พอลิเมอร์ดังกล่าวมี ค่าแข็งแรง ค่ายังสัมมอดูลัส ของแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะ PA ซึ่งมีค่าสูงสุด และพอลิแล็กติกแอซิด มีระดับความเป็นผลึกมาก ขึ้นแต่ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงในพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตมากนัก อันเป็นผลมาจากการ สร้างพันธะไฮโดรเจนและ แรงโควาเลนต์ระหว่าง TRD กับ พอลิเมอร์ดังกล่าวทำให้โมเลกุลเกิดการ จัดเรียงตัวขึ้นใหม่ สอดคล้องกับเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นของ พอลิเอไมด์ชีวภาพเมื่อผสม กับ TRD แต่เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต พบว่าไม่ มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก งานวิจัยนี้จึงเป็นการยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างเมทริกซ์กับตัวเติม และผล ของการเพิ่มคุณสมบัติให้กับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้เองทางชีวภาพ โดยใช้ TDR เป็นตัวเติม และความ จำเป็นในการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันบนแกรฟีนออกไซด์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ดีขึ้นกับ พอลิเมอร์ [20]

Yu Fu และคณะ ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของแกรฟีนและพอลิแล็กติกแอซิด

โดยการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันบนผิวแกรฟีนออกไซด์ และ ปรับปรุงสมบัติของเมทริกซ์พอลิเอทิลีนกอกแอซิด ให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้นโดยใช้ polymer toughener ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Ethylene/n-butyl acrylate/glycidyl methacrylate terpolymer elastomer (EBA-GMA) เป็น elastomer modifier ทำให้การควบคุมการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนในวัสดุเชิงประกอบดีขึ้นจึงทำให้การยึดเกาะกันดีขึ้นทำให้สมบัติเชิงกล สมบัติการนำความร้อน และเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น โดยวิธีการนี้จึงเป็นการแก้ปัญหาของ สารตัวเติมระดับนาโนที่แม้จะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล ความแข็งแรงให้พอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่ก็จะทำให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีความเปราะ จึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติพอลิเอทิลีนกอกแอซิดให้มีความอ่อนตัว และมีเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ EBA-GMA toughner เป็นตัวปรับปรุงคุณภาพ แต่พบว่าการเตรียมวัสดุเชิงประกอบในงานวิจัยนี้ต้องผ่านหลายกระบวนการ ทั้งขั้นตอนการหลอมผสม กระบวนการคอมปาวนด์ และกระบวนการหลอมอัดขึ้นรูปขึ้นงานจึงมีโอกาสนที่ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เตรียมได้จะมีคุณภาพที่ด้อยลงไป จึงต้องมีการหาวิธีการอื่นที่ลดกระบวนการในส่วนนี้ลง[21]

George Z. Papageorgiou และคณะ ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสารเสริมแรง Graphene oxide (GO) และ Graphene oxide modified กับ dodekylamine (org-GO) บนเมทริกซ์พอลิเอทิลีนกอกแอซิด เพื่อให้ได้วัสดุเสริมแรงระดับนาโนชนิดใหม่ พบว่าวัสดุเสริมแรงดังกล่าวเมื่อผสมกับ GO หรือ org-Go แล้วช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนกอกแอซิด ทำให้ค่าโมดูลัสของยัง ความต้านทานแรงดึงและความต้านทานการยืดขาดเพิ่มขึ้นประมาณ 10% ซึ่งจะมีค่าสูงสุดในวัสดุที่มีตัวเติมเสริมแรง 1wt% แต่จะลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มน้ำหนักตัวเติมเสริมแรงเป็น 2.5% แต่พบว่า พอลิเอทิลีนกอกแอซิดที่ผสม org-GO มีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนกอกแอซิด ที่ผสมด้วย GO เล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากหมู่ฟังก์ชันอะมิโนของ org-GO ส่งผลให้เกิดพันธะไฮโดรเจนและแรงระหว่างสายโซ่ทำให้วัสดุนี้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นอกจากนี้พบว่าอัตราการตกผลึกเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเติมเสริมแรง และพบว่าพอลิเอทิลีนกอกแอซิดที่ผสม GO ช่วยในการย่อยสลายพอลิเอทิลีนกอกแอซิดโดยเอนไซม์ ได้ดีกว่า org-GO เนื่องจาก GO มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำมากกว่าขณะที่ org-GO มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำมากกว่าพอลิเอทิลีนกอกแอซิดปกติ แต่น้อยกว่า org-GO และการที่มีหมู่เมทิลีนบนพื้นผิวมากกว่า ทำให้อัตราการย่อยสลายลดลง [22]

แกรฟีนที่อยู่ในเมทริกซ์ของคอมพอสิตมักมีแรงแวนเดอร์วาลส์ที่แข็งแรงเกิดขึ้นระหว่างชั้นของแกรฟีนแต่ละแผ่น ทำให้ยากต่อการกระจายตัวเป็นชั้นเดียวในเมทริกซ์ได้ จึงมีการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของแกรฟีน โดย Zhang และคณะ ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มคอมพอสิตของพอลิเอทิลีนกอกแอซิด โดยใช้ exfoliated octadecylamine-functionalized graphene (ODAG)

เป็นตัวเติม ซึ่งเป็นการปรับปรุงพื้นผิวของแกรฟีนออกไซด์ ด้วยสาร octadecylamine ที่มีลักษณะเป็นสารโมเลกุลสายโซ่ยาวมีหมู่ฟังก์ชันอยู่ปลายสายโซ่ จากการทดสอบพบว่าคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิดกับ ODAG นี้มีความเข้ากันได้ดี โดย ODAG สามารถกระจายตัวเข้าเป็นเนื้อเดียวกับเมทริกซ์พอลิแล็กติกแอซิดและมีการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสที่ดี ช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพการเกิดผลึกให้ดีขึ้น อีกทั้งยังมีเสถียรภาพทางความร้อนและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นด้วย โดยจากการเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกบริสุทธ์ พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลดีกว่าวัสดุพอลิแล็กติกบริสุทธ์ที่ไม่ได้ใช้ตัวเติม ทั้งในแง่ของความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์กับความยืดหยุ่นสูงที่สุด ณ จุดขาดที่สูงเพิ่มขึ้นถึง 300% เมื่อเติม ODAG เพียงแค่ 0.14% โดยน้ำหนัก ซึ่งจากสมบัติที่มีการเปลี่ยนแปลงไปในแนวโน้มที่ดีดังกล่าวแสดงให้เห็นความเหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิวแกรฟีนให้กระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ขึ้นด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีสายโซ่ยาว [23]

การปรับปรุงพื้นผิวและหมู่ฟังก์ชันของแกรฟีนออกไซด์เพื่อปรับปรุงการกระจายตัวของแกรฟีนในพอลิเมอร์เมทริกซ์ อาจใช้สารคู่ควบไซเลนซึ่งเป็นหนึ่งในสารที่นิยมใช้ในการปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างตัวเติมและเมทริกซ์ในคอมพอสิต โดย Wang และคณะ ได้ศึกษาการใช้สารคู่ควบ vinyl triethoxysilane (VTES) เป็นตัวแทนของสารคู่ควบไซเลนเพื่อปรับปรุงพื้นผิวของแกรฟีนออกไซด์ และใช้สารไฮดราซีน (hydrazine) เป็นสารรีดิวซ์เพื่อทำปฏิกิริยารีดักชันสังเคราะห์แกรฟีนจากแกรฟีนออกไซด์ที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวมาแล้ว โดยนำแกรฟีนดังกล่าวไปเป็นตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จากผลการทดสอบเชิงกลพบว่าความต้านทานแรงดึง ยังสัมพันธ์กับความยืดหยุ่นสูงที่สุด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น รวมถึงสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สที่ดีขึ้นแสดงถึงความเข้ากันได้และความกระจายตัวที่ดีขึ้นเมื่อปรับปรุงพื้นผิวของแกรฟีนในพอลิเมอร์เมทริกซ์[24]

ในงานวิจัยของ Jiali Zhang และคณะ ได้นำเสนอใช้กรดแอสคอร์บิก (L- ascorbic acid) เป็นตัวรีดิวซ์เพื่อทำปฏิกิริยารีดักชันสังเคราะห์แกรฟีนจากแกรฟีนออกไซด์ แทนการใช้ไฮดราซีนซึ่งเป็นที่ยอมรับกันอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากไฮดราซีนมีความเป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์และสิ่งแวดล้อมสูง แนวคิดในการใช้กรดแอสคอร์บิกนี้ พบว่าเมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันระหว่างแกรฟีนออกไซด์และกรดแอสคอร์บิก โดยการนำแกรฟีนออกไซด์และกรดแอสคอร์บิกต่างละลายในน้ำแล้วนำมาผสมกันภายใต้การกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง สามารถกำจัดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจากแกรฟีนออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการใช้สารที่เป็นอันตราย อีกทั้งเป็นวิธีที่ง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [19]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สืบค้นข้อมูลทางวิชาการและทบทวนวรรณกรรม

- 3.1.1 ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2 วางแผนงานวิจัย กำหนดขั้นตอนและวิธีการทดลอง
- 3.1.3 จัดหาและเตรียมวัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง
- 3.1.4 ศึกษาการใช้งานเครื่องมือขึ้นรูปและเครื่องมือทดสอบ
- 3.1.5 เตรียมแกรฟีนตัดแปรด้วยสารคู่ควบประเภทไซเลน
- 3.1.6 เตรียมพอลิเมอร์คอมพาวนด์พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรคอมพอลิเมอร์อัตราส่วนต่างๆ โดยผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่
- 3.1.7 ขึ้นรูปชิ้นงานฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรคอมพอลิเมอร์ด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม
- 3.1.8 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปร
- 3.1.9 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate, PBAT) เกรด F Mulch C1201 จากบริษัท POLYMATS ประเทศไทย
- 3.2.2 เฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน (hexadecyltrimethoxysilane, HDS) จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศไทย
- 3.2.3 แกรไฟต์ (graphite) จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศไทย
- 3.2.4 กรดซัลฟิวริก เข้มข้น 98% (sulfuric Acid 98%, H₂SO₄) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab Scan ประเทศไทย
- 3.2.5 โซเดียมไนเตรต (sodium nitrate) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab Scan ประเทศไทย
- 3.2.6 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium permanganate, KMnO₄) จากบริษัท RCI Lab Scan ประเทศไทย

3.2.7 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI-water) จากบริษัท RCI Lab Scan ประเทศไทย

3.2.8 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) จากบริษัท RCI Lab Scan ประเทศไทย

3.2.9 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCL) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab Scan ประเทศไทย

3.2.10 กรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab Scan ประเทศไทย

3.2.11 แอมโมเนีย ความเข้มข้น 25% (ammonia 25% NH_3) จากบริษัท Panreac ประเทศไทย

3.2.12 คลอโรฟอร์ม (chloroform, $CHCl_3$) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab Scan ประเทศไทย

3.2.13 เมทานอล (methanol) เกรด AR จากบริษัท RCI Lab Scan ประเทศไทย

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar)

3.3.2 เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (hot plate and magnetic stirrer) พร้อมเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ของบริษัท IKA รุ่น UNB 400 ประเทศประเทศไทย

3.3.3 ขวดก้นกลมแบบสามคอ (three-neck round bottom flask) ขนาด 1000 มิลลิลิตร

3.3.4 คอนเดนเซอร์ (condenser)

3.3.5 กระจกตวง (graduated cylinder) ขนาด 10 และ 100 มิลลิลิตร

3.3.6 ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 50 100 500 1,000 และ 2,000 มิลลิลิตร

3.3.7 หลอดหยดสาร (dropper)

3.3.8 ปิเปต (pipette) ขนาด 1 และ 10 มิลลิลิตร

3.3.9 เดซิเคเตอร์ (desicator)

3.3.10 เครื่องชั่งสารทศนิยมสองตำแหน่ง (analytical balance)

3.3.11 ตู้อบ (hot air oven)

3.3.12 ชุดกรองบุชเนอร์แบบสุญญากาศ (Buchner funnel, Buchner flask and vacuum pump)

3.3.13 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (-rotating twin-screw extruder) ของบริษัท Mettler Thermo Prism รุ่น DSR-28 ประเทศเยอรมัน

3.3.14 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (pelletizer cutting machine) ของบริษัท Labtech Engineering รุ่น LZ-80 ประเทศไทย

3.3.15 เครื่องรีดหล่อฟิล์ม (chill roll casting) ของบริษัท Labtech Engineering รุ่น LCR-300HDCO-EX/VS ประเทศเยอรมัน

3.3.16 เครื่องวัดความหนาของฟิล์ม (thickness gage) ของบริษัท Mitutoyo Corporation รุ่น 7310 ประเทศญี่ปุ่น

3.3.17 เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ของบริษัท Med inter รุ่น Senova TD5M-WS ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน

3.3.18 เครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic bath) ของบริษัท Nisd laboratory instruments รุ่น WUC-D06H ประเทศเกาหลี

3.3.19 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (fourier transform infrared spectrophotometer, FT-IR) ของบริษัท Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700 ประเทศเยอรมัน

3.3.20 เครื่องสเปกโตรสโกปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray photoelectron spectroscopy) ของบริษัท Kratos Analytical รุ่น AXIS Ultra DLD ประเทศอังกฤษ

3.3.21 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึก (X-ray diffractometer, XRD) ของบริษัท Bruker AXS รุ่น D8 Advance ประเทศอังกฤษ

3.3.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (field emission scanning electron microscope and energy dispersive X-Ray spectrometer, FESEM-EDS) ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6400LV ประเทศญี่ปุ่น

3.3.23 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น DSC/1STERe ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.24 เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (universal testing machine) ของบริษัท LLOYD รุ่น LR100K

3.3.25 เครื่องวัดทดสอบไฟฟ้า (picoammeter/voltage source) ของ KEITHLEY รุ่น 487 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมแกรฟีนดัดแปร

3.4.1.1 การเตรียมแกรฟีนออกไซด์ด้วยการใช้การฮัมเมอร์ดัดแปรและออฟแมน

[25]

นำแกรไฟต์มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันให้กลายเป็นแกรไฟต์ออกไซด์ เริ่มจากเติมผงแกรไฟต์ 10 กรัม ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 97% ปริมาตร 250 มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร จากนั้นเติมโซเดียมไนเตรต ปริมาณ 5 กรัม และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 30 กรัม การกวนอย่างต่อเนื่องและควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน 360 มิลลิลิตรและเพิ่มอุณหภูมิเป็น 100 องศาเซลเซียส กวนต่อเนื่องนาน 15 นาที จากนั้นเทสารลงในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 1140 มิลลิลิตร หยดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จนไม่เกิดฟอง ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน เพื่อปรับค่า pH ให้เป็นกลาง โดยใช้วิธีการปั่นเหวี่ยง อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะได้ผงผลิตภัณฑ์สีเหลือง นำไปกระจายตัวในน้ำปราศจากไอออนในอัตราส่วน 2 มิลลิกรัม/1 มิลลิลิตร แล้วทำการสั่นด้วยแรงเชิงกลความถี่สูง เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอน ซ้ำอีก 2 ครั้ง อบในตู้อบจะได้ผงแกรฟีนออกไซด์



รูปที่ 3. 1 เครื่องปั่นเหวี่ยง ของ Med inter รุ่น TD5M-WS



รูปที่ 3. 2 เครื่องอัลตราโซนิก ของ Nisd laboratory instruments รุ่น WUC-D06H [25, 26]

3.4.1.2 การสังเคราะห์แกรไฟีนตัดแปร

นำผงแกรไฟีนออกไซด์ 0.4 กรัม นำไปกระจายตัวในน้ำปราศจากไอออน 200 มิลลิลิตร แล้วสั่นด้วยแรงเชิงกลความถี่สูง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เทสารละลายสู่ขวดสามคอ หยดเฮกซะเดคซิลไทรเมทอกซีไซเลน 2 มิลลิลิตร และกรดไฮโดรคลอริก 1 มิลลิลิตร กวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นเติมกรดแอลเอสคอร์บิก 4 กรัม และแอมโมเนีย ความเข้มข้น 25% 10 มิลลิลิตร กวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำไปกรองและล้างด้วย DI water ดังแสดงในรูปที่ 3.4 แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.1.3 การสังเคราะห์แกรไฟีน

นำผงแกรไฟีนออกไซด์ 0.4 กรัม กระจายตัวในน้ำปราศจากไอออน 200 มิลลิลิตร แล้วสั่นด้วยแรงเชิงกลความถี่สูง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เทสารละลายสู่ขวดสามคอแล้วเติมกรดแอลเอสคอร์บิก 4 กรัม และสารละลายแอมโมเนีย ความเข้มข้น 25% 10 มิลลิลิตร กวนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำไปกรองและล้างด้วย DI water และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3. 3 ชุดเตรียมแกรฟีนดัดแปรด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลนและกรดแอลแอสคอร์บิก



รูปที่ 3. 4 การกรองแกรฟีนดัดแปรด้วยชุดกรองบุชเนอร์แบบสุญญากาศ

3.4.2 การเตรียมคอมพอลิตของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตเพวีเคราะห์และทดสอบสมบัติที่แตกต่างกันจากผลของสารเสริมแรงแกรฟีนดัดแปรและแกรฟีน

3.4.2.1 การเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปร และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอลิต

เตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปร โดยใช้อัตราส่วนพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตต่อแกรฟีนดัดแปรเป็น 3 ต่อ 1 โดยเริ่มจากนำแกรฟีนดัดแปร 1 กรัม กระจายตัวในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม 100 มิลลิลิตร (10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) แล้วทำการ โซนิเคชันส์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขณะที่นำพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต 10 กรัม ละลายในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม 100 มิลลิลิตร (10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) ภายใต้การกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำสารละลายทั้งสองมาผสมกันภายใต้การกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารนานอีก 1 ชั่วโมง แล้วนำของผสมมาตกตะกอนร่วมในเมทานอล ที่ไว้ 1 ชั่วโมง แล้วกรองตะกอนที่ได้ ล้างด้วยเมทานอล และน้ำปราศจากไอออน ตามลำดับ แล้วจึงนำไปอบแห้งต่อไป ขณะที่การเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนยังคงใช้วิธีเช่นเดียวกับการเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปร แต่เปลี่ยนสารเสริมแรงจากแกรฟีนดัดแปรเป็นแกรฟีน

3.4.2.2 การเตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพาวนด์ และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพาวนด์

เตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพาวนด์ โดยการอบเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต และ แกรฟีนดัดแปร ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงผสมเข้าด้วยกันโดยวิธีทางกายภาพ โดยใช้อัตราส่วนการผสมแกรฟีนดัดแปรที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต แล้วนำไปผสมแบบหลอมเหลวโดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และตัดเป็นเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยอุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรู ดังแสดงในตารางที่ 3.1

โดยการเตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพาวนด์ และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพาวนด์ ทำการศึกษาปัจจัยต่อไปนี้

ผลของชนิดของสารเสริมแรง ต่อสมบัติของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอลิต โดยเตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพาวนด์ต่างๆ ดังนี้

- พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลตที่ไม่เติมตัวสารเสริมแรง
- พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลตที่เติมตัวสารเสริมแรงแกรฟีนดัดแปร ในปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลตที่เติมตัวสารเสริมแรงแกรฟีน ในปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เมื่อได้เม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลตคอมพาวนด์จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเตรียมขึ้นรูปต่อไป

ขณะที่การเตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลต/แกรฟีนคอมพาวนด์ ยังคงใช้วิธีเช่นเดียวกับการเตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพาวนด์ แต่เปลี่ยนสารเสริมแรงจากแกรฟีนดัดแปรเป็นแกรฟีน

ตารางที่ 3. 1 อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการเตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลตคอมพาวนด์

โซน	อุณหภูมิ (°C)
Feed	115
2	120
3	125
4	135
Die	140
ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)	20



รูปที่ 3. 5 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28



รูปที่ 3. 6 เครื่องตัดเม็ดพลาสติกของ Labtech Engineering รุ่น LZ-80/VS

3.4.2.3 การเตรียมฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โคเทรพเทเลตคอมพอสิต

เม็ดพลาสติกพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โคเทรพเทเลตคอมพาวนด์ที่อบไล่ความชื้นแล้ว ทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โคเทรพเทเลตคอมพอสิต ด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม ภายใต้ อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3. 2 อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต

โซน	อุณหภูมิ (°C)
Feed	135
2	140
3	145
4	150
5	150
Die	152
ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)	30



รูปที่ 3. 7 เครื่องรีดหล่อฟิล์มของ Labtech Engineering รุ่น LCR-300HDCO-EX

3.4.3 การเตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตเพื่อวิเคราะห์และทดสอบสมบัติจากผลของปริมาณสารเสริมแรงแกรฟีนดัดแปรที่แตกต่างกัน

3.4.3.1 การเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต

เตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปร โดยใช้อัตราส่วนพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตต่อแกรฟีนดัดแปรเป็น 3 ต่อ 1 โดยเริ่มจากนำแกรฟีน

ตัดแปร 1 กรัม กระจายตัวในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม 100 มิลลิลิตร (10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) แล้วทำการ โชนิเคชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขณะที่นำพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต 10 กรัม ละลายในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม 100 มิลลิลิตร (10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) ภายใต้การกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก กวนสาร นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำสารละลายทั้งสองมาผสมกันภายใต้การกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารนานอีก 1 ชั่วโมง แล้วนำของผสมมาตกตะกอนร่วมในเมทานอล ที่ไว้ 1 ชั่วโมง แล้วกรองตะกอนที่ได้ ล้างด้วยเมทานอล และน้ำปราศจากไอออน ตามลำดับ แล้วจึงนำไปอบแห้งต่อไป

3.4.3.2 การเตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

เตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ โดยการอบเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตเพื่อไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต และ แกรฟีนตัดแปร ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงผสมเข้าด้วยกันโดยวิธีทางกายภาพ โดยใช้อัตราส่วนการผสมแกรฟีนตัดแปรแสดงดังตารางที่ 3.3 แล้วนำไปผสมแบบหลอมเหลวโดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ และตัดเป็นเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก โดยอุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรู ดังแสดงในตารางที่ 3.1

โดยการเตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ศึกษาปัจจัยต่อไปนี้

- ผลของปริมาณของสารเสริมแรงแกรฟีนตัดแปร ต่อสมบัติของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพอสิต โดยเตรียมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์ต่างๆ ดังนี้
- พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตที่ไม่เติมตัวสารเสริมแรง
- พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตที่เติมตัวสารเสริมแรงแกรฟีนตัดแปร ในปริมาณ 0 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3. 3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพาวนด์

ชื่อสูตร	ปริมาณ PBAT	ปริมาณแกรฟีนตัดแปร(%wt)
PBAT	100.0	-
PBAT/0.5%FG	99.5	0.5
PBAT/1%FG	99.0	1.0
PBAT/1.5%FG4	98.5	1.5
PBAT/2%FG5	98.0	2.0
PBAT/2.5%FG	97.5	2.5

เมื่อได้เม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพาวนด์จะนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเตรียมนำไปขึ้นรูปต่อไป

3.4.3.3 การเตรียมฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอลิต

เม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพาวนด์ที่อบไล่ความชื้นแล้วทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอลิต ด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม ภายใต้ อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3. 4 อุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอลิต

โซน	อุณหภูมิ (°C)
Feed	135
2	140
3	145
4	150
5	150
Die	152
ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที)	30

3.4.4 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติ

3.4.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และแกรฟีนดัดแปร ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ความถี่ในช่วงเลขคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3. 8 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700

3.4.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

วิเคราะห์ศึกษาชนิดธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์ แกรฟีน ออกไซด์ และแกรฟีนดัดแปร ด้วยเทคนิค เอกซเรย์โฟอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3. 9 เครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ ของ Kratos Analytical รุ่น AXIS Ultra DLD [27]

3.4.4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

วิเคราะห์โครงสร้างผลึก โดยการศึกษารูปแบบผลึกของโครงสร้างจากมุม

กระทบที่แตกต่างกันของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10

3.4.4.3.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์
แกรฟีนดัดแปร

3.4.4.3.2. วิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟ
แทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟแทเลต/
แกรฟีนคอมพอสิต

3.4.4.3.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโค
เทเรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต



รูปที่ 3. 10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึก ของ Bruker AXS รุ่น D8 Advance

3.4.4.4 วิเคราะห์สัณฐานวิทยา ชนิด ปริมาณ และการกระจายของ
องค์ประกอบธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.4.4.4.1 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพต
โคเทเรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟแทเลต/
แกรฟีนคอมพอสิต

วิเคราะห์ศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคแกรฟีนดัดแปรด้วยกล้องจุลทรรศน์
แบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยายในการทดสอบ 2,500 และ 30,000 เท่า รวมทั้งศึกษาชนิดและ
ปริมาณธาตุองค์ประกอบของอนุภาคแกรฟีน ด้วยเทคนิค Energy dispersive X-rayspectroscopy
ดังแสดงในรูปที่ 3.8

3.4.4.4.2 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิ
เพตโคเทเรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต

วิเคราะห์ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ซึ่งนำฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตที่ได้ หลังจากการทดสอบสมบัติทนแรงดึงมาเคลือบด้วยทอง ผ่านเครื่อง sputter-coater ที่ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยทำการวิเคราะห์ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตแบบภาคตัดขวาง โดยใช้กำลังขยายในการทดสอบ 3,000 และ 10,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.

3.4.4.4.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต

วิเคราะห์ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด โดยนำฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตที่ได้หลังจากการทดสอบสมบัติทนแรงดึงมาเคลือบด้วยทองผ่านเครื่อง sputter-coater ที่ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยทำการวิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตแบบภาคตัดขวาง โดยใช้กำลังขยายในการทดสอบ 3,000 และ 10,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3. 11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ของ JEOL รุ่น JSM-6400LV

3.4.4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

วิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (melting temperature, T_m) และปริมาณผลึก (degree of crystallinity, X_c) ของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอลิเอทิลีน และฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอลิเอทิลีน ตามมาตรฐาน ASTM D7426 ด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ใช้ภาวการณ์ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 150 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนและเย็นตัวเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศแก๊สไนโตรเจน

โดยปริมาณผลึกของพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพอลิเอทิลีนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 [28]

$$X_c = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_m^\circ \times (1 - W_f)} \times 100\% \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

โดยที่ ΔH_c คือ เอนทัลปีของการเกิดผลึกขณะให้ความเย็นของตัวอย่าง

ΔH_m° คือ เอนทัลปีของการหลอมผลึกอย่างสมบูรณ์ของพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ (114 จูลต่อกรัม) [6]

W_f คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารเสริมแรงที่เติมลงในฟิล์มคอมพอลิเอทิลีน

3.4.4.5.1 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอลิเอทิลีน และฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอลิเอทิลีน

3.4.4.5.2 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอลิเอทิลีน



รูปที่ 3. 12 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของ Mettler Toledo รุ่น DSC/1STER[®]

3.4.4.6 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง ได้แก่ ความทนแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสของยัง (Young's modulus) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D882 ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแพเลตคอมพอลิิต ด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยขึ้นทดสอบตัวอย่างฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแพเลตคอมพอลิิตมีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร และความหนาในช่วง 0.10-0.20 มิลลิเมตร ภายใต้ Load cell ขนาด 100 นิวตัน ใช้อัตราเร็วในการดึงขึ้นงาน 500 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะห่างระหว่างตัวจับขึ้นงาน 5 เซนติเมตร

3.4.4.6.1 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแพเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอลิิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแพเลต/แกรฟีนคอมพอลิิต

3.4.4.6.2 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแพเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอลิิต

การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง ได้แก่ ความทนแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสของยัง (Young's modulus) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D882 ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแพเลตคอมพอลิิต ด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยขึ้นทดสอบตัวอย่างฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแพเลตคอมพอลิิตมีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร และความหนา

ในช่วง 0.10-0.20 มิลลิเมตร ภายใต้ Load cell ขนาด 100 นิวตัน ใช้อัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน 500 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะห่างระหว่างตัวจับชิ้นงาน 5 เซนติเมตร



รูปที่ 3. 13 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของ LLOYD รุ่น LR100K

3.4.4.7 การทดสอบความทนแรงฉีกขาด

ทดสอบความทนแรงฉีกขาด (tear strength) ของฟิล์มพอลิไวนิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตคอมพอลิเมอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D1938 ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยขึ้นทดสอบตัวอย่างฟิล์มพอลิไวนิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตคอมพอลิเมอร์มีความกว้าง 5 เซนติเมตร ความยาว 7.5 เซนติเมตร และความหนาในช่วง 0.10-0.20 มิลลิเมตร ใช้ load cell ขนาด 100 นิวตัน ใช้อัตราเร็วในการดึง 250 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะห่างระหว่างตัวจับชิ้นงาน 2.5 เซนติเมตร

3.4.4.7.1 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิไวนิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอลิเมอร์ และฟิล์มพอลิไวนิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนคอมพอลิเมอร์

3.4.4.7.2 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิไวนิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอลิเมอร์

3.4.4.8 การทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้า

การทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้า ได้แก่ ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิววัสดุ (surface resistivity) เครื่องวัดทดสอบไฟฟ้าพิโคแอมป์มิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.14

3.4.4.8.1 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิโพรพิลีนแอติเพตโคเทเรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และฟิล์มพอลิโพรพิลีนแอติเพตโคเทเรฟเทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต

3.4.4.8.2 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติฟิล์มพอลิโพรพิลีนแอติเพตโคเทเรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต



รูปที่ 3. 14 เครื่องวัดทดสอบไฟฟ้า (picoammeter/voltage source) ของ KEITHLEY รุ่น 487

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติของแกรไฟีนออกไซด์

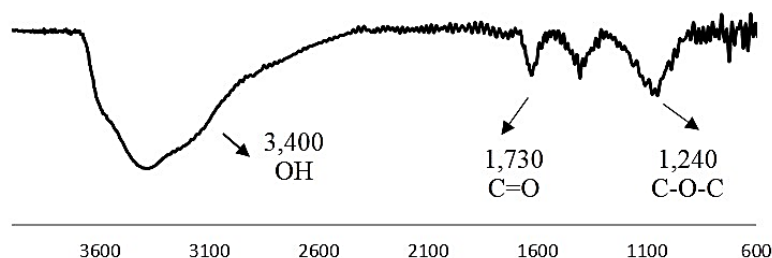
4.1.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

จากการนำแกรไฟต์มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในสารละลายกรดซัลฟิวริก ตามการทดลองที่ 3.4.1.1 จะได้สารละลายสีน้ำตาลขุ่น เมื่อทำการปั่นเหวี่ยงตกตะกอนจะได้แกรไฟต์ออกไซด์ออกมา ต่อจากนั้นจึงนำไปทำการโซนิเคชัน โดยใช้ความเข้มข้นระหว่างแกรไฟต์ออกไซด์กับน้ำเป็นปริมาณแกรไฟต์ออกไซด์ 2 มิลลิกรัมต่อน้ำปราศจากไอออน 1 มิลลิลิตร พบว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็น แกรไฟีนออกไซด์ คิดเป็นผลิตภัณฑ์ ร้อยละ 70.3 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับสารตั้งต้นแกรไฟต์

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์ และแกรไฟีนออกไซด์ศึกษาได้ โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ดังผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.1

(a.) Graphite

(b.) GO

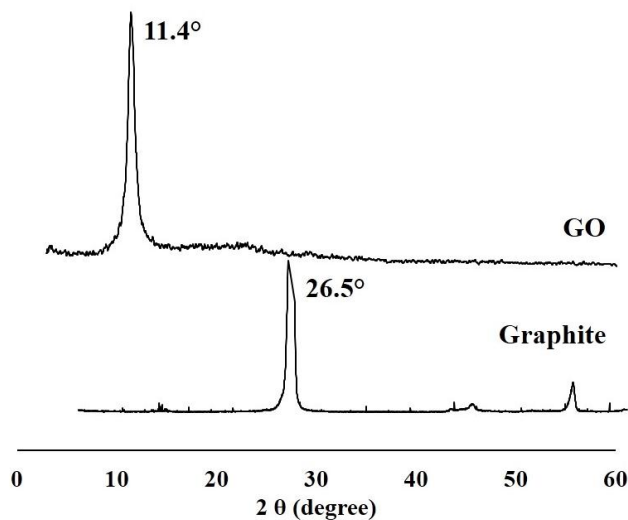


รูปที่ 4. 1 อินฟราเรดสเปกตรัมของแกรไฟต์และ แกรไฟีนออกไซด์ [20]

จากรูปที่ 4.1 จะแสดงถึงการปรากฏตัวขึ้นของหมู่ฟังก์ชันของแกรไฟีนออกไซด์ซึ่งเพิ่มขึ้นจากโครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์ โดยแกรไฟีนออกไซด์จะพบฟังก์ชันเอกลักษณ์ ที่เลขคลื่น $3,433\text{ cm}^{-1}$, $1,700\text{ cm}^{-1}$ และ $1,240\text{ cm}^{-1}$ อันแสดงถึงตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอนิล และหมู่อีพ็อกไซด์บนโครงสร้างทางเคมีของแกรไฟีนออกไซด์ ตามลำดับ [24, 25]

4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

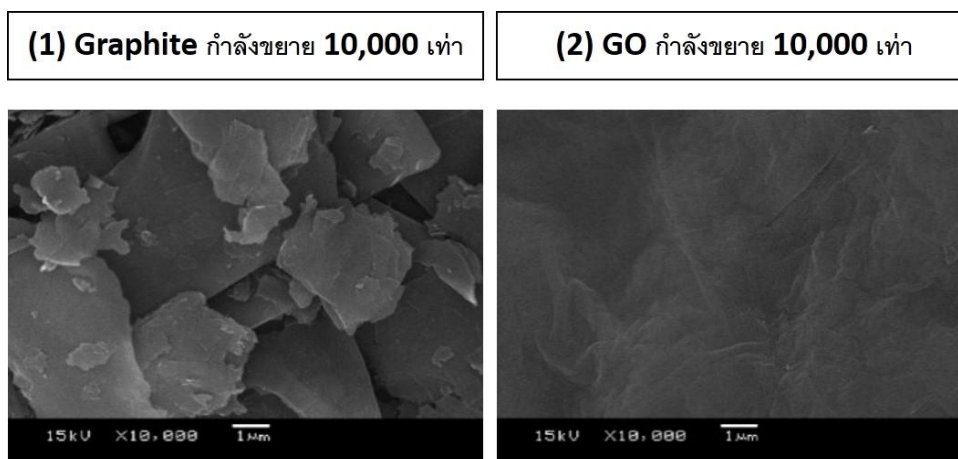
โกปี



รูปที่ 4. 2 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ และแกรไฟีนออกไซด์

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคแกรไฟต์ และแกรไฟีนออกไซด์ จากเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันแสดงในรูปที่ 4.2 ยืนยันความสำเร็จในการเตรียมแกรไฟีนออกไซด์ จากแกรไฟต์ พิจารณาได้จากพีกการเลี้ยวเบนของแกรไฟต์ในระนาบผลึก (002) จะปรากฏตำแหน่ง 2 theta ที่ 26.5 องศา ขณะที่แกรไฟีนออกไซด์หลังการออกซิเดชันจะปรากฏพีกการเลี้ยวเบน 2 theta ที่ 11.4 องศา มีระยะห่างระหว่างชั้นประมาณ 0.81 นาโนเมตร ซึ่งให้เห็นถึงปัจจัยจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มมากขึ้นจากหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบแทรกอยู่ระหว่างชั้นแกรไฟต์ สอดคล้องกับสมการของ Bragg (Bragg's law equation) $\lambda = 2d \sin\theta$ นั่นคือหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสามารถเข้าไปแทรกในระหว่างชั้นของแกรไฟต์ ทำให้มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เลื่อนต่ำลง [29]

4.1.3 สัณฐานวิทยาของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์



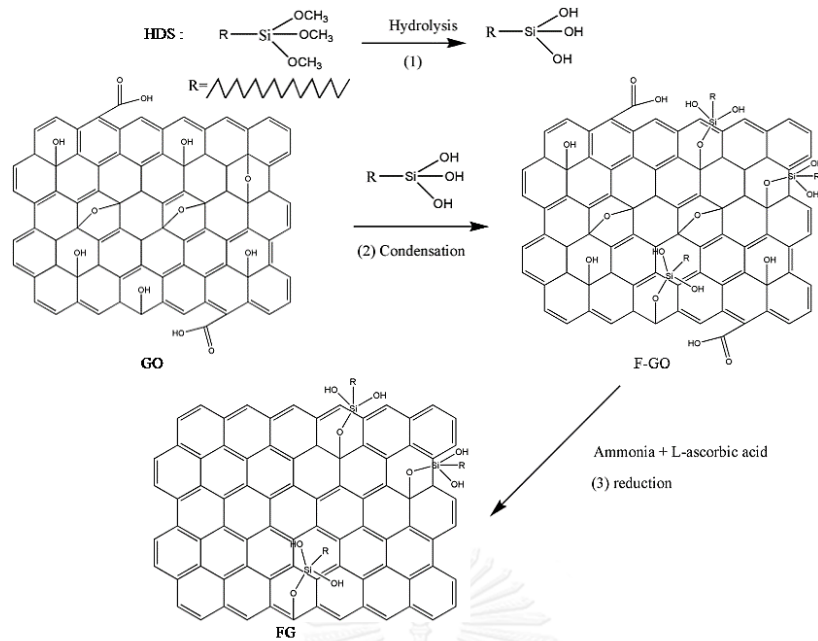
รูปที่ 4. 3 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของแกรไฟต์ (1) แกรฟีนออกไซด์ (2)

ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาคแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000x ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า อนุภาคแกรไฟต์มีลักษณะเป็นแผ่นเรียงซ้อนเกาะกลุ่มกันเป็นชั้น โดยพบว่ามีลักษณะจัดเรียงซ้อนที่ค่อนข้างหนาแน่นกว่าเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ซึ่งเป็นลักษณะตามโครงสร้างของระนาบคาร์บอนที่เรียงซ้อนยึดติดกันด้วยแรงระหว่างขั้วส่งผลให้แต่ละชั้นเกิดการยึดติดกันได้แข็งแรง ขณะที่อนุภาคแกรฟีนออกไซด์มีลักษณะเรียบบางไม่ได้เกิดลักษณะเรียงซ้อนติดกันดังเช่นแกรไฟต์ อันเนื่องมาจากเมื่อแกรไฟต์ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจะปรากฏหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของระนาบคาร์บอนของแกรไฟต์ อันได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิล หมู่อีพอกไซด์ และหมู่คาร์บอกซิลส่งผลให้ระนาบชั้นคาร์บอนแยกห่างออกจากกัน [19]

4.2 สมบัติของแกรฟีนดัดแปร

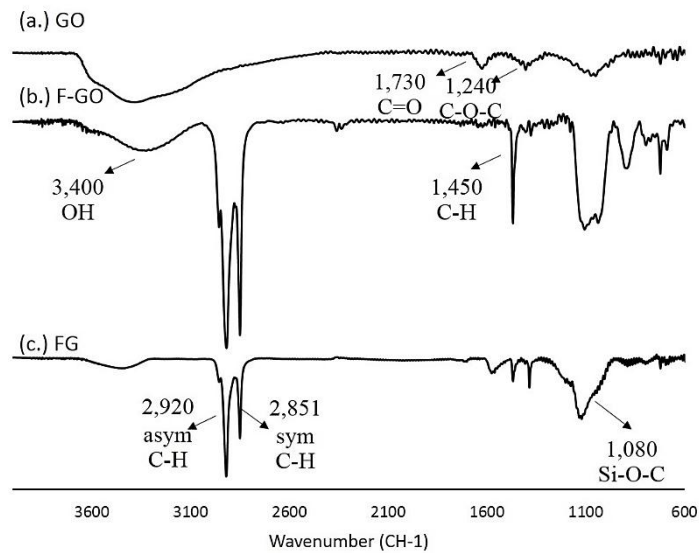
4.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

แกรฟีนดัดแปรถูกเตรียมขึ้นโดยผ่านขั้นตอนต่างๆ คือ ขั้นที่หนึ่งเป็นการนำเฮกซะเดคซิลไทรเมทอกซีไซเลนมาทำปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสในสารละลายกรดเพื่อเปลี่ยนหมู่ $-OCH_3$ ของสารคู่ควบไซเลนให้กลายเป็นหมู่ $-OH$ ขั้นที่สองเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแกรฟีนออกไซด์กับเฮกซะเดคซิลไทรเมทอกซีไซเลนที่ผ่านการไฮโดรลิซิสแล้ว และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการรีดักชันจากแกรฟีนออกไซด์ที่มีการดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนหรือ(แกรฟีนออกไซด์ดัดแปร) ให้กลับเป็นแกรฟีนดัดแปร [30]ปฏิกิริยาในการดัดแปรแกรฟีนออกไซด์ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ปฏิกิริยาที่ใช้ในการเตรียมแกรฟีนดัดแปร

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแกรฟีนดัดแปรศึกษาได้จากวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแกรฟีนออกไซด์ แกรฟีนออกไซด์ดัดแปร และแกรฟีนดัดแปร โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ (GO) แกรฟีนออกไซด์ดัดแปร (F-GO) และแกรฟีนดัดแปร (FG)

สำหรับแกรฟีนออกไซด์จะพบพีกเอกลักษณ์ ที่เลขคลื่น 3433 cm^{-1} 1700 cm^{-1} และ 1240 cm^{-1} อันแสดงถึงตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอนิล และหมู่อีพ็อกไซด์บนโครงสร้างทางเคมีของแกรฟีนออกไซด์ตามลำดับ [24] และเมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาตัดแปรรวมตัวของแกรฟีนออกไซด์ ส่งผลให้พีกเอกลักษณ์ของแกรฟีนออกไซด์ดังกล่าวลดลงอย่างเห็นได้ชัด อันเนื่องมาจากการเข้าทำปฏิกิริยาซิลิเลชัน (silylation) ของสารคู่ควบไซเลนกับแกรฟีนออกไซด์ ขณะเดียวกันนั้นจะพบพีกที่เลขคลื่น 2920 cm^{-1} และ 2851 cm^{-1} อันเป็นพีกของ C-H stretching รวมถึงพีกที่ 1450 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกของ C-H bending จากสายโซ่อัลคิลของสารคู่ควบเฮกซะเดคซิล ไทรมโทกซีไซเลน นอกจากนี้ยังปรากฏพีกที่ 1080 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกของ Si-O-C stretching แสดงให้เห็นว่ามีสารคู่ควบไซเลนทำปฏิกิริยากับแกรฟีนออกไซด์ [31]

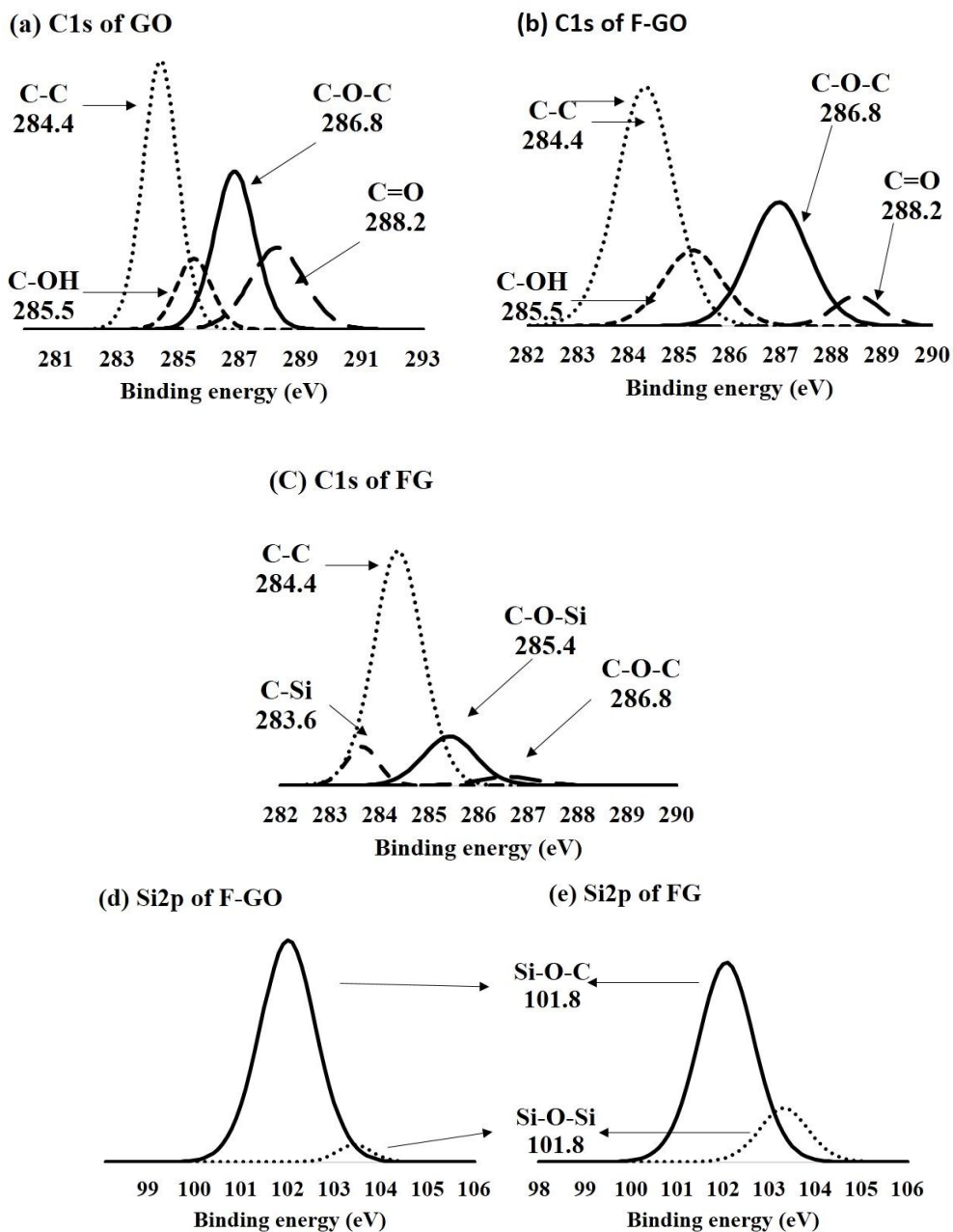
สำหรับแกรฟีนตัดแปรรวมพบว่าพีกเอกลักษณ์ของแกรฟีนออกไซด์ ที่เลขคลื่น 3433 cm^{-1} 1700 cm^{-1} และ 1240 cm^{-1} ลดลงอย่างเห็นได้ชัด จนแทบไม่ปรากฏพีกดังกล่าว แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีในการทำปฏิกิริยารีดักชันแกรฟีนออกไซด์ตัดแปรรวมให้เป็นแกรฟีนตัดแปรรวมโดยใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ [24] แต่ยังคงปรากฏพีกที่ 2920 cm^{-1} และ 2851 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีกของ C-H stretching แสดงให้เห็นว่าสารคู่ควบไซเลนยังปรากฏอยู่บนแกรฟีนภายหลังการรีดักชันแล้ว และ

4.2.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (x-ray photoelectron spectroscopy, XPS) ได้สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงถึงสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ (a) แกรฟีนออกไซด์ตัดแปรรวม (b และ d) และแกรฟีนตัดแปรรวม (c และ e) ตามลำดับ จาก C1s สเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ แสดงให้เห็นโครงสร้างทางเคมีในแกรฟีนออกไซด์ ได้แก่ C=C/C-C (284.4 eV) ซึ่งแสดงลักษณะของพันธะคาร์บอนกับคาร์บอน C-OH (285.5 eV) แสดงลักษณะของหมู่ไฮดรอกซิล C-O-C (286.8 eV) แสดงลักษณะของหมู่อีพ็อกไซด์ และ C=O (288.2 eV) ซึ่งแสดงลักษณะของหมู่คาร์บอกซิล

เมื่อเปรียบเทียบ XPS สเปกตรัม ในรูปที่ 4.6(b) ของแกรฟีนออกไซด์ตัดแปรรวม และรูปที่ 4.6(c) ของแกรฟีนตัดแปรรวม พบว่าสเปกตรัมที่แสดงหมู่ไฮดรอกซิล อีพ็อกไซด์ และคาร์บอกซิลของแกรฟีนออกไซด์มีแนวโน้มลดลง โดยจะลดลงบางส่วนในแกรฟีนออกไซด์ตัดแปรรวมเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันบางส่วนของบนพื้นผิวของแกรฟีนออกไซด์จะไปทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบไซเลน ทำให้สเปกตรัม XPS เหล่านี้ลดลง เช่นเดียวกับ

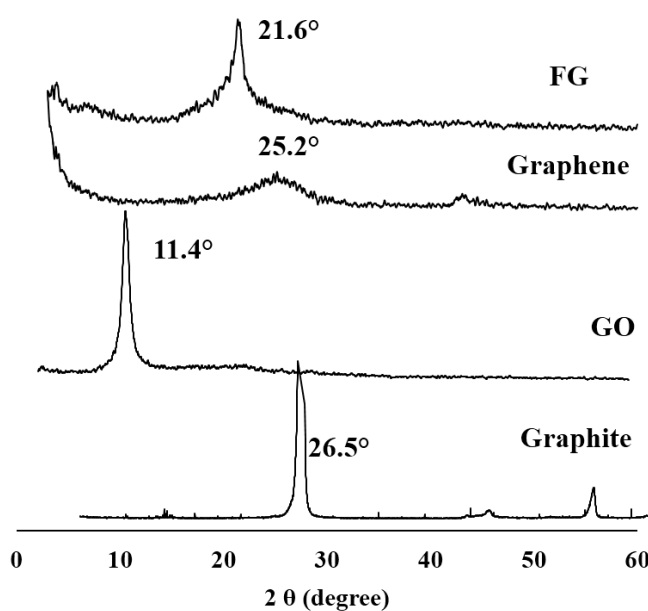
แกรฟีนดัดแปร เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันแล้วจะพบว่าสเปกตรัม XPS ของหมู่ฟังก์ชันของแกรฟีนมีแนวโน้มลดลงจนแทบไม่ปรากฏ นอกจากนี้จาก C1s สเปกตรัม XPS ของแกรฟีนดัดแปร ยังปรากฏสเปกตรัม XPS ของ C-Si (283.6 eV.) และ C-O-Si (285.4 eV.) แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของสารคู่ควบไซเลนที่ทำปฏิกิริยากับแกรฟีน สอดคล้องกับ Si2p สเปกตรัม XPS 5.3d ของแกรฟีนออกไซด์ดัดแปร และ รูป 4.6(e) ของแกรฟีนดัดแปร โดยแสดงให้เห็นการทำปฏิกิริยาที่ดีของสารคู่ควบไซเลนกับหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวของวัสดุทั้งสอง ได้แก่ Si-O-C (101.8 eV.) และ Si-O-Si (101.8 eV.) [29]



รูปที่ 4. 6 เอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ แกรฟีนออกไซด์ดัดแปร และแกรฟีนดัดแปร

4.2.3 โครงสร้างผลึก

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ แกรฟีนดัดแปร และอนุภาคแกรฟีนดัดแปร จากเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันแสดงในรูปที่ 4.7 ในกรณีของแกรไฟต์พบฟีกการเลี้ยวเบนของในระนาบผลึก (002) ที่ตำแหน่ง 2θ 26.5 องศา ซึ่งเมื่อใช้สมการของแบรกก์สามารถคำนวณระยะห่างระหว่างชั้นได้ประมาณ 0.38 นาโนเมตร ภายหลังจากออกซิเดชัน แกรฟีนออกไซด์ที่ได้ปรากฏฟีกการเลี้ยวเบน 2θ ที่ 11.4 องศา ค่าคำนวณระยะห่างระหว่างชั้นได้ประมาณ 0.81 นาโนเมตร ซึ่งให้เห็นว่าการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มมากขึ้นจากหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบแทรกอยู่ระหว่างชั้นแกรไฟต์ [31] ทำให้มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เลื่อนต่ำลงนั่นเอง[29] ขณะที่ฟีกการเลี้ยวเบนของแกรฟีนปรากฏที่ 2θ เท่ากับ 25.2 องศา อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยารีดักชันทำให้หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่เคยแทรกอยู่ระหว่างชั้นแกรไฟต์หายไป ระยะห่างระหว่างชั้นจึงลดลง และเมื่อพิจารณาฟีกของแกรฟีนดัดแปร พบว่าฟีกเลื่อนต่ำลงเล็กน้อยอยู่ที่ 21.6 องศา แสดงถึงระยะห่างระหว่างชั้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลจากสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ปรับปรุงบนผิวของแกรฟีนนั่นเอง

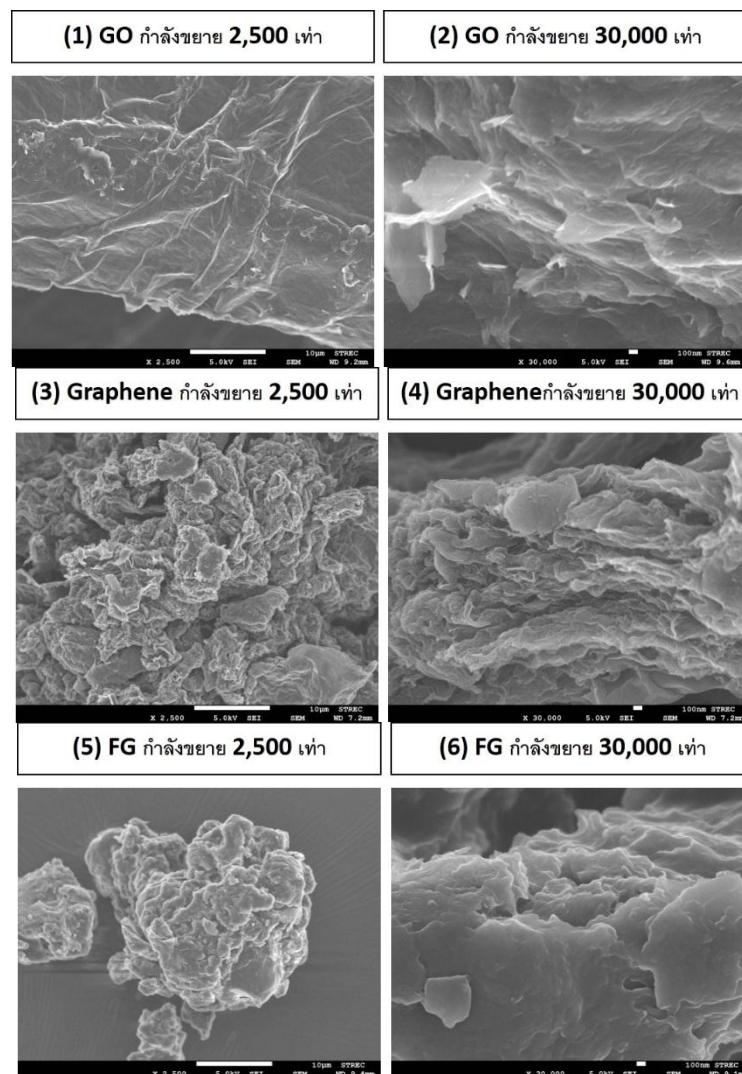


รูปที่ 4. 7 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ แกรฟีน และแกรฟีนดัดแปร

4.2.4 สันฐานวิทยาของแกรฟีนออกไซด์ แกรฟีน และแกรฟีนดัดแปร

ผลการตรวจสอบสันฐานวิทยาของอนุภาคแกรฟีนออกไซด์ แกรฟีน และแกรฟีนดัดแปร โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 3,000x และ 30,000x ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า อนุภาคทั้งสามชนิดมีลักษณะเป็นแผ่นเรียงซ้อนกันเป็นชั้น โดยเมื่อพิจารณา

จากรูปของแกรฟีนจะมีลักษณะจัดเรียงซ้อนที่ค่อนข้างหนาแน่นกว่าสารชนิดอื่น และมีอนุภาคเกาะกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ อันเนื่องมาจากแกรฟีนสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคแกรฟีนด้วยกันเองทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ได้ง่าย ขณะที่แกรฟีนตัดแปรมีการต่อกิ่งสารคู่ควบไซเลนอาจส่งผลต่อการแยกชั้น และเพิ่มความห่างของชั้นได้ดีกว่าแกรฟีน ทำให้มีการจัดเรียงตัวในลักษณะเป็นชั้นบาง และขนาดเล็กกว่าแกรฟีน [19]ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน



รูปที่ 4. 8 สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นที่ภาคตัดขวางของ แกรฟีนออกไซด์ (1)(2) แกรฟีน (3)(4) และแกรฟีนตัดแปร (5)(6)

4.2.5 การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบธาตุของแกรฟีนออกไซด์ แกรฟีน และแกรฟีนดัดแปร

ดัดแปร

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบของอนุภาคแกรฟีนออกไซด์ แกรฟีน และแกรฟีนดัดแปร ด้วยเทคนิค energy dispersive x-ray spectroscopy ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า หลังจากรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ เพอร์เซนต์สัดส่วนธาตุคาร์บอนเพิ่มปริมาณขึ้น ในขณะที่เปอร์เซนต์สัดส่วนธาตุออกซิเจนลดปริมาณลง เนื่องจากออกซิเจนซึ่งอยู่ในรูปหมู่ฟังก์ชันของแกรฟีนออกไซด์ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอกซิล หรือ หมู่อีพอกไซด์ ถูกจำกัดออก เกิดการเปลี่ยนกลับมาเป็นพันธะคอนจูเกตของคาร์บอนในโครงสร้างแกรฟีน ในขณะที่ผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบของแกรฟีนดัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลน ยืนยันการมีอยู่ของธาตุ Si [31]

ตารางที่ 4. 1 เปอร์เซนต์องค์ประกอบธาตุของแกรฟีนออกไซด์ แกรฟีน และแกรฟีนดัดแปร

Sample	C (at.%)	O (at.%)	Si (at.%)
GO	64.06	35.94	-
Graphene	83.04	16.96	-
FG	83.98	11.38	4.64

4.3 สมบัติของฟิล์มพอลิเบวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และฟิล์มพอลิเบวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต

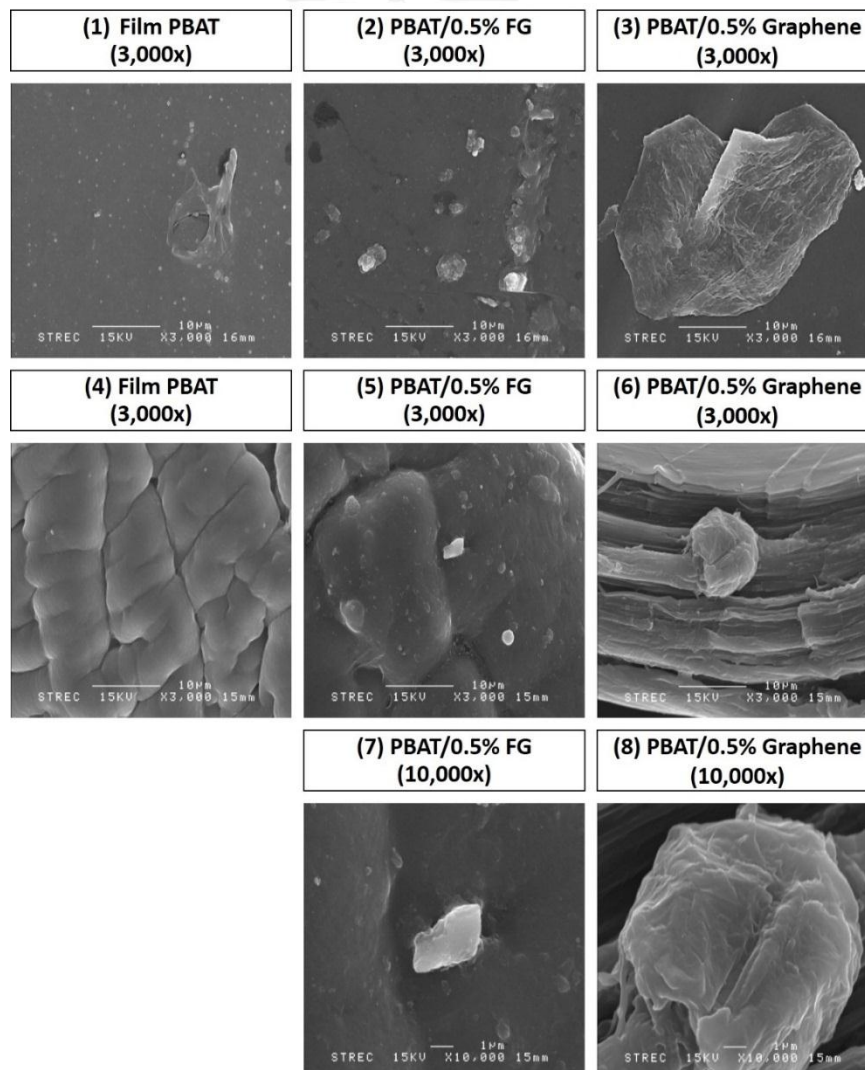
4.3.1 สันฐานวิทยา

ผลการวิเคราะห์สันฐานวิทยาของบริเวณพื้นผิวของพอลิเบวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ พอลิเบวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และพอลิเบวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต ที่ปริมาณตัวเติมเท่ากันคือ 0.5 ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 3,000x แสดงในรูปที่ 4.9(1-3) และสันฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางจากการดึงขาด (fracture surface) ของพอลิเบวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ พอลิเบวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และพอลิเบวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต ที่ปริมาณตัวเติมเท่ากันคือ 0.5 ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 3,000x และ 30,000x แสดงในรูปที่ 4.9(4-8)

จากรูปที่ 4.6(1) พบว่าฟิล์มพอลิเบวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตพื้นผิวมีลักษณะเรียบ แต่เมื่อเติมแกรฟีนดัดแปรร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก พบว่า แกรฟีนดัดแปรมีการกระจายในเนื้อฟิล์ม

ค่อนข้างสม่ำเสมอ ขนาดอนุภาคของแกรฟีนตัดแปรมีขนาดใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9(2) แต่เมื่อพิจารณาฟิล์มที่ผสมแกรฟีนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 4.9(3) พบว่ามีความแตกต่างจากฟิล์มที่ผสมแกรฟีนตัดแปรกล่าวคือ แกรฟีนกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ มีพฤติกรรมรวมตัวเกาะกลุ่มก้อน อันเนื่องมาจากแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างแกรฟีนทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันระหว่างแกรฟีนได้ง่ายกว่าและกระจายตัวได้ยากกว่าในเมทริกซ์เมื่อเทียบกับแกรฟีนตัดแปร[32]

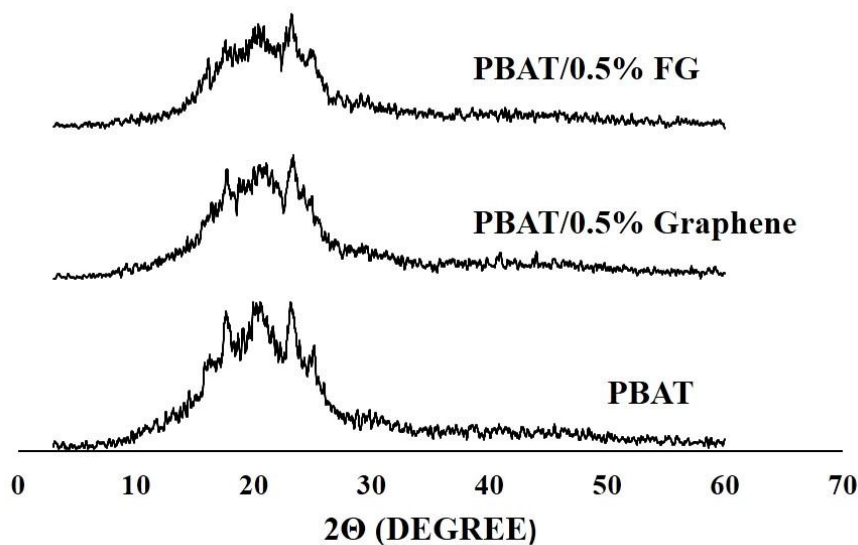
จากรูปที่ 4.9(4-8) แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างสารเสริมแรงและพอลิเมอร์ เมทริกซ์ดังจะเห็นว่า ทั้งแกรฟีนและแกรฟีนตัดแปรถูกปกคลุมด้วยพอลิพิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟแทเลต ซึ่งไม่ได้หลุดแยกออกจากการขาดเสียรูปของฟิล์มขึ้นงาน แต่อย่างไรก็ตามยังคงปรากฏความแตกต่างกันของแกรฟีนและแกรฟีนตัดแปร ในลักษณะดังเช่นที่กล่าวไว้ในข้างต้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติด้านอื่นของวัสดุ อันเนื่องมาจากขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอและการกระจายตัวที่ดีจะส่งผลที่ดีต่อประสิทธิภาพของการเสริมแรงในคอมพอสิต



รูปที่ 4. 9 สัมฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลตบริสุทธิ์(1) พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต (2) พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต(3) และสัมฐานวิทยาบริเวณพื้นที่ภาคตัดขวางของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลตบริสุทธิ์(4) พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต(5)(7) พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต(6)(8)

4.3.2 โครงสร้างผลึก

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต จากเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าพีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ในโครงสร้างผลึกของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลต ที่ระนาบผลึก (011) (010) พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลต (101) (100) (111) และ (104) ซึ่งให้เห็นว่าไม่พบผลึกขนาดใหญ่ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูปฟิล์ม และชี้ให้เห็นว่าแกรฟีน และ แกรฟีนดัดแปรไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกของฟิล์มคอมพอสิต ซึ่งพิจารณาได้จากความสูงของพีคและพื้นที่ใต้กราฟ XRD ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง (6)



รูปที่ 4. 10 โครงสร้างผลึกของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต

4.3.3 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (melting temperature, T_m) และปริมาณผลึก (degree of crystallinity, X_c) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิต ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี แสดงดังตารางที่ 4.2

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการใส่ตัวเติมเสริมแรงแกรฟีนดัดแปร และแกรฟีนในเมทริกซ์พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเกิดผลึก แต่เมื่อพิจารณาจากปริมาณผลึกพบว่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ เนื่องมาจากแกรฟีนดัดแปรและแกรฟีนสามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ส่งผลให้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกได้ง่าย แต่อันตรกิริยาระหว่างแกรฟีนดัดแปรและเมทริกซ์ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์จัดเรียงตัวได้ยากขึ้น ปริมาณผลึกจึงน้อยกว่าฟิล์มคอมพอสิตที่ใช้แกรฟีนเป็นตัวเติม

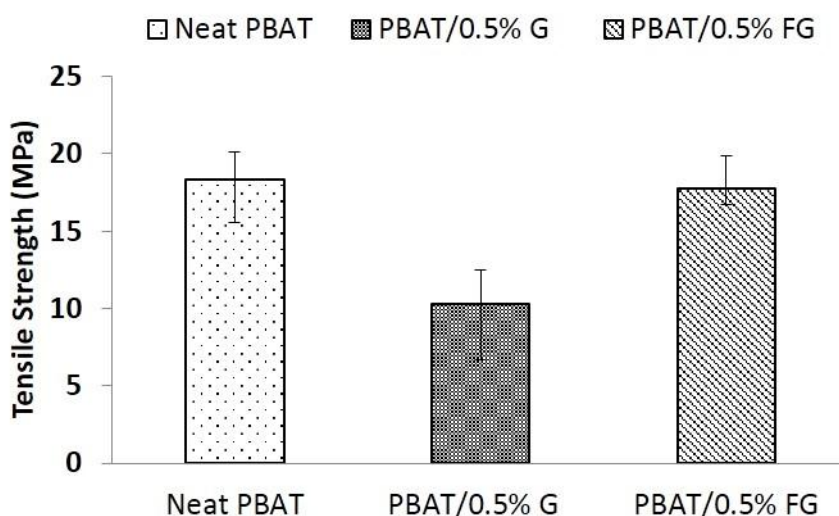
เมื่อพิจารณาอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก พบว่าการใช้สารเสริมแรงแกรฟีนดัดแปรหรือแกรฟีนสามารถเพิ่มอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกขึ้นเนื่องจากสารเสริมแรงเข้าไปเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตกับเฟสของสารเสริมแรงทำให้แรงยึดรอยต่อระหว่างเฟสสูงขึ้น ขณะที่พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตที่ใส่แกรฟีนเป็นสารเสริมแรง มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก 2 ตำแหน่ง เนื่องจากอนุภาคแกรฟีนมีพฤติกรรมเกาะกลุ่มรวมตัวเป็นก้อน มีขนาดไม่สม่ำเสมอจึงเหนี่ยวนำให้ผลึกที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกัน โดยผลึกในช่วงแรกเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์มีขนาดเล็กจึงทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกในช่วงแรกต่ำกว่า อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกในช่วงหลังแสดงถึงความเป็นผลึกที่สมบูรณ์หลังจากผ่านความร้อนขึ้นรูป [23]

ตารางที่ 4. 2 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีน และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปร

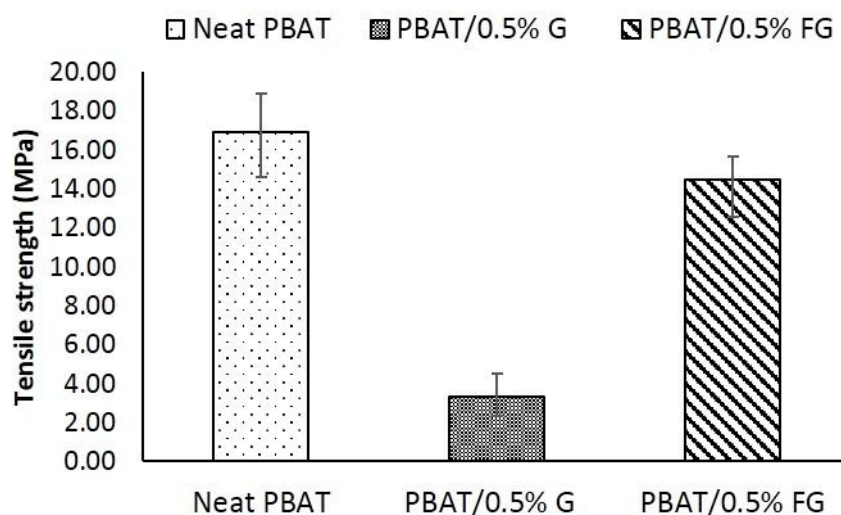
sample	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_c (J/g)	X_c (%)
PBAT	99.54	125.96	6.77	5.94
PBAT/0.5 Graphene	99.56	110.28,128.12	8.58	7.53
PBAT/0.5 FG	99.38	126.29	7.15	6.27

4.3.4 สมบัติด้านแรงดึง

ผลการวิเคราะห์ความทนแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (transverse direction, TD) ของฟิล์มคอมพอสิตของพอลิবিวทีลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีน และฟิล์มคอมพอสิตของพอลิবিวทีลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปร แสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

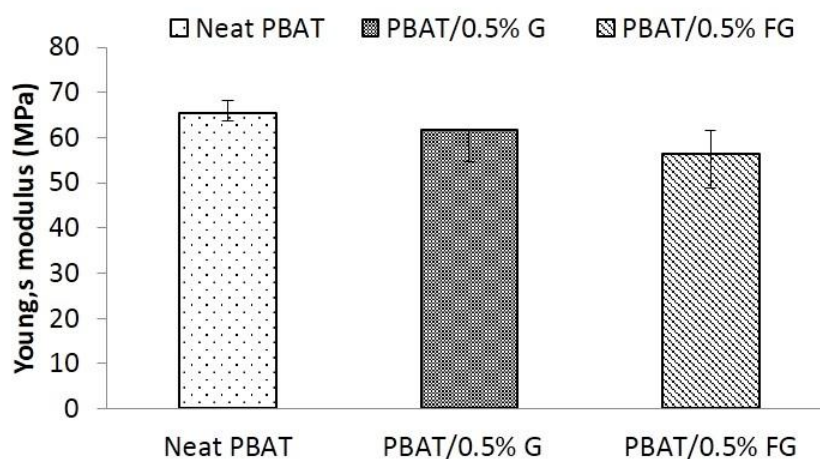


รูปที่ 4.11 ความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตของพอลิবিวทีลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต

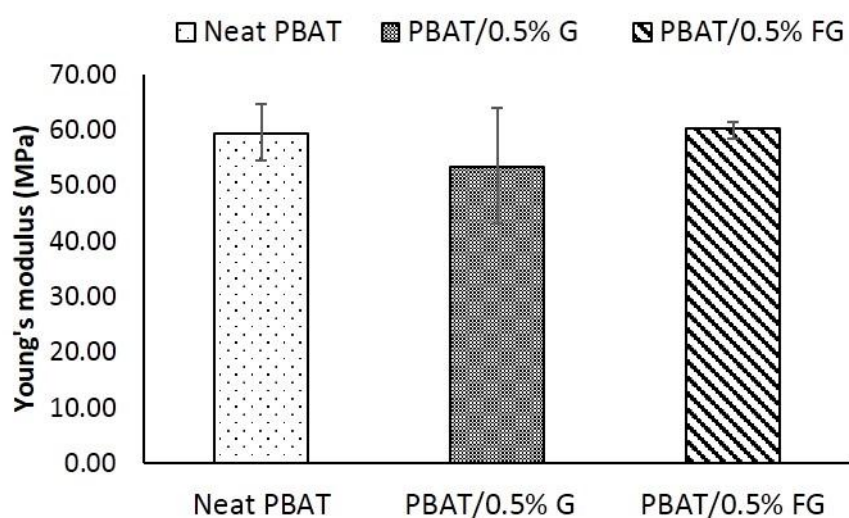


รูปที่ 4.12 ความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตของพอลิবিวทีลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

ผลการวิเคราะห์มอดูลัสของยังในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (transverse direction, TD) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14



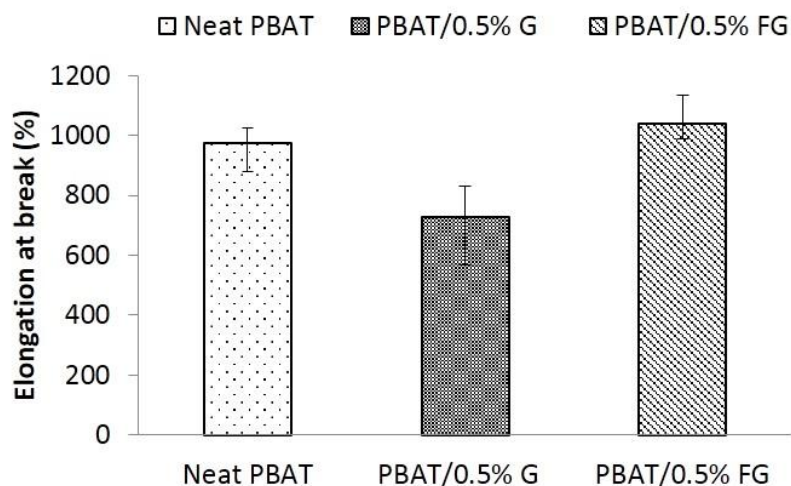
รูปที่ 4. 13 มอดูลัสของยังของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีน และฟิล์มคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรในทิศทางตามแนวเครื่องจักร



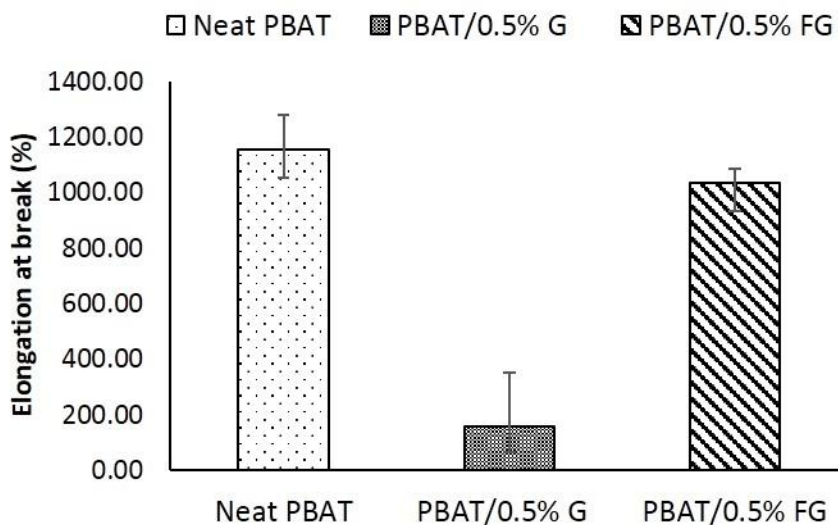
รูปที่ 4. 14 มอดูลัสของยังของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

จากผลการทดสอบการทดลองพบว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตคอมพอสิตที่เติมแกรฟีนดัดแปร มีความทนแรงดึงและมอดุลัสของยังใกล้เคียงกับ ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตบริสุทธิ์ ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและทิศทางขวางแนวเครื่องจักร ขณะที่ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตคอมพอสิตที่เติมแกรฟีน มีความทนแรงดึงและมอดุลัสของยังลดลงอย่างเห็นได้ชัดอันเนื่องมาจากการที่แกรฟีนเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ทำให้เกิดลักษณะเป็นข้อบกพร่องในชิ้นงาน ทำให้อุณหภูมิแกรฟีนนั้นไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ส่งผลให้วัสดุไม่สามารถกระจายแรงไปตามสายโซ่ได้ดีเท่าที่ควร ประกอบกับอุณหภูมิของสารเสริมแรงไปขัดขวางการเกิดผลึกอันเนื่องมาจากการเกาะกลุ่มและการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของแกรฟีน ทำให้วัสดุรับแรงกระทำจากภายนอกส่งผ่านแรงจากพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตไปสู่แกรฟีนได้ไม่ดี [29]

ผลการวิเคราะห์ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (transverse direction, TD) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4. 15 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตบริสุทธิ์ พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

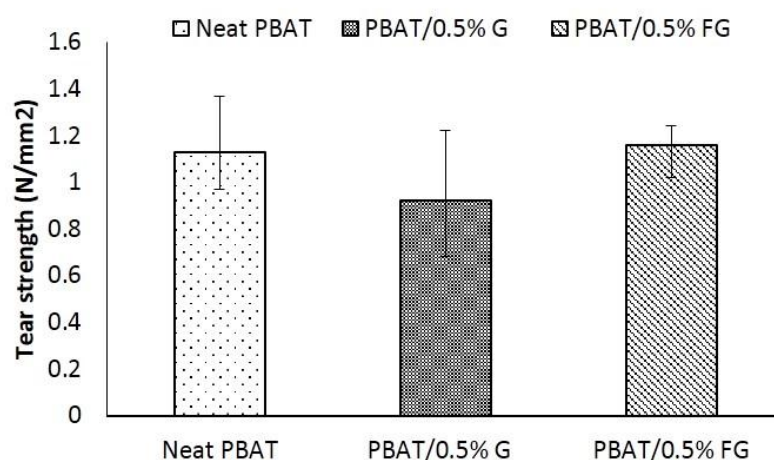


รูปที่ 4. 16 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอสิต พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

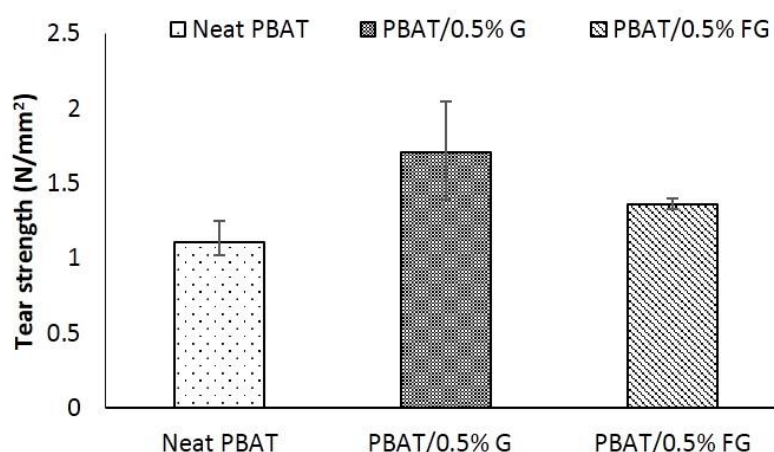
จากการทดลองพบว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอสิต มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร เนื่องจากแกรฟีนตัดแปรรวมพอสิตมีการกระจายตัวที่ดี ทำให้วัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกสามารถกระจายแรงได้ดีทำให้สามารถดึงฟิล์มได้มากขึ้นโดยเฉพาะในทิศทางตามแนวเครื่องจักรซึ่งมีค่าดีกว่าในทิศทางขนานแนวเครื่องจักร เนื่องจากแกรฟีนตัดแปรรวมพอสิตที่มีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีจะสามารถจัดเรียงตัวไปตามทิศทางเดียวกับแรงดึงที่เข้าไป แกรฟีนตัดแปรรวมพอสิตจึงขัดขวางการเคลื่อนที่ผ่านกันของสารโซโม่เลกุลพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตได้น้อยลง ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอสิตจึงยืดออกในทิศทางตามแนวเครื่องจักรได้ดีกว่าพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีน และ ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ ขณะที่ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีน แกรฟีนที่เติมลงไปไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างและรับแรงจากภายนอกได้ ประกอบกับเกิดการเกาะกลุ่มกันของ จึงมีพฤติกรรมเป็นจุดรวมของแรงก่อนชิ้นงานจะเสียรูป

4.3.5 ความทนแรงฉีกขาด

ผลการวิเคราะห์ความทนแรงฉีกขาดในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (transverse direction, TD) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18



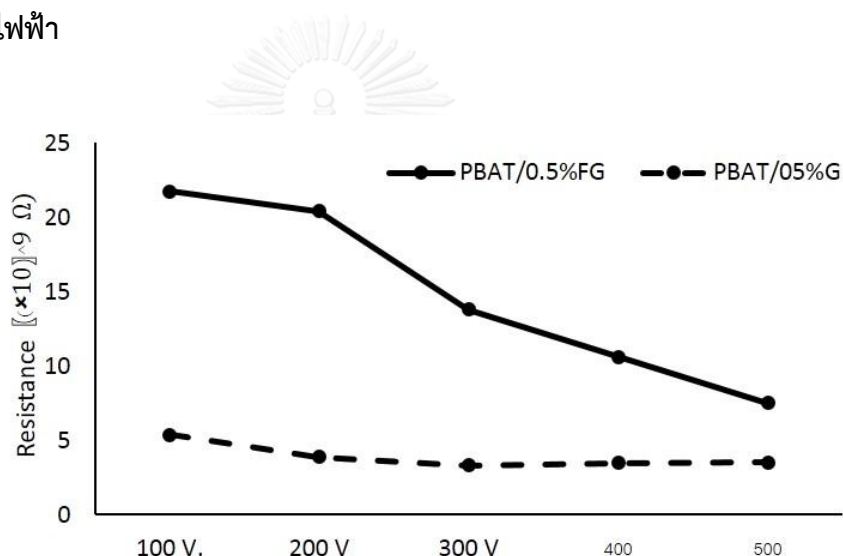
รูปที่ 4. 17 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตบริสุทธิ์ พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร



รูปที่ 4. 18 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตบริสุทธิ์ พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

จากผลการทดลองพบว่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอาจเป็นผลมาจากการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้เกิดการกระจายแรงได้ดี และไปขัดขวางการเติบโตของรอยขาดทำให้ทิศทางของรอยขาดเบี่ยงเบนออกไปจึงต้องใช้แรงมากขึ้นในการฉีกขาด เช่นเดียวกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนที่มีค่าเพิ่มขึ้นในทิศทางแนวเครื่องจักร เนื่องมาจากแกรฟีนก่อตัวเป็นสารถ่วงผลึก ช่วยเพิ่มปริมาณผลึกขึ้นส่งผลให้วัสดุแข็งแรงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูง อันเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอของแกรฟีน

3.6 สมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 4. 19 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต(PBAT/0.5%FG) และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต (PBAT/0.5%FG)

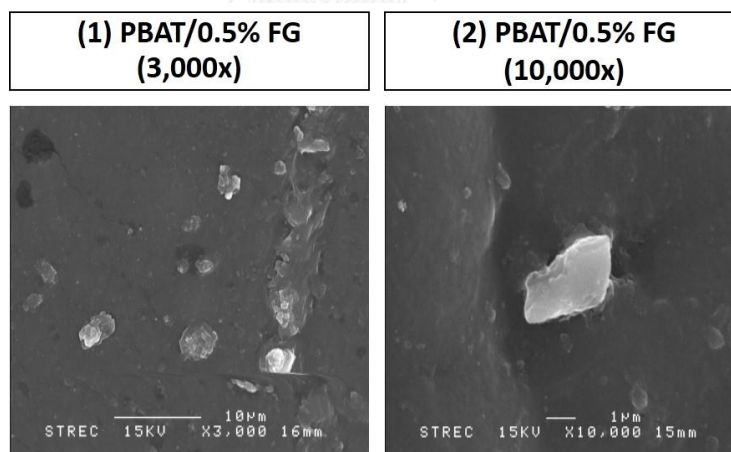
จากรูปที่ 4.19 พบว่าการเติมแกรฟีนลงในพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต มีผลทำให้มีความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตที่เติมแกรฟีนกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตที่เติมแกรฟีนดัดแปรพบว่าฟิล์มคอมพอสิตที่เติมแกรฟีนมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า แสดงถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากแกรฟีนซึ่งเป็นผลึกที่ได้อาจเกิดจากการทำปฏิกิริยารีดักชันโดยมีกรดแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ได้โดยตรงทำให้มีโครงสร้างเป็นพันธะคู่เชื่อมต่อกัน ได้มากกว่า แกรฟีนดัด

แปรที่โครงสร้างทางเคมีพันธะคู่หักเหลี่ยมจำนวนหนึ่งต้องสูญเสียไปกับการทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบไซเลนจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าต่ำกว่าแกรฟีน [24]

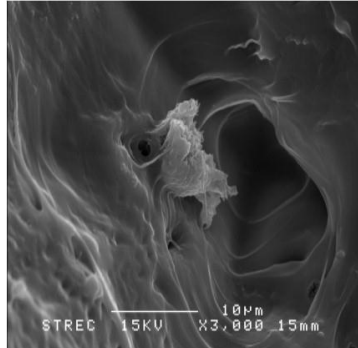
4.4 สมบัติของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพอสิต

4.4.1 สันฐานวิทยา

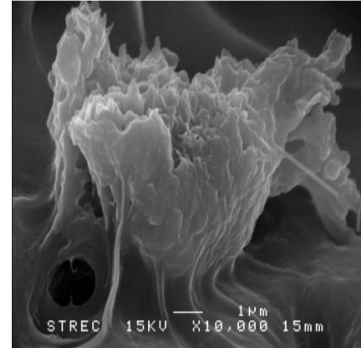
ผลการวิเคราะห์สันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพอสิตบริเวณพื้นที่ภาคตัดขวางจากการทดสอบทนแรงดึง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 3,000x และ 10,000x ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่า อนุภาคแกรฟีนดัดแปรมีลักษณะเป็นแผ่นเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ส่วนมากจะฝังหรือห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์เมทริกซ์โดยไม่มีร่องการหลุดออกของแกรฟีนดัดแปรแสดงถึงความเข้ากันที่ดี นอกจากนี้จะพบว่าฟิล์มคอมพอสิตที่มีแกรฟีนดัดแปรที่อัตราส่วนต่ำจะแสดงลักษณะการกระจายตัวที่ดี และมีอนุภาคเล็กที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่เมื่อปริมาณแกรฟีนดัดแปรเพิ่มสูงขึ้นในฟิล์มคอมพอสิตโดยโครงสร้างของแกรฟีนดัดแปรจะก่อให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเองด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นก้อนขนาดใหญ่ส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิตที่ได้ไม่เกิดการกระจายตัว [23]



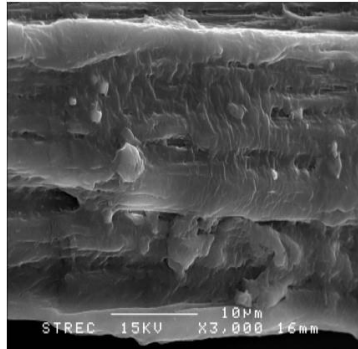
**3) PBAT/1% FG
(3,000x)**



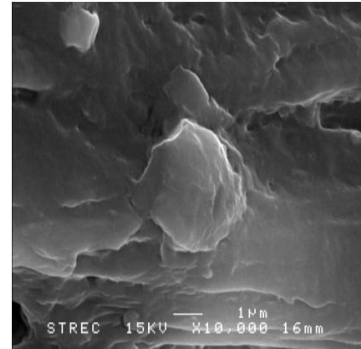
**(4) PBAT/1% FG
(10,000x)**



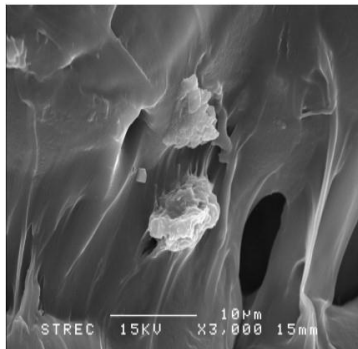
**(5) PBAT/1.5% FG
(3,000x)**



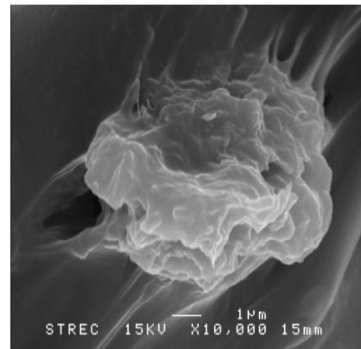
**(6) PBAT/1.5% FG
(10,000x)**

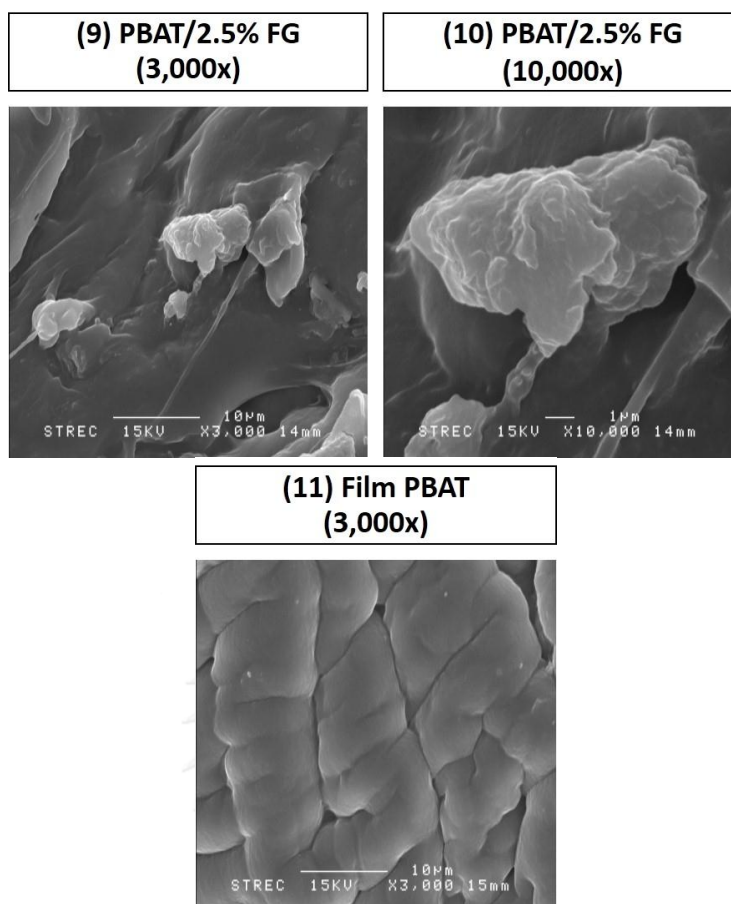


**(7) PBAT/2% FG
(3,000x)**



**(8) PBAT/2% FG
(10,000x)**

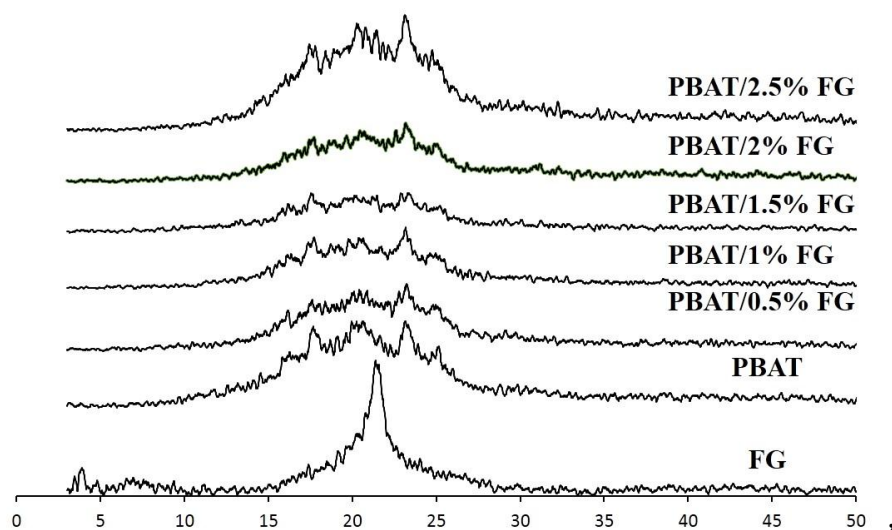




รูปที่ 4. 20 สัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอสิต(1-10) และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลตบริสุทธิ์

4.4.2 โครงสร้างผลึก

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลตคอมพอสิตจากเทคนิคเอกเรย์ดิฟแฟรคชัน แสดงในรูปที่ 4.21 พิกการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ในโครงสร้างผลึกของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลต ที่ระนาบผลึก (011) (010) พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลต (101) (100) (111) และ (104) ซึ่งให้เห็นว่าไม่พบผลึกขนาดใหญ่ในช่วงระหว่างการขึ้นรูปฟิล์มคอมพอสิต และชี้ให้เห็นว่าแกรฟีนตัดแปรรวมไม่ได้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างผลึก หรือส่งผลต่อการเกิดผลึกของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลตคอมพอสิตแต่อย่างใด โดยพิจารณาได้จากความสูงของพีกและพื้นที่ใต้กราฟ XRD ซึ่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง [6]



รูปที่ 4. 21 แสดงโครงสร้างผลึกของแกรฟีนตัดฟิล์มแปร์ และ พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพอสิต

4.4.3 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (crystalline melting temperature, T_m) และปริมาณผลึก (degree of crystallinity, X_c) ของฟิล์มคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปร์ ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิทรี แสดงดังตารางที่ 4.5

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มคอมพอสิตของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตไม่เปลี่ยนไปจากฟิล์มของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตที่ไม่ได้ใส่แกรฟีนตัดแปร์มากนัก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกพบว่าเมื่อเติมแกรฟีนตัดแปร์ลงไปในฟิล์มคอมพอสิต อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.3 ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะแกรฟีนตัดแปร์ทำหน้าที่คล้ายสารก่อผลึกและเหนี่ยวนำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวขึ้นเป็นผลให้ฟิล์มคอมพอสิตมีความแข็งแรงขึ้น ในช่วงปริมาณแกรฟีนตัดแปร์ร้อยละ 0.5 และ 1 โดยน้ำหนักของฟิล์มคอมพอสิต มีผลสอดคล้องกับภาพถ่ายสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.17 (1-4) โดยจะพบว่าแกรฟีนตัดแปร์ในฟิล์มคอมพอสิตดังกล่าวมีขนาดอนุภาคและการกระจายตัวดี แต่เมื่อพิจารณาในช่วงปริมาณแกรฟีนตัดแปร์ร้อยละ 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก ของฟิล์มคอมพอสิตจากภาพถ่ายสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.21 (5-10) การเกาะกลุ่มกันของแกรฟีนตัดแปร์โดยเกิดอันตรกิริยา

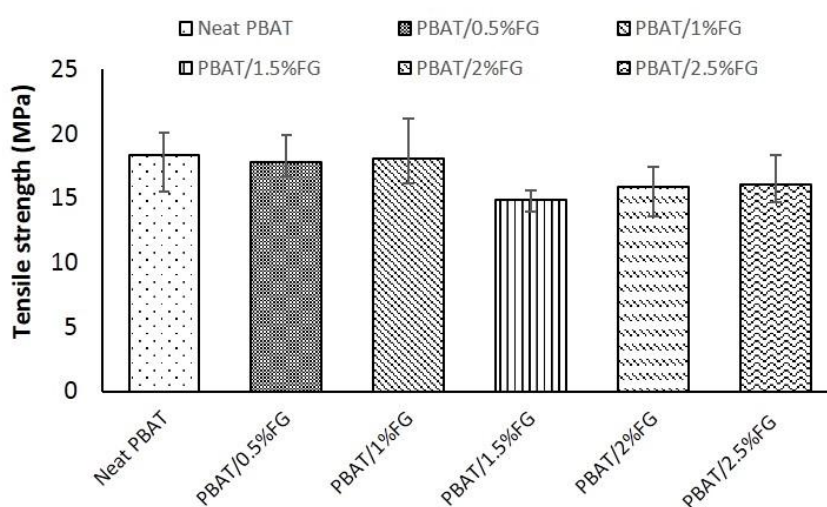
ระหว่างกัน [32]ส่งผลให้แกรฟีนดังกล่าวไม่เกิดการกระจายตัวและอาจเป็นตัวขวางการเกิดผลึกในฟิล์มคอมพอสิตทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกมีค่าต่ำลง [23]

ตารางที่ 4. 3 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิต

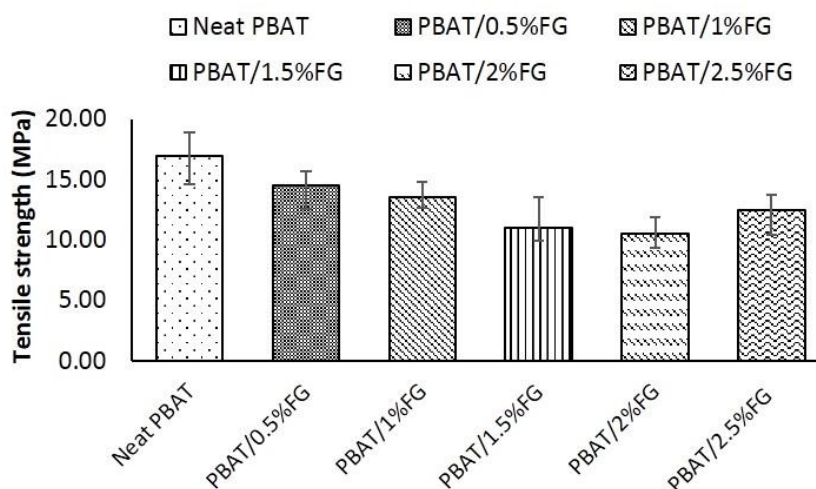
sample	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_c (J/g)	X_c (%)
PBAT	99.54	125.96	6.77	5.94
PBAT/0.5 FG	99.38	126.29	7.15	6.27
PBAT/1 FG	99.39	127.97	7.01	6.15
PBAT/1.5 FG	99.21	126.97	6.48	5.88
PBAT/2 FG	99.23	126.96	8.01	7.03
PBAT/2.5 FG	99.24	126.62	7.33	6.43

4.4.4 สมบัติด้านแรงดึง

ผลการวิเคราะห์ความทนแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (transverse direction, TD) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23



รูปที่ 4. 22 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตคอมพอสิต ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

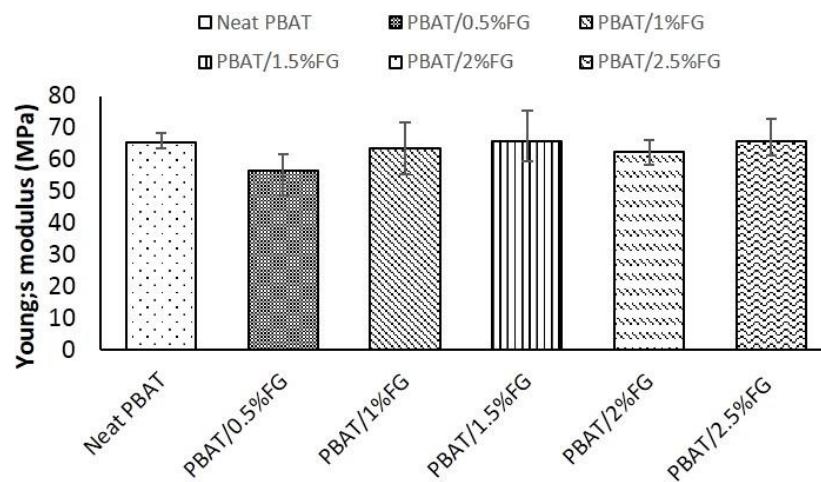


รูปที่ 4. 23 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทีลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลตคอมพอในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

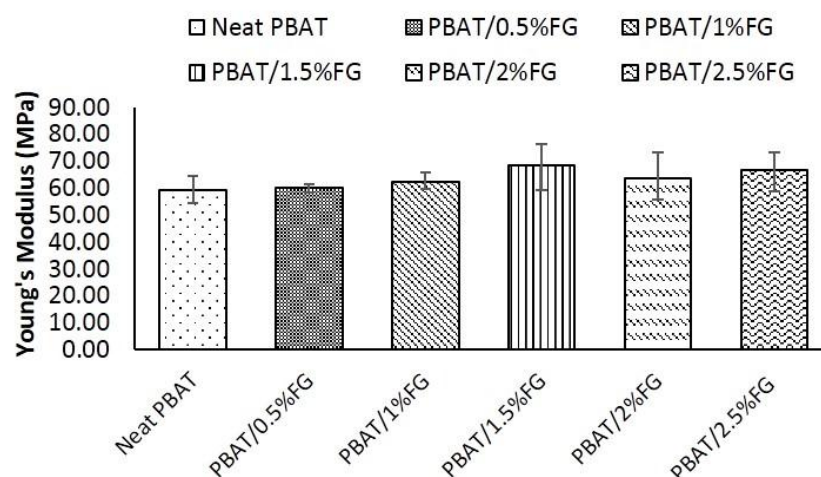
เนื่องจากในเบื้องต้นงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นพอลิเมอร์เชิงประกอบสำหรับบรรจุภัณฑ์อเล็กทรอนิกส์ จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาสมบัติด้านแรงดึงเมื่อปริมาณสารเสริมแรงแกรฟีนแตกต่างกัน ซึ่งจากรูปที่ 4.22 และ 4.23 พบว่า ฟิล์มคอมพอสิตที่เติมแกรฟีนตัดแปรในปริมาณต่ำได้แก่ ร้อยละ 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึงใกล้เคียงกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่ได้เติมแกรฟีนตัดแปร ขณะที่ฟิล์มคอมพอสิตที่เติมแกรฟีนตัดแปรในปริมาณสูงได้แก่ ร้อยละ 1.5, 2 และ 2.5 โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงไปในทิศทางเดียวกัน อันเนื่องมาจากแกรฟีนตัดแปรที่ปริมาณสูงมักเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันเองและเกิดพฤติกรรมเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ส่งผลให้เกิดการขัดขวางการเกิดผลึก ทำให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีความเป็นผลึกลดลง เมื่อได้รับแรงดึงจะส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่าย นอกจากนี้การที่แกรฟีนตัดแปรมีหมู่อัลคิลเป็นลักษณะสายโซ่ยาวบนพื้นผิวอาจส่งผลให้สายโซ่นี้สามารถเข้าไปแทรกสอดระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดการเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายได้เช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามสายโซ่อัลคิลบนแกรฟีนตัดแปรมีส่วนช่วยให้เกิดการแทรกสอดระหว่างชั้นของแกรฟีนตัดแปรช่วยให้ ชั้นแกรฟีนตัดแปรดังกล่าวเกิดการเกาะกลุ่มกันได้ยากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากผลทนแรงดึงที่ปริมาณ แกรฟีนตัดแปรร้อยละ 0.5 และ 1 โดยน้ำหนักมีค่าที่ใกล้เคียงกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่ได้เติม และยังอธิบายได้จากภาพถ่ายแสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิตแสดงในรูปที่ 4.20 (1-4) ซึ่งจะเห็นว่าฟิล์มแกรฟีนตัดแปรคอมพอสิตที่ ร้อยละ 0.5 และ 1 โดยน้ำหนักมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอทำให้สามารถรับและกระจายแรงได้ดี ส่งเสริมให้เกิดการเสริมแรงอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่อพิจารณา

ปริมาณแกรฟีนดัดแปรที่ร้อยละ 0.5 และ 1 โดยน้ำหนักพบว่าไม่ได้มีความต่างกันอย่างนัยยะสำคัญ จึงสามารถเลือกสองปริมาณนี้เพื่อเปรียบเทียบกับเลือกปริมาณที่เหมาะสมและคุ้มค่าได้

ผลการวิเคราะห์มอดุลัสของยังในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (transverse direction, TD) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25



รูปที่ 4. 24 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

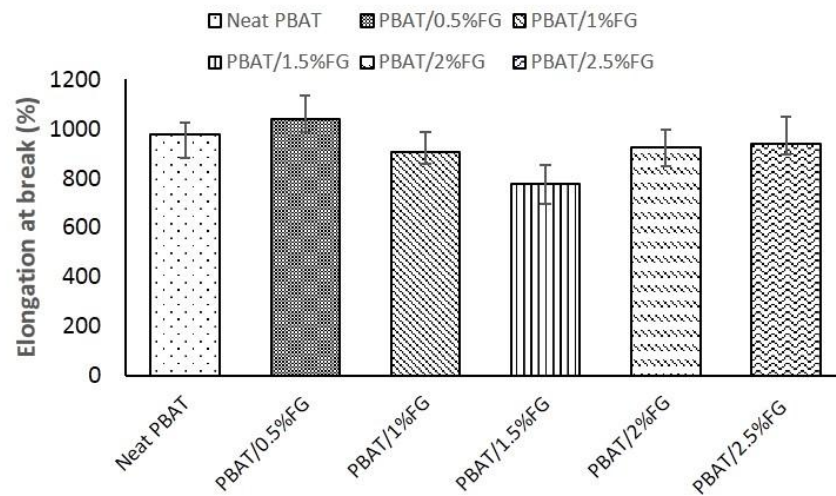


รูปที่ 4. 25 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

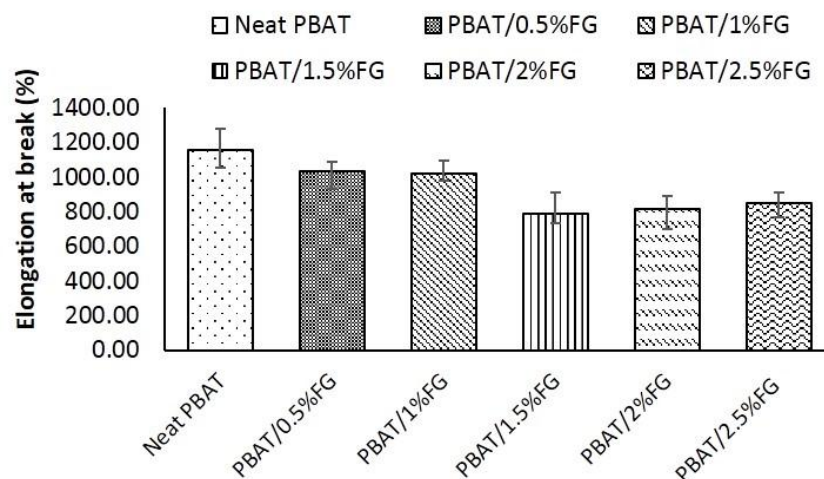
จากผลการทดสอบค่ามอดูลัสของยัง ซึ่งสามารถบอกระดับความแข็งแรงของวัสดุ หรือความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูป จากผลการทดสอบพบว่ามอดูลัสที่ต่างจากความหนาแน่นดังกล่าวคือที่คอมพอสิตที่ใช้แกรไฟีนดัดแปรปริมาณร้อยละ 0.5 ของฟิล์มพอลิเมอร์มีค่ามอดูลัสของยังต่ำกว่าฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่ได้ผสมแกรไฟีนดัดแปร ขณะที่แกรไฟีนดัดแปรในสูตรของฟิล์มคอมพอสิตที่เหลือพบว่ามอดูลัสใกล้เคียงกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่ได้ใส่แกรไฟีนดัดแปรในทิศทางแนวเครื่องจักร และมีค่ามอดูลัสของยังสูงกว่าคอมพอสิตที่ไม่ได้ใส่แกรไฟีนดัดแปรในทิศทางแนวเครื่องจักร

ปรากฏการณ์นี้อาจเป็นผลของการปรับปรุงพื้นผิวของแกรไฟีนด้วยหมู่อัลคิลสายยาว กล่าวคือ ในกรณีของแกรไฟีนดัดแปรปริมาณร้อยละ 0.5 ของฟิล์มพอลิเมอร์ เมื่ออยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ หมู่อัลคิลสายยาวจะช่วยเพิ่มระยะห่างระหว่างชั้นแกรไฟีนดัดแปรทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของแผ่นแกรไฟีนได้ยากขึ้นในช่วงปริมาณหนึ่ง นอกจากนี้หมู่อัลคิลสายยาวบนพื้นผิวแกรไฟีนยังช่วยในการกระจายตัวในระดับโมเลกุลในพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์และช่วยสนับสนุนการถ่ายโอนความเค้น อาจช่วยลดแรงดึงตึงระหว่างสายโซ่ต่อสายโซ่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิตที่ได้มีสมบัติเหนียวและยืดหยุ่น ขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณแกรไฟีนดัดแปรในฟิล์มคอมพอสิตขึ้นส่งผลให้ ปริมาณอัลคิลสายโซ่ยาวมีปริมาณมากขึ้นจะอาจเกิดการแพร่และเกี่ยวพัน (entanglement) ระหว่างสายโซ่ยาวด้วยตัวเอง หรืออาจเกี่ยวพันกับสายโซ่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งทำให้เกิดเป็นโครงสร้างการยึดติดกันขึ้นจึงทำให้ฟิล์มดังกล่าวมีความแข็งแรงขึ้น [23] อย่างไรก็ตาม ค่ามอดูลัสของยังในทิศทางแนวเครื่องจักรมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันจึงยังให้ความสนใจในการพิจารณาเลือกปริมาณที่เหมาะสมต่อการเลือกนำไปใช้ของแกรไฟีนดัดแปรที่ร้อยละ 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักพบว่าไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะกับสูตรปริมาณแกรไฟีนดัดแปรที่สูงกว่านี้

ผลการวิเคราะห์มอดูลัสของยังในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (transverse direction, TD) ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ลิ้นแอดิเพตโคเทรฟเทเลตคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27



รูปที่ 4. 26 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร



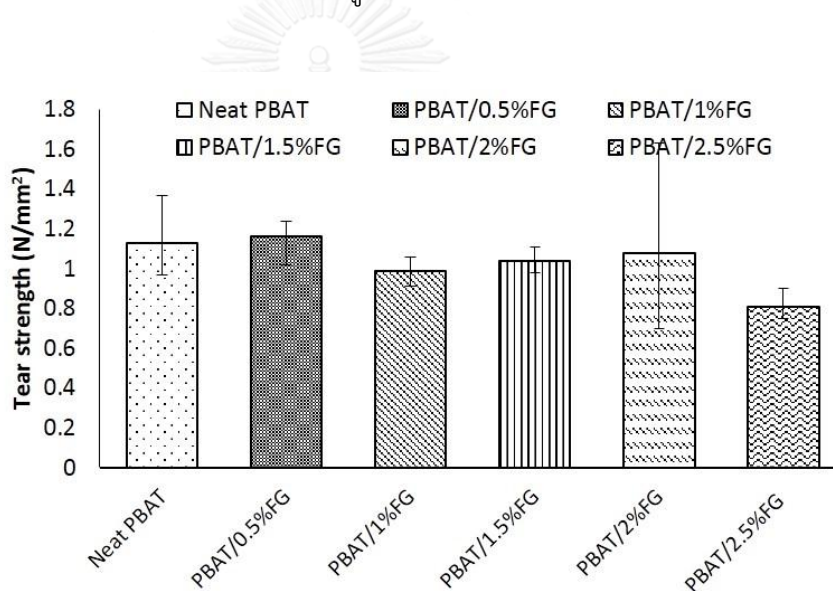
รูปที่ 4. 27 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต ในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

จากผลการทดลองความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิต พบว่าฟิล์มคอมพอสิตดังกล่าวมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับสมมติฐานที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นคือที่แกรฟีนดัดแปรปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอมพอสิตจะมีลักษณะค่อนข้างเหนียว กล่าวคือ เป็นผลสายโซ่อัลคิลบนพื้นผิวแกรฟีนดัดแปร ช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวในระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้เกิดการถ่ายโอนความเค้นได้ดี เช่นเดียวกับปริมาณแกรฟีนดัดแปรสูตรอื่นที่สามารถเกิดการเกี่ยวพันจึงมีความแข็งแรงแต่แกรฟีนดัดแปรในปริมาณที่มากขึ้น

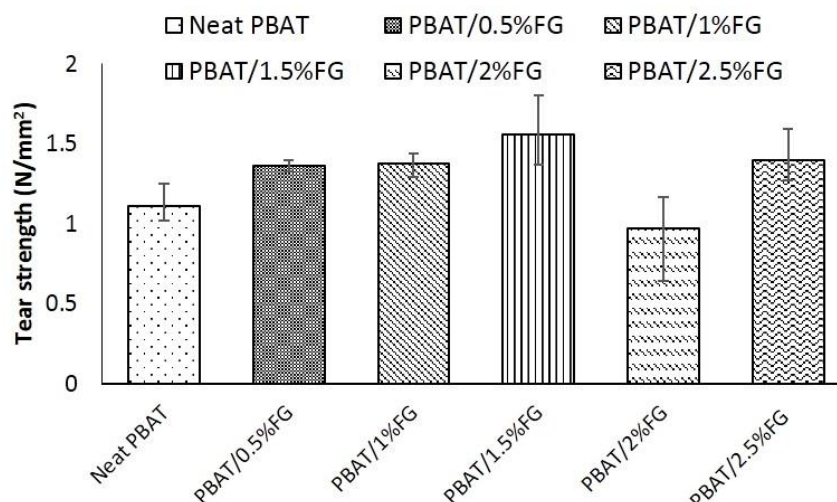
ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้จากการถูกยึดติด เกียวพัน ทำเสมือนเป็นจุดรับความเครียดระหว่างกระบวนการเปลี่ยนรูปเท่านั้นความยืดสูงสุด ณ จุดขาดจึงต่ำกว่าแกรฟิเต็ดแปรที่ปริมาณน้อยๆในพอลิเมอร์คอมพอสิต ดังนั้นเมื่อพิจารณาเป้าหมายในการนำฟิล์มนี้ไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อเล็กโทโรนิกส์ ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีความเหมาะสม คือ ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีปริมาณสารแกรฟีนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก

4.4.5 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟเทเลตคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์ความทนแรงฉีกขาดในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (transverse direction, TD) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟเทเลตคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.28 และ 4.29



รูปที่ 4. 28 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟเทเลตคอมพอสิต ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร



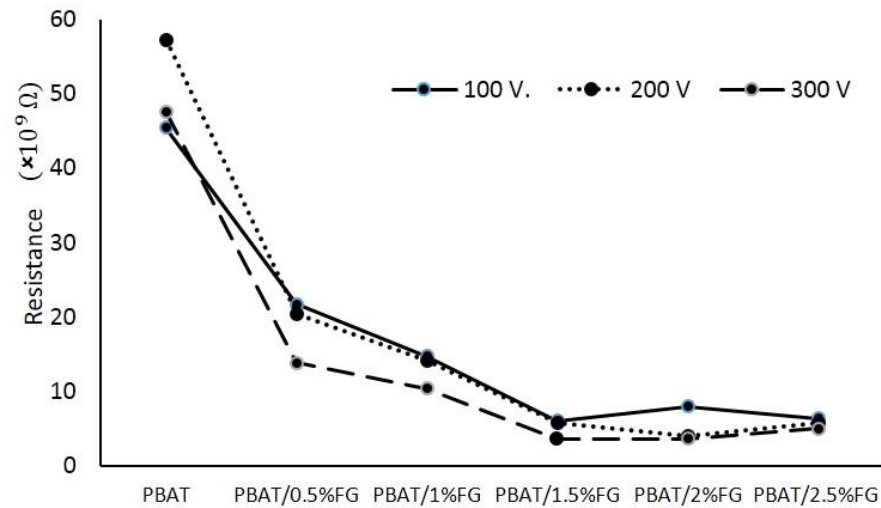
รูปที่ 4. 29 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิবিทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลตคอมพอสิต ในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

จากผลการทดลองพบว่า ฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติมแกรฟีนดัดแปรมีความทนแรงฉีกขาดใกล้เคียงกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่ได้ใส่แกรฟีนดัดแปรในทิศทางแนวเครื่องจักร และมีค่าที่เพิ่มขึ้นจากฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่ได้ใส่แกรฟีนดัดแปร พฤติกรรมที่เกิดขึ้นมานี้เนื่องมาจากแกรฟีนดัดแปรมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์เมื่อมีปริมาณแกรฟีนต่ำ และผลจากโครงสร้างที่เกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่อิลคิล หรือเป็นตัวก่อผลึกเนื่องจากมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นจากการเกาะกลุ่มกัน ในขณะที่ฟิล์มซึ่งเติมแกรฟีนดัดแปรปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักมีความทนแรงฉีกขาดต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่ได้ใส่แกรฟีนดัดแปร เนื่องจากเมื่อปริมาณของแกรฟีนดัดแปรมากขึ้น จะเกิดการรวมกลุ่มกัน (aggregation) ส่งผลให้กลายเป็นจุดบกพร่องภายในชิ้นงานซึ่งเป็นจุดกำเนิดของการแตกหักเสียหายของวัสดุนั่นเอง

4.4.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มคอมพอสิตของพอลิবিทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลต/แกรฟีน

ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มคอมพอสิตของพอลิবিทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลต/แกรฟีนแสดงดังรูปที่ 4.30 โดยพบว่า การเติมแกรฟีนลงในพอลิবিทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลต มีผลทำให้มีความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มคอมพอสิตลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมมีแกรฟีนดัดแปร เนื่องจากแกรฟีนดัดแปรที่มีโครงสร้างที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานของฟิล์มพอลิবিทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลตจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแกรฟีนดัดแปร จาก $10^{10} \Omega$ ให้อยู่ในช่วง $10^9 \Omega$ ซึ่งเป็นการนำไฟฟ้าของวัสดุที่มีสมบัติกระจายไฟฟ้าสถิตได้ จากรูป 4.27 จะพบว่าปริมาณของแกรฟีนที่เริ่มส่งผลให้ค่าความต้านทานของฟิล์มพอลิবিทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลตคือ

พอสิต คือ ที่ปริมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก [33] เมื่อพิจารณาจะพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแกรฟีนตัดแปรรจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง



รูปที่ 4. 30 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟแทเลตคอมพอสิต



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตให้สามารถใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยการนำพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตมาทำเป็นคอมพอสิตโดยใช้แกรฟีนที่ดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนเป็นตัวเติมเสริมแรงเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งาน ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 แกรฟีนออกไซด์สามารถเตรียมจากแกรไฟต์ได้โดยใช้การประยุกต์วิธีของฮัมเมอร์และออฟแมน ส่วนแกรฟีนสามารถเตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้กรดแอสคอร์บิกให้เป็นแกรฟีน

5.1.2 แกรฟีนดัดแปรสามารถเตรียมได้โดยการดัดแปรผิวของแกรฟีนออกไซด์ด้วยสารคู่ควบเฮกซะเดคซิลไทรเมทอกซีไซเลน และทำปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้กรดแอสคอร์บิกให้เป็นแกรฟีนดัดแปร

5.1.3 มาสเตอร์แบตช์ของพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตกับแกรฟีนและแกรฟีนดัดแปรถูกเตรียมขึ้นด้วยการตกตะกอนร่วมในเมทานอล จากนั้นนำมาสเตอร์แบตช์ไปผสมกับพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตเพื่อให้ได้คอมพอสิตคอมพาวนด์ที่มีปริมาณตัวเติมต่างๆ คอมพอสิตคอมพาวนด์นี้สามารถนำไปใช้ขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตคอมพอสิต ได้ด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม

5.1.4 จากการทดลองเปรียบเทียบผลของตัวเติมเสริมแรงระหว่างแกรฟีนและแกรฟีนดัดแปรในปริมาณเท่ากันที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก พบว่าแกรฟีนมีแนวโน้มในการเกาะกลุ่มรวมตัวกันในฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตคอมพอสิต ขณะที่แกรฟีนดัดแปรมีพฤติกรรมในการเกาะกลุ่มรวมตัวน้อยจากผลของสารคู่ควบไซเลนบนพื้นผิว ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ ฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตมีสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความทนแรงดึง โมดูลัสของยัง และความทนแรงฉีกขาด และความยืดหยุ่นสูง จุดขาดสูงกว่าฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต และมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต แต่อย่างไรก็ตามพบว่าฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนคอมพอสิตก็ยังสามารถต้านทานฟ้าสถิตได้

5.1.5 จากการทดลองเปรียบเทียบผลของปริมาณของตัวเติมเสริมแรงแกรฟีนดัดแปร ในที่ ปริมาณร้อยละ 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 โดยน้ำหนัก พบว่าแกรฟีนดัดแปรมีความสามารถในการเข้ากันได้กับเมทริกซ์พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตที่ดีขึ้นในทุกช่วงปริมาณที่ศึกษา เมื่อพิจารณาฟิล์ม พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตที่มีปริมาณร้อยละ 0.5 และ 1 โดย น้ำหนัก พบว่ามีความสามารถในการกระจายตัวที่ดีในเนื้อเมทริกซ์ ขณะที่แกรฟีนดัดแปรในช่วง ปริมาณร้อยละ 1.5 ถึง 2.5 โดยน้ำหนัก มีพฤติกรรมในการเกาะรวมกลุ่มกันของแกรฟีนส่งผลให้การ กระจายตัวในเมทริกซ์ได้ต่ำกว่า

เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิต ที่มีปริมาณ แกรฟีนดัดแปรร้อยละ 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก พบว่ามีความทนแรงดึง ความยืดหยุ่นสูง จุดขาดสูง กว่าที่ปริมาณอื่น โดยฟิล์มที่มีแกรฟีนดัดแปรปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึง ไกลเคียงกับฟิล์มที่มีแกรฟีนดัดแปรปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ขณะที่ฟิล์มที่มีแกรฟีนดัดแปร ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีความยืดหยุ่นสูง จุดขาดสูงกว่า ฟิล์มที่มีแกรฟีนดัดแปรปริมาณร้อย ละ 1 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามพบว่า modulus ของยังของฟิล์มที่มีปริมาณแกรฟีนดัดแปรร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีค่าต่ำกว่าปริมาณอื่นๆ

ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตที่มีปริมาณของแกรฟีน ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีความทนแรงฉีกขาดในทิศทางตามแนวเครื่องจักรมากที่สุด เมื่อเทียบกับ ฟิล์มคอมพอสิตสูตรอื่น

นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตใน ทุกช่วงปริมาณมีความสามารถในการต้านไฟฟ้าสถิตได้ดี

อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัด แปรคอมพอสิต สำหรับขึ้นรูปเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติต้านไฟฟ้าสถิต คือฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิ เพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตที่มีปริมาณแกรฟีนดัดแปรร้อยละ 0.5 หรือ 1 โดย น้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการเลือกใช้สารคู่ควบไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันอื่นที่ช่วยใน การนำไฟฟ้ามาดัดแปรผิวของแกรฟีน เพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าในฟิล์มคอมพอสิตให้ได้มากขึ้น

5.2.2 ศึกษาสมบัติในด้านอื่นของฟิล์มคอมพอสิต อาทิ ความสามารถในการป้องกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

รายการอ้างอิง

1. ศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2013.
2. Innoplus. Biodegradable Plastic: A New Environmental-Friendly Choice. polymers'place. 2010: 10.
3. Business OTLPaP. Properties enhancement for plastics. Optimal Tech's News. 2012(17): 2-3.
4. Wikipedia®. Polybutyrate 2016. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polybutyrate#Properties>. [20 June 2016]
5. สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. National Roadmap for the Development of bioplastics industry. 2551.
6. Li, G., Shankar, S., Rhim, J.W., Oh, B.Y. Effects of preparation method on properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate) films. Food Science and Biotechnology. 2015;24(5): 1679-85.
7. Sima, K., Nhol, K., Sati, N.B. Electrical, thermal, and viscoelastic properties of graphene nanoplatelet/poly(butylene adipate-co-terephthalate) biodegradable nanocomposites. Journal of Applied Polymer Science. 2016;133(27): 1-9.
8. แพรวี เคหะสุวรรณ. พลาสติกชีวภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ในด้านตลาดของเกษตรกรในเขต ปฎิรูปที่ดิน, สำนักงานการปฏิรูปที่ดินเพื่อการเกษตร. (132)2013: 103-8.
9. หฤทภาค กิรติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และ อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ. วิศวกรรมสาร มก. 22(70) (พฤศจิกายน 2009 - มกราคม 2010)
10. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน. คอมพอสิต. Available from: <http://ir.rmuti.ac.th/xmlui/bitstream/handle/123456789/384/Chapter%202.pdf?sequence=>. [20 June 2016]
11. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. ถาม-ตอบปัญหาวัสดุศาสตร์ วัสดุที่เรียกว่า "คอมโพสิต(composites)" คือวัสดุประเภทใด. 2016. Available from:

- <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-question-answer/169-วัสดุที่เรียกว่า-คอมโพสิต-composites-คือวัสดุประเภทใด> [20 June 2016]
12. อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2003.
 13. อโนดาช รัชเวทย์. พอลิเมอร์ (Polymer). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ดวงกลม พับลิชชิ่ง, 2009.
 14. Jeeranun D. Graphene (Part 2): Properties and some of its applications. Naresuan Phayao Journal. 2014: 7(1).
 15. Wikipedia®. แกรฟีน. 2016. Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%9F%E0%B8%B5%E0%B8%99> [20 June 2016]
 16. Chakrabarti, M.H., Brandon, N.P., Yufit, V., Hashim, M.A., Irfan, M.F., et al. Progress in the electrochemical modification of graphene-based materials and their applications. Electrochimica Acta. (107)2013: 425-40.
 17. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. The Jewel of Future Material 2012. Available from: <http://www.nstda.or.th/prs/index.php/graphene?showall=1> [20 June 2016]
 18. ประธาน บุรณศิริ และ พิชญ์สินี สุวรรณแพทย์. ผลของการตอบสนองต่อแสงของวัสดุนาโนคาร์บอน. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2014.
 19. Fryczkowski, R., Gorczońska, M., Slusarczyk, C., Fryczkowska, B., Janicki, J. The possibility of obtaining graphene/polymer composites from graphene oxide by a one step process. Composites Science and Technology. (80)2013: 87-92.
 20. Mittal, V., Chaudhry, A.U., Luckachan, G.E. Biopolymer – Thermally reduced graphene nanocomposites: Structural characterization and properties. Materials Chemistry and Physics. 147(1-2)(2014): 319-332.
 21. Fu, Y., Liu, L., Zhang, J., Hiscox, W.C. Functionalized graphenes with polymer toughener as novel interface modifier for property-tailored polylactic acid/graphene nanocomposites. Polymer. 55(24)(2014): 6381-6389.

22. Papageorgiou, G.Z., Terzopoulou, Z., Bikiaris, D., Triantafyllidis, K.S., Diamanti, E., Gournis, D., et al. Evaluation of the formed interface in biodegradable poly(l-lactic acid)/graphene oxide nanocomposites and the effect of nanofillers on mechanical and thermal properties. Thermochimica Acta. (597)2014: 48-57.
23. Zhang L, Li Y, Wang H, Qiao Y, Chen J, Cao S. Strong and ductile poly(lactic acid) nanocomposite films reinforced with alkylated graphene nanosheets. Chemical Engineering Journal. (264)2015: 538-546.
24. Zhang, J., Yang, H., Shen, G., Cheng, P., Zhang, J., Guo, S. Reduction of graphene oxide via L-ascorbic acid. Chemical communications. 46(7)2010: 1112-1114.
25. Williams, S.H., Richarde, E.O. Preparation of Graphitic Oxide. Contribution from The Baroiddivision Nationale Adcompany. (1975): 1339.
26. ศูนย์เครื่องมือกลาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. Sonicator bath. 2016. Available from: <http://www.inct.sat.psu.ac.th/index.php/2010-07-21-06-18-57?id=69:sonicator-bath&catid=41> [20 June 2016]
27. บริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด. AMICUS Ultra DLD X-Ray Photoelectron Spectroscopy. 2016. Available from: <http://www.barascientific.com/products/shimadzu/scientific/surface/thai/XPS/AMICUS-Ultra-DLD.php> [20 June 2016].
28. สิทธิพงษ์ อำนวยพาณิชย์. กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน. วารสารวิชาการ มช 2004. 2004: 82-94.
29. ชวกร กุลวงศ์. การศึกษาการกระจายตัวของนาโนเคลย์ในวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนของพอลิเอธิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยใช้ไขมันมะพร้าวเป็นสารพลาสติกไซเซอร์. ปรินญูมหาบัณฑิตมหาบัณฑิต สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2001.
30. Wang, J., Xu, C., Hu, H., Wan, L., Chen, R., Zheng, H. Synthesis, mechanical, and barrier properties of LDPE/graphene nanocomposites using vinyl triethoxysilane as a coupling agent. Journal of Nanoparticle Research. 13(2)(2010): 869-878.

31. Ma, W.S., Li, J., Deng, B.J., Zhao, X.S. Preparation and characterization of long-chain alkyl silane-functionalized graphene film. Journal of Materials Science. 48(1)(2012): 156-161.
32. Hu, K., Kulkarni, D.D., Choi, I., Tsukruk, V.V. Graphene-polymer nanocomposites for structural and functional applications. Progress in Polymer Science. 39(11)(2014) :1934-1972.
33. Kunalaya, S., Sasiroj, C., Walaiporn, P.O., Sirisart, O. Thermal and Electrical Properties of LLDPE Filled with Polypyrrole and Carbon Black. The Journal of KMUTNB. 21(2)(2011)





ภาคผนวก ก

สมบัติเชิงกลด้านการต้านแรงดึง

ตารางที่ ก-1 สมบัติต้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิবিวิทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และฟิล์มพอลิবিวิทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% FG	PBAT/ 1% FG	PBAT/ 1.5% FG	PBAT/ 2% FG	PBAT/ 2.5% FG
1	20.05	16.69	16.69	15.59	17.45	15.59
2	18.70	19.86	18.14	13.98	16.86	13.98
3	15.53	17.67	18.32	15.29	13.56	15.29
4	17.51	17.04	21.22	13.95	16.70	13.95
5	20.10	27.62	16.17	15.33	14.78	15.33
Average	18.37	17.77	18.10	14.83	15.86	14.82
Max	20.09	19.86	21.21	15.59	17.45	18.31
Min	15.53	16.69	16.16	13.95	13.55	14.64
SD	1.92	1.24	1.97	0.80	1.64	0.80

ตารางที่ ก-2 สมบัติความยืด ณ จุดสูงสุด ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และ ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% FG	PBAT/ 1% FG	PBAT/ 1.5% FG	PBAT/ 2% FG	PBAT/ 2.5% FG
1	984.03	1054.12	880.08	852.50	996.96	941.64
2	1068.03	986.74	867.74	758.30	966.50	1046.46
3	920.84	1134.19	857.70	794.67	849.53	986.53
4	879.63	997.65	941.71	773.18	900.95	1047.43
5	1024.70	1038.19	985.36	696.81	918.61	897.76
Average	975.44	986.74	1038.19	790.95	812.27	938.96
Max	1024.69	1134.19	985.36	852.49	996.96	1047.43
Min	879.63	986.74	857.69	696.80	849.52	897.76
SD	76.21	59.31	54.87	56.55	57.46	65.50

ตารางที่ ก-3 มอดูลัสของยังของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตบริสุทธิ์ และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอลิสไตรีนทิศทางตามแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% FG	PBAT/ 1% FG	PBAT/ 1.5% FG	PBAT/ 2% FG	PBAT/ 2.5% FG
1	68.22	56.98	57.87	59.45	58.47	61.28
2	65.15	58.99	64.54	61.41	62.38	63.79
3	65.36	61.64	67.49	67.08	66.00	68.22
4	64.58	48.72	71.53	64.90	64.95	62.04
5	63.59	55.51	55.44	75.53	59.86	72.98
Average	65.37	56.36	63.37	65.67	62.33	65.66
Max	68.21	61.63	71.52	75.52	65.99	72.98
Min	63.58	48.71	55.43	59.44	58.46	61.27
SD	1.73	4.85	6.67	6.26	3.21	4.90

ตารางที่ ก-4 สมบัติด้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มพอลิ บิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/ แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% G	PBAT/ 0.5% FG
1	14.57	3.63	15.68
2	18.89	2.84	12.57
3	17.05	4.48	15.33
4	16.15	2.34	14.11
5	17.77	3.29	14.70
Average	16.89	2.32	14.48
Max	18.89	4.48	15.68
Min	14.57	2.34	12.57
SD	1.64	0.81	1.23

ตารางที่ ก-5 สมบัติความยืดหยุ่น ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% G	PBAT/ 0.5% FG
1	984.03	829.65	1054.12
2	1068.03	819.88	986.74
3	920.84	567.52	1134.19
4	879.63	693.21	997.65
5	1024.70	723.93	1020.47
Average	975.45	726.84	1038.19
Max	1024.70	829.65	1134.19
Min	879.63	567.52	986.74
SD	76.21	106.94	59.31

ตารางที่ ก-6 สมบัติด้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มพอลิ บิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/ แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% G	PBAT/ 0.5% FG
1	68.22	66.69	56.98
2	65.15	54.72	58.99
3	65.36	55.27	61.64
4	64.58	64.20	48.72
5	63.59	67.96	55.51
Average	65.37	61.76	56.36
Max	68.21	61.77	61.63
Min	63.58	54.72	48.71
SD	1.73	6.33	4.85

ตารางที่ ก-7 สมบัติต้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอลิเมอร์ในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% FG	PBAT/ 1% FG	PBAT/ 1.5% FG	PBAT/ 2% FG	PBAT/ 2.5% FG
1	14.57	15.68	12.63	9.93	11.87	12.10
2	18.89	12.57	13.92	10.02	9.71	13.76
3	17.05	15.33	13.61	10.67	10.93	12.65
4	16.15	14.11	12.64	13.57	10.82	13.29
5	17.77	14.70	14.79	10.96	9.38	10.39
Average	16.89	14.48	13.52	11.03	10.54	12.44
Max	18.89	15.68	14.79	13.57	11.87	13.76
Min	14.57	12.57	12.63	9.93	9.38	10.39
SD	1.64	1.23	0.92	1.48	1.00	1.31

ตารางที่ ก-8 สมบัติความยืด ฃ จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทยเลตบริสุทธิ์ และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรพแทยเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% FG	PBAT/ 1% FG	PBAT/ 1.5% FG	PBAT/ 2% FG	PBAT/ 2.5% FG
1	1051.89	1087.02	987.76	739.77	891.45	853.74
2	1277.67	1043.65	1084.85	788.12	842.18	907.83
3	1182.20	1083.30	981.03	736.40	825.78	882.26
4	1062.76	1017.76	1047.28	913.33	801.97	839.50
5	1206.13	933.72	1016.62	777.18	699.97	764.72
Average	1151.13	1087.02	1094.85	790.96	812.27	849.61
Max	1277.67	1087.02	978.76	913.33	891.45	907.83
Min	1051.89	933.72	52.48	736.40	699.97	764.72
SD	96.87	62.55	0.92	72.06	70.83	54.27

ตารางที่ ก-9 มอดูลัสของยังของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอลิสไตรีนทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% FG	PBAT/ 1% FG	PBAT/ 1.5% FG	PBAT/ 2% FG	PBAT/ 2.5% FG
1	54.63	59.75	63.42	75.03	73.10	64.03
2	60.00	59.81	59.86	66.56	55.75	73.13
3	60.12	61.38	65.65	59.32	63.10	65.82
4	64.63	58.55	62.96	76.55	56.78	71.20
5	57.45	61.55	59.68	65.49	69.23	58.84
Average	59.36	60.21	62.32	68.59	63.59	66.60
Max	64.63	61.55	65.65	76.55	73.10	73.13
Min	54.63	58.55	59.68	59.32	55.75	58.84
SD	3.70	1.25	2.53	7.15	7.59	5.73

ตารางที่ ก-10 สมบัติด้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิবিวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มพอลิবিวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต และฟิล์มพอลิবিวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% G	PBAT/ 0.5% FG
1	14.57	3.63	15.68
2	18.89	2.84	12.57
3	17.05	4.48	15.33
4	16.15	2.34	14.11
5	17.77	3.29	14.70
Average	16.89	3.32	14.48
Max	18.89	4.48	15.68
Min	14.57	2.34	12.57
SD	1.64	0.81	1.23

ตารางที่ ก-11 สมบัติความยืด ผน จุดขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% G	PBAT/ 0.5% FG
1	1051.89	219.30	1087.02
2	1277.67	72.77	1043.65
3	1182.20	349.62	1083.30
4	1062.76	64.00	1017.76
5	1206.13	89.57	933.72
Average	1156.13	159.19	1033.09
Max	1277.67	349.62	1087.02
Min	1051.89	123.62	933.72
SD	96.87	0.81	62.55

ตารางที่ ก-12 มอดูลัสของยังของฟิล์มพอลิবিวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มพอลิবিวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนคอมพอสิต และฟิล์มพอลิবিวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% G	PBAT/ 0.5% FG
1	54.63	53.54	59.75
2	60.00	57.98	59.81
3	60.12	47.65	61.38
4	64.63	43.33	58.55
5	57.45	63.94	61.55
Average	59.36	53.29	60.21
Max	64.63	63.94	61.555
Min	3.70	43.33	58.55
SD	1.64	8.16	1.25

ภาคผนวก ข

สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงฉีกขาด

ตารางที่ ข-1 ความทนแรงฉีกขาดฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% FG	PBAT/ 0.5 FG	PBAT/ 1% FG	PBAT/ 1.5% FG	PBAT/ 2% FG	PBAT/ 2.5% FG
1	1.17	0.78	1.02	1.05	1.05	1.26	0.79
2	1.37	1.22	1.12	0.91	0.98	1.63	0.75
3	0.97	0.68	1.24	1.06	1.11	1.06	0.77
4	1.04	0.81	1.22	0.97	1.07	0.70	0.83
5	1.09	1.09	1.17	0.96	0.98	0.73	0.90
Average	1.13	0.92	1.16	0.99	1.04	1.08	0.81
Max	1.37	1.22	1.24	1.06	1.11	1.63	0.90
Min	0.97	0.68	1.02	0.91	0.98	0.70	0.75
SD	0.15	0.23	0.09	0.06	0.06	0.39	0.06

ตารางที่ ข-2 ความทนแรงฉีกขาดฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตบริสุทธิ์ ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนคอมพอสิตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

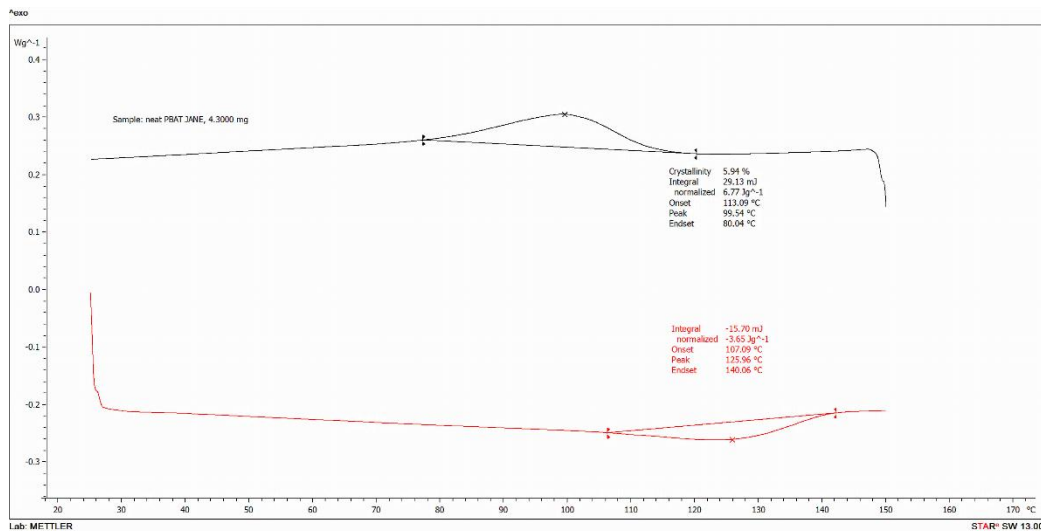
Sample	Neat PBAT	PBAT/ 0.5% FG	PBAT/ 0.5 FG	PBAT/ 1% FG	PBAT/ 1.5% FG	PBAT/ 2% FG	PBAT/ 2.5% FG
1	1.12	2.05	1.34	1.38	1.62	0.64	1.59
2	1.25	1.77	1.33	1.29	1.80	1.28	1.47
3	1.06	1.47	1.40	1.36	1.58	0.88	1.37
4	1.09	1.86	1.38	1.44	1.37	1.17	1.27
5	1.02	1.39	1.38	1.42	1.41	0.88	1.30
Average	1.11	1.71	1.36	1.38	1.56	0.97	1.40
Max	1.25	2.05	1.14	1.44	1.80	1.17	1.59
Min	0.09	1.39	1.33	1.29	1.37	0.64	1.27
SD	0.15	0.27	0.03	0.06	0.17	0.26	0.13

ภาคผนวก ค

DSC Thermogram

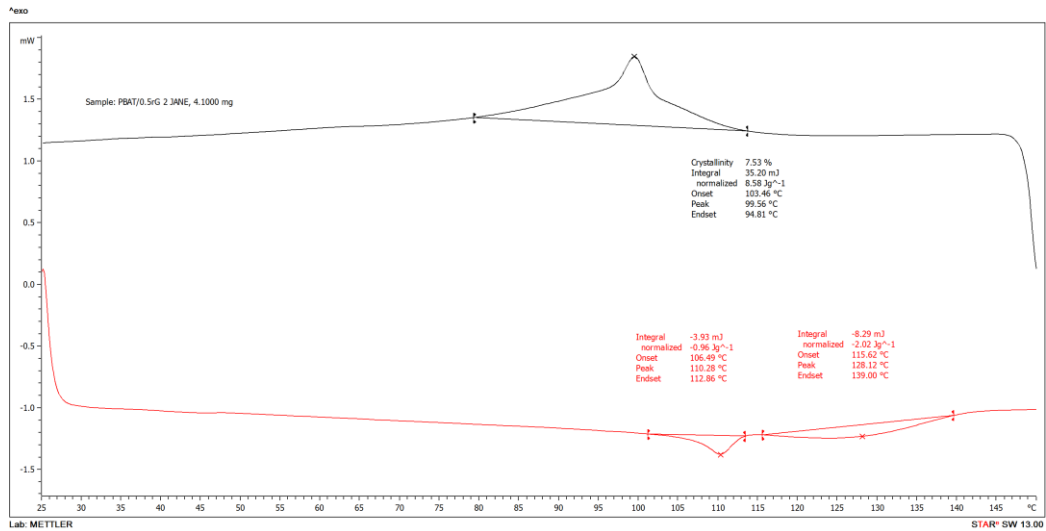
DSC Thermogram (second heat) ของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์
ฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และฟิล์ม
พอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอลิต

1. ฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์



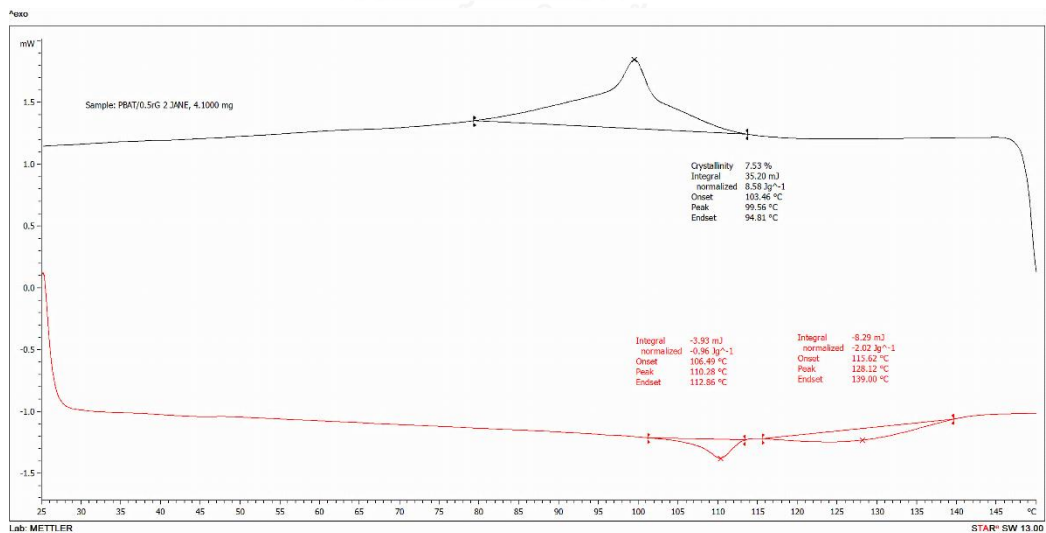
รูปที่ ค-1 เทอร์โมแกรมการเย็นตัวและให้ความร้อนครั้งที่สองของฟิล์มพอลิไบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์

2. ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิตร์้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก



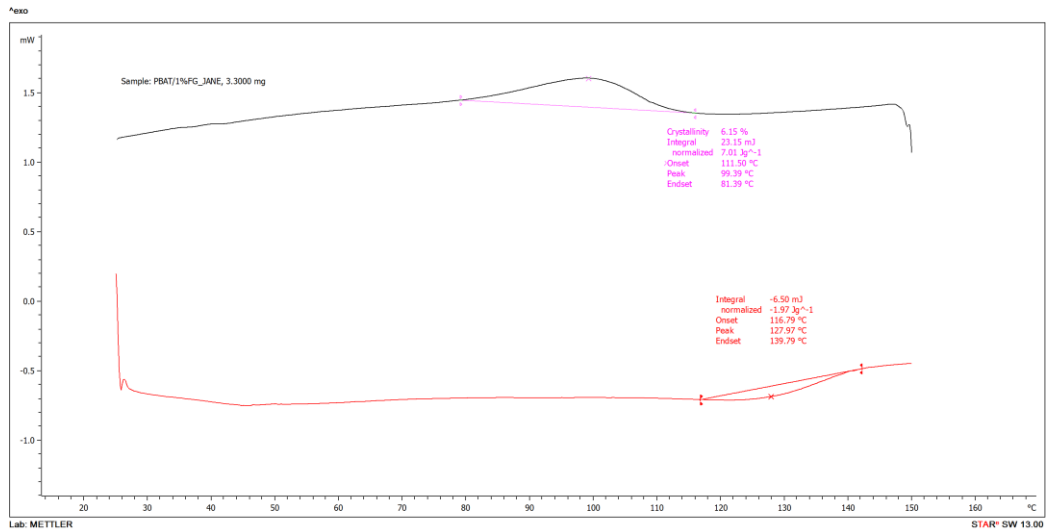
รูปที่ ค-2 เทอร์โมแกรมการเย็นตัวและให้ความร้อนครั้งที่สองของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิตร์้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก

3. ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตร์้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก



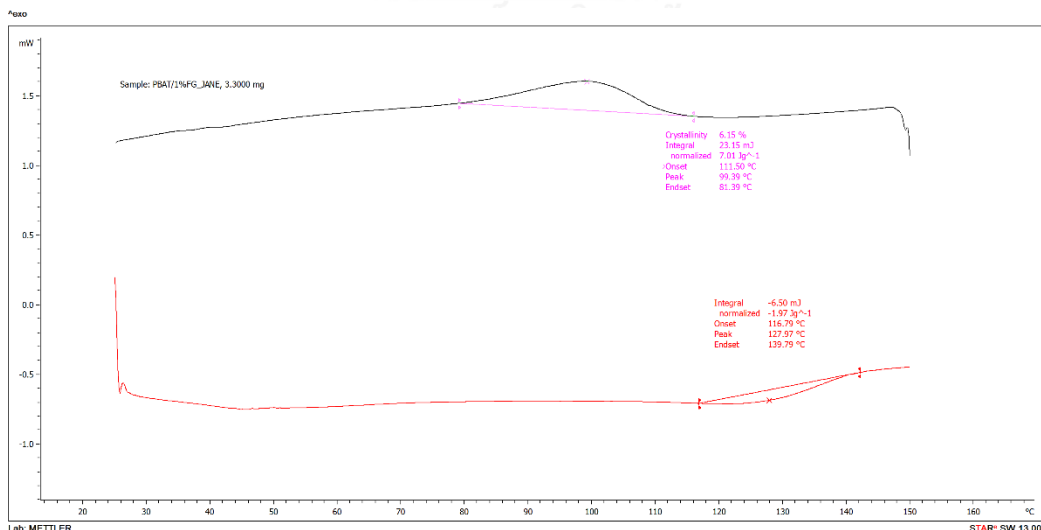
รูปที่ ค-3 เทอร์โมแกรมการเย็นตัวและให้ความร้อนครั้งที่สองของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนดัดแปรคอมพอสิตร์้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก

4. ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรคอมพอสิตร์้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



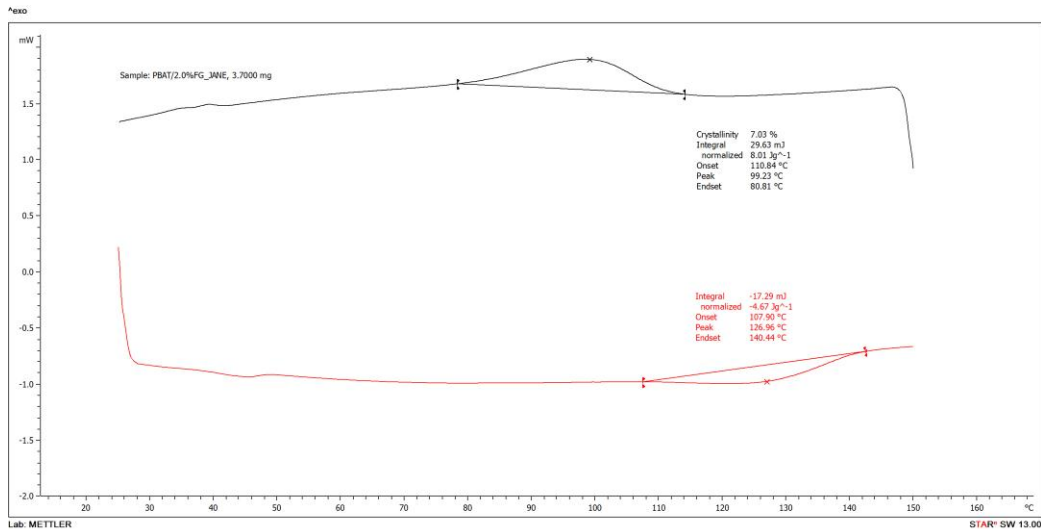
รูปที่ ค-1 เทอร์โมแกรมการเย็นตัวและให้ความร้อนครั้งที่สองของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรคอมพอสิตร์้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

5. ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรคอมพอสิตร์้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก



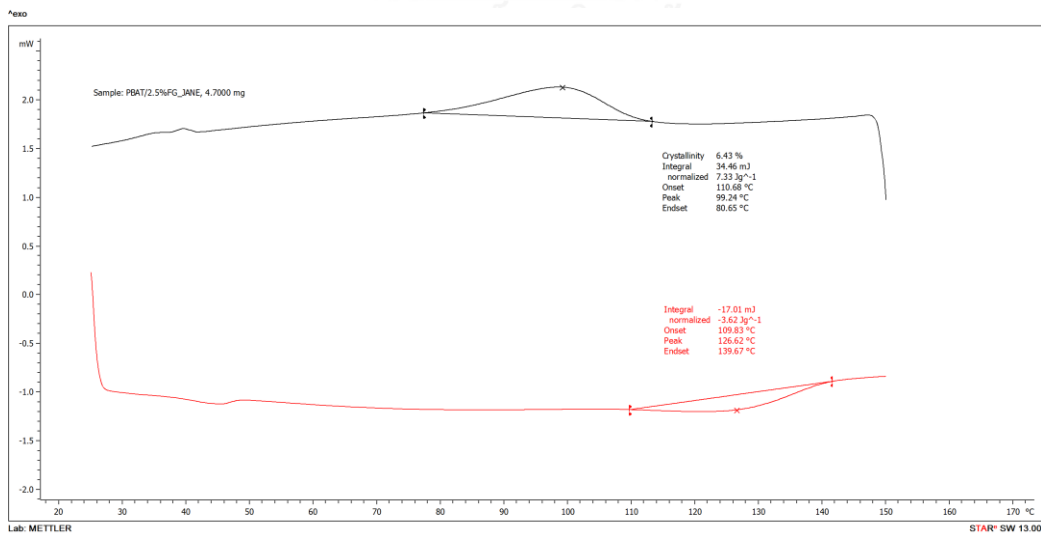
รูปที่ ค-5 เทอร์โมแกรมการเย็นตัวและให้ความร้อนครั้งที่สองของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรคอมพอสิตร์้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก

6. ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอสิตร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ค-6 เทอร์โมแกรมการเย็นตัวและให้ความร้อนครั้งที่สองของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนตัดแปรรวมพอสิตร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

7. ฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิตร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ค-6 เทอร์โมแกรมการเย็นตัวและให้ความร้อนครั้งที่สองของฟิล์มพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต/แกรฟีนคอมพอสิตร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบการนำไฟฟ้า

ตารางที่ ง-1 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มพอลิবিวทีลีนแอดิเพตโคเทรฟแพเลตบริสุทธี และฟิล์มพอลิবিวทีลีนแอดิเพตโคเทรฟแพเลต/แกรฟีนตัดแปรคอมพอสิตร์้อยละ 0.5 โดยน้ำหนั ก ที่ความต่างศักย์ 100 200 และ300 โวลต์

Sample	ค่าความต้านทาน ($\times 10^9 \Omega$)		
	100 V.	200 V	300 V
PBAT	45.45	57.14	47.61
PBAT/0.5%FG	21.73	20.4	13.8
PBAT/1%FG	14.7	14.08	10.41
PBAT/1.5%FG	6.02	5.81	3.58
PBAT/2%FG	7.93	3.91	3.63
PBAT/2.5%FG	6.36	5.69	4.99

ตารางที่ ง-2 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าฟิล์มพอลิবিวทีลีนแอดิเพตโคเทรฟแพเลตบริสุทธี ฟิล์มพอลิবিวทีลีนแอดิเพตโคเทรฟแพเลต/แกรฟีนคอมพอสิตร์้อยละ 0.5 โดยน้ำหนั ก และฟิล์มพอลิবিวทีลีนแอดิเพตโคเทรฟแพเลต/แกรฟีนตัดแปรคอมพอสิตร์้อยละ 0.5 โดยน้ำหนั ก ที่ความต่างศักย์ 100 200 300 400 และ500 โวลต์

Sample	ค่าความต้านทาน ($\times 10^9 \Omega$)				
	100 V.	200 V	300 V	400 V	500 V
PBAT/0.5%FG	21.73	20.4	13.8	10.61	7.5
PBAT/05%G	5.37	3.85	3.31	3.46	3.5

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชีรวัฒน์ เย็นเพชร เกิดวันที่ 10 ธันวาคม 2534

สำเร็จเร็วการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม จากคณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2556 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

มีผลงานการนำเสนองานวิจัยในการประชุม ดังนี้

1. Conference on The 4th Polymer Conference of Thailand, March 20-21, 2014

ณ. Pathumwan Princess Hotel ประเทศไทย

ใน หัว ข้อ Morphology and Mechanical Properties of Poly(butylene succinate) Foam

2. Conference on The 41st Congress on Science and Technology of Thailand (STT41)

ณ มหาวิทยาลัยสุรนารี ประเทศไทย

ใน หัว ข้อ Preparation and Properties of Poly(butylene adipate-co-terephthalate reinforced with Modified Graphene

3, Asian Conference on Engineering and Natural Sciences, February 1-3, 2016,

ณ เมืองฟุกุโอกะ ประเทศญี่ปุ่น

ใน หัว ข้อ Preparation and Properties of Poly(butylene adipate-co-terephthalate reinforced with Modified Graphene