

สมบัติทางกายภาพของรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PHYSICAL PROPERTIES OF REDUCED GRAPHENE OXIDE/POLY(BUTYLENE SUCCINATE)
COMPOSITES

Miss Praewpanit Nuamcharoen



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

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | สมบัติทางกายภาพของรีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต |
| โดย | นางสาวแพรวพณิต น่วมเจริญ |
| สาขาวิชา | ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช |

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรธน์ ประศาสน์สารกิจ)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช)
.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกุลกิจ)
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์)
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

แพรวพณิต น่วมเจริญ : สมบัติทางกายภาพของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต (PHYSICAL PROPERTIES OF REDUCED GRAPHENE OXIDE/POLY(BUTYLENE SUCCINATE) COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ประณัฐ โปธิยะราช, 95 หน้า.

งานวิจัยนี้จุดประสงค์เพื่อศึกษาและปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโดยการใช้นุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นตัวเติม การเตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตใช้เทคนิคการเตรียม 2 ขั้นตอน โดยขั้นแรกคือการเตรียมมาสเตอร์แบดซ์ด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วม และขั้นที่สองคือการเตรียมคอมพอสิตคอมพาวนด์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์ด้วยวิธีทางเคมีที่ดัดแปลงมาจากวิธีของฮัมเมอร์ และเลือกใช้กรดแอลแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ในขั้นตอนปฏิกิริยารีดักชันเพื่อทดแทนการใช้ตัวรีดิวซ์ซึ่งอาจไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหรือเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและเทคนิคเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี พบการลดลงของปริมาณออกซิเจนของหมู่ฟังก์ชันหลังจากผ่านปฏิกิริยารีดักชันด้วยกรดแอลแอสคอร์บิก แสดงว่ากรดแอลแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ที่เหมาะสมจากนั้นเตรียมมาสเตอร์แบดซ์ด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วมโดยมีความเข้มข้นของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และเตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตโดยนำอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมผ่านเครื่องอัดรีดสกรูคู่และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50 และ 2.00 โดยน้ำหนัก แล้วศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า ผลการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาแสดงการกระจายตัวที่ดีของอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ และเมื่อปริมาณอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นสำหรับความสามารถในการต้านทานแรงดึงและค่ายังส์มอดูลัส ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาดและความสามารถในการต้านทานแรงฉีกขาดลดลง เสถียรภาพทางความร้อนไม่เปลี่ยนแปลง และสมบัติการนำไฟฟ้าดีขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพื่อให้ความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ด้านไฟฟ้าสถิต

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5772091023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: GRAPHENE, POLY(BUTYLENE SUCCINATE), ANTISTATIC PACKAGING

PRAEWPANIT NUAMCHAROEN: PHYSICAL PROPERTIES OF REDUCED GRAPHENE OXIDE/POLY(BUTYLENE SUCCINATE) COMPOSITES. ADVISOR: ASSOC. PROF. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., 95 pp.

The main purpose of this research is to improve the physical and electrical properties of poly(butylene succinate) (PBS) using reduced graphene oxide (RGO) as a filler. The PBS/RGO composites was prepared by a two-step processes; in the first step PBS/RGO masterbatch was prepared by the co-precipitation technique, then composite compounds were produced by melt-blending in a twin-screw extruder to obtain composites. Briefly, RGO was prepared from graphite powder, which is chemically exfoliated by modified Hummer's method and reduced by L-ascorbic acid (L-AA) as the reducing agent. Then, RGO was mixed with PBS (10%wt) to prepare masterbatch. Finally, the PBS/RGO composites were prepared by mixing masterbatches with PBS at 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50 and 2.00 wt% of masterbatches by twin screw extrusion. The results of FTIR and XPS clearly show that the L-AA can completely remove oxygen-containing functional groups of graphene oxide. The state of dispersion of the RGO in the PBS matrix was examined by SEM observation revealing the good homogeneous distribution of RGO in PBS matrix. The effects of RGO loading on mechanical properties, thermal properties and electrical conductivity of PBS/RGO composites were also studied. For mechanical properties, the results show that the tensile strength and Young's modulus increased when the loading of RGO increased. However, the elongation at break and tear strength decreased with the increasing amount of RGO. The increase of RGO content in the composites had not shown any significant effect on the thermal properties. Furthermore, the electrical conductivity of PBS/RGO composites was improved by increasing RGO loading which indicated the possibility to use this composite material for antistatic packaging applications.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Student's Signature

Science Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่างๆเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสผู้วิจัยในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งในความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และสนับสนุนในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย ตลอดจนการเอาใจใส่ดูแล และจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์เป็นอย่างดีมาโดยตลอด
2. ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ ที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิถีรัตน์ รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ และรองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
4. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ทำวิจัย
5. รุ่นพี่ เพื่อน บุคลากร ในหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือเอื้อเฟื้อต่างเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสรรค์สร้างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฅ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ฉ |
| 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 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพแบ่งตามแหล่งวัตถุดิบ..... | 3 |
| 2.1.1.1 พลาสติกที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี..... | 3 |
| 2.1.1.2 พลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้..... | 4 |
| 2.1.2 ประเภทของการย่อยสลายได้ของพลาสติกตามกลไกในการย่อยสลาย..... | 4 |
| 2.1.2.1 การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)..... | 5 |
| 2.1.2.2 การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)..... | 5 |
| 2.1.2.3 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)..... | 5 |
| 2.1.2.4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis degradation)..... | 6 |
| 2.1.2.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)..... | 6 |
| 2.1.3 การทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ..... | 7 |

| | |
|--|----|
| 2.2 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต..... | 7 |
| 2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต | 8 |
| 2.2.2 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต | 9 |
| 2.2.3 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต | 10 |
| 2.2.4 การใช้งานของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต..... | 10 |
| 2.3 วัสดุคอมพอสิต (Composite material)..... | 10 |
| 2.3.1 เฟสหลัก | 11 |
| 2.3.2 เฟสกระจาย..... | 11 |
| 2.3.3 ประเภทของวัสดุคอมพอสิตแบ่งตามลักษณะสารเสริมแรง | 12 |
| 2.3.3.1 วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced)..... | 12 |
| 2.3.3.2 วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced)..... | 13 |
| 2.3.3.3 วัสดุคอมพอสิตโครงสร้าง (Structural)..... | 13 |
| 2.4 แกรฟีน (Graphene)..... | 13 |
| 2.4.1 วิธีการสังเคราะห์แกรฟีน | 14 |
| 2.4.1.1 Mechanical exfoliation | 14 |
| 2.4.1.2 Chemical vapour deposition (CVD)..... | 15 |
| 2.4.1.3 Chemical exfoliation | 15 |
| 2.4.2 สมบัติของแกรฟีน..... | 16 |
| 2.4.2.1 การขนส่งอิเล็กตรอน..... | 16 |
| 2.4.2.2 สมบัติเชิงกล..... | 17 |
| 2.4.3 การนำแกรฟีนไปประยุกต์ใช้งาน..... | 17 |
| 2.5 บรรจุภัณฑ์ด้านไฟฟ้าสถิต | 18 |
| 2.5.1 การเกิดไฟฟ้าสถิต..... | 18 |

| | |
|---|----|
| 2.5.2 ความเสียหายของวัสดุเนื่องจากไฟฟ้าสถิต | 19 |
| 2.5.3 ประเภทของถุงต้านไฟฟ้าสถิต..... | 20 |
| 2.5.3.1 Antistatic bags | 20 |
| 2.5.3.2 Dissipative bags | 20 |
| 2.5.3.3 Metallized shielding bags..... | 21 |
| 2.6 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน | 22 |
| 2.6.1 การผสม..... | 22 |
| 2.6.2 การขึ้นรูปและการหล่อเย็น | 22 |
| 2.6.2.1 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเครื่องอัดรีด | 22 |
| 2.6.2.2 กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม..... | 24 |
| 2.6.2.3 กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเครื่องอัดแบบ | 25 |
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 26 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย | 32 |
| 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย | 32 |
| 3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... | 33 |
| 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 34 |
| 3.4 ขั้นตอนการทดลอง | 35 |
| 3.4.1 การสังเคราะห์รีติวซ์แกรไฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์..... | 35 |
| 3.4.1.1 การสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ | 35 |
| 3.4.1.2 การสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์ | 37 |
| 3.4.1.3 การสังเคราะห์รีติวซ์แกรไฟีนออกไซด์จากแกรไฟีนออกไซด์..... | 37 |
| 3.4.2 การเตรียมมาสเตอร์แบตช์ด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วม | 38 |
| 3.4.3 เตรียมรีติวซ์แกรไฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตด้วยด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่..... | 40 |

| | |
|---|----|
| 3.4.4 การขึ้นรูปชิ้นงานรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 42 |
| 3.4.4.1 การขึ้นรูปชิ้นงานเป็นฟิล์มคอมพอสิตด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม | 42 |
| 3.4.4.2 การขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแผ่นคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดแบบ | 43 |
| 3.4.5 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์ แกรฟีนออกไซด์ | 44 |
| 3.4.5.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี | 44 |
| 3.4.5.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี | 44 |
| 3.4.5.3 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา | 45 |
| 3.4.5.4 วิเคราะห์การจัดเรียงตัวของผลึก | 46 |
| 3.4.5.5 วิเคราะห์ขนาดอนุภาค | 46 |
| 3.4.6 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 47 |
| 3.4.6.1 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา | 47 |
| 3.4.6.2 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟิล์มคอมพอสิตภายใต้ความร้อน | 47 |
| 3.4.6.3 ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิต | 47 |
| 3.4.6.4 ทดสอบความทนแรงดึง | 48 |
| 3.4.6.5 ทดสอบความทนแรงฉีกขาด | 49 |
| 3.4.6.5 ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าบริเวณพื้นผิว | 50 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง | 52 |
| 4.1 สมบัติของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ | 52 |
| 4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน | 52 |
| 4.1.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี | 52 |
| 4.1.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี | 53 |
| 4.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา | 54 |

| | |
|---|----|
| 4.1.3 การจัดเรียงตัวของผลึก | 55 |
| 4.1.4 ขนาดอนุภาครีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์ | 57 |
| 4.2 สมบัติของรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 58 |
| 4.2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา..... | 58 |
| 4.2.1.1 แผ่นรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 58 |
| 4.2.1.2 ฟิล์มรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 59 |
| 4.2.2 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 60 |
| 4.2.2.1 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน..... | 60 |
| 4.2.2.2 อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึก | 61 |
| 4.2.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 63 |
| 4.2.3.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)..... | 63 |
| 4.2.3.2 ยังส์มอดูลัส (Young's Modulus)..... | 64 |
| 4.2.3.3 ความยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)..... | 65 |
| 4.2.3.4 ความทนแรงฉีกขาด (Tear strength)..... | 67 |
| 4.2.4 สมบัติทางไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต..... | 70 |
| 4.2.4.1 แผ่นรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 70 |
| 4.2.4.2 ฟิล์มรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 71 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 73 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 73 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 74 |
| รายการอ้างอิง | 75 |
| ภาคผนวก..... | 80 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 95 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น..... | 9 |
| ตารางที่ 3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... | 33 |
| ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 34 |
| ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูในการผสมพอลิเมอร์คอมพอสิต | 41 |
| ตารางที่ 3.4 อุณหภูมิ ความเร็วสกรูและความเร็วลูกกลิ้งในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์คอมพอสิต | 42 |
| ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิ ความดัน และเวลา ในการขึ้นรูปแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต | 43 |
| ตารางที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์..... | 53 |
| ตารางที่ 4.2 XPS สเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์..... | 54 |
| ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต คอมพอสิต..... | 61 |
| ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์ม รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต..... | 61 |
| ตารางที่ 4.5 สมบัติด้านแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์คอมพอสิต | 69 |
| ตารางที่ 4.6 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์คอมพอสิต | 70 |
| ตารางที่ 4.7 สมบัติทางไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต | 71 |

สารบัญรูปภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 แหล่งที่มาของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ | 4 |
| รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต | 7 |
| รูปที่ 2.3 ขั้นตอนแรกของการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต..... | 8 |
| รูปที่ 2.4 ขั้นตอนสองของการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต..... | 8 |
| รูปที่ 2.5 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต | 9 |
| รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงประเภทของวัสดุคอมพอสิต..... | 11 |
| รูปที่ 2.7 การแบ่งวัสดุคอมพอสิตตามลักษณะสารเสริมแรง..... | 12 |
| รูปที่ 2.8 การกระจายตัวของสารเสริมแรงต่างชนิดในวัสดุคอมพอสิต : (a) เสริมแรงด้วยแบบเส้นใย, (b) เสริมแรงแบบอนุภาค และ (c) วัสดุเสริมแรงแบบโครงสร้างลามิना..... | 13 |
| รูปที่ 2.9 การจัดเรียงอะตอมคาร์บอน : (a) แกร์ฟีน และ (b) แกร์ไฟต์..... | 14 |
| รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์แกร์ฟีนด้วยวิธี Mechanical exfoliation | 15 |
| รูปที่ 2.11 การสังเคราะห์แกร์ฟีนด้วยวิธี Chemical exfoliation..... | 16 |
| รูปที่ 2.12 การประยุกต์ใช้งานของแกร์ฟีน..... | 17 |
| รูปที่ 2.13 ปรากฏการณ์ถ่ายเทประจุจากการเสียดสี | 19 |
| รูปที่ 2.14 ความเสียหายของแผงวงจรที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต..... | 19 |
| รูปที่ 2.15 ประเภทของวัสดุในงานด้านไฟฟ้าสถิตแบ่งตามความต้านไฟฟ้าที่พื้นผิว (โอห์ม/เซนติเมตร)..... | 20 |
| รูปที่ 2.16 ประเภทของถุงต้านไฟฟ้าสถิต : (a) Antistatic bags, (b) Dissipative bags และ (c) Metallized shielding bags | 21 |
| รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีด | 23 |
| รูปที่ 2.18 ตัวอย่างการหมุนของสกรู : (a) การหมุนตามกัน (Co-rotating) และ (b) หมุนสวน ทางกัน (Counter-rotating)..... | 24 |
| รูปที่ 2.19 ลักษณะรูปร่างของหัวตาย : (a) รูปตัวที และ (b) รูปไม้แฉวนเสื่อ | 24 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 2.20 เครื่องรีดหล่อฟิล์ม | 25 |
| รูปที่ 2.21 เครื่องอัดแบบ : (a) ตอนเปิดแม่แบบ และ (b) ตอนปิดแม่แบบ | 26 |
| รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ | 36 |
| รูปที่ 3.2 การติดตั้งเครื่องมือเพื่อใช้สังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ | 37 |
| รูปที่ 3.3 แผนผังวิธีการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์ | 37 |
| รูปที่ 3.4 แผนผังวิธีการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์ | 38 |
| รูปที่ 3.5 การสังเคราะห์รีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์ด้วยกรดแอลเอสคอร์บิก | 38 |
| รูปที่ 3.6 การกระจายตัวของอนุภาคในตัวทำละลาย : (a) การกระจายของแกรไฟต์ออกไซด์ในน้ำ, (b) การกระจายของรีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์ในน้ำ และ (c) การกระจายของรีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์ ในคลอโรฟอร์ม | 39 |
| รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมมาสเตอร์แบตช์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและรีดิวซ์แกรไฟต์ ออกไซด์ | 40 |
| รูปที่ 3.8 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28 | 41 |
| รูปที่ 3.9 เครื่องตัดเม็ดพลาสติกของ Labtech Engineering รุ่น LZ-80/VS | 41 |
| รูปที่ 3.10 เครื่องรีดหล่อฟิล์มของ Labtech Engineering รุ่น LCR-300HD CO-EX | 42 |
| รูปที่ 3.11 เครื่องอัดแบบ Labtech Engineering ของ Labtech Engineering รุ่น LP20-b | 43 |
| รูปที่ 3.12 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer ของ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700 | 44 |
| รูปที่ 3.13 เครื่อง X-ray photoelectron spectroscopy ของ Kratos Analytical รุ่น AXIS Ultra DLD | 45 |
| รูปที่ 3.14 เครื่อง Scanning Electron Microscope บริษัท JEOL รุ่น JSM-6400LV | 45 |
| รูปที่ 3.15 เครื่อง X-ray diffraction ของ Bruker รุ่น D8 Advance | 46 |
| รูปที่ 3.16 เครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer ของ Malvern รุ่น Mastersizer 2000 | 46 |
| รูปที่ 3.17 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer ของ Netzsch รุ่น TG 209 F3 Tarsus | 47 |
| รูปที่ 3.18 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry ของ Mettler Toledo รุ่น DSC1/STAR ^c | 48 |
| รูปที่ 3.19 เครื่อง Universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR100K | 49 |

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 3.20 | ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงดึง | 49 |
| รูปที่ 3.21 | ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงฉีกขาด | 50 |
| รูปที่ 3.22 | เครื่อง Picovoltmeter ของ KETHLEY รุ่น 487 | 51 |
| รูปที่ 3.23 | การเตรียมชิ้นงานฟิล์มเพื่อทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้า | 51 |
| รูปที่ 4.1 | FTIR สเปกตรัมของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ | 52 |
| รูปที่ 4.2 | โครงสร้างของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และแกรฟีน | 53 |
| รูปที่ 4.3 | XPS สเปกตรัม : (a) แกรฟีนออกไซด์ และ (b) รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์..... | 54 |
| รูปที่ 4.4 | ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ | 55 |
| รูปที่ 4.5 | กราฟของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ... | 56 |
| รูปที่ 4.6 | ระยะห่างระหว่างระนาบชั้นคาร์บอนของแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์..... | 57 |
| รูปที่ 4.7 | ขนาดอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่กระจายตัวในคลอโรฟอร์ม..... | 57 |
| รูปที่ 4.8 | ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 58 |
| รูปที่ 4.9 | ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต .. | 59 |
| รูปที่ 4.10 | TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 60 |
| รูปที่ 4.11 | ความทนแรงดึงของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 64 |
| รูปที่ 4.12 | ยังสัมมอดูลัสของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 65 |
| รูปที่ 4.13 | ความยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต | 66 |
| รูปที่ 4.14 | ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต | 68 |
| รูปที่ 4.15 | แบบจำลองแรงฉีกขาดที่กระทำต่อฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต : (a) ทิศทางตามแนวเครื่องจักร และ (b) ทิศทางขวางแนวเครื่องจักร หมายถึง ลูกศรแสดง ทิศทางของแรงฉีกขาดที่กระทำต่อฟิล์มคอมพอสิต | 69 |
| รูปที่ 4.16 | กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า | 71 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันจำนวนพลาสติกที่ถูกผลิตขึ้นในแต่ละปีมีปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ ตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพื่อใช้ในการตอบสนองต่อความต้องการการใช้งานของมนุษย์ และพลาสติกถือได้ว่าเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ แต่พลาสติกส่วนใหญ่ที่ถูกนำมาใช้งานด้านนี้ ล้วนมาจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งวัสดุชนิดนี้ยังไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นส่งผลให้หลังจากการใช้งานพลาสติกเหล่านี้กลายเป็นขยะที่ยากต่อการกำจัดจนนำไปสู่ปัญหาสิ่งแวดล้อมต่อไป ด้วยผลกระทบที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้หลายคนตระหนักถึงความสำคัญในการแก้ปัญหา โดยการให้ความสนใจในการหาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหรือสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) ซึ่งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS) ถือเป็นหนึ่งในพลาสติกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพราะสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และสมบัติเด่นเรื่องความยืดหยุ่น (Flexibility) ทำให้เหมาะแก่การนำมาใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ แต่สำหรับผลิตภัณฑ์บางชนิดอาจจะเกิดไฟฟ้าสถิตได้ในระหว่างการขนส่งเนื่องจากขั้วดู ทำให้บรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทนี้จำเป็นต้องสามารถต้านทานไฟฟ้าสถิตได้ ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าให้แก่บรรจุภัณฑ์ โดยประจุส่วนเกินที่อาจจะก่อให้เกิดปัญหาไฟฟ้าสถิตจะถูกกำจัดได้ด้วยการถ่ายเทประจุจากผลิตภัณฑ์มายังบรรจุภัณฑ์ แต่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังขาดสมบัติในการนำไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโดยการเติมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide, RGO) ซึ่งเป็นสารที่มีสมบัติเด่นในเรื่องสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การนำไฟฟ้าเนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมเรียงต่อกันคล้ายรังผึ้งส่งผลให้ประจุไฟฟ้าสามารถวิ่งได้อย่างสะดวก และยังเป็นสารที่เตรียมมาจากวัตถุดิบที่สร้างใหม่ทดแทนได้ จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อม โดยคาดหวังว่าพอลิเมอร์คอมพอลสิตที่เตรียมได้จะมีสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ด้านไฟฟ้าสถิต

โดยเริ่มต้นงานวิจัยนี้จากการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมีและการหาเทคนิคที่เหมาะสมเพื่อให้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์กระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เพื่อใช้ผสมกับพอลิบิวทิลีน

ซ้กซึเนตและซ้กรูบเป็นมาสเตอร์แบตซ์ด้วยวิธีการตตะกอนร่วม (Coagulation) แล้วจึงนำมาสเตอร์แบตซ์มาผสมกับพอลิบิวทิลีนซ้กซึเนตตามสัดส่วนที่ต้องการด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin screw extruder) สุตทำยซ้กรูบเป็นซ้กรงานทดสอบด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์มและเครื่องอัดแบบ และศึกษาผลจากสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ รวมทั้งสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมพอสิตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาเทคนิคที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนซ้กซึเนตกับรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์
- 1.2.2 ศึกษาผลของปริมาณรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ต่อสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงกล และสมบัติกายภาพของคอมพอสิตที่เตรียมซ้กร

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซ้กซึเนตคอมพอสิตที่มีสมบัติเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานด้านวัสดุต้านไฟฟ้าสถิต

บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาวัสดุที่ได้รับความนิยมมากที่สุดชนิดหนึ่งคือ พลาสติก เนื่องจากสมบัติของพลาสติกที่สามารถปรับปรุงให้เหมาะสมกับการใช้งานได้หลากหลาย พลาสติกจึงถูกเลือกให้เป็นวัสดุยอดนิยมในปัจจุบัน แต่หลังจากใช้งานวัสดุเหล่านี้ ขยะที่เกิดจากพลาสติกกลับสร้างปัญหาสิ่งแวดล้อมมากมาย อาทิ น้ำเน่าเสีย มลพิษทางอากาศ สุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เพราะความสามารถในการกำจัดขยะพลาสติกมีไม่มากพอกับปริมาณขยะที่เกิดขึ้น ซึ่งประเทศไทยมีปริมาณขยะพลาสติกสูงกว่า 2.3 ล้านตันต่อปี โดยขยะพลาสติกจำเป็นจะต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานหลายร้อยปี หากนำมาเผาทำลายจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ดังนั้นด้วยปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นจึงเกิดการแก้ไขปัญหานี้ด้วยการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

สำหรับคำนิยามของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพตามมาตรฐานขององค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (International Standards Organization, ISO 472:1998) ได้ให้คำจำกัดความว่า พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น [1]

2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพแบ่งตามแหล่งวัตถุดิบ

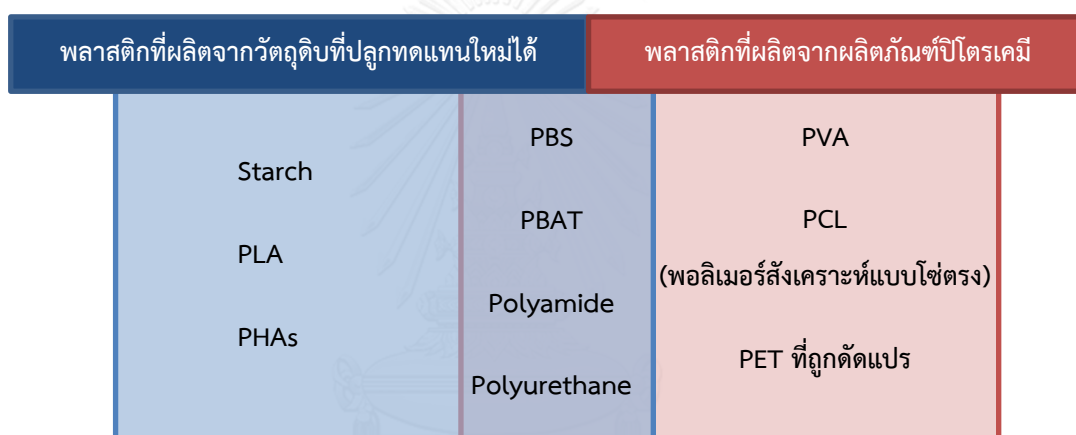
2.1.1.1 พลาสติกที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี

คือ พลาสติกที่เกิดจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม มีวัตถุดิบจากน้ำมันและก๊าซธรรมชาติซึ่งจัดว่าเป็นวัตถุดิบที่ใช้แล้วหมดไปไม่สามารถหาทดแทนใหม่ได้ ตัวอย่างพลาสติกที่ได้จากผลิตภัณฑ์

ปิโตรเคมี เช่น พอลิคาร์โพลีแล็กโตน (polycaprolactone) พอลิบิวทิลีนแอดิเพตเทเรฟทาเลต poly(butylene adipate-co-terephthalate)) พอลิวินิลแอลกอฮอล์ poly(vinyl alcohol) เป็นต้น

2.1.1.2 พลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้

คือ พลาสติกที่มีวัตถุดิบมาจากพืชผลทางการเกษตร จำพวกแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง อ้อย เป็นต้น นอกจากนี้พืชผลทางการเกษตรแล้วยังมีการใช้วัตถุดิบอื่น เช่น เซลลูโลส ลิกโนเซลลูโลสที่อยู่ในพืชนำมาใช้เป็นวัตถุดิบด้วย ตัวอย่างพลาสติกที่ได้จากวัตถุดิบมวลชีวภาพ เช่น พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (poly(hydroxybutyrate), PHB) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แหล่งที่มาของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

หมายเหตุ : PLA คือ Poly(lactic acid) PET คือ Poly(ethylene terephthalate) PBS คือ Poly(Butylene succinate)
 PHAs คือ Polyhydroxyalkanoates PVA คือ Poly(vinyl alcohol)
 PBAT คือ poly(butylene adipate-co- terephthalate)

2.1.2 ประเภของการย่อยสลายได้ของพลาสติกตามกลไกในการย่อยสลาย

การย่อยสลายของพลาสติกคือกระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของพลาสติก เช่น ความแข็งแรง สี รูปร่าง เป็นต้น เนื่องจากการแตกออกของพันธะภายในโครงสร้างจนทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยาวสั้นลงและโครงสร้างของพอลิเมอร์มีขนาดเล็กลงด้วย โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดการย่อยสลายสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย อาทิ แสง ความร้อน สารเคมี จุลินทรีย์ เป็นต้น

การจัดประเภทตามกลไกในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพลาสติก สามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ ได้ดังนี้

2.1.2.1 การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงเกิดขึ้นได้เนื่องจากมีการใส่สารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสง ลงในพลาสติก หรือภายในโครงสร้างของพลาสติกมีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง ซึ่งสามารถแตกพันธะได้เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation, UV) ดังนั้นเมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันเหล่านั้นสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะก่อให้เกิดการแตกออกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งไม่เสถียร อนุมูลอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีของสายโซ่บนตำแหน่งคาร์บอนของพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดออกของสายโซ่ ส่งผลให้โครงสร้างพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กลงเรื่อยๆ ดังนั้นวิธีการย่อยสลายโดยแสงจึงเกิดขึ้นไม่ได้ ถ้าหากขยะพลาสติกถูกจัดเก็บไว้ในที่มีดินจนแสงส่องผ่านไม่ถึง รวมทั้งพลาสติกที่ผ่านการพิมพ์ด้วยหมึกที่หนาмаกบริเวณพื้นผิวเพราะพลาสติกไม่ได้สัมผัสกับรังสีโดยตรง

2.1.2.2 การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)

การย่อยสลายทางกล เกิดจากการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการโดยทั่วไปเพื่อทำให้พลาสติกมีขนาดเล็กลง

2.1.2.3 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ ปฏิกิริยาที่เกิดจากการเติมออกซิเจนลงในโครงสร้างของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ โดยอาศัย ออกซิเจน ความร้อนจากแสงและแรงกลเป็นปัจจัยสำคัญ ปัจจัยเหล่านี้ทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งประเภทช่วยเพิ่มความเสถียร (stabilizing agent) แสงและความร้อนทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและโครงสร้างของพอลิเมอร์มีขนาดเล็กลง ในปัจจุบันการพัฒนาการย่อยสลายประเภทนี้เพื่อให้สารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวได้รวดเร็วมากขึ้น โดยเพิ่มสารเคมีจำพวกเกลือของโลหะทรานสิชันซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการแตกตัว ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

2.1.2.4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮไดรยด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่ง (catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่ง (non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (external catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งที่เป็นเอนไซม์ (enzyme) เช่น depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzyme) เช่น โลหะ แอลคาไลด์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

2.1.2.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายทางชีวภาพ การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่สามารถละลายน้ำได้ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme คือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme คือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ เกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

ปัจจัยที่กำหนดความซ้ำเร็วของการย่อยสลายทางชีวภาพ ได้แก่ น้ำหนักและโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ จุดหลอมเหลว (melting point) ปริมาณความเป็นผลึก (crystallinity) ชนิดและ

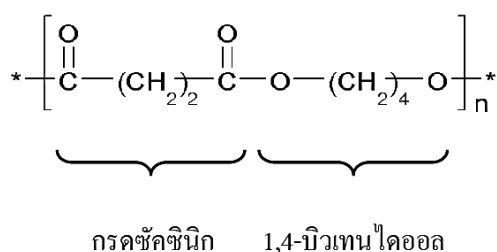
ปริมาณของจุลินทรีย์ อุณหภูมิ ความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณสารอาหารในสภาวะแวดล้อม โดยทั่วไปพบว่าพลาสติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จุดหลอมเหลวต่ำ มีความเป็นระเบียบในการจัดเรียงลำดับในโมเลกุลต่ำ หรือมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นเส้นตรงสามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ดีกว่าพลาสติกที่มีค่าดังกล่าวสูง

2.1.3 การทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพตามมาตรฐาน ASTM 5338 ใช้เวลาในการทดสอบ 6 เดือน โดยกำหนดหลักเกณฑ์ไว้ 2 กรณี พิจารณาจากจำนวนชนิดของพอลิเมอร์ในพลาสติก กรณีแรกพลาสติกที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวต้องเกิดการย่อยสลายอย่างน้อยร้อยละ 60 โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอินทรีย์ สารชีวมวล ภายใต้สภาวะการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน และกรณีสองพอลิเมอร์ผสมต้องเกิดการย่อยสลายร้อยละ 90 และผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับสภาพดิน และไม่เป็นพิษต่อพืชและสัตว์ จึงจะได้รับอนุญาตให้ติดสัญลักษณ์ที่แสดงว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [2]

2.2 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

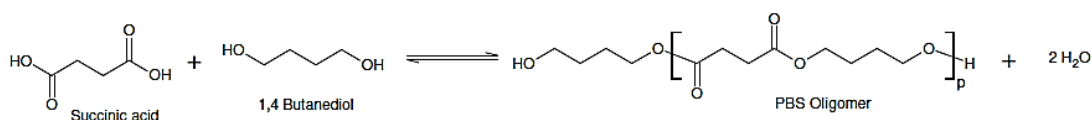
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเอสเทอร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาควบนั่นระหว่างมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ กรดซัคซินิก (succinic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) ดังแสดงรูปที่ 2.2 ในปัจจุบันมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถเตรียมได้จากวัตถุดิบตั้งต้นที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและกระบวนการทางชีวภาพ



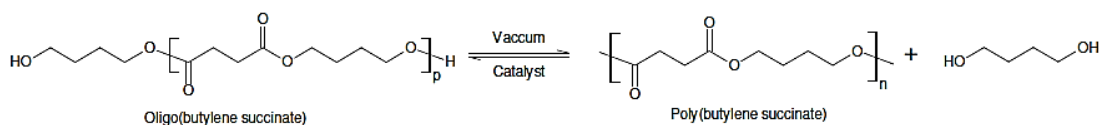
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [3]

2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

การสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเกิดขึ้นผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) ซึ่งเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกคือการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล ได้เป็นโอลิโกเมอร์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นของน้ำ ตามรูปที่ 2.3 ขั้นตอนที่สองคือการเชื่อมต่อกันของโอลิโกเมอร์ภายใต้ความดันเกิดเป็นสายโซ่ยาวจนได้เป็นพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งขั้นตอนนี้มีการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไทเทเนียม (Titanium) หรือเจอร์เมเนียม (Germanium) เพื่อช่วยเร่งการเกิดพอลิเมอร์ให้เร็วยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 2.4

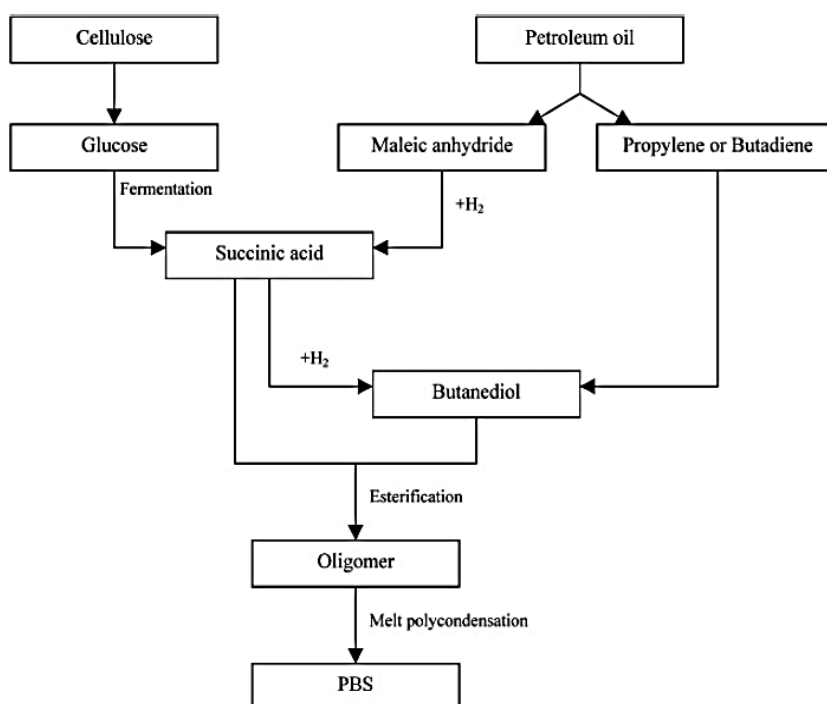


รูปที่ 2.3 ขั้นตอนแรกของการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนสองของการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

ปัจจุบันการเตรียมมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดทำได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีและพืชผลทางการเกษตร โดยมอนอเมอร์ที่เริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีเกิดจากปฏิกิริยาเคมีของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของบิวเทน (Butane) หรือ เบนซีน (Benzene) จนได้เป็นกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล สำหรับมอนอเมอร์ที่เริ่มต้นจากวัตถุดิบทางการเกษตรเกิดจากกระบวนการทางชีวภาพ ด้วยการนำพืชมาหมักโดยใช้จุลินทรีย์ เช่น *Anaerobiospirillum succiniciproducens*, *Mannheimia succiniciproducens* และ *Escherichia coli* ได้เป็นกรดซัคซินิก และสามารถเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิต 1,4-บิวเทนไดออล จากนั้นมอนอเมอร์ทั้งสองคือ กรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล จะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นแล้วเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [4]

2.2.2 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเอสเตอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง มีความหนาแน่น 1.23 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับพอลิแลกติกแอซิด แต่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิแลกติกแอซิดมาก โดยมีอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกที่ 115 องศาเซลเซียส และทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียสโดยไม่เสียสภาพ สำหรับสมบัติเชิงกล ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นกับปริมาณความเป็นผลึก โดยทั่วไปมีค่าความทนแรงดึง (tensile strength) อยู่ในช่วง 30-35 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับพอลิพรอพิลีน อีกทั้งยังสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ทนทานต่อสารเคมี

| Items | PLA (LACEA) | PBS (Bionolle) #1000 | PBSA #3000 | PP MA210 | HDPE | LDPE F082 |
|-----------------------------------|-------------|-------------------------|---------------|-------------|------|--------------|
| Glass transition temperature (°C) | 55 | -32 | -45 | -5 | -120 | -120 |
| Melting point (°C) | 170-180 | 114 | 96 | 163 | 129 | 110 |
| Heat distortion temperature (°C) | 55 | 97 | 69 | 110 | 82 | 49 |
| Tensile strength (Mpa) | 66 | 34 | 19 | 33 | 28 | 10 |
| Elongation at break (%) | 4 | 560 | 807 | 415 | 700 | 300 |
| Izod impact strength (J/m) | 29 | 300 | >400 | 20 | 40 | >400 |
| Degree of crystallinity (%) | | 35-45 | 20-30 | 56 | 69 | 49 |

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น [5]

2.2.3 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน เริ่มต้นจากการตัดสายโซ่พอลิเมอร์ให้มีขนาดเล็กลงด้วยการทำลายพันธะเอสเทอร์ภายในโครงสร้างโดยอาศัยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7 ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลง และขั้นตอนที่สองเป็นขั้นตอนที่เกิดการย่อยโดยอาศัยจุลินทรีย์ เนื่องจากขนาดของพอลิเมอร์มีขนาดเล็กมากพอที่จะสามารถแพร่ผ่านเข้าสู่เซลล์

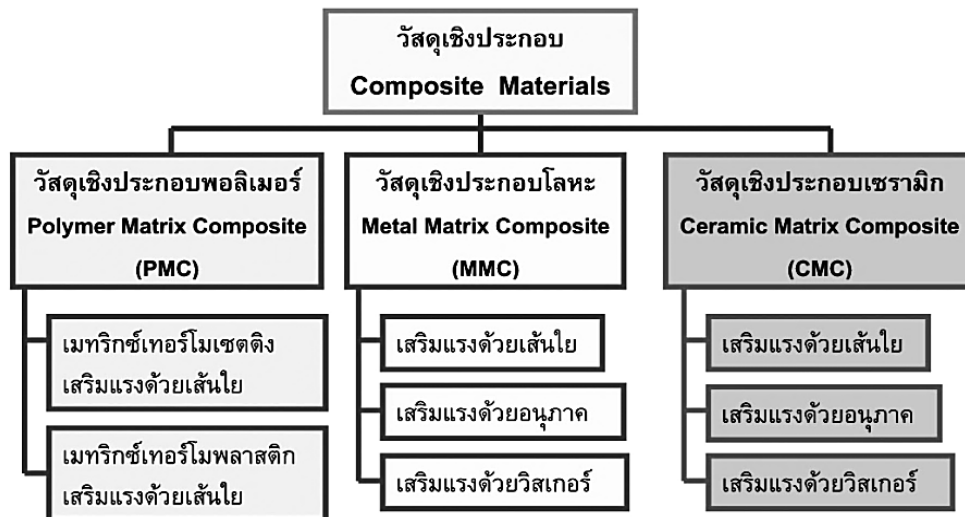
2.2.4 การใช้งานของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

การนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปใช้งานมีชื่อที่รู้จักกันในทางการค้า คือ Bionolle ด้วยสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ดี ทำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถนำไปใช้แทนที่พลาสติกชนิดอื่นๆได้ เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) , พอลิพรอพิลีน (polypropylene, PP) และพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefin) โดยเฉพาะพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) , พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) นอกจากนี้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น หลอดฉีดยา ฟิล์ม บรรจุภัณฑ์อาหาร ขวดน้ำ ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตร ส่วนประกอบและชิ้นส่วนตกแต่งภายในยานยนต์ เป็นต้น

2.3 วัสดุคอมโพสิต (Composite material)

วัสดุคอมโพสิต คือ วัสดุที่ประกอบด้วยของผสมหรือเป็นการรวมกันของสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ทั้งในขนาดระดับไมโคร (micro) หรือ แมคโคร (macro) โดยที่องค์ประกอบทางเคมีของสารแตกต่างกันและต้องไม่ละลายเข้าด้วยกัน หรือไม่รวมเป็นเฟสเดียวกัน วัสดุคอมโพสิตที่ดีต้องมีสมบัติดีกว่าเดิมหรือมีลักษณะที่สำคัญบางประการแตกต่างไปจากเดิม วัสดุคอมโพสิตประกอบจากเฟส 2 ชนิด คือ เฟสหลัก (matrix phase) ซึ่งติดกันและรอบล้อมอีกเฟสไว้ และเฟสที่สอง เรียก เฟสรอง หรือ เฟสกระจาย (dispersed phase) หรือสารเสริมแรง (reinforcement) ประเภทของวัสดุคอมโพสิตสามารถแบ่งตามชนิดของเมทริกซ์เฟสได้ 3 ชนิด โดยประเภทแรกคือ พอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer matrix composites, PMCs) เป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์เฟสเป็นพอลิเมอร์ ซึ่งอาจเป็นพลาสติกหรือยาง และใช้วัสดุเสริมแรง เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นใยโลหะ เป็นต้น ประเภทที่สอง คือ เซรามิกคอมโพสิต (ceramic matrix composites, CMCs) หรือที่เรา รู้จักกันในชื่อคอนกรีตเสริม

เหล็ก ซึ่งวัสดุในกลุ่มนี้เหมาะสมกับงานที่ต้องอยู่ในสภาวะรุนแรงหรืออุณหภูมิสูง และประเภทสุดท้ายคือ เมทัลคอมโพสิต (metal matrix composites, MMCs) เป็นคอมโพสิตที่มีเมทริกซ์เฟสเป็นโลหะ โดยส่วนมากพบการใช้งานของวัสดุประเภทนี้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ โดยมีวัสดุประเภทเซรามิกซ์ เช่น คาร์ไบด์ ไนไตรต์ เป็นสารเสริมแรง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงประเภทของวัสดุคอมโพสิต [6]

2.3.1 เฟสหลัก

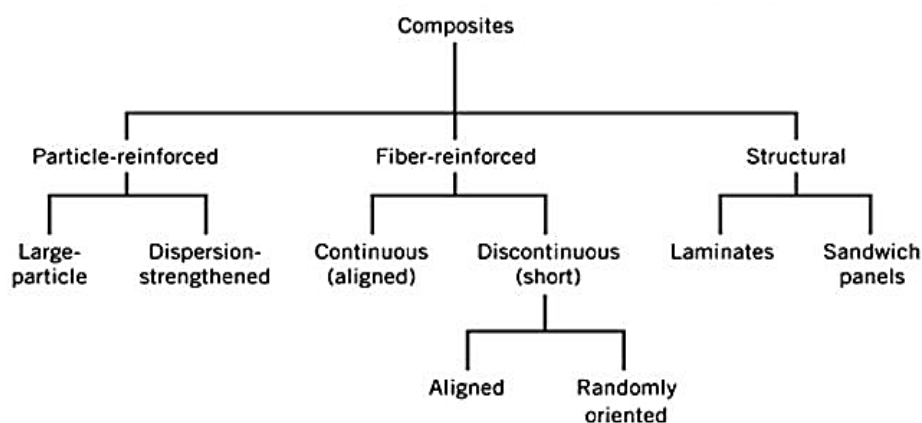
เฟสหลักหรือเมทริกซ์เป็นเนื้อวัสดุที่มีปริมาณมากสุดในองค์ประกอบทั้งหมดของวัสดุคอมโพสิต มีหน้าที่ในการหล่อหุ้มและยึดจับวัสดุเสริมแรงให้ฝังตัวอยู่ได้ โดยสมบัติที่ดีของเมทริกซ์คือ ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเสริมแรงแต่ต้องยอมให้วัสดุเสริมแรงเข้าไปยึดเกาะได้ และไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือระเหยได้ในภายหลัง [7]

2.3.2 เฟสกระจาย

เฟสกระจายหรือสารเสริมแรง เป็นวัสดุที่มีปริมาณน้อยเมื่ออยู่ในวัสดุคอมโพสิต และกระจายตัวได้ในเมทริกซ์ สมบัติที่ดีของวัสดุเสริมแรง ต้องมีสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง ความแกร่ง ความยืดหยุ่น ความเหนียว ที่ดีกว่าวัสดุในเฟสหลัก และต้องมีรูปร่างที่เหมาะสมกับการยึดเกาะวัสดุในเฟสหลักได้ดี ตัวอย่างของวัสดุเสริมแรง เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยซิลิกอน เป็นต้น

2.3.3 ประเภทของวัสดุคอมพอสิตแบ่งตามลักษณะสารเสริมแรง

ประเภทของวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่มใหญ่ คือ วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย และวัสดุคอมพอสิตโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การแบ่งวัสดุคอมพอสิตตามลักษณะสารเสริมแรง [8]

2.3.3.1 วัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced)

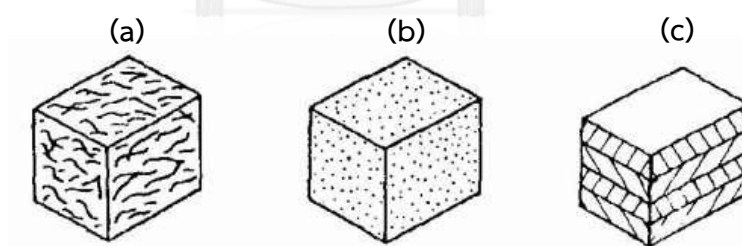
วัสดุคอมพอสิตประเภทนี้สามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อย 2 กลุ่ม คือ วัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ และวัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็กละเอียด ซึ่งทั้งสองชนิดแตกต่างกันในเรื่องกลไกการเสริมแรง โดยการเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ การเพิ่มความแข็งแรงอาศัยเรื่องกลศาสตร์เท่านั้น โดยอนุภาคเสริมแรงเหล่านี้จะเหนี่ยวรั้งหรือยับยั้งการเคลื่อนที่ของเมทริกซ์บริเวณที่อยู่ใกล้อนุภาคนั้น และเมทริกซ์จะส่งผ่านความเค้นเข้าไปสู่ออนุภาคที่รับแรงได้สูง ระดับความสามารถในการเสริมแรงหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับการยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเมทริกซ์กับอนุภาค สำหรับอนุภาคเสริมแรงขนาดเล็กละเอียด ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ถึง 0.1 ไมโครเมตร ความแข็งแรงเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเมทริกซ์กับอนุภาคระดับอะตอม อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้จะกระจายตัวและยับยั้งการเคลื่อนที่ของเมทริกซ์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจึงต้องใช้แรงกระทำสูงขึ้น ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกล เช่น ความต้านแรงดึง ความแข็งแรงที่จุดครากสูงขึ้น

2.3.3.2 วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced)

วัสดุคอมโพสิตประเภทนี้มีรูปร่างของเฟสกระจายเป็นเส้นใย โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงหรือค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นต่อน้ำหนักที่สูงขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวเรียก ความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) และมอดูลัสจำเพาะ (specific modulus)

2.3.3.3 วัสดุคอมโพสิตโครงสร้าง (Structural)

วัสดุคอมโพสิตประเภทโครงสร้าง สมบัติที่ได้นอกจากขึ้นกับองค์ประกอบของวัสดุแล้วยังขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างด้วย ประเภทของวัสดุที่พบบ่อยคือ โครงสร้างลามิना (lamina) และโครงสร้างแผงประกบแซนด์วิช (sandwich panels) โครงสร้างลามิनाจะประกอบด้วยแผ่น 2 มิติที่มาเรียงซ้อนทับกัน ซึ่งแต่ละแผ่นจะถูกให้แรงในทิศตั้งฉากเพื่อให้เกิดความแข็งแรง ดังนั้นวัสดุประเภทนี้จึงมีความแข็งแรงสูงและสามารถรับแรงได้ทุกทิศทุกทาง สำหรับโครงสร้างแผงประกบแบบแซนด์วิช ประกอบด้วยแผ่นนอกที่มีความแข็งแรงและแทรกด้วยชั้นของวัสดุอื่นที่หนาแน่นน้อยกว่า โดยแผ่นหน้าจะรับแรงส่วนใหญ่ในแนวระนาบและรับแรงดัดงอในทิศทางตามขวาง และชั้นแกนทำหน้าที่แยกแผ่นหน้าออกจากกันและต้านทานการเปลี่ยนรูปในทิศตั้งฉากกับระนาบแผ่นหน้า วัสดุที่ใช้เป็นชั้นกลาง เช่น โฟมพอลิเมอร์อย่างสังเคราะห์ เป็นต้น [9] การกระจายตัวของสารเสริมแรงแสดงดังรูปที่ 2.8

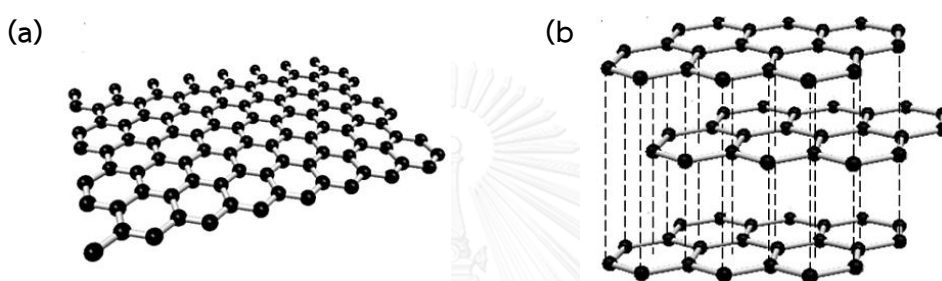


รูปที่ 2.8 การกระจายตัวของสารเสริมแรงต่างชนิดในวัสดุคอมโพสิต : (a) เสริมแรงด้วยแบบเส้นใย, (b) เสริมแรงแบบอนุภาค และ (c) วัสดุเสริมแรงแบบโครงสร้างลามิना

2.4 แกรฟีน (Graphene)

ช่วงสิบปีที่ผ่านมาแกรฟีนถือเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลก ซึ่งแกรฟีนเป็นรูปแบบหนึ่งของผลึกคาร์บอนเช่นเดียวกับ ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) ฟลูเลอรีน (fullerene) และเพชร ซึ่งแตกต่างกันในเรื่องการจัดเรียงอะตอมในโครงสร้าง สำหรับแกรฟีนสามารถ

อธิบายได้ว่า เป็นชั้นหนาเพียงอะตอมเดียวของแร่แกรไฟต์ โดยแกรไฟต์มีการจัดเรียงคาร์บอนเป็นระนาบเดียว ในลักษณะ 2 มิติ (two-dimensional, 2D) และเรียงต่อกันเป็นหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง ดังรูปที่ 2.9 แต่ละชั้นยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงดึงดูดแบบอ่อนๆ ที่เรียกว่า แรงแวน-เดอร์วาลส์ (van der Waals) และมีระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอน 0.142 นาโนเมตร สมบัติของแกรไฟต์นั้นมีความโดดเด่นกว่าวัสดุอื่นๆ โดยเป็นวัสดุที่มีความแข็งที่สุด ซึ่งแข็งกว่าเหล็กกล้าและเพชร แม้จะมีความแข็ง แต่แกรไฟต์กลับมีความยืดหยุ่นและสามารถบิดงอได้ นอกจากนี้ยังมีสมบัติในการนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ โดยสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดงถึง 4 เท่า ซึ่งมากกว่าท่อนาโนคาร์บอนถึง 2 เท่า [10]



รูปที่ 2.9 การจัดเรียงอะตอมคาร์บอน : (a) แกรไฟน์ และ (b) แกรไฟต์ [11]

การสังเคราะห์แกรไฟน์ประสบความสำเร็จเป็นครั้งแรกเมื่อปี 2004 โดยนักวิจัย 2 ท่าน คือ ดร.อังเดร ไกม์ (Dr. Andre Geim) และดร.คอนสแตนติน โนโวเซลอฟ (Dr. Konstantin Novoselov) จากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ โดยทั้งสองท่านได้สังเคราะห์แกรไฟน์จากการนำสก็อตเทปแปะลงบนแท่งแกรไฟต์และลอกออก จะปรากฏชั้นของแกรไฟน์ติดอยู่บนสก็อตเทป และต่อมาวิธีการนี้ได้ถูกเรียกว่าวิธีการสังเคราะห์เชิงกล (micromechanical cleavage หรือ scotch tape method) ซึ่งการค้นพบในครั้งนี้นำไปสู่การได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี 2010

2.4.1 วิธีการสังเคราะห์แกรไฟน์

2.4.1.1 Mechanical exfoliation

การสังเคราะห์โดยวิธีการนี้ ยังสามารถเรียกอีกชื่อได้ว่า scotch tape method ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งเป็นเทคนิคแรกที่ค้นพบแกรไฟน์และเป็นเทคนิคที่ซับซ้อนน้อยที่สุด โดยอาศัยการลอกชั้นแกรไฟต์ออกจากกัน โดยขนาดอนุภาคของแกรไฟน์ที่อยู่ในช่วงไมโครเมตรขึ้นไปและมีปริมาณน้อย ดังนั้นวิธีการนี้จึงเป็นเพียงการสังเคราะห์ในระดับงานวิจัยเพื่อศึกษาสมบัติของแกรไฟน์เท่านั้น



รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธี Mechanical exfoliation [12]

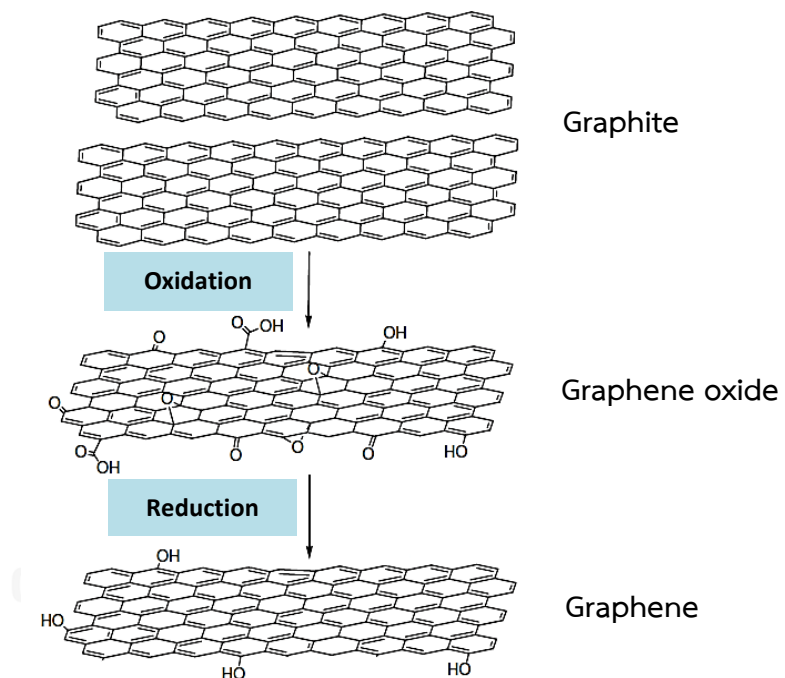
2.4.1.2 Chemical vapour deposition (CVD)

การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยเทคนิคนี้ได้แกรฟีนที่มีคุณภาพและปริมาณมากกว่าวิธีแรก โดยอาศัยหลักการใช้ความร้อนทำให้ไอเคมีแตกตัวและเคลือบลงบนวัสดุอื่น ซึ่งใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 1300 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันสูง เริ่มต้นจากนำสารเคมีที่มีสมบัติระเหย เช่น มีเทน (methane) ทำปฏิกิริยาและซ้อนทับกันแล้วไปเคลือบบนผิวของวัสดุรองรับ (substrate) โดยส่วนใหญ่วัสดุรองรับที่ใช้เป็นวัสดุประเภทเซรามิกหรือโลหะ และโลหะที่นิยมใช้คือ คอปเปอร์ (copper) และ นิกเกิล (nickel) ทั้งนี้การเลือกวัสดุรองรับมาใช้จะคำนึงถึงความเป็นไปได้ที่แกรฟีนจะเข้าไปเกาะติดบนพื้นผิวของสารเหล่านั้น ขั้นตอนดังกล่าวใช้ระบบให้ความร้อนแบบท่อที่มีนิกเกิลเป็นส่วนประกอบ และมีการปล่อยสารไฮโดรคาร์บอนที่แตกตัวได้ในความร้อนเข้าไปในท่อ จากนั้นอะตอมของคาร์บอนจะตกลงสู่พื้นผิวของนิกเกิลและสร้างแผ่นแกรฟีน ดังนั้นวิธีการนี้จึงเหมาะสมสำหรับการผลิตแผ่นฟิล์มแกรฟีนรวมทั้งเหมาะสมในการผลิตระดับอุตสาหกรรมเพราะได้แกรฟีนในปริมาณมาก แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ มีต้นทุนสูง สารเคมีที่ใช้มีความเป็นพิษ การเปลี่ยนวัสดุรองรับหลังการสังเคราะห์แล้วทำได้ยาก และการใช้อุณหภูมิอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติการขยายตัวทางความร้อนของแกรฟีน

2.4.1.3 Chemical exfoliation

การสังเคราะห์แกรฟีนโดยวิธีนี้เป็นที่นิยมมากในระดับอุตสาหกรรม โดยกระบวนการสังเคราะห์ถูกปรับปรุงจากวิธีฮัมเมอร์ (Hummer's method) ซึ่งเป็นวิธีการดั้งเดิมในการสังเคราะห์แกรฟีนจากแกรไฟต์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน สำหรับวิธีในปัจจุบันได้รับการพัฒนาจากวิธีการดั้งเดิมและถูกเรียกว่า "modified Hummer method" เริ่มต้นจากการผลิตแกรไฟต์ออกไซด์ (graphite oxide) ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของแกรไฟต์ภายใต้กรดซัลฟูริก (sulfuric acid) และ

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium permanganate) หลังจากนั้นนำแกรไฟต์ออกไซด์ไปกระจายตัวในน้ำด้วยคลื่นความถี่สูง เพื่อแยกชั้นแกรไฟต์ออกไซด์ออกจากกันเป็นชั้นเดี่ยว ที่เรียกว่าแกรฟีนออกไซด์ (graphene oxide) หลังจากนั้นแกรฟีนออกไซด์ที่กระจายตัวในน้ำจะถูกรีดิวซ์ ซึ่งโดยทั่วไปตัวรีดิวซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมคือไฮดราซีน (hydrazine) และสุดท้ายจะได้แกรฟีน แม้กระบวนการนี้จะนิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรมแต่ก็มีข้อเสีย อาทิ สารเคมีที่ใช้มีความเป็นพิษสูงและราคาแพงเนื่องจากจำเป็นต้องผ่านกระบวนการเพื่อทำให้ได้แกรฟีนบริสุทธิ์ แต่ข้อเสียที่สำคัญมากที่สุดคือค่าการนำไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากการสังเคราะห์ที่ได้มีผลต่อความขรุขระบริเวณพื้นผิว การสังเคราะห์แกรฟีนแสดงด้วยวิธี chemical exfoliation แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธี Chemical exfoliation [13]

2.4.2 สมบัติของแกรฟีน

2.4.2.1 การขนส่งอิเล็กตรอน

แกรฟีนมีโครงสร้างสองมิติและอะตอมคาร์บอนต่อกันในลักษณะรังผึ้งทำให้แกรฟีนจัดเป็นสารกึ่งโลหะ (semi-metal) โดยความสามารถในการขนส่งอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนมากกว่า $15,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่บนแผ่นแกรฟีนแบบเป็นเส้นตรงคล้ายลูกกระสุน เรียกว่า Ballistic transport และแทบจะไม่มีมวลเลย เรียกได้ว่าเป็น massless relativistic particle

และอิเล็กทรอนิกส์ที่วิ่งบนแกรฟีนสามารถทะลุทะลวงชั้นที่มาขวางได้อย่างง่ายดาย โดยไม่มีการสูญเสีย โหมดนิ่ง และมีความคล่องตัวสูงมาก เรียกว่า Klein effect

2.4.2.2 สมบัติเชิงกล

แกรฟีนเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่าแผ่นเหล็กที่มีความหนาเท่ากันถึง 100 เท่า โดยค่าความทนแรงดึงมากกว่า 1 TPa แต่ทั้งนี้สมบัติเชิงกลแปรตามประสิทธิภาพในการสังเคราะห์

2.4.3 การนำแกรฟีนไปประยุกต์ใช้งาน

แกรฟีนมีสมบัติเด่นหลายด้านดังที่กล่าวมาข้างต้นทำให้การประยุกต์ใช้งานของแกรฟีนทำได้หลากหลาย ดังรูปที่ 2.12 เช่น การผลิตตัวกรองจากแกรฟีน โดยแกรฟีนสามารถกรองเกลือออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการอื่น แกรฟีนมีการนำไฟฟ้าสูงและมีความโปร่งใสทางแสงสูง ทำให้มันเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสที่จำเป็นสำหรับการใช้งานเช่น หน้าจอสัมผัส การเคลือบผิววัสดุด้วยแกรฟีนช่วยเพิ่มสมบัติไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) หรือเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ วัสดุนาโนแกรฟีนมีแนวโน้มมากขึ้นสำหรับการใช้งานด้านพลังงาน โดยแกรฟีนช่วยเพิ่มกำลังการผลิตพลังงานและอัตราการจ่ายไฟในการชาร์จแบตเตอรี่ รวมทั้งการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จากแกรฟีนเป็นวิธีการเพื่อลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้น้ำหนักเบาและมีความยืดหยุ่นสูงกว่าเดิม แต่ทั้งนี้การนำแกรฟีนไปใช้ในเชิงการค้ายังมีข้อจำกัดในเรื่องของการเตรียมวัสดุนาโนแกรฟีนให้มีโครงสร้างตามที่ต้องการและการควบคุมการผลิตของวัสดุเหล่านี้ที่จำเป็นต้องมีเทคโนโลยีที่ทันสมัยมารองรับ



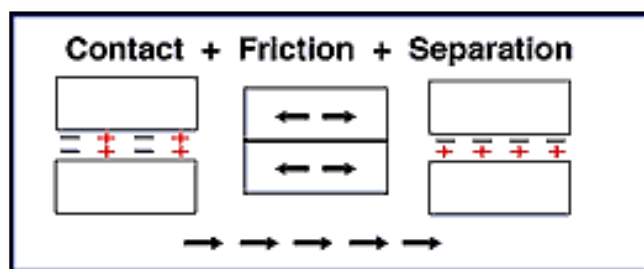
รูปที่ 2.12 การประยุกต์ใช้งานของแกรฟีน [14]

2.5 บรรจุภัณฑ์ด้านไฟฟ้าสถิต

บรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์บางประเภทที่สามารถเกิดไฟฟ้าสถิตได้ง่าย หรือถ้าเกิดแล้วจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผลิตภัณฑ์ จำเป็นต้องมีสมบัติพิเศษเพื่อลดการเกิดไฟฟ้าสถิต ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นสินค้ากลุ่มอิเล็กทรอนิกส์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า electrostatic discharge (ESD) โดยบรรจุภัณฑ์ชนิดนี้จะช่วยลดการประทุของประจุส่วนบนผิวของวัสดุ ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้

2.5.1 การเกิดไฟฟ้าสถิต

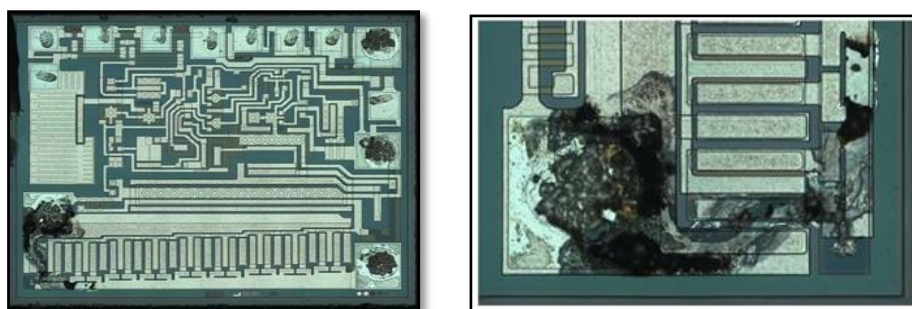
ไฟฟ้าสถิต เป็นปรากฏการณ์ที่ประจุบวกและประจุลบบริเวณผิวของวัสดุมีไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุและเกิดแรงดึงดูดเมื่อวัสดุทั้งสองชิ้นมีประจุต่างชนิดกัน หรือเกิดแรงผลักรันเมื่อวัสดุทั้งสองชิ้นมีประจุชนิดเดียวกัน ไฟฟ้าสถิตสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายๆ ผ่านปรากฏการณ์การถ่ายเทประจุเนื่องจากการเสียดสี (triboelectric) ดังรูปที่ 2.13 โดยเริ่มแรกวัสดุอยู่ในสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้า หรือมีปริมาณประจุบวกและประจุลบบริเวณพื้นผิวเท่ากัน แต่หลังจากที่วัสดุทั้งสองชนิดเกิดการเสียดสี ซึ่งการเสียดสีมีโอกาสเกิดได้ในช่วงระหว่างการเคลื่อนย้าย และขนส่ง ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุจากวัสดุทั้งสองที่เป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็น วัสดุชิ้นหนึ่งมีประจุบวกมากกว่า และอีกชิ้นหนึ่งมีประจุลบมากกว่า ทั้งนี้ภายหลังจากการเสียดสี วัสดุใดจะมีประจุชนิดใดมากกว่านั้น ขึ้นกับชนิดของวัสดุทั้งสอง โดยส่วนใหญ่วัสดุที่เกิดความเสียหายได้จากไฟฟ้าสถิตจะเป็นวัสดุที่ไม่สามารถนำไฟฟ้า หรือไม่สามารถเคลื่อนประจุส่วนเกินได้ เช่น วัสดุฉนวนไฟฟ้า เพราะในสภาพเช่นนี้ประจุส่วนเกินจะไม่สามารถรั่วไหลออกไปเพื่อปรับสภาพพื้นผิวให้เป็นกลางทางไฟฟ้าได้ และตามปกติประจุไฟฟ้าสถิตที่มีจำนวนเท่ากันแต่ต่างชนิดประจุกัน และจะพยายามอยู่ใกล้ซึ่งกันและกันให้มากที่สุด นำไปสู่แรงดึงดูดระหว่างประจุไฟฟ้าบนผิวของวัสดุทั้งสอง ทำให้ประจุไฟฟ้าจากพื้นผิวหนึ่งอาจกระโดดผ่านช่องว่างไปยังอีกพื้นผิวหนึ่งได้เพื่อรักษาสมดุลไฟฟ้า การส่งผ่านประจุอย่างรวดเร็วของกระแสไฟฟ้าเช่นนี้จะเกิดประกายไฟ และประกายไฟที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าสถิตนี้เองที่เป็นต้นเหตุทำให้เกิดอันตรายและความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆได้



รูปที่ 2.13 ปรากฏการณ์ถ่ายเทประจุจากการเสียดสี [15]

2.5.2 ความเสียหายของวัสดุเนื่องจากไฟฟ้าสถิต

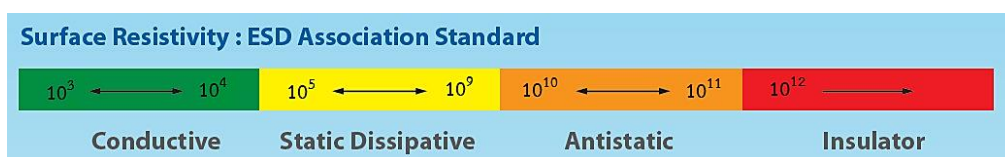
ในปัจจุบันมีนักวิจัยจำนวนมากพยายามพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อย่างต่อเนื่องให้มีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค เช่น การทำให้ชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวกแผงวงจรไฟฟ้า มีขนาดเล็กและบางลงเรื่อยๆ ทั้งนี้เพื่อรองรับการใช้งานที่ต้องการความสะดวกในการพกพาหรือเหมาะสมการใช้งานบางประเภท ซึ่งขนาดเล็กและบางของวัสดุเหล่านี้ เมื่อเกิดความเสียหายจากไฟฟ้าสถิตจะเกิดความเสียหายที่รุนแรงกว่าวัสดุที่มีความหนา มากกว่า เพราะประกายไฟทำให้โลหะบางๆ เหล่านี้หลอมละลายและเปิดวงจร คล้ายกับเหตุการณ์ฟิวส์ขาดเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากเกินไปจนเกิดความร้อน ซึ่งเรียกความเสียหายนี้ว่าปรากฏการณ์ Current crowding คือเมื่อมีกระแสไหลผ่านรอยต่อในแผงวงจรและเกิดความเข้มของกระแสสูงมากเกินไปจนสามารถละลายชิ้นส่วนโลหะและสร้างรอยไหม้บนแผงวงจรในอุปกรณ์นั้นๆ ได้ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความเสียหายของแผงวงจรที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต

2.5.3 ประเภทของถุงต้านไฟฟ้าสถิต

บรรจุภัณฑ์ต้านไฟฟ้าสถิตถูกนำมาใช้งานตั้งแต่กระบวนการเก็บวัตถุดิบ การผลิต รวมไปถึง การขนส่ง โดยสมบัติของบรรจุภัณฑ์ที่ผู้บริโภคร้องการสำหรับสินค้าประเภทอิเล็กทรอนิกส์ คือ สามารถป้องกันความเสียหายจากไฟฟ้าสถิต ปกป้องผลิตภัณฑ์จากความชื้นและสิ่งปนเปื้อนภายนอก และมีความสามารถในการปิดผนึก จากสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น นำไปสู่การพัฒนาบรรจุภัณฑ์เหล่านี้ ให้สอดคล้องกับการใช้งาน ซึ่งปัจจุบันในท้องตลาดสามารถแบ่งประเภทถุงต้านไฟฟ้าสถิตได้เป็น 3 ประเภท โดยคำนึงถึงความสามารถในการนำไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ประเภทของวัสดุในงานต้านไฟฟ้าสถิตแบ่งตามความต้านไฟฟ้าที่พื้นผิว (โอห์ม/เซนติเมตร) [16]

2.5.3.1 Antistatic bags

ถุงต้านไฟฟ้าสถิตชนิดนี้มีช่วงความต้านทานไฟฟ้าระหว่าง 10^{10} ถึง 10^{11} โอห์มต่อเซนติเมตร โดยส่วนใหญ่ผลิตจากพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ที่ผ่านการใส่สารเติมแต่งประเภทต้านทานไฟฟ้าสถิต ส่วนใหญ่ถุงจะมีสีชมพู บางครั้งจึงเรียกถุงนี้ว่า Pink bag หลักการป้องกันไฟฟ้าสถิตของถุงประเภทนี้จะเหมาะกับการเกิดไฟฟ้าสถิตจากการเสียดสีกัน เนื่องจากสารเติมแต่งที่เติมลงไปจะถูกเคลือบอยู่บนผิวภายนอก ดังนั้นเมื่อเกิดการเสียดสีกันแล้วจะไม่เกิดไฟฟ้าสถิต แต่ถ้าไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นจากสาเหตุอื่น ถุงประเภทนี้จะไม่สามารถช่วยได้เนื่องจากไม่สามารถระบายประจุส่วนเกินได้ เนื่องจากค่าความต้านไฟฟ้าสูงเกินไป ดังนั้น การใช้งานจึงเหมาะสมกับวัสดุประเภทไม่ได้รับความเสียหายเมื่อเกิดไฟฟ้าสถิต (non-static sensitive) เช่น กระดาษ ขวด ผงแป้ง เป็นต้น ข้อดีของถุงประเภทนี้คือมีความใส ทำให้สามารถเห็นผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายในถุงได้อย่างชัดเจน และสามารถขึ้นรูปได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นฟิล์ม แผ่น หรือ ถุงกันกระแทก [17]

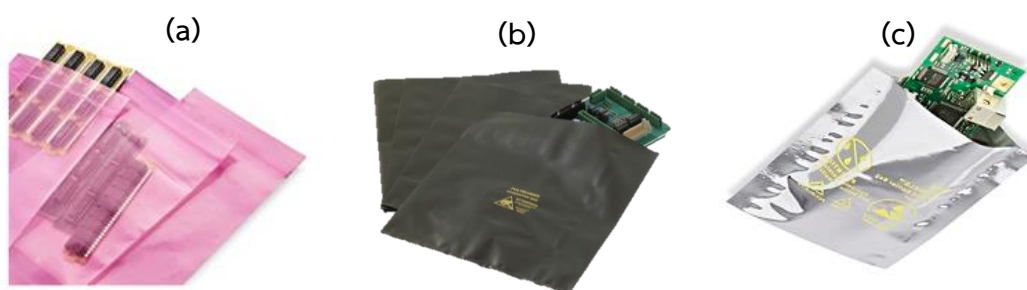
2.5.3.2 Dissipative bags

สำหรับถุงต้านไฟฟ้าสถิตประเภทที่สองมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 10^5 ถึง 10^9 โอห์มต่อเซนติเมตร โดยถุงประเภทนี้มีสีดำสนิทเนื่องจากเติมสารเติมแต่งประเภทคาร์บอนเข้าไปผสมกับเนื้อพลาสติก ซึ่งสารคาร์บอนส่วนใหญ่ที่เติม คือ คาร์บอนแบล็ค (carbon black) เพื่อให้

ถุงพลาสติกเกิดความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ หลักการทำงานของถุงประเภทนี้จะช่วยป้องกันไฟฟ้าสถิตได้โดยอาศัยมนุษย์เป็นตัวกลางส่งถ่ายประจุส่วนเกินจากผิวของถุงไปยังพื้นดิน เพราะถุงประเภทนี้เมื่อเกิดประจุส่วนเกินแล้วไม่สามารถกระจายประจุเหล่านั้นได้ด้วยตัวเอง จำเป็นต้องมีสื่อกลางในการกระจายประจุลงสู่พื้นดินเพื่อปรับสภาพผิวให้เข้าสู่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า ดังนั้นการใช้งานของถุงประเภทนี้มีความหลากหลายมากกว่าถุงประเภทแรก โดยเหมาะสมใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มากกว่า แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถเห็นผลิตภัณฑ์ภายในได้เนื่องจากความทึบแสงของถุง

2.5.3.3 Metallized shielding bags

ถุงต้านไฟฟ้าสถิตชนิดนี้ทำจากพลาสติกที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไอโลหะ ถุงต้านไฟฟ้าสถิตประเภทนี้มีต้นทุนสูง ดังนั้นการใช้งานส่วนใหญ่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีราคาสูง หรือถ้าเกิดความเสียหายกับผลิตภัณฑ์จะเกิดความเสียหายรุนแรง เช่น ชิ้นส่วนอุปกรณ์บนเครื่องบิน โดยหลักการทำงานของถุงประเภทนี้เนื่องจากการเคลือบผิวภายนอกด้วยไอโลหะ ส่งผลให้เมื่อเกิดไฟฟ้าสถิตประจุส่วนเกินเหล่านั้นจะอยู่แค่บริเวณผิวของถุงเท่านั้น และประจุเกิดการเคลื่อนออกอย่างอิสระและกลับเข้าสู่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่จำเป็นต้องเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางนำไฟฟ้าได้อย่างถุงต้านไฟฟ้าสถิตประเภทที่สอง เพราะบริเวณผิวของถุงมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงทำให้ประจุสามารถเคลื่อนที่ได้ทันที ซึ่งเป็นไปตามหลักการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก หรือ Faraday cage ข้อเสียของถุงประเภทนี้ที่มีต้นทุนสูงแล้ว ยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน อาทิ ไม่สามารถพับหรือหักถุงได้และไม่สามารถขึ้นรูปถุงให้มีลักษณะ bubble air หรือถุงกันกระแทกได้ ประเภทถุงต้านไฟฟ้าสถิต แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ประเภทของถุงต้านไฟฟ้าสถิต :

(a) Antistatic bags, (b) Dissipative bags และ (c) Metallized shielding bags [18]

2.6 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตและการขึ้นรูปชิ้นงาน

กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์และการขึ้นรูปชิ้นงานถือเป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยขั้นตอนในกระบวนการนี้สามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การผสม การขึ้นรูป และการหล่อเย็น

2.6.1 การผสม

ขั้นตอนแรกคือการผสมสารเติมแต่งเข้ากับพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ตรงกับความต้องการ โดยในระดับอุตสาหกรรมที่มีปริมาณการผลิตสูงๆ การผสมสารเติมแต่งบางชนิดให้กระจายตัวดีในพอลิเมอร์นั้นทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาในเรื่องการกระจายตัวจะเตรียมคอมพอสิตในรูปของมาสเตอร์แบตช์ (masterbatch) ก่อนการผสมในอัตราส่วนของสารเติมแต่งที่ต้องการ โดยมาสเตอร์แบตช์หมายถึง เม็ดคอมพอสิตระหว่างสารเติมแต่งกับพอลิเมอร์ในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน หรือมีความเข้มข้นของสารเติมแต่งสูงกว่าความเข้มข้นสุดท้ายที่ต้องการ ผ่านกระบวนการผสม เช่น การตกตะกอนร่วม (coagulation) การผสมผ่านเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin screw extruder) จนได้เป็นมาสเตอร์แบตช์ ส่วนของพอลิเมอร์ในมาสเตอร์แบตช์นี้เองที่จะช่วยให้สารเติมแต่งกระจายตัวได้ดีเมื่อผสมกับพอลิเมอร์ในปริมาณสูงๆ ซึ่งปริมาณของมาสเตอร์แบตช์ 25 กิโลกรัมสามารถผสมกับพอลิเมอร์ได้ถึง 1 ตัน [19]

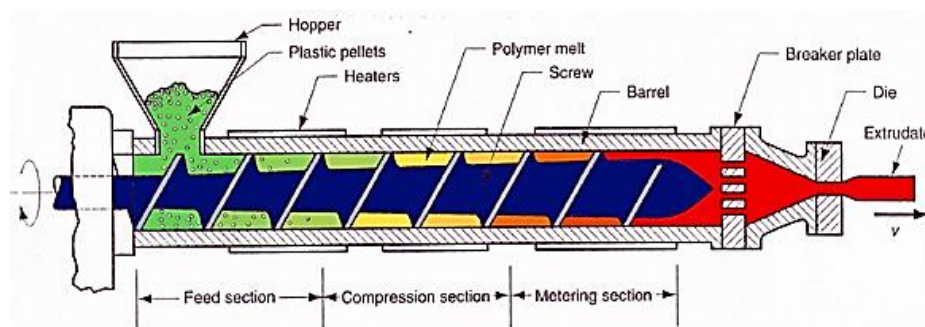
2.6.2 การขึ้นรูปและการหล่อเย็น

วิธีการขึ้นรูปพลาสติกมีด้วยกันหลายวิธี โดยปัจจัยหลักที่จะเลือกวิธีการขึ้นรูปแบบใดพิจารณาจากลักษณะรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แต่สำหรับงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกและแผ่นพลาสติก ดังนั้นเครื่องมือที่เลือกใช้มีดังต่อไปนี้

2.6.2.1 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเครื่องอัดรีด

กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ผ่านเครื่องอัดรีดเหมาะสมกับพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก โดยเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับการผสมระหว่างสารเติมแต่งและพอลิเมอร์ และผ่านการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการหลอมเหลวของพลาสติก และใช้ความดันร่วมเพื่อให้สามารถขนถ่ายพลาสติกในเครื่องจักรได้ด้วยการไหลและรีดออกมาพร้อมทั้งการหล่อเย็นเพื่อให้พลาสติกเกิดการเซตตัว

ในบางกรณีเครื่องอัดรีดต่อเชื่อมเข้ากับเครื่องขึ้นรูปชนิดอื่นด้วย เช่น เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film) เครื่องรีดหล่อฟิล์ม (Chill row) เป็นต้น ส่วนประกอบของเครื่องอัดรีดที่สำคัญ แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีด [20]

จากรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าเครื่องอัดรีดมีลักษณะเป็นท่อยาว เรียกว่า บาร์เรล (Barrel) และสามารถแบ่งโซนภายในได้ทั้งหมด 3 โซน คือ

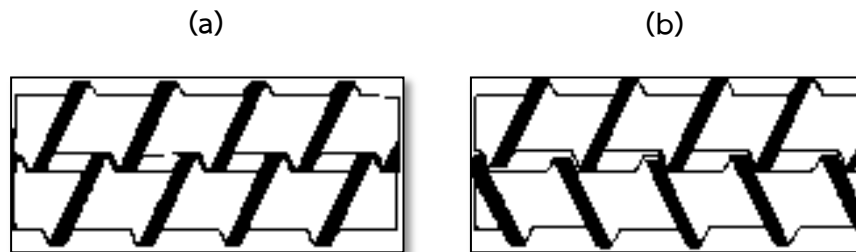
Feed section เป็นบริเวณปลายด้านช่องใส่พลาสติก เกลียวสกรูในโซนนี้จะมีความลึกมากที่สุดเพื่อใช้ในการกักเก็บเม็ดพลาสติกที่ถูกป้อนเข้ามาผ่านเครื่องป้อน (Hopper) สกรูจะพยายามหมุนพาพลาสติกไปด้านหน้าเพื่อเข้าสู่โซนถัดไปพร้อมทั้งเม็ดพลาสติกในส่วนนี้ค่อยๆ หลอมโดยใช้ความร้อนที่ให้จากภายนอกและความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทาน

Compression section เป็นบริเวณกลางบาร์เรล ปริมาณช่องระหว่างเกลียวสกรูจะค่อยๆ ลดลง ทำให้เกิดแรงบีบอัดแก่พลาสติกหลอม การเคลื่อนที่ของสกรูส่งผลให้พลาสติกผสมเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดแรงเฉือนซึ่งส่งผลให้เกิดความร้อนจากการเสียดสีมากขึ้นและทำให้พลาสติกหลอมเหลวสมบูรณ์

Metering section เป็นบริเวณปลายบาร์เรล พลาสติกหลอมจะถูกผสมให้เข้ากันดียิ่งขึ้นและส่งมาที่หัวตาย ปริมาณของช่องระหว่างเกลียวสกรูจะน้อยที่สุดเพื่อให้เกิดแรงดันสูง ดันพลาสติกหลอมออกมาที่หัวตาย ทั้งนี้รูปทรงของหัวตายเป็นตัวกำหนดลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้

ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องอัดรีดคือสกรู โดยสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว และเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ซึ่งส่วนใหญ่เครื่องอัดรีดสกรูคู่นิยมมากกว่าเนื่องจากเกิดแรงเฉือนน้อยกว่าสกรูเดี่ยว จึงเหมาะสำหรับพลาสติกที่ทนต่ออุณหภูมิสูงไม่ได้ และยังช่วยผสมสารเติม

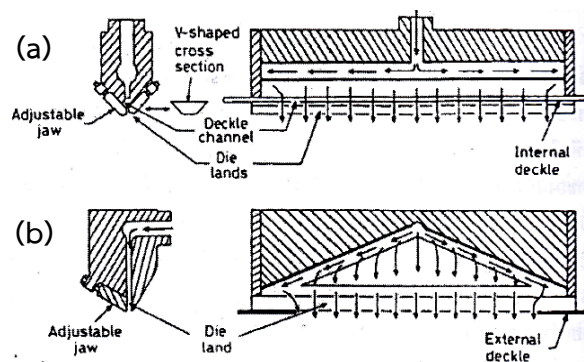
แต่ทำให้เข้ากับพอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น เครื่องอัดรีดสกรูคู่สามารถจำแนกตามทิศทางการหมุนของสกรูเป็น 2 ทิศทาง คือ การหมุนตามกัน (co-rotating) และหมุนสวนทางกัน (counter-rotating) ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างการหมุนของสกรู : (a) การหมุนตามกัน (Co-rotating) และ (b) หมุนสวนทางกัน (Counter-rotating) [21]

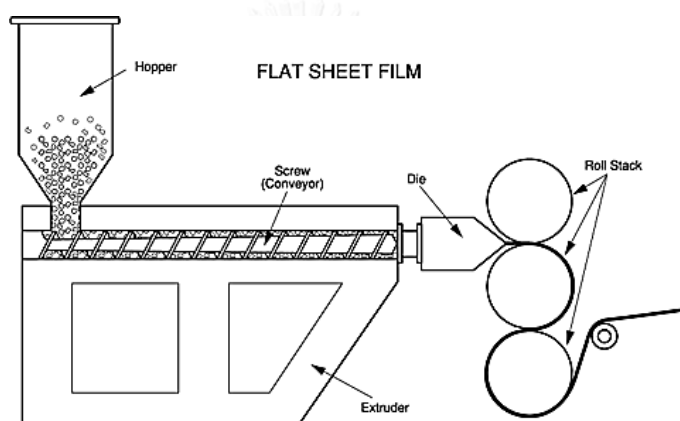
2.6.2.2 กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม

เครื่องรีดหล่อฟิล์มทำหน้าที่ในการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกและแผ่นพลาสติก ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของเครื่องอัดรีดทำหน้าที่ในการหลอมพลาสติกและส่วนที่สองคือส่วนของหัวดายที่มีหน้ากว้างและมีลักษณะเป็นรูปตัวทีหรือรูปไม้แฉวนเสื่อ ดังรูปที่ 2.19 โดยเมื่อพลาสติกหลอมผ่านหัวดายออกมาแล้วจะถูกทำให้เย็นลงจนอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ด้วยการทำให้เย็นผ่านอ่างน้ำหรือลูกกลิ้งหล่อเย็น (chill roller) ลูกกลิ้งดังกล่าวเป็นลูกกลิ้งที่มีผนังสองชั้นโดยมีน้ำหล่อเย็นอยู่ภายใน หลังจากนั้นพลาสติกถูกดึงด้วยอัตราเร็วสูงและม้วนด้วยลูกกลิ้งขนส่ง (carrier roll) และลูกกลิ้งหล่อเย็นต่อไป โดยการเคลื่อนที่ผ่านลูกกลิ้งด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันมีผลต่อความหนาของแผ่นฟิล์มที่ได้ โดยถ้าดึงด้วยอัตราเร็วลูกกลิ้งสูงจะทำให้ได้ฟิล์มบางกว่าการดึงด้วยอัตราเร็วลูกกลิ้งช้า



รูปที่ 2.19 ลักษณะรูปร่างของหัวดาย : (a) รูปตัวที และ (b) รูปไม้แฉวนเสื่อ

ในการอัดรีดแผ่นฟิล์มโดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการนี้มีการดึงพลาสติกหลังจากผ่านหัวตายไปตามลูกกลิ้ง ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวสูงในทิศทางของการดึงหรือทิศทางไหลของเครื่องจักร (machine direction) ทำให้พลาสติกมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความเหนียวในทิศทางของเครื่องมากกว่าทิศทางตามแนวขวาง (transverse direction) แต่การจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถทำได้ทั้งทิศทางตามแนวเครื่องจักรและทิศทางตามแนวขวางด้วยเครื่องซิง (tender) หลักการของการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลทั้งสองทิศทาง (biaxial oriented) คือเมื่อพลาสติกไหลออกจากหัวตายแล้ว จะถูกซิงด้วยตะขอบริเวณด้านข้างของแผ่นฟิล์ม ทำให้เกิดแรงดึงในแนวขวาง ดังนั้นพลาสติกจะถูกดึงทั้งสองทิศทาง ส่งผลทำให้พลาสติกมีความทนแรงดึงที่ดีขึ้น



รูปที่ 2.20 เครื่องรีดหล่อฟิล์ม [22]

2.6.2.3 กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเครื่องอัดแบบ

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ในเชิงอุตสาหกรรมที่เก่าแก่ที่สุด เครื่องอัดแบบแสดงดังรูปที่ 2.21 ก่อนการขึ้นรูปจะต้องเตรียมพอลิเมอร์ที่ผสมสารเติมแต่งหรือที่เรียกว่าคอมพาวด์ (Compounds) ให้เรียบร้อยก่อนการขึ้นรูป เพราะกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จะไม่มีการผสมด้วยเครื่องอัดรีดเหมือนกับสองวิธีแรก หลักการของเครื่องอัดแบบ มีดังนี้

2.6.2.3.1 เริ่มต้นจากนำแม่แบบวางระหว่างแผ่นเหล็กอัด (platen) ให้ความร้อนสองแผ่นซึ่งประกบกันอยู่ โดยใช้แรงอัดด้วยระบบไฮดรอลิก (hydraulic)

2.6.2.3.2 วางคอมพาวด์ในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปลงในแม่แบบประกบแม่แบบทั้งสองเข้าด้วยกัน

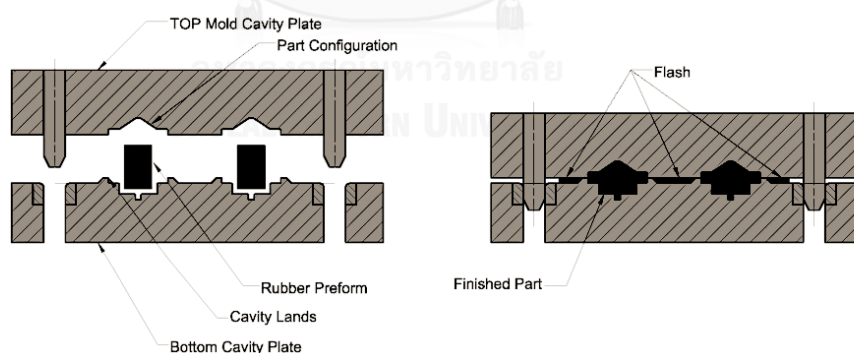
2.6.2.3.3 จากนั้นวางแม่แบบลงบนแผ่นเหล็กอัดให้ความร้อนอัดแม่แบบเข้าหากันด้วยความดันสูงจนกระทั่งประกบกันสนิทโดยใช้ระบบไฮดรอลิก เพื่อป้องกันการรั่วไหลของพอลิเมอร์ระหว่างรอยต่อของแม่แบบ

2.6.2.3.4 ให้ความร้อนกับคอมพาวด์จนกระทั่งอ่อนตัวและสามารถไหลตามรูปร่างของโพรงภายในแม่แบบ เมื่ออุณหภูมิภายในแบบสูงเพียงพอ

2.6.2.3.5 หลังจากนั้นทำการหล่อเย็นเพื่อให้พลาสติกเกิดการเซตตัว

2.6.2.3.6 คลายแรงดันการอัดแม่แบบลงเพื่อเปิดแม่แบบออก จากนั้นนำเอาชิ้นผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากแม่แบบ

จากการที่วิธีการรูปด้วยเครื่องอัดแบบเป็นกระบวนการที่มีการจัดเรียงโมเลกุลพอลิเมอร์ในทิศทางเดียวกันต่ำ ส่งผลให้เกิดข้อดีแก่ผลิตภัณฑ์ อาทิ สารเติมแต่งประเภทเส้นใยสามารถกระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์ได้ดี ไม่มีผลการรบกวนจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล ผลิตภัณฑ์มีความเค้นตกค้างต่ำ สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยังเหมือนเดิมเนื่องจากการไหลภายใต้แรงเฉือนค่อนข้างต่ำ และเครื่องมือมีต้นทุนต่ำเนื่องจากอาศัยเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน



รูปที่ 2.21 เครื่องอัดแบบ : (a) ตอนเปิดแม่แบบ และ (b) ตอนปิดแม่แบบ [23]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ต้นเหตุหลักสำคัญที่นำไปสู่ปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันนั้นเกิดขึ้นจากขยะพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หรือต้องใช้เวลาอันนับล้านปี ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวที่ได้รับความนิยมคือการใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยพลาสติกชนิดนี้ได้รับความสนใจ

จากนักวิจัยทั่วโลกเพื่อพัฒนาให้เหมาะกับการใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา โดยทั่วไปสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดี และยังมีสมบัติเด่นในเรื่องของความยืดหยุ่นสูง ซึ่งมีความใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีน ดังนั้น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจึงถูกนำไปประยุกต์ในงานด้านบรรจุภัณฑ์ แต่บรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์บางชนิดจำพวกสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ ต้องสามารถนำไฟฟ้าได้เพื่อลดความเสียหายแก่ผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากการเกิดความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวซึ่งนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าสถิตแต่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าให้แก่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโดยผสมกับวัสดุอื่นที่นำไฟฟ้าได้ เช่น คาร์บอนแบล็ค แกรฟีน เป็นต้น

สำหรับการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ด้วยวิธีทางเคมี ถูกค้นพบโดย William S. Hummers และ Richard E. Offman [24] นักวิจัยทั้งสองได้ทำการศึกษาวิธีการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ ซึ่งปรับปรุงจากวิธีการของ Brodie แต่มีข้อดีกว่าในเรื่องการใช้เวลาทำปฏิกิริยาสั้นเพียง 2 ชั่วโมง รวมทั้งมีความปลอดภัยในระหว่างการสังเคราะห์สูงกว่า เพราะการสังเคราะห์เกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิต่ำและสารเคมีที่ใช้มีความเป็นพิษน้อยกว่า โดยสารเคมีที่ถูกใช้ในการสังเคราะห์ ได้แก่ กรดซัลฟูริก โซเดียมไนเตรต (sodium nitrate) และ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium permanganate) ซึ่งจากผลการทดลองประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากแกรไฟต์โดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน สามารถวัดได้จากสัดส่วนระหว่างอะตอมคาร์บอนและอะตอมออกซิเจนในโครงสร้าง ซึ่งพบว่าสัดส่วนของคาร์บอนต่อออกซิเจนเพิ่มขึ้นเป็น 2.1 ถึง 2.9 นอกจากนี้ นักวิจัยทั้งสองยังได้ให้ข้อสังเกตอีกว่า ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ยังสามารถสังเกตได้จากลักษณะสีที่เปลี่ยนไปของสาร โดยเมื่อนำแกรไฟต์ออกไซด์มากระจายตัวในน้ำพบว่า สารละลายมีสีเหลืองเข้มจะมีปริมาณของอะตอมออกซิเจนสูงกว่าสารละลายที่มีสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ ซึ่งต่อมากการสังเคราะห์วิธีการนี้กลายเป็นวิธีการพื้นฐานสำหรับการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี และถูกเรียกว่า Hummer method

จากงานวิจัยของ Sasha Stankovich และคณะ [25] ได้ศึกษาวิธีการสังเคราะห์แกรฟีนจากแกรไฟต์ออกไซด์โดยผ่านปฏิกิริยารีดักชัน โดยเริ่มจากการนำแกรไฟต์ออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธี Hummer method มากระจายตัวในน้ำด้วยคลื่นความถี่สูงเพื่อให้ได้แกรฟีนออกไซด์

หลังจากนั้นกำจัดสารประกอบออกไซด์ที่อยู่ในโครงสร้างด้วยปฏิกิริยารีดักชัน โดยมีไฮดราซีนไฮเดรต (hydrazine hydrate) เป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) สูดทำยเกิดตะกอนของแกรฟีน หลังจากนั้นนำแกรฟีนที่ได้มาวิเคราะห์ผ่านเทคนิคต่างๆ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าระหว่างการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน แกรฟีนเกิดการตกตะกอน ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ภายในโครงสร้างเริ่มลดลงหรือโมเลกุลมีความไม่มีขั้วมากขึ้น ทำให้โมเลกุลไม่สามารถกระจายในน้ำได้ เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณระหว่างอะตอมคาร์บอนและอะตอมออกซิเจน ผ่านวิธีการไทเทรต (Karl-Fisher titration) โดยดูจากความมีขั้วหรือไม่มีขั้วของสารผ่านปริมาณของน้ำที่อยู่ในสาร พบว่าแกรฟีนออกไซด์มีปริมาณน้ำที่ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ในขณะที่แกรฟีนมีปริมาณน้ำที่ร้อยละ 2.8 โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณน้ำที่ลดลงสามารถอ้างได้ว่าภายในโครงสร้างของแกรฟีนที่ถูกกำจัดสารประกอบออกไซด์ออกไปเกือบหมดด้วยปฏิกิริยารีดักชัน และนอกจากนี้การวิเคราะห์แกรฟีนผ่านเครื่อง X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) พบว่าสเปกตรัมที่แสดงถึงการสร้างพันธะกับออกซิเจน เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) มีความเข้มของกราฟ (intensity) ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแกรไฟต์ออกไซด์

แม้ว่าไฮดราซีนไฮเดรตมีประสิทธิภาพเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีแต่ไม่เหมาะกับการใช้ในปริมาณมากหรือในระดับอุตสาหกรรมเพราะมีความเป็นพิษสูง ไม่ปลอดภัยในระหว่างการใช้งาน รวมทั้งยังสามารถเกิดระเบิดได้ถ้าหากใช้งานในสภาวะที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นจากงานวิจัยของ M.J. Fernandez-Merino และคณะ [26] ได้ศึกษาตัวรีดิวซ์ชนิดต่างๆ ที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับไฮดราซีนไฮเดรตแต่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยตัวรีดิวซ์ที่ใช้ ได้แก่ แอมโมเนีย (ammonia) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide) โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (sodium borohydride) ไพโรแกลลอน (pyrogallol) และ วิตามินซี (vitamin C) เริ่มเตรียมสารละลายแกรฟีนออกไซด์ในน้ำความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรและเติมตัวรีดิวซ์ต่างชนิดกันดังที่กล่าวมาข้างต้น หลังจากนั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันภายใต้อุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส ในสภาวะเบสอ่อน โดยกำหนดเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวรีดิวซ์แตกต่างกัน ซึ่งจากการวิเคราะห์แกรฟีนด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) พบว่าสเปกตรัมของสารประกอบออกไซด์ของแกรฟีนที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยวิตามินซีมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับแกรฟีนออกไซด์และตัวรีดิวซ์อื่น และเส้นกราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายกับแกรฟีนที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยไฮดราซีนไฮเดรต แสดงว่าประสิทธิภาพ

ในการกำจัดหมู่ฟังก์ชันออกไซด์ในโครงสร้างของวิตามินซีมีค่าใกล้เคียงกับไฮดรอกซีไฮเดรต นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าที่ได้ปรากฏว่าค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดของแกรฟีนที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยวิตามินซีและไฮดรอกซีไฮเดรต อยู่ที่ 7700 และ 9960 S/m ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าของแกรฟีนด้วยตัวรีดิวซ์ แอมโมเนีย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ไพโรแกลลอน อยู่ที่ 0.32, 0.17, 1.55 และ 488 S/m ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากแกรฟีนที่มีวิตามินซีเป็นตัวรีดิวซ์อย่างชัดเจน ดังนั้นจากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าวิตามินซีเป็นตัวรีดิวซ์ที่เหมาะสมโดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดหมู่ฟังก์ชันออกไซด์ได้ดีใกล้เคียงกับไฮดรอกซีไฮเดรตแต่มีความปลอดภัยสูงจึงเหมาะกับการใช้ในระดับอุตสาหกรรม

ในปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยวิธีการใส่สารเสริมแรงประเภทคาร์บอนก็เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ได้รับความนิยม จากงานวิจัยของ Fathilah Binti Ali และ Raja Mohan [27] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติการนำไฟฟ้า ของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นผ่านการเติมท่อนาโนคาร์บอน และเตรียมขึ้นงานด้วยเทคนิคการผสมแบบหลอมเหลว (melt blending) โดยกำหนดความแตกต่างของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนในคอมพอสิต ดังนี้ 0.1, 0.5, 1, 3, และ 5 phr และขึ้นงานถูกเตรียมในลักษณะแผ่นซีทที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร จากผลวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพบว่า ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 0.5 โดยน้ำหนัก ค่ายังส์มอดูลัส (Young's modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นที่ไม่มีการเติมสารเสริมแรง และเมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนมากกว่า 1 phr ปรากฏว่าค่ายังส์มอดูลัสลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการเกาะที่ท่อนาโนคาร์บอนมีค่า aspect ration ที่สูงทำให้เมื่อเติมในปริมาณมากเกิดการจับกลุ่มกันเองมากกว่าจับกับพอลิเมอร์ ส่งผลให้การกระจายแรงทำได้ไม่ดี ดังนั้นสมบัติเชิงกลจึงมีค่าต่ำลง สำหรับผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนพบว่า อุณหภูมิในการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารเสริมแรงมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้แก่พอลิเมอร์ ส่วนอุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melting temperature, T_g) ระหว่างพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นกับพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นที่ใส่สารเสริมแรงพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และผลการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าพบว่าค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจากการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าสารเสริมแรงคาร์บอนสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นได้

แกรฟีนเป็นสารเสริมแรงคาร์บอนอีกชนิดที่ได้รับความนิยมใส่งในพอลิเมอร์ ซึ่งแกรฟีนมีสมบัติเชิงกล สมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี จากงานวิจัยของ Artur M Pinto และคณะ [28] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงของพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) โดยมีแกรฟีนและแกรฟีนออกไซด์เป็นสารเสริมแรงและขึ้นรูปชิ้นงานเป็นฟิล์มด้วยเทคนิค casting solution โดยใช้อะซิโตน (acetone) เป็นตัวทำละลายสำหรับแกรฟีนออกไซด์ และคลอโรฟอร์ม (chloroform) เป็นตัวทำละลายสำหรับพอลิเมอร์และแกรฟีน ความเข้มข้นของสารเสริมแรงในฟิล์มคอมพอสิตตั้งแต่ร้อยละ 0.2 ถึง 1.0 โดยน้ำหนัก จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิตที่เตรียมได้ผ่านกล้องจุลทรรศน์พบว่าที่ความเข้มข้นของสารเสริมแรงตั้งแต่ร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก เกิดการแยกกันระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงทั้งแกรฟีนและแกรฟีนออกไซด์อย่างชัดเจน และเกิดการเกาะกลุ่มกันเองของสารเสริมแรง ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าขนาดอนุภาคของสารเสริมแรงทั้งสองที่มีขนาดเล็กระดับนาโนทำให้จะเกาะกันเองมากกว่ากระจายตัวในพอลิเมอร์ ซึ่งจากการกระจายตัวที่ไม่ดีนี้ทำให้สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตไม่ดีเช่นกัน คือที่ความเข้มข้นของสารเสริมแรงต่ำกว่าร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ายังสัมมูลัสเพิ่มขึ้น โดยคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยแกรฟีนมีค่าสูงกว่าคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยแกรฟีนออกไซด์ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเสริมแรงมากกว่าร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ายังสัมมูลัสลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยา ดังนั้นจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าวิธีการเตรียมชิ้นงานด้วยวิธี casting solution เป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมเนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันเองของสารเสริมแรงมากกว่ากระจายตัวในพอลิเมอร์

จากงานวิจัยของ Chaoying Wan และ Biqiong Chen [29] ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเมื่อแกรฟีนออกไซด์เป็นสารเสริมแรง สำหรับแกรไฟต์ออกไซด์เตรียมได้จากวิธีการสังเคราะห์ทางเคมีผ่านวิธี Hummer method และการเตรียมวัสดุคอมพอสิตเตรียมด้วยเทคนิค casting solution โดยใช้ไดเมทิลฟอร์มามิได์ (dimethylformamide, DMF) เป็นตัวทำละลายสำหรับแกรฟีนออกไซด์ และใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายสำหรับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์เป็นร้อยละ 0, 0.3, 0.5, 1.0, และ 2.0 โดยน้ำหนัก จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) พบว่าสารเสริมแรงสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ ก่อนการทดสอบสมบัติเชิงกลได้เตรียมตัวผ่านเครื่องอัดแบบ (compression molding) หลังจากเตรียมผ่าน

เทคนิค casting solution ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าฟิล์มคอมพอสิตที่ได้มีความแข็งแรงและความเหนียวมากขึ้นเมื่อปริมาณของแกรฟีนออกไซด์มากขึ้น สำหรับฟิล์มคอมพอสิตที่ความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 2.0 พบว่าค่าความทนแรงดึง ค่ายังส์มอดูลัส และร้อยละการยืดตัว (Elongation at break) เพิ่มขึ้นร้อยละ 53, 70 และ 12 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างแรงดึงดูดระหว่างออกไซด์ของแกรฟีนออกไซด์ กับหมู่คาร์บอกซิลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ทำให้เกิดความแข็งแรงของโครงสร้างและนำไปสู่สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิตพบว่าที่ความเข้มข้นแกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการเกิดผลึก 5 องศาเซลเซียส และปริมาณผลึกก็เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแกรฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้แก่พอลิเมอร์แต่อุณหภูมิในการหลอมเหลวระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารเสริมแรงพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจากการทดลองสรุปได้ว่าแกรฟีนออกไซด์สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลแก่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้

จากงานวิจัยของ Xin Wang และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาสมบัติที่เปลี่ยนไปของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ผ่านการเติมแกรฟีนเป็นสารเสริมแรงและความเข้มข้นของแกรฟีนตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 2.0 โดยน้ำหนัก โดยเริ่มต้นงานวิจัยด้วยการสังเคราะห์แกรฟีนผ่านวิธีการทางเคมี และใช้ไฮดราซีนเป็นตัวรีดิวซ์ สำหรับการเตรียมตัวอย่างเตรียมด้วยเทคนิค casting solution ใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงและร้อยละการยืดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแกรฟีนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปหลังจากเติมสารเสริมแรงพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุคอมพอสิตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจาก 2.5×10^{-12} เป็น 2.08×10^{-7} S/cm ที่ความเข้มข้นแกรฟีนร้อยละ 2.0 ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นผลโดยตรงของสมบัติเฉพาะตัวของแกรฟีน ดังนั้นจากการทดลองสรุปได้ว่าแกรฟีนสามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนงานวิจัย

- 3.1.1 ศึกษา ค้นคว้าทฤษฎี และสืบค้นข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2 วางแผนการดำเนินงานวิจัย กำหนดขั้นตอน และวิธีการทดลอง
- 3.1.3 จัดหาวัสดุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง
- 3.1.4 ศึกษาการใช้เครื่องมือขึ้นรูปและเครื่องมือทดสอบ
- 3.1.5 สังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์
- 3.1.6 เตรียมมาสเตอร์แบตช์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตกับรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิคการตกตะกอนโดยมีอัตราส่วนของแกรฟีนอยู่ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
- 3.1.7 เตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตด้วยการผสมมาสเตอร์แบตช์กับพอลิเมอร์ในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ในอัตราส่วนต่างๆ
- 3.1.8 ขึ้นรูปชิ้นงานของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดแบบและเครื่องรีดหล่อฟิล์ม
- 3.1.9 ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของรีดิวซ์แกรฟีนที่สังเคราะห์ได้และวัสดุคอมพอสิต
- 3.1.10 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

รายชื่อวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

| วัตถุดิบ/สารเคมี | เกรด | บริษัทผู้ผลิต/ประเทศ |
|---|------------------------------|---|
| 1. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate)) | FZ91PM สำหรับงาน ฟิล์ม | PTT MCC Biochem Company Limited /ประเทศไทย |
| 2. แกรไฟต์ (Graphite) | - | Sigma-Aldrich /ประเทศ สวีตเซอร์แลนด์ |
| 3. กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 | AR | ACI Labscan /ประเทศไทย |
| 4. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) | AR | Ajax Finechem Pty Ltd. / ประเทศออสเตรเลีย |
| 5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 30 | AR | Chem-supply /ประเทศออสเตรเลีย |
| 6. แอล-แอสคอร์บิก แอซิด (L-ascorbic acid) | AR | Chem-supply /ประเทศออสเตรเลีย |
| 7. อะซิโตน (Acetone) | CG | ACI Labscan /ประเทศไทย |
| 8. คลอโรฟอร์ม (Chloroform) | AR | ACI Labscan /ประเทศไทย |
| 9. เมทานอล (Methanol) | CG | ACI Labscan /ประเทศไทย |
| 10. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) | - | ACI Labscan /ประเทศไทย |

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รายชื่อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

| ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์ | บริษัทผู้ผลิต/รุ่น |
|---|--|
| 1. เครื่องกวนแบบเชิงกล (Mechanical stirrer) | EUROSTAR รุ่น RW-20 |
| 2. ตู้อบ (Hot air oven) | Memmer รุ่น UNB 400 |
| 3. เครื่องชั่งทศนิยมสองตำแหน่ง (Analytical balance) | Mettler Toledo รุ่น AB204-S/FACT |
| 4. เครื่องกวนสารแบบใช้ความร้อน (Hot plate and magnetic stirrer) พร้อมเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) | Heidolph |
| 5. เครื่องกรองระบบสุญญากาศ (Büchner funnel vacuum filtration) | SIBATA รุ่น WJ-20 |
| 6. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuged machine) | Med inter รุ่น Senova TD5M-WS |
| 7. เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Co-rotating twin-screw extruder) | Thermo Prism รุ่น DSR-28 |
| 8. เครื่องรีดหล่อฟิล์ม (Chill roll casting) | Labtech Engineering รุ่น LCR-300HDCO-EX/VS |
| 9. เครื่องอัดแบบ (Compression molding) | Labtech Engineering รุ่น LP20-b |
| 10. เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Pelletizer cutting machine) | Labtech Engineering รุ่น LZ-80 |
| 11. เครื่องวัดความหนาของฟิล์ม (Thickness gage) | Mittutoyo Corporation รุ่น 7301 |
| 12. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) | Bruker รุ่น D8 Advance |
| 13. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) | Thermo Scientetic รุ่น Nicolet 6700 |
| 14. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) | JEOL รุ่น JSM-6400LV |

| ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์ (ต่อ) | บริษัทผู้ผลิต/รุ่น (ต่อ) |
|---|--|
| 15. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) | Netzsch รุ่น TG 209 F3 Tarsus |
| 16. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) ของ | Mettler Toledo รุ่น DSC1/STAR ^c |
| 17. เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) | LLOYD รุ่น LR100K |
| 18. เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Piccovoltmeter) | KETHLEY รุ่น 487 |
| 19. เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) | Kratos Analytical รุ่น AXIS Ultra DLD |
| 20. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายตัว (Laser Particle Size Distribution Analyzer) | Malvern รุ่น Mastersizer 2000 |
| 21. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonicate bath) | Wisd Laboratory Instrument รุ่น WUC-D06H |

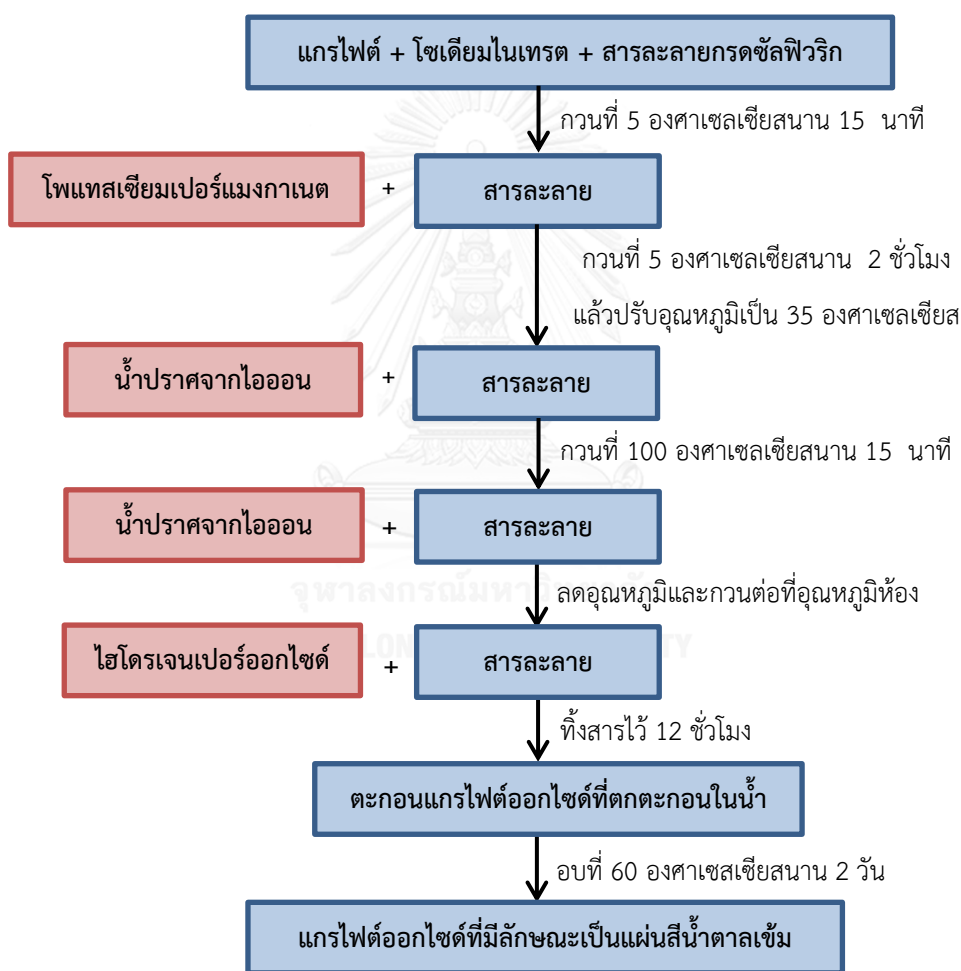
3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์

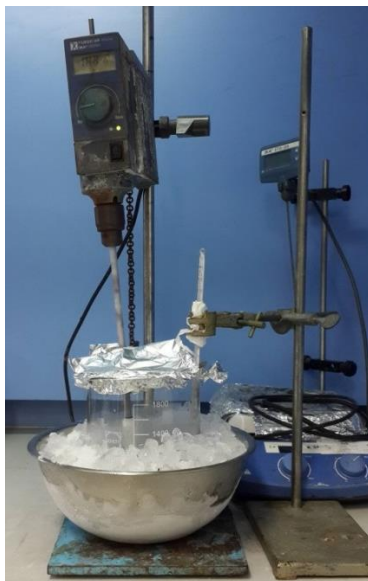
3.4.1.1 การสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์

การสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ด้วยวิธีการทางเคมีผ่านกระบวนการที่ประยุกต์จากวิธีฮัมเมอร์ (Hummer's method) ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเริ่มจากการเติมผงแกรไฟต์ 10 กรัม และโซเดียมไนเตรตปริมาณ 5 กรัม ลงในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วกวนด้วยเครื่องกวน ภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส โดยใช้อ่างน้ำแข็งรองด้านล่างเพื่อลดอุณหภูมิ หลังจากกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 15 นาที จึงเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ปริมาณ 30 กรัม อย่างช้าๆ พร้อมกับกวนอย่างต่อเนื่องที่ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำอ่างน้ำแข็งออกแล้วปรับอุณหภูมิให้เป็น 35 องศาเซลเซียส โดยให้ความร้อนส่งผ่านมายังอ่างน้ำที่รองอยู่ด้านล่างเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ หลังจากนั้นจึงเติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 360 มิลลิลิตร อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มเป็น 100 องศาเซลเซียส และกวน

ต่อเนื่องที่อุณหภูมิเดิมเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเทสารลงในน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 1,140 มิลลิลิตร และกวนต่อเนื่องพร้อมทั้งลดอุณหภูมิให้กลับเข้าสู่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงหยดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 30 ลงในสารจนกระทั่งไม่เกิดฟองอากาศ จากนั้นทิ้งสารให้ตกตะกอนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาปรับค่า pH ให้เป็นกลางด้วยน้ำปราศจากไอออนโดยใช้วิธีการปั่นเหวี่ยง และนำตะกอนสีน้ำตาลเข้มที่ได้ทดลองงานเพาะเชื้อ แล้วเข้าอบในตู้อบโดยใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน จะได้แกรไฟต์ออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นสีน้ำตาลเข้ม วิธีการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์แสดงดังรูปที่ 3.1



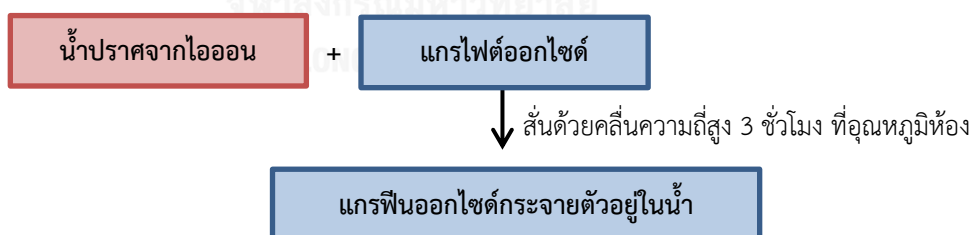
รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์



รูปที่ 3.2 การติดตั้งเครื่องมือเพื่อใช้สังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์

3.4.1.2 การสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์

การสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์โดยใช้คลื่นความถี่สูงด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เริ่มต้นจากการเติมแกรไฟต์ออกไซด์จากขั้นตอนที่แล้วปริมาณ 1 กรัม ลงในน้ำปราศจากไอออน (2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) แล้วให้คลื่นความถี่สูงความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ได้แกรไฟต์ออกไซด์กระจายตัวอยู่ในน้ำ วิธีการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์แสดงดังรูปที่ 3.3

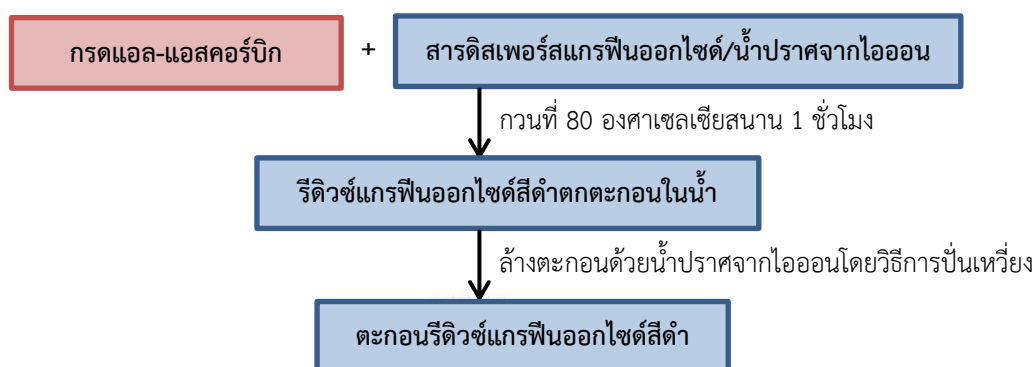


รูปที่ 3.3 แผนผังวิธีการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์

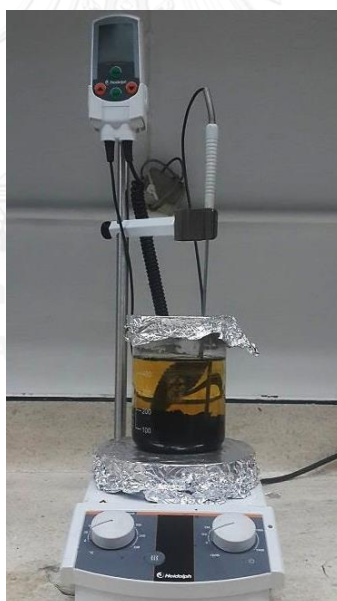
3.4.1.3 การสังเคราะห์รีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์

การสังเคราะห์รีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์จากแกรไฟต์ออกไซด์ด้วยปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ วิธีการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์แสดงดังรูปที่ 3.4 เริ่มจากการเติมกรดแอสคอร์บิกปริมาณ 10 กรัม ลงในสารดิสเพอร์สแกรไฟต์ออกไซด์ในน้ำปราศจากไอออนที่เตรียมได้จากขั้นตอนก่อนหน้า แล้วกวนอย่างต่อเนื่องด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ

80 องศาเซลเซียส และเห็นได้ว่าการเปลี่ยนสีของสารจากสีน้ำตาลกลายเป็นสีดำและเกิดการตกตะกอน หลังจากนั้นล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อกำจัดกรดแอสคอร์บิก โดยใช้วิธีการปั่นเหวี่ยงจำนวน 5 รอบ โดยแต่ละรอบใช้น้ำปราศจากไอออน 200 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.4 แผนผังวิธีการสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จากแกรฟีนออกไซด์

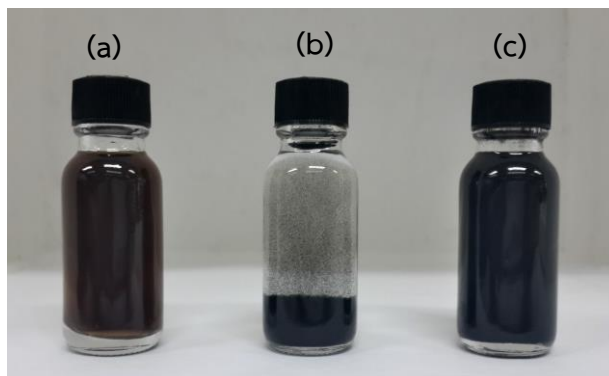


รูปที่ 3.5 การสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จากแกรฟีนออกไซด์ด้วยกรดแอสคอร์บิก

3.4.2 การเตรียมมาตรฐานแบคทีเรียด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วม

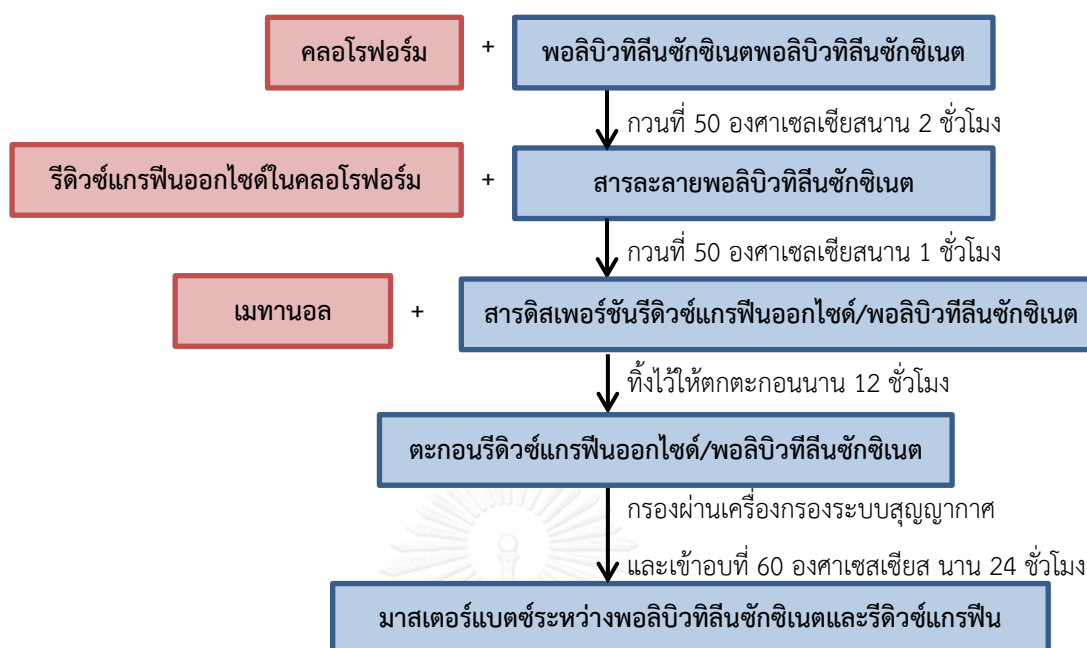
ก่อนการผสมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ลงในพอลิเมอร์จำเป็นต้องปรับสภาพให้เหมาะสมเพื่อช่วยให้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์กระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์และตัวทำละลาย เริ่มต้นจากการนำตะกอนที่ได้หลังจากกำจัดกรดแอสคอร์บิกแล้วมาล้างด้วยอะซิโตน โดยใช้วิธีการปั่นเหวี่ยงจำนวน 5 รอบ

หลังจากนั้นนำตะกอนที่ผ่านการปรับสภาพมาเติมคลอโรฟอร์ม (20 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) แล้วให้คลื่นความถี่สูงด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ได้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์กระจายตัวอยู่ในคลอโรฟอร์ม ดังแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การกระจายตัวของอนุภาคในตัวทำละลาย : (a) การกระจายของแกรฟีนออกไซด์ในน้ำ, (b) การกระจายของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ในน้ำ และ (c) การกระจายของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ในคลอโรฟอร์ม

เตรียมมาสเตอร์แบตช์ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัลไฟด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยวิธีการตกตะกอนร่วมด้วยเมทานอล ดังรูปที่ 3.7 กำหนดปริมาณของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ในพอลิบิวทิลีนซัลไฟด์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เริ่มจากนำเม็ดพอลิบิวทิลีนซัลไฟด์ปริมาณ 9 กรัมมาละลายในคลอโรฟอร์ม (1 กรัม/10 มิลลิลิตร) กวนด้วยแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง แล้วเติมสารดิสเพอร์สชันรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ในคลอโรฟอร์ม (20 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในสารละลายพอลิบิวทิลีนซัลไฟด์พร้อมกับการกวนอย่างต่อเนื่องที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารดิสเพอร์สชันระหว่างรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์และพอลิบิวทิลีนซัลไฟด์มาตกตะกอนร่วมด้วยเมทานอลปริมาณมากเกินพอ และตั้งทิ้งไว้ให้ตะกอนประมาณ 12 ชั่วโมง แล้วกรองด้วยเครื่องกรองระบบสุญญากาศและนำตะกอนที่ได้อบที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุแม่แบบระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์

3.4.3 เตรียมรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่

เตรียมรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตตามความเข้มข้นที่ต้องการด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ดังรูปที่ 3.8 ก่อนขั้นตอนการผสมเม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตถูกนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ขั้นตอนการผสมเริ่มต้นจากการนำวัสดุแม่แบบที่เตรียมได้มาบดเพื่อให้มีขนาดสม่ำเสมอ แล้วผสมกับเม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ โดยความเข้มข้นของรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอยู่ที่ช่วงร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50 และ 2.00 โดยน้ำหนัก ซึ่งหลังการอัดรีดคอมพอสิตจะถูกนำไปเข้าเครื่องตัดเม็ด ดังรูปที่ 3.9 และนำเม็ดต่อไปความชื้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง อุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูในการผสมพอลิเมอร์คอมพอสิตแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูในการผสมพอลิเมอร์คอมพอสิต

| Zone | Temperature ($^{\circ}\text{C}$) |
|------------------------------|------------------------------------|
| Feed | 110 |
| 2 | 120 |
| 3 | 125 |
| 4 | 130 |
| 5 | 135 |
| ความเร็วรอบสกรู (รอบต่อนาที) | 35 |



รูปที่ 3.8 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ของ Thermo Prism รุ่น DSR-28



รูปที่ 3.9 เครื่องตัดเม็ดพลาสติกของ Labtech Engineering รุ่น LZ-80/VS

3.4.4 การขึ้นรูปชิ้นงานรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

3.4.4.1 การขึ้นรูปชิ้นงานเป็นฟิล์มคอมพอสิตด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม

ก่อนการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นฟิล์มคอมพอสิต เม็ดคอมพอสิตที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่แล้ว ถูกอบเพื่อไล่ความชื้นที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานเป็นฟิล์มด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์มของบริษัท Labtech Engineering รุ่น LCR-300HDCO-EX ดังรูปที่ 3.10 โดยกำหนดความหนาอยู่ในช่วง 0.10-0.13 มิลลิเมตร ภายใต้สภาวะดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 อุณหภูมิ ความเร็วสกรูและความเร็วลูกกลิ้งในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์คอมพอสิต

| Temperature | | Screw rate (RPM) | Chill roll rate | |
|-------------|-----|---------------------|-----------------|-------|
| Zone | °C | | Zone | m/min |
| Feed | 155 | 35 | 1 | 1.3 |
| 2 | 160 | | 2 | 1.5 |
| 3 | 165 | | | |
| 4 | 170 | | | |
| 5 | 175 | | 3 | 4.0 |
| Distributor | 180 | | | |
| Die | 185 | | | |



รูปที่ 3.10 เครื่องรีดหล่อฟิล์มของ Labtech Engineering รุ่น LCR-300HDCO-EX

3.4.4.2 การขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแผ่นคอมพอสิตด้วยเครื่องอัดแบบ

ก่อนการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแผ่นคอมพอสิต เม็ดคอมพอสิตถูกนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปขึ้นในลักษณะเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดแบบของบริษัท Labtech Engineering รุ่น LP20-b ดังรูปที่ 3.11 โดยใช้แม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร และมีความหนา 1 มิลลิเมตร ภายใต้สภาวะดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิ ความดัน และเวลา ในการขึ้นรูปแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต

| Time | | Temperature (°C) | Pressure (Ton) |
|-------------------|---------|---------------------|-------------------|
| Zone | Sec. | | |
| Pre-heating | 600 | 135 | 150 |
| Venting (3 times) | 10/time | | |
| Final press | 1800 | | |
| Cooling | 2500 | | |



รูปที่ 3.11 เครื่องอัดแบบ Labtech Engineering ของ Labtech Engineering รุ่น LP20-b

3.4.5 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์ แกรฟีนออกไซด์

3.4.5.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูริเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีโดยดูหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ด้วยเครื่องฟูริเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ของบริษัท Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700 ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer ของ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700

3.4.5.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีโดยดูจากหมู่ฟังก์ชันของ แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) ของบริษัท Kratos Analytical รุ่น AXIS Ultra DLD ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่อง X-ray photoelectron spectroscopy ของ Kratos Analytical รุ่น AXIS Ultra DLD [31]

3.4.5.3 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6400LV ดังแสดงในรูปที่ 3.14 การเตรียมตัวอย่างก่อนนำมาวิเคราะห์จะต้องทำการอบไล่ความชื้นที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จึงนำมาเคลือบด้วยทองผ่านเครื่อง Sputter-coater ที่มีศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า และ 10,000 เท่า



รูปที่ 3.14 เครื่อง Scanning Electron Microscope บริษัท JEOL รุ่น JSM-6400LV

3.4.5.4 วิเคราะห์การจัดเรียงตัวของผลึก

การวิเคราะห์ลักษณะของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ โดยดูระยะห่างระหว่างชั้นคาร์บอนที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD) ของบริษัท Bruker รุ่น D8 Advance ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่อง X-ray diffraction ของ Bruker รุ่น D8 Advance

3.4.5.5 วิเคราะห์ขนาดอนุภาค

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer ของบริษัท Malvern รุ่น Mastersizer 2000 ดังแสดงในรูปที่ 3.16 การเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปวิเคราะห์ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ถูกเติมลงในคลอโรฟอร์มและสั่นด้วยคลื่นความถี่สูง นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์ โดยงานวิจัยนี้จะใช้ค่า particle refractive index เท่ากับ 1.33 และค่า absorption เท่ากับ 1 โดยใช้ค่า $d(0.5)$ สำหรับการอ่านค่าขนาดรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่กระจายตัวในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม



รูปที่ 3.16 เครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer ของ Malvern รุ่น Mastersizer 2000 [32]

3.4.6 วิเคราะห์และทดสอบสมบัติของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซินเนตคอมพอสิต

3.4.6.1 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อดูการกระจายของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่กระจายตัวในวัสดุคอมพอสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6400LV โดยศึกษาการกระจายของอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ในวัสดุคอมพอสิตศึกษาจากภาพตัดขวางของวัสดุคอมพอสิต และก่อนทดสอบ ชิ้นงานตัวอย่างถูกหักและอบไล่ความชื้นที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำผิวภาพตัดขวางเคลือบด้วยทองผ่านเครื่อง Sputter-coater ที่มีศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยใช้กำลังขยาย 3,000

3.4.6.2. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟิล์มคอมพอสิตภายใต้ความร้อน

การศึกษาสมบัติทางความร้อนเพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายของฟิล์มคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM E2550 ด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ของบริษัท Netzsch รุ่น TG 209 F3 Tarsus ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยทดสอบชิ้นงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส ถึง 700 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.17 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer ของ Netzsch รุ่น TG 209 F3 Tarsus [33]

3.4.6.3 ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิต

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิตเว่ยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) ของบริษัท Mettler Toledo รุ่น DSC1/STAR^c

ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (Melting temperature, T_m) และปริมาณผลึก (Degree of crystallinity, X_c) ของฟิล์มคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D7426 ภายใต้เทคนิคแบบให้ความร้อน-ทำให้เย็นตัว-ให้ความร้อน (Heat-cool-heat) ในช่วงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถึง 150 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน

ปริมาณผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 [29]

$$X_c = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_m^0 \times (1 - W_f)} \times 100\% \quad (3.1)$$

โดยที่ ΔH_c คือ เอนทัลปีของการเกิดผลึกขณะให้ความเย็นของตัวอย่าง มีหน่วยจูล/กรัม

ΔH_m^0 คือ เอนทัลปีของการหลอมผลึกอย่างสมบูรณ์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์

มีหน่วยจูล/กรัม โดยเป็นค่าคงที่ 110.3 จูล/กรัม

W_f คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่เติมลงในฟิล์มคอมพอสิต



รูปที่ 3.18 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry ของ Mettler Toledo รุ่น DSC1/STAR^e

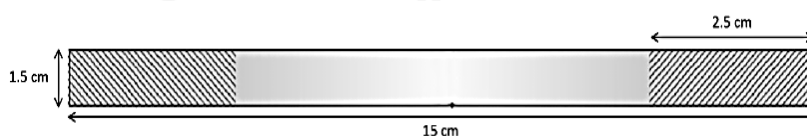
3.4.6.4 ทดสอบความทนแรงดึง

การทดสอบความทนแรงดึง (Tensile strength) ยั่งส์มอดูลัส (Young's modulus) และความยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ของฟิล์มคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D882

ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ของบริษัท LLOYD รุ่น LR100K ดังแสดงในรูปที่ 3.19 โดยกำหนดขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบให้มีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร และความหนาในช่วง 0.10-0.13 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป 3.20 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ ใช้ load cell ขนาด 100 นิวตัน ใช้อัตราเร็วในการดึง 12.5 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะที่วัดการยืดออก (Gauge length) 125 มิลลิเมตร



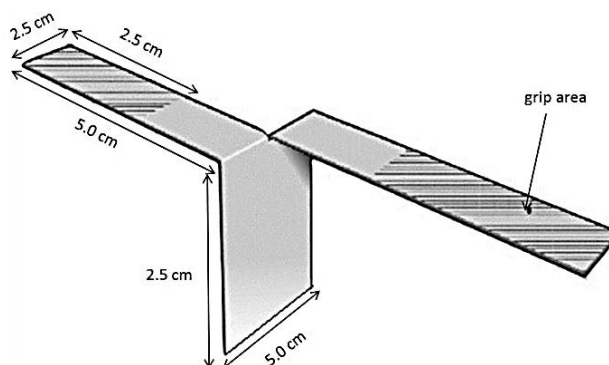
รูปที่ 3.19 เครื่อง Universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR100K



รูปที่ 3.20 ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงดึง

3.4.6.5 ทดสอบความทนแรงฉีกขาด

การทดสอบความทนแรงฉีกขาด (Tear resistance) ของฟิล์มคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D1938 ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยกำหนดขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบให้มีความกว้าง 5.0 เซนติเมตร ความยาว 7.5 เซนติเมตร และความหนาในช่วง 0.10-0.15 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ทดสอบโดยใช้ load cell ขนาด 100 นิวตัน ใช้อัตราเร็วในการดึง 250 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะห่างระหว่างตัวจับชิ้นงาน 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.21 ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงฉีกขาด [34]

3.4.6.5 ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าบริเวณพื้นผิว

วิธีการทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุคอมพอสิตแบบขั้วปลายแหลมสองขั้ว (Two point probe) ด้วยเครื่องพิโคโวลต์มิเตอร์ (Picovoltmeter) ของบริษัท KETHLEY รุ่น 487 ดังแสดงในรูปที่ 3.22 โดยกำหนดขนาดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.5×2.5 ตารางเซนติเมตร ขั้นตอนในการทดสอบเริ่มต้นจากการตัดแผ่นทองแดงให้มีขนาดเท่ากับชิ้นงานตัวอย่างแล้วประกบบนล่างเข้ากับชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.23 แล้วบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อให้ความต่างศักย์ตั้งแต่ 0 ถึง 500 โวลต์ แล้วนำไปพล็อตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ ค่าความต้านทานจะได้จากความชันระหว่างกราฟนี้

สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity, σ) ของชิ้นงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 มีหน่วย S/cm [35]

$$\text{Conductivity} = \frac{l}{R \cdot A} \quad (3.2)$$

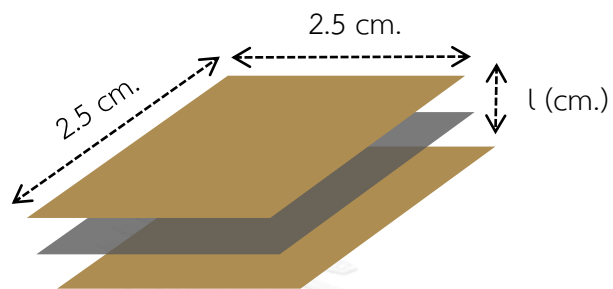
โดยที่ R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยโอห์ม

l คือ ระยะห่างระหว่างปลายขั้วไฟฟ้า (Electrode) มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นทองแดง มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร โดยเป็นค่าคงที่ 6.25 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3.22 เครื่อง Picovoltmeter ของ KETHLEY รุ่น 487



รูปที่ 3.23 การเตรียมชิ้นงานฟิล์มเพื่อทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้า

บทที่ 4

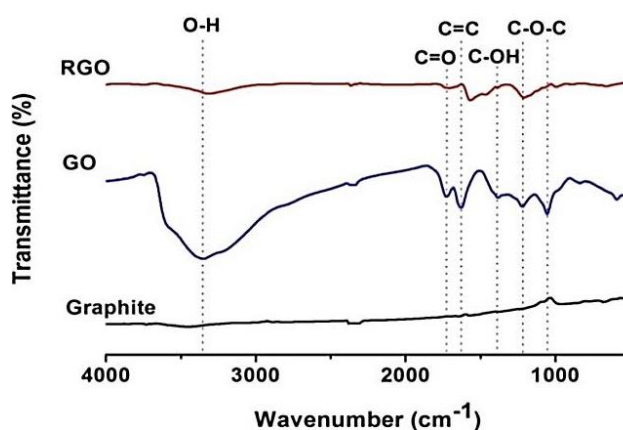
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

4.1.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

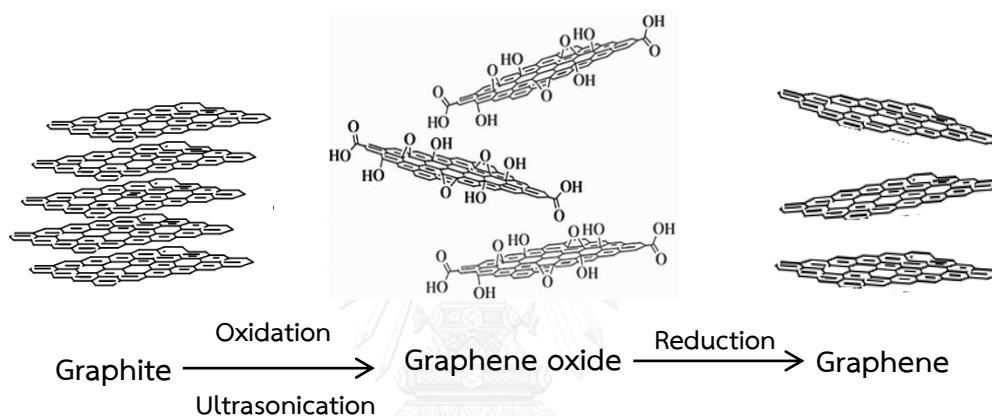
ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแสดงการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า สเปกตรัมของแกรไฟต์เป็นเส้นตรงและไม่มีพีกปรากฏ เนื่องจากองค์ประกอบของแกรไฟต์มีเพียงอะตอมคาร์บอนเท่านั้น แต่เมื่อนำแกรไฟต์มาสังเคราะห์เป็นแกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมี สเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ปรากฏพีกตามตารางที่ 4.1 ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวเกิดขึ้นจากการเติมอะตอมออกซิเจนเข้าไปในโครงสร้างผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันดังต่อไปนี้ หมู่อีพอกซี (epoxy) แอลคอกซี (alkoxy) หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl) หมู่คาร์บอนิล (carbonyl) หมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic) และหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) สำหรับสเปกตรัมของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่ได้จากสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์ผ่านปฏิกิริยารีดักชันด้วยกรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) พบว่า ความเข้มของพีกที่แสดงหมู่ฟังก์ชันข้างต้นมีค่าลดลง โดยเฉพาะที่ระดับพลังงาน 3,000-3,500 cm^{-1} มีค่าลดลงอย่างชัดเจน แสดงว่ากรดแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ที่เหมาะสม สามารถกำจัดอะตอมออกซิเจนได้ดี และได้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง โครงสร้างของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และแกรฟีน แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ [36], [37]

ตารางที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

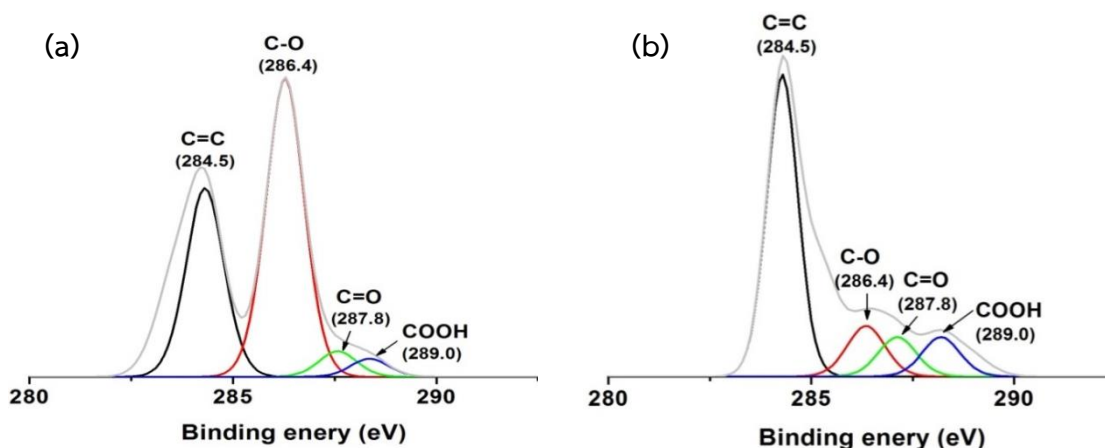
| สเปกตรัม (cm^{-1}) | แสดงพันธะ | หมู่ฟังก์ชัน |
|-------------------------------|------------------|-------------------------|
| 1,059 และ 1,229 | C-O-C stretching | Epoxy และ Alkoxy |
| 1,395 | C-OH stretching | Carboxyl |
| 1,620 | C=C stretching | Aromatic rings |
| 1,715 | C=O stretching | Carbonyl และ Carboxylic |
| 3,000-3,500 | O-H stretching | Hydroxyl |



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และแกรฟีน [38]

4.1.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีแสดงการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์โดยพิจารณาจาก 4 สเปกตรัมที่เปลี่ยนไปขององค์ประกอบคาร์บอน จากผลการวิเคราะห์พบว่า สเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันปรากฏฟีกตามตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 และเมื่อนำแกรฟีนออกไซด์มาผ่านปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์พบว่า สเปกตรัมของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีความเข้มของฟีกดังกล่าวลดลง โดยเฉพาะระดับพลังงานที่ 286.4 eV มีค่าลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์จึงเป็นเหตุผลสนับสนุนกรดแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ที่เหมาะสม



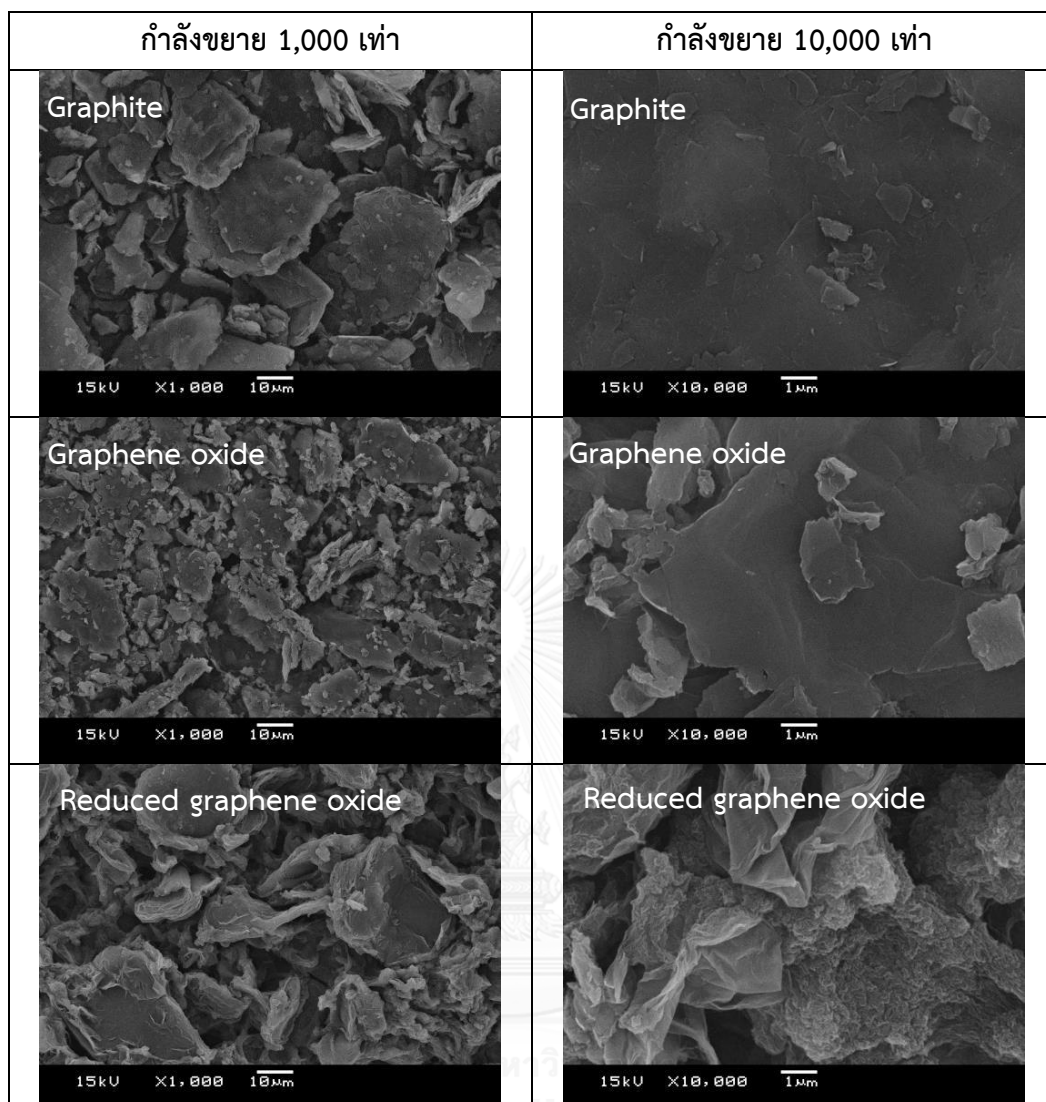
รูปที่ 4.3 XPS สเปกตรัม : (a) แกร์ฟีนออกไซด์ และ (b) รีติวซ์แกร์ฟีนออกไซด์

ตารางที่ 4.2 XPS สเปกตรัมของแกร์ฟีนออกไซด์และรีติวซ์แกร์ฟีนออกไซด์ [39], [40]

| สเปกตรัม (eV) | แสดงพันธะ | หมู่ฟังก์ชัน |
|---------------|-----------|------------------|
| 284.5 | C=C/C-C | Aromatic rings |
| 286.4 | C-O | Epoxy และ Alkoxy |
| 287.8 | C=O | Carbonyl |
| 289.0 | COOH | Carboxylic |

4.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 1,000 เท่า และ 10,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าอนุภาคของแกร์ไฟต์มีลักษณะ อนุภาคเป็นแผ่น โดยชั้นคาร์บอนเรียงซ้อนทับกันอย่างหนาแน่นเป็นชั้นๆ (stack) และเมื่อเพิ่ม กำลังขยายพบว่าไม่สามารถเห็นลักษณะรูปร่างของอนุภาคแกร์ไฟต์ที่เป็นแผ่นได้ ในขณะที่แกร์ฟีน ออกไซด์มีอนุภาคขนาดเล็กและแต่ละชั้นของคาร์บอนมีการกระจายตัวแยกออกจากกันมากขึ้น ทำให้ที่ กำลังขยาย 10,000 เท่า สามารถเห็นลักษณะของอนุภาคและรายละเอียดทางสัณฐานวิทยาได้ ดีกว่าแกร์ไฟต์ที่ กำลังขยายเท่ากัน เป็นผลมาจากหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและการ สันด้วยคลื่นความถี่สูงในระหว่างการสังเคราะห์ สำหรับรีติวซ์แกร์ฟีนออกไซด์ อนุภาคมีการกระจาย ตัวมากขึ้นและชั้นคาร์บอนแต่ละชั้นแยกออกจากกัน หรือเกาะกันอย่างหลวมๆ ทำให้สามารถเห็น รายละเอียดของอนุภาคได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแกร์ไฟต์และแกร์ฟีนออกไซด์ที่ กำลังขยายเท่ากัน

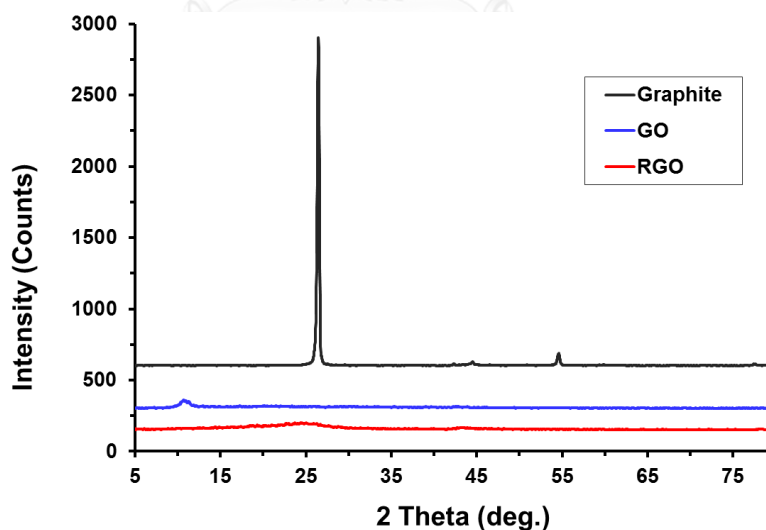


รูปที่ 4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ [41]

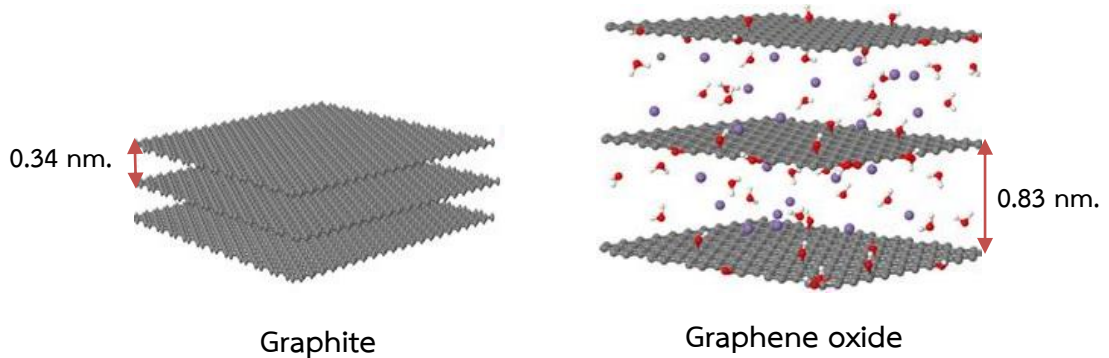
4.1.3 การจัดเรียงตัวของผลึก

การศึกษาลักษณะโครงสร้าง ระยะห่างระหว่างชั้นคาร์บอนและผลึกของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ สามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน จากผลการวิเคราะห์พบว่า แกรไฟต์แสดงพีกที่มีความเข้มสูงสุดที่ $2\text{-Theta} = 26.45^\circ$ และมีค่าระยะห่างระหว่างระนาบคาร์บอน (d-spacing) กว้าง 0.34 นาโนเมตร สำหรับแกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านขั้นตอนการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีแสดงพีกที่มีความเข้มสูงสุดที่ $2\text{-Theta} = 10.69^\circ$ และมีระยะห่างระหว่างระนาบคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็น 0.83 นาโนเมตร ซึ่งการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างระนาบของคาร์บอนเนื่องจากการนำแกรไฟต์มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและผ่านการสั่นด้วยความถี่สูง ส่งผล

ให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนและอะตอมออกซิเจนในโครงสร้าง โดยหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นรวมทั้งคลื่นความถี่สูงทำหน้าที่ถ่างชั้นระนาบคาร์บอนออกจากกันทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่พีกที่มีความเข้มสูงสุดของรีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์อยู่ที่ $2\text{-Theta} = 24.39^\circ$ และมีค่าระยะห่างระหว่างระนาบคาร์บอนกว้าง 0.37 นาโนเมตร สาเหตุที่ระยะห่างระหว่างชั้นระนาบคาร์บอนกลับมีค่าลดลงเนื่องจากเมื่อนำแกรฟีนออกไซด์ผ่านปฏิกิริยารีดักชันแล้ว อะตอมออกซิเจนถูกกำจัดออกจากโครงสร้างส่งผลให้ชั้นระนาบคาร์บอนจากเดิมที่มีหมู่ฟังก์ชันคอยถ่างชั้นระนาบกลายเป็นชั้นของอะตอมคาร์บอนเท่านั้น ดังนั้นระยะห่างระหว่างชั้นระนาบจึงลดลงใกล้เคียงกับแกรไฟต์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.5 ความเข้มของพีกสูงสุดแสดงถึงการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของผลึก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแกรไฟต์กับรีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์พบว่า แกรไฟต์แสดงความเข้มพีกสูงกว่ามากแสดงว่าโครงสร้างมีการจัดเรียงตัวของผลึกอย่างเป็นระเบียบและโมเลกุลเกิดการเกาะกันอย่างหนาแน่น ในขณะที่รีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์แสดงความเข้มพีกที่ต่ำกว่าแสดงว่าอนุภาคเกิดการกระจายตัวแยกออกจากกัน เนื่องจากการสังเคราะห์และการใช้คลื่นความถี่สูง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ารีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้นั้นไม่ได้กลับมาเกาะกลุ่มกันเองของแต่ละชั้นเช่นเดียวกับแกรไฟต์ [42], [43] ดังรูปที่ 4.6



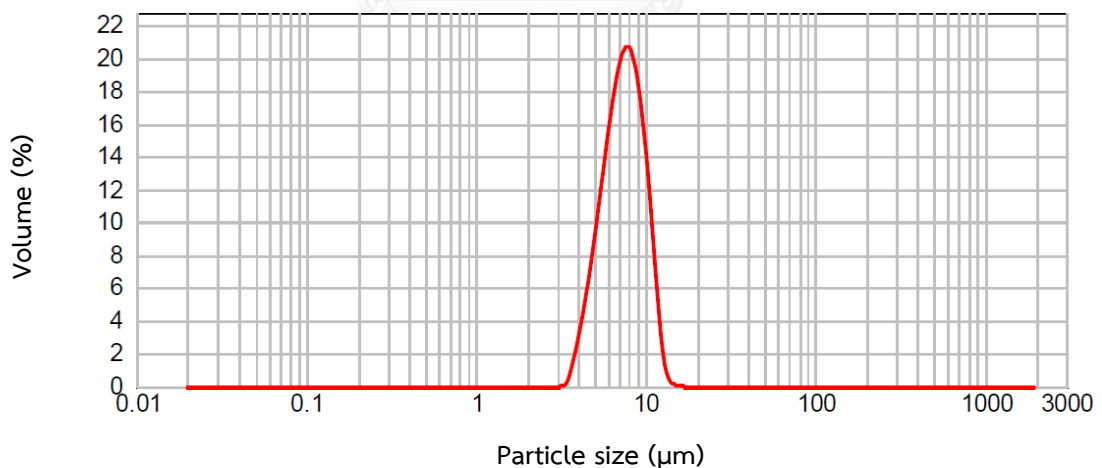
รูปที่ 4.5 กราฟของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์และรีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน



รูปที่ 4.6 ระยะห่างระหว่างระนาบชั้นคาร์บอนของแกรไฟต์และแกรฟีนออกไซด์ [44]

4.1.4 ขนาดอนุภาครีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยวิธีการวัดการกระเจิงแสง (light scattering) พบว่าอนุภาครีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีและกระจายตัวด้วยคลื่นความถี่สูงภายใต้ตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 5.0 ถึง 10.2 ไมโครเมตร โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 7.4 ไมโครเมตร และจากรูปที่ 4.7 พบว่าอนุภาครีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันเนื่องความกว้างของกราฟแคบและรูปร่างของกราฟแสดงจุดสูงสุดเพียงค่าเดียว ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอนุภาครีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดีและไม่เกิดการเกาะกลุ่มก้อนในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม



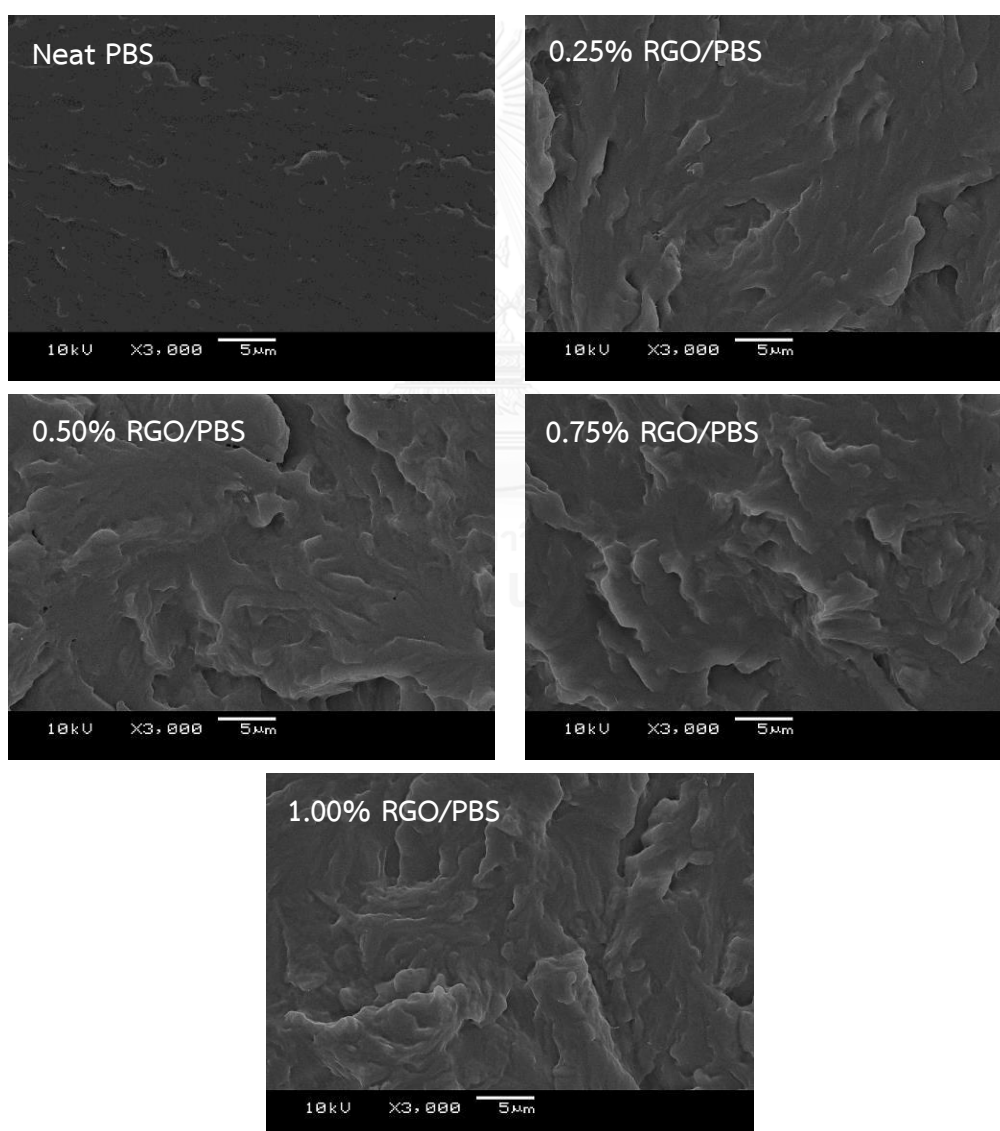
รูปที่ 4.7 ขนาดอนุภาครีดิวิซ์แกรฟีนออกไซด์ที่กระจายตัวในคลอโรฟอร์ม

4.2 สมบัติของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

4.2.1.1 แผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

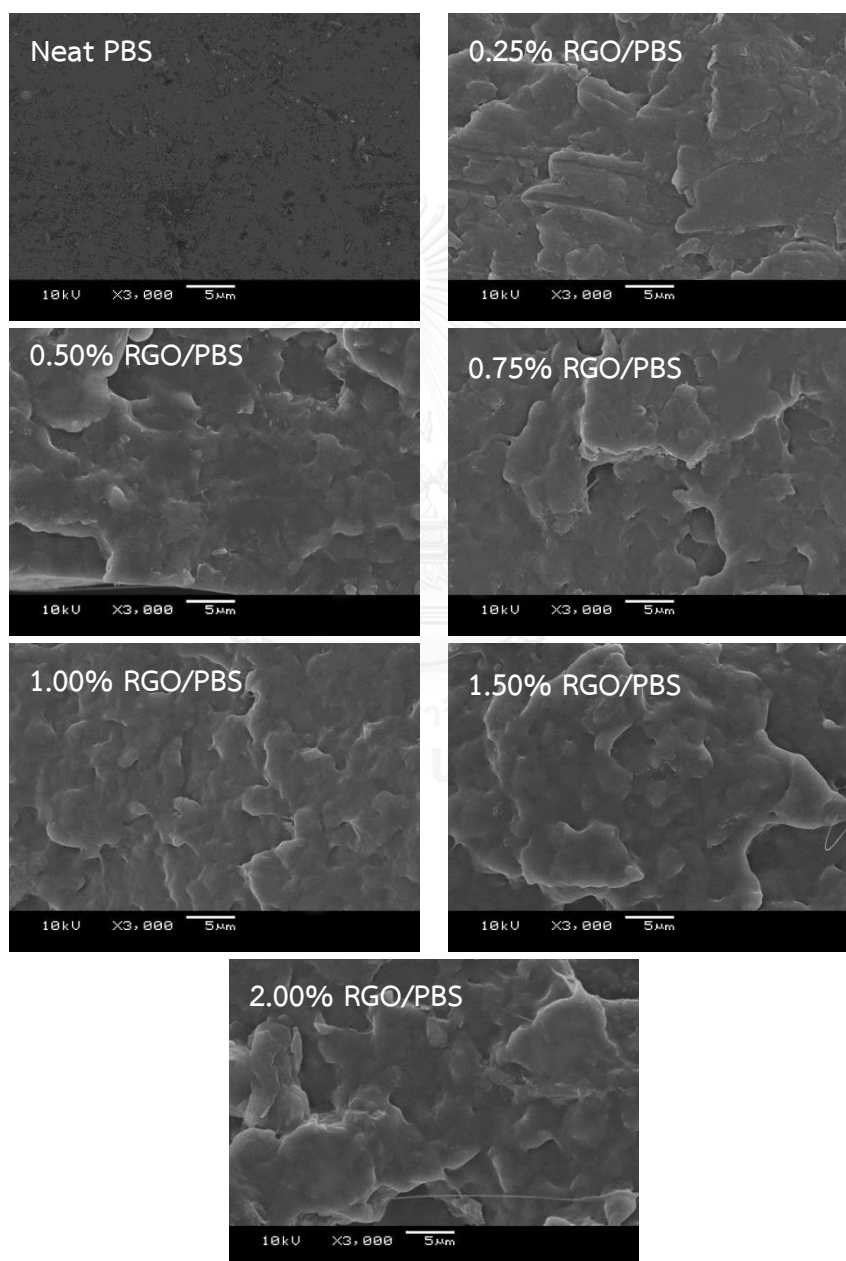
ผลการวิเคราะห์บริเวณพื้นผิวภาคตัดขวางเพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนในแผ่นพอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 3,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิไบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.2.1.2 พิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิไบวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

ผลการวิเคราะห์บริเวณพื้นผิวภาคตัดขวางเพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนในฟิล์มพอลิไบวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิไบวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์มผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 3,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.9



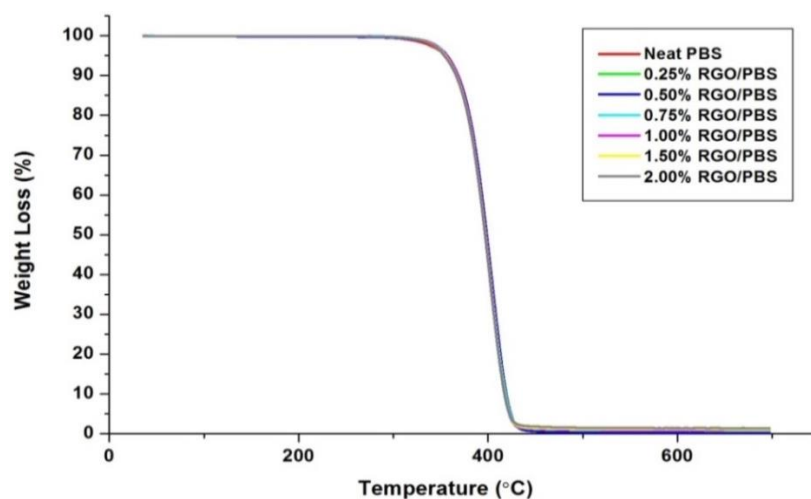
รูปที่ 4.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิไบวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ลักษณะพื้นผิวภาพของแผ่นคอมพอสิตและฟิล์มคอมพอสิตแสดงภาพตัดขวางคล้ายกัน โดยลักษณะพื้นผิวของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีลักษณะผิวค่อนข้างเรียบ แต่เมื่อเติมอนุภาครีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์เข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ พื้นผิวของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมีผิวที่ขรุขระมากขึ้นตามปริมาณของอนุภาครีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์ที่ใส่ลงไป ทั้งนี้รอยขรุขระที่เกิดขึ้นเกิดจากการกระจายตัวของอนุภาครีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์ที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (eterogeneous) ในพอลิเมอร์ การไม่เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างรีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์และพอลิเมอร์อาจเนื่องจากสภาพผิวที่แตกต่างกัน โดยอนุภาครีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นสารที่ไม่มีผิวจากโครงสร้างประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนเรียงต่อกันเท่านั้น ในขณะที่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเมอร์ที่มีผิวจากโครงสร้างที่ประกอบด้วยพันธะเอสเทอร์ ดังนั้นอนุภาครีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์จึงไม่เป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์

4.2.2 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มรีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.2.2.1 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิที่สารเริ่มเกิดการสลายตัว (T_{onset}) อุณหภูมิที่สารเกิดการเสื่อมสลายมากที่สุด ($T_{\text{inflection point}}$) และอุณหภูมิสุดท้ายที่สารสลายตัว (T_{endset}) ด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักในขณะที่ฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มรีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตได้รับความร้อน แสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มรีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

| Sample | T _{onset} (°C) | T _{inflection point} (°C) | T _{endset} (°C) |
|---------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| Neat PBS | 373 | 404 | 419 |
| 0.25% RGO/PBS | 374 | 404 | 420 |
| 0.50% RGO/PBS | 374 | 403 | 421 |
| 0.75% RGO/PBS | 374 | 403 | 420 |
| 1.00% RGO/PBS | 374 | 403 | 420 |
| 1.50% RGO/PBS | 374 | 403 | 420 |
| 2.00% RGO/PBS | 374 | 402 | 419 |

จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่สารเริ่มเกิดการสลายตัว อุณหภูมิที่สารเกิดการเสื่อมสลายมากที่สุดและอุณหภูมิสุดท้ายที่สารสลายตัวของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณของอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีปริมาณน้อยจึงไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์

4.2.2.2 อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึก

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยศึกษาอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึกของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

| Sample | T _c (°C) | T _m (°C) | X _c (%) |
|---------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Neat PBS | 90.4 | 105.5, 113.6 | 51.0 |
| 0.25% RGO/PBS | 91.1 | 106.5, 114.0 | 51.9 |
| 0.50% RGO/PBS | 91.2 | 106.3, 113.6 | 54.1 |
| 0.75% RGO/PBS | 91.0 | 106.3, 113.7 | 55.5 |
| 1.00% RGO/PBS | 91.0 | 105.8, 113.7 | 56.0 |
| 1.50% RGO/PBS | 90.6 | 105.8, 113.5 | 57.9 |
| 2.00% RGO/PBS | 91.1 | 105.7, 113.2 | 58.1 |

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมความร้อน โดยอุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณผลึก ศึกษาจากการกราฟในช่วงของการเย็นตัว (cooling curve) เนื่องจากเป็นช่วงที่สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบเพื่อให้เกิดส่วนที่เป็นผลึกในโครงสร้าง และสำหรับอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกศึกษาจากการให้ความร้อนขึ้นที่สอง (second heat) เป็นการให้ความร้อนเพื่อกำจัดประวัติทางความร้อนเดิมที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป และด้วยสภาวะที่วิเคราะห์ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์หาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้

จาดตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการเกิดผลึกของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ และฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยอุณหภูมิในการเกิดผลึกมีค่าอยู่ที่ 91 องศาเซลเซียส การที่อุณหภูมิในการเกิดผลึกไม่เปลี่ยนแปลงนั้น อาจกล่าวได้ว่าในช่วงระหว่างการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เพื่อให้เกิดผลึกในโครงสร้าง อนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ไม่ได้ส่งผลให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ดังนั้นอุณหภูมิในการเกิดผลึกจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง

สำหรับอุณหภูมิในการหลอมตัวของผลึกแสดงอุณหภูมิที่ใช้เพื่อทำให้ส่วนที่เป็นผลึกเกิดการเคลื่อนที่ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.4 พบว่า อุณหภูมิในการหลอมตัวของผลึกพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตประกอบด้วย 2 ค่า แสดงว่าภายในโครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบความแตกต่างของชนิดผลึก ทำให้อุณหภูมิในการหลอมของผลึกไม่เท่ากัน [45] และจากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิในการหลอมตัวของผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าปริมาณอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอมตัวของผลึกของฟิล์มคอมพอสิต อาจเนื่องจากอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนมีขนาดเล็กและปริมาณของอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่เติมลงไปพอลิเมอร์มีปริมาณต่ำจนไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิในการหลอมผลึก [46]

เมื่อพิจารณาความเป็นผลึกพบว่าฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมีปริมาณผลึกมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ และปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นตามปริมาณรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ การเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกสามารถอธิบายได้ว่าอนุภาค

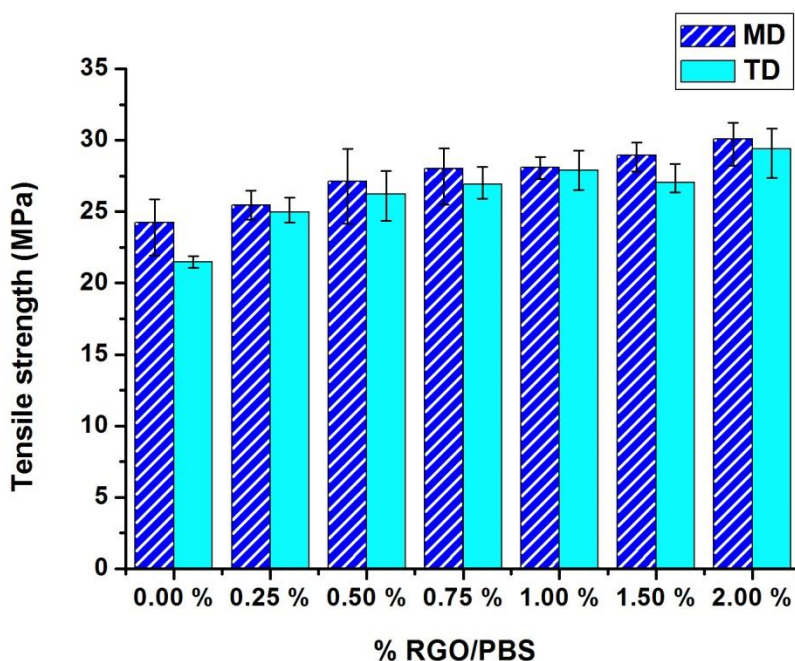
รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์และยังทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก ช่วยให้พอลิโพรพิลีนซึกซิเนตเกิดผลึกได้ง่ายขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณของผลึกเพิ่มขึ้น [29]

4.2.3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิโพรพิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต

4.2.3.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

ผลการวิเคราะห์ความทนแรงดึงในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (transverse direction, TD) ของฟิล์มพอลิโพรพิลีนซึกซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิโพรพิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.11

จากผลการทดลองความทนแรงดึงของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิโพรพิลีนซึกซิเนตคอมพอสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิโพรพิลีนซึกซิเนตบริสุทธิ์ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร แสดงดังในรูปที่ 4.11 และแสดงค่าในตารางที่ 4.5 โดยสามารถอธิบายสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงได้ดังนี้ อนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้แก่พอลิเมอร์ส่งผลให้ปริมาณผลึกของฟิล์มคอมพอสิตมีปริมาณมากขึ้นตามผลการทดลองที่ 4.2.2.2 การเพิ่มขึ้นของผลึกทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้แรงที่มากกระทำเพื่อให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่จนทำให้วัสดุเกิดความเสียหายต้องมีมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิตในรูปที่ 4.9 อนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวได้สม่ำเสมอในพอลิเมอร์ แสดงว่าอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เกิดอันตรกิริยาระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) ของพอลิโพรพิลีนซึกซิเนตได้ดี และอันตรกิริยาช่วยให้เกิดการกระจายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อฟิล์มคอมพอสิตถูกแรงดึงมากกระทำ และอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นแผ่นทำให้อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) ที่สูงจึงช่วยทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้แก่พอลิเมอร์ด้วย [28], [30]



รูปที่ 4.11 ความทนแรงดึงของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

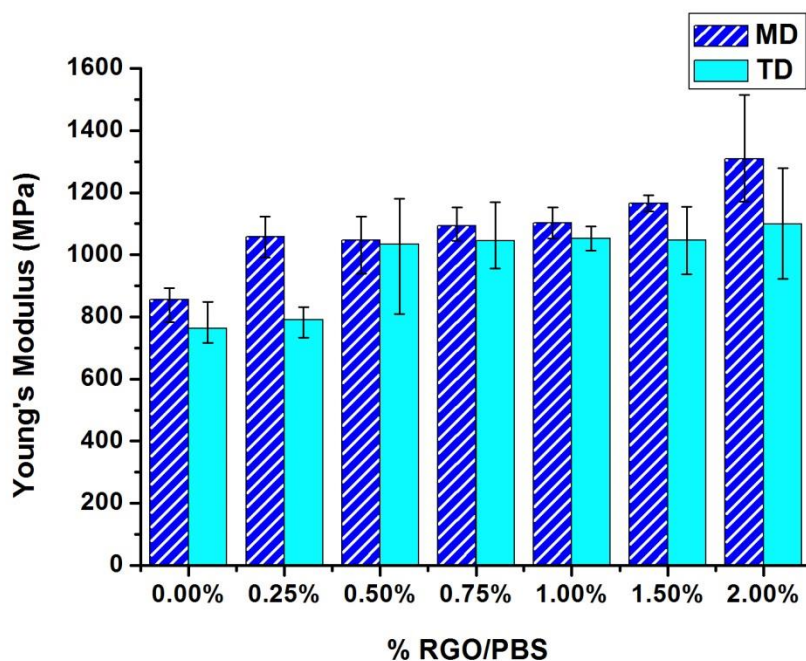
ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มคอมพอสิตที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.00 โดยน้ำหนัก เพิ่มขึ้นจาก 24% เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ สำหรับการทดสอบในทิศทางตามแนวเครื่องจักร ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านทานแรงดึงให้แก่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

4.2.3.2 ยังส์มอดุลัส (Young's Modulus)

ผลการวิเคราะห์ยังส์มอดุลัสในทิศทางตามแนวเครื่องจักร และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.12

ค่ายังส์มอดุลัสเป็นค่าบอกระดับความแข็งเกร็ง (stiffness) ของวัสดุ หรือแสดงถึงความสามารถในการคงรูปของวัสดุเมื่อมีความเค้นมากระทำ จากผลการทดลองค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักร และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร แสดงดังในรูปที่ 4.12 และแสดงค่าในตารางที่ 4.5 ซึ่งมีแนวโน้ม

เช่นเดียวกับความทนแรงดึง เนื่องจากอนุภาครีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้แก่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ปริมาณผลึกของฟิล์มคอมพอสิตมีปริมาณมากขึ้น และอนุภาครีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ในพอลิเมอร์ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน ส่งผลให้วัสดุสามารถกระจายแรงได้ดีเมื่อมีความเค้นหรือแรงมากกระทำต่อวัสดุ และต้องใช้ความเค้นมากขึ้นเพื่อทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปร่างด้วย [28]



รูปที่ 4.12 ยังสัมมอดูลัสของฟิล์มรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต

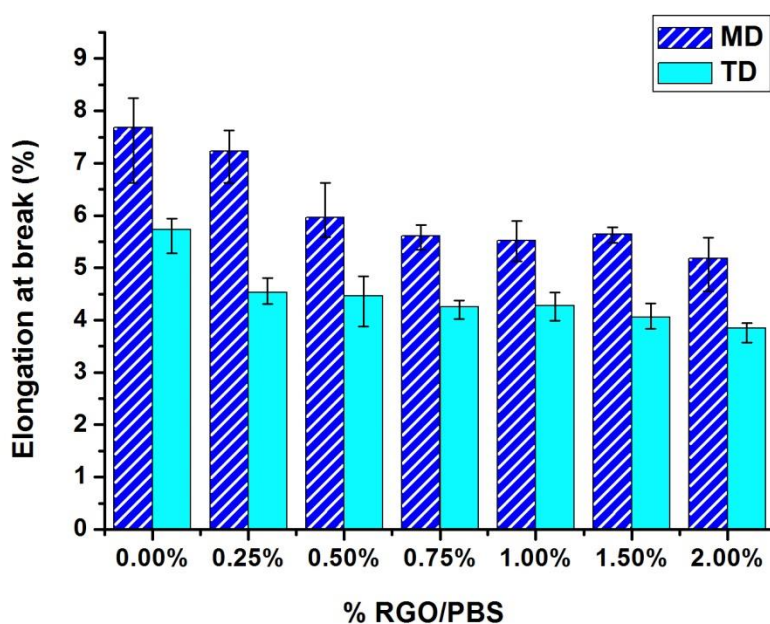
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยฟิล์มคอมพอสิตที่ความเข้มข้นของรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 2.00 โดยน้ำหนัก มีค่ายังสัมมอดูลัสเพิ่มขึ้น 35% เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตบริสุทธิ์ สำหรับการทดสอบในทิศทางตามแนวเครื่องจักรเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนบริสุทธิ์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอนุภาครีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ช่วยปรับปรุงค่ายังสัมมอดูลัสให้แก่พอลิบิวทิลีนซึกซิเนต

4.2.3.3 ความยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

ผลการวิเคราะห์ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดในทิศทางตามแนวเครื่องจักร และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซึกซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซึกซิเนตคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.13

ความยืดตัว ณ จุดขาด แสดงถึงร้อยละของระยะยืดที่เปลี่ยนสูงสุดเมื่อมีแรงมากระทำ เทียบกับความยาวเดิมก่อนที่วัสดุจะเกิดการเสียรูปร่าง จากผลการทดลองค่าความยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร แสดงดังในรูปที่ 4.13 และแสดงค่าในตารางที่ 4.5 เนื่องจากอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก เมื่อเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตส่งผลให้ส่วนที่เป็นอสัณฐานของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลงและปริมาณผลึกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความยืดหยุ่นของวัสดุแปรผันตามส่วนที่เป็นอสัณฐาน ดังนั้นเมื่อส่วนที่เป็นอสัณฐานในวัสดุลดลง ทำให้เมื่อมีแรงมากระทำ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเป็นไปได้ยากมากขึ้น ค่าความยืดตัว ณ จุดขาดลดลง [47]



รูปที่ 4.13 ความยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

โดยฟิล์มคอมพอสิตที่ความเข้มข้นของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีความยืดตัว ณ จุดขาดลดลง 32% เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ สำหรับการทดสอบในทิศทางตามแนวเครื่องจักรเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนบริสุทธิ์

เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

พบว่าค่าความทนแรงดึงและค่ายังสัมมอดูลัสของฟิล์มในทิศทางแนวเครื่องจักรมีค่าสูงกว่าทิศทางเครื่องจักร ทั้งนี้เนื่องจากการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มเกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ทิศทางตามแนวเครื่องจักรในช่วงที่ฟิล์มรีดผ่านลูกกลิ้ง ทำให้เมื่อให้แรงดึงกระทำกับฟิล์มเกิดแรงดึงในลักษณะขนานกับทิศทางการจัดเรียงของสายโซ่สร้างพันธะโควาเลนต์ (covalence bond) ระหว่างกัน แต่สำหรับการดึงฟิล์มในทิศทางขวางแนวเครื่องจักรเป็นการให้แรงในทิศตั้งฉากซึ่งการจัดเรียงสายโซ่พอลิเมอร์ในทิศทางนี้สร้างพันธะแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ ทำให้แรงกระทำเพื่อให้วัสดุเสียรูปร่างจึงใช้แรงน้อยกว่า ค่าสมบัติเชิงกลทั้งค่าความทนแรงดึงและค่ายังสัมมอดูลัสในทิศทางขวางเครื่องจักรจึงมีค่าน้อยกว่าทิศทางตามแนวเครื่องจักร

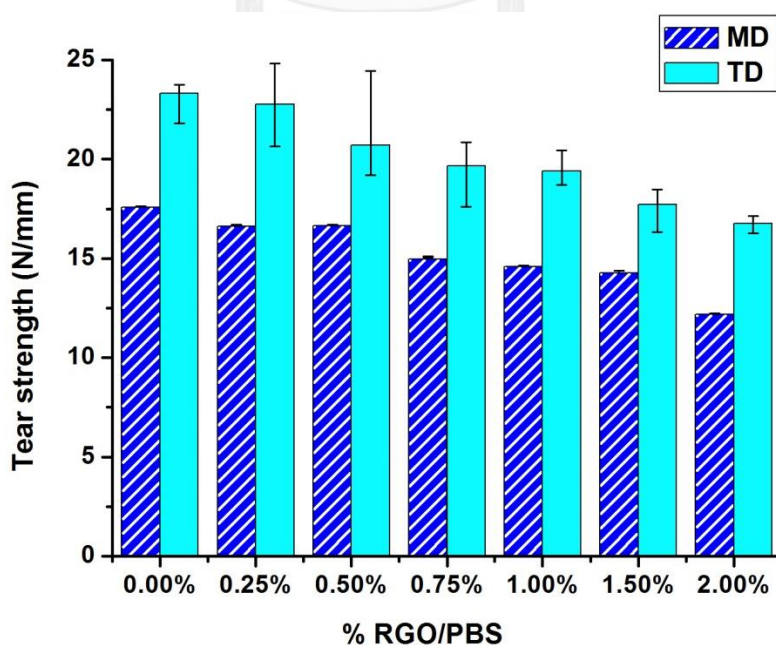
4.2.3.4 ความทนแรงฉีกขาด (Tear strength)

ผลการวิเคราะห์ความทนแรงฉีกขาดในทิศทางตามแนวเครื่องจักร และในทิศทางขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต แสดงในรูปที่ 4.14 และแสดงค่าในตารางที่ 4.6 จากผลการทดลองความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

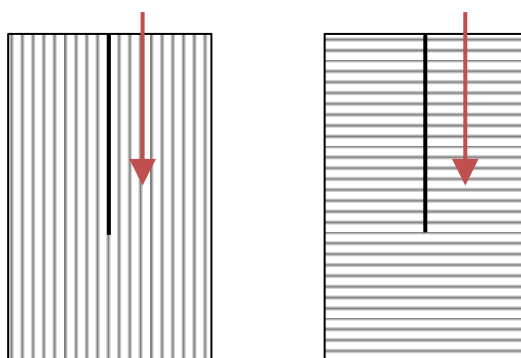
จากผลการทดลองเห็นได้ว่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มคอมพอสิตไม่สอดคล้องกับความทนแรงดึงและค่ายังสัมมอดูลัส แม้ว่าฟิล์มคอมพอสิตที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งช่วยสนับสนุนการเกิดผลึกในโครงสร้าง หรือการเติมอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เข้าไปในพอลิเมอร์จะเข้าไปช่วยให้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นจากการทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก แต่สำหรับงานวิจัยนี้ปัจจัยการเกิดผลึกถือเป็นปัจจัยรอง ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนไปของความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มคอมพอสิต สามารถอธิบายได้จากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างเฟสจากสภาพขั้วที่แตกต่างกัน โดยอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นสารที่ไม่มีขั้วทางเคมีเพราะโครงสร้างประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนเรียงต่อกันเท่านั้น แต่ในขณะที่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจัดเป็นพอลิเอสเทอร์ประเภทหนึ่ง ซึ่งพันธะเอสเทอร์ในโครงสร้างทำให้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีขั้วทางเคมี ดังนั้นจากสภาพขั้วที่แตกต่างกันระหว่างสารเติมแต่งและพอลิเมอร์จึงนำไปสู่การเกิด

ช่องว่างระหว่างเฟสและความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.9 ที่สังเกตเห็นความขรุขระของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์สูงขึ้น ซึ่งช่องว่างระหว่างเฟสทำให้ไม่มีอนุภาครองรับแรงและต้านทานแรงฉีกขาด ทำให้วัสดุเกิดการฉีกขาดได้ง่ายขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและทิศทางขวางแนวเครื่องจักรพบว่า ค่าสามารถในการต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มในทิศทางตามแนวเครื่องจักรมีค่าต่ำกว่าทิศทางขวางเครื่องจักร ทั้งนี้อาจเนื่องจากลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์มและเคลื่อนที่ผ่านลูกกลิ้ง สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักร ซึ่งเมื่อให้แรงฉีกขาดกระทำกับฟิล์มจะเกิดแรงในลักษณะขนานกับทิศทางการจัดเรียงของสายโซ่ ทำให้การฉีกขาดเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า [20] ในขณะที่การให้แรงฉีกขาดจามทิศทางขวางเครื่องจักรซึ่งเป็นแรงที่กระทำในทิศตั้งฉากกับสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้แรงที่กระทำจำเป็นต้องมากพอที่ทำลายสายโซ่พอลิเมอร์ที่ขวางแนวแรงอยู่ ส่งผลให้พลังงานที่ต้องใช้ในการให้วัสดุเกิดการฉีกขาดสูงกว่าลักษณะแรงที่กระทำต่อฟิล์มคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและทิศทางขวางแนวเครื่องจักรเป็นไปตามรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต



รูปที่ 4.15 แบบจำลองแรงฉีกขาดที่กระทำต่อฟิล์มรีตีวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซีเนตคอมพอสิต

: (a) ทิศทางตามแนวเครื่องจักร และ (b) ทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

หมายเหตุ ลูกศรแสดงทิศทางของแรงฉีกขาดที่กระทำต่อฟิล์มคอมพอสิต

ตารางที่ 4.5 สมบัติด้านแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์คอมพอสิต

| Sample | Tensile strength (MPa) | | Young's Modulus (MPa) | | Elongation at break (%) | |
|---------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|
| | MD | TD | MD | TD | MD | TD |
| Neat PBS | 24.3±1.5 ^a | 21.5±0.3 ^a | 856.4±45.7 ^a | 763.7±50.1 ^a | 7.7±0.7 ^a | 5.7±0.3 ^a |
| 0.25% RGO/PBS | 25.5±0.8 ^b | 25.0±0.7 ^b | 1057.5±61.5 ^b | 791.0±41.8 ^b | 7.2±0.4 ^a | 4.5±0.2 ^b |
| 0.50% RGO/PBS | 27.1±1.9 ^c | 26.2±1.6 ^{b,c} | 1047.2±77.7 ^c | 1034.5±153.9 ^b | 5.9±0.4 ^b | 4.5±0.4 ^b |
| 0.75% RGO/PBS | 28.0±1.5 ^{c,d} | 26.9±1.0 ^{c,d} | 1093.1±43.7 ^c | 1044.7±84.4 ^{b,c} | 5.6±0.2 ^{b,c} | 4.2±0.1 ^{b,c} |
| 1.00% RGO/PBS | 28.1±0.6 ^{c,d} | 27.9±1.1 ^d | 1103.3±38.6 ^c | 1053.2±29.2 ^{b,c} | 5.5±0.3 ^{b,c} | 4.3±0.3 ^{b,c} |
| 1.50% RGO/PBS | 29.0±0.9 ^{d,e} | 27.1±0.9 ^{c,d} | 1165.3±19.7 ^c | 1046.9±93.6 ^c | 5.6±0.1 ^{b,c} | 4.1±0.2 ^{c,d} |
| 2.00% RGO/PBS | 30.1±1.2 ^e | 29.4±1.6 ^e | 1308.7±144.9 ^c | 1099.5±142.8 ^d | 5.2±0.4 ^c | 3.9±0.2 ^d |

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b, c, d และ e แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.6 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์คอมพอสิต

| Sample | Tear strength (N/mm) | |
|---------------|-----------------------|-------------------------|
| | MD | TD |
| Neat PBS | 17.6±0.3 ^a | 23.3±0.8 ^a |
| 0.25% RGO/PBS | 16.6±0.6 ^b | 22.8±1.7 ^a |
| 0.50% RGO/PBS | 16.5±0.3 ^b | 20.7±2.2 ^b |
| 0.75% RGO/PBS | 15.0±0.8 ^c | 19.7±1.5 ^b |
| 1.00% RGO/PBS | 14.6±0.5 ^c | 19.4±0.8 ^{b,c} |
| 1.50% RGO/PBS | 14.3±0.9 ^c | 17.7±0.8 ^{c,d} |
| 2.00% RGO/PBS | 12.2±0.4 ^d | 16.8±0.4 ^d |

หมายเหตุ ตัวอักษร a, b, c และ d แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.2.4 สมบัติทางไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

4.2.4.1 แผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต

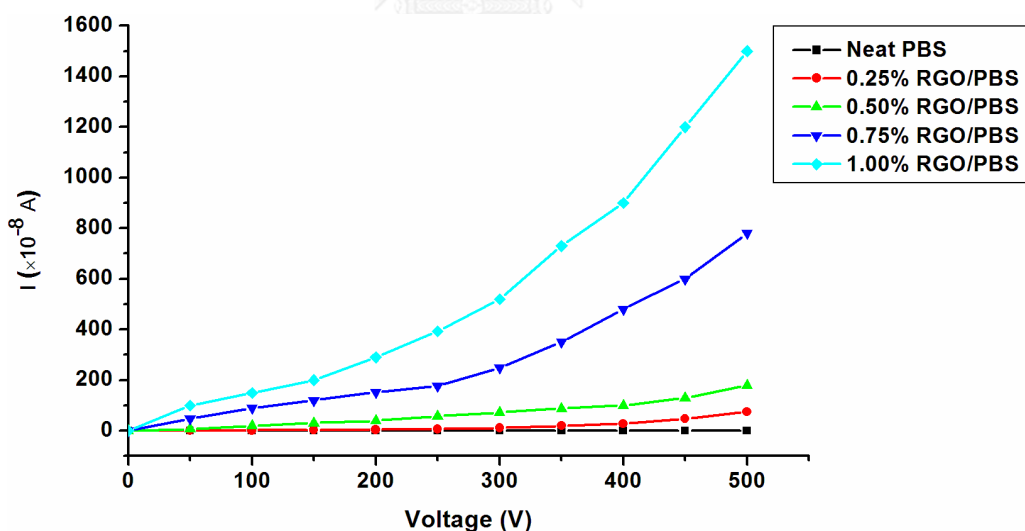
การวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของแผ่นพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ วัตต์ค่าการนำไฟฟ้าจากเครื่องพีโคโวลต์มิเตอร์ แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.16 โดยแสดงกราฟระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปที่ความต่างศักย์ต่างๆ และตารางที่ 4.7 แสดงค่าความต้านไฟฟ้าที่คำนวณได้จากความชันของกราฟ และค่าสภาพนำไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

จากผลการทดลองพบว่าค่าความต้านไฟฟ้าของแผ่นพลาสติกแกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตมีค่าต่ำลงตามปริมาณอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นพลาสติกพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ และเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานไฟฟ้าในตารางที่ 4.7 ค่าความต้านไฟฟ้าลดลงจาก 5.15×10^{11} โอห์มของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ เป็น 3.33×10^7 โอห์มของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นคอมพอสิต เนื่องจากอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีจากโครงสร้างของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่ประกอบด้วยชั้นเดี่ยวของอะตอมคาร์บอนต่อกันลักษณะหกเหลี่ยมและสร้างพันธะโควาเลนต์แบบ sp^2 ไฮบริไดเซชัน (sp^2 hybridization) ซึ่งลักษณะ

โครงสร้างของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกขึ้น และอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่เติมลงในแผ่นคอมพอสิตมีการกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์สอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.8 ดังนั้นจากผลทดลองแสดงว่าอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนช่วยปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้และค่าสภาพนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุฐานไฟฟ้าสถิต [27], [48]

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของแผ่นพอลิเมอร์คอมพอสิต

| Sample | Resistance (Ω) | Conductivity (S/cm) |
|---------------|-------------------------|-----------------------|
| Neat PBS | 5.2×10^{11} | 1.6×10^{-13} |
| 0.25% RGO/PBS | 6.7×10^8 | 1.2×10^{-10} |
| 0.50% RGO/PBS | 2.8×10^8 | 2.9×10^{-10} |
| 0.75% RGO/PBS | 6.4×10^7 | 1.3×10^{-9} |
| 1.00% RGO/PBS | 3.3×10^7 | 2.4×10^{-9} |



รูปที่ 4.16 กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า

4.2.4.2 ฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

สำหรับการศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของฟิล์มพลาสติกพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องรีดหลอมฟิล์ม วัดค่าจาก

เครื่องพีโคโวลต์มิเตอร์ พบว่าในระหว่างการทดลองเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 0 - 500 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้ไม่สามารถนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ได้ ส่งผลให้ไม่สามารถคำนวณค่าความต้านของวัสดุได้ ซึ่งแสดงว่าฟิล์มคอมพอสิตที่เตรียมได้มีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำมากกว่าที่เครื่องสามารถตรวจจับได้ แสดงให้เห็นว่าอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าแก่ฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ทำให้ฟิล์มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตยังแสดงลักษณะของวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า ซึ่งค่าความต้านไฟฟ้าที่ไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากเติมอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ อาจเนื่องจากขั้นตอนการขึ้นรูปวัสดุประเภทฟิล์มด้วยเครื่องหล่อรีดฟิล์ม โดยเมื่อพอลิเมอร์หลอมเคลื่อนที่ผ่านหัวตายถูกรีดให้เป็นแผ่นบางพร้อมทั้งถูกดึงผ่านลูกกลิ้งเพื่อให้ได้วัสดุฟิล์มที่ต้องมีความหนาไม่เกิน 0.25 ไมครอน ด้วยขั้นตอนการรีดฟิล์มให้มีลักษณะบางส่งผลให้อนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ถูกกระจายแยกออกจากกันและปริมาณอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ต่อ 1 หน่วยพื้นที่เมื่อเปรียบเทียบกับกรขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกด้วยเครื่องอัดแบบมีปริมาณลดลง ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไม่เปลี่ยนแปลงแม้เติมอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ลงไปแล้วก็ตาม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่ใช่เป็นสารตัวเติมต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา, สมบัติทางความร้อน, สมบัติเชิงกลและสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยเลือกใช้วิธีการเตรียมวัสดุคอมพอสิตแบบสองชั้นตอน โดยเริ่มต้นจากการเตรียมสเตอร์แบตซ์ที่มีปริมาณรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วม แล้วนำมาสเตอร์แบตซ์มาผสมกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโดยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ เพื่อให้ได้วัสดุคอมพอสิตที่มีความเข้มข้นของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ร้อยละ 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นจึงขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สามารถสังเคราะห์รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จากแกรไฟต์ด้วยวิธีทางเคมี และกรดแอลเอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ที่มีความปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนปฏิกิริยารีดักชัน และให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดออกซิเจนออกจากโครงสร้างของแกรฟีนออกไซด์
2. สามารถเตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตด้วยวิธีการเตรียมแบบสองชั้นตอน และจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดีในวัสดุคอมพอสิต
3. สมบัติทางความร้อนพบว่าอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ไม่ได้ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิต และการเติมอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ส่งผลให้ปริมาณผลึกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น
4. สมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมพอสิตมีค่าความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณา ค่าความยืดตัว ณ จุดขาด ความทนแรงฉีกขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณอนุภาครีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มากขึ้น

5. สมบัติการนำไฟฟ้าพบว่าอนุภาครีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์ไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มคอมพอสิต แต่ในขณะที่แผ่นคอมพอสิตมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อปริมาณอนุภาครีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานด้านวัสดุต้านไฟฟ้าสถิต

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพิ่มปริมาณรีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์ในฟิล์มรีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตเพื่อปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ไฟฟ้าสถิต



รายการอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 2007. [10 May 2016]. Available from: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic.
- [2] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) 2010. [10 May 2016]. Available from: <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR12.pdf>.
- [3] Wikipedia®. Polybutylene succinate 2015 [10 May 2016]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Polybutylene_succinate.
- [4] Xu, J. and Guo, B.H. Review : Poly(butylene succinate) and its copolymers: Research, development and industrialization. *Biotechnol J.* 2010 ; 5 : 1149–1163.
- [5] Middleton B. 3-Composites: Manufacture and Application. *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality.* 2016 ; 53-101.
- [6] หฤทภักดิ์ กীরติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิตติสกุล และ อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ. *วิศวกรรมสาร มก.*22(70).
- [7] กวี หวังนิเวศน์กุล. วัสดุวิศวกรรม (Engineering materials). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์รุ่งแสงการพิมพ์; 2554.
- [8] วิลเลียมส์ ดี, คาลิสเตอร์ เจ อาร์. วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท้อป; 2548.
- [9] Ray, S.C. *Applications of Graphene and Graphene-Oxide Based Nanomaterials.* Oxford: William Andrew Publication; 2015.
- [10] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. แกรฟีนวัสดุแห่งโลกอนาคต 2010. [10 May 2016]. Available from: <http://www.nstda.or.th/news/2398-2010-11-01-02-36-30>.
- [11] Aliofkhazraei, M. *Advances in Graphene Science.* InTech Publisher; 2013.
- [12] Shin, Y.C., Dresselhaus, M.S. and Kong, J. *Preparation of Graphene with Large Area. Carbon Nanotubes and Graphene (Second Edition)* 2014 ; 39-76.
- [13] Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S.I. and Seal, S. Graphene based materials: Past, present and future. *Progress in Materials Science.* 2011 ; 56 : 1178–1271.

- [14] Chua, C.K. and Pumera, M. Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint. *Chem Soc Rev.* 2014 ; 43 : 291-312.
- [15] Wikipedia®. ไฟฟ้าสถิต 2016 [10 May 2016]. Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/ไฟฟ้าสถิต>.
- [16] บริษัทมิซูมิ ประเทศไทย จำกัด. MISUMI Technical knowledge : วัสดุในงานเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตย์ (Anti-static material) 2559 [10 May 2016]. Available from: http://th.misumi-ec.com/maker/misumi/mech/campaign/email20121108/Antistatic_material.html.
- [17] Fowler Associates Inc. ESD BAGS: TO SHIELD OR NOT TO SHIELD 2011 [10 May 2016]. Available from: <http://www.esdjournal.com/techpaper/ryne/esdbags.htm>.
- [18] PackagingKnowledge. Antistatic Bags & Conductive Bags [10 May 2016]. Available from: http://www.packagingknowledge.com/Anti_Static_Bags.asp.
- [19] งามทิพย์ ภู่วโรดม. วัสดุอ่อนตัวสำหรับการบรรจุ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์บริษัท อีพีโพรเอป จำกัด; 2557.
- [20] MEGA Machinery Mould Co. Plastic Processing Methode Types 2009 [10 May 2016]. Available from: <http://www.megamould.com/TechBlog/Mold-Design>.
- [21] ชีรวุฒิ เพชรเย็น. เอกสารประกอบการสอนวิชาการแปรรูปวัสดุชีวฐาน (Bio-Based Materials Processing). กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2554.
- [22] Corparation Ep. Manufacturing Processes [10 May 2016]. Available from: <http://www.extrapackaging.com/polyurethane/whatispolyurethane.php>.
- [23] Twister Technology Inc. Compression Molding [10 May 2016]. Available from: <http://twistertechnology.com/Process%20Capabilities.html#Top>.
- [24] Offman W. Preparation of Graphitic Oxide. PREPARATION OF GRAPHITIC OXIDE 1958 ; 1339.
- [25] Stankovich, S., Dikin, D.A., Piner, R.D., Kohlhaas, K.A., Kleinhammes, A. and Jia, Y. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. *Carbon.* 2007 ; 45 : 1558–1565.
- [26] Fernández-Merino ,M.J., Guardi, L., Paredes, J.I., Villar-Rodil, S., Solís-Fernández, P. and Martínez-Alonso, A., Vitamin C Is an Ideal Substitute for Hydrazine in the Reduction of Graphene Oxide Suspensions. *Journal of Physical Chemistry C.* 2010 ; 114 : 6426–6432.

- [27] Ali, F.B. and Mohan, R. Thermal, Mechanical, and Rheological Properties of Biodegradable Polybutylene Succinate/Carbon Nanotubes Nanocomposites. POLYMER COMPOSITES. 2010 ; 31 : 1309-1314.
- [28] Pinto, A.M., Cabral, J., Tanaka, D., Mendes, A. and Magalhães, F.D. Effect of incorporation of graphene oxide and graphene nanoplatelets on mechanical and gas permeability properties of poly(lactic acid) films. Polymer International. 2013 ; 62 : 33-40.
- [29] Wan, C. and Chen, B. Reinforcement of Biodegradable Poly(butylene succinate) with Low Loadings of Graphene Oxide. Journal of Applied Polymer Science. 2013 ; 127 : 5094-5099.
- [30] Wang, X., Yang, H., Song, L., Hu, Y., Xing, W. and Lu, H. Morphology, mechanical and thermal properties of graphene-reinforced poly(butylene succinate) nanocomposites. Composites Science and Technology. 2011 ; 72 : 1-6.
- [31] TECOTEC. X-ray Photoelectron Spectrometer 2015 [10 May 2016]. Available from: <http://tecotec.com.vn/en/xray-photoelectron-spectrometer/>.
- [32] Institute of Ceramics and Building Materials. SCIENTIFIC AND RESEARCH EQUIPMENT 2013 [10 May 2016]. Available from: http://icimb.pl/centrala_en/bioceramics/bioceramics-scientific-and-research-equipment.
- [33] ACADEMY N. Thermogravimetric Analysis 2015 [10 May 2016]. Available from: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/thermogravimetric-analysis/tg-209-f3-tarsus/>.
- [34] Andreasson, E., Mehmood, N. and Kao-Walter, S. Trouser tear tests of two thin polymer films 2013 [10 May 2016]. Available from: <http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/ICF/icf13/paper/viewFile/11465/10844>.
- [35] Wikipedia®. Electrical resistivity and conductivity 2016 [10 May 2016]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity_and_conductivity.
- [36] Guo, H.L., Wang, X.F., Qian, Q.Y., Wang, F.B. and Xia, X.H. A Green Approach to the Synthesis of Graphene Nanosheets. ACS NANO. 2009 ; 3 : 2653-2659.
- [37] PENG, S., FAN, X., LI, S. and ZHANG, J. GREEN SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF GRAPHITE OXIDE BY ORTHOGONAL EXPERIMENT. Journal of the Chilean Chemical Society. 2013 ; 4 : 2213-2217.

- [38] Garg, B., Bisht, T. and Ling, Y.C. Graphene-Based Nanomaterials as Heterogeneous Acid Catalysts: A Comprehensive Perspective. *Molecules* 2014 ; 19 : 14582-14613.
- [39] Jiali, Z., Haijun, Y., Guangxia, S., Ping, C., Zhang, J. and Guo, S. Reduction of graphene oxide via L-ascorbic acid. *CHEMICAL COMMUNICATIONS*. 2010 ; 46 : 1112-1124.
- [40] Yuxia, S., Tao-Jing, W.R., Jiwei, Z., Zhi-Guo, Jiang., Yu, Z. and Dasari, A. Chemical and thermal reduction of graphene oxide and its electrically conductive polylactic acid nanocomposites. *Composites Science and Technology*. 2012 ; 72 : 1430–1435.
- [41] Ryszard, F., Marta, G., Czesław S', L., Fryczkowska, B. and Janicki, J. The possibility of obtaining graphene/polymer composites from graphene oxide by a one step process. *Composites Science and Technology*. 2013 ; 80 : 87–92.
- [42] Liao, K.H., Mittal, A., Bose, S., Leighto, N.C., Mkhoyan, K.A. and Macosko, C.W. Aqueous Only Route toward Graphene from Graphite Oxide. *ACS NANO*. 2011 ; 5 : 1253-1258.
- [43] Loryuenyong, V., Totepvimarn, K., Eimburanaprat, P., Boonchompoo, W. and Buasri, A. Preparation and Characterization of Reduced Graphene Oxide Sheets via Water-Based Exfoliation and Reduction Methods. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013 ; 1-5.
- [44] Martinez, U., Dumont, J.H., Holby, E.F., Artyushkova, K., Purdy, G.M. and Singh, A. Critical role of intercalated water for electrocatalytically active nitrogen-doped graphitic systems. *MATERIALS SCIENCE*. 2016 ; 1-6.
- [45] Du, X.C., Xu, X.L., Liu, X.H., Yang, J.h., Wang, Y. and Gao, X.L.. Graphene oxide induced crystallization and hydrolytic degradation of poly(butylene succinate). *Polymer Degradation and Stability*. 2016 ; 123 : 94-104.
- [46] Pallathadka, P.K., Koh, X.Q., Khatta, A., Luckachan, G.E. and Mittal, V. Characteristics of Biodegradable Poly(butylene succinate) Nanocomposites With Thermally Reduced Graphene Nanosheets. *POLYMER COMPOSITES*. 2015 ; 1-7.
- [47] Wang, X.W., Zhang, C.A., Wang, P.L., Zhao, J., Zhang, W. and Ji, JH. Enhanced Performance of Biodegradable Poly(butylene succinate)/ Graphene Oxide Nanocomposites via in Situ Polymerization. *Langmuir*. 2012 ; 28 : 7091-7095.

- [48] Sathansatit, K., Chousakul, S., Ouajai, W.P., and Ouajai, S. Mechanical, thermal and electrical properties of LLDPE filled with polypyrrole and carbonblack. The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok. 2011 ; 21 : 350-356.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ขนาดอนุภาครีติวซ์แกรฟีนออกไซด์

ตาราง ก-1 การกระจายตัวของอนุภาครีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ในคลอโรฟอร์ม

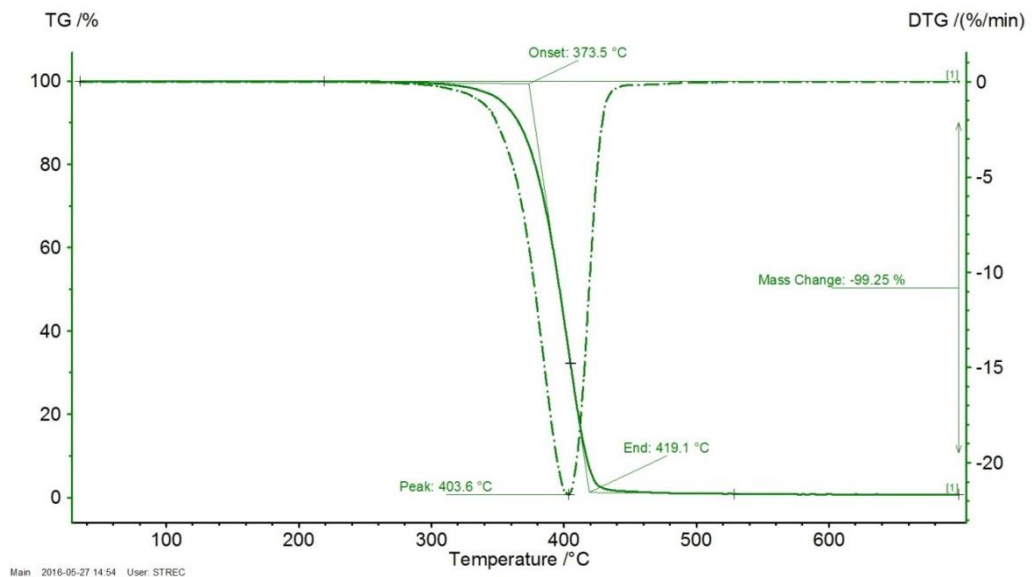
| ขนาด (μm) | ปริมาณ % | ขนาด (μm) | ปริมาณ % |
|-----------|----------|-----------|----------|
| 0.010 | 0.00 | 0.550 | 0.00 |
| 0.011 | 0.00 | 0.631 | 0.00 |
| 0.013 | 0.00 | 0.724 | 0.00 |
| 0.015 | 0.00 | 0.832 | 0.00 |
| 0.017 | 0.00 | 0.955 | 0.00 |
| 0.020 | 0.00 | 1.096 | 0.00 |
| 0.023 | 0.00 | 1.259 | 0.00 |
| 0.026 | 0.00 | 1.445 | 0.00 |
| 0.030 | 0.00 | 1.660 | 0.00 |
| 0.035 | 0.00 | 1.905 | 0.00 |
| 0.040 | 0.00 | 2.188 | 0.00 |
| 0.046 | 0.00 | 2.512 | 0.00 |
| 0.052 | 0.00 | 2.884 | 0.00 |
| 0.060 | 0.00 | 3.311 | 0.00 |
| 0.069 | 0.00 | 3.802 | 0.63 |
| 0.079 | 0.00 | 4.365 | 3.10 |
| 0.091 | 0.00 | 5.012 | 6.43 |
| 0.105 | 0.00 | 5.754 | 10.61 |
| 0.120 | 0.00 | 6.607 | 14.92 |
| 0.138 | 0.00 | 7.586 | 18.06 |
| 0.158 | 0.00 | 8.710 | 18.55 |
| 0.182 | 0.00 | 10.000 | 15.52 |
| 0.209 | 0.00 | 11.482 | 9.49 |
| 0.240 | 0.00 | 13.183 | 2.51 |
| 0.275 | 0.00 | 15.136 | 0.19 |
| 0.316 | 0.00 | 17.378 | 0.00 |
| 0.363 | 0.00 | 19.953 | 0.00 |
| 0.417 | 0.00 | 22.909 | 0.00 |
| 0.479 | 0.00 | 26.303 | 0.00 |

| ขนาด (μm) | ปริมาณ % | ขนาด (μm) | ปริมาณ % |
|------------------------|----------|------------------------|----------|
| 30.200 | 0.00 | 181.970 | 0.00 |
| 34.674 | 0.00 | 208.930 | 0.00 |
| 39.811 | 0.00 | 239.883 | 0.00 |
| 45.709 | 0.00 | 275.423 | 0.00 |
| 52.481 | 0.00 | 316.228 | 0.00 |
| 60.256 | 0.00 | 363.078 | 0.00 |
| 69.183 | 0.00 | 416.869 | 0.00 |
| 79.433 | 0.00 | 478.630 | 0.00 |
| 91.201 | 0.00 | 549.541 | 0.00 |
| 104.713 | 0.00 | 630.957 | 0.00 |
| 120.226 | 0.00 | 724.436 | 0.00 |
| 138.038 | 2.51 | 831.764 | 0.00 |
| 158.489 | 0.19 | 954.993 | 0.00 |
| 181.970 | 0.00 | 1096.478 | 0.00 |
| 208.930 | 0.00 | 1258.925 | 0.00 |
| 239.883 | 0.00 | 1445.440 | 0.00 |
| 275.423 | 0.00 | 1659.587 | 0.00 |
| 316.228 | 0.00 | 1905.461 | 0.00 |
| 363.078 | 0.00 | 2187.762 | 0.00 |
| 416.869 | 0.00 | 2511.886 | 0.00 |
| 478.630 | 0.00 | 2884.032 | 0.00 |
| 549.541 | 0.00 | 3311.311 | 0.00 |
| 630.957 | 0.00 | 3801.894 | 0.00 |
| 724.436 | 0.00 | 4365.158 | 0.00 |
| 831.764 | 0.00 | 5011.872 | 0.00 |
| 954.993 | 0.00 | 5754.399 | 0.00 |
| 1096.478 | 0.00 | 6606.934 | 0.00 |
| 1258.925 | 0.00 | 7585.776 | 0.00 |
| 138.038 | 0.00 | 8709.636 | 0.00 |
| 158.489 | 0.00 | 10000.000 | 0.00 |

ภาคผนวก ข

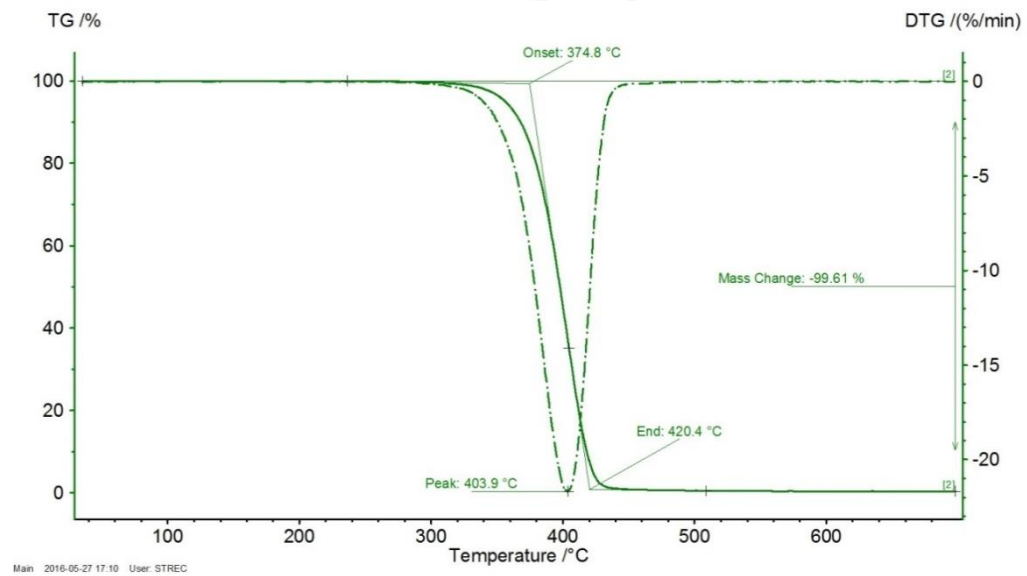
TGA Thermogram ของฟิล์มคอมพอลิเมอร์

1. พอลิไพลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์



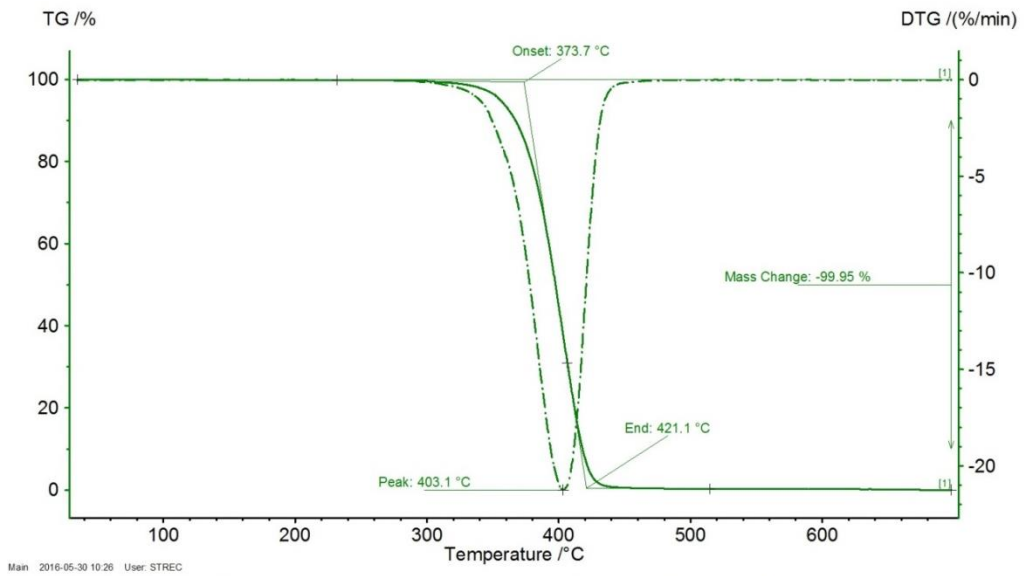
รูปที่ ข-1 เทอร์โมแกรมของ PBS

2. 0.25% ไรติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิไพลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์



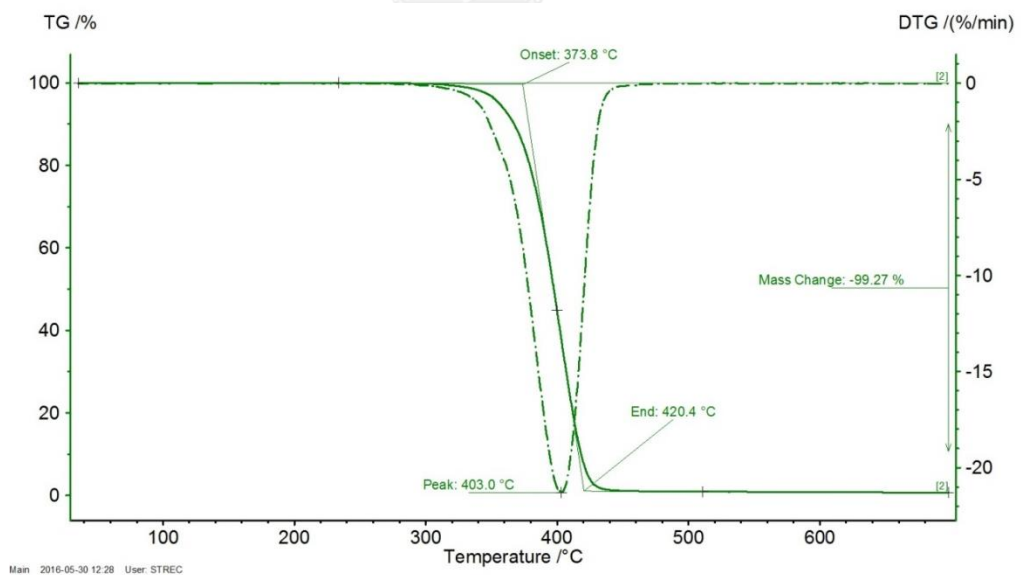
รูปที่ ข-2 เทอร์โมแกรมของ 0.25% ไรติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิไพลีนซัคซิเนตคอมพอลิเมอร์

3. 0.50% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



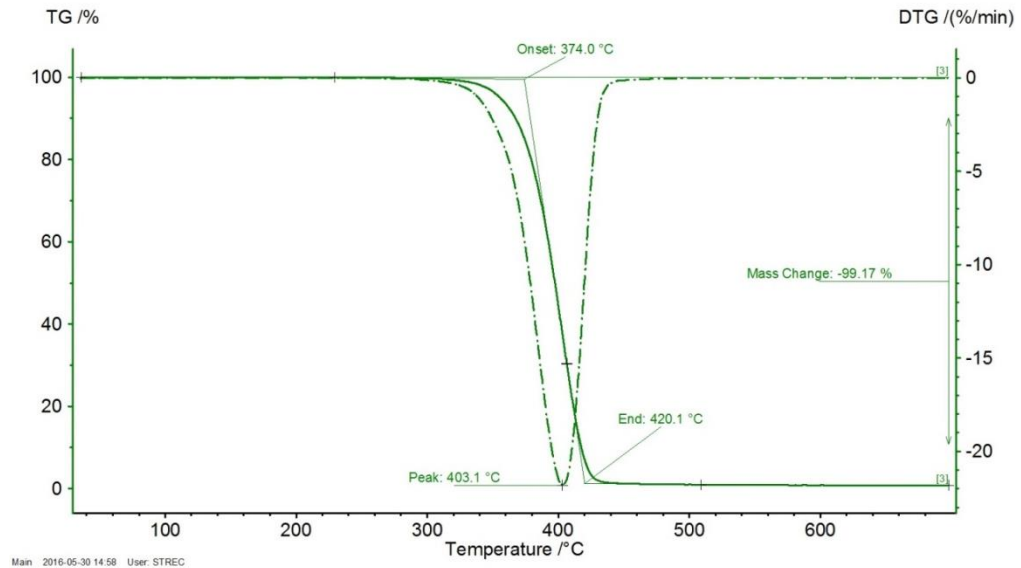
รูปที่ ข-3 เทอร์โมแกรมของ 0.50% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต

4. 0.75% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



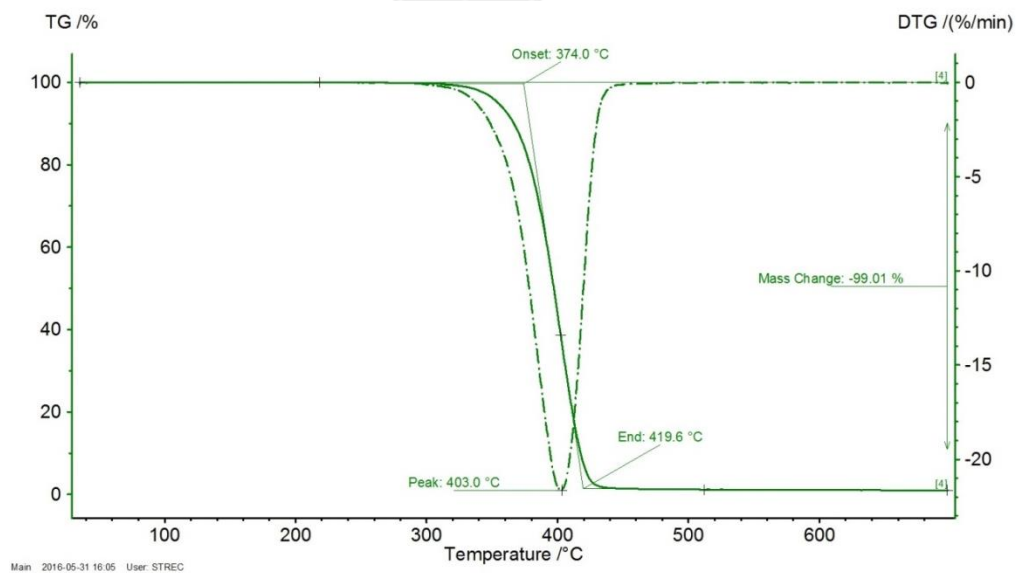
รูปที่ ข-4 เทอร์โมแกรมของ 0.75% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต

5. 1.00% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



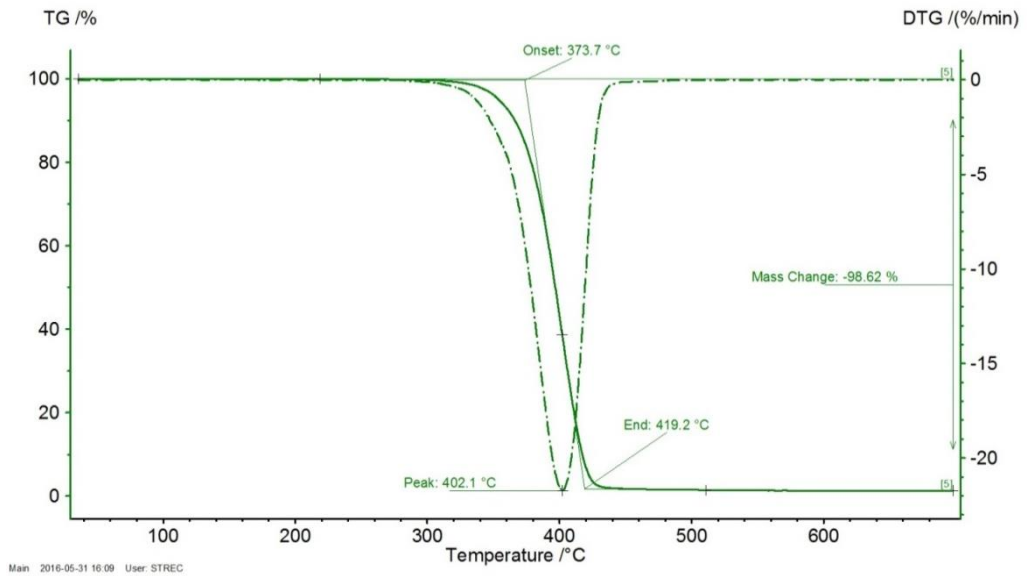
รูปที่ ข-5 เทอร์โมแกรมของ 1.00% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต

6. 1.50% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



รูปที่ ข-6 เทอร์โมแกรมของ 1.50% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต

7. 2.00% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



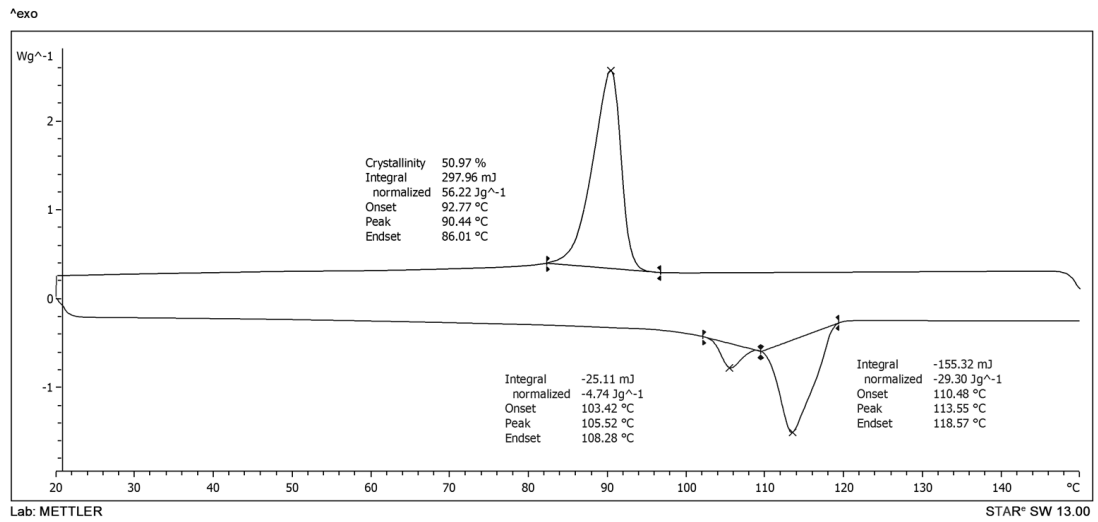
รูปที่ ข-7 เทอร์โมแกรมของ 2.00% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



ภาคผนวก ค

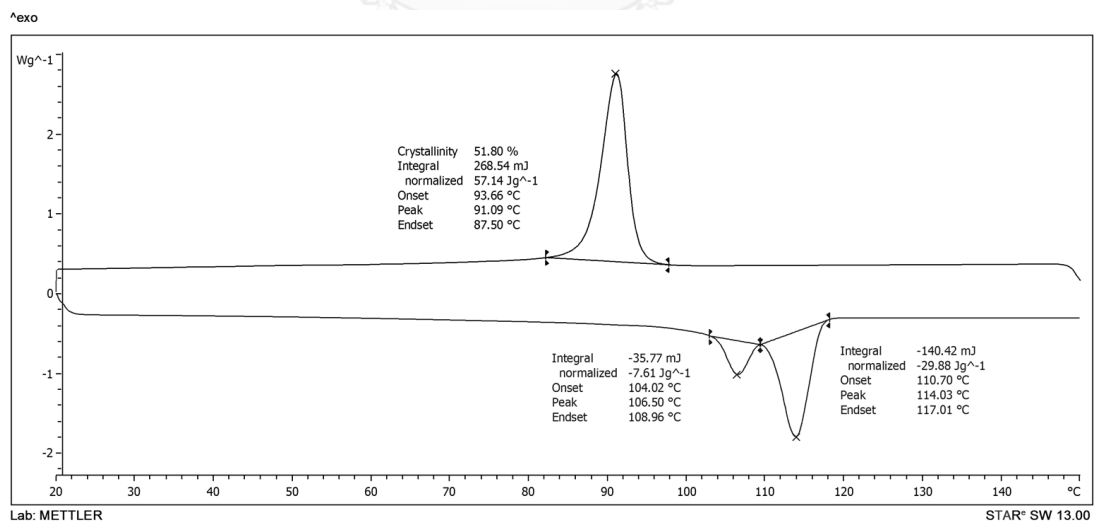
DSC Thermogram (Second heat) ของฟิล์มคอมพอลิต

1. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์



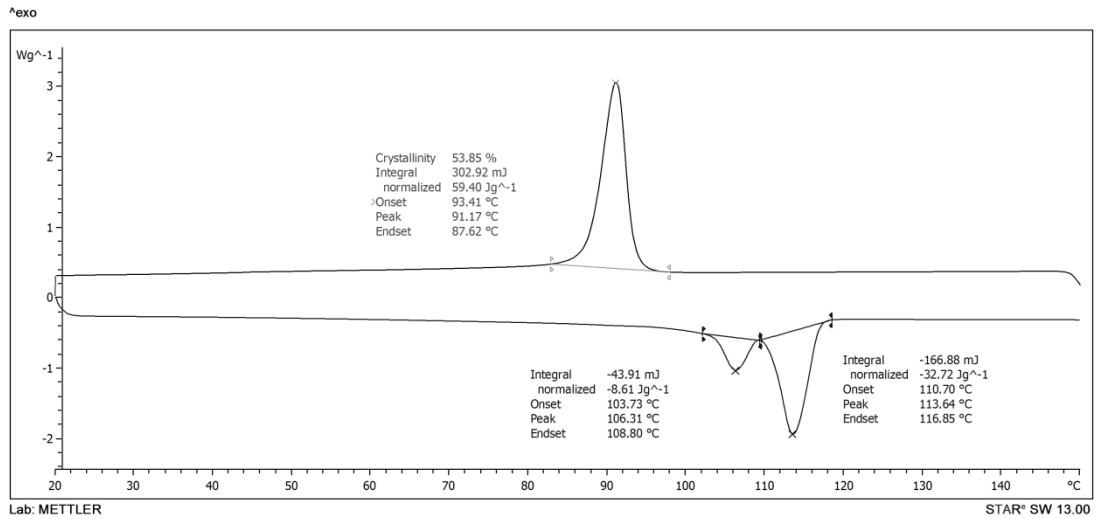
รูปที่ ค-1 เทอร์โมแกรมของ PBS

2. 0.25% ไรติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



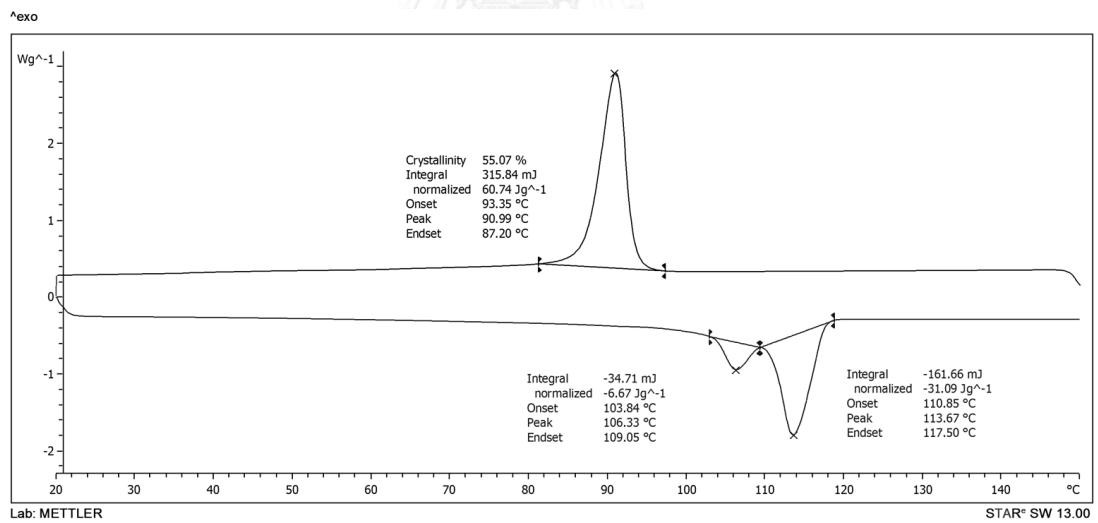
รูปที่ ค-2 เทอร์โมแกรมของ 0.25% ไรติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต

3. 0.50% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



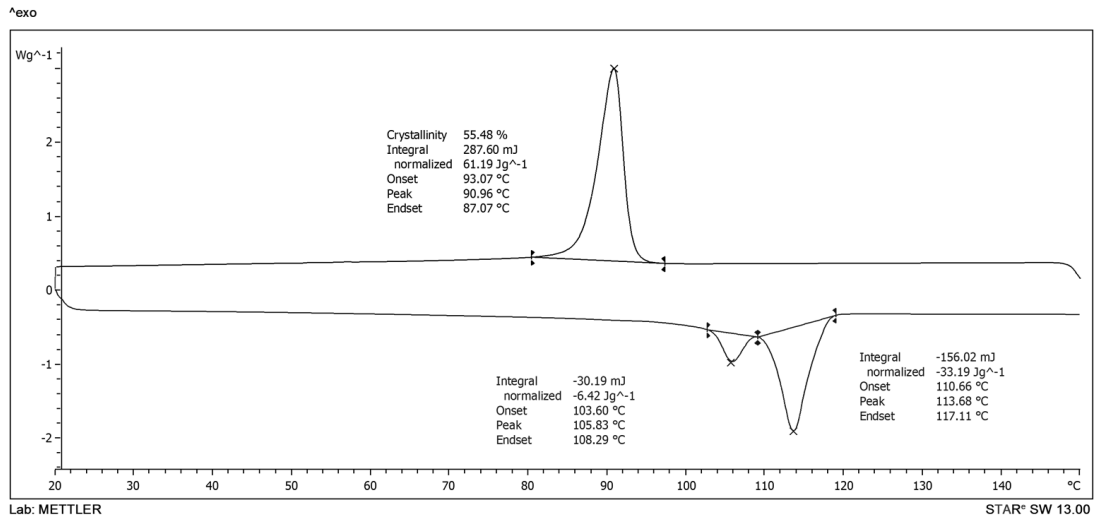
รูปที่ ค-3 เทอร์โมแกรมของ 0.50% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต

4. 0.75% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



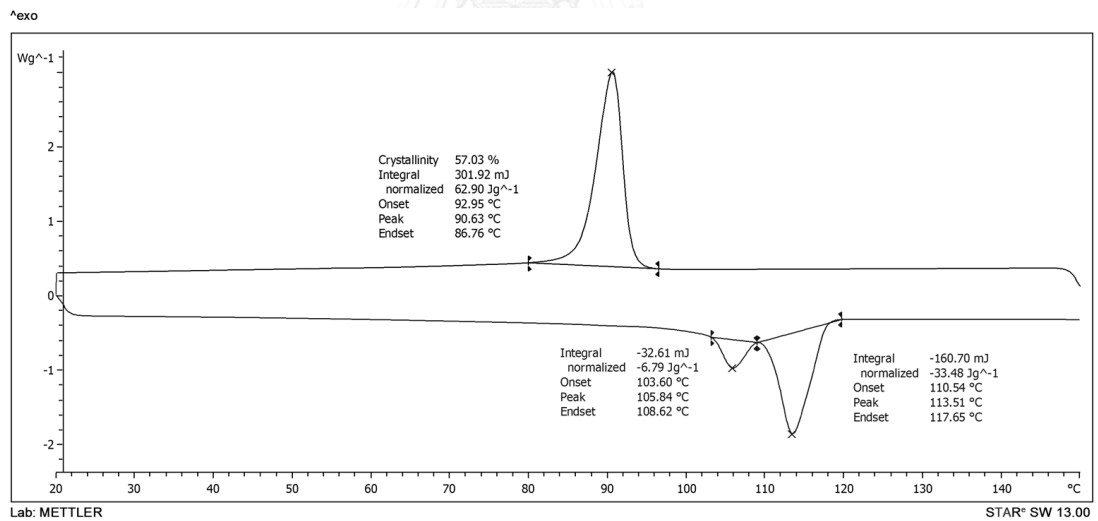
รูปที่ ค-4 เทอร์โมแกรมของ 0.75% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต

5. 1.00% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



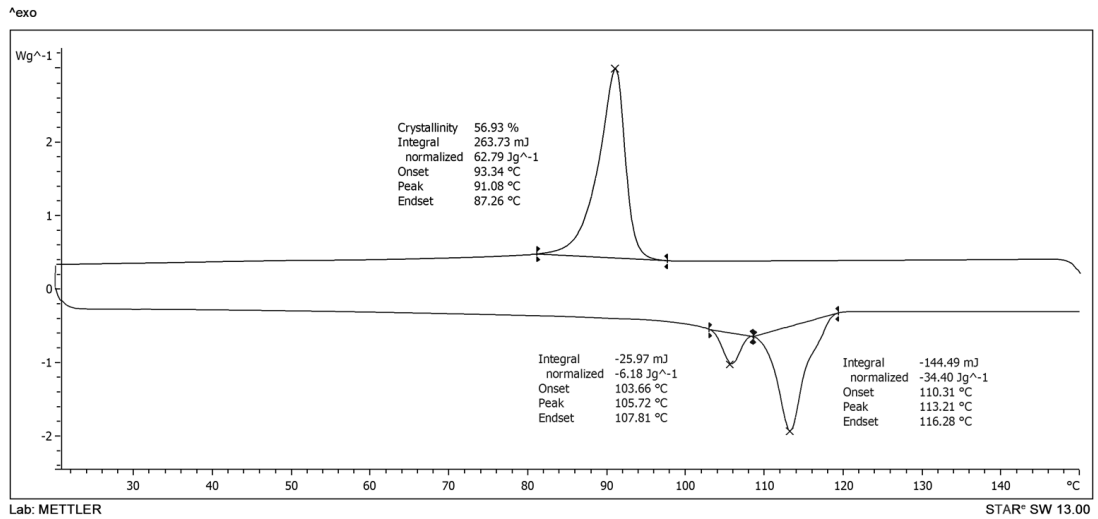
รูปที่ ค-5 เทอร์โมแกรมของ 1.00% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต

6. 1.50% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต



รูปที่ ค-6 เทอร์โมแกรมของ 1.50% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลิต

7. 2.00% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลสิต



รูปที่ ค-7 เทอร์โมแกรมของ 2.00% รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอลสิต



ภาคผนวก ง

สมบัติเชิงกลของของฟิล์มคอมพอสิต

ตาราง ง-1 ความทนแรงดึงของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

| Sample | Tensile strength (MPa) | | | | | | |
|---------------|------------------------|------|------|------|------|---------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average | SD |
| Neat PBS | 23.8 | 22.4 | 25.3 | 22.0 | 24.3 | 24.3 | 1.5 |
| 0.25% RGO/PBS | 26.5 | 25.9 | 25.5 | 24.5 | 24.9 | 25.5 | 0.8 |
| 0.50% RGO/PBS | 27.1 | 27.1 | 24.2 | 29.4 | 27.9 | 27.1 | 1.9 |
| 0.75% RGO/PBS | 29.4 | 28.3 | 28.5 | 28.3 | 25.5 | 28.0 | 1.5 |
| 1.00% RGO/PBS | 28.8 | 28.1 | 27.3 | 27.9 | 28.4 | 28.1 | 0.6 |
| 1.50% RGO/PBS | 28.4 | 29.8 | 29.1 | 29.8 | 27.8 | 29.0 | 0.9 |
| 2.00% RGO/PBS | 31.2 | 31.0 | 28.2 | 30.0 | 30.1 | 30.1 | 1.2 |

ตาราง ง-2 ความทนแรงดึงของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

| Sample | Tensile strength (MPa) | | | | | | |
|---------------|------------------------|------|------|------|------|---------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average | SD |
| Neat PBS | 21.1 | 21.3 | 21.9 | 21.5 | 21.6 | 21.5 | 0.3 |
| 0.25% RGO/PBS | 24.9 | 26.0 | 25.2 | 24.2 | 24.5 | 25.0 | 0.7 |
| 0.50% RGO/PBS | 26.8 | 24.6 | 27.9 | 27.5 | 24.4 | 26.2 | 1.6 |
| 0.75% RGO/PBS | 28.2 | 26.8 | 25.9 | 26.2 | 27.6 | 26.9 | 1.0 |
| 1.00% RGO/PBS | 27.7 | 27.3 | 29.3 | 28.7 | 26.5 | 27.9 | 1.1 |
| 1.50% RGO/PBS | 26.3 | 27.6 | 28.4 | 26.4 | 26.6 | 27.1 | 0.9 |
| 2.00% RGO/PBS | 27.4 | 30.7 | 30.8 | 28.1 | 30.0 | 29.4 | 1.6 |

ตาราง ง-3 ยั่งส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซึกซีเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซึกซีเนตคอมพอสิตไน
ทิสทางตามแนวเครื่องจักร

| Sample | Young's Modulus (MPa) | | | | | | |
|---------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average | SD |
| Neat PBS | 848.3 | 762.2 | 716.4 | 748.1 | 743.5 | 763.7 | 50.1 |
| 0.25% RGO/PBS | 733.9 | 798.0 | 831.0 | 827.9 | 764.0 | 791.0 | 41.8 |
| 0.50% RGO/PBS | 1111.9 | 809.7 | 1127.6 | 943.1 | 1179.9 | 1034.5 | 153.9 |
| 0.75% RGO/PBS | 982.9 | 1034.0 | 1168.8 | 956.5 | 1081.5 | 1044.7 | 84.4 |
| 1.00% RGO/PBS | 1013.3 | 1043.6 | 1049.8 | 1092.2 | 1067.1 | 1053.2 | 29.2 |
| 1.50% RGO/PBS | 1045.1 | 1124.2 | 937.2 | 973.4 | 1154.7 | 1046.9 | 93.6 |
| 2.00% RGO/PBS | 1279.3 | 1085.3 | 1010.7 | 1199.3 | 922.8 | 1099.5 | 142.8 |

ตาราง ง-4 ยั่งส์มอดุลัสของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซึกซีเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซึกซีเนตคอมพอสิตไน
ทิสทางขวางแนวเครื่องจักร

| Sample | Young's Modulus (MPa) | | | | | | |
|---------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average | SD |
| Neat PBS | 880.5 | 784.1 | 893.6 | 838.4 | 885.6 | 856.4 | 45.7 |
| 0.25% RGO/PBS | 990.4 | 1034.6 | 1017.2 | 1121.9 | 1123.3 | 1057.5 | 61.5 |
| 0.50% RGO/PBS | 1034.6 | 1017.2 | 1121.9 | 938.9 | 1123.3 | 1047.2 | 77.7 |
| 0.75% RGO/PBS | 1045.2 | 1083.7 | 1152.0 | 1062.4 | 1122.1 | 1093.1 | 43.7 |
| 1.00% RGO/PBS | 1127.4 | 1053.2 | 1081.4 | 1152.1 | 1102.5 | 1103.3 | 38.6 |
| 1.50% RGO/PBS | 1155.2 | 1174.2 | 1191.5 | 1166.3 | 1139.3 | 1165.3 | 19.7 |
| 2.00% RGO/PBS | 1171.0 | 1514.0 | 1379.7 | 1303.1 | 1175.5 | 1308.7 | 144.9 |

ตาราง ง-5 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต
ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

| Sample | Elongation at break (%) | | | | | | |
|---------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|---------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average | SD |
| Neat PBS | 6.6 | 7.9 | 8.2 | 7.4 | 8.2 | 7.7 | 0.7 |
| 0.25% RGO/PBS | 7.1 | 7.5 | 7.6 | 6.6 | 7.2 | 7.2 | 0.4 |
| 0.50% RGO/PBS | 5.7 | 6.1 | 5.6 | 6.6 | 5.7 | 5.9 | 0.4 |
| 0.75% RGO/PBS | 5.3 | 5.8 | 5.4 | 5.8 | 5.7 | 5.6 | 0.2 |
| 1.00% RGO/PBS | 5.9 | 5.1 | 5.3 | 5.5 | 5.8 | 5.5 | 0.3 |
| 1.50% RGO/PBS | 5.8 | 5.8 | 5.6 | 5.6 | 5.5 | 5.6 | 0.1 |
| 2.00% RGO/PBS | 5.4 | 4.5 | 5.5 | 5.6 | 4.9 | 5.2 | 0.4 |

ตาราง ง-6 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต
ในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

| Sample | Elongation at break (%) | | | | | | |
|---------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|---------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average | SD |
| Neat PBS | 5.8 | 5.9 | 5.3 | 5.9 | 5.7 | 5.7 | 0.3 |
| 0.25% RGO/PBS | 4.3 | 4.3 | 4.8 | 4.5 | 4.7 | 4.5 | 0.2 |
| 0.50% RGO/PBS | 4.8 | 4.2 | 4.8 | 3.9 | 4.6 | 4.5 | 0.4 |
| 0.75% RGO/PBS | 4.3 | 4.4 | 4.4 | 4.0 | 4.2 | 4.2 | 0.1 |
| 1.00% RGO/PBS | 4.0 | 4.4 | 4.5 | 4.5 | 4.0 | 4.3 | 0.3 |
| 1.50% RGO/PBS | 4.2 | 4.3 | 4.0 | 3.9 | 3.8 | 4.1 | 0.2 |
| 2.00% RGO/PBS | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.6 | 3.9 | 0.2 |

ตาราง ง-7 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิต
ในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

| Sample | Tear strength (MPa) | | | | | | |
|---------------|---------------------|------|------|------|------|---------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average | SD |
| Neat PBS | 17.5 | 17.5 | 17.7 | 18.2 | 17.1 | 17.6 | 0.4 |
| 0.25% RGO/PBS | 17.1 | 16.5 | 17.0 | 16.8 | 15.7 | 16.6 | 0.6 |
| 0.50% RGO/PBS | 16.7 | 16.5 | 16.7 | 16.6 | 16.1 | 16.5 | 0.3 |
| 0.75% RGO/PBS | 14.9 | 15.8 | 15.3 | 15.3 | 13.6 | 15.0 | 0.8 |
| 1.00% RGO/PBS | 14.2 | 14.1 | 14.6 | 15.1 | 15.0 | 14.6 | 0.5 |
| 1.50% RGO/PBS | 13.2 | 14.7 | 13.7 | 14.3 | 15.4 | 14.3 | 0.9 |
| 2.00% RGO/PBS | 12.3 | 11.8 | 12.4 | 12.7 | 11.7 | 12.2 | 0.4 |

ตาราง ง-8 ความทนแรงฉีกขาดของฟิล์มรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมพอสิตใน
ทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

| Sample | Tear strength (MPa) | | | | | | |
|---------------|---------------------|------|------|------|------|---------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average | SD |
| Neat PBS | 23.7 | 23.4 | 22.8 | 23.8 | 21.8 | 23.1 | 0.8 |
| 0.25% RGO/PBS | 23.1 | 23.6 | 21.7 | 20.6 | 24.8 | 22.8 | 1.7 |
| 0.50% RGO/PBS | 21.2 | 19.4 | 19.2 | 19.3 | 24.5 | 20.7 | 2.2 |
| 0.75% RGO/PBS | 20.9 | 20.6 | 17.6 | 20.9 | 18.4 | 19.7 | 1.5 |
| 1.00% RGO/PBS | 18.7 | 20.4 | 18.7 | 20.0 | 19.1 | 19.4 | 0.8 |
| 1.50% RGO/PBS | 17.9 | 16.3 | 18.3 | 18.5 | 17.5 | 17.7 | 0.8 |
| 2.00% RGO/PBS | 16.3 | 17.1 | 17.0 | 17.1 | 16.3 | 16.8 | 0.4 |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวแพรวพณิต น่วมเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 15 กันยายน พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาตรี จากหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2556 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยา
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2557 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2558

การเสนอผลงานวิจัย จากงานวิทยานิพนธ์ มีดังนี้

N. Praewpanit and P. Pranut. Preparation and Properties of Reduced
Graphene Oxide/Poly(Butylene Succinate) Nanocomposites For Antistatic
Packaging Application. Asian Conference on Engineering and Natural Sciences
(ACENS), Fukuoka Japan, 2016.

