

โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

นาโนคอมโพสิตชนิดใหม่ของเอบีเอสและแกรฟีนสำหรับการพิมพ์สามมิติแบบหลอมเหลว
(A Novel ABS/Graphene Nanocomposite for FDM 3D Printing)

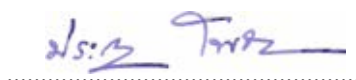
เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

โดย

1. นายกิตตินนท์ สกุลโภคทรัพย์ เลขประจำตัว 5833204323
2. นายภูมิภัทร์ ก้องเกรียงไกร เลขประจำตัว 5833256023

อนุมัติโดย



(ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ปีการศึกษา 2561

หัวข้องานวิจัย	นาโนคอมโพสิตชนิดใหม่ของเอปียเอสและแกรฟีนสำหรับการพิมพ์สามมิติแบบหลอมเหลว
โดย	นายกิตตินนท์ สกกุลโภคทรัพย์ เลขประจำตัว 5833204323 นายภูมิภัทร์ ก้องเกรียงไกร เลขประจำตัว 5833256023
สาขาวิชา	เซรามิกและวัสดุศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบระหว่างเอปียเอสและแกรฟีน เพื่อใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในเครื่องใช้ไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ โดยเริ่มจากการเตรียมแกรฟีนจากผงแกรไฟต์ด้วยวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีของฮัมเมอร์ หลังจากนั้นนำแกรฟีนที่เตรียมได้มาผสมกับเอปียเอสด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีแกรฟีนความเข้มข้นสูง แล้วจึงนำมาผสมกับเม็ดพลาสติกเอปียเอสบริสุทธิ์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่เพื่อขึ้นรูปเป็นเส้นวัสดุเชิงประกอบสำหรับการพิมพ์สามมิติ โดยจะทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความสามารถในการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (printability) ของเส้นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ เช่น สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล เป็นต้น นอกจากนี้จะทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา รวมไปถึง สมบัติทางไฟฟ้า ของชิ้นงานจากวัสดุเชิงประกอบที่พัฒนาขึ้นซึ่งทำการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ ผลการทดลองพบว่า วิธีการผสมแกรฟีนกับเอปียเอสเพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีแกรฟีนความเข้มข้นสูงพบว่า วิธีการระเหยตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้อง ได้ขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติที่มีคุณสมบัติด้านแรงดึงที่ดีที่สุด รวมถึงสมบัติดัชนีการลอมไหล ผลของการเติมอนุภาคแกรฟีนลงไปในเอปียเอสต่อสมบัติของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ พบว่าเมื่อปริมาณการเติมแกรฟีน 1 ส่วนต่อพอลิเมอร์ 100 ส่วน ชิ้นทดสอบจะมีสมบัติด้านแรงดึงและความทนแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้น และลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณแกรฟีนตั้งแต่ 3 ส่วนต่อพอลิเมอร์ 100 ส่วนขึ้นไป และชิ้นงานที่เติมแกรฟีนมีดัชนีการลอมไหล และอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงขึ้น อีกทั้งยังสามารถช่วยเพิ่มสมบัติต้านไฟฟ้าสถิตให้กับวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนแอกไซด์ได้

Title	A Novel ABS/Graphene Nanocomposite for FDM 3D Printing	
Authors	Kittinon Sakunphokesup	Student ID 5833202023
	Poomipat Kongkrekri	Student ID 5833205023
Department	Materials Science	
Advisor	Prof. Dr. Pranut Potiyaraj	
Academic Year	2018	

Abstract

In this research we focus on the development of ABS with graphene composite materials for using in the production of electronic components in electrical appliances by 3D printing. By starting with the preparation of graphene from graphite powder in a modified Hummer's method. After that, the graphene is mixed with ABS with 3 different techniques to obtain composite materials with high concentration graphene and then mixed with pure ABS by twin screw extruder to form a composite material for 3D printing. By studying various properties including the printability of prepared material filaments such as thermal properties, melt flow rate etc. In addition, mechanical properties, morphology and electrical properties of the specimens from the developing composite material by 3D printing are studied. The results showed that graphene and ABS blending methods composite materials by solvent evaporation methods at room temperature to obtain high concentration graphene. The specimens that are molded by 3D printing have the best tensile and melt flow index properties. The results of the properties of the 3D printing specimens by adding graphene to the ABS showed that when the amount of graphene was added 1 phr polymers will increase tensile and impact strength properties and decreasing when increase the amount of graphene from 3 parts or more per 100 polymers but increase the melt flow index and decomposition temperature. And also help to increase the antistatic properties for polylactic acid composite materials.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยการพัฒนาวัดดุเชิงประกอบระหว่างเอบีเอสและแกรฟีนสำหรับการพิมพ์สามมิติจะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ดีหากปราศจากความช่วยเหลือ คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางแก้ปัญหาต่างๆ จากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน อาจารย์ ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ดร.ชวันชม อ่วมเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานร่วม ที่ช่วยดำเนินการและอำนวยความสะดวกในการตรวจสอบคุณลักษณะของชิ้นงานจากงานวิจัยทั้งในส่วนของทฤษฎีและการทดลอง และขั้นตอนการปฏิบัติการต่างๆ

ขอขอบคุณ นายอภิวัฒน์ พงศ์วิสุทธิรักษ์ รุ่นพี่นิสิตปริญญาเอกภาควิชาวัสดุศาสตร์ที่ให้คำแนะนำระหว่างทำการทดลอง แบ่งปันประสบการณ์การทำวิจัย และสอนใช้เครื่องมือต่างๆในห้องทดลอง

คณะผู้วิจัย

กิตตินนท์ สกุลโภคทรัพย์

ภูมิภัทร์ ก้องเกรียงไกร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์	3
2.1 อะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene)	3
2.2 แกรฟีน (Graphene)	6
2.3 การพิมพ์สามมิติ (3D Printing)	10
2.4 วัสดุเชิงประกอบ (composite)	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	20
3.1 สารเคมีที่เกี่ยวข้อง	20
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม และขึ้นรูป	20
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติ	20
3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง	21
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	22

3.5.1 การเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) จากแกรไฟต์	22
3.5.2 การเตรียมแกรฟีน (Graphene) จากแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide)	22
3.5.3 การเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของเอบีเอส/แกรฟีน	23
3.5.4 เตรียมเส้นพลาสติกวัสดุเชิงประกอบของเอบีเอส/แกรฟีน	23
3.5.5 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยการพิมพ์สามมิติ	23
3.6 การวิเคราะห์ และทดสอบชิ้นงาน.....	24
3.6.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometry, FT-IR)	24
3.6.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	25
3.6.3 วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน.....	26
3.6.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	27
3.6.5 การทดสอบหาค่าดัชนีการลอมไพล์.....	27
3.6.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล	28
3.6.7 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	30
3.6.8 การศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า	30
บทที่ 4 ผลการทดลอง	31
4.1 สมบัติของแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน	31
4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	31
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และแกรฟีน ด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	34
4.2 เส้นวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ	37
4.2.1 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของเส้นวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/เอบีเอส	

สำหรับการพิมพ์สามมิติภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	37
4.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี	39
4.2.3 การทดสอบหาค่าดัชนีการหลอมไหล	40
4.3 ผลของวิธีการผสมเส้นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรไฟีน/เอบีเอสต่อสมบัติเชิงกลของ ชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ	41
4.3.1 สมบัติด้านแรงดึง	41
4.4 ผลของสัดส่วนแกรไฟีนต่อสมบัติของเส้นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรไฟีน/เอบีเอส สำหรับการพิมพ์สามมิติ	45
4.4.1 การศึกษาผลของแกรไฟีนที่สัดส่วนต่างๆต่อการสลายตัวทางความร้อนของ เส้นวัสดุเชิงประกอบแกรไฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน	45
4.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี	47
4.4.3 การทดสอบหาค่าดัชนีการหลอมไหล	48
4.4.4 สมบัติด้านแรงดึง	49
4.4.5 สมบัติด้านความทนแรงกระแทก	52
4.4.6 สมบัติด้านการต้านไฟฟ้า	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุปผลการทดลอง	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
เอกสารอ้างอิง	55
ภาคผนวก	57

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบ FDM	13
ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบ การฉีดขึ้นรูป	13
ตารางที่ 2.3 สภาวะแบบต่างๆของชิ้นงานทดสอบที่นำไปทดสอบ	14
ตารางที่ 2.4 ค่า tensile strength, strain at tensile strength และ elastic modulus สำหรับชิ้นงานของ ABS และ PLA ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3มิติ	15
ตารางที่ 2.5 ผลการทดลองค่า Young's Modulus ต่อประมาณสัดส่วนแกรฟีนในวัสดุเชิงประกอบ	19
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของแกรฟีนต่อเอปียเอสในการเตรียมเส้นวัสดุเชิงประกอบ	24
ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขสำหรับการพิมพ์ชิ้นงานทดสอบเชิงกล	24
ตารางที่ 4.1 เลขคลื่นการสั่นของพันธะคาร์บอนในแกรฟีนออกไซด์	33
ตารางที่ 4.2 ค่ามุมการเลี้ยวเบน (2θ) และระยะห่างระหว่างชั้นของอนุภาค (D-spacing) ของแกรไฟต์ออกไซด์และแกรฟีน	36
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ	39
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเส้นวัสดุสำหรับการพิมพ์สามมิติ	40
ตารางที่ 4.5 ดัชนีการหลอมไหลของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ	41
ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ	46
ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเส้นวัสดุสำหรับการพิมพ์สามมิติ	48
ตารางที่ 4.8 ดัชนีการหลอมไหลของเส้นวัสดุสำหรับการพิมพ์สามมิติ	48

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ พอลิเมอร์เอบีเอส(อะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน)	3
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ โมโนเมอร์อะครีโลไนไตรล์, บิวทาไดอีน และ สไตรีน	3
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ ABS ที่มีผลต่อการดูดซับความชื้น	5
รูปที่ 2.4 การเตรียมพลาสติกเอบีเอสด้วยการทำเป็นพอลิเมอร์แบบผสม	5
รูปที่ 2.5 การเตรียมพลาสติกเอบีเอสด้วยวิธีการกราฟต์	6
รูปที่ 2.6 ภาพจำลองความแข็งแรงของแกรฟีนที่สามารถรองรับน้ำหนักผ่านพื้นที่เล็ก ๆ ได้ (ซ้าย) และความ เชื่อมโยงเชิงโครงสร้างของอีกรูปต่าง ๆ ของคาร์บอนผ่านโครงสร้าง 2 มิติของแกรฟีน (ขวา)	6
รูปที่ 2.7 แผนภาพจำลองการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยเทคนิค CVD และขั้นตอนการเคลื่อนย้ายแกรฟีน ที่สังเคราะห์ได้	8
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชัน	8
รูปที่ 2.9 การนำแกรฟีนไปใช้ในส่วนประกอบของ OLEDs	9
รูปที่ 2.10 ภาพแสดงผลที่มีสมบัติการโค้งงอจากแกรฟีน	9
รูปที่ 2.11 ภาพแสดงเครื่องFDM/FFF Printer, Material และ Print	11
รูปที่ 2.12 สรุปผลการทดสอบของชิ้นงานทดสอบรูปแบบ -P เมื่อเทียบกับการฉีดขึ้นรูป	14
รูปที่ 2.13 ภาพเปรียบเทียบเทอร์โมแกรมทางความร้อนจากเครื่อง TGA	16
รูปที่ 2.14 แผนภูมิการขั้นตอนการสังเคราะห์แกรฟีนจากงานวิจัย	17
รูปที่ 2.15 ภาพแสดงแกรฟีนผสมNMP, Gr layer, Extracted Gr	18
รูปที่ 2.16 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสารสกัดแกรฟีน	18
รูปที่ 2.17 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของวัสดุเชิงประกอบเอบีเอส/แกรฟีน ที่สกัดส่วนแกรฟีน 2.5% (ซ้าย) และ 5% (ขวา)	19

รูปที่ 3.1	แผนผังการดำเนินการวิจัย	22
รูปที่ 3.2	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) รุ่น Nicolet 6700	25
รูปที่ 3.3	เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) รุ่น D8 Advance	26
รูปที่ 3.4	เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) รุ่น TG 209 F3 Tarsus®	26
รูปที่ 3.5	เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์ (DSC) รุ่น DSC1/STARe	27
รูปที่ 3.6	เครื่องทดสอบหาดัชนีการหลอมไหลรุ่น 7053	27
รูปที่ 3.7	รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบในรูปดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D638-14 type V	28
รูปที่ 3.8	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล	28
รูปที่ 3.9	รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-10	29
รูปที่ 3.10	เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก รุ่น GT-7045-MDH	29
รูปที่ 3.11	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น SU3500	30
รูปที่ 3.12	เครื่องทดสอบไฟฟ้า (Pico ammeter)	30
รูปที่ 4.1	อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และแกรฟีน จากการสังเคราะห์ครั้งที่ 1 ..	32
รูปที่ 4.2	อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และแกรฟีน จากการสังเคราะห์ครั้งที่ 2 ..	33
รูปที่ 4.3	อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคแกรฟีน จากการสังเคราะห์ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2	34
รูปที่ 4.4	กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน ในการสังเคราะห์ครั้งที่ 1	35
รูปที่ 4.5	กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน ในการสังเคราะห์ครั้งที่ 2	35
รูปที่ 4.6	เส้นวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/เอปีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ สูตร ABS/G1 (A)	37
รูปที่ 4.7	เทอร์โมแกรมการสลายตัวของชิ้นทดสอบเส้นเอปีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิง	

ประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติสูตร ABS/G1 ทั้ง 3 รูปแบบ	38
รูปที่ 4.8 พฤติกรรมทางความร้อนของเส้นเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่ผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2	40
รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอส สำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่ผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน	42
รูปที่ 4.10 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของ แกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่ผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน	43
รูปที่ 4.11 ยังสัมมอดูลัสของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอส สำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่ผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน	43
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงบริเวณรอยแตกหักจากการทดสอบด้านแรงดึงของ เส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่ผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน	44
รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรมการสลายตัวของชิ้นทดสอบเส้นเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ	45
รูปที่ 4.14 พฤติกรรมทางความร้อนของเส้นเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของ แกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2	46
รูปที่ 4.15 ความทนแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอส สำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ	49
รูปที่ 4.16 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของ แกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ	50
รูปที่ 4.17 ยังสัมมอดูลัสของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอส	

สำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ	51
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงบริเวณรอยแตกหักจากการทดสอบด้านแรงดึงของ เส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ	51
รูปที่ 4.19 ความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของ แกรไฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ	52
รูปที่ 4.20 ความต้านไฟฟ้าของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอส สำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันพลาสติกมีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก วัสดุในชีวิตประจำวันหลายชนิดล้วนผลิตมาจากพลาสติก เช่น เครื่องใช้ในครัวเรือน ของเล่นเด็ก วัสดุก่อสร้าง กาวติดไม้และติดโลหะ อุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ เป็นต้น งานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ภายในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ คาปาซิเตอร์ เป็นต้น โดยเฉพาะในเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีราคาแพง หากมีชิ้นส่วนเหล่านี้เสียหาย การหาอะไหล่หรือผลิตชิ้นส่วนทดแทนที่มีความจำเพาะต่อเครื่องใช้นั้นๆ อาจทำได้ยาก และมีราคาสูง

การพิมพ์สามมิติ (3D Printing) คือ กระบวนการในการสร้างวัตถุสามมิติ เป็นเทคนิคหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบเติม (additive manufacturing) โดยใช้หลักการขึ้นรูปวัสดุเป็นชั้นบาง ๆ ทีละชั้น กล่าวคือขึ้นรูปชิ้นงานในลักษณะสองมิติเริ่มต้นในระนาบ XY ก่อน หลังจากพิมพ์เสร็จในแต่ละชั้นที่เป็นสองมิติแล้ว เครื่องจะเลื่อนฐานพิมพ์ไปพิมพ์ชั้นถัดไป (ตามแนวแกน Z) ตามรูปร่างที่กำหนด โดยสามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำด้วยคำสั่งจากคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ด้วยหลักการนี้จึงทำให้การพิมพ์สามมิติสามารถสร้างชิ้นส่วนที่ละเอียดซับซ้อน ซึ่งทำได้ยากหรือไม่สามารถทำได้ด้วยกระบวนการผลิตแบบอื่น นับเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในการผลิตชิ้นส่วนทดแทน หรืออะไหล่เครื่องมือที่มีปริมาณการผลิตไม่สูงมากนัก และมีความจำเพาะต่อเครื่องมือ หรือเป็นชิ้นส่วนที่มีความละเอียดซับซ้อนสูง

อะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน หรือ เอบีเอส (acrylonitrile butadiene styrene, ABS) เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีความสามารถในการหลอมใหม่ได้ ขึ้นรูปได้ง่ายและมีสมบัติเชิงกลที่ดี นิยมนำมาใช้ในงานที่ต้องรับแรงกระแทก อาทิ กันชนรถยนต์ หมวกกันน็อค โดยปัจจุบันยังมีการใช้งาน ABS อย่างแพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับในการพิมพ์สามมิติ (3D printing) โดยเฉพาะเทคนิคการฉีดเส้นพลาสติก(FDM) เนื่องจากเอบีเอส มีสมบัติบางประการที่เหมาะสมกว่าพลาสติกชนิดอื่น กล่าวคือ เอบีเอสมีจุดหลอมสูง (200-250 องศาเซลเซียส) ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานเพื่อใช้ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงได้ โดยมีขอบเขตการใช้งานที่กว้างกว่าพลาสติกหลายชนิด อีกทั้งเอบีเอสยังมีความแข็งแรงเหนียว (toughness) และทนแรงกระแทกที่ดี (impact resistance)

แกรฟีน (graphene) เป็นรูปแบบหนึ่งของผลึกคาร์บอน คล้ายคลึงกับเพชร แกรไฟต์ หรือ ท่อนาโนคาร์บอน และฟูลเลอร์รีน โดยอะตอมของคาร์บอนของแกรฟีนจะมีการเรียงตัวในรูปแบบหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้งมี

ความหนาของแต่ละชั้นเพียงอะตอมเดียวของคาร์บอน แกรฟีนที่มีคุณภาพสูง จะมีความแข็งแรงมาก น้ำหนักเบา เกือบโปร่งใส และมีสมบัติเป็นตัวนำทั้งความร้อนและไฟฟ้าที่ดี ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความสนใจในการนำแกรฟีน มาเป็นตัวเติมเสริมแรง (reinforcement filler) ในพลาสติก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านความแข็งแรงและปรับปรุงสมบัติเชิงไฟฟ้าของพลาสติก

งานวิจัยนี้จึงสนใจนำแกรฟีนมาพัฒนาวัสดุเชิงประกอบร่วมกับพลาสติกเอปียีส เพื่อผลิตเป็นเส้นพลาสติก สำหรับการพิมพ์สามมิติ (3D printed filament) โดยทั่วไปตัวเติมเสริมแรงจะทำหน้าที่ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ จะต้องมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ แต่เนื่องจากการผสมเอปียีสกับแกรฟีนเพื่อให้กระจายตัวได้ดี เป็นไปได้ยาก เช่นเดียวกับการผสมสารตัวเติมที่เป็นของแข็งลงในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาเทคนิคที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีนและเอปียีสเพื่อผลิตเส้นพลาสติกสำหรับการพิมพ์สามมิติต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

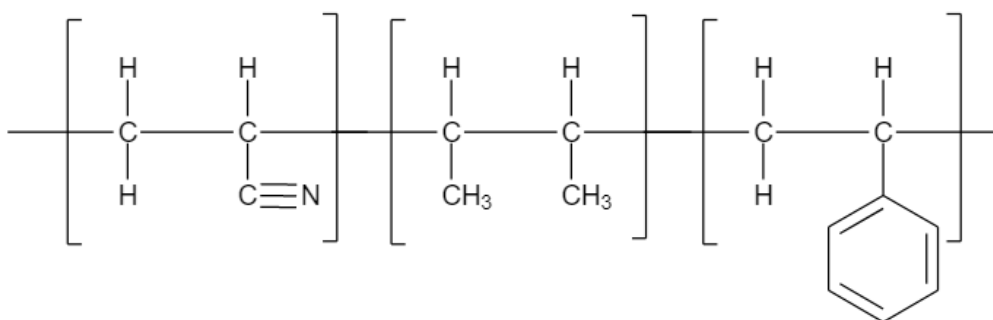
1. เพื่อพัฒนาวิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีนและเอปียีส สำหรับนำไปใช้ในการเตรียมเส้นพลาสติกสำหรับการพิมพ์สามมิติ
2. เพื่อศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และด้านสมบัติการนำไฟฟ้า

บทที่ 2

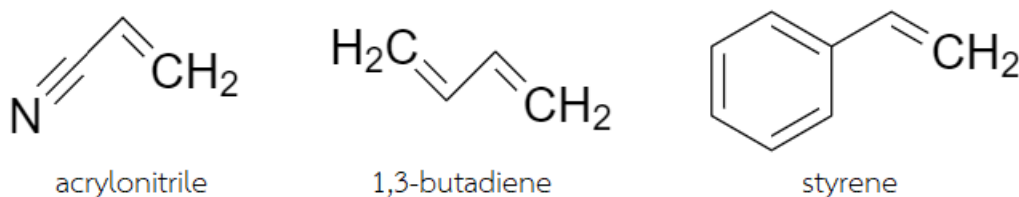
วารสารปริทัศน์

2.1 อะคริโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

อะคริโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน หรือ เอบีเอส (acrylonitrile butadiene styrene, ABS) มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกหรือพลาสติกที่หลอมใหม่ได้ สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของโมโนเมอร์ 3 ชนิด คือ สไตรีน (styrene), อะคริโลไนไตรล์ (acrylonitrile) และ โพลิบิวทาไดอีน (polybutadiene) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จะเรียกว่า เทอร์โพลิเมอร์ (terpolymer) โดยโมโนเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์เอบีเอสขึ้นมาต่างมีผลต่อคุณสมบัติของพลาสติกเอบีเอสทั้งสิ้น โดย อะคริโลไนไตรล์ ทำให้มีความทนทานต่อสารเคมี ความทนความร้อนสูง ช่วยเพิ่มความแข็งแรง (rigidity) แต่ทำให้การฉีกขึ้นรูปยาก บิวทาไดอีน มีผลต่อสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก (impact strength) สไตรีน มีผลทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เพิ่มความคงรูปหรือความแข็งตึง (stiffness) การฉีกขึ้นรูปง่ายเพราะมีดัชนีการไหลสูง รวมทั้งมีพื้นผิวมันเงาและตัดแต่งวัสดุได้ง่าย ^[1, 2, 3]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ พอลิเมอร์เอบีเอส(อะคริโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน สไตรีน)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ โมโนเมอร์อะคริโลไนไตรล์, บิวทาไดอีน และ สไตรีน

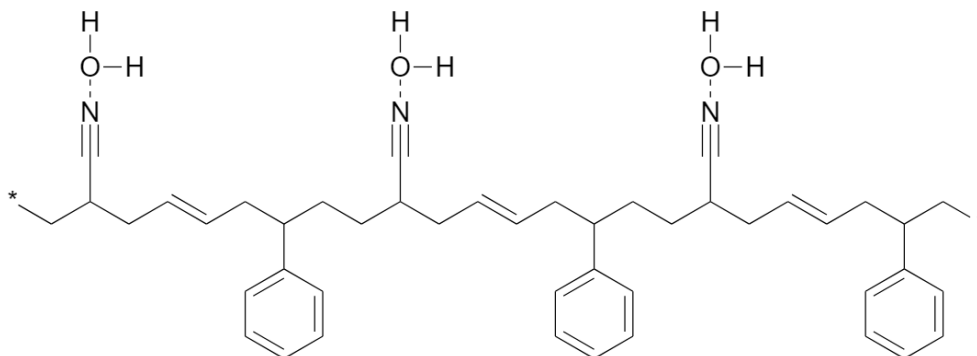
พลาสติกเอบีเอสสามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนของโมโนเมอร์ทั้ง 3 ชนิด เพื่อให้มีสมบัติตามที่ต้องการเหมาะแก่การนำไปใช้ โดยหากต้องการสมบัติเด่นด้านใดนั้น จะต้องมีการกำหนดให้มีอัตราส่วนของโมโนเมอร์ชนิดนั้นมากขึ้น แต่ก็ส่งผลให้สมบัติด้านอื่นลดลง ปัจจุบันเอบีเอสที่จำหน่ายตามท้องตลาดจะประกอบด้วย อะครีโลไนไตรล์ ประมาณ 15-30% , บิวทาไดอีน ประมาณ 5-30% และ สไตรีนประมาณ 45-75% ^[2]

นอกจากนี้ยังมีการใช้โมโนเมอร์อื่นๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางประการให้ให้กับเอบีเอส เช่น bifunctional compounds (isoprene, 2-chloro-1,3-butadiene, piperylene), monofunctional compounds (α -methylstyrene copolymer (high heat), ethylstyrene, chlorostyrene, methacrylonitrile, acrylic acid, และ ethyl acrylate) ^[2]

เอบีเอส มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 200-250 °C ทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ ทนแรงกระแทก (impact strength) ได้ดี เนื่องจากบิวทาไดอีนที่มีคุณสมบัติเป็นยางที่อุณหภูมิห้องและมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว หรือ T_g ประมาณ -70 °C นอกจากนี้สมบัติของอะครีโลไนไตรล์ซึ่งเป็นโมโนเมอร์ที่มีขั้ว ทำให้ทนต่อตัวทำละลายไม่มีขั้ว (non-polar solvent resistance) เช่น กรดและน้ำมันบางชนิด เป็นต้น รวมถึงมีความแข็งแรงยืดหยุ่น (elasticity) สูง สามารถทนต่อแรงบีบและแรงดึงได้ดี จึงเหมาะในการใช้งานด้านวิศวกรรมหรืองานเครื่องจักร และสามารถนำไปใช้งานภายนอกได้เนื่องจากเป็นผลผลิตจากปิโตรเลียมทำให้ทนต่อสภาพอากาศได้ดี และเมื่อใส่สีเพิ่มเข้าไปจะมีความขุ่น (opaque) เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการคุณสมบัติทึบแสง ^[4, 5]

จากคุณสมบัติเด่นที่กล่าวข้างต้นทำให้ ในปัจจุบันนิยมใช้พลาสติกเอบีเอสทำชิ้นส่วนและโครงสร้างของเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น โทรทัศน์ วิทยุ เครื่องดูดฝุ่นเครื่องซักผ้า รวมการถึงนำไปทำชิ้นส่วนต่าง ๆ ในรถยนต์ เช่น แผงหน้าปัด หรือชิ้นส่วนขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังจัดเป็นพลาสติกวิศวกรรม (engineering plastics) ที่มีการใช้งานมากที่สุดในประเทศไทย ^[5]

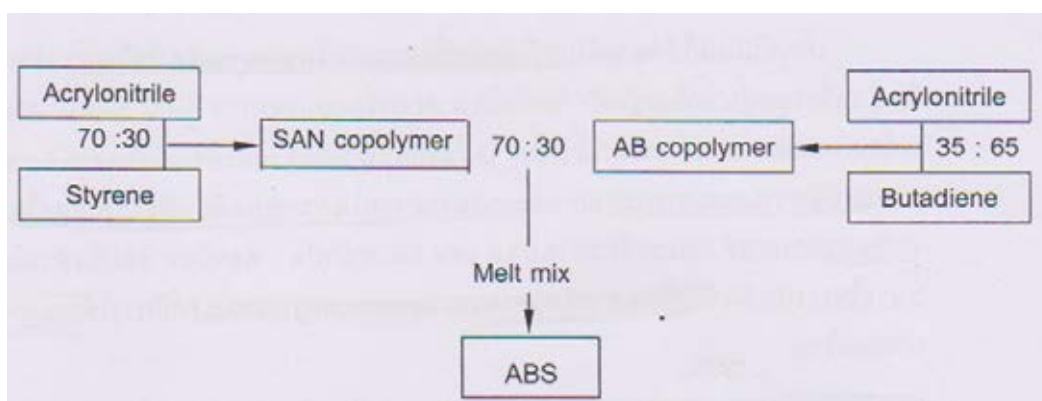
คุณสมบัติด้อยของเอบีเอส คือ มีความสามารถดูดความชื้นสูงเนื่องจากมีหมู่ไนไตรล์ ในอะครีโลไนไตรล์มอนอเมอร์ ที่มีลักษณะเป็นประจุบวกจึงสามารถดึงดูดอะตอมออกซิเจนที่เป็นประจุลบจากโครงสร้างของน้ำหรือความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้น ก่อนนำเอบีเอสไปขึ้นรูปจึงต้องทำการอบไล่ความชื้นก่อน และเนื่องจากเอบีเอสมีจุดหลอมเหลวที่สูงทำให้ต้องใช้เวลานานในการเย็นตัว ส่งผลให้ชิ้นงานมีโอกาสที่จะเกิดการหดตัว (shrinkage) หรือเสียรูปได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงทำให้อาจเกิดไฟฟ้าสถิตได้ และเมื่อทำไปเผาไฟจะเกิดควันปริมาณมาก ^[4, 5]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ ABS ที่มีผลต่อการดูดซับความชื้น

การเตรียมเอบีเอสในทางการค้ามี 2 วิธี คือ การทำ “พอลิเมอร์ผสม” และ “การกราฟต์(grafting)” ซึ่งจะได้เอบีเอสที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน [5]

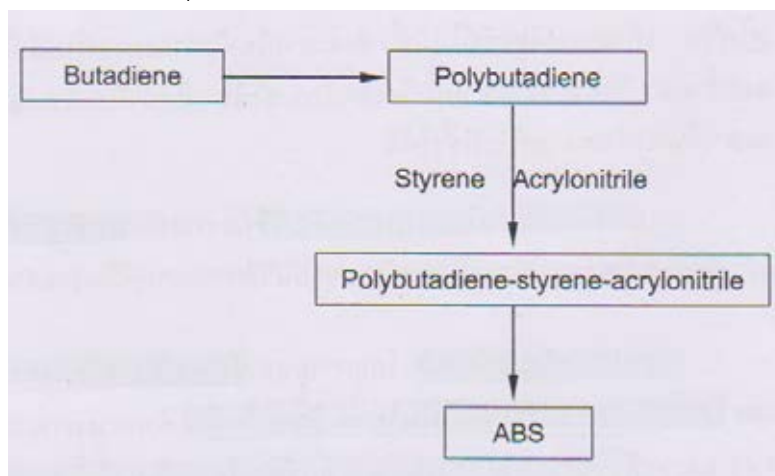
1. การทำพอลิเมอร์ผสม : โดยการผสม “โคพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์-สไตรีน” และ “โคพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน” ด้วยกระบวนการเชิงกล นิยมเตรียมโดยการผสมเลเทกซ์ของโคพอลิเมอร์ทั้งสองเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.4 แล้วทำให้จับตัวเป็นก้อน โดยสมบัติของผลิตภัณฑ์จะขึ้นกับองค์ประกอบและปริมาณของโคพอลิเมอร์แต่ละชนิด



รูปที่ 2.4 การเตรียมพลาสติกเอบีเอสด้วยการทำเป็นพอลิเมอร์แบบผสม

2. การกราฟต์ : เป็นการกระบวนการผลิตเอบีเอสที่นิยมในปัจจุบัน โดยการทำให้โคพอลิเมอร์ของ สไตรีน และอะคริโลไนไตรล์ ในพอลิบิวทาไดอีนเลเทกซ์ ที่อุณหภูมิประมาณ 50°C โดยใช้ โปแทสเซียมซัลเฟต (potassium sulfate) เป็นสารเริ่มปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งอาจเรียกว่า “latex

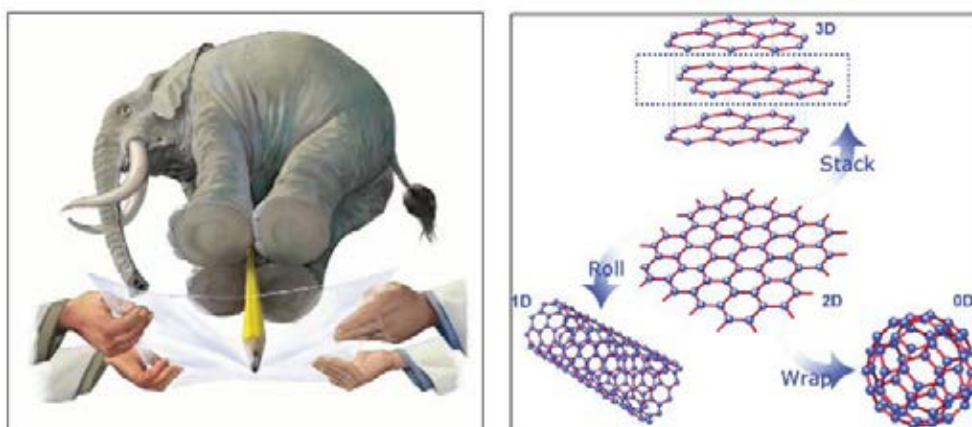
grafting method” พลาสติกเอบีเอสที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีนี้ จะมีความทนแรงกระแทกสูงแม้ที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้เอบีเอสที่ได้จากกระบวนการนี้มีพื้นฐานวิถาคล้าย พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (HIPS) ต่างกันที่อนุภาคของบิวทาไดอีนมีขนาดเล็กกว่า (1-10 μ m)



รูปที่ 2.5 การเตรียมพลาสติกเอบีเอสด้วยวิธีการกราฟต์

2.2 แกรฟีน(Graphene)

แกรฟีน (Graphene) คือ อะตอมของคาร์บอน (carbon atom) ที่มีการจัดเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) ด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่ความแข็งแรงสูงทำให้แกรฟีนมีความแข็งแรงมากกว่าเพชร และเหล็กกล้า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของแกรฟีน [6]

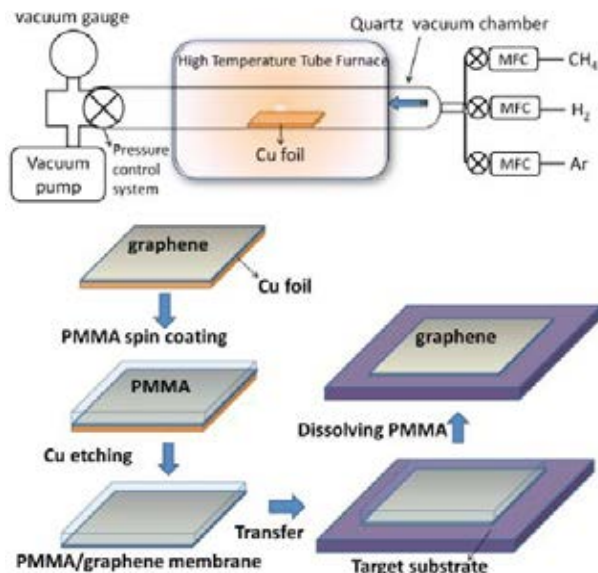


รูปที่ 2.6 ภาพจำลองความแข็งแรงของแกรฟีนที่สามารถรองรับน้ำหนักผ่านพื้นที่เล็ก ๆ ได้ (ซ้าย) และความเชื่อมโยงเชิงโครงสร้างของอัญรูปต่าง ๆ ของคาร์บอนผ่านโครงสร้าง 2 มิติของแกรฟีน (ขวา) [6]

แกรฟีนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าวัสดุนำไฟฟ้าทั่วไป เช่น ทองแดง เนื่องจากสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนบริเวณผิวได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมประกอบไปด้วยออร์บิทัล $2s$, $2p_x$, $2p_y$ และ $2p_z$ โดยออร์บิทัลเหล่านี้สามารถผสมกันไปมาได้ก่อให้เกิดโครงสร้างลูกผสมแบบต่าง ๆ โดยในกรณีของแกรฟีนจะเกิดการผสมกันระหว่างออร์บิทัล S และ p_x , p_y เกิดเป็นออร์บิทัลลูกผสมชนิด sp^3 ซึ่งจะเกิดเป็นพันธะ σ 3 พันธะ และเหลือออร์บิทัล p_z ซึ่งจะเกิดเป็นพันธะ π 1 พันธะและพันธะ π^* ของแต่ละอะตอมของคาร์บอนสามารถเกิดการไฮบริไดเซชัน (hybridization) เกิดเป็นแถบของ π และ π^* ส่งผลให้แกรฟีนมีสมบัติทางไฟฟ้าที่พิเศษ ^[7] นอกจากนี้แกรฟีนยังมีน้ำหนักที่เบามากในทางทฤษฎีเมื่อเทียบอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อพื้นที่ผิว แกรฟีน 1 กรัม จะสามารถมีพื้นที่ผิวถึง 2,360 ตารางเมตร

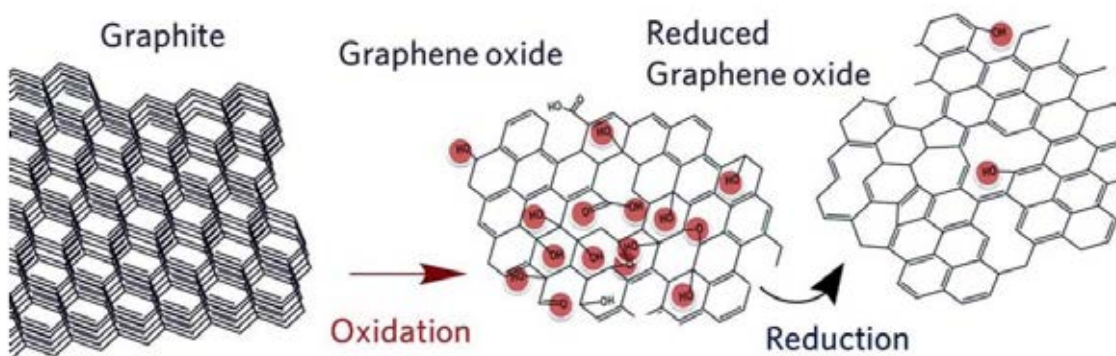
การสังเคราะห์แกรฟีนสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมที่นิยมและเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้มี 2 วิธี ได้แก่

1. การผลิตแกรฟีนโดย chemical vapor deposition หรือ CVD โดยเริ่มจากการปล่อยก๊าซมีเทน (CH_4) ที่อุณหภูมิห้องเข้าไปในเตาเผาที่มีก๊าซไฮโดรเจน (H_2) อยู่ด้วยเล็กน้อย เมื่อก๊าซมีเทนสัมผัสกับโลหะ เช่น ทองแดงหรือนิกเกิลที่อุณหภูมิสูงระดับ $1000\text{ }^{\circ}C$ จะเกิดการสลายตัวเหลือเพียงอะตอมของคาร์บอนเกาะอยู่บนแผ่นโลหะและจัดเรียงโครงสร้างเป็นแกรฟีนได้ในสภาวะที่เหมาะสม แม้การสลายตัวของก๊าซมีเทนรวมถึงการเกิดโครงสร้างแบบแกรฟีนนั้นต้องใช้ความร้อนสูงถึง $2500\text{ }^{\circ}C$ แต่โลหะทองแดงหรือนิกเกิลนั้นมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้อุณหภูมิที่ใช้ลดลงอย่างมาก^[6] จากนั้นแกรฟีนที่อยู่บนโลหะจะถูกเคลือบผิวด้านบนด้วยโพลีเมอร์ โพลีเมทิลเมทาไครเลต หรือ พีเอ็มเอ็มเอ (poly(methyl methacrylate), PMMA) แล้วกำจัดเอาแผ่นโลหะออกโดยกระบวนการกัดกรด (etching) จากนั้นทำการเคลื่อนย้าย แผ่นแกรฟีนที่เคลือบด้วย PMMA ไปวางบนวัสดุหรือชิ้นงานที่ต้องการ ตามด้วยการละลายเอา PMMA ออกในที่สุดซึ่งแกรฟีนที่ผลิตขึ้นโดยเทคนิค CVD นี้เป็นแกรฟีนที่มีคุณภาพสูง สามารถควบคุมจำนวนชั้นของแกรฟีนได้ และมีการนำไฟฟ้าที่ดีจึงเหมาะอย่างยิ่งกับการนำไปใช้ในทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ^[7]



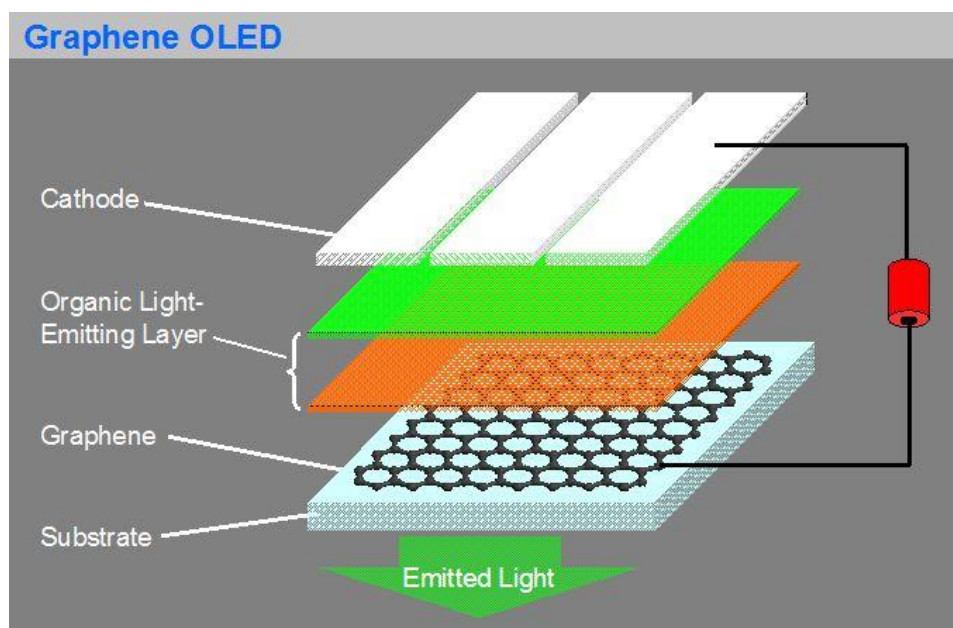
รูปที่ 2.7 แผนภาพจำลองการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยเทคนิค CVD และขั้นตอนการเคลื่อนย้ายแกรฟีนที่สังเคราะห์ได้ [6]

2. การผลิตแกรฟีนโดยกระบวนการทางเคมี เริ่มจากการออกซิไดซ์แกรไฟต์เพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ไปกั้นระหว่างชั้นของแกรไฟต์ให้ห่างออกจากกัน (exfoliation) และเรียกผลผลิตที่ได้ว่า แกรไฟต์ออกไซด์หรือแกรฟีนออกไซด์ ขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ (แกรฟีนออกไซด์ 1 ชั้น มีความหนา ประมาณ 0.9 นาโนเมตรเท่านั้น) [6] จากนั้นจึงทำปฏิกิริยารีดักชัน เพื่อลดจำนวนหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน ลง และเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าให้มากขึ้นด้วยซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถผลิตแกรฟีนได้ในจำนวนมาก ๆ และมีต้นทุนต่ำกว่าวิธีแรกมาก แต่แกรฟีนที่ได้จะมีสมบัติหรือคุณภาพที่ด้อยกว่า แต่ยังมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี เช่น การนำไปใช้ในวัสดุคอมโพสิตเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ [7]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชัน [6]

เนื่องจากโครงสร้าง hexagonal หนึ่งชั้นของแกรฟีน จะมีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 2.3% หรือค่าความโปร่งแสงประมาณ 97-98 % ทำให้แกรฟีนเป็นตัวเลือกในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในอุตสาหกรรม เช่น หน้าจอโทรศัพท์ แผงเซลล์สุริยะ ทรานซิสเตอร์ หรืออุปกรณ์เปล่งแสงอินทรีย์ (organic light emitting diodes, OLEDs) ที่ต้องการความโปร่งแสงที่สูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ^[6]



รูปที่ 2.9 การนำแกรฟีนไปใช้ในส่วนประกอบของ OLEDs ^[6]

ปัจจุบันแกรฟีนสามารถนำมาใช้ทดแทนอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide, ITO) ใช้ในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการสมบัติการโค้งงอ เช่น แผงเซลล์สุริยะที่มีความบางและโค้งงอหรือหน้าจอแสดงผลที่โค้งงอได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่า ทนต่อสารเคมีการกัดกร่อน และมีความยืดหยุ่นสูงกว่า อีกทั้ง แกรฟีนยังมีค่าความเครียดต่อการแตกหัก (fracture strain) สูงกว่าอินเดียมออกไซด์ถึง 10 เท่า ^[7]



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงผลที่มีสมบัติการโค้งงอจากแกรฟีน

2.3 การพิมพ์สามมิติ(3D Printing)

การพิมพ์สามมิติ (3D Printing, 3DP) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ข้อมูลจากการออกแบบข้อมูลสามมิติ computer-aided design (CAD) มาขึ้นรูปเป็นวัตถุทางกายภาพ โดยเครื่องพิมพ์สามมิติส่วนใหญ่จะใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลโมเดล CAD จากสามมิติ มาเป็นข้อมูลในรูปแบบสองมิติแต่ละชั้นของการพิมพ์ [1]

ในปัจจุบันมีการนิยามความหมายของ “การพิมพ์สามมิติ” โดยใช้แทนความหมายของกระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยการเติมวัสดุ (additive manufacturing, AM) ซึ่งสามารถจำแนกได้หลากหลายถึง 7 ประเภทตามมาตรฐาน ISO/ASTM52900-15 ได้แก่ [8]

1. การขึ้นรูปโดยการฉีดสารยึด (binder jetting) เป็นการขึ้นรูปโดยใช้สารยึดในลักษณะของเหลวฉีดเคลือบไปบนผงวัสดุเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ
2. การขึ้นรูปโดยการถ่ายโอนพลังงานโดยตรง (directed energy deposition) เป็นการขึ้นรูปโดยใช้พลังงานความร้อนจาก เลเซอร์ ลำแสงอิเล็กตรอน หรือ พลาสมาในการหลอมละลายวัสดุในบริเวณที่ต้องการ เพื่อให้ชิ้นงานหลอมเชื่อมกันตามที่ต้องการ
3. การขึ้นรูปโดยการอัดรีดวัสดุ (material extrusion) เป็นการขึ้นรูปโดยการอัดรีดวัสดุผ่านหัวฉีดออกมาเป็นชิ้นงานตามที่ต้องการ
4. การขึ้นรูปโดยการฉีดวัสดุ (material jetting) เป็นการขึ้นรูปโดยการพ่นหยดวัสดุประเภทแว็กซ์ หรือ พอลิเมอร์ประเภทไวแสงลงบนฐานพิมพ์ก่อนจะทำให้พอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาการคงรูปโดยการฉายแสงจะได้ชิ้นงานออกมาตามที่ต้องการ
5. การขึ้นรูปโดยการรวมผงวัสดุบนฐานพิมพ์ (power bed fusion) เป็นการขึ้นรูปโดยการให้พลังงานความร้อนทำให้ผงวัสดุบนฐานพิมพ์หลอมเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ
6. การขึ้นรูปโดยการเรียงแผ่นวัสดุ (sheet lamination) เป็นการขึ้นรูปโดยการนำแผ่นวัสดุมาวางเรียงกันเป็นชิ้นงาน
7. การขึ้นรูปโดยการฉายแสง (vat photopolymerization) เป็นการขึ้นรูปโดยการฉายแสงลงพอลิเมอร์ไวแสงที่มีลักษณะเป็นของเหลวให้เกิดปฏิกิริยาแข็งตัวตามรูปแบบชิ้นงานที่ต้องการ

หนึ่งในระบบการขึ้นรูปโดยการพิมพ์สามมิติที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน คือวิธีการที่เรียกว่า Fused deposition modelling (FDM) เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีพื้นฐานมาจากการขึ้นรูปโดยการอัดรีดวัสดุ (material extrusion) โดยมีหลักการทำงานคือ การหลอมเส้นพลาสติกที่ต้องการให้กลายเป็นของเหลวและฉีดออกมาเป็นเส้นผ่านหัวฉีด (nozzle) โดยอาศัยระบบการเคลื่อนที่ 3 แกนโดยหัวฉีดจะขยับไปตามแนวระนาบ XY 2 มิติพิมพ์เป็นภาพตัดขวาง (cross section) ของชิ้นงาน เมื่อชั้นเลเยอร์นี้สมบูรณ์แพลตฟอร์มจะเคลื่อนที่ลงในแนวแกน Z เพื่อพิมพ์ชั้นถัดไป โดยกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นวนไปจนชิ้นงานเสร็จสมบูรณ์ วิธีการ FDM สามารถสร้างชิ้นส่วน

หรือชิ้นงานที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว วัสดุที่นำมาใช้ขึ้นกับลักษณะของการใช้งานและสมบัติที่ต้องการ ในปัจจุบัน วัสดุที่นิยมใช้ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) สำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม, ไนลอน (Nylon) สำหรับงานที่ต้องการความอ่อนตัว, พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) สำหรับผลิตภัณฑ์หรือบรรจุภัณฑ์สำหรับใส่อาหาร และเอบีเอส (acrylonitrile butadiene styrene, ABS) เป็นวัสดุมาตรฐานสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงและความทนทาน ^[1]

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติแบบ FDM ได้รับความสนใจจากสาธารณชนเพราะความสะดวกสบายและเรียบง่ายของเครื่องมือ ในปัจจุบันเครื่อง FDM ส่วนใหญ่ถูกออกแบบมาให้สามารถใช้กับสำหรับงานอดิเรกและสามารถทำเองได้ตามที่อยู่อาศัย โดยได้มีการคาดการณ์ไว้ว่าในอีกไม่กี่ปีผลิตภัณฑ์จากพลาสติกในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะพวกอะไหล่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เดิมได้จากการบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding, IM) จะสามารถทดแทนด้วยการพิมพ์สามมิติ ซึ่งสามารถทำได้ด้วยตัวเองและสามารถลดต้นทุนการผลิต แต่ปัญหาของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการพิมพ์สามมิติก็คือ ความแข็งแรง และสมบัติเชิงกลไม่สามารถสู้ผลิตภัณฑ์แบบ monofilament หรือ จากการขึ้นรูปด้วยการฉีดไม่ได้ ^[1]



รูปที่ 2.11 ภาพแสดงเครื่องFDM/FFF Printer, Material และ Print ^[4]

นอกจากกระบวนการแบบ FDM แล้วยังมีกระบวนการขึ้นรูปของการพิมพ์สามมิติแบบอื่น ๆ ที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน ^[4] ได้แก่

- ระบบลาดเรชิน (SLA หรือ DLP) เป็นการขึ้นรูปโดยการฉายแสงไปบนเรซินที่ไวต่อแสงบนฐานพิมพ์ เรซินจะแข็งตัวเฉพาะบริเวณที่โดนแสง โดยเครื่องจะทำให้เกิดรูปร่าง และทำให้แข็งตัวทีละชั้น เมื่อเสร็จชั้นหนึ่งแล้วจะเริ่มทำชั้นต่อไปจนชิ้นงานออกมาเสร็จสมบูรณ์
- ระบบผงยิปซัม (powder 3D printer) เป็นการขึ้นรูปโดยการฉีดสารยึดใช้ผงยิปซัม/ผงพลาสติกเป็นตัวกลางในการขึ้นชิ้นงานเครื่องจะพิมพ์ผงยิปซัมลงไปบนฐานพิมพ์และใช้สารยึดฉีดลงไป ผสานผงยิปซัมเข้าด้วยกัน

- ระบบหลอมผงพลาสติก, ผงโลหะและเซรามิก (selective laser sintering, SLS) การขึ้นรูปโดยการถ่ายโอนพลังงานโดยตรง (directed energy deposition)

2.4 วัสดุเชิงประกอบ (composite)

วัสดุเชิงประกอบ คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างที่แตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน โดยวัสดุผสมที่ได้จะมีสมบัติใหม่และสามารถแบ่งแยกความแตกต่างระหว่างวัสดุเริ่มต้นทั้งสองชนิดได้ด้วยตาเปล่าหรือยังมีเฟสแยกกันอยู่อย่างชัดเจน โดยทั่วไปจะมีวัสดุตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นเฟสหลักหรือเมทริกซ์ (matrix) และวัสดุที่เหลือทำหน้าที่เป็นเฟสกระจายตัว (dispersed phase) จะกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรง (reinforced phase) ควบคู่ไปด้วย^[9]

วัสดุเชิงประกอบสามารถพบได้ตามธรรมชาติ เช่น ไม้ ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างลิกนิน (lignin) และเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) หรือกระดูกซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแร่อะพาไทต์ (apatite) กับโปรตีนคอลลาเจน (collagen) เป็นต้น

โดยสามารถแบ่งวัสดุเชิงประกอบออกตามประเภทของเฟสที่กระจายตัว สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท ได้แก่^[9]

1. วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาค (particle-reinforced composite) คือวัสดุเชิงประกอบที่เฟสกระจายตัวส่วนใหญ่ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง (reinforcement) ให้กับวัสดุ
2. วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced composite) คือวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งวัสดุจะมีความแข็งแรงและความแข็งตึงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก
3. วัสดุเชิงประกอบโครงสร้าง (structural composite) คือวัสดุเชิงประกอบที่ประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียว ซึ่งสมบัติวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างนี้ นอกจากจะขึ้นกับวัสดุเริ่มต้นแล้วยังขึ้นกับทิศทางการจัดเรียงของวัสดุที่นำมาประกอบ เราสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ วัสดุเชิงประกอบแบบชั้น (laminar composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (sandwich panel)

แบ่งตามชนิดของเนื้อหลัก สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่^[9]

1. วัสดุเชิงประกอบประเภทพอลิเมอร์ (polymer matrix composite, PMC) คือ ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส โดยมีพอลิเมอร์เป็นเฟสหลัก (matrix) และวัสดุเสริมแรง (reinforcing agent)
2. วัสดุเชิงประกอบประเภทเซรามิก (ceramic matrix composite, CMC) คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีวัสดุเสริมแรงเป็นวัสดุจากพวกเซรามิก เพื่อปรับสมบัติด้านความเปราะ และช่วยเสริมความเหนียวลดการแตกร้าว

3. วัสดุเชิงประกอบประเภทโลหะ (metal matrix composite, MMC) คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีเฟสหลักประกอบด้วยโลหะหรือโลหะผสมเช่น เหล็ก อะลูมิเนียม สังกะสี ฯลฯ และมีเฟสวัสดุเสริมแรงใช้วัสดุที่เป็นอนุภาค (particle) เส้นใย (fiber) เส้นใยสั้น (whisker) ทั้งที่เป็น เซรามิก และพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบประเภทนี้มักใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ และอากาศยาน

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาของงานวิจัยของ M. Dawoud และคณะ^[1] เรื่องการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเอบีเอส ระหว่างการพิมพ์สามมิติแบบ FDM และการขึ้นรูปแบบการฉีดขึ้นรูป โดยมีพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2

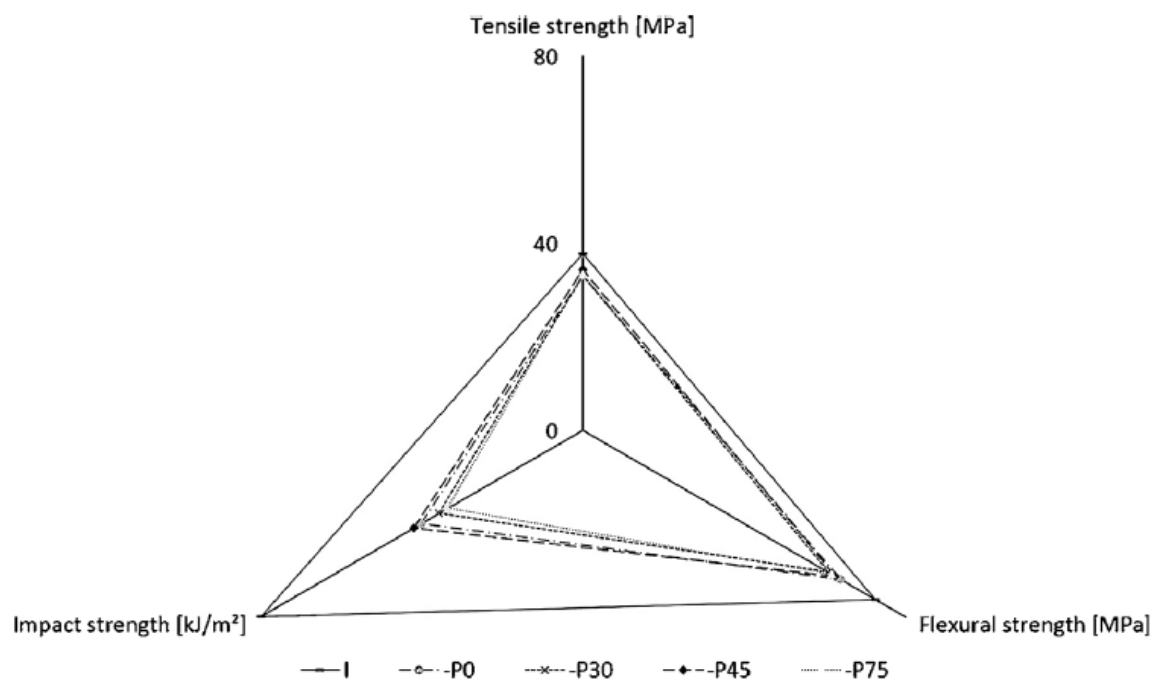
ตารางที่ 2.1 และ 2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบ FDM และการฉีดขึ้นรูป^[1]

Parameter	Value	Parameter	Value
Nozzle diameter	1 mm	Screw speed	180 rpm
Layer height	0.5 mm	Injection pressure	90 kg/cm ²
Printing speed	30 mm/s	Clamping pressure	105 kg/cm ²
Nozzle temperature	250 °C	Holding time	35 s
Bed temperature	120 °C		

โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นหลายรูปแบบ โดยมีพารามิเตอร์เป็นมุม และช่องว่างระหว่างแรสเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สภาวะแบบต่างๆของชิ้นงานทดสอบที่นำไปทดสอบ ^[1]

Designation	Processing technique	Raster angle (even layers)	Raster angle (odd layers)	Gap (mm)
I	IM	-	-	-
-P0	FDM	0	+90	-0.05
-P30	FDM	+30	-60	-0.05
-P45	FDM	+45	-45	-0.05
-P75	FDM	+75	-15	-0.05
+P0	FDM	0	+90	+0.05
+P30	FDM	+30	-60	+0.05
+P45	FDM	+45	-45	+0.05
+P75	FDM	+75	-15	+0.05



รูปที่ 2.12 สรุปผลการทดสอบของชิ้นงานทดสอบรูปแบบ -P เมื่อเทียบกับการฉีดขึ้นรูป ^[1]

พบว่าคุณสมบัติเชิงกลของเอบีเอสที่เตรียมจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) ทั่วไปมีความเหนือกว่าการพิมพ์สามมิติในทุกด้าน อย่างไรก็ตามถ้าสามารถกำหนดพารามิเตอร์ของกระบวนการการพิมพ์สามมิติแบบ FDM ให้เหมาะสมจะทำให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติที่เทียบเท่าจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปได้ จากผลการวิจัย^[1] พารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ รูปแบบ -P45 ซึ่งมีพารามิเตอร์ มุมการพิมพ์ของชั้นเลขคู่เท่ากับ +45, ชั้นเลขคู่เท่ากับ -45 และมีช่องว่างเท่ากับ -0.05mm โดยรูปแบบ -P45 จะมีคุณสมบัติสามารถทนแรงดัดงอได้ถึง 86% ในขณะที่ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปมีคุณสมบัติสามารถทนแรงดัดงอได้ 91% ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เราจึงนำพารามิเตอร์จากงานวิจัยชิ้นนี้มาใช้ในการทดลองในงานวิจัยฉบับนี้

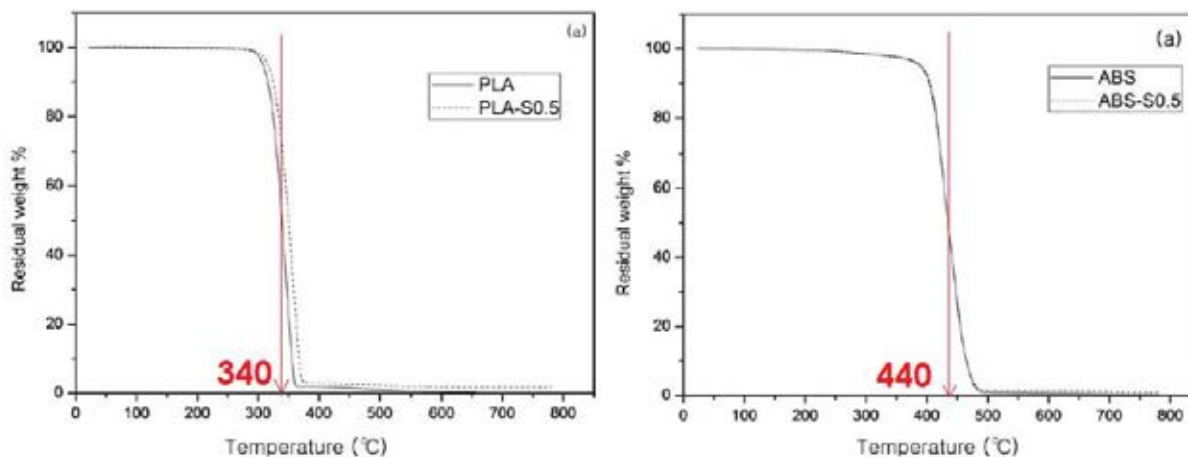
B.M. Tymrak และคณะ^[10] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของอะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอิน สไตรีน และพอลิแลคติกแอซิด หรือ พีแอลเอ (Polylactic Acid, PLA) ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ซึ่งพลาสติกทั้ง 2 ชนิดที่เป็นที่นิยมในการขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่า tensile strength, strain at tensile strength และ elastic modulus สำหรับชิ้นงานของ ABS และ PLA ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ^[1]

จากการศึกษาของงานวิจัยของ Jo, M. Y. และคณะ^[11] ได้ทำการศึกษาข้อมูลเรื่องสมบัติทางความร้อน

	Average tensile strength (MPa)	Average strain at tensile strength (mm/mm)	Average elastic modulus (MPa)
ABS			
0.4 mm layer height	28.2	0.0197	1875
0.3 mm layer height	27.6	0.0231	1736
0.2 mm layer height	29.7	0.0201	1839
0/90 Orientation	27.7	0.0192	1867
+45/-45 Orientation	29.5	0.0233	1739
Total	28.5	0.0212	1807
PLA			
0.4 mm layer height	54.9	0.0194	3286
0.3 mm layer height	48.5	0.0171	3340
0.2 mm layer height	60.4	0.0196	3480
0/90 Orientation	54.9	0.0188	3336
+45/-45 Orientation	52.3	0.0181	3384
Total	56.6	0.0193	3368

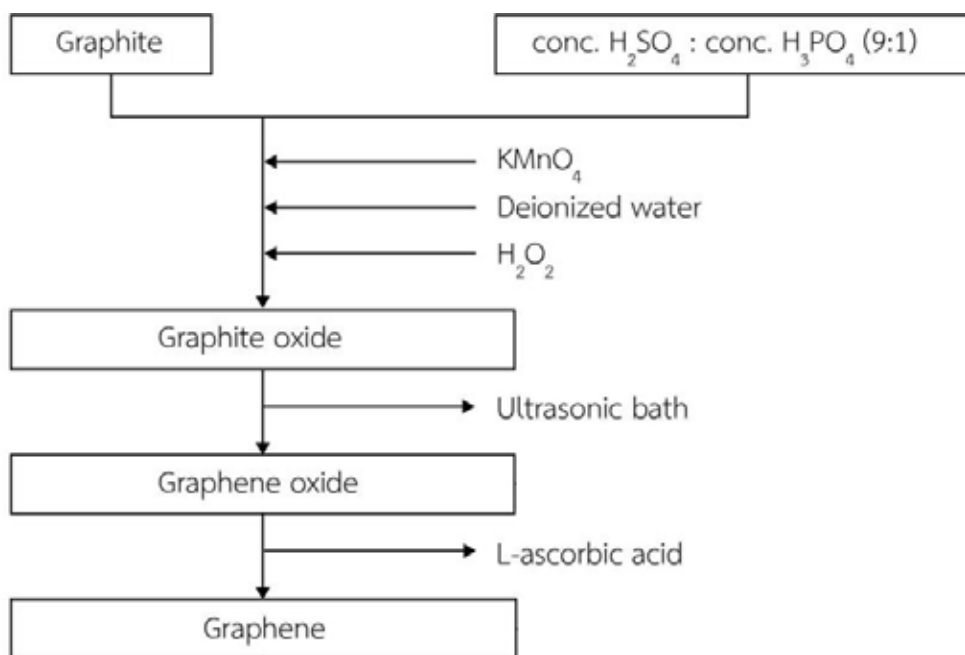
ระหว่างพลาสติกเอบีเอส และ พีแอลเอ โดยใช้เครื่อง TGA ในการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 พบว่า พลาสติกเอบีเอสมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 440 °C สูงกว่าพีแอลเอที่มีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 340 °C



รูปที่ 2.13 ภาพเปรียบเทียบเทอร์โมแกรมทางความร้อนจากเครื่อง TGA ^[11]

สำหรับการสังเคราะห์แกรฟีน A. Pongwisuthuruchte ^[9] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์แกรฟีน (graphene) ด้วยวิธีการที่ได้จากการปรับปรุงวิธีของแฮมเมอร์ (improved Hummer's method) ^[12] ดังแสดงในรูปที่ 2.14 แบ่งขั้นตอนการเตรียมแกรฟีนเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

- การเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide)
- การเตรียมแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide)
- การเตรียมแกรฟีน (Graphene) จากแกรฟีนออกไซด์

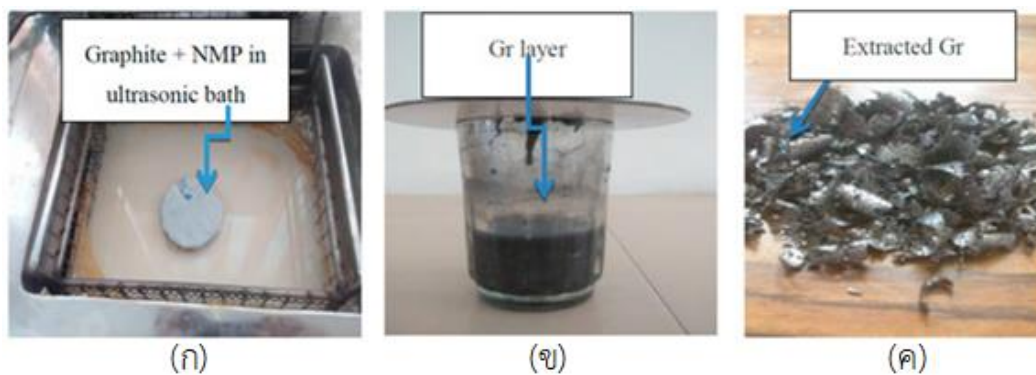


รูปที่ 2.14 แผนภูมิการขั้นตอนการสังเคราะห์แกรฟีนจากงานวิจัย [2]

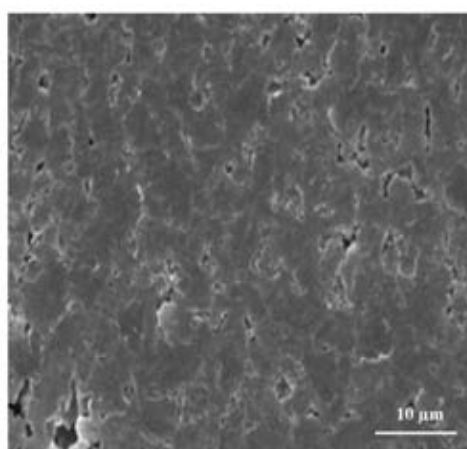
โดยเมื่อนำแกรฟีนที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (fourier transform infrared spectrometry, FT-IR) ให้ผลมีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Eun-Young Choi และคณะ [13]

จากการศึกษางานวิจัย [14] พบว่าเมื่อไม่นานมานี้แกรฟีน ได้รับการตรวจสอบว่าเป็นสารเสริมแรงที่เป็นไปได้สำหรับพอลิเมอร์ผสม โดยแกรฟีนถูกนำมาใช้ได้หลากหลายเนื่องจากมีโครงสร้างแบบตาข่ายสองมิติ ทำให้เกิดสมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและความร้อนที่ดี ทั้งนี้แผ่นวัสดุเชิงประกอบเอป็อกซีเมื่อเสริมด้วยแกรฟีนจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางไฟฟ้าและความร้อน

การศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการจัดเตรียมพอลิเมอร์เชิงประกอบของแกรฟีน โดยเตรียมแกรฟีนจากกระบวนการแยกชั้นของแกรไฟต์ โดยตรงในสารละลายอินทรีย์ โดยการเติมแนฟทาลีน ซึ่งมีโมเลกุลเป็นรูปลิ้น ทำทำหน้าที่ในการแยกชั้นของแกรไฟต์ ซึ่งเป็นหน้าที่ที่สำคัญระหว่างการสั่นด้วยความถี่สูง (รูปที่ 2.15ก) และช่วยเพิ่มผลผลิตของแกรฟีนได้อย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 2.15ข, 2.15ค) จากรูปที่ 2.16 พบว่าเกิดโครงสร้างที่มีรูปแบบสองมิติ จึงสามารถอนุมานได้ว่าไม่เกิดการรบกวนหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างของแกรฟีน



รูปที่ 2.15 ก, 2.15 ข และ 2.15 ค ภาพแสดงแกรฟีนผสม NMP, Gr layer, Extracted Gr ^[14]



รูปที่ 2.16 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสารสกัดแกรฟีน ^[14]

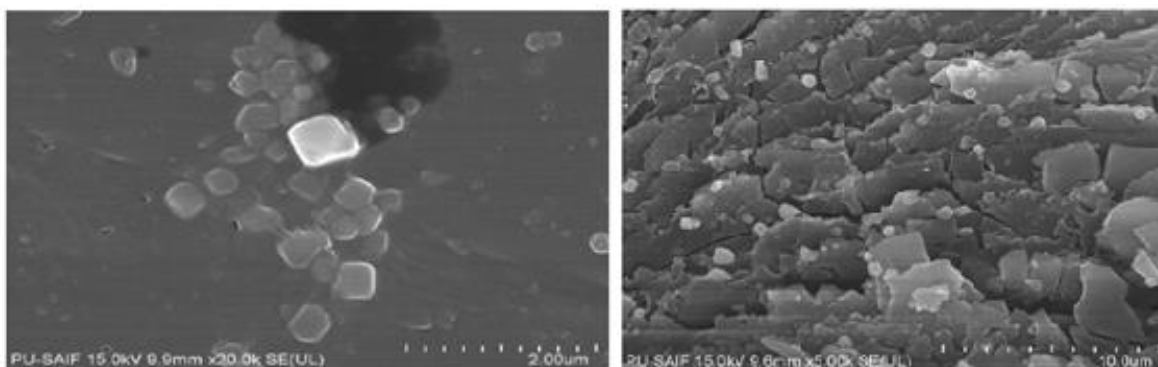
จากการศึกษางานวิจัย ^[14] พบว่าการผสมแกรฟีนกับเอปียีสสามารถทำได้ 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการผสมเชิงกล และ กระบวนการผสมเชิงกลควบคู่กับการผสมทางเคมี จากการนำเส้นใยผสมของแกรฟีนและเอปียีสไปทดสอบคุณสมบัติด้านต่างแสดงให้เห็นว่าได้รับการปรับปรุงสมรรถนะทางไฟฟ้า ความร้อนและสมบัติเชิงกล ทำให้สามารถนำไปใช้งานด้านวิศวกรรมได้ นอกจากนี้คุณสมบัติของเส้นใยผสมยังขึ้นกับสัดส่วนและความหนาแน่นของแกรฟีนที่ผสมลงไป รวมถึงกระบวนการผสมที่ใช้อีกด้วย

และจากการศึกษางานวิจัยของ Vikas Sharma และ คณะ ^[15] เกี่ยวกับการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเอปียีสและแกรฟีนด้วยวิธีการผสมแห้ง โดยเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่างที่มีสัดส่วนแกรฟีน 0%, 2.5%, 5% และ 7.5% และได้ค่า Young's Modulus ตามที่แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ผลการทดลองค่า Young's Modulus ต่อปริมาณสัดส่วนแกรฟีนในวัสดุเชิงประกอบ^[15]

Graphene content (%)	Young's Modulus (MPa)	Percentage Improvement in Young's Modulus
0	825	-
2.5%	852	3.27
5%	925	11.63
7.5%	1025	24.24

และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 2.17 จะแสดงให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีสัดส่วนแกรฟีน 5% จะมีการกระจายตัวของแกรฟีนดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีสัดส่วนแกรฟีน 2.5% แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของแกรฟีนมีผลต่อสมบัติเชิงกล



รูปที่ 2.17 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของวัสดุเชิงประกอบเอปียูเอส/แกรฟีน ที่สัดส่วนแกรฟีน 2.5% (ซ้าย) และ 5% (ขวา)^[15]

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่เกี่ยวข้อง

1. อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) เกรด GA850 (general purpose grade), Melt Flow Index (10 kg/220 °C)
2. แกรไฟต์ (graphite)
3. กรดแอลแอซคอร์บิก ($C_6H_8O_6$)
4. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
5. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$)
6. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
7. แอซีโตน (C_3H_6O)
8. คลอโรฟอร์ม ($CHCl_3$)
9. เมทานอล (CH_3OH)
10. น้ำกลั่น

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม และขึ้นรูป

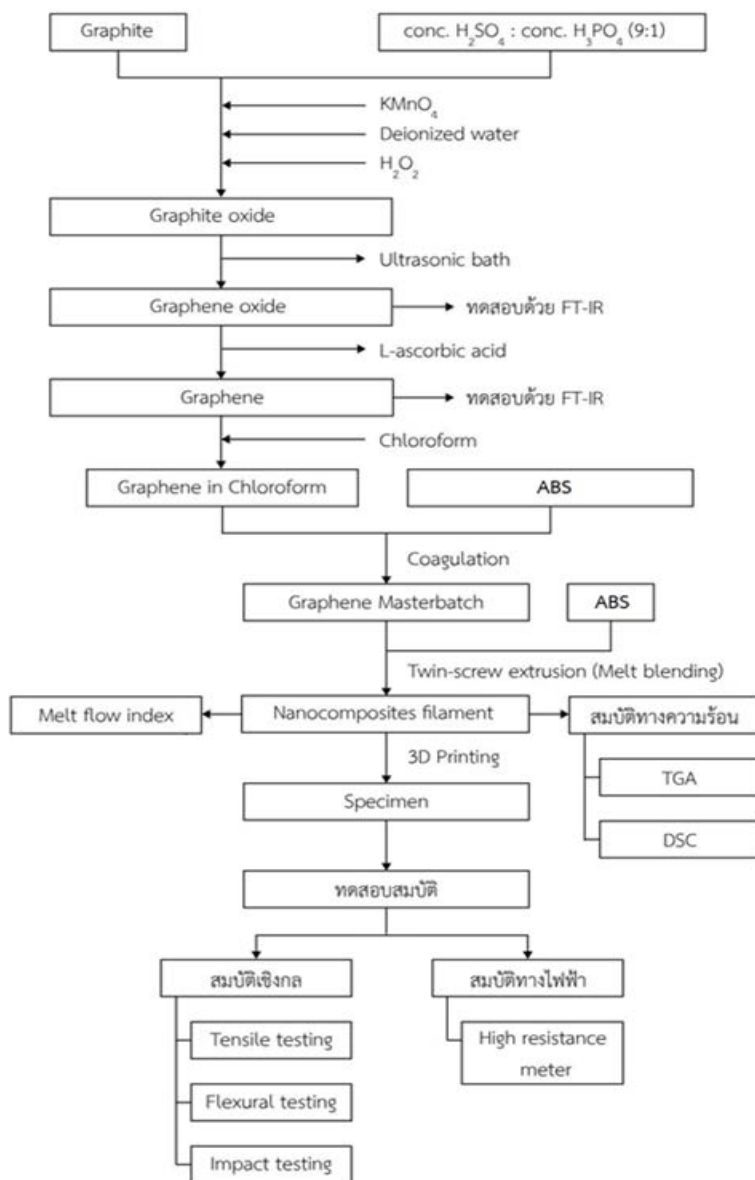
1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin Screw Extruder) รุ่น Prism DSR-28
2. เครื่องพิมพ์สามมิติระบบ Fused Deposition Modeling (FDM)

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติ

1. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)
2. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA)
3. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC)
4. เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Indexer)
5. เครื่องทดสอบแรงดึง หรือ เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine)
6. เครื่องทดสอบด้านความทนแรงกระแทก (Impact Testing Machine)
7. เครื่องวิเคราะห์ความเป็นฉนวนของวัสดุ (High Resistance Meter)

3.4 แผนภูมิข้อมูลการทดลอง

แผนภูมิขั้นตอนการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 การเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) จากแกรไฟต์

ทำการสังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ โดยใช้วิธีการปรับปรุงแฮมเมอร์ (improved Hummer's method) ดังนี้

1. นำแกรไฟต์ 9 กรัม ผสมลงในสารละลายระหว่างกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 200 มิลลิลิตร และโซเดียมไนเตรต 4.5 กรัม เมื่อผสมเสร็จหล่อเย็นให้อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส
2. หลังจากนั้นนำโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 27 กรัม ผสมอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลา 30 นาที หลังจากนั้นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 4 ชั่วโมงโดยค้อนอุณหภูมิไว้ที่
3. เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด ทำการหยุดปฏิกิริยา โดยการเติมสารที่ทำปฏิกิริยาลงในของผสม ระหว่างน้ำเย็น 800 มิลลิลิตร กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิลิตร
4. นำไปทำให้เป็นกลางด้วยการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และทำการแยกชั้นแกรไฟต์ออกไซด์ออกจากน้ำโดยการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ทำไม่เรื่อยๆจนกว่าสารจะเป็นกลาง
5. นำแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
6. หลังจากนั้นนำแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้มากระจายตัวในน้ำปราศจากไอออน ที่อัตราส่วนแกรไฟต์ออกไซด์ต่อน้ำปราศจากไอออน 2 กรัม/ลิตร แล้วทำการกระจายตัวด้วยคลื่นความถี่สูงที่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

3.5.2 การเตรียมแกรฟีน (Graphene) จากแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide)

โดยการนำแกรฟีนออกไซด์ที่ได้มาทำการสั่นด้วยคลื่นความถี่สูงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาเติมกรดแอสคอร์บิก 10 กรัมต่อแกรฟีน 1 กรัม พร้อมกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำแกรฟีนที่ได้ไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) และเก็บในรูปแบบผงแห้ง

3.5.3 การเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของเอบีเอส/แกรฟีน

กำหนดสัดส่วน เอบีเอส 10 กรัม ต่อแกรฟีน 1 กรัม จากนั้นทำการเตรียมสารละลายเอบีเอสใน DMF โดยกำหนดอัตราส่วนของเอบีเอสใน DMF เท่ากับ 10 กรัม/50 มิลลิลิตร ทำการละลายเอบีเอสอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนกว่าเอบีเอสจะละลายหมด จากนั้นนำแกรฟีนมากระจายตัวใน DMF ด้วยการสั่นด้วยคลื่นความถี่สูงที่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปผสมลงในสารละลายเอบีเอสใน DMF กวนผสมอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมที่ได้มาเก็บในรูปของแข็ง โดยการตกตะกอนร่วม (Coagulation) ด้วยเมทานอล หรือ การระเหยตัวทำละลาย DMF ที่อุณหภูมิห้อง

3.5.4 เตรียมเส้นพลาสติกก๊วยชิ่งประกอบของเอบีเอส/แกรฟีน

นำมาสเตอร์แบตช์ที่เตรียมได้มาผสมกับเอบีเอส (ABS) บริสุทธิ์ และทำการอัดรีดเป็นเส้นพลาสติกก๊วยชิ่งประกอบสำหรับการพิมพ์สามมิติด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

โดยเส้นพลาสติกก๊วยชิ่งประกอบสูตร ABS/G1 หรือ สูตรสัดส่วนแกรฟีน 1 กรัมต่อเอบีเอส 100 กรัม จะทำการทดลองการขึ้นเส้นด้วยวิธีผสมที่ต่างกัน 3 วิธี เพื่อตรวจสอบว่าวิธีใดสามารถช่วยให้แกรฟีนมีการกระจายตัวในเอบีเอสได้ดีที่สุด ดังนี้

1. ABS/G1A : นำมาสเตอร์แบตช์ของเอบีเอส/แกรฟีน ที่ผ่านการตกตะกอนร่วม (Coagulation) ด้วยเมทานอล ผสมกับเอบีเอส 90 กรัม
2. ABS/G1B : นำมาสเตอร์แบตช์ของเอบีเอส/แกรฟีน ที่ผ่านการระเหยตัวทำละลาย DMF ที่อุณหภูมิห้อง ผสมกับเอบีเอส 90 กรัม
3. ABS/G1 : ทำการผสมแห้งแกรฟีน 1 กรัม ต่อเอบีเอส 100 กรัม โดยไม่ผ่านตัวทำละลายใดๆ

เมื่อได้วิธีการขึ้นเส้นที่ช่วยให้แกรฟีนกระจายตัวในเอบีเอสได้ดีที่สุดแล้ว จะนำวิธีนั้นไปใช้ในการขึ้นเส้นพลาสติกก๊วยชิ่งประกอบโดยกำหนดสัดส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.1 พร้อมควบคุมให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นพลาสติกก๊วยชิ่งประกอบเท่ากับ 1.75 มิลลิเมตร และม้วนเก็บเส้นพลาสติกก๊วยชิ่งประกอบไว้สำหรับนำไปใช้ในการพิมพ์สามมิติ

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของแกรฟีนต่อเอบีเอสในการเตรียมเส้นวัสดุเชิงประกอบ

ชื่อสูตร	Graphene (กรัม)	ABS (กรัม)
ABS/G1	1	100
ABS/G3	3	100
ABS/G5	5	100

3.5.5 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยการพิมพ์สามมิติ

ทำสอบการขึ้นรูปชิ้นงานจากวัสดุเชิงประกอบเอบีเอส/แกรฟีนด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติแบบ Fused deposition modeling (FDM) รุ่น WANHAO Duplicator 6 [Desktop 3D Printer] เพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลดังแสดงในหัวข้อ 3.6.6 โดยมีเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขสำหรับการพิมพ์ชิ้นงานทดสอบเชิงกล

Nozzle		0.4 mm
Quality	Layer Height	0.1 mm
Shell	Wall Thickness	0.8 mm
	Wall Line Count	3
	Top/Bottom Thickness	0.8 mm
	Top/Bottom Layers	8
	Horizontal Expansion	0 mm
Infill	Infill Pattern	Lines 30 %
Material : PLA	Printing Temperature	200 ° C
	Build Plate Temperature	60 ° C
Speed	Print Speed	25 mm/s
	Infill Speed	25 mm/s
	Wall Speed	12.5 mm/s
	Travel Speed	25 mm/s
Travel	Z Hop When Retracted	X
Cooling	Enable Print Cooling	X
	Regular Fan Speed	X

Support	Generate Support	X
Build Plate Adhesion	Type	Skirt

* ทิศการพิมพ์ชิ้นงานที่ 45 องศา

3.6 การวิเคราะห์ และทดสอบชิ้นงาน

3.6.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometry, FT-IR)

นำแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ แกรฟีน และวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/เอบีเอส ที่เตรียมได้ มาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ โดยการขึ้นรูปชิ้นทดสอบตัวอย่างด้วยการอัดผงตัวอย่างร่วมกับโพแทสเซียมโบรไมด์



รูปที่ 3.2 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) รุ่น Nicolet 6700

3.6.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

เพื่อศึกษาสารตัวอย่างด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer, XRD) ของแกรไฟต์, แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน โดยนำมาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างด้วยการสังเกตมุมหักเหของรังสีเอกซ์ที่เปลี่ยนแปลง และระยะห่างระหว่างระนาบของสารตัวอย่าง



รูปที่ 3.3 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) รุ่น D8 Advance

3.6.3 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน

ทำการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของเส้นวัสดุเชิงประกอบเอป็อกซี/แกรไฟน์สำหรับการพิมพ์สามมิติ โดยกำหนดช่วงอุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์ตั้งแต่ 50 ถึง 600 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer, TGA ดังแสดงในรูป 3.3



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA)

รุ่น TG 209 F3 Tarsus®

3.6.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบเอปียเอส/แกรฟีนสำหรับการ พิมพ์สามมิติ ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) โดยทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 250 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ค่าที่ต้องการวิเคราะห์คือ อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (melting temperature, T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และ ระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity, X_c)



รูปที่ 3.5 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) รุ่น DSC1/STARe

3.6.5 การทดสอบหาค่าดัชนีการหลอมไหล

ศึกษาเปรียบเทียบค่าดัชนีการหลอมไหลของเส้นเอปียเอสเกรดทางการค้า และเส้นวัสดุเชิงประกอบเอปียเอส/แกรฟีนสำหรับการพิมพ์สามมิติ ด้วยเครื่องทดสอบหาค่าดัชนีการหลอมไหล ตามมาตรฐาน ASTM D1238-13



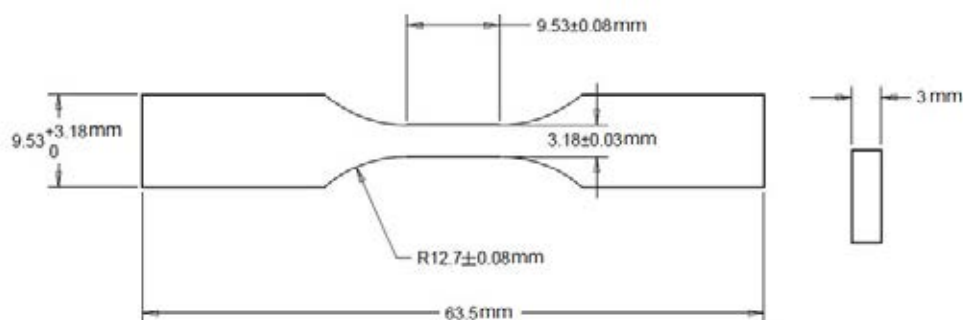
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบหาค่าดัชนีการหลอมไหลรุ่น 7053

3.6.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลทำเพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของสัดส่วนแกรฟีนที่เติมลงไปในวัสดุเชิงประกอบเอปียเอส/แกรฟีนที่ปริมาณต่างกัน และทำการทดสอบเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ได้ กับเส้นเอปียเอส (ABS) บริสุทธิ์ และเส้นเอปียเอส (ABS) ที่มีในทางการค้า โดยทำการทดสอบสมบัติเชิงกลทั้ง 3 ด้าน ได้แก่

การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (tensile properties)

เตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-14 โดยการเตรียมชิ้นทดสอบในรูปดัมเบล (dumbbell, type V) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 นำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.7) โดยใช้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน และอัตราเร็วในการดึงยึด 50 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง พร้อมวิเคราะห์ ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) และยังส์มอดุลัส (Young's modulus)



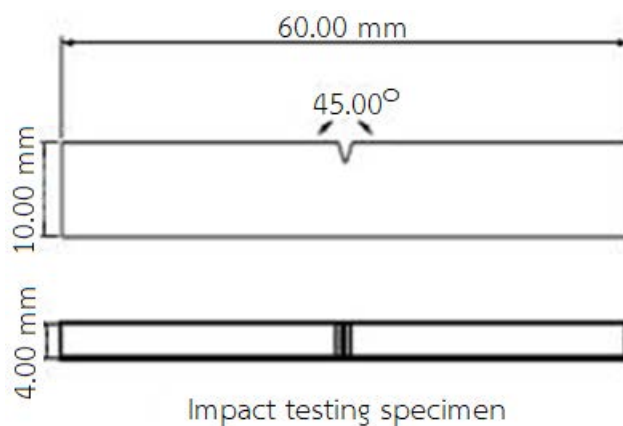
รูปที่ 3.7 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบในรูปดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D638-14 type V



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล

การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength)

เตรียมชิ้นตัวอย่างที่จะนำไปทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-10 ดังแสดงในรูปที่ 3.10 จากนั้นนำไปทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก ยี่ห้อ GOTECH รุ่น GT-7045-MDH (รูปที่ 3.11) โดยใช้หัวกระแทกเบอร์ 2 ขนาด 2.75 จูล โดยทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง พร้อมวิเคราะห์ค่าความทนแรง



รูปที่ 3.9 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-10



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก รุ่น GT-7045-MDH

3.6.7 การตรวจลักษณะของชั้นการพิมพ์

ตรวจสอบลักษณะของชั้นการพิมพ์ของชิ้นงานบริเวณรอยแตก (fracture surface) ของชิ้นทดสอบหลังการแตกหักถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope, OM) โดยการนำชิ้นทดสอบที่แตกหักหลังผ่านการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงมาตรวจสอบ



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น SU3500

3.6.8 การศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า

ทำการศึกษาความสามารถในการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเป็นฉนวนของวัสดุ (รูปที่ 3.14) โดยเครื่องทดสอบไฟฟ้า (Pico ammeter) ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ก่อนจะนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบไฟฟ้า (Pico ammeter)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 สมบัติของแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีวิธีการปรับปรุงแฮมเมอร์ (improved Hummer's method) โดยในการสังเคราะห์แต่ละครั้งจะได้ปริมาณแกรฟีน 13 - 15 กรัม เนื่องจากในงานวิจัยจำเป็นต้องใช้แกรฟีนปริมาณมากกว่าปริมาณที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละครั้ง จึงต้องทำการสังเคราะห์หลายครั้งแล้วนำมารวมกันเพื่อให้ได้ปริมาณตามต้องการ ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าแกรฟีนที่สังเคราะห์ขึ้นในแต่ละครั้งมีสมบัติเฉพาะตัวเหมือนกัน ผู้วิจัยได้ทำการสุมแกรฟีนที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละครั้งมาทำการตรวจสอบลักษณะเฉพาะโดยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) และ การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

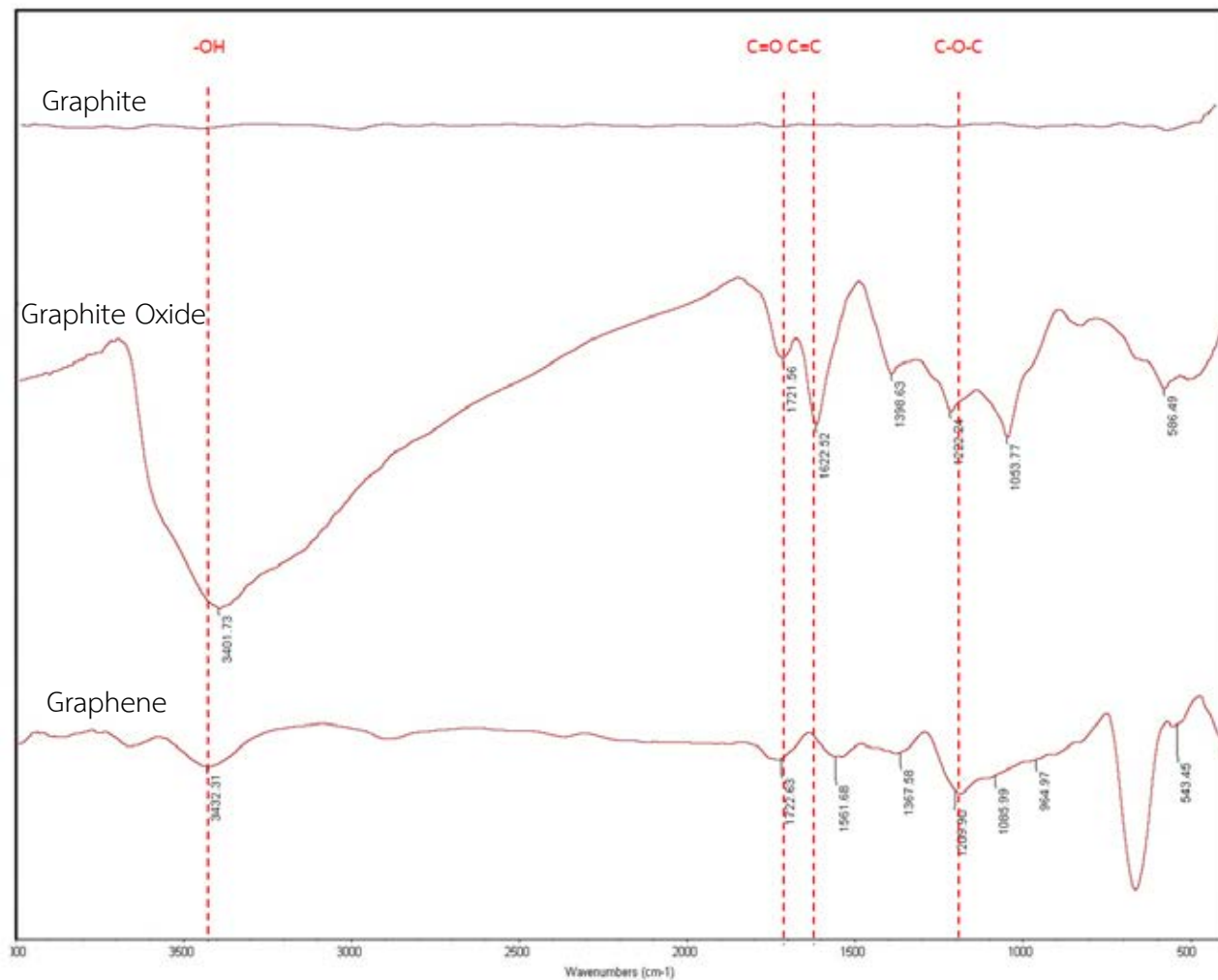
หมู่ฟังก์ชันของแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ และ แกรฟีน จากการสังเคราะห์ครั้งที่ 1 และ 2 ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีดังแสดงในรูป 4.1 และ รูปที่ 4.2 จากรูปพบว่าสเปกตรัมของแกรไฟต์มีลักษณะแบบราบ มีพีกแสดงขึ้นมาเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแกรไฟต์มีโครงสร้างเป็นเพียงอะตอมของคาร์บอนที่เชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์เพียงอย่างเดียว จึงไม่ปรากฏพีกของหมู่ฟังก์ชันใดๆ

นอกจากนี้ แกรไฟต์ออกไซด์ซึ่งได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระหว่างแกรไฟต์, กรดซัลฟิวริกเข้มข้น และ โซเดียมไนเตรด ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างบริเวณผิวของแกรไฟต์จากพันธะคู่ของอะตอมคาร์บอนให้กลายเป็นคาร์บอนที่มีหมู่ฟังก์ชันร่วมกับออกซิเจน แกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 แสดงออกมาเป็นสเปกตรัมที่ตำแหน่งประมาณ 3400 cm^{-1} 1700 cm^{-1} 1200 cm^{-1} ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ในการสั่นของ หมู่ไฮดรอกซิล (C-OH) หมู่คาร์บอนิล (C=O) หมู่คาร์บอกซิลิก (-C(=O)-OH) และหมู่อีพอกไซด์ (C-O-C) ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังปรากฏพีกกว้างที่ตำแหน่งประมาณ 1620 cm^{-1} ซึ่งตรงกับลักษณะการสั่นของ sp^2 ของอะตอมคาร์บอน หรืออะตอมของคาร์บอนที่เกิดพันธะคู่กับอะตอมคาร์บอนใกล้เคียง (-C=C-) ซึ่งผลสเปกตรัมที่ได้จากแกรไฟต์ออกไซด์จากการสังเคราะห์ทั้ง 2 ครั้ง ทำให้สามารถยืนยันการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนบนคาร์บอนอะตอมของแกรฟีนออกไซด์

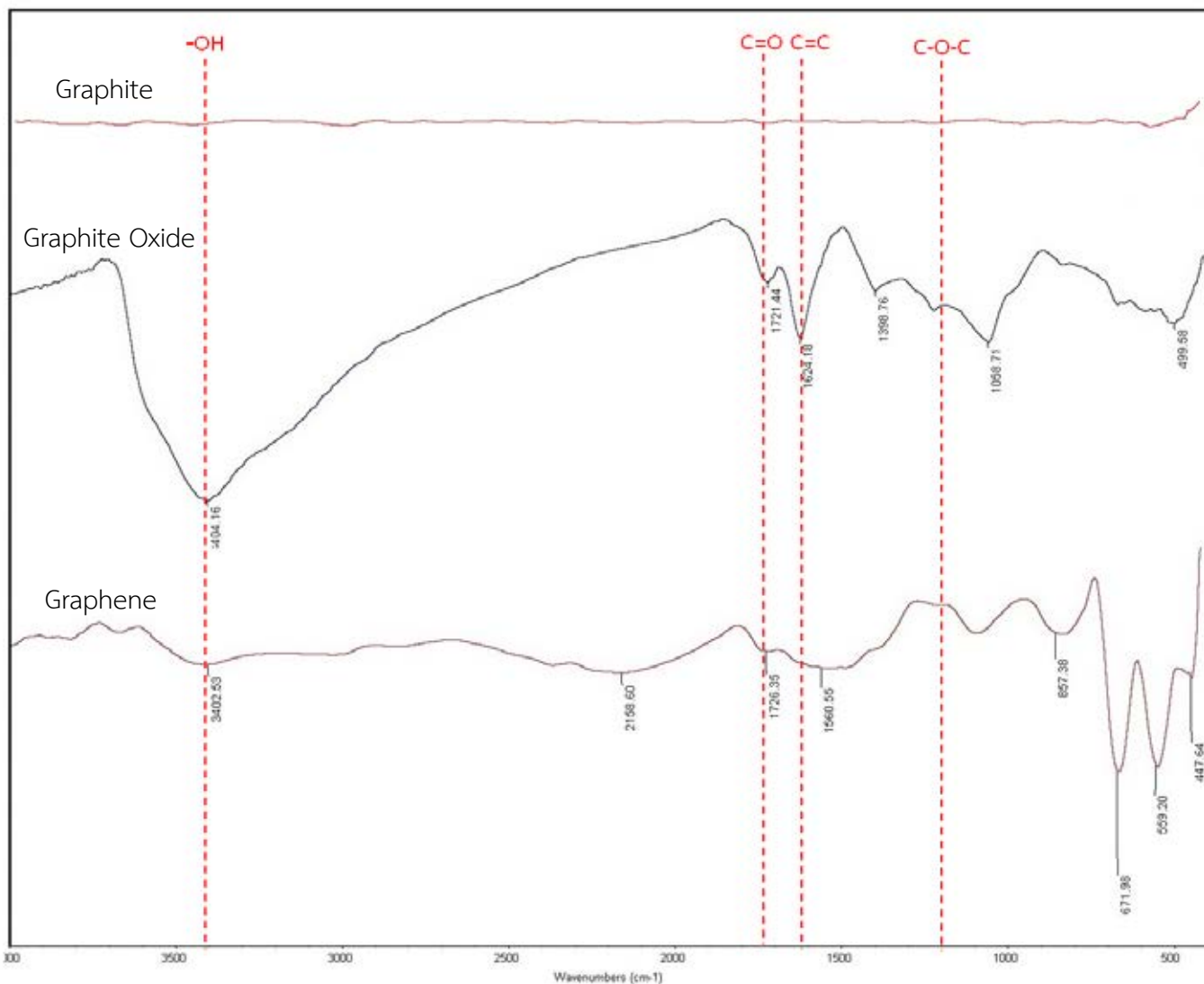
สเปกตรัมของแกรฟีนที่ได้จากการทำปฏิกิริยารีดักชันของแกรฟีนออกไซด์ทั้งการสังเคราะห์ครั้งที่ 1 และ 2 พบว่าความเข้มของพีกที่แสดงหมู่ฟังก์ชันระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน โดยเฉพาะบริเวณระดับพลังงาน $2000 - 2500\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (C-OH) ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการกำจัด

หมู่ไฮดรอกซิลด้วยการทำปฏิกิริยากับกรดแอสคอร์บิก แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีการปรากฏพีคของหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เล็กน้อยแสดงให้เห็นถึงเกิดการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ไม่สมบูรณ์นั่นเอง

จากผลที่แสดงให้เห็นทำให้เห็นว่าคุณภาพของแกรฟีนที่สังเคราะห์ได้จากทั้ง 2 รอบมีลักษณะเฉพาะที่ใกล้เคียงกัน สังเกตได้จากลักษณะการเกิดสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และทำให้สามารถเชื่อว่าสารที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 2 ครั้งเป็นแกรฟีน



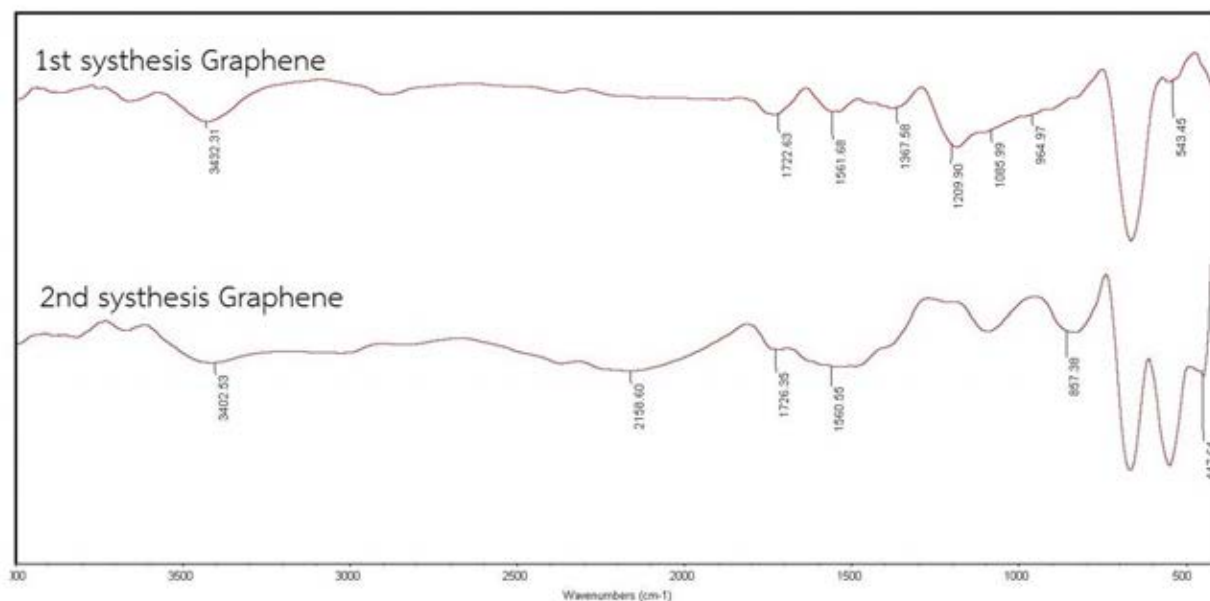
รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และแกรฟีน จากการสังเคราะห์ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคแกรไฟต์ กราฟีนออกไซด์ และกราฟีน จากการสังเคราะห์ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.1 เลขคลื่นการสั่นของพันธะคาร์บอนในกราฟีนออกไซด์

Spectrum (cm ⁻¹)		Functional Groups
1 st Synthesis	2 nd Synthesis	
1058 and 1224	1064 and 1220	C-O-C stretching: Epoxy and Alkoxy
1624	1622	C=C stretching: Carbon sp ²
1721	1721	C=O stretching: Carbonyl and Carboxylic
3401	3404	O-H stretching: Hydroxyl

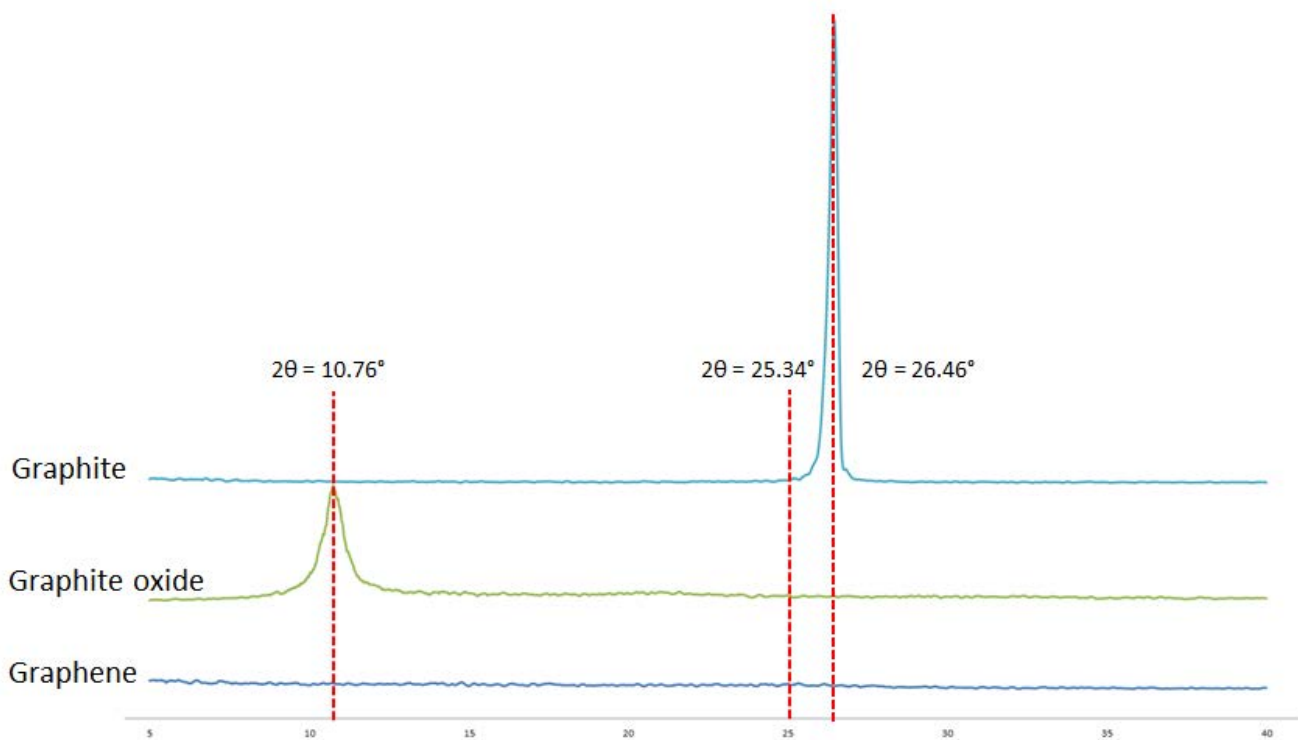


รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคแกรฟีน จากการสังเคราะห์ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2

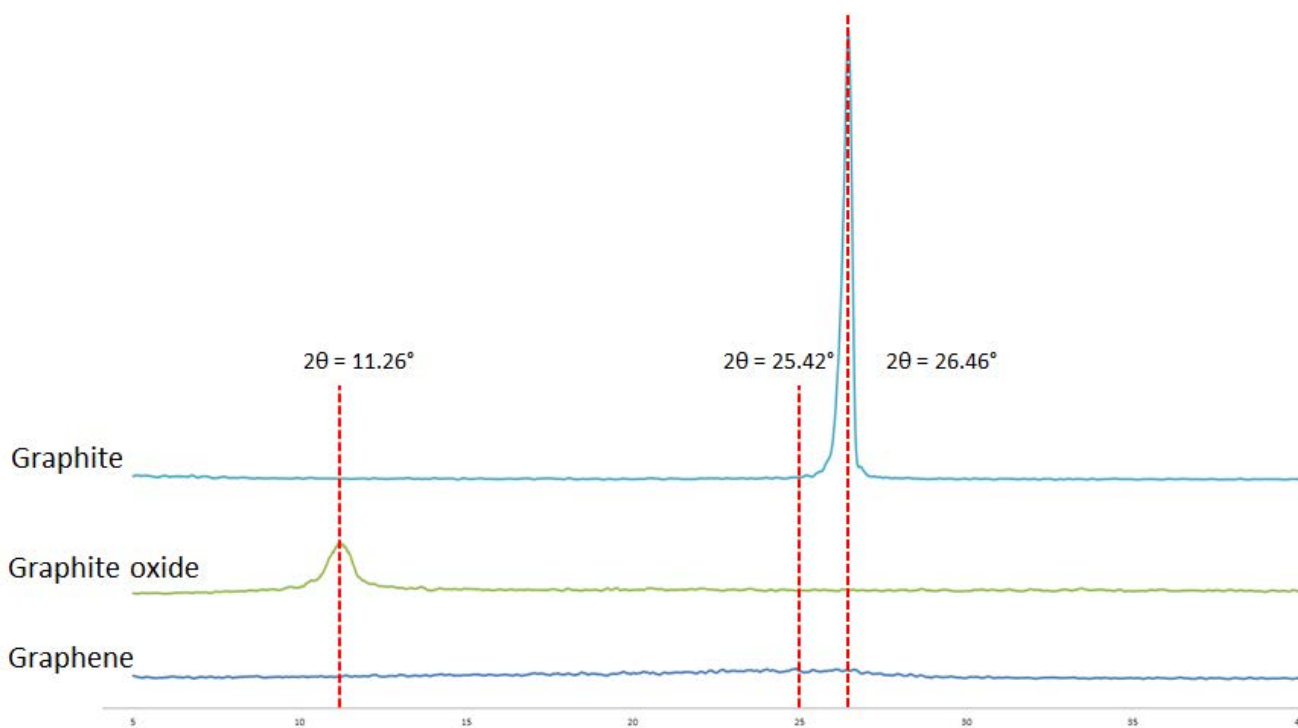
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

จากการนำแกรไฟต์, แกรไฟต์ออกไซด์ และ แกรฟีนที่สังเคราะห์ได้ครั้งที่ 1 และ 2 มาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD ได้ผลแสดงออกมาดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 เมื่อนำผลที่ได้มาคำนวณด้วยสมการของแบรกก์ (Bragg's equation; $n\lambda = 2d\sin\theta$) จะแสดงถึงค่าระยะห่างระหว่างชั้นของอนุภาค (D-spacing) โดยจะแปรผกผันกับค่า θ

พบว่าอนุภาคแกรไฟต์ปรากฏพีคการหักเหของรังสีเอ็กซ์ที่มุมของการเลี้ยวเบน (2θ) 26.46° เมื่อนำมาคำนวณด้วยสมการของแบรกก์ จะพบว่าระยะห่างระหว่างระนาบของอนุภาคประมาณ 0.34 นาโนเมตร และผลจากวิเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีนดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.4 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน ในการสังเคราะห์ครั้งที่ 1



รูปที่ 4.5 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน ในการสังเคราะห์ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.2 ค่ามุมการเลี้ยวเบน (2θ) และระยะห่างระหว่างชั้นของอนุภาค (D-spacing) ของแกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน

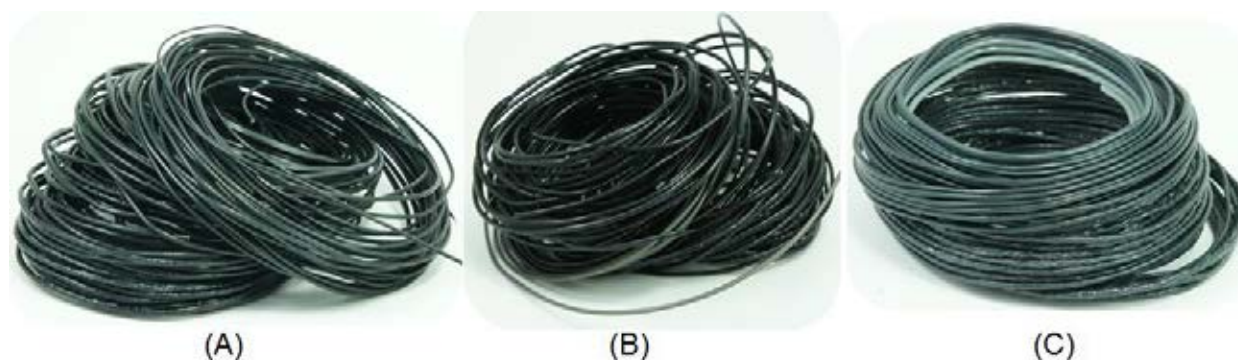
	1 st Synthesis		2 nd Synthesis	
	2-Theta (degree)	D-spacing (nm)	2-Theta (degree)	D-spacing (nm)
Graphite Oxide	10.76	0.82	11.26	0.79
Graphene	25.34	0.35	25.42	0.35

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อนำแกรไฟต์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันจนได้เป็นแกรไฟต์ออกไซด์ พบว่าแกรไฟต์ออกไซด์ทั้งในการสังเคราะห์ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีระยะห่างระหว่างระนาบที่เพิ่มมากขึ้นแสดงให้เห็นว่าการเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ มีส่วนช่วยให้ระยะห่างระหว่างระนาบของแกรไฟต์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้จากลักษณะของกราฟฟีกที่แสดงถึงหักเหของรังสีเอ็กซ์มีความเข้มข้นที่ต่ำลงจากตอนเป็นแกรไฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงให้เห็นว่าหมู่ออกซิเจนที่เข้าไปแทรกทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างระนาบของแกรไฟต์ลดลง ส่งผลให้แต่ละระนาบของแกรไฟต์สามารถแยกออกจากกันได้อย่างอิสระเมื่อได้รับคลื่นความถี่สูงผ่านตัวกลางน้ำ

เมื่อนำแกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันด้วยกรดแอสคอร์บิก พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นมีค่าลดลงเนื่องมาจากการลดลงของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้ชั้นของอะตอมคาร์บอนมีค่าระยะห่างระหว่างระนาบอะตอมมีค่าลดลง และเมื่อสังเกตลักษณะของฟีกที่ตำแหน่งประมาณ 25° พบว่ามีความกว้าง และความเข้มของฟีกที่ต่ำ แสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างอนุภาคแกรฟีน

4.2 เส้นวัสดุเชิงประกอบแกรไฟิน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ

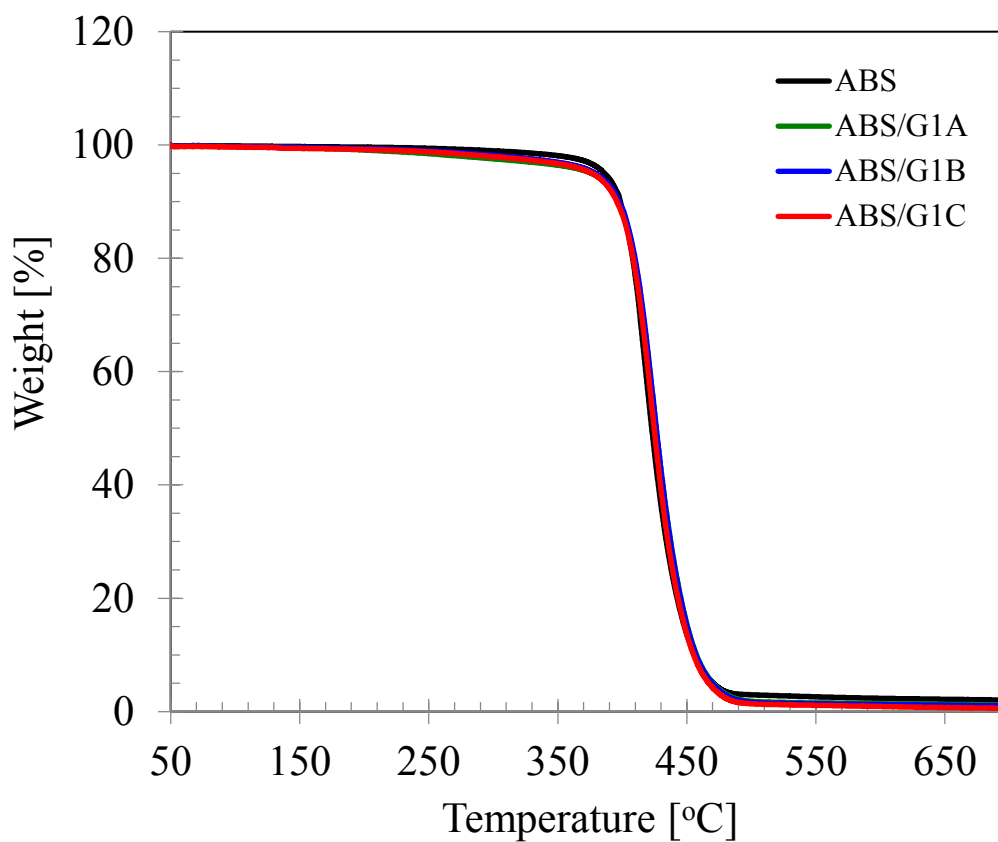
ผู้วิจัยได้ทำเตรียมการฉีดเส้นวัสดุเชิงประกอบแกรไฟิน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติสูตร ABS/G1 3 วิธี ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.5.4 โดยเส้นวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้แสดงดังรูปที่ 4.6 จากการสังเกตลักษณะทั่วไป ภายนอก พบว่าเส้นวัสดุเชิงประกอบสูตร ABS/G1A มีลักษณะเส้นค่อนข้างเรียบ เนื้อวัสดุรวมเป็นเนื้อเดียวกัน เส้นค่อนข้างที่จะเปราะ สามารถหักได้โดยง่าย ต่อมาเส้นวัสดุเชิงประกอบ ABS/G1B มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับสูตร ABS/G1A แต่เส้นมีรอยขรุขระเล็กน้อย และในเส้นวัสดุเชิงประกอบ ABS/G1C มีลักษณะเส้นที่ขรุขระมาก เนื้อวัสดุมีการแยกกันอย่างชัดเจน เป็นรอยจุดสีดำ และพื้นสีขาว



รูปที่ 4.6 เส้นวัสดุเชิงประกอบแกรไฟิน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ สูตร ABS/G1 (A)

4.2.1 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของเส้นวัสดุเชิงประกอบแกรไฟิน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

รูปที่ 4.7 แสดงเทอร์โมแกรมการสลายตัวของชิ้นทดสอบเส้นเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟิน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติสูตร ABS/G1 ทั้ง 3 รูปแบบการผสมชิ้นทดสอบ ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ 50 – 700 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



รูปที่ 4.7 เทอร์โมแกรมการสลายตัวของชิ้นทดสอบเส้นเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติปริสทุธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติสูตร ABS/G1 ทั้ง 3 รูปแบบ

จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวดังแสดงในรูป 4.7 พบว่าการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบสำหรับการพิมพ์สามมิติมีลักษณะการสลายตัวเพียงขั้นเดียว จะเห็นได้ชัดว่าเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิตินี้มีจุดอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ส่งผลให้เห็นว่าแกรฟีนมีผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบ

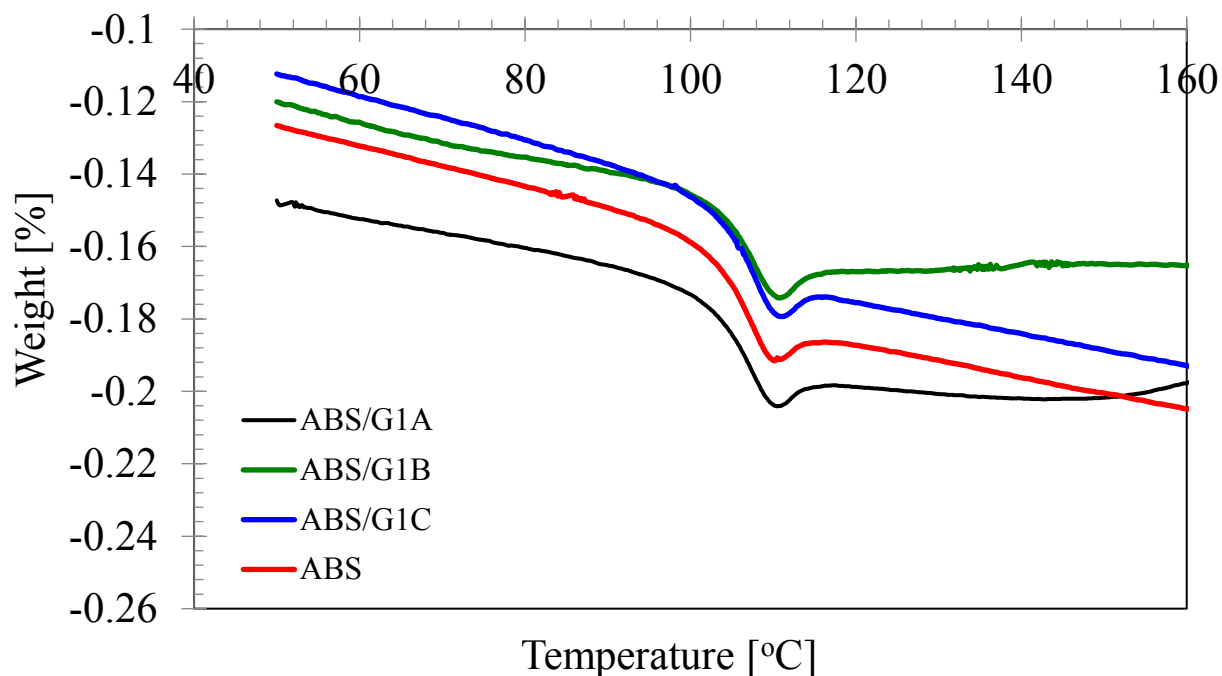
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ

Materials	T _{on-set} (°C)	T _{end-set} (°C)	T _{50%} (°C)
ABS	400.8	444.7	422.7
ABS/G1A	403.9	449.6	426.8
ABS/G1B	404.4	449.3	426.9
ABS/G1C	403.4	447.1	125.2

ผลการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ในตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอส สำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่ผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ โดยพบว่าเส้นวัสดุเชิงประกอบสำหรับการพิมพ์สามมิติมีแนวโน้มอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคแกรฟีน ประกอบด้วยระนาบวงคาร์บอนที่มีความเสถียรภาพทางความร้อนที่สูง ซึ่งเห็นได้ชัดว่าในวิธีการผสมทั้ง 3 แบบจะมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่เพิ่มขึ้นจากเอบีเอสที่ไม่ได้ผสมแกรฟีน โดยจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้ง 3 วิธี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

รูปที่ 4.8 แสดงพฤติกรรมทางความร้อนของเส้นเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่ผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ พบว่าปรากฏเพียงพฤติกรรมของ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) เพียงค่าเดียว เนื่องด้วยเอบีเอสเป็นพอลิเมอร์ออสซิลูฐาน จึงไม่แสดงอุณหภูมิลอมเหลวผลึก (T_m) และเมื่อเติมแกรฟีนลงไปในเอบีเอสส่งผลให้มีแนวโน้มของอุณหภูมิ การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าแกรฟีนไม่ส่งผลต่อ อุณหภูมิกลาสทรานซิชันอย่างมีนัยสำคัญ หรือก็คือการเติมแกรฟีนลงไปในเอบีเอสไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการ ขึ้นรูป จึงสามารถขึ้นรูปชิ้นงานจากเส้นวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/เอบีเอสด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติที่อุณหภูมิเดียวกับ เส้นเอบีเอสบริสุทธิ์ได้โดยไม่ต้องทำการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ



รูปที่ 4.8 พฤติกรรมทางความร้อนของเส้นเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่ผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเส้นวัสดุสำหรับการพิมพ์สามมิติ

Materials	T_g (°C)
ABS	109.9
ABS/G1A	110.0
ABS/G1B	110.3
ABS/G1C	110.4

4.2.3 การทดสอบหาค่าดัชนีการหลอมไหล

ตารางที่ 4.4 แสดงดัชนีการหลอมไหลของเส้นพลาสติกเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ และเส้นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรไฟีน/เอบีเอส สำหรับการพิมพ์สามมิติที่ผสมต่างกัน 3 รูปแบบ พบว่าการเติมแกรไฟีนสามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหลอมไหลของเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ โดยเส้นวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการผสมแบบ A และ B จะมีดัชนีการหลอมไหลที่ใกล้เคียงกัน ที่ประมาณ 5.9 g/10min แต่ในเส้นวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการผสมแบบ C จะมีดัชนีการหลอมไหลสูงขึ้นถึงประมาณ 6.9 g/10min เป็นผลมาจากอนุภาคของแกรไฟีนแสดง

พฤติกรรมคล้าย พลาสติกไซเซอ์กระจายตัวในโครงสร้างของพอลิแล็กติกแอซิด ทำให้สายโซ่โครงสร้างของพอลิแล็กติกแอซิดเกิดการเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่าย ส่งผลให้มีดัชนีการหลอมไหลที่สูงขึ้น และพบว่าเส้นวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการผสมแบบ A มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด แสดงให้เห็นถึงการกระจายของข้อมูลที่สูงสุด ซึ่งน่าจะมีผลมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของแกรฟีนในเอปียเอส

ตารางที่ 4.4 ดัชนีการหลอมไหลของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ

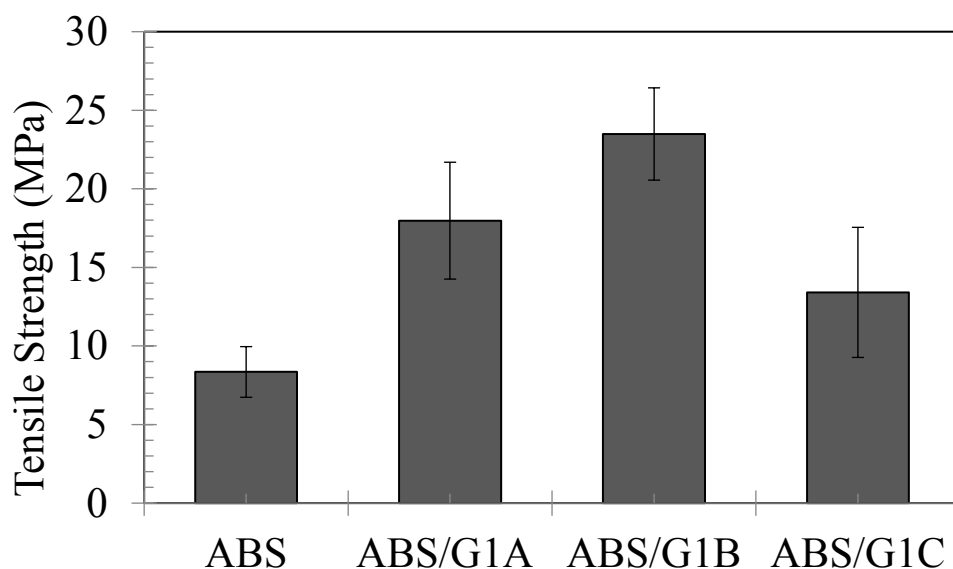
Materials	MFI (g/10min)
ABS	5.3
ABS/G1A	6.8
ABS/G1B	6.5
ABS/G1C	6.3

4.3 ผลของวิธีการผสมเส้นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีน/เอปียเอสต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ

เพื่อทำการคัดเลือกขั้นตอนการผสมแกรฟีนกับเอปียเอส สำหรับสร้างเส้นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีน/เอปียเอสจึงทำการศึกษาผลของวิธีการผสมทั้ง 3 แบบต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ

4.3.1 สมบัติด้านแรงดึง

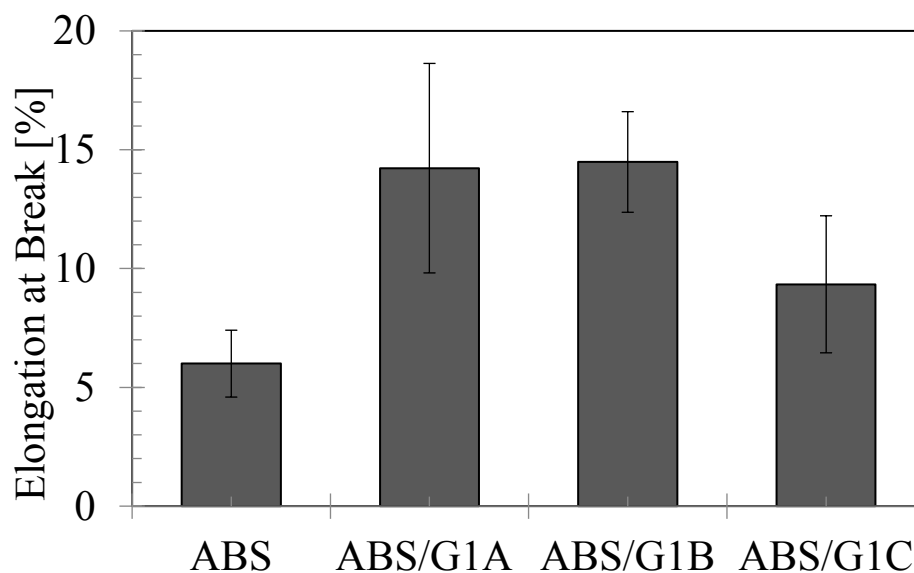
รูปที่ 4.9 แสดงอิทธิพลของขั้นตอนการผสมแกรฟีนและเอปียเอสที่มีต่อสมบัติความทนแรงดึงของชิ้นทดสอบ จากกราฟพบว่าสูตร ABS/G1A มีค่าทนแรงดึง 17.976 MPa, ABS/G1B มีค่าทนแรงดึง 23.49 MPa, ABS/G1C มีค่าทนแรงดึง 13.41 MPa และ ABS มีค่าทนแรงดึง 8.35 MPa แสดงให้เห็นว่าแกรฟีนมีคุณสมบัติช่วยเสริมแรงให้กับเอปียเอส โดยวิธีการผสมสูตร ABS/G1B หรือ การทำมาสเตอร์แบชโดยผ่านการระเหยตัวทำละลาย DMF ที่อุณหภูมิห้อง จะช่วยให้อนุภาคแกรฟีนกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีที่สุด



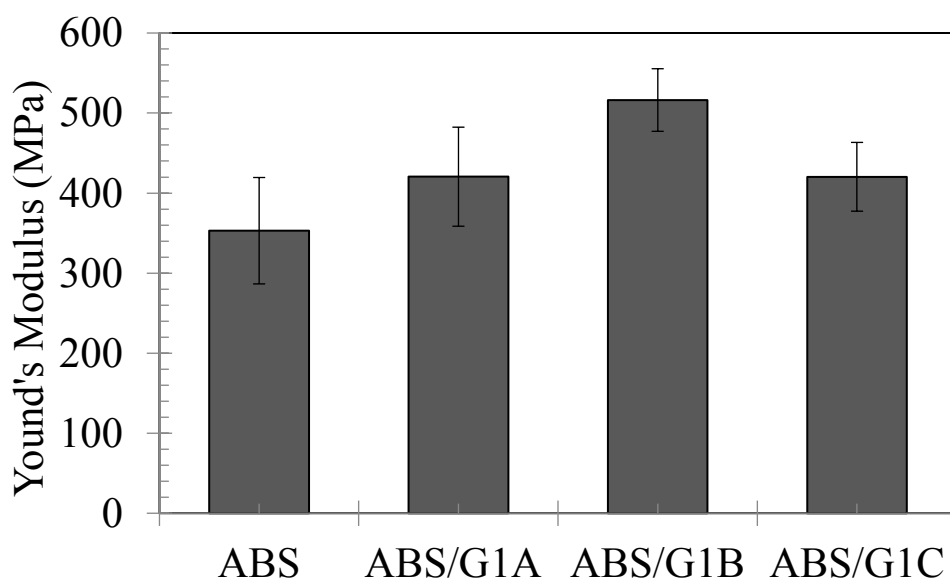
รูปที่ 4.9 ความทนแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่ผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

เช่นเดียวกับใน รูปที่ 4.10 แสดงอิทธิพลของขั้นตอนการผสมแกรไฟีนและเอบีเอสที่มีต่อสมบัติความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ จากกราฟพบว่าสูตร ABS/G1A, ABS/G1B, ABS/G1C และ ABS มีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเท่ากับ 14.22%, 14.48%, 9.33% และ 5.99% ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.11 แสดงอิทธิพลของขั้นตอนการผสมแกรไฟีนและเอบีเอสที่มีต่ออย่างสัมมอดูลัสของชิ้นทดสอบ จากกราฟพบว่าสูตร ABS/G1A, ABS/G1B, ABS/G1C และ ABS มีค่ายังสัมมอดูลัสเท่ากับ 420.50 MPa, 516.28 MPa, 420.37 MPa และ 352.99 MPa ตามลำดับ จากทั้ง 2 รูปแสดงให้เห็นว่า สูตร ABS/G1B หรือ การทำมาสเตอร์แบบซโดยผ่านการระเหยตัวทำละลาย DMF ที่อุณหภูมิห้อง ก็ยังคงมีค่าคุณสมบัติที่สูงที่สุด

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าเส้นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรไฟีน/เอบีเอส สูตร ABS/G1B หรือ การทำมาสเตอร์แบบซโดยผ่านการระเหยตัวทำละลาย DMF ที่อุณหภูมิห้อง มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด จึงสามารถสรุปได้ว่า จะทำการเลือกวิธีการผสมแกรไฟีน/เอบีเอสด้วยการทำมาสเตอร์แบบซโดยผ่านการระเหยตัวทำละลาย DMF ที่อุณหภูมิห้อง ในการทำงานวิจัยขั้นต่อไป

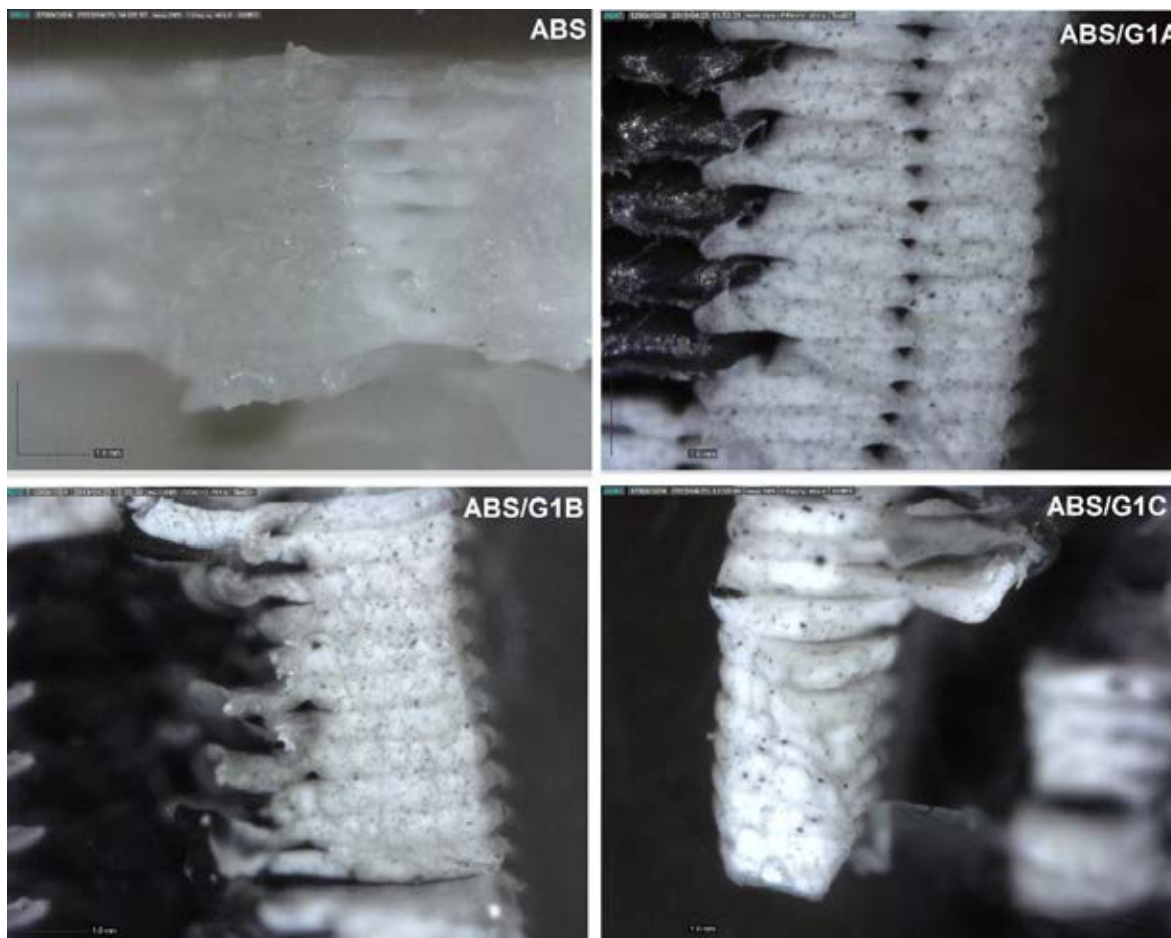


รูปที่ 4.10 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่ผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.11 ยังสัมมอดูลัสของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่ผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

โดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.12 พบว่าระนาบชั้นการพิมพ์ของ ABS/G1B มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีความเป็นระเบียบสูงกว่า ABS/G1A ที่แสดงช่องว่างระหว่างชั้นการพิมพ์ และ ABSG1C ที่มีการแยกกันของชั้นการพิมพ์อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงบริเวณรอยแตกหักจากการทดสอบด้านแรงดึงของ เส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่ผสมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

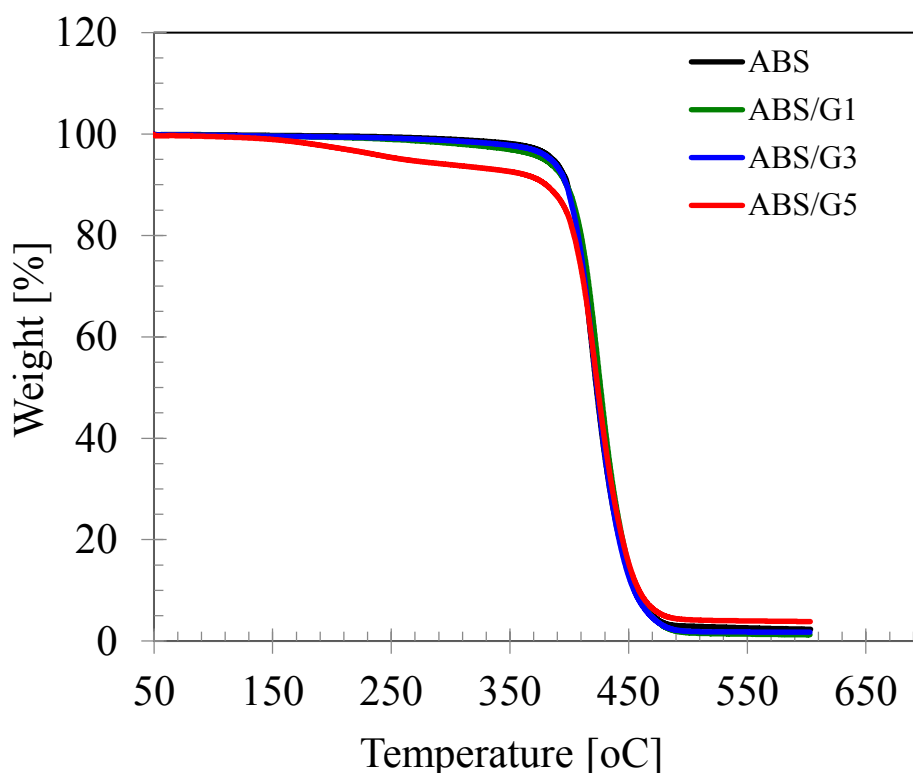
จากผลที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าเส้นวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการผสมแบบ B มีคุณสมบัติด้านต่างๆ ดีที่สุด จึงทำให้เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานวิจัยขั้นถัดไป

4.4 ผลของสัดส่วนแกรฟีนต่อสมบัติของเส้นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ

เมื่อได้ขั้นตอนการผสมแกรฟีน/เอบีเอสที่ดีที่สุดแล้ว เพื่อทำการคัดเลือกสูตรที่ดีที่สุดของเส้นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในเครื่องใช้ไฟฟ้า จึงทำการศึกษาผลของสัดส่วนแกรฟีนที่ 1, 3 และ 5 phr ต่อสมบัติด้านความร้อนของเส้นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีน/เอบีเอส และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ

4.4.1 การศึกษาผลของแกรฟีนที่สัดส่วนต่างๆต่อการสลายตัวทางความร้อนของเส้นวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

รูปที่ 4.13 แสดงเทอร์โมแกรมการสลายตัวของชิ้นทดสอบเส้นเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติสูตร ABS/G1, ABS/G3 และ ABS/G5 ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ 50 – 700 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรมการสลายตัวของชิ้นทดสอบเส้นเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ

จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวดังแสดงในรูป 4.8 พบว่าการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบสำหรับการพิมพ์สามมิติมีลักษณะการสลายตัวเพียงขั้นเดียว จะเห็นได้ชัดว่าเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิตินั้นมีจุดอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ส่งผลให้เห็นว่าแกรฟีนมีผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบ ยกเว้นผลของเส้นวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/เอบีเอสสูตร ABS/G5 มีลักษณะการสลายตัวสองขั้น โดยในขั้นแรกเกิดในช่วง 150-270 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลดัชนีการหลอมไหลในหัวข้อถัดไป

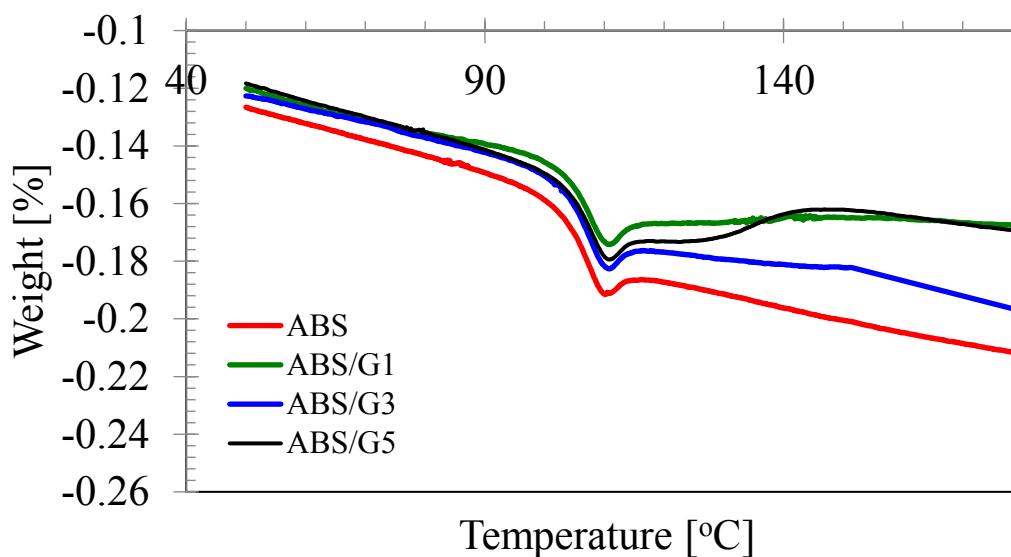
ผลการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ในตารางที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมที่ 1 3 และ 5 phr โดยพบว่าเส้นวัสดุเชิงประกอบสำหรับการพิมพ์สามมิติมีแนวโน้มอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่เพิ่มขึ้น เมื่อเติมแกรฟีนที่สัดส่วน 1 phr แต่เมื่อเติมถึงสัดส่วนที่ 3 phr อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด เริ่มลดลงจนเทียบเท่าเส้นเอบีเอสบริสุทธิ์ และเมื่อเติมถึงสัดส่วนที่ 5 phr อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด เกิดการสลายตัวสองขั้น โดนในขั้นแรกจะอยู่ในช่วง 150-270 องศาเซลเซียส และในขั้นที่สองจะมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่เพิ่มขึ้นจากเส้นวัสดุเอบีเอสบริสุทธิ์ เนื่องจากอนุภาคแกรฟีนประกอบด้วยระนาบวงคาร์บอนที่มีความเสถียรภาพทางความร้อนที่สูง

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ

Materials	T _{on-set} (°C)	T _{end-set} (°C)	T _{50%} (°C)
ABS	401.0	445.1	423.0
ABS/G1	404.4	449.3	426.9
ABS/G3	401.3	446.1	423.8
ABS/G5	152.6	270.4	221.5
	402.0	448.8	425.4

4.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

รูปที่ 4.14 แสดงพฤติกรรมทางความร้อนของเส้นเอบีเอสำหรับการพิมพ์สามมิติปริส্তুธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมที่ 1 3 และ 5 phr พบว่าปรากฏเพียงพฤติกรรมของ อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) เพียงค่าเดียว เนื่องด้วยเอบีเอเป็นพอลิเมอร์อสัญฐาน จึงไม่แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และเมื่อเติมแกรฟีนลงไปเอบีเอส่งผลให้มีแนวโน้มของอุณหภูมิ กลาสทรานซิชัน (T_g) ที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นปริมาณการเติมแกรฟีนที่ต่างกันไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชันอย่างมีนัยสำคัญ หรือก็คือการเติมแกรฟีนลงไปเอบีเอไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป จึงสามารถขึ้นรูปชิ้นงานจากเส้นวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/เอบีเอด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติที่อุณหภูมิเดียวกับเส้นเอบีเอปริส্তুธิ์ได้โดยไม่ต้องทำการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ



รูปที่ 4.14 พฤติกรรมทางความร้อนของเส้นเอบีเอสำหรับการพิมพ์สามมิติปริส্তুธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสำหรับการพิมพ์สามมิติที่มีสัดส่วนการเติมต่างๆระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเส้นวัสดุสำหรับการพิมพ์สามมิติ

Materials	T _g (°C)
ABS	109.9
ABS/G1	110.3
ABS/G3	110.2
ABS/G5	110.4

4.4.3 การทดสอบหาดัชนีการหลอมไหล

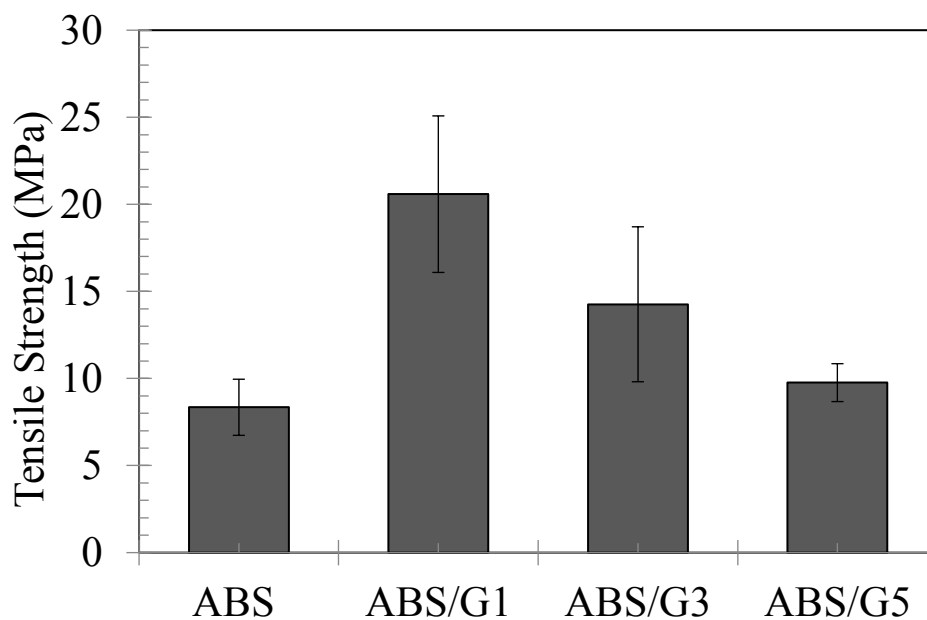
ตารางที่ 4.7 แสดงดัชนีการหลอมไหลของเส้นพลาสติกเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ และเส้นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีน/เอบีเอส สำหรับการพิมพ์สามมิติที่มีสัดส่วนการเติมที่ 1 3 และ 5 phr พบว่าการเติมแกรฟีนสามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหลอมไหลของเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ โดยเส้นวัสดุเชิงประกอบที่มีสัดส่วนการเติมที่ 1 phr มีดัชนีการหลอมไหลที่ประมาณ 6.5 g/10min และที่สัดส่วนการเติมที่ 3 phr มีดัชนีการหลอมไหลที่ประมาณ 6.3 g/10min พบว่าที่ปริมาณการเติมแกรฟีนที่ 1-3 phr ไม่ส่งผลต่อดัชนีการหลอมไหลอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในเส้นวัสดุเชิงประกอบที่มีสัดส่วนการเติมที่ 5 phr จะมีดัชนีการหลอมไหลสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญถึงประมาณ 13.5 g/10min ซึ่งอาจเป็นผลการจากสายโซ่โครงสร้างของเอบีเอสมีขนาดสั้นลงทำให้สามารถไหลได้ง่ายมากขึ้น และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนที่สัดส่วนการเติมที่ 5 phr เกิดการสลายตัวบางส่วนในช่วง 130-270 องศาเซลเซียส ซึ่งครอบคลุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบดัชนีการหลอมไหล

ตารางที่ 4.8 ดัชนีการหลอมไหลของเส้นวัสดุสำหรับการพิมพ์สามมิติ

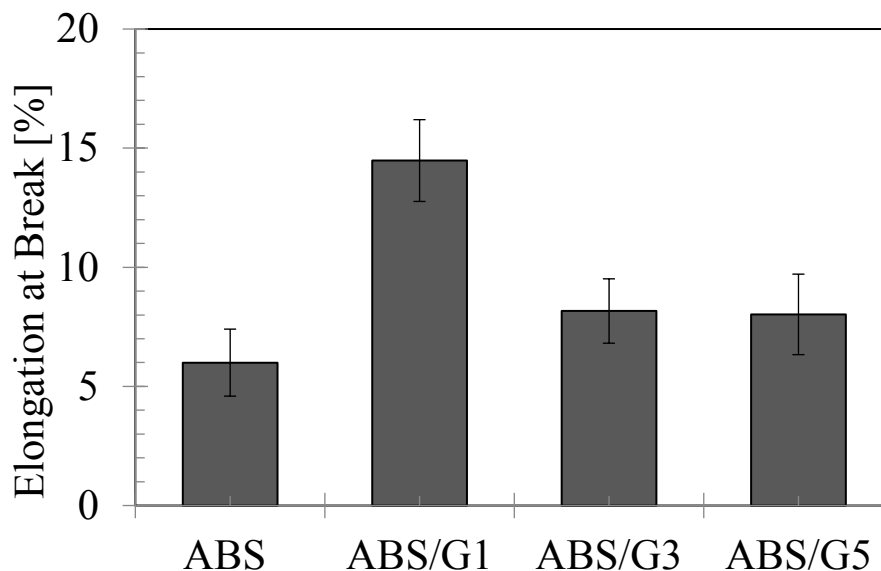
Materials	MFI (g/10 min)
ABS	5.3
ABS/G1	6.5
ABS/G3	6.3
ABS/G5	13.5

4.4.4 สมบัติด้านแรงดึง

รูปที่ 4.15 แสดงอิทธิพลของปริมาณแกรฟีนในเอบีเอสที่มีต่อสมบัติความทนแรงดึงของชิ้นทดสอบ จากกราฟพบว่าสูตร ABS/G1 มีค่าทนแรงดึง 23.5 MPa, ABS/G3 มีค่าทนแรงดึง 14.3 MPa, ABS/G5 มีค่าทนแรงดึง 9.8 MPa และ ABS มีค่าทนแรงดึง 8.3 MPa แสดงให้เห็นว่าปริมาณการเติมแกรฟีนมากกว่า 1 phr ส่งผลให้สมบัติด้านทานแรงดึงลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่เมื่อมีปริมาณแกรฟีนมากขึ้น แกรฟีนจะเริ่มจับตัวกันเองเป็นกลุ่ม ทำให้กระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้แยขึ้น เช่นเดียวกับรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปริมาณแกรฟีนในเอบีเอสที่มีต่อความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ จากกราฟพบว่ามีความยืดสูงสุดของ ABS/G1, ABS/G3, ABS/G5 และ ABS มีค่าเท่ากับ 14.5, 1.3, 1.7 และ 1.4 ตามลำดับ พบว่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบมีค่าลดลงสอดคล้องกับปริมาณแกรฟีนที่เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับสมบัติความทนแรงดึง

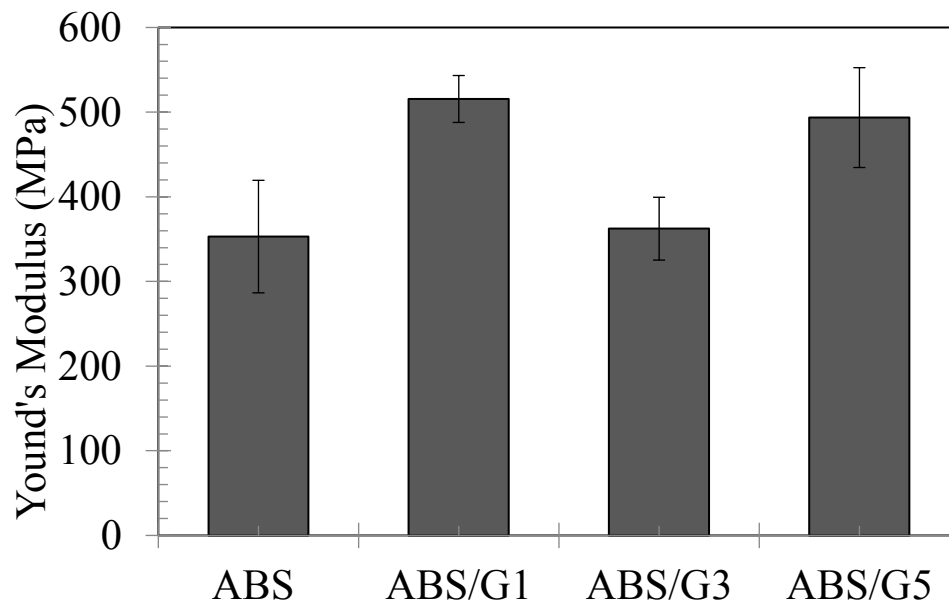


รูปที่ 4.15 ความทนแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ

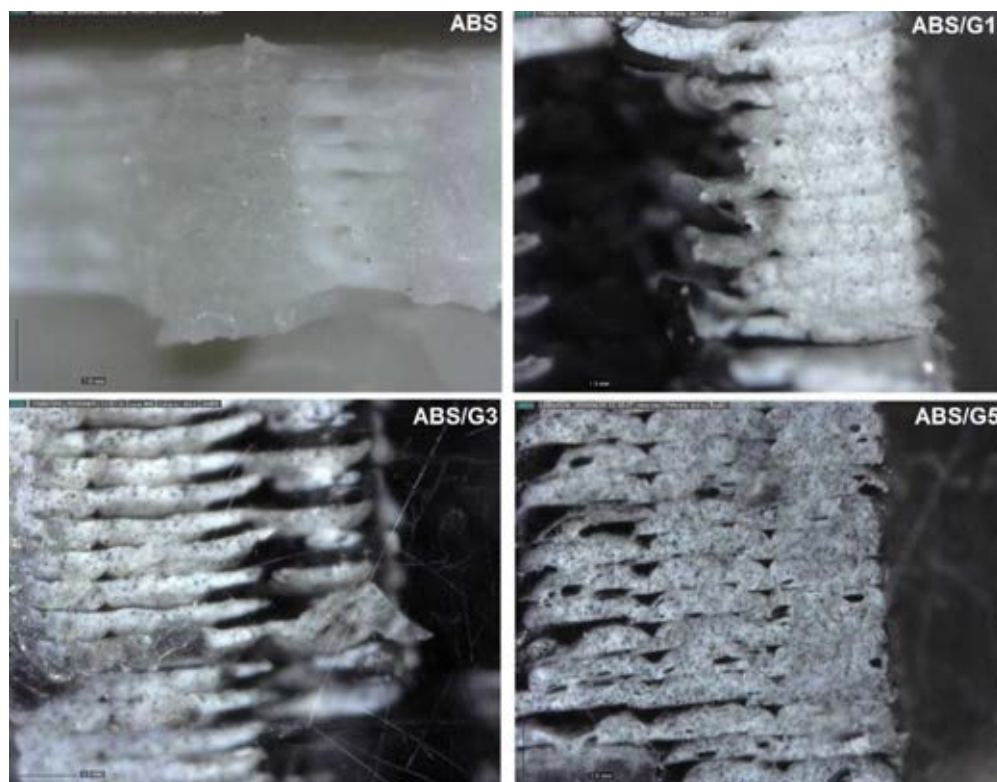


รูปที่ 4.16 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ

รูปที่ 4.17 แสดงอิทธิพลของปริมาณแกรไฟีนในเอบีเอสที่มีต่ออย่างสัมมูล์ของชิ้นทดสอบ จากกราฟพบว่า สูตร ABS/G1 มีค่ายังสัมมูล์ 515.5 MPa, ABS/G3 มีค่ายังสัมมูล์ 362.4 MPa, ABS/G5 มีค่ายังสัมมูล์ 493.7 MPa และ ABS มีค่ายังสัมมูล์ 353.0 MPa แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมแกรไฟีนที่สัดส่วน 3 phr มีค่ายังสัมมูล์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เป็นผลมาจากการมีระนาบชั้นการพิมพ์ที่แบ่งชั้นการอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.18 ส่งผลให้แรงยึดติดระหว่างชั้นการพิมพ์น้อยกว่า ABS/G1 และ ABS/G5



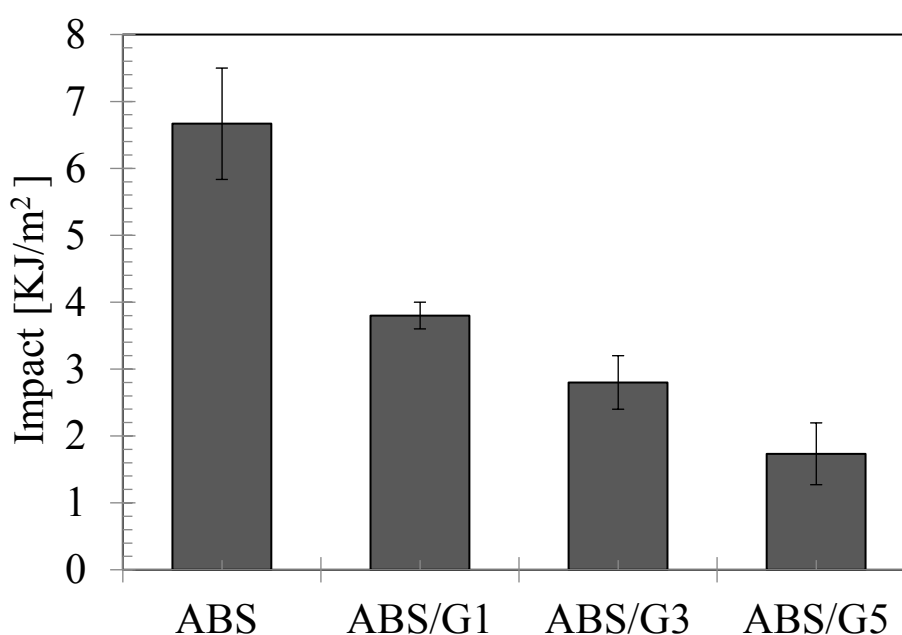
รูปที่ 4.17 ยังสัมมอดูลัสของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ



รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงบริเวณรอยแตกหักจากการทดสอบด้านแรงดึงของ เส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ

4.4.5 สมบัติด้านความทนแรงกระแทก

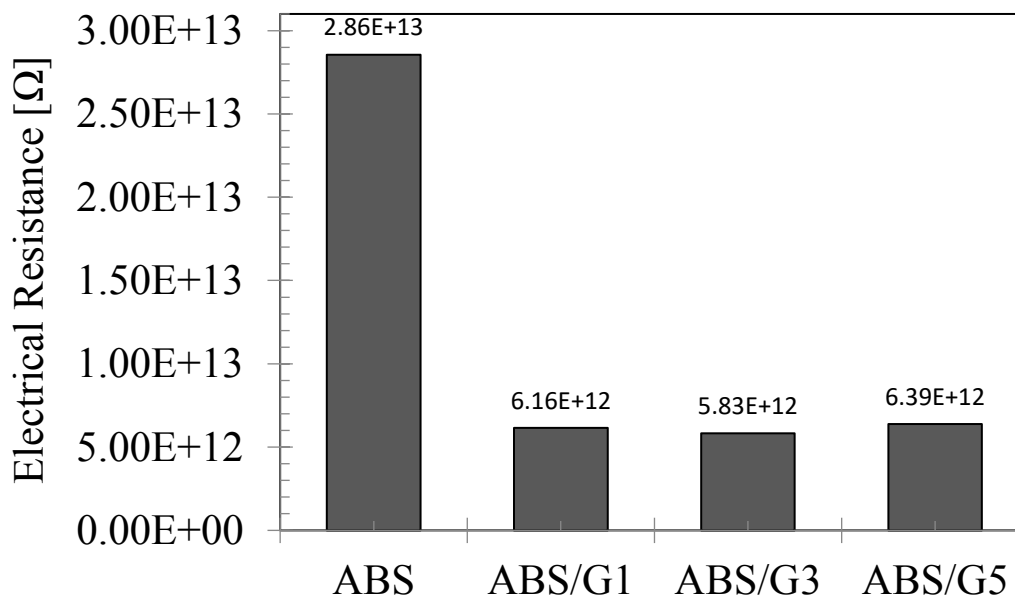
จากผลการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทกดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยเอบีเอสบริสุทธิ์ มีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่าชิ้นทดสอบที่มีการเติมแกรฟีนลงไป และเมื่อเปรียบเทียบค่าทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ปริมาณการเติมแกรฟีนที่แตกต่างกันพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแกรฟีนที่เติมลงในเอบีเอส ส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกที่ลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่อนุภาคแกรฟีนไปขัดขวางโครงสร้างของเอบีเอสที่มีคุณสมบัติด้านความทนแรงกระแทกสูง ส่งผลให้สมบัติด้านนี้ลดต่ำลงจากการเติมแกรฟีน



รูปที่ 4.19 ความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ

4.4.6 สมบัติด้านการต้านไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติจากเส้นพลาสติกเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติ และเส้นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีน/เอบีเอสที่มีสัดส่วนการเติมที่ 1 3 และ 5 phr ที่ทำการวัดด้วยเครื่องพิโคแอมมิเตอร์ (Pico ammeter) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยวัดกระแส (I) ที่ได้จากการให้แรงดันไฟฟ้า (V) และนำไปพล็อตกราฟคำนวณหาความชันได้ออกมาเป็นค่าความต้านทาน (R)



รูปที่ 4.20 ความต้านไฟฟ้าของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นเอบีเอส และ
เส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.20 พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติ จากเส้นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรไฟีน/เอบีเอส มีความต้านทานการนำไฟฟ้าที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากอนุภาคแกรไฟีน ซึ่งมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีจากโครงสร้างของแกรไฟีนที่ประกอบด้วยวงแหวนหกเหลี่ยมของอะตอมคาร์บอนชั้นเดียว จึงทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกขึ้น และทำให้เกิดการนำไฟฟ้า และที่ปริมาณการเติมแกรไฟีนที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อสมบัติการต้านไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่ปริมาณการเติมที่ 5 phr มีแนวโน้มที่มีการต้านไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สามารถคาดการณ์ได้อนุภาคแกรไฟีนเริ่มจับตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของแกรไฟีนแย่ง ทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการผสมแกรฟีนและเอบีเอส เพื่อนำไปใช้ในการผลิตเส้นวัสดุเชิงประกอบสำหรับกระบวนการพิมพ์สามมิติ และเพื่อศึกษาผลของการเติมแกรฟีนต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ดัชนีการลอมโพล และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบเอบีเอส โดยการเตรียมแกรฟีนขึ้นเองในห้องปฏิบัติการจากผงแกรไฟต์ด้วยเทคนิคที่ดัดแปลงจากวิธีการของฮัมเมอร์ รวมทั้งใช้ตัวรีดิวซ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้แก่กรดแอสคอร์บิก แล้วจึงนำแกรฟีนที่เตรียมได้มาผสมเข้ากับเอบีเอสด้วยวิธีที่ให้ผลดีที่สุด ที่อัตราส่วนแกรฟีน 1 3 และ 5 phr ด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เพื่อขึ้นรูปเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติ โดยจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สามารถเตรียมแกรฟีนจากแกรไฟต์ด้วยเทคนิคที่ดัดแปลงจากวิธีการของฮัมเมอร์ได้
2. สามารถเตรียมเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติจากวัสดุเชิงประกอบเอบีเอสกับแกรฟีนได้
3. วิธีการเตรียมบาสเตอร์แบบซีพผ่านการระเหยตัวทำละลาย DMF ที่อุณหภูมิห้อง เป็นวิธีที่ดีที่สุดในการเตรียมเส้นวัสดุเชิงประกอบ
4. สมบัติด้านแรงดึง และความทนแรงกระแทก มีค่าเพิ่มขึ้นที่ปริมาณการเติมที่ 1 phr และลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเติม
5. ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบเอบีเอสกับแกรฟีนสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าชิ้นงาน เอบีเอสที่ไม่ได้เติมแกรฟีน จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมแกรฟีนช่วยเพิ่มสมบัติในด้านการต้านไฟฟ้าสถิตให้กับวัสดุเชิงประกอบเอบีเอสได้
6. ปริมาณการเติมแกรฟีนที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ 1 phr

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการพิมพ์แบบสามมิติเพิ่มเติม เช่น ทิศทางการพิมพ์ขึ้นทดสอบการตัดกันของโครงสร้างใน ชิ้นทดสอบ และปริมาณการเติมขึ้นทดสอบในหน่วยเปอร์เซ็นต์ต์
2. ศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/เอบีเอสให้ มีการกระจายตัวของแกรฟีนที่ดี

ขึ้น

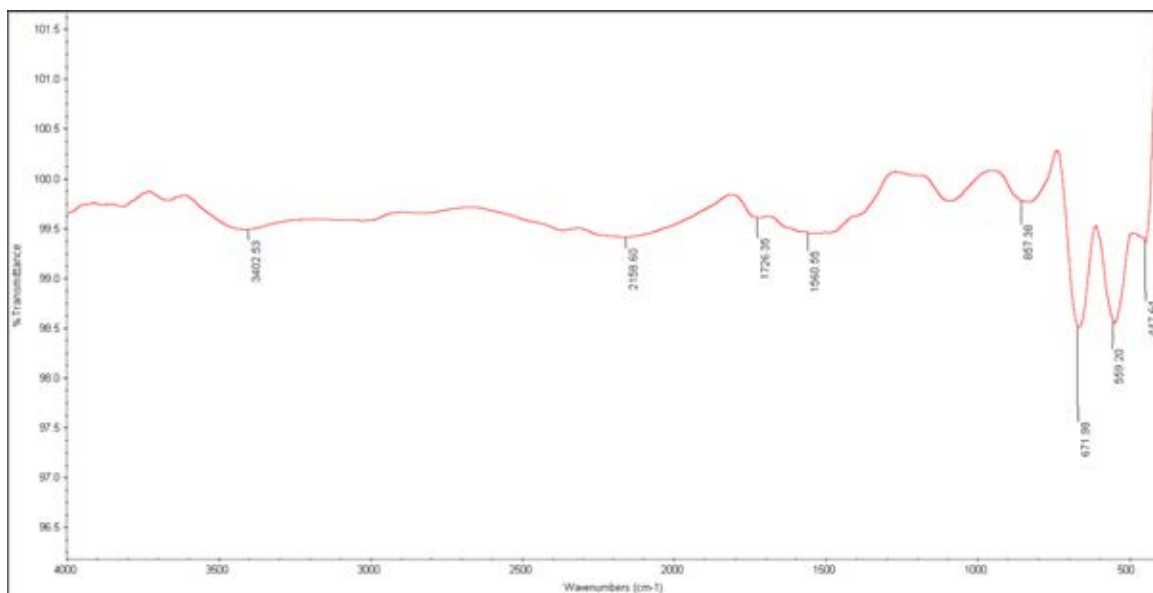
เอกสารอ้างอิง

1. Dawoud, M., I. Taha, and S.J. Ebeid, Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016. 21: p. 39-45.
2. สมานมิตร ยาวิจิตร. พลาสติกเอบีเอส, บริษัท อีพีจี อินโนเวชั่น เซ็นเตอร์ จำกัด, 2014, p. 1-4.
3. รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. พลาสติกเอบีเอส. *Properties of Polymers*. Department of Materials Science Faculty of Science Chulalongkorn University. P. 99-101.
4. Chom. คุณสมบัติพลาสติก ABS. 2015 ; Available from: <https://goo.gl/XuTQH1>
5. รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. พลาสติกเอบีเอส. *Properties of Polymers*. Department of Materials Science Faculty of Science Chulalongkorn University. P. 99-101.
6. ดร.ศิริกาญจน์ วิเศษสุวรรณภูมิ, แกรฟีนวัสดุ 2มิติ เพื่ออนาคต, M.T.E.C. 2017, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. P.95-69.
7. วิศวกรรมศาสตราจารย์ ชาติอารยะวดี, แกรฟีน ตอนที่ 2: สมบัติและการนำไปประยุกต์ใช้, วารสารนเรศวรพะเยา, 2014. P. 17-26.
8. International, A., Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology, in ISO / ASTM52900-15. 2015, ASTM International: West Conshohocken, PA.
9. A. Pongwisuthiruchte 3D-PRINTED GRAPHENE/POLY (LACTIC ACID) COMPOSITES. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology. 2016, Department of Materials Science Faculty of Science Chulalongkorn University. P. 3-6, 16-19, 23, 26-27
10. B.M. Tymrak a, M. Kreigerb and J.M. Pearce. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, in *Materials and Design*. 2014, Department of Mechanical Engineering & Engineering Mechanics, Michigan Technological University, Houghton, MI, United States. P. 242-245.
11. Jo, M. Y. and et al. Effects of Compatibilizers on the Mechanical Properties of ABS/PLA Composites. *Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com)*, 2012.
12. Lasprilla, A.J.R., G.A.R. Martinez, and B. Hoss, Synthesis and characterization of poly (lactic acid) for use in biomedical field. *Chem. Eng*, 2011. 24: p. 985-990.

13. Choi, E. Y., et al., Noncovalent functionalization of graphene with end-functional polymers. *Journal of Materials Chemistry*, 2010. 20(10): p. 1907-1912.
14. Rupinder, S. et al., Licensee MDPI, Basel, Switzerland. Investigations for Thermal and Electrical Conductivity of ABS-Graphene Blended Prototypes. 2017 ; Available from: <http://www.mdpi.com/1996-1944/10/8/881/htm>
15. Sharma, V. et al. Preparation, Characterization and Study of Mechanical Properties of Graphene/ABS Nanocomposites. *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 10(17), 2017. p. 0974-6846

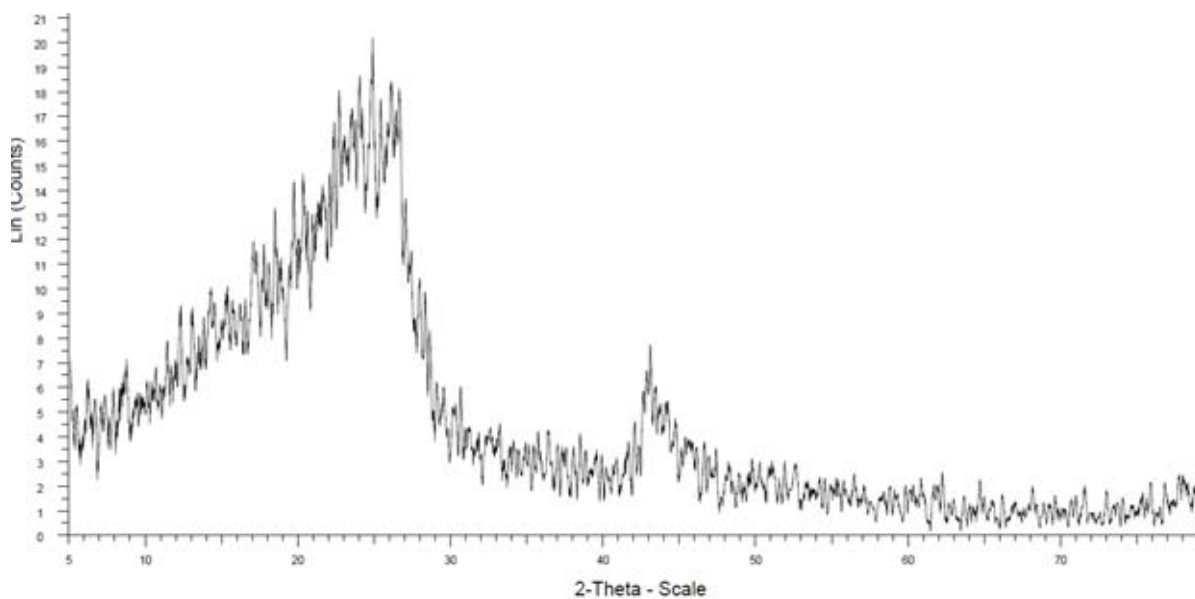
ภาคผนวก

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี



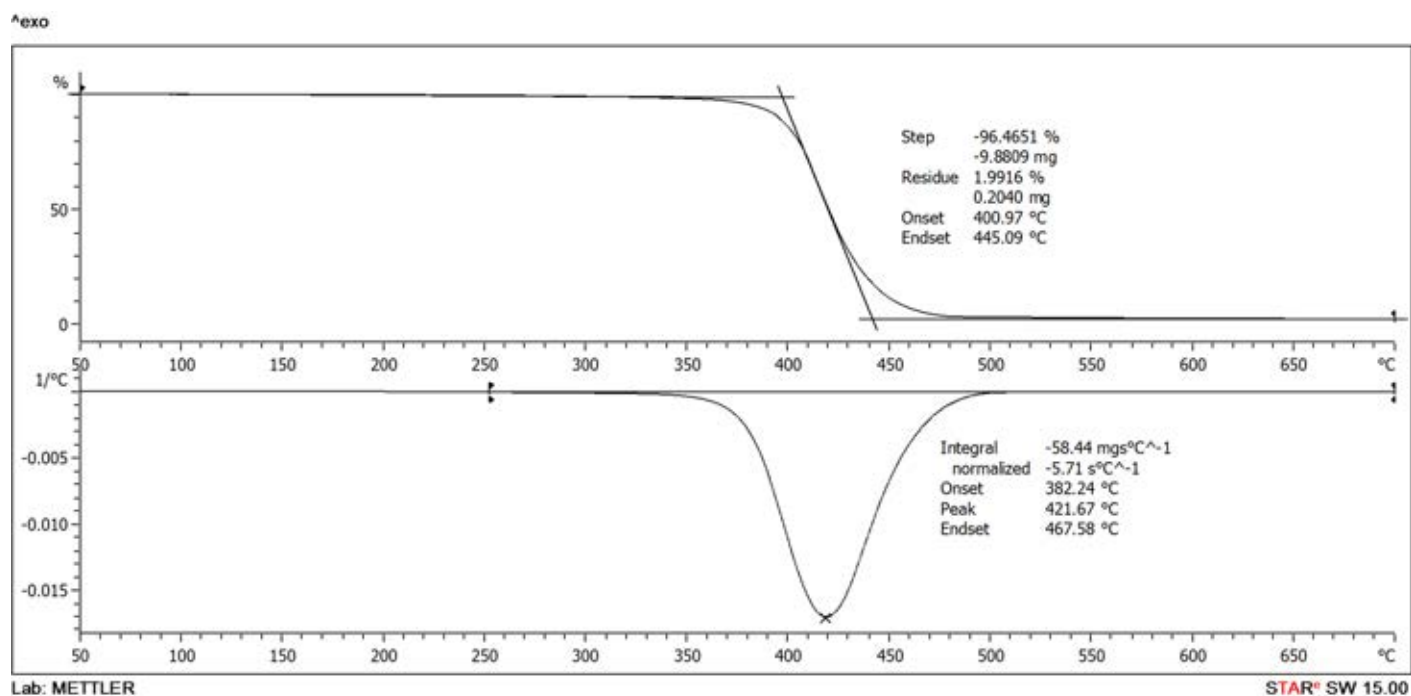
รูปที่ 1 อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคแกรฟีน จากวิธีการปรับปรุงแฮมเมอร์
(improved Hummer's method)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

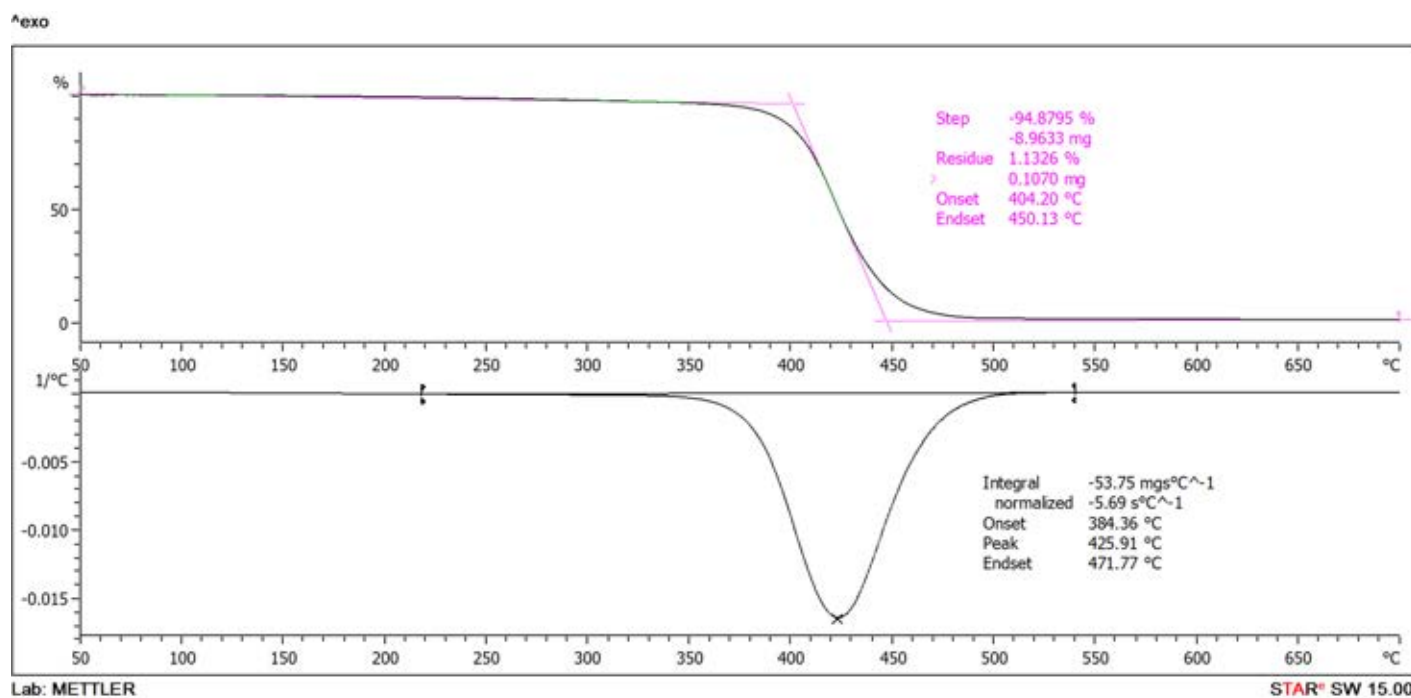


รูปที่ 2 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแกรฟีน

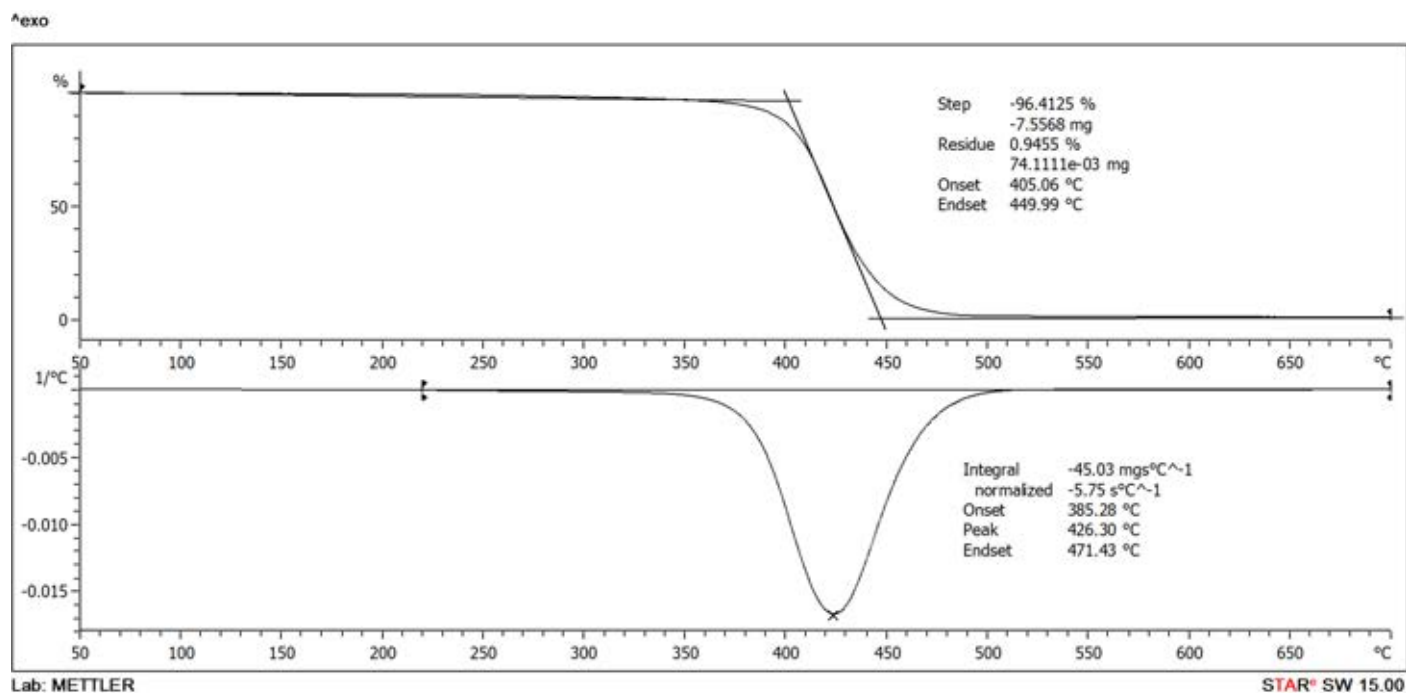
การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analyzer



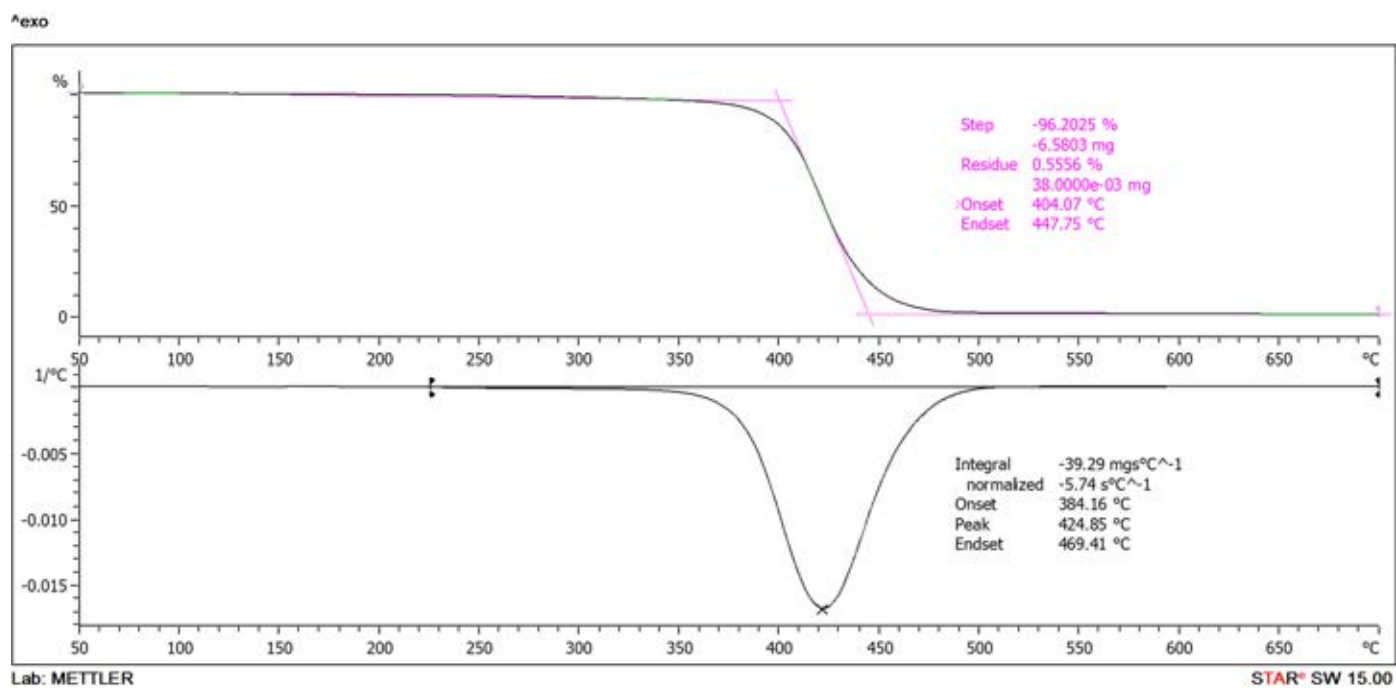
รูปที่ 3 เทอร์โมแกรมการสลายตัวของเส้นเอบีเอสสำหรับการพิมพ์สามมิติบริษัท



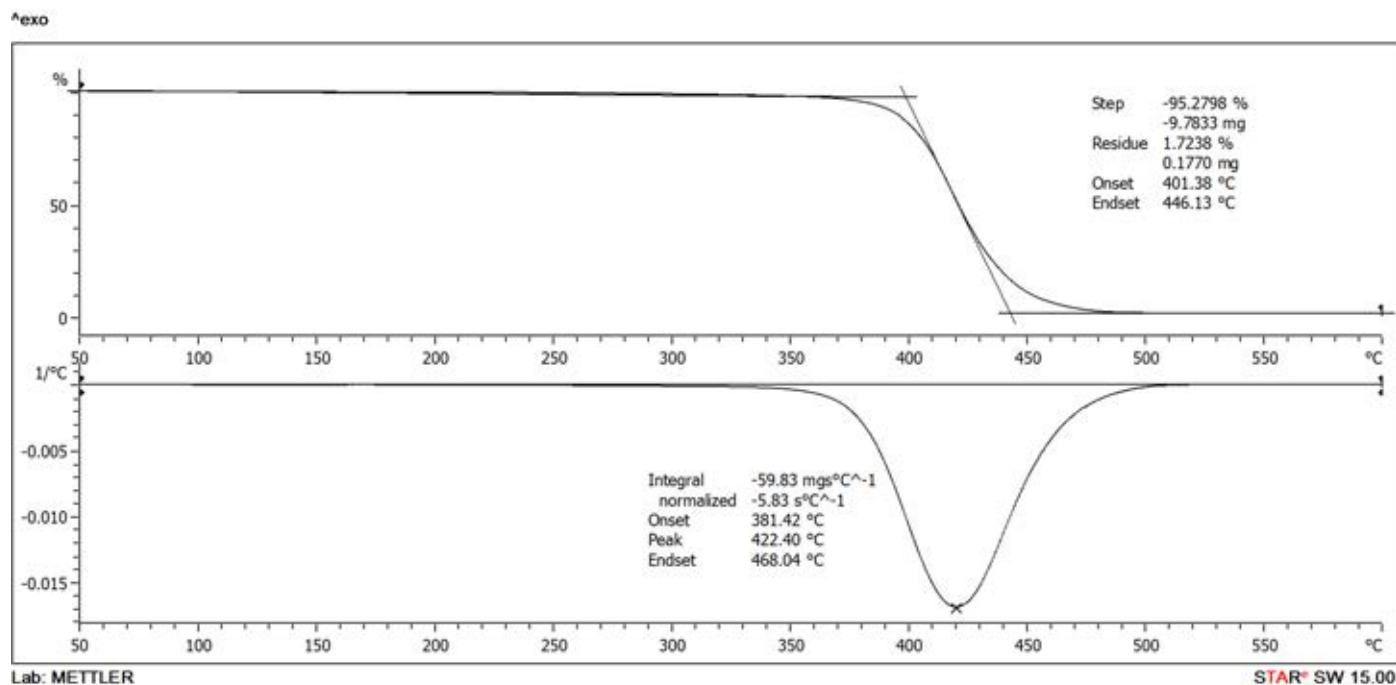
รูปที่ 4 เทอร์โมแกรมการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/เอบีเอส ABS/G1A



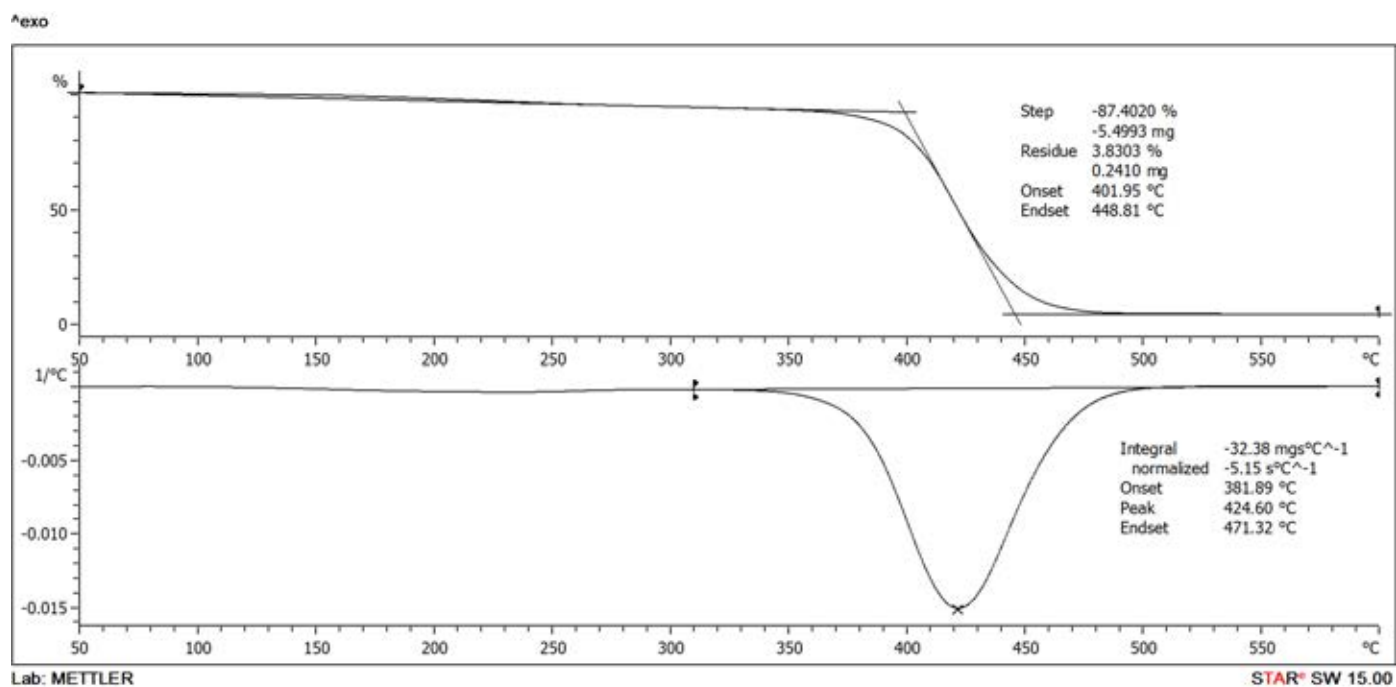
รูปที่ 5 เทอร์โมแกรมการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอส ABS/G1B



รูปที่ 6 เทอร์โมแกรมการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอส ABS/G1C

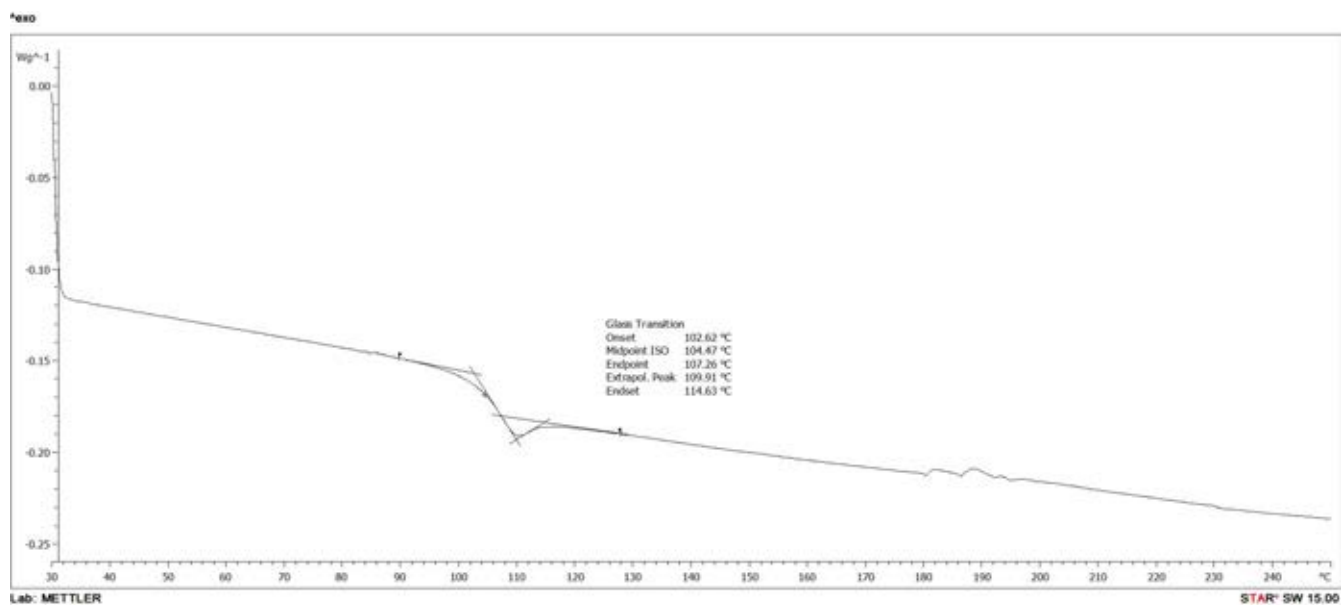


รูปที่ 7 เทอร์โมแกรมการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอส ABS/G3

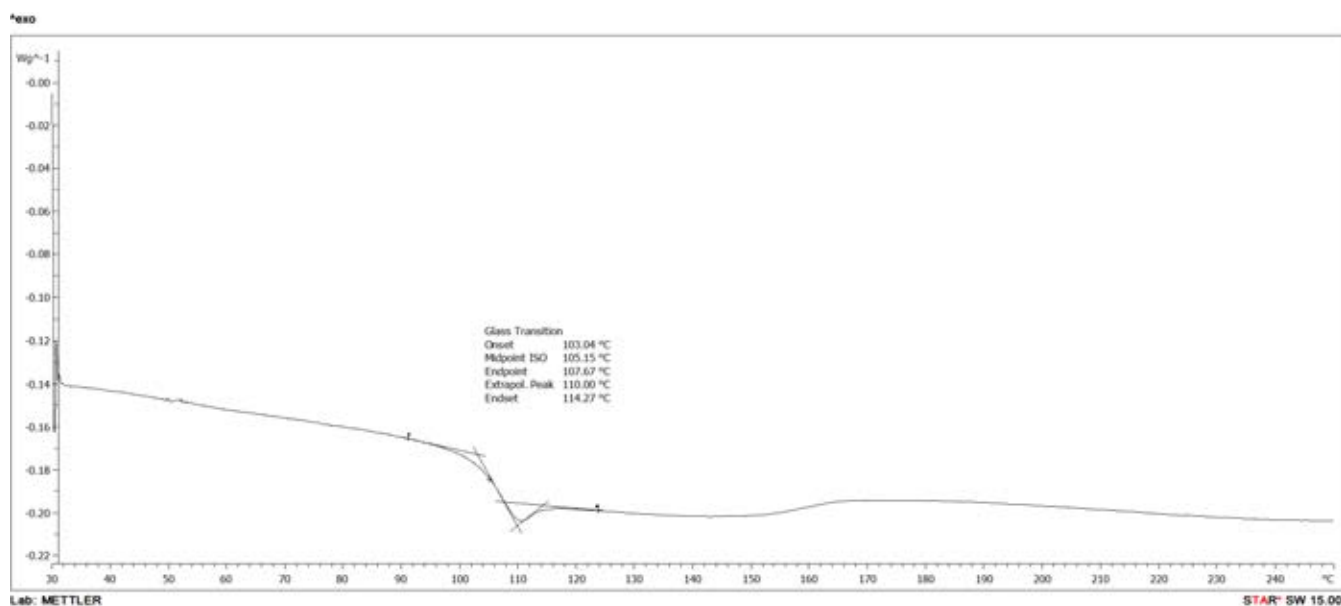


รูปที่ 8 เทอร์โมแกรมการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอส ABS/G5

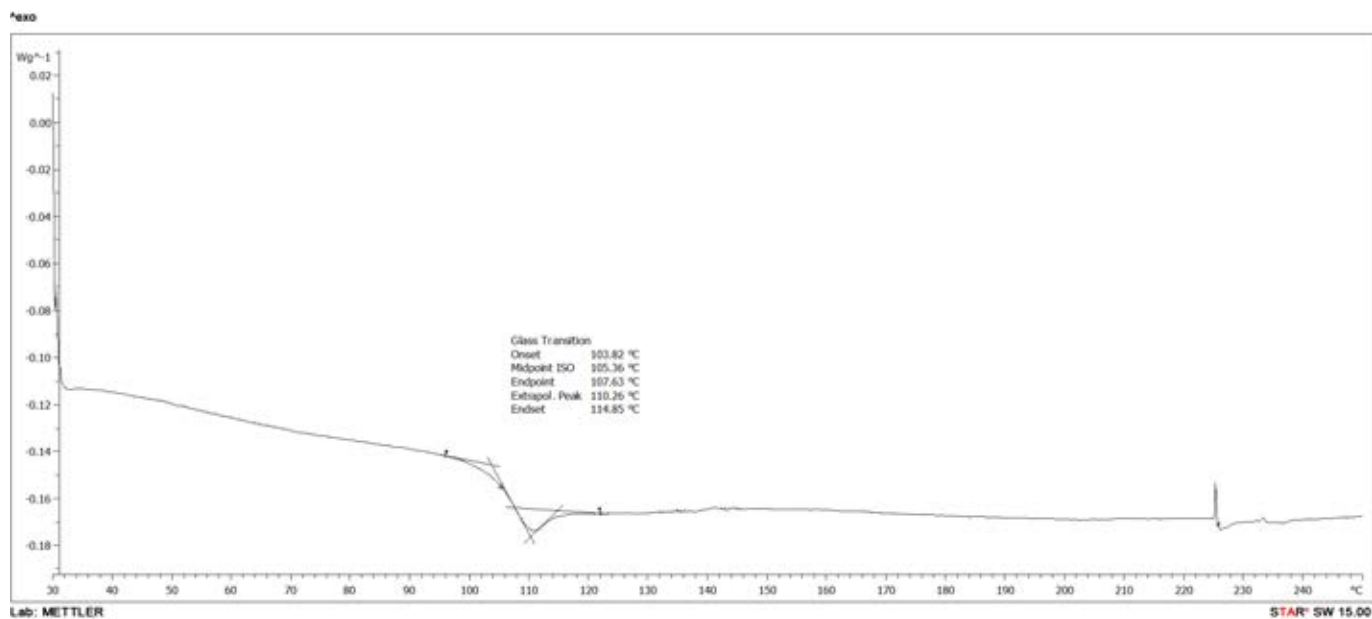
การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี



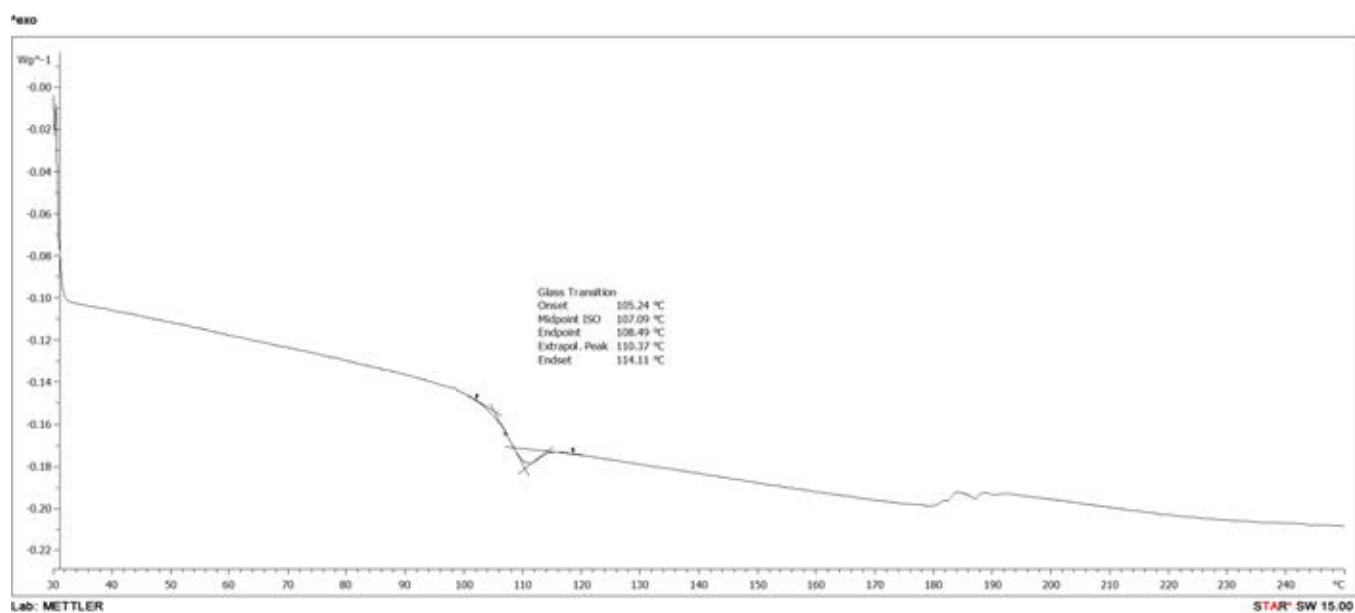
รูปที่ 9 เทอร์โมแกรมระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นเอปียีสสำหรับการพิมพ์สามมิติบริษัท



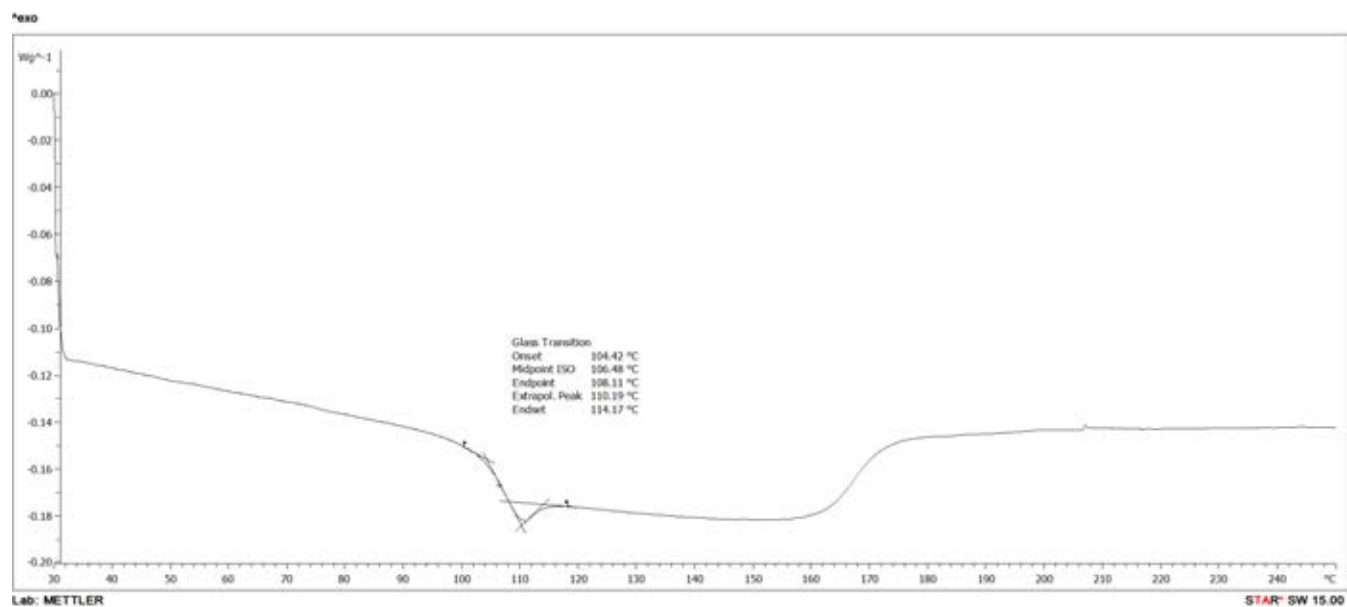
รูปที่ 10 เทอร์โมแกรมระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอปียีส ABS/G1A



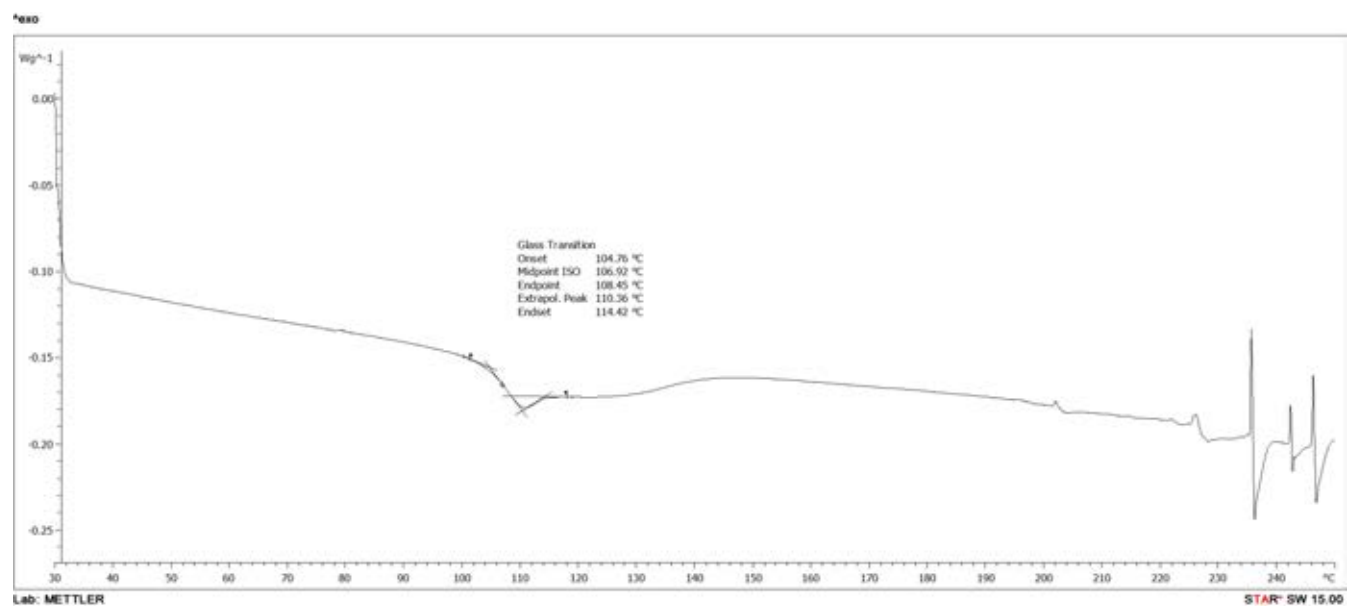
รูปที่ 11 เทอร์โมแกรมระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอส ABS/G1B



รูปที่ 12 เทอร์โมแกรมระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอส ABS/G1C



รูปที่ 13 เทอร์โมแกรมระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอส ABS/G3



รูปที่ 14 เทอร์โมแกรมระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/เอบีเอส ABS/G5

การทดสอบหาดัชนีการลอมไหล

ตารางที่ 1 ดัชนีการลอมไหลของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	ABS	5.8	5.0	5.0	-	-	5.3
2	ABS/G1A	5.2	7.3	8.0	-	-	6.8
3	ABS/G1B	5.8	7.2	-	-	-	6.5
4	ABS/G1C	7.0	7.0	5.9	-	-	6.6
5	ABS/G3	6.4	6.8	7	6	5.6	6.4
6	ABS/G5	14	13.6	14.4	12	-	13.5

การทดสอบหาสมบัติด้านแรงดึง

ตารางที่ 1 ความทนแรงดึงของชิ้นงานจากการพิมพ์สามมิติ

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	ABS	8.9	9.6	6.5	-	-	8.3
2	ABS/G1A	17.3	13.5	22.0	14.6	-	16.9
3	ABS/G1B	21.0	22.8	16.5	26.7	15.9	20.6
4	ABS/G1C	6.6	8.6	15.5	16.1	-	11.7
5	ABS/G3	8.0	11.6	18.3	15.2	18.2	14.3
6	ABS/G5	8.8	10.3	8.8	11.0	-	9.7

ตารางที่ 2 ความยืดหยุ่นสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นงานจากการพิมพ์สามมิติ

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	ABS	6.4	7.1	4.4	-	-	6.0
2	ABS/G1A	11.2	4.9	19.3	12.1	-	11.9
3	ABS/G1B	16.6	12.3	13.3	14.5	15.6	14.5
4	ABS/G1C	7.8	12.7	4.6	7.5	-	8.15
5	ABS/G3	6.9	7.1	8.3	8.1	10.3	8.2
6	ABS/G5	6.8	8.5	6.5	10.1	-	8.0

ตารางที่ 3 ยังสัมพันธ์ของชิ้นงานจากการพิมพ์สามมิติ

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	ABS	419.7	392.4	352.6	-	-	388.2
2	ABS/G1A	350.2	396.0	466.8	444.4	-	409.4
3	ABS/G1B	560.5	560.5	516.9	486.3	512.1	515.6
4	ABS/G1C	371.3	439.0	407.7	450.8	-	417.2
5	ABS/G3	345.8	324.7	361.8	423.7	355.9	362.4
6	ABS/G5	502.6	528.5	407.7	535.5	-	493.6

สมบัติด้านความทนแรงกระแทก

ตารางที่ 4 ความทนแรงกระแทกของชิ้นงานจากการพิมพ์สามมิติ

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ			ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	
1	ABS	6.4	6	7.6	6.7
2	ABS/G1	3.6	4	3.8	3.8
5	ABS/G3	2.4	2.8	3.2	2.8
6	ABS/G5	2	1.2	2	1.7