

วัสดุเชิงประกอบแกรไฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3D-PRINTED GRAPHENE/POLY(LACTIC ACID) COMPOSITES

Mr. Aphiwat Pongwisuthiruchte



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

Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วัสดุเชิงประกอบแกรไฟีน/พอลิเอทิลีนไอกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ
โดย	นายอภิวัฒน์ พงศ์วิสุทธิรักษ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โปธิยะราช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. ประสิทธิ์ พัฒนนะวุฒม์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โปธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. ประสิทธิ์ พัฒนนะวุฒม์)

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

อภิวัฒน์ พงศ์วิสุทธิรักษ์ : วัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ (3D-PRINTED GRAPHENE/POLY(LACTIC ACID) COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ประณัฐ โพธิยะราช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร. ประสิทธิ์ พัฒนะนุวัฒน์, 94 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปัจจัยในการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกชีวภาพด้วยเทคนิคการพิมพ์สามมิติต่อสมบัติของชิ้นทดสอบ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ทิศทางการพิมพ์ชิ้นทดสอบ การตัดกันของโครงสร้างในชิ้นทดสอบ และปริมาณการเติมชิ้นทดสอบ ส่วนสมบัติที่ศึกษา ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ดัชนีการหลอมไหล สมบัติทางไฟฟ้า และสัมมนาวิทยา นอกจากนี้ยังศึกษาความเป็นไปได้ของการเตรียมเส้นวัสดุเชิงประกอบของพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยอนุภาคแกรฟีนเพื่อใช้ในการพิมพ์สามมิติ และผลต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ การทดลองเริ่มจากการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์จากผงแกรไฟต์ด้วยวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีของฮัมเมอร์ จากนั้นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ให้กลายเป็นแกรฟีนโดยใช้กรดแอลกอฮอล์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของอนุภาคแกรฟีนที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี และเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโทรสโกปี แกรฟีนที่สังเคราะห์ได้ถูกนำมาเตรียมเป็นมาสเตอร์แบดซ์กับพอลิแล็กติกแอซิดด้วยเทคนิคการตกตะกอนร่วมในเมทานอล แล้วจึงนำมาสเตอร์แบดซ์มาผสมกับเม็ดพอลิแล็กติกแอซิดด้วยการผสมแบบหลอมเหลวในเครื่องอัดรีดสกรูคู่เพื่อขึ้นรูปเป็นเส้นวัสดุเชิงประกอบสำหรับการพิมพ์สามมิติ และม้วนเก็บเส้นด้วยเครื่องมือม้วนเก็บที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง ผลการทดลองพบว่า ทิศทางการพิมพ์ชิ้นทดสอบ การตัดกันของโครงสร้างในชิ้นทดสอบ และปริมาณการเติมชิ้นทดสอบ มีผลต่อสมบัติของชิ้นทดสอบ กล่าวคือทิศทางการพิมพ์ชิ้นทดสอบที่เหมาะสมกับลักษณะงานจะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลแก่ชิ้นงาน การตัดกันของโครงสร้างในชิ้นทดสอบจะให้สมบัติเชิงกลที่ต่างกันโดยแบบ $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ จะได้ชิ้นงานที่มีความยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดที่สูงกว่า สามารถรับแรงกระแทกได้ดีว่า ในขณะที่แบบ $0^{\circ}/+90^{\circ}$ จะได้ชิ้นงานที่มีความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้งที่สูงกว่า ส่วนการลดปริมาณการเติมชิ้นทดสอบจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด ผลของการเติมอนุภาคแกรฟีนลงในพอลิแล็กติกแอซิดต่อสมบัติของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ พบว่าเมื่อปริมาณการเติมแกรฟีนมากขึ้นชิ้นทดสอบจะมีสมบัติด้านแรงดึงและความทนแรงกระแทกที่ลดต่ำลง ส่วนความทนแรงดัดโค้งที่มีค่าเพิ่มขึ้นที่ปริมาณการเติมที่ 2 phr และลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเติม เนื่องจากการจับตัวรวมกันของอนุภาคแกรฟีน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชิ้นงานที่เติมแกรฟีนมีดัชนีการหลอมไหล และอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงขึ้น อีกทั้งยังสามารถช่วยเพิ่มสมบัติด้านไฟฟ้าสถิตให้กับวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็กติกแอซิดได้

ภาควิชา	วัสดุศาสตร์	ลายมือชื่อ นิสิต
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และ เทคโนโลยีสิ่งทอ	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งใจไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้โอกาสผู้วิจัยครั้งนี้ รวมทั้งให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และสนับสนุนในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนจนถึงการเอาใจใส่และการสละเวลาในการตรวจสอบ แก่ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

2. อ.ดร.ประสิทธิ์ พัฒนะนุวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และการเอาใจใส่และการสละเวลาในการตรวจสอบ แก่ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

3. ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมี และวัสดุ สำหรับการให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

4. กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำทางวิชาการในการทำวิจัย

5. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

6. รุ่นพี่ เพื่อน และบุคลากรภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษา และสละเวลาให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย

7. บริษัท สยามเรปเรป จำกัด สำหรับการให้คำปรึกษา และการจัดหาเครื่องมือในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจในการทำวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี และขอบคุณอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 มูลเหตุจูงใจ และที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ และขอบเขตงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 การพิมพ์สามมิติ (3D printing).....	3
2.2 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics).....	7
2.3 พอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, PLA).....	10
2.3.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด.....	12
2.3.2 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด	12
2.3.3 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด.....	14
2.4 แกรฟีน (Graphene).....	14
2.4.1 ลักษณะโครงสร้างของแกรฟีน	15
2.4.2 การสังเคราะห์แกรฟีน	15
2.4.3 สมบัติของแกรฟีน	16
2.5 วัสดุเชิงประกอบ (Composite).....	16
2.5.1 นิยามของวัสดุเชิงประกอบ.....	16

2.5.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ	17
2.5.3 วิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ	18
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	20
3.1 วัตถุประสงค์	20
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม และขึ้นรูป	20
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติ	20
3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง.....	22
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	23
3.5.1 การเตรียมแกรฟีน	23
3.5.1.1 การเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide).....	23
3.5.1.2 การเตรียมแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide).....	23
3.5.1.3 การเตรียมแกรฟีน (Graphene) จากแกรฟีนออกไซด์.....	23
3.5.2 เตรียมเส้นพลาสติกวัสดุเชิงประกอบ	23
3.5.2.1 การเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิแล็กติกแอซิด/แกรฟีน	23
3.5.2.2 เตรียมเส้นพลาสติกวัสดุเชิงประกอบของพอลิแล็กติกแอซิด/แกรฟีน	24
3.5.3 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยการพิมพ์สามมิติ.....	25
3.5.3.1 การเขียนแบบขึ้นทดสอบ	25
3.5.3.2 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ.....	25
3.6 การวิเคราะห์ และทดสอบชิ้นงาน.....	26
3.6.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometry, FT-IR).....	26
3.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอน สเปกโทรสโกปี (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS).....	26

3.6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffractometer, XRD).....	27
3.6.4 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน.....	27
3.6.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	28
3.6.6 การทดสอบหาค่าดัชนีการหักเห.....	28
3.6.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล	29
3.6.7.1 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (tensile properties)	29
3.6.7.2 ทำการทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength).....	30
3.6.7.3 ทำการทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength)	31
3.6.8 การตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยา	32
3.6.9 การศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลอง	33
4.1 สมบัติของแกรไฟต์ แกรไฟน์ออกไซด์ และแกรไฟน์	33
4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ...	33
4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของแกรไฟน์ออกไซด์ที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี	34
4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคแกรไฟต์ แกรไฟน์ออกไซด์ และแกรไฟน์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน.....	36
4.2 สมบัติของเส้นวัสดุเชิงประกอบแกรไฟน์/พอลิเอทิลีนทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ.....	37
4.2.1 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของเส้นวัสดุเชิงประกอบแกรไฟน์/พอลิเอทิลีนทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติภายใต้บรรยากาศออกซิเจน	37
4.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี	39
4.2.3 การทดสอบหาค่าดัชนีการหักเห.....	42

4.3 ผลของตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยเส้นพอลิ แล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า	42
4.3.1 สมบัติด้านแรงดึง	43
4.3.2 สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง	47
4.3.3 สมบัติด้านความทนแรงกระแทก	47
4.4 สมบัติของขึ้นทดสอบวัสดุเชิงประกอบของพอลิแล็กติกแอซิด/แกรฟีนที่ขึ้นรูปด้วย กระบวนการพิมพ์สามมิติ	49
4.4.1 ลักษณะสัณฐานวิทยา	49
4.4.2 สมบัติด้านแรงดึง	50
4.4.3 สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง	52
4.4.4 สมบัติด้านความทนแรงกระแทก	53
4.4.5 สมบัติด้านการนำไฟฟ้า	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผลการทดลอง	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	56
รายการอ้างอิง	57
ภาคผนวก ก	61
ภาคผนวก ข	65
ภาคผนวก ค	68
ภาคผนวก ง	80
ภาคผนวก จ	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	94

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 กระบวนการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ 9

รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของกรดแล็กติก 12

รูปที่ 2.3 วิธีการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดแบบต่าง ๆ 13

รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย..... 22

รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder) รุ่น Prism DSR-28 24

รูปที่ 3.3 เครื่องม้วนเก็บเส้นที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง 24

รูปที่ 3.4 เครื่องพิมพ์สามมิติแบบ FDM รุ่น DeltaX200..... 25

รูปที่ 3.5 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) รุ่น Nicolet 6700 26

รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (XPS) รุ่น AXIS Ultra DLD 26

รูปที่ 3.7 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) รุ่น D8 Advance 27

รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) รุ่น TG 209 F3 Tarsus® 27

รูปที่ 3.9 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) รุ่น DSC1/STARe..... 28

รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบหาดัชนีการหลอมไหลรุ่น 7053..... 28

รูปที่ 3.11 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบในรูปดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D638-14 type IV..... 29

รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล รุ่น H10KM 29

รูปที่ 3.13 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-10 30

รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล รุ่น L500 30

รูปที่ 3.15 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-10 31

รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก รุ่น GT-7045-MDH 31

รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น SU3500..... 32

รูปที่ 3.18 เครื่องทดสอบไฟฟ้า (High resistance meter) รุ่น 4339B 32

รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และแกรฟีน.....	33
รูปที่ 4.2 เอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์.....	35
รูปที่ 4.3 เอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกตรัมของแกรฟีน.....	35
รูปที่ 4.4 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน.....	37
รูปที่ 4.5 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของเส้นพอลิเล็กทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์ สามมิติเกรดทางการค้า, เส้นพอลิเล็กทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิง ประกอบของแกรฟีน/พอลิเล็กทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ	38
รูปที่ 4.6 พฤติกรรมทางความร้อนของของเส้นพอลิเล็กทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรด ทางการค้า, เส้นพอลิเล็กทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของ แกรฟีน/พอลิเล็กทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ ระหว่างการเย็นตัว	40
รูปที่ 4.7 พฤติกรรมทางความร้อนของของเส้นพอลิเล็กทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรด ทางการค้า, เส้นพอลิเล็กทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของ แกรฟีน/พอลิเล็กทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ ระหว่างการให้ความ ร้อนครั้งที่ 2.....	40
รูปที่ 4.8 แสดงทิศทางการพิมพ์	43
รูปที่ 4.9 ค่าความทนแรงดึงของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ.....	44
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณพื้นผิวรอยแตกของ ชั้นทดสอบ (A) H-45-100, (B) V-45-100, (C) H-0-100, (D) V-0-100, (E) H-0-50 และ (F) H-0-20.....	45
รูปที่ 4.11 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ.....	46
รูปที่ 4.12 ยังสัมมอดูลัสของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ.....	46
รูปที่ 4.13 ค่าความทนแรงดัดโค้งของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ	47
รูปที่ 4.14 ค่าความทนแรงกระแทกของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ	48
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณพื้นผิวของชั้นทดสอบที่ ขึ้นรูปจาก เส้นพอลิเล็กทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของ แกรฟีน/พอลิเล็กทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ	49

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการพิมพ์.....	25
ตารางที่ 4.1 เลขคลื่นการสั่นของพันธะคาร์บอนในแกรไฟีนออกไซด์	34
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนระหว่างพลังงานพันธะของคาร์บอนที่ตำแหน่ง C=C/C-O	36
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ	39
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และปริมาณผลึกของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ.....	41
ตารางที่ 4.5 ดัชนีการหลอมไหลของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ	42
ตารางที่ 4.6 ตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	43
ตารางที่ 4.7 สมบัติทางไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของขึ้นทดสอบที่ระยะห่างระหว่างขั้วทดสอบ 5 เซนติเมตร	54
ตารางที่ ก.1 แสดงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ และพลังงานการหลอมผลึกของเส้น สำหรับการพิมพ์สามมิติ.....	64
ตารางที่ ข.1 ดัชนีการหลอมไหลของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ	66
ตารางที่ ค.1 ค่าความทนแรงดึงของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (MPa).....	69
ตารางที่ ค.2 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (%).....	72
ตารางที่ ค.3 ยังสัมมอดูลัสของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (MPa).....	74
ตารางที่ ค.4 ค่าความทนแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (MPa).....	76
ตารางที่ ค.5 ค่าความทนแรงกระแทกของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (J/m ²).....	78
ตารางที่ ง.1 ค่าความทนแรงดึงของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (MPa)	81
ตารางที่ ง.2 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (%).....	83
ตารางที่ ง.3 ยังสัมมอดูลัสของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (MPa).....	85
ตารางที่ ง.4 ค่าความทนแรงดัดโค้งของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (MPa).....	87
ตารางที่ ง.5 ค่าความทนแรงกระแทกของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (J/m ²).....	89
ตารางที่ จ.1 ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่ความต่างศักย์ 10 โวลต์	92

ตารางที่ จ.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของชั้นทดสอบ	92
ตารางที่ จ.3 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของชั้นทดสอบ.....	93



บทที่ 1

บทนำ

1.1 มูลเหตุจูงใจ และที่มาของโครงการวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการขึ้นรูปโดยการพิมพ์สามมิติ (3D printing) ได้รับความสนใจอย่างมากในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่าง ๆ เนื่องจากมีกระบวนการทำงานที่เรียบง่าย สามารถออกแบบ และขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนตามความต้องการ การพิมพ์สามมิติเป็นเทคนิคการขึ้นรูปที่สามารถสร้างชิ้นงานได้ด้วยวัสดุหมึกพิมพ์หลากหลายรูปแบบ เช่น เทอร์โมพลาสติก ซิเมนต์ น้ำตาล และโลหะ เป็นต้น ซึ่งวัสดุหมึกพิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยเครื่องพิมพ์สามมิตินั้น มีความเหมาะสมแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องพิมพ์สามมิติ สำหรับในงานขึ้นรูปพลาสติกนั้น เครื่องพิมพ์สามมิติในระบบ FDM (Fused Deposition Modeling) ถือเป็นเครื่องพิมพ์สามมิติที่มีความนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาต้นทุนต่ำ โดยวัสดุที่เป็นเส้นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถเลือกซื้อได้ง่าย และสะดวกต่อการใช้งาน โดยหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติในระบบ FDM จะอาศัยระบบมอเตอร์ในการขับเคลื่อนเส้นเทอร์โมพลาสติก ให้เข้ามาที่หัวพิมพ์ที่มีความร้อนอยู่ในอุณหภูมิช่วงหลอมเหลวของเทอร์โมพลาสติกนั้น ๆ และขับเคลื่อนเส้นพลาสติกหลอมเหลวออกมาที่หัวพิมพ์ และทำการวาดเส้นพลาสติกหลอมเหลวไปตามทิศทางในแนวแกน XYZ ที่ผู้ใช้ได้ป้อนข้อมูลรูปร่างให้แก่เครื่อง ในขณะที่ส่วนฐานของเครื่องพิมพ์จะมีส่วนให้ความเย็นแก่เส้นพลาสติกหลอมเหลวเพื่อให้เกิดการแข็งตัวของเส้นพลาสติก อย่างไรก็ตามพบว่าในปัจจุบัน ประเภทของวัสดุเส้นเทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้ในการพิมพ์สามมิติทางการค้ามีเพียงสองชนิด ได้แก่ อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (acrylonitrile butadiene styrene, ABS) และพอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, PLA) อีกทั้งมีการศึกษาเพียงเล็กน้อยในการประยุกต์นำเอาเทอร์โมพลาสติกทางการค้าเกรดฉีดขึ้นรูป (injection molding) มาใช้ในการขึ้นรูปการพิมพ์สามมิติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการศึกษาการขึ้นรูปโดยการพิมพ์สามมิติของพอลิแล็กติกแอซิดเกรดทางการค้า โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบอทธิพลต่าง ๆ ที่ใช้ในการพิมพ์สามมิติ เช่น ทิศทางในการฉีด (direction) องศาของฉีดยุติ (raster angle) และปริมาณเนื้อพลาสติก (%infill) ที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับเส้นพอลิแล็กติกแอซิดเกรดขึ้นรูปพิมพ์สามมิตินอกจากนี้ผู้วิจัยยังมีความสนใจในการออกแบบชิ้นงาน ให้มีสมบัติเฉพาะเจาะจงต่อการใช้งาน เพื่อให้มีความสามารถนำไปใช้ในงานที่เพิ่มมูลค่าแก่ผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจใน

การนำพอลิแล็กติกแอซิดซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพ (bioplastic) ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพในรูปแบบของแข็งเปราะที่อุณหภูมิห้อง มีลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งออสัญฐาน และมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) [1] มาปรับปรุงให้มีสมบัติเฉพาะด้วยการเตรียมเป็นเส้นวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชีวภาพ (bioplastic composites) ร่วมกับแกรฟีน (graphene) โดยเทคนิคการผสมแบบการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) และแบบหลอมเหลว (melt blending) ตามลำดับ เนื่องจากแกรฟีนเป็นโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนซึ่งยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์แบบคอนจูเกต (conjugate) มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวเป็นรูปร่างหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้งเรียงกัน (hexagonal configuration) และโครงสร้างสองมิติที่มีความหนาเพียง 1 อะตอม มีความเป็นรูพรุน และพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการนำความร้อน และสมบัติเชิงกลสูง มีความสามารถในการนำไฟฟ้า [2] ซึ่งคาดว่าเมื่อนำแกรฟีนมาใช้เป็นสารเติมแต่งจะสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์สามมิติได้

1.2 วัตถุประสงค์ และขอบเขตงานวิจัย

1. การศึกษาและเปรียบเทียบอิทธิพลที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยเครื่องพิมพ์สามมิติที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบพลาสติกชีวภาพพอลิแล็กติกแอซิด
2. ศึกษาอิทธิพลของการเติมแกรฟีนในพลาสติกชีวภาพต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้า

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 การพิมพ์สามมิติ (3D printing)

กระบวนการในการขึ้นรูปวัสดุถูกปรับปรุงแก้ไขมาอย่างยาวนาน อีกทั้งยังมีการพัฒนาและคิดค้นกระบวนการใหม่ ๆ เพื่อช่วยในการขึ้นรูปวัสดุได้หลากหลาย และตรงต่อความต้องการในการใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยกระบวนการหนึ่งที่ถูกพัฒนามาตั้งแต่ปลายศตวรรษที่ 19 และกำลังเป็นที่นิยมในยุคปัจจุบันนั่นก็คือ กระบวนการพิมพ์สามมิติ (3D printing) หรือที่รู้จักในชื่อ กระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยการเติมวัสดุ (additive manufacturing, AM) [3] ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานแบบสามมิติ สามารถขึ้นรูปได้อย่างอิสระตามความต้องการของผู้ผลิตโดยไม่มีข้อจำกัด ซึ่ง Jeremy Rifkin นักอนาคตศาสตร์ชื่อดังชาวอเมริกัน เชื่อว่า เป็นสัญญาณการเริ่มต้นของการปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 3 ของโลก [4] การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการพิมพ์สามมิตินั้น จะเริ่มต้นกระบวนการจากการออกแบบโมเดลสามมิติในคอมพิวเตอร์ แล้วจึงนำแบบที่ได้มาทำการแปลงเป็นค่าคำสั่งในการทำงานของเครื่องพิมพ์ เพื่อให้เครื่องพิมพ์ทำการผลิตชิ้นงานให้ได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ [5]

เดิมคำว่า “การพิมพ์สามมิติ” หมายถึงกระบวนการในการพิมพ์สารยึด (binder) ลงบนวัสดุผง (material powder) ที่อยู่ในฐานสำหรับพิมพ์ (printing bed) ด้วยหัวพิมพ์อิงค์เจท (inkjet printer heads) ทีละชั้นจนได้มาซึ่งชิ้นงาน แต่เมื่อไม่นานมานี้ “การพิมพ์สามมิติ” นิยมใช้ในการให้ความหมายอย่างกว้าง ๆ ของกระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยการเติมวัสดุ (additive manufacturing, AM) ที่มีความหลากหลาย ซึ่งสามารถจำแนกได้ถึง 7 ประเภทตามมาตรฐาน ISO/ASTM52900-15 [6] ได้แก่

1. การขึ้นรูปโดยการฉีดสารยึด (binder jetting) เป็นการขึ้นรูปโดยใช้สารยึดที่มีลักษณะเป็นของเหลว ฉีดลงบนวัสดุผงเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ
2. การขึ้นรูปโดยการถ่ายโอนพลังงานโดยตรง (directed energy deposition) เป็นการขึ้นรูปโดยใช้พลังงานความร้อนจาก เลเซอร์ ลำแสงอิเล็กตรอน หรือ พลาสมา ในการหลอมละลายวัสดุในจุดที่ให้พลังงานออก เพื่อให้เกิดชิ้นงานตามที่ต้องการ
3. การขึ้นรูปโดยการอัดรีดวัสดุ (material extrusion) เป็นการขึ้นรูปโดยการอัดรีดวัสดุผ่านหัวฉีดเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ
4. การขึ้นรูปโดยการฉีดวัสดุ (material jetting) เป็นการขึ้นรูปโดยการพ่นหยดวัสดุ ประเภทแว็กซ์ หรือพอลิเมอร์ประเภทไวแสง ลงบนฐานพิมพ์ ก่อนจะทำให้พอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาโดยการฉายแสง จนได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ

5. การขึ้นรูปโดยการรวมผงวัสดุบนฐานพิมพ์ (powder bed fusion) เป็นการขึ้นรูปโดยการใช้พลังงานความร้อนในการหลอมรวมผงวัสดุในจุดที่ให้พลังงานเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ
6. การขึ้นรูปโดยการเรียงแผ่นวัสดุ (sheet lamination) เป็นการขึ้นรูปโดยการนำแผ่นวัสดุมาวางเรียงกันเป็นชิ้นงาน
7. การขึ้นรูปโดยการฉายแสง (vat photopolymerization) เป็นการขึ้นรูปโดยการฉายแสงลงพอลิเมอร์ไวแสงที่มีลักษณะเป็นของเหลวให้แข็งตัวตามรูปแบบชิ้นงานที่ต้องการ

การพัฒนากระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยการเติมวัสดุ หรือการพิมพ์สามมิติ และวัสดุที่ใช้สำหรับงานพิมพ์นั้น เริ่มถูกพัฒนาขึ้นมาในช่วงปี 1980 [7]

- ปี 1981, Hideo Kodama จากสถาบันวิจัยอุตสาหกรรมแห่งเมืองนาโกยาได้คิดค้นวิธีการใช้สารเติมแต่งสองชนิดในการขึ้นรูปโมเดลพลาสติกสามมิติ จากเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ที่สามารถแข็งตัวได้ด้วยแสงยูวี โดยควบคุมแสงผ่านการใช้แผ่นแม่แบบหรือใช้เส้นใยนำแสงในการส่องผ่านแสงยูวีในส่วนที่ต้องการในการขึ้นรูป
- ปี 1984 Alain Le Méhauté, Olivier de Witte, และ Jean Claude André กลุ่มนักประดิษฐ์ชาวฝรั่งเศส ได้ยื่นจดสิทธิบัตรกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้ลำแสง (stereolithography) แต่กลับถูกละทิ้งจากทั้ง บริษัท French General Electric (Alcatel-Alsthom ในปัจจุบัน) และ บริษัท CILAS ด้วยสาเหตุที่ว่าแนวทางในเชิงธุรกิจ
- สามสัปดาห์หลังจากนั้น, Chuck Hull ผู้ก่อตั้งบริษัท 3D Systems ได้ยื่นจดสิทธิบัตรระบบการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้ลำแสง (stereolithography, SLA) ที่แต่ละระนาบจะถูกเติมโดยพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการบ่มได้กับลำแสงเหนือม่วง (ultraviolet light lasers) โดยได้ให้นิยามกระบวนการนี้ว่า ระบบการขึ้นรูปวัตถุสามมิติจากระนาบตัดขวางของวัตถุนั้นเป็นชิ้นงาน นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในการกำเนิดรูปแบบไฟล์ STL (stereolithography file) การตัดแต่งชิ้นงาน (slicing) และการเติมเนื้อชิ้นงาน (infill) แบบดิจิทัล ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในปัจจุบัน
- เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติที่นิยมใช้เป็นส่วนมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะกับผู้ที่มีการอดิเรกในการทำโมเดลหรือสิ่งของที่มีลักษณะเฉพาะ และผู้บริโภคมอเดลหรือสิ่งของเหล่านั้น คือเทคโนโลยีการพิมพ์โดยการถ่ายโอนวัสดุหลอม (fused deposition modeling, FDM) ซึ่งเป็นวิธีพิเศษในการอัดรีดพลาสติกที่ถูกพัฒนาขึ้นในปี 1988

โดย S. Scott Crump และจัดจำหน่ายเครื่องพิมพ์สามมิติแบบ FDM เครื่องแรกของโลก โดยบริษัท Stratasys ของเขา ในปี 1992

- เทคนิคการใช้หัวพิมพ์อิงค์เจ็ทในการปล่อยสารเชื่อมประสานลงบนผงที่อยู่ในฐานสำหรับพิมพ์ เพื่อให้ผงที่ใช้ในการพิมพ์นั้นเกิดการเกาะตัวกันเป็นรูปร่าง ซึ่งเป็นเทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยสถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ ในปี 1993 และถูกนำมาจัดจำหน่ายโดยบริษัท Z Corporation นอกจากนี้ในปีเดียวกัน บริษัท Solidscape ได้มีการพัฒนาระบบการพิมพ์สามมิติโดยการฉีดพอลิเมอร์ที่มีความแม่นยำสูง โดยมีโครงสร้างรองรับที่สามารถละลายน้ำได้
- กระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยการเติมวัสดุมีการขยายตัวที่เพิ่มขึ้นในช่วงปี 2000 ซึ่งในช่วงนี้กระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยการเติมวัสดุ ที่ใช้ในด้านการพิมพ์สามมิติที่เป็นที่นิยมคือ เทคโนโลยีการพิมพ์โดยการถ่ายโอนวัสดุหลอม (fused deposition modeling, FDM) การฉีดพอลิเมอร์ (polymer jetting) และเทคนิคอื่น ๆ
- ในช่วงปี 2010 ความหมายของการพิมพ์สามมิติ และกระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยการเติมวัสดุ ถูกพัฒนา และรวมความหมายรวมเข้าด้วยกันในชื่อ เทคโนโลยีเอเอ็ม (AM technologies) หรือก็คือ เทคโนโลยีการสร้างชิ้นงานด้วยการเติมวัสดุ (additive manufacturing technologies) ซึ่งเป็นคำที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปอย่างแพร่หลาย

โมเดลสามมิติ เป็นสิ่งที่จำเป็นแก่การขึ้นรูปโดยการพิมพ์สามมิติอย่างมาก เพราะถือเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการผลิต โมเดลสามมิติจึงถูกเปรียบเสมือนแม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปการสร้างโมเดลสามมิตินั้นสามารถทำได้หลายวิธีทั้งการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการออกแบบ (computer-aided design, CAD) ที่จะช่วยลดข้อผิดพลาด และสามารถปรับแก้ชิ้นงานก่อนพิมพ์งานได้ แต่การสร้างโมเดลสามมิติด้วยวิธีนี้จะเปรียบเสมือนการปั้นงานศิลป์ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งอาจต้องการความชำนาญ และเวลาในระดับหนึ่ง ส่วนการการใช้เครื่องสแกนภาพสามมิติ (3D scanner) หรือการใช้กล้องถ่ายภาพรูปดิจิทัลธรรมดาคู่กับโปรแกรมช่วยประมวลผลนั้น จะเป็นการเก็บข้อมูลรูปร่างรายละเอียดของวัตถุจริง เพื่อนำมาสร้างเป็นโมเดลสามมิติที่สามารถนำมาใช้ได้จริง แต่อาจยากแก่การแก้ไขหากมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นกับโมเดลสามมิติ

ก่อนที่จะเริ่มการพิมพ์โมเดลสามมิติที่อยู่ในรูปแบบไฟล์ STL นั้น จะต้องมีการใช้โปรแกรมเพื่อทดสอบหาข้อผิดพลาดเสียก่อน เนื่องจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโมเดลส่วน

ใหญ่อาจก่อให้เกิดข้อผิดพลาดในขณะที่สร้างไฟล์ STL เช่น หลุม, ผิวโมเดลผิดปกติ, เกิดการแยกตัวของโมเดล หรือปัญหาอื่น ๆ ซึ่งเมื่อทำการทดสอบ และตรวจพบปัญหาดังกล่าว โปรแกรมที่ใช้จะ สามารถทำการซ่อมแซม แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ทันที และโดยทั่วไปแล้วไฟล์ STL ของโมเดลสามารถที่ได้จากการสแกนสามมิตินั้นอาจพบข้อผิดพลาดได้มากกว่าไฟล์ที่ได้จากการใช้โปรแกรมช่วยออกแบบ เนื่องจากการการสแกน และสร้างโมเดลจะเป็นการทำงานแบบจุดต่อจุดซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในไฟล์โมเดลสามมิติ เมื่อทำการตรวจสอบ และแก้ไขข้อผิดพลาดแล้วไฟล์ STL ของโมเดลสามมิติจะต้องนำมาเข้าโปรแกรมที่เรียกว่า “slicer” เพื่อแปลงข้อมูลโมเดลสามมิติให้เป็นชั้นบาง ๆ ซ้อนกัน และสร้างไฟล์ G-code ซึ่งเป็นไฟล์ที่ใช้ในการกำหนดการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติ

ความละเอียดของเครื่องพิมพ์สามารถดูได้จากความหนาของชั้นที่พิมพ์ และความละเอียดในระนาบ X-Y โดยมีหน่วยกำกับเป็น จำนวนจุดต่อหนึ่งนิ้ว (dots per inch, DPI) หรือ ไมโครเมตร (micrometers, μm) ซึ่งโดยทั่วไปความหนาของชั้นที่พิมพ์จะอยู่ที่ประมาณ 100 μm หรือ 250 DPI แม้ว่าเครื่องพิมพ์ในปัจจุบันจะสามารถพิมพ์ได้เล็กถึง 16 μm หรือ 1,600 DPI ส่วนความละเอียดในระนาบ X-Y มีความหมายเช่นเดียวกับความละเอียดเครื่องพิมพ์เลเซอร์หรือเครื่องพิมพ์อิงค์เจต ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความละเอียดอยู่ที่ 50 ถึง 100 μm หรือที่ 510 ถึง 250 DPI โดยความละเอียดในการพิมพ์นี้ก็ยิ่งส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นงาน นอกจากนี้ขนาดของชิ้นงาน ความซับซ้อนของชิ้นงาน วิธีการพิมพ์ ความสามารถของเครื่องพิมพ์ และประเภทของการขึ้นรูป ต่างส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นงานเช่นกัน

การขึ้นรูปแบบทั่วไปเช่นการฉีดขึ้นรูปนั้น จะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพที่สูงกว่า และมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า เมื่อผลิตในระดับอุตสาหกรรม แต่การสร้างชิ้นงานด้วยการเติมวัสดุหรือการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการสามมิตินั้น สามารถทำการผลิตให้มีความซับซ้อนได้มากกว่า ไวกว่า และมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าเมื่อผลิตในจำนวนน้อย และเป็นชิ้นงานที่มีความเฉพาะเจาะจงที่สูงกว่า และยังช่วยให้นักออกแบบสามารถออกแบบหรือพัฒนาแนวคิดในการสร้างชิ้นงานให้ออกมาในรูปของชิ้นงานต้นแบบที่สามารถจับต้องได้ และเห็นภาพได้ชัดเจนขึ้น การพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์นั้น เมื่อได้ชิ้นงานตามที่ต้องการก็สามารถนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ ต่อได้ทันที ดังเช่นในงานวิจัยของ Michael Dawoud และคณะ [8] ได้ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบอะครีโลไนไทรล์บิวทาไดอีนสไตรีนที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM กับชิ้นทดสอบที่ทำการฉีดขึ้นรูป (injection molding) พบว่าชิ้นทดสอบที่ทำการฉีดขึ้นรูปมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM เนื่องจากชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM นั้น มีการพิมพ์ทีละชั้น

ทำให้เกิดจุดอ่อนระหว่างชั้นของการพิมพ์ ในขณะที่ชั้นทดสอบจากการฉีดขึ้นรูปมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า ทำให้ไม่มีจุดอ่อนระหว่างชั้น แต่ในบางครั้งชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์สามมิติอาจมีขนาดใหญ่เกิน หรืออาจมีส่วนเกินที่เกิดจากการพิมพ์ที่เกิดจากการพิมพ์ส่วนรับ (supports) รวมถึงผิวชิ้นงานที่อาจจะไม่เรียบสวยงาม โดยปัญหาเหล่านี้สามารถทำการแก้ไขได้โดยการตัดแต่งชิ้นงาน หรือในกรณีที่ใช้วัสดุจำพวกพอลิเมอร์ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแล้วได้ผิวที่ยังไม่เรียบก็สามารถใช้ตัวทำละลายในการแต่งผิวชิ้นงานให้เรียบได้ นอกจากนี้หากต้องการให้ชิ้นงานมีสีอื่น ผู้ใช้งานก็สามารถทำการตกแต่งได้ตามต้องการ หรืออาจใช้เครื่องพิมพ์ที่มีความสามารถในการพิมพ์หลายสีก็สามารถช่วยให้ได้ชิ้นงานที่มีสีอื่นได้เช่นกัน

ในปัจจุบันเครื่องพิมพ์ที่เป็นที่นิยม มีราคาอยู่ในช่วงที่สามารถให้ผู้ใช้หน้าใหม่สามารถเข้าถึงได้ และมีวัสดุหลากหลายประเภทให้เลือกใช้คือ เครื่องพิมพ์ประเภทถ่ายโอนวัสดุหลอม (fused deposition modeling, FDM) ซึ่งเป็นเครื่องพิมพ์ที่จะให้ความร้อนแก่วัสดุโดยตัวให้ความร้อน (heater) ที่อยู่บริเวณหัวพิมพ์ (extrusion nozzle head) เพื่อให้วัสดุที่อยู่ในรูปของเส้น (filament) ที่ถูกป้อนเข้ามาถึงหัวพิมพ์ เกิดการอ่อนตัวหรือหลอมตัว ก่อนจะขับวัสดุออกมาเพื่อทำการพิมพ์ด้วยเส้นส่วนที่ถูกป้อนเข้ามาทดแทน และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อให้เกิดชั้นของการพิมพ์ วัสดุที่ใช้กับเครื่องพิมพ์แบบ FDM นั้นมีหลากหลายประเภททั้งเส้นเทอร์มอพลาสติก, เส้นโลหะ, หรือวัสดุอื่น ๆ แต่สำหรับเครื่องพิมพ์ในระดับเริ่มต้นนั้นจะเป็นประเภทที่ใช้เส้นเทอร์มอพลาสติกขึ้นต่าง ๆ ที่อาจมีการเติมสารเติมแต่ง (additive) เพื่อให้เส้นที่ได้มีสมบัติพิเศษต่าง ๆ เมื่อนำพิมพ์ออกมาเป็นชิ้นงาน นอกจากนั้นการออกแบบลักษณะของการพิมพ์ชิ้นงานก็สามารถทำให้ชิ้นงานที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้นได้เช่นกันดังในงานวิจัยของ Angel R. Torrado และคณะ [9] ได้ทดสอบสมบัติเชิงกลในแต่ละทิศทางของอะครีโลไนไทรล์บิวทาไดอีนสไตรีน ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM พบว่าสมบัติทางกายภาพของชิ้นทดสอบนั้นจะขึ้นกับทิศทางของการพิมพ์ขึ้นทดสอบ ทางผู้วิจัยจึงได้พิมพ์ชิ้นทดสอบออกมาใน 2 ทิศทาง คือในแนวนอน และในแนวตั้ง พบว่าการพิมพ์ในแนวนอนนั้นจะให้ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดสูงกว่าการพิมพ์ในแนวตั้ง ถึงร้อยละ 47 ± 7.23 โดยผลการทดสอบที่ได้นี้ก็สอดคล้องกับผลการทดลองของ B.M. Tymrak และคณะ [10] ที่ได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลในแต่ละทิศทางของอะครีโลไนไทรล์บิวทาไดอีนสไตรีน และพอลิแล็กติกแอซิด

2.2 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics)

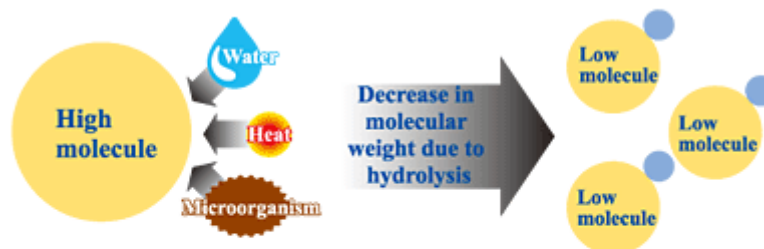
พลาสติกชีวภาพ หรือพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (bioplastics or biodegradable plastics) หมายถึง พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์หรือแบคทีเรียที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ที่เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

สารสำคัญที่ใช้การดำรงชีวิตของพืช โดยแหล่งที่มาของพลาสติกชีวภาพนั้นสามารถแบ่งตามแหล่งที่มาของสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตเป็น 2 ประเภท ได้แก่ พลาสติกชีวภาพจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (petroleum-based bioplastics) และพลาสติกชีวภาพจากวัตถุดิบฐานชีวภาพ (bio-based bioplastics) ที่ซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากพลาสติกชีวภาพเป็นพลาสติกที่สามารถผลิตได้จากทรัพยากรที่สามารถสร้างทดแทนได้ (renewable resource) โดยอาศัยกระบวนการหมัก (fermentation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานต่ำ สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ อีกทั้งยังเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติโดยการฝังกลบภายหลังจากเสร็จสิ้นการใช้งาน และเมื่ออยู่ในภาวะที่เหมาะสมกับการย่อยสลายแล้ว พลาสติกชีวภาพจึงจะสามารถเกิดการย่อยสลายได้ คำจำกัดความของพลาสติกชีวภาพ ตามมาตรฐาน ASTM D6400-12 [11] หมายถึง พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้อันเนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย, รา, และสาหร่าย เป็นต้น พลาสติกชีวภาพที่นิยมใช้ในทางการค้า และมีการนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิแล็กติกแอซิด และ poly(hydroxy alcanoate, PHA) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้จากธรรมชาติ ผ่านกระบวนการทางชีวเคมีในการเปลี่ยนสภาพแป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง และข้าวโพด ให้เป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ นอกจากนี้พลาสติกชีวภาพสองชนิดนี้แล้ว ยังมีพลาสติกชีวภาพอีกหลายชนิดที่นิยมใช้ในทางการค้า เช่น พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS)

การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) คือ การสลายตัวของพอลิเมอร์ที่มีจุลินทรีย์เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา โดยทั่วไปจะเกิดขึ้น 2 กระบวนการ คือ

1. โดยส่วนใหญ่พอลิเมอร์จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์เหล่านั้นได้อย่างเต็มที่ การสลายตัวของพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวนอกโดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งแบบการใช้เอนไซม์ในการทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในของสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ (endo-enzyme) และแบบการใช้เอนไซม์ในการทำให้เกิดการแตกหักของพันธะระหว่างหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ (exo-enzyme) และเมื่อพอลิเมอร์เกิดการแตกตัวจนมีขนาดเล็กเพียงพอต่อการแพร่ผ่านของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ที่แพร่เข้าไปจะทำการปลดปล่อยเอนไซม์เพื่อทำให้เกิดกระบวนการการย่อยสลายต่อไป

Phase 1: Hydrolysis



Phase 2: Biodegradation



รูปที่ 2.1 กระบวนการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ [12]

- เมื่อพลาสติกชีวภาพเกิดการสลายตัวแล้วได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายทางชีวภาพ (ultimate biodegradation) เป็น พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็ก จากการเกิดการสันดาปของสารโมเลกุลขนาดเล็กของพอลิเมอร์ (metabolism) ภายในจุลินทรีย์หรือแบคทีเรีย เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่าง ๆ และชีวมวล (biomass)

พลาสติกชีวภาพสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ตามกระบวนการในการสังเคราะห์ และแหล่งที่มาของสารตั้งต้นที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ได้แก่

- พอลิเมอร์ที่ได้จากสารตั้งต้นที่เป็นชีวมวล ได้แก่ สารตั้งต้นจำพวกพอลิแซคคาไรด์ จากแป้งข้าวสาลี แป้งมันฝรั่ง และ แป้งข้าวโพด สารตั้งต้นจากผลิตภัณฑ์จำพวก ลิกโนเซลลูโลส เช่น ฟาง หรือไม้ สารตั้งต้นในกลุ่มของไคติน และไคโตซาน ที่เมื่อนำมาละลายในกรดอินทรีย์จะได้เป็นสารละลายที่มีลักษณะเหนียวใสคล้ายวุ้น สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นพลาสติกได้ และสารตั้งต้นในกลุ่มคอลลาเจน และเจลาติน ที่สกัดได้จาก โปรตีนพืช และสัตว์ ซึ่งสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นพลาสติกได้เช่นกัน
- พอลิเมอร์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ (microbial polymers) ได้แก่ พอลิเมอร์ในกลุ่ม PHA เช่น poly(hydroxybutyrate และ poly(hydroxybutyrate cohydroxyvalerate
- พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการทางเคมี โดยใช้สารตั้งต้นจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย ที่เมื่อผ่านกระบวนการทาง

เทคโนโลยีชีวภาพ (กระบวนการหมัก) แป้งจะถูกเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาล ก่อนจะเปลี่ยนไปเป็น กรดแล็กติก (lactic acid) และเมื่อนำมาเชื่อมกันจะได้สายโซ่ของพอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, PLA)

4. พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้จากมอนอเมอร์หรือพอลิเมอร์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง เช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ที่ได้จากมอนอเมอร์คือ กรดซัคซินิก (succinic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) และกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนแโรแมติก (aromatic ring) เช่น พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโค-เทเรฟทาเลต เป็นต้น โดยจะสังเกตได้ว่าเป็นพลาสติกชีวภาพประเภทเดียวเท่านั้น ที่ไม่ได้สังเคราะห์ขึ้นจากสารตั้งต้นที่เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถสร้างทดแทนได้

2.3 พอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, PLA)

พอลิแล็กติกแอซิด หรือพอลิแล็กไทด์ (polylactide) เป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มของแอลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) หรือพอลิเอสเทอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง ปัจจุบันนิยมนำมาวิจัย ปรับปรุง และพัฒนาเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลาสติกทางการค้า เนื่องจากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากการสะสมตัวของขยะจำพวกพลาสติกทางการค้าที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยมีสาเหตุมาจากการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกจากแหล่งปิโตรเลียมที่ทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ด้วยเพราะจุลินทรีย์มีวงจรชีวิตที่สั้นกว่าระยะเวลาในการย่อยสลายพอลิเมอร์ ทำให้โครงสร้างของพอลิเมอร์ไม่ถูกทำลาย พลาสติกเหล่านี้จึงไม่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติ ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันงานวิจัยส่วนใหญ่จึงมีความสนใจต่อพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติ และยังสามารถสร้างทดแทนได้มากขึ้น พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติจะเกิดการย่อยสลายของสายโซ่ภายใต้ภาวะที่มีแบคทีเรีย เพื่อเปลี่ยนให้เป็นโมเลกุลของสาร เช่น น้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสิ่งมีชีวิต จะเห็นได้ว่าการนำพลาสติกที่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติ มาใช้ทดแทนพลาสติกจากแหล่งปิโตรเลียมเป็นการแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และยังสามารถช่วยพัฒนาเศรษฐกิจอย่างยั่งยืน เพราะพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตจากสารตั้งต้นที่ได้จากธรรมชาติ คือ กรดแล็กติก ที่ได้จากกระบวนการหมักแป้งจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด เป็นต้น พอลิแล็กติกแอซิดจึงสามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติ และเกิดสารที่มีความเป็นพิษต่ำ ทำให้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากมาหลายศตวรรษ [13, 14]

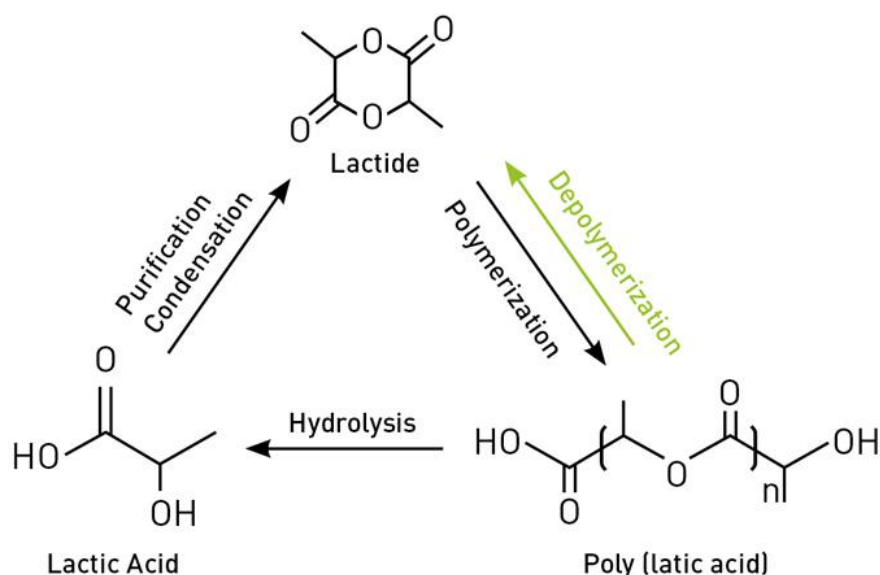
ในปี 1845, Théophile Jules Pelouze [15] ได้ทำการทดลองควบแน่นกรดแล็กติกทำให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และไดเมอร์ของแล็กติกแอซิดที่มีลักษณะแบบวงหรือที่รู้จักกันในชื่อว่า “แล็กไทด์” 50 ปีต่อมา ในปี 1894, Carl Adam Bischoff และ Paul Walden [16] ได้พยายามสังเคราะห์พอลิแล็กไทด์จากแล็กไทด์แต่วิธีที่ได้นั้นยังไม่เหมาะสม จนในปี 1948, Paul D. Watson [17] ได้เผยแพร่ผลงานเกี่ยวกับการนำพอลิแล็กติกแอซิดมาใช้เป็นสารเคลือบและ สารประกอบในเรซิน ถึงแม้พอลิแล็กติกแอซิดจะเป็นที่รู้จักมานานหลายร้อยปี แต่ยังไม่สามารถใช้งานในทางการค้าได้ เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้นั้นมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้มีสมบัติที่ไม่คงที่ จนเมื่อไม่นานมานี้วิธีการสังเคราะห์ได้ถูกพัฒนาจนได้พอลิแล็กติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูง จากการสังเคราะห์ผ่านกลไกแบบเปิดวงของแล็กไทด์ ทำให้เกิดการผลิทมอนอเมอร์ในเชิงการค้าจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมากขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป โดยสมบัติโดยทั่วไปของพอลิแล็กติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของพอลิแล็กติกแอซิด [18]

สมบัติ	ปริมาณ
น้ำหนักโมเลกุล (kg/mol)	100 - 300
อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (T_g , (°C))	55 - 70
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	130 - 215
พลังงานความร้อนของการหลอมเหลวผลึก ΔH_m (J/m)	8.1 - 93.1
ดีกรีความเป็นผลึก (%)	10 - 40
พลังงานพื้นผิว (dynes)	38
พารามิเตอร์การละลาย (δ) (J/ml) ^{1/2}	19 - 20.5
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1.25
ดรรชนีการหลอมไหล (MFI) (g/10 min)	2-20
ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ (fmol m ⁻¹ s ⁻¹ Pa ⁻¹)	4.25 และ 23.2
ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (%)	100 - 180

2.3.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด

กรดแล็กติก (lactic acid or 2-hydroxypropionic acid) เป็นมอนอเมอร์ที่ได้จากการหมักผลผลิตทางการเกษตรจำพวกแป้งด้วยแบคทีเรียหรือเชื้อราด้วยวิธีแบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถเกิดการจัดเรียงตัวได้ 2 แบบ ประกอบไปด้วย 2 ไอโซเมอร์ คือ แอล-แล็กติกแอซิด (L-lactic acid) และ ดี-แล็กติกแอซิด (D-lactic acid) โดยปกติจะพบ แอล-แล็กติกแอซิด มากกว่า โดยพบมากถึง 99.5% และพบ ดี-แล็กติกแอซิด เพียงแค่ 0.5% เท่านั้น ส่วนแล็กไทด์ (lactide) เป็นวงแหวนไดเมอร์ของแล็กติกแอซิดที่เกิดจากการรวมตัวกันของแล็กติกแอซิด 2 โมเลกุล สามารถเกิดการจัดเรียงตัวได้ 3 แบบ ประกอบไปด้วย 3 ไอโซเมอร์ คือ แอล-แล็กไทด์ (L-lactide), ดี-แล็กไทด์ (D-lactide) และ เมโส-แล็กไทด์ (meso-lactide)



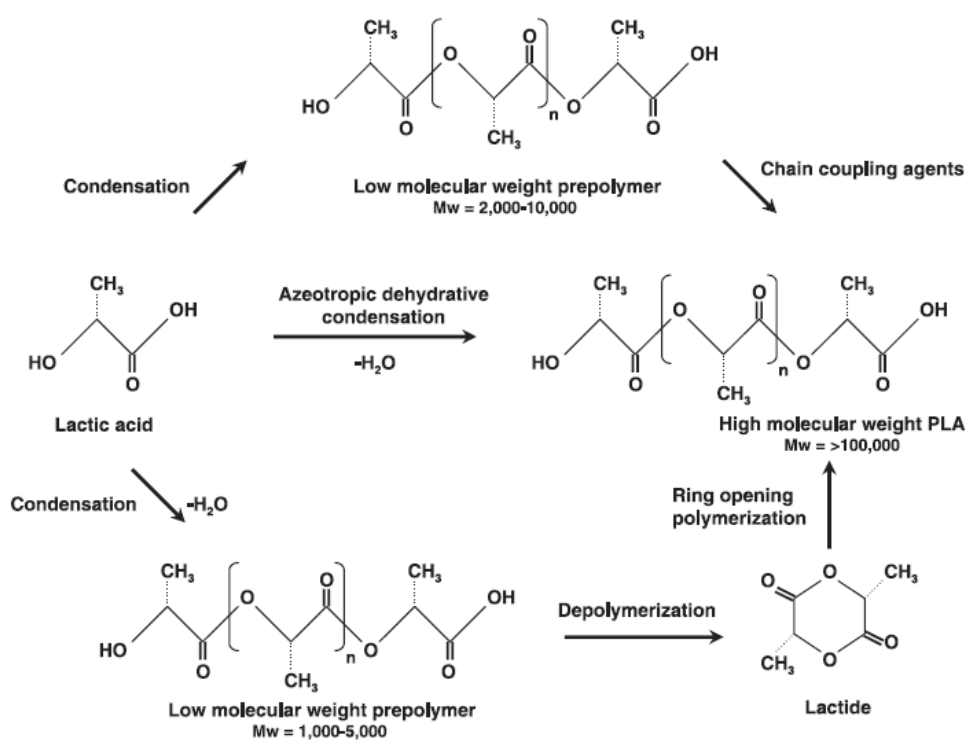
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของกรดแล็กติก [19]

2.3.2 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด

1. การสังเคราะห์จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (direct condensation polymerization) สารเชื่อมสายโซ่ (branching agent) [20] วิธีการสังเคราะห์ที่ง่ายที่สุด โดยใช้กรดแล็กติกเป็นสารตั้งต้นร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับลดความดัน โดยน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์จะแยกออกจากกระบวนการได้ยาก เป็นเหตุให้ไม่สามารถควบคุมน้ำหนักโมเลกุลได้ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ จึงต้องมีการใช้สารเชื่อมสายโซ่ เพื่อให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น แต่การใช้สารเชื่อมสายโซ่เป็นการเพิ่มต้นทุน และความ

ยุ่งยากในการผลิต นอกจากนั้นยังทำให้พอลิแล็กติกแอซิดที่ได้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากขึ้นด้วย

2. การสังเคราะห์จากการควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิกดีไฮเดรชัน (azeotropic dehydration condensation) [21] เป็นการสังเคราะห์ที่ทำให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีสายโซ่ยาวโดยไม่ต้องใช้สารอื่น ๆ ช่วยในให้เกิดพอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เพราะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยในการดึงน้ำออกภายใต้ความดันต่ำ ทำให้สามารถควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มักมีความเป็นพิษต่อเนื้อเยื่อสูง ทำให้การนำพอลิแล็กติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้ไปใช้งานนั้น ต้องผ่านการทำให้บริสุทธิ์ก่อน



รูปที่ 2.3 วิธีการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดแบบต่าง ๆ [22]

3. การสังเคราะห์จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ring opening polymerization) [23] เป็นการสังเคราะห์ที่สามารถควบคุมโครงสร้างทางเคมีได้ โดยการแตกวงของแล็กไทด์ด้วยความร้อน และใช้ทินออกโทเอต (tin-octoate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พอลิเมอร์ที่ได้จึงอาจเรียกว่า พอลิแล็กไทด์ การเปิดวงของแล็กไทด์เป็นวิธีการเดียวที่ทำให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์ และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โดยสามารถสังเคราะห์ผ่าน

กระบวนการแบบสารละลาย แบบบัลค์ แบบหลอมเหลวหรือแบบแขวนลอยก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถสังเคราะห์ผ่านกลไกแบบแคทไอออนิก แอนไอออนิก หรือแบบ co-ordination insertion ก็ได้

2.3.3 สมบัติของพอลิเล็กทิกแอซิด

พอลิเล็กทิกแอซิดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีโครงสร้างทั้งแบบอสัณฐาน และแบบกึ่งผลึก ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงรูปร่างของมอนอเมอร์ และประวัติการได้รับความร้อน โดยพอลิเล็กทิกแอซิดที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานจะมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ประมาณ 58 °C และมีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_c) ประมาณ 148 °C ส่วนพอลิเล็กทิกแอซิดที่มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึกจะมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ประมาณ 62 °C และมีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ประมาณ 151 °C พอลิเล็กทิกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล และโครงสร้างสเตอริโอเคมี (stereochemical structure) พอลิเล็กทิกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมักมีความแข็งแรงแต่เปราะจึงไม่นิยมนำไปใช้งาน ต่างกับพอลิเล็กทิกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สามารถนำไปใช้งานได้ ด้วยเพราะมีความแข็งแรงเชิงกลสูง และสามารถนำไปใช้งานได้ดี มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของอากาศ และก๊าซที่ดีเทียบเท่ากับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้ มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) โดยมีความไม่ชอบน้ำจะลดลงเมื่อมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิเล็กทิกแอซิดมีลักษณะทางกายภาพที่แข็ง เปราะ และมีราคาสูง จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาสมบัติให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน [1]

2.4 แกรฟีน (Graphene)

แกรฟีนเป็นวัสดุ 2 มิติชนิดแรก ที่มีความบางมากที่สุด และมีความแข็งแรงมากที่สุดในโลก เป็นที่รู้จักครั้งแรกเมื่อปี 2004 จากผลงานวิจัยของ Andre Geim และ Konstantin Novoseloy [24] สองนักฟิสิกส์แห่งมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ เจ้าของรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ปี 2010 ที่ได้ทำการศึกษาอนุพันธ์ของแกรไฟต์ ที่โครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้นของอะตอมคาร์บอน จึงทำการแยกชั้นของแกรไฟต์ให้บางลงจนเหลือเพียงชั้นเดียว หรือมีความหนาเท่ากับหนึ่งอะตอม ซึ่งตรงข้ามกับแนวคิดของนักวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่ที่ว่า การสร้างวัสดุให้มีความหนาเพียงอะตอมเดียวเป็นเรื่องที่ยากหรือเป็นไปได้ เพราะหากทำให้อะตอมเกิดการสั่นขึ้นลงในแนวตั้ง จะทำให้โครงสร้างของวัสดุเกิดความไม่เสถียรจนอาจทำให้อะตอมทั้งหมดเกิดการระเหยกกลายเป็นไอ แต่ความสำเร็จของงานวิจัยชิ้นนี้คือ การสร้างแกรไฟต์ที่มีความหนาเพียงอะตอมเดียว และมีความเสถียรอย่างมาก โดยการใช้เทป

การในการดึงลอกชั้นของแกรไฟต์ให้เกิดแยกชั้น จนได้ความบางเพียงระนาบเดียวของแกรฟีน และเรียกวัสดุที่ได้นี้ว่า แกรฟีน [2]

2.4.1 ลักษณะโครงสร้างของแกรฟีน

ความหนาเพียงหนึ่งชั้นอะตอมของคาร์บอน มีลักษณะโครงสร้างเป็นระนาบ 2 มิติ ของอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงตัวแบบวงหกเหลี่ยม (hexagonal configuration) มีความหนาประมาณ 0.34 นาโนเมตร แต่มักไม่พบแกรฟีนปรากฏขึ้นเองตามธรรมชาติ เพราะแรงที่ยึดเหนี่ยวระหว่างระนาบของแกรฟีน ทำให้เกิดการรวมตัวซ้อนทับกันอยู่ในรูปของแกรไฟต์ โมเลกุลของคาร์บอนที่ค้นพบก่อนหน้าแกรฟีน ทั้งบัคกิ้งบอล หรือคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้น ต่างมีแกรฟีนเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน โดยบัคกิ้งบอลเกิดจากการม้วนพับเป็นลูกบอลของวงแหวนหกเหลี่ยมของแกรฟีนจำนวน 20 วงต่อกัน ส่วนคาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดจากการม้วนพับของระนาบแกรฟีนเป็นทรงกระบอก

2.4.2 การสังเคราะห์แกรฟีน

แกรฟีนถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกด้วยวิธี micromechanical exfoliation ที่ทำได้โดยการลอกชั้นบาง ๆ ของชั้นแกรฟีนออกจากแกรไฟต์โดยใช้เทป แต่ปริมาณของแกรฟีนที่ได้จากวิธีนี้จะมีปริมาณน้อย ซึ่งเป็นประโยชน์เพียงสำหรับการศึกษาสมบัติ และโครงสร้างขั้นพื้นฐาน ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาวิธี chemical vapor deposition (CVD) ซึ่งเป็นวิธีการสังเคราะห์แกรฟีนที่ได้ผลผลิตในปริมาณที่มากขึ้น นิยมใช้ในโรงงานผลิตฟิล์มกึ่งตัวนำแบบบาง นอกจากนี้ยังมีวิธีการวิธีการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาเคมี ที่สามารถทำได้ง่ายในระดับห้องปฏิบัติการ และยังได้แกรฟีนในปริมาณมาก โดยแกรฟีนที่ได้จะอยู่ในลักษณะสารแขวนลอย (suspension) ในสารละลายที่สามารถนำไปใช้ในงานได้หลากหลาย โดยหลักการในการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยการทำปฏิกิริยาเคมีที่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันนั้นเป็นวิธีที่เสนอโดยฮัมเมอร์ [25] โดยเริ่มต้นด้วยการใช้กรดแก่ร่วมกับสารออกซิไดซ์ ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรุนแรง เพื่อเปลี่ยนแกรไฟต์ให้กลายเป็นแกรไฟต์ออกไซด์ โดยจะเกิดการเพิ่มหมู่ ไฮดรอกซิล คาร์บอกซิลิก และคาร์บอนิล บนระนาบพื้นผิวในแต่ละชั้นของแกรไฟต์ ทำให้แต่ละระนาบของแกรไฟต์มีระยะห่างเพิ่มขึ้น และลดแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างชั้นของแกรไฟต์ลง ซึ่งเมื่อแกรไฟต์ออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแรงเชิงกล เช่น การให้คลื่นความถี่สูง (ultrasonication) แต่ละระนาบของแกรไฟต์ออกไซด์จะสามารถหลุดลอกออกจากกัน เกิดเป็นแกรฟีนออกไซด์ (graphene oxide) ที่มีสมบัติในด้านการกระจายตัวในน้ำได้ดี (hydrophilic) แต่ไม่นำไฟฟ้าเนื่องจากความต่อเนื่องของการเรียงตัวแบบพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยว (conjugated bond) ถูกทำลายจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นเพื่อให้โครงสร้างกลับมามีความต่อเนื่องเหมือนเดิม จึงต้องทำการแกรฟีนเพื่อให้กลายเป็นแกรฟีน

นอกจากวิธีการสังเคราะห์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีอีกหลายวิธีที่สามารถแกรฟีนจากแกรไฟต์ได้ซึ่งการสังเคราะห์แกรฟีนจากแกรไฟต์ ซึ่งหลายวิธีสามารถผลิตแกรฟีนจากแกรไฟต์ได้ในปริมาณมาก แต่ทั้งนี้หลายวิธีก็มีขั้นตอนที่ซับซ้อน และยากต่อการสังเคราะห์กว่าการใช้ปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์แต่สามารถสังเคราะห์แกรฟีนที่มีบริสุทธิ์สูงได้ [26] เช่นในงานวิจัยของ Daniela C. Marcano และคณะวิจัย [27] ซึ่งได้ค้นพบวิธีการเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์ในปริมาณที่มากกว่าวิธีการที่ใช้โดยทั่วไป และเมื่อนำไปสังเคราะห์ให้ได้มาซึ่งแกรฟีนแล้วพบว่าสจะให้สมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า นอกจากนั้นการเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์ด้วยวิธีการนี้ยังง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิขณะสังเคราะห์ และไม่เกิดก๊าซพิษจากกระบวนการสังเคราะห์

2.4.3 สมบัติของแกรฟีน

โครงสร้างของแกรฟีนมีความหนาเพียงหนึ่งชั้นอะตอมของคาร์บอน มีความหนาแน่น 0.77 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กถึง 1000 เท่า และมากกว่าเพชรถึง 200 เท่าเมื่อเทียบความแข็งแรงต่อน้ำหนัก มีความโปร่งใส สามารถดูดซับแสงประมาณร้อยละ 2.3 ของแสงขาว จึงทำให้แกรฟีนไม่แสดงสีใด ๆ ชั้นของแผ่นแกรฟีนแบบหนามีค่าการนำไฟฟ้าจะอยู่ที่ $0.96 \times 10^6 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ ซึ่งเมื่อกระแสอิเล็กตรอนไหลผ่านจึงไม่เกิดการกระจัดกระจาย จึงมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำมาก แม้จะนำไฟฟ้าได้ไม่ดีเท่าตัวนำยิ่งยวด (superconductor) แต่แกรฟีนสามารถนำไฟฟ้าได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งต่างจากตัวนำยิ่งยวดที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีที่อุณหภูมิตดลกว่าร้อยละสองเซลเซียส แกรฟีนมีค่าการนำความร้อนประมาณ $5000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ในขณะที่ทองแดงมีค่าการนำความร้อนประมาณ $401 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ จะเห็นได้ว่าแกรฟีนสามารถนำความร้อนได้ดีกว่าทองแดง 10 เท่า ทั้งนี้เพราะการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของอะตอมในโครงสร้างของแกรฟีน [28]

2.5 วัสดุเชิงประกอบ (Composite)

2.5.1 นิยามของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างที่แตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน โดยวัสดุที่ได้จะมีสมบัติใหม่ และสามารถแบ่งแยกความแตกต่างระหว่างวัสดุเริ่มต้นทั้งสองชนิดได้ด้วยตาเปล่า หรือยังมีเฟสแยกกันอยู่อย่างชัดเจน โดยทั่วไปแล้ววัสดุเชิงประกอบจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสหลักหรือเมทริกซ์ (matrix) และวัสดุอีกชนิดที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (dispersed phase) ในเมทริกซ์นั้น ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรง (reinforced phase) ยกตัวอย่างของวัสดุเชิงประกอบที่พบในธรรมชาติ เช่น ไม้ ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างลิกนิน (lignin) กับเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) หรือกระดูก ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างแร่ อะพาไทต์ (apatite) กับโปรตีนคอลลาเจน (collagen) เป็นต้น

2.5.2 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ

สามารถแบ่งตามประเภทของเฟสที่กระจายตัว สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาค (particle-reinforced composite) คือ วัสดุที่มีอนุภาคของวัสดุใด ๆ กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่อนุภาคมีหน้าที่เป็นสารเสริมแรง (reinforcement) ให้กับวัสดุ โดยอนุภาคนั้นสามารถมีรูปร่างได้หลายแบบ เช่น เป็นแผ่นบาง (flake) เป็นอนุภาค (particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (filler) เป็นต้น
2. วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced composite) วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งวัสดุโครงสร้างเป็นเส้นใยเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง และความแข็งดึงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก ลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความทนแรงดึงกับความถ่วงจำเพาะ และในรูปของมอดุลัสจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ
3. วัสดุเชิงประกอบโครงสร้าง (structural composite) วัสดุเชิงประกอบโครงสร้างประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียว และวัสดุเชิงประกอบสมบัติของ วัสดุเชิงประกอบโครงสร้างนี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นแล้ว ยังขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดเรียงของวัสดุที่นำมาประกอบกันด้วย เราสามารถแบ่งวัสดุเชิงประกอบแบบโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภท คือ วัสดุเชิงประกอบแบบชั้น (laminar composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (sandwich panel)

แบ่งตามชนิดของเนื้อหลัก สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. วัสดุเชิงประกอบประเภทพอลิเมอร์ (polymer matrix composite, PMC) เป็นผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส โดยมีพอลิเมอร์เป็นเนื้อประสานหลัก (matrix) และวัสดุเสริมแรง (reinforcing agent)
2. วัสดุเชิงประกอบประเภทเซรามิก (ceramic matrix composite, CMC) เป็นวัสดุวัสดุเชิงประกอบประกอบด้วยเนื้อหลัก และเฟสวัสดุเสริมแรง วัสดุเสริมแรงเป็นวัสดุจาวกเซรามิก เพื่อปรับสมบัติด้านความเปราะ และเสริมความเหนียวลดการแตกร้าว
3. วัสดุเชิงประกอบประเภทโลหะ (metal matrix composite, MMC) เนื้อหลักประกอบด้วยโลหะหรือโลหะผสมเช่น เหล็ก อะลูมิเนียม สังกะสี ฯลฯ เฟสวัสดุเสริมแรงใช้วัสดุที่เป็นอนุภาค (particle) เส้นใย (fiber) เส้นใยสั้น (whisker) ทั้งที่เป็น เซรามิก และพอลิเมอร์ ได้แก่ กลุ่มคาร์ไบด์ กลุ่มไนไตรด์ แกรไฟต์ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน

เส้นใยเคฟลาร์ วัสดุเชิงประกอบประเภทนี้มักใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ และ อากาศยาน

2.5.3 วิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ

ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบประเภทพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กระดับนาโน สามารถเตรียมได้ 3 วิธี ดังนี้

1. การเตรียมด้วยเทคนิคการผสมในสารละลาย (solution blending) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมน้อย แต่มีข้อดีที่สามารถกระจายตัวของวัสดุขนาดเล็กที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรลงในพอลิเมอร์ได้ดี โดยใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมเป็นตัวกลางในการกระจายตัว ทำให้วัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรเกิดการกระจายตัว และสายโซ่พอลิเมอร์จึงเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างอนุภาคได้ แล้วจึงระเหยตัวทำละลายออกภายหลัง ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ การที่ตัวทำละลายพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นสารระเหยที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย และสิ่งแวดล้อม รวมถึงยังต้องใช้ตัวทำละลายในปริมาณมาก
2. การเตรียมผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบอินซิทู (In Situ polymerization) เป็นเทคนิคที่ใช้ตัวทำละลายเช่นเดียวกัน แต่เป็นเทคนิคการผลิตร่วมกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ โดยเริ่มจากการนำวัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรใส่ลงไปในสารละลายมอนอเมอร์ เมื่อมอนอเมอร์แพร่เข้าไประหว่างวัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ทำให้วัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรเกิดการบวมตัว จากนั้นจึงทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ (polymerization) โดยพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะแทรกตัวอยู่ระหว่างระนาบของวัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จนกระทั่งสายโซ่พอลิเมอร์เติบโตมากขึ้น ทำให้ระนาบเกิดการแยกชั้นเป็นแผ่นเดี่ยว ๆ ที่ไม่เป็นระเบียบ
3. การเตรียมด้วยเทคนิคการหลอมเหลว (melt compounding) เป็นการผสมพอลิเมอร์กับวัสดุอื่นภายใต้แรงเฉือน และความร้อน เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม และเป็นที่ยอมรับโดยทั่วกันในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกในระดับนาโนเมตร โดยเริ่มจากการนำวัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรไปผสมกับพอลิเมอร์ที่กำลังหลอมเหลว นอกจากแรงเฉือน และอุณหภูมิที่ใช้แล้ว ยังต้องมีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ จึงจะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแทรกตัวระหว่างอนุภาคของวัสดุขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรได้ ดังนั้นวิธีการนี้จึงสามารถเตรียมได้ในเครื่องขึ้นรูปจำพวกเครื่องอัดรีด (extruder)

ในปัจจุบันมีความสนใจในการนำแกรฟีนมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์โดยคาดว่าแกรฟีน จะสามารถช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ และสามารถเพิ่มการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ ได้ ดังเช่นงานวิจัยของ Sithiprumnea Dul และคณะ [29] ที่ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของชั้นทดสอบ อะครีโลไนไทรล์บิวทาไดอีนสไตรีน ที่มีการเติมแผ่นขนาดนาโนเมตรของแกรฟีน (nanoplatelets) ลงไปเป็นสารเติมแต่งในเส้นพลาสติกสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM พบว่าการเติมแผ่นขนาดนาโนเมตรของแกรฟีนช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลได้ดีโดยเฉพาะมอดุลัสดึง (tensile modulus) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอะครีโลไนไทรล์บิวทาไดอีนสไตรีนบริสุทธิ์ ในขณะที่มีค่าความทนแรงดึง และความยืดหยุ่นสูง จุดขาดที่ลดลงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (coefficient of thermal expansion, CTE) ซึ่งส่งผลดีต่อการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ ด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติ และในงานวิจัยของ Huan Pang และคณะ [30] ได้ศึกษาการนำแกรฟีนผสมลงไปในพอลิเอทิลีนชนิดที่มีมวลโมเลกุลสูง และทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าที่ปริมาณการเติมแกรฟีนที่ต่างกัน พบว่าการเพิ่มปริมาณการเติมแกรฟีนขึ้น จะสามารถช่วยทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบมีค่าสูงขึ้น



บทที่ 3 วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุดิบ

1. พอลิแล็กติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เกรด 4043D (general propose) จากบริษัท BC Polymers Marketing
2. แกรไฟต์ (graphite) ขนาด <20 ไมครอน จากบริษัท Sigma-Aldrich
3. กรดแอสคอร์บิก (L-ascorbic acid) รูปแบบผง เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma-Aldrich
4. กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) เข้มข้นร้อยละ 97 เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท RCI Labscan
5. กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) เข้มข้นร้อยละ 87 เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท RCI Labscan
6. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (potassium permanganate) แบบผง เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท RCI Labscan
7. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ความเข้มข้นร้อยละ 30 เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Chem-supply
8. แอซีโตน (acetone) เกรดการค้า จากบริษัท RCI Labscan
9. คลอโรฟอร์ม (chloroform) เกรดการค้า จากบริษัท RCI Labscan
10. เมทานอล (methanol) เกรดการค้า จากบริษัท RCI Labscan
11. น้ำปราศจากไอออน (deionized water, DI water) จากบริษัท ลี เซ่ง ฮวด

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม และขึ้นรูป

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder) รุ่น Thermo prism DSR-28 ของบริษัท LabTech Engineering ประเทศเยอรมัน
2. เครื่องม้วนเก็บเส้นที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง
3. เครื่องพิมพ์สามมิติแบบ FDM รุ่น DeltaX200 ของบริษัท Siamreaprap ประเทศไทย

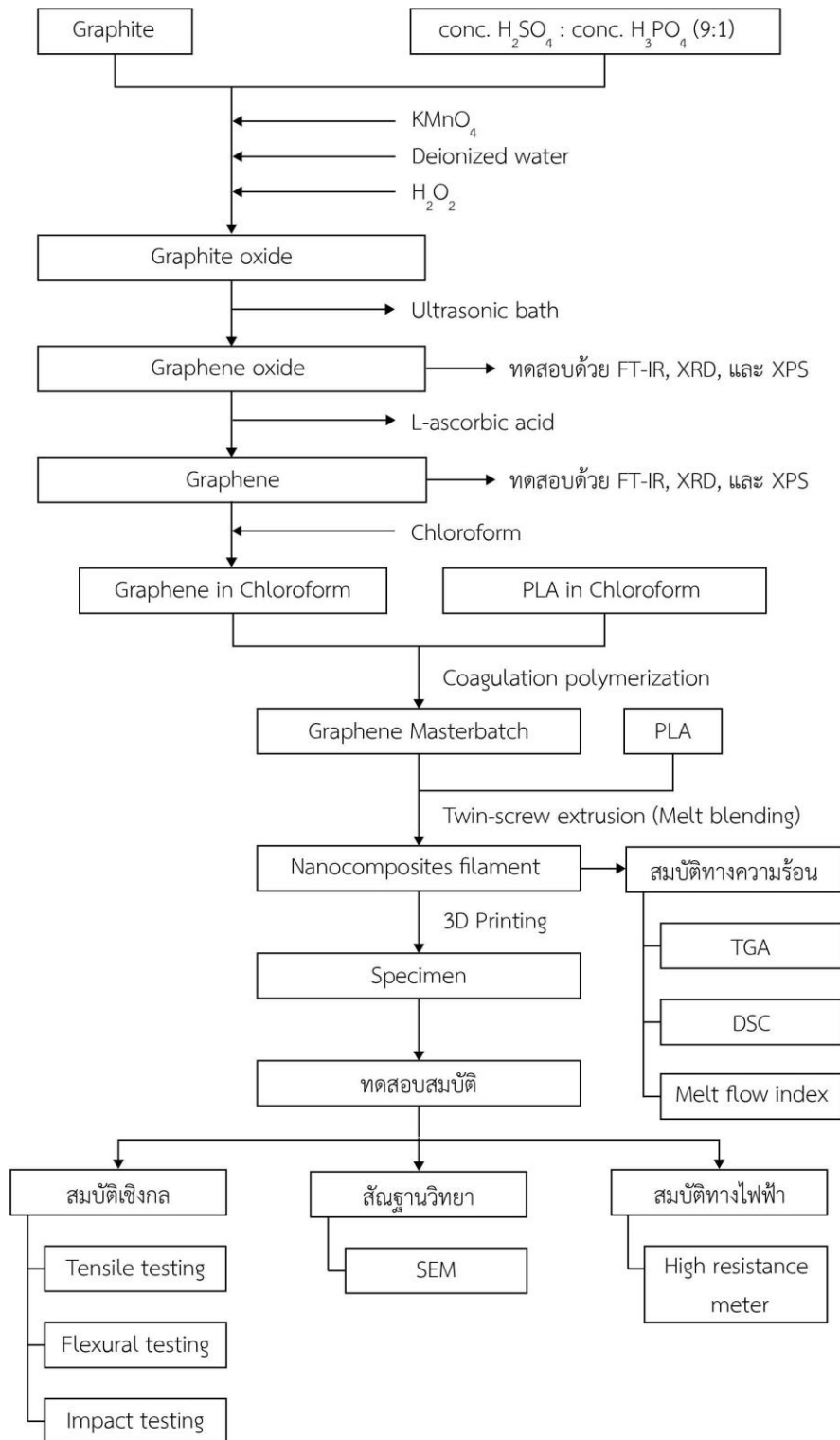
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติ

1. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) รุ่น Nicolet 6700 ของบริษัท Thermo Scientific ประเทศเยอรมัน
2. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer, XRD) รุ่น D8 Advance ของบริษัท Bruker ประเทศอังกฤษ

3. เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) รุ่น AXIS Ultra DLD ของบริษัท Kratos Analytical Ltd. ประเทศอังกฤษ
4. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น TG 209 F3 Tarsus® ของบริษัท NETZSCH ประเทศเยอรมนี
5. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) รุ่น DSC1/STARe ของบริษัท Mettler toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เครื่องทดสอบหาดัชนีการหลอมไหล (Melt flow indexer) รุ่น 7053 ของบริษัท Kayeness ประเทศสหรัฐอเมริกา
7. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) รุ่น H10KM ของบริษัท Hounsfield (Tinius Olsen ปัจจุบัน) ประเทศสหราชอาณาจักร
8. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) รุ่น L500 ของบริษัท LLOYD ประเทศสหราชอาณาจักร
9. เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก (Impact testing machine) รุ่น GT-7045-MDH ของบริษัท GOTECH ประเทศไต้หวัน
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น SU3500 ของบริษัท Hitachi ประเทศญี่ปุ่น
11. เครื่องทดสอบไฟฟ้า (High resistance meter) รุ่น 4339B ของบริษัท Keysight Technologies ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง

แผนภูมิขั้นตอนการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 การเตรียมแกรฟีน

3.5.1.1 การเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide)

แกรไฟต์ออกไซด์ในการทดลองนี้สังเคราะห์ได้จากวิธีการปรับปรุงแฮมเมอร์ (improved Hummer's method) [21] ดังนี้ นำแกรไฟต์ 9 กรัม ผสมลงในสารละลายผสมระหว่างกรดซัลฟิวริกเข้มข้นกับกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วน 9:1 ในปริมาตร 1200 มิลลิลิตร (1080:120 มิลลิลิตร) หลังจากนั้นนำโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 54 กรัม ผสมอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสในระยะเวลา 30 นาที หลังจากนั้นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 15 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดหยุดปฏิกิริยา โดยการเติมสารที่ทำปฏิกิริยาลงในของผสมระหว่างน้ำแข็ง 1200 กรัม กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30 ในปริมาณ 9 มิลลิลิตร ทำเป็นกลางด้วยการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และทำการแยกชั้นแกรไฟต์ออกไซด์ออกจากน้ำโดยการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที 30 นาที ก่อนนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3.5.1.2 การเตรียมแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide)

นำแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้มากระจายตัวในน้ำปราศจากไอออน ที่อัตราส่วนแกรไฟต์ออกไซด์ต่อน้ำปราศจากไอออน 2 กรัม/ลิตร แล้วทำการกระจายตัวด้วยคลื่นความถี่สูงที่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง [21]

3.5.1.3 การเตรียมแกรฟีน (Graphene) จากแกรฟีนออกไซด์

นำแกรฟีนออกไซด์ที่ได้มาทำการสั่นด้วยคลื่นความถี่สูงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเติมกรดแอลเอสคอร์บิก 10 กรัม พร้อมกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทำการเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นคลอโรฟอร์มโดยการปั่นเหวี่ยงเพื่อกำจัดน้ำออก และล้างด้วยอะซิโตนเพื่อปรับสภาพ และใส่คลอโรฟอร์มเพื่อเก็บสารละลายไว้ในขวดแก้ว [31]

3.5.2 เตรียมเส้นพลาสติกวัสดุเชิงประกอบ

3.5.2.1 การเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของพอลิแล็กติกแอซิด/แกรฟีน

โดยการกำหนดสัดส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด และแกรฟีนที่ 10 ต่อ 1 นำละลายพอลิแล็กติกแอซิดในคลอโรฟอร์ม 1 กรัม/100 มิลลิลิตร ทำการกวนละลายอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นนำแกรฟีนที่กระจายตัวอยู่ในคลอโรฟอร์มมาสั่นด้วยคลื่นความถี่ที่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ สูงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำไปลงในพอลิแล็กติกแอซิดที่ละลายใน

คลอโรฟอร์ม กวนผสมอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมา ตกตะกอนร่วมด้วยเมทานอล (methanol) เพื่อเป็นมาสเตอร์แบตช์

3.5.2.2 เตรียมเส้นพลาสติกวัสดุเชิงประกอบของพอลิแล็กติกแอซิด/แกรฟีน

นำมาสเตอร์แบตช์ที่เตรียมได้มาผสมกับพอลิเมอร์แล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ โดยการรีดเป็นเส้น พลาสติกวัสดุเชิงประกอบสำหรับการพิมพ์สามมิติด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ และกำหนดสัดส่วนระหว่าง พอลิเมอร์ และแกรฟีนเท่ากับ 2 4 และ 8 ส่วน ต่อพอลิแล็กติกแอซิด 100 ส่วน พร้อมควบคุมให้ได้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นพลาสติกวัสดุเชิงประกอบให้ได้คงที่ที่ 1.75 มิลลิเมตร และม้วนเก็บ ด้วยเครื่องมือม้วนเก็บเส้นที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder) รุ่น Prism DSR-28

*อุณหภูมิในแต่ละโซนระหว่างการอัดรีด 180/180/195/210/200 °C, ความเร็วรอบ: 30 รอบ/นาที



รูปที่ 3.3 เครื่องม้วนเก็บเส้นที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง

3.5.3 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยการพิมพ์สามมิติ

3.5.3.1 การเขียนแบบชิ้นทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบออกแบบผ่านโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ 123D Design [32] โดยบริษัท Autodesk ตามมาตรฐานการทดสอบ

3.5.3.2 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

นำเส้นพลาสติกวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มาขึ้นรูปชิ้นทดสอบทำโดยเครื่องพิมพ์สามมิติแบบ Fused deposition modeling (FDM), โดยมีตัวแปรในการขึ้นรูปชิ้นงาน ได้แก่ ปริมาณการเติมเนื้อของชิ้นงานที่ 20% 50% และ 100% มุมในการพิมพ์ชิ้นงานที่ 45° และ 90° พร้อมทั้งมีการจัดวางการพิมพ์ชิ้นงานในแนวตั้ง และแนวนอน โดยมีตัวแปรควบคุมดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการพิมพ์

ตัวแปร	ค่าตัวแปร	ตัวแปร	ค่าตัวแปร
Nozzle diameter	0.35 mm	Printing speed	50 mm/s
Layer height	0.2 mm	Nozzle temperature	195°C
Shells thickness	0.8 mm	Bed temperature	70°C
Bottom/Top thickness	1 mm		



รูปที่ 3.4 เครื่องพิมพ์สามมิติแบบ FDM รุ่น DeltaX200

3.6 การวิเคราะห์ และทดสอบชิ้นงาน

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

แกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ แกรฟีน และวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิด ถูกนำมาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ โดยการขึ้นรูปชิ้นทดสอบตัวอย่างด้วยการอัดผงตัวอย่างร่วมกับ โปแทสเซียมโบรไมด์



รูปที่ 3.5 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) รุ่น Nicolet 6700

3.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)

การวิเคราะห์ และเปรียบเทียบปริมาณหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคแกรไฟต์ก่อน และหลังผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และปฏิกิริยารีดักชันด้วยกรดแอสคอร์บิก ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ หรือ XPS ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (XPS) รุ่น AXIS Ultra DLD

3.6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffractometer, XRD)

แกรไฟต์, แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน ถูกนำมาทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างการโดยสังเกตมุมหักเหของรังสีเอกซ์ที่เปลี่ยนแปลง และระยะห่างระหว่างระนาบ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน



รูปที่ 3.7 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) รุ่น D8 Advance

3.6.4 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน

สมบัติการสลายตัวทางความร้อนของเส้นวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนไกลีคอล/แกรฟีนสำหรับการพิมพ์สามมิติ ถูกศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) ตั้งแต่อุณหภูมิ 50 ถึง 600 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA)

รุ่น TG 209 F3 Tarsus®

3.6.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

พฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนกติกแอซิด/แกรฟีนสำหรับการพิมพ์สามมิติถูกศึกษาด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) โดยการศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิ 30-200 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และทำการวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (melting temperature, T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity, X_c)



รูปที่ 3.9 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) รุ่น DSC1/STARe

3.6.6 การทดสอบหาค่าดัชนีการหลอมไหล

ค่าดัชนีการหลอมไหลของเส้นพอลิเอทิลีนกติกแอซิดเกรดทางการค้า เส้นพอลิเอทิลีนกติกแอซิดบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนกติกแอซิด/แกรฟีนสำหรับการพิมพ์สามมิติ ถูกศึกษาด้วยเครื่องทดสอบหาค่าดัชนีการหลอมไหลตามมาตรฐาน ASTM D1238-13



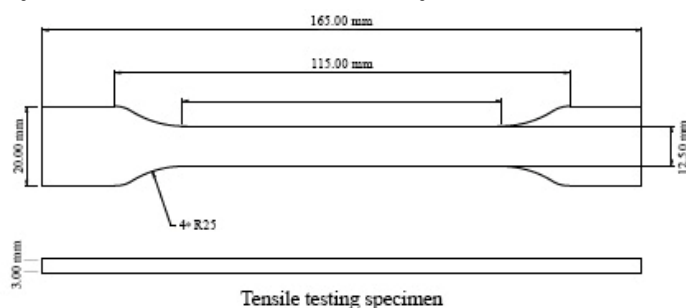
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบหาค่าดัชนีการหลอมไหลรุ่น 7053

3.6.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลจะทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบอภิทธิพลที่ใช้ในการขึ้นรูป ได้แก่ ทิศทางการพิมพ์ของชิ้นงาน, องศาการพิมพ์ชิ้นงาน, และปริมาณการเติมเนื้อชิ้นงาน นอกจากนี้ยังทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบอภิทธิพลการเติมแกรฟีนที่ของปริมาณต่างกัน โดยจะทำการทดสอบสมบัติเชิงกลทั้ง 3 ด้าน ได้แก่

3.6.7.1 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (tensile properties)

ขึ้นตัวอย่างทดสอบถูกเตรียม และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-14 type IV โดยการเตรียมขึ้นทดสอบในรูปดัมเบล (dumbbell) ดังแสดงในรูป 3.11



รูปที่ 3.11 รูปตัวอย่างขึ้นทดสอบในรูปดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D638-14 type IV

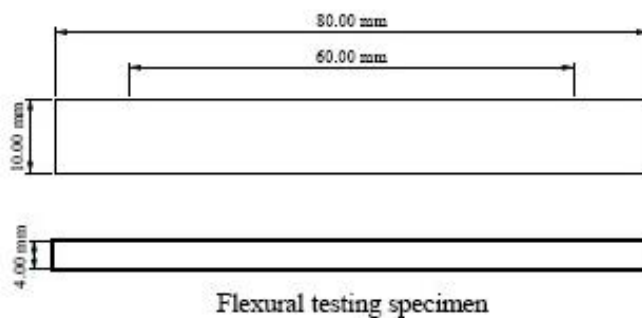
ทดสอบเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล โดยใช้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน และอัตราเร็วในการดึงยึด 50 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง พร้อมวิเคราะห์ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) และยังส์มอดุลัส (Young's modulus)



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล รุ่น H10KM

3.6.7.2 ทำการทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

ของชิ้นตัวอย่างทดสอบถูกเตรียม และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-10 โดยการเตรียมชิ้นทดสอบดังแสดงในรูป 3.13



รูปที่ 3.13 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-10

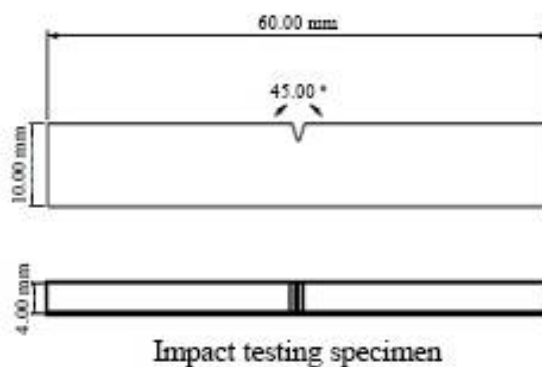
จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปสมบัติความทนแรงดัดโค้งด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลยี่ห้อ LLOYD รุ่น L500 โดยใช้ load cell ขนาด 1 กิโลนิวตัน และอัตราเร็วในการดึงยึด 2 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง พร้อมวิเคราะห์ค่าความทนแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล รุ่น L500

3.6.7.3 ทำการทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength)

ของชิ้นตัวอย่างทดสอบถูกเตรียม และทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-10 โดยการเตรียมชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูป 3.15



รูปที่ 3.15 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-10

จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก ยี่ห้อ GOTECH รุ่น GT-7045-MDH โดยใช้หัวกระแทกเบอร์ 2 ขนาด 2.75 จูล โดยทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง พร้อมวิเคราะห์ค่าความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก รุ่น GT-7045-MDH

3.6.8 การตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวบริเวณรอยแตก (fracture surface) ของชิ้นทดสอบ หลังการแตกหักถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) และการเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาพื้นผิวบริเวณรอยแตกของชิ้นทดสอบ กระทำได้โดยการนำชิ้นทดสอบที่แตกหักผ่านการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง มาตัดให้ได้ความยาวขนาด 3-5 มิลลิเมตรโดยคงพื้นที่หน้าตัดไว้ ตัวอย่างทดสอบถูกนำไปเคลือบทองในลักษณะวางราบ โดยหยาบบริเวณรอยแตกขึ้น เพื่อนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 15 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น SU3500

3.6.9 การศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า

การศึกษาความสามารถในการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบไฟฟ้า โดยการใช้ขั้วทดสอบลักษณะเข็ม กดทดสอบบริเวณปลายของชิ้นงานทั้งสองด้านที่ระยะห่าง 1, 2, 3, 4, และ 5 เซนติเมตร แล้วจึงวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 10 โวลต์ ก่อนจะนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.18 เครื่องทดสอบไฟฟ้า (High resistance meter) รุ่น 4339B

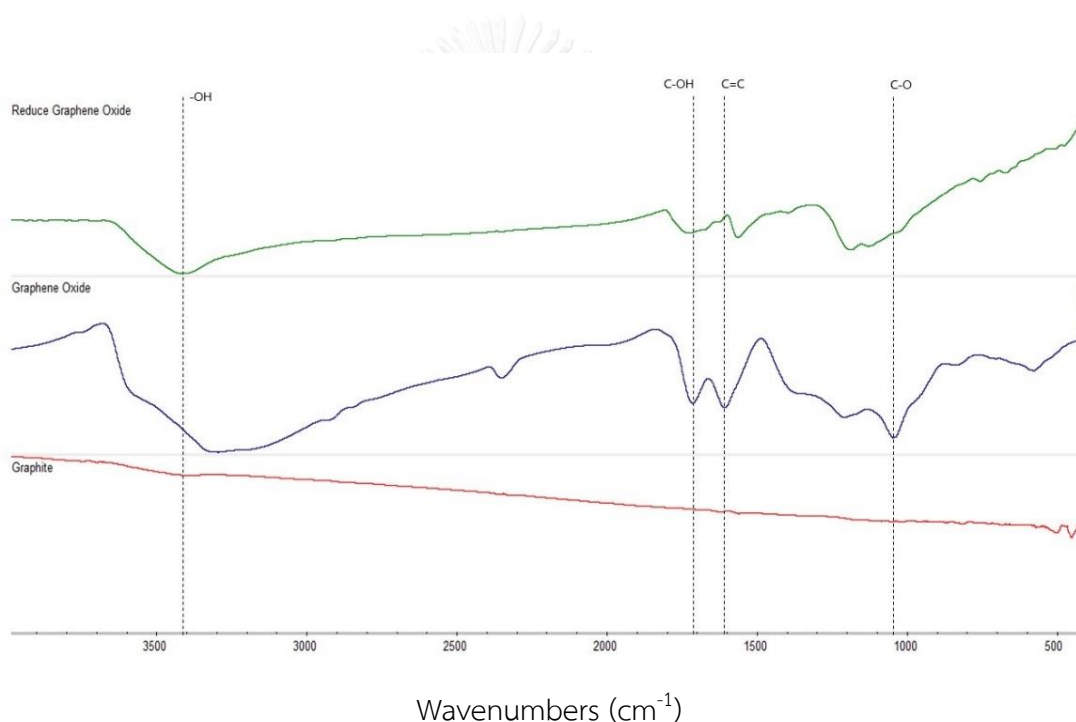
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 สมบัติของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และแกรฟีน

4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

หมู่ฟังก์ชันของแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และแกรฟีน ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีดังแสดงในรูป 4.1 จากรูปพบว่าสเปกตรัมของแกรไฟต์มีลักษณะแบนราบ และไม่ปรากฏพีกขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของแกรไฟต์มีเพียงอะตอมของคาร์บอนที่เชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์เพียงอย่างเดียว จึงไม่ปรากฏการสั่นของหมู่ฟังก์ชันใด ๆ ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Eun-Young Choi และคณะ [33]



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และแกรฟีน

การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกราไฟต์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นกับกรดฟอสฟอริกเข้มข้นในอัตราส่วน 9:1 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีบริเวณพื้นผิวของอนุภาคแกรไฟต์จากพันธะคู่ของอะตอมคาร์บอนให้กลายเป็นคาร์บอนที่มีหมู่ฟังก์ชันร่วมกับออกซิเจน โดยสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 3294 cm^{-1} 1718 cm^{-1} 1620 cm^{-1} และ 1240 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ในการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (C-OH) หมู่คาร์บอนิล (C=O) หมู่คาร์บอกซิลิก ($-(\text{C}=\text{O})-\text{OH}$)

และหมู่เอพ็อกไซด์ (C-O-C) ตามลำดับ นอกจากนี้แกรฟีนออกไซด์ยังปรากฏพีกกว้างที่ตำแหน่ง 1620 cm^{-1} ซึ่งตรงกับลักษณะการสั่นของ sp^2 ของอะตอมคาร์บอน หรืออะตอมของคาร์บอนที่เกิดพันธะคู่กับอะตอมคาร์บอนใกล้เคียง ($-C=C-$) ซึ่งจากผลสเปกตรัมที่ได้ยืนยันการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนบนคาร์บอนอะตอมของแกรฟีนออกไซด์

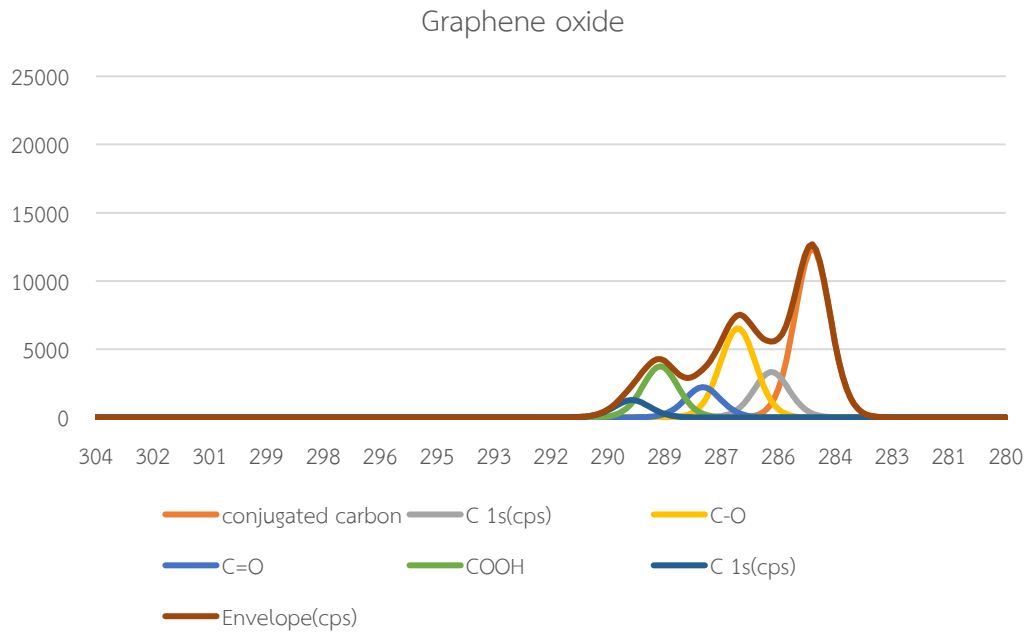
สเปกตรัมของแกรฟีนซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยารีดักชันของแกรฟีนออกไซด์ พบว่ามีความเข้มของพีกที่แสดงหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนลดลง โดยเฉพาะบริเวณพีกของหมู่ไฮดรอกซิลที่ระดับพลังงาน $3000-3500\text{ cm}^{-1}$ มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการกำจัดหมู่ไฮดรอกซิลด้วยการทำปฏิกิริยารีดักชันของกรดแอสคอร์บิกที่ดี ทำให้ได้แกรฟีน อย่างไรก็ตาม พบว่ามีพีกที่แสดงถึงการที่มีหมู่คาร์บอนิล และหมู่คาร์บอกซิลิกหลงเหลืออยู่ ซึ่งเกิดจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 4.1 เลขคลื่นการสั่นของพันธะคาร์บอนในแกรฟีนออกไซด์

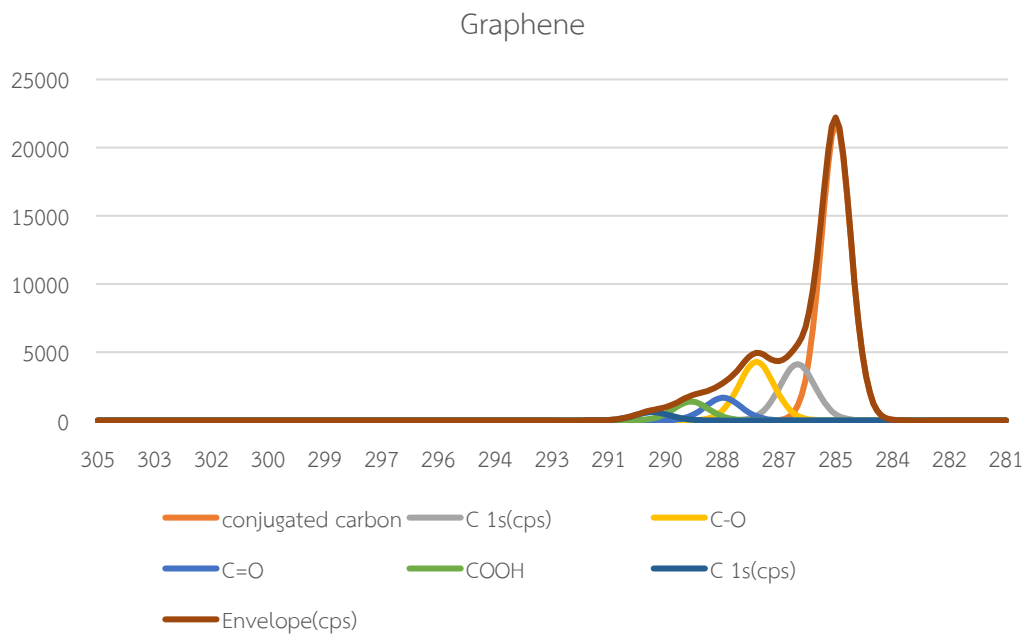
สเปกตรัม(cm^{-1})	แสดงพันธะ	หมู่ฟังก์ชัน
1059 และ 1240	C-O-C stretching	Epoxy และ Alkoxy
1620	C=C stretching	sp^2 ของคาร์บอน
1718	C=O stretching	Carbonyl และ Carboxylic
3000-3500	O-H stretching	Hydroxyl

4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของแกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านการรีดิวซ์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

การประเมินประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของกรดแอสคอร์บิกนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบระหว่างก่อน และหลังการทำปฏิกิริยารีดักชันด้วยกรดแอสคอร์บิก จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี พบว่าสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ปรากฏพีกที่สำคัญ 4 ตำแหน่ง ได้แก่ 284.5 286.4 287.8 และ 288.4 eV ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานพันธะของคาร์บอนต่าง ๆ ดังนี้ C-C C-O C=O และ $-(C=O)-OH$ ตามลำดับ [31, 34] โดยที่ความเข้มของพีกมีค่าสัมพันธ์กับปริมาณพันธะที่เกิดขึ้น เมื่อนำแกรฟีนออกไซด์ที่ได้มารีดิวซ์พบว่า ความเข้มของพีกที่ตำแหน่ง 286.4 287.8 และ 288.4 eV มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 บ่งบอกถึงปริมาณพันธะของคาร์บอนหมู่ที่เกิดฟังก์ชันกับออกซิเจนของ C-O, C=O, และ $-(C=O)-OH$ มีปริมาณมีค่าลดลงอย่างมาก แต่ยังคงมีพันธะของคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยารีดักชัน



รูปที่ 4.2 เอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.3 เอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกตรัมของแกรฟีน

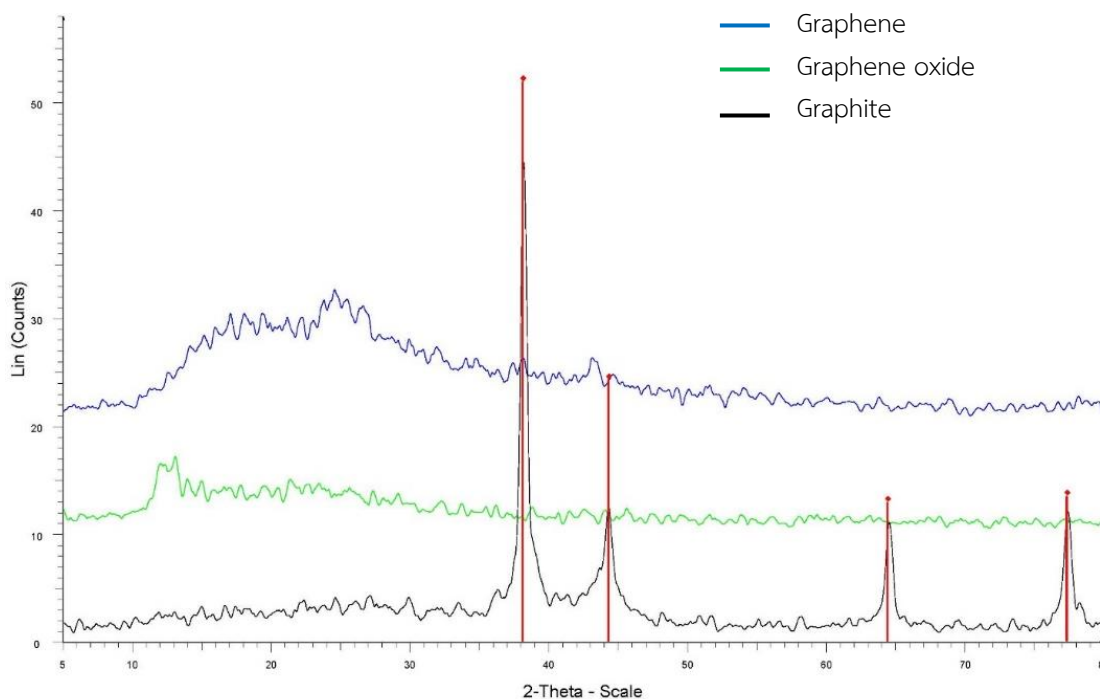
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนระหว่างพลังงานพันธะของคาร์บอนที่ตำแหน่ง C=C/C-O

	ความเข้มของพีก C=C	ความเข้มของพีก C-O	อัตราส่วน C=C/C-O
Graphene oxide	12402.48	6529.32	1.90
Graphene	21750.60	4313.76	5.04

จากข้อมูลตารางที่ 4.2 แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างพลังงานพันธะของคาร์บอน (C1s) ที่เกิดพันธะร่วมกับออกซิเจนที่ตำแหน่ง C=C/C-O จะพบว่าอัตราส่วนของคาร์บอน (C=C/C-O) มีปริมาณที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกรดแอสคอร์บิกในการรีดิวซ์ กล่าวคือ กรดแอสคอร์บิก สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันจากหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบให้ กลายเป็น sp² คาร์บอน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเกิดการเคลื่อนได้อย่างอิสระ ซึ่งเป็นผลให้อนุภาคแกรไฟีนมีความสามารถในนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคแกรไฟต์ แกรไฟีนออกไซด์ และแกรไฟีน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

จากรูปที่ 4.4 เมื่อนำมาเข้าสมการของแบรกก์ (Bragg's equation; $n\lambda = 2d\sin\theta$) ที่แสดงให้เห็นว่า ค่าระยะห่างระหว่างชั้นของอนุภาค (D-spacing) จะแปรผกผันกับค่า θ โดยเมื่อนำมาวิเคราะห์ผลที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน จะพบว่าพบอนุภาคแกรไฟต์ปรากฏพีการหักเหของรังสีเอ็กซ์ที่มุมของการเลี้ยวเบน (2θ) ที่ตำแหน่ง 36.7° เมื่อคำนวณด้วยสมการของแบรกก์ พบว่ามีระยะห่างระหว่างชั้นของอนุภาคประมาณ 0.11 นาโนเมตร เมื่อผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน และทำการสั่นด้วยคลื่นความถี่สูงในตัวกลางน้ำจนได้เป็นแกรไฟีนออกไซด์ พบว่าพีกมีการเลื่อนตำแหน่งมุมของการเลี้ยวเบน (2θ) ที่ตำแหน่ง 12.9° และมีระยะห่างระหว่างชั้นประมาณ 0.67 นาโนเมตร ซึ่งระยะห่างระหว่างชั้นที่มากขึ้นแสดงให้เห็นว่า การเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมีส่วนช่วยให้ระยะห่างระหว่างระนาบของแกรไฟต์เพิ่มมากขึ้น ช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างระนาบซึ่งเป็นผลจากหมู่ออกซิเจนระหว่างระนาบของแกรไฟีนออกไซด์ ทำให้แต่ละระนาบของแกรไฟต์สามารถแยกออกจากกันอย่างอิสระเมื่อให้คลื่นความถี่สูงผ่านตัวกลาง น้ำ โดยสังเกตได้จากลักษณะของพีกที่มีความเข้มของพีกที่ต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นระเบียบภายในโครงสร้างของอนุภาคแกรไฟีนออกไซด์



รูปที่ 4.4 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน

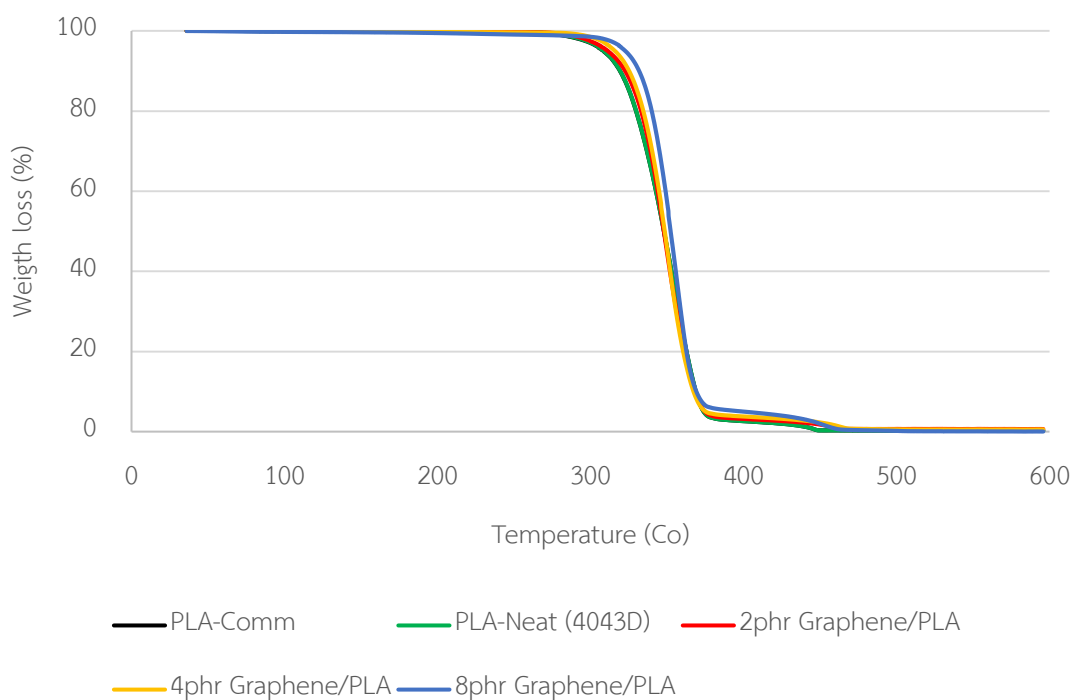
เมื่อนำแกรฟีนออกไซด์ที่ผ่านการทำปฏิกิริยารีดักชันด้วยกรดแอสคอร์บิก พบว่ามุมของการเลี้ยวเบนของแกรฟีนที่ตำแหน่ง 25° และมีระยะห่างระหว่างชั้นประมาณ 0.35 นาโนเมตร โดยระยะห่างระหว่างชั้นมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการลดลงของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเป็นเหตุให้ชั้นของอะตอมคาร์บอนมีค่าระยะห่างระหว่างอะตอมจึงมีค่าลดลง และเมื่อสังเกตลักษณะของพีคที่ตำแหน่ง 25° พบว่ามีความกว้าง และความเข้มของพีคที่ต่ำ แสดงให้เห็นถึงความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างอนุภาคแกรฟีน นอกจากนี้พบว่าผลจากการทดสอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ ดิฟแฟรกชันนี้ สอดคล้องกับผลทดสอบที่ใกล้เคียงกัน และสอดคล้องกับการใช้สารรีดิวซ์ชนิดอื่น เช่น ไฮดราซีน (hydrazine) [35] เป็นต้น

4.2 สมบัติของเส้นวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ

4.2.1 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของเส้นวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

รูปที่ 4.5 แสดงเทอร์โมแกรมการสลายตัวของชิ้นทดสอบเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า, เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมแกรฟีนที่ 2, 4 และ 8 phr ชิ้นทดสอบถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ

0-600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน และผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นทดสอบจากเทอร์โมแกรมการสลายตัวในเทอมของอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (T_{onset}) และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.5 เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า, เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ

จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวดังแสดงในรูป 4.5 พบว่าการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบสำหรับการพิมพ์สามมิติมีลักษณะการสลายตัวสองขั้น กล่าวคือในขั้นแรกเป็นการสลายตัวของพอลิเมอร์เมทริกซ์ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิตินั้นมีจุดอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิด และมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณแกรไฟีนสูงขึ้น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ในส่วนการมี การสลายตัวขั้นที่สองนั้นเกิดจากการสลายตัวขององค์ประกอบของคาร์บอน จากการทดสอบภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่ทำการทดสอบ พบว่าคาร์บอนสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนภายใต้ความร้อนได้ จึงทำให้การสลายตัวไม่ปรากฏองค์ประกอบของคาร์บอนเหลืออยู่

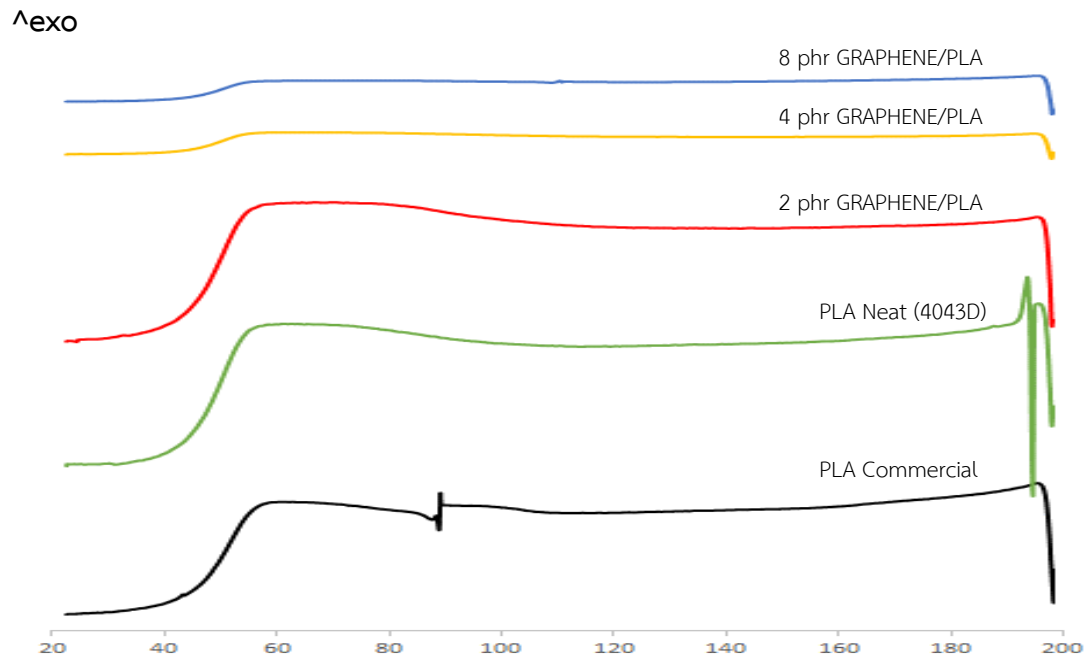
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ

ชนิดเส้น	T _{on-set} (°C)	T _{end-set} (°C)	T _{50%} (°C)	Char (%)
PLA (Commercial)	320.7	370.6	356.0	2.49
Neat PLA (4043D)	325.2	366.6	345.4	2.57
2 phr GRAPHENE/PLA	327.7	366.9	347.6	3.84
4 phr GRAPHENE/PLA	322.7	364.9	348.5	3.35
8 phr GRAPHENE/PLA	332.5	366.8	352.9	4.73

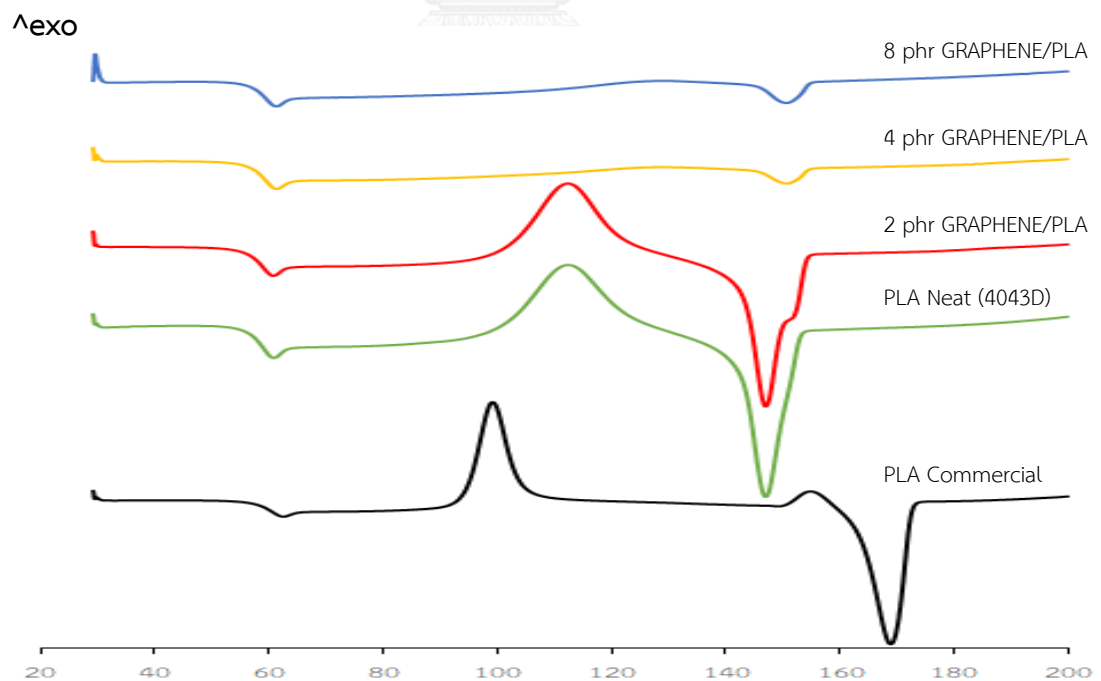
ผลการสลายตัวของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ในตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมที่ 2 4 และ 8 phr โดยพบว่าเส้นวัสดุเชิงประกอบสำหรับการพิมพ์สามมิติมีแนวโน้มอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคแกรฟีนประกอบด้วยระนาบวงคาร์บอนที่มีความเสถียรภาพทางความร้อนที่สูง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อปริมาณแกรฟีนเพิ่มขึ้นเส้นวัสดุเชิงประกอบสำหรับการพิมพ์สามมิติมีแนวโน้มเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้น [36]

4.2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีพีเอเรนเซียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงพฤติกรรมทางความร้อนของเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมแกรฟีนที่ 2 4 และ 8 phr พบว่าเมื่อเติมแกรฟีนลงในพอลิแล็กติกแอซิดส่งผลให้มีแนวโน้มของอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ที่ลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการประพุดิตัวคล้ายพลาสติกไซส์ของแกรฟีนมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงขึ้น และปรากฏพฤติกรรมการเกิดผลึกก่อนเกิดการหลอมผลึกหรือ cold crystallization (T_{cc}) ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Khaled Mezghani [37] ซึ่งเป็นผลมาจากการขึ้นรูปเป็นเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติมีการหล่อเย็นอย่างรวดเร็วทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ไม่มีเวลามากพอในการจัดเรียงตัวเป็นผลึกที่สมบูรณ์ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวอย่างไม่สมบูรณ์ และเมื่อได้รับความร้อนอีกครั้งหนึ่งทำให้สายโซ่เกิดการคลายตัวในส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ และเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกเพิ่มขึ้นในบริเวณที่เป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4.6 พฤติกรรมทางความร้อนของของเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า, เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ ระหว่างการเย็นตัว



รูปที่ 4.7 พฤติกรรมทางความร้อนของของเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า, เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ ระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.4 แสดงระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity, X_c) ของเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า, เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมที่ 2 4 และ 8 phr โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC แล้วนำผลที่ได้จากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 เพื่อลบประวัติทางความร้อน (thermal history) ของเส้นวัสดุเชิงประกอบ ไปคำนวณหาระดับความเป็นผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดจากสมการที่ 4.1 [38]

$$X_c (\%) = (\Delta H_f (\text{PLA}) \times 100) / (\Delta H^\circ (\text{PLA}) \times w) \quad (4.1)$$

โดย	ΔH_f	=	เอนทัลปีของพอลิแล็กติกแอซิด
	ΔH°	=	เอนทัลปีของพอลิแล็กติกแอซิดที่เกิดผลึก 100% (มีค่าเท่ากับ 93 จูล/กรัม)
	w	=	อัตราส่วนของพอลิแล็กติกแอซิดในเส้นวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และปริมาณผลึกของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ

Sample	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_m (°C)	T_c (°C)	%crystallinity
PLA (Commercial)	60.65	99.65	169.11	62.1	44.57
Neat PLA	58.30	112.77	147.33	61.43	24.78
2 phr GRAPHENE/PLA	58.33	112.86	147.31	60.93	26.02
4 phr GRAPHENE/PLA	58.88	126.99	151.06	61.18	2.35
8 phr GRAPHENE/PLA	58.60	127.00	150.91	61.76	3.26

จากตารางแสดงให้เห็นว่าปริมาณแกรฟีนที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวผลึกหรืออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ ในส่วนของปริมาณผลึกจะเห็นว่าปริมาณแกรฟีนที่ 2 phr มีแนวโน้มที่ให้ปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก อนุภาคแกรฟีนประพฤติตัวคล้าย สารก่อผลึกทำให้มีการเกิดปริมาณผลึกมากขึ้นในพอลิแล็กติกแอซิดเมทริก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณว่าปริมาณแกรฟีนที่มากกว่า 2 phr มีปริมาณผลึกที่ลดต่ำลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแกรฟีน มีทำให้เกิดการขัดขวางการเติบโตของการเกิดผลึกของพอลิเมอร์เมทริก

4.2.3 การทดสอบหาดัชนีการหลอมไหล

ตารางที่ 4.5 แสดงดัชนีการหลอมไหลของเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ชนิดที่ใช้ในการค้า เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ และเส้นแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิด สำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมที่ 2 4 และ 8 phr ตามลำดับพบว่า การเติมแกรฟีน สามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหลอมไหลของเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ และมีดัชนีการหลอมไหลที่เพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนแกรฟีนมีค่ามากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของแกรฟีนแสดงพฤติกรรมคล้ายพลาสติกไฮเซอร์กระจายตัวในโครงสร้างของพอลิแล็กติกแอซิด ทำให้สายโซ่โครงสร้างของพอลิแล็กติกแอซิดเกิดการเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่าย ส่งผลให้มีดัชนีการหลอมไหลที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถช่วยลดแรงเสียดทานที่ใช้ในการขึ้นรูปได้ อย่างไรก็ตามพบว่าดัชนีการหลอมไหลของเส้นแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิด สำหรับการพิมพ์สามมิตียังคงมีดัชนีการหลอมไหลต่ำกว่าเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติชนิดที่ใช้ในการค้า ซึ่งอนุมานได้ว่าเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติชนิดที่ใช้ในการค้าอาจมีการใส่สารเติมแต่งต่าง ๆ เช่น สารหล่อลื่น จึงทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลสูงขึ้น

ตารางที่ 4.5 ดัชนีการหลอมไหลของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ

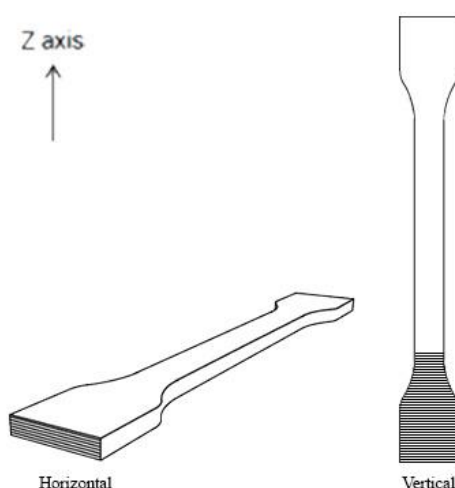
	MFI (g/10 min)
PLA (Commercial)	43
Neat PLA (4043D)	9.5
2phr GRAPHENE/PLA	19.6
4phr GRAPHENE/PLA	20.5
8phr GRAPHENE/PLA	20.8

4.3 ผลของตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า

เพื่อทำการคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติ จึงได้มีการทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบ โดยใช้เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า ในการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

ตัวอย่าง	ทิศทางการพิมพ์	การตัดกันของโครง ด้านในขึ้นทดสอบ	ปริมาณการเพิ่มขึ้น ทดสอบ (%)
H-45-100	แนวนอน	+45°/-45°	100
V-45-100	แนวตั้ง	+45°/-45°	100
H-0-100	แนวนอน	0°/+90°	100
V-0-100	แนวตั้ง	0°/+90°	100
H-0-50	แนวนอน	0°/+90°	50
H-0-20	แนวนอน	0°/+90°	20

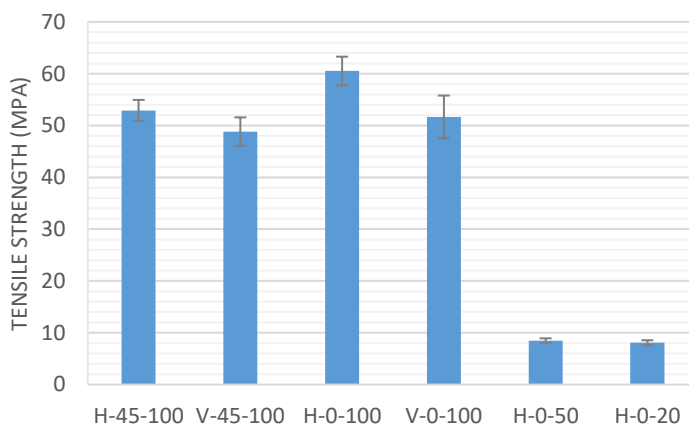


รูปที่ 4.8 แสดงทิศทางการพิมพ์

4.3.1 สมบัติด้านแรงดึง

รูปที่ 4.9 แสดงอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบที่มีต่อสมบัติความทนแรงดึงของขึ้นทดสอบ จากกราฟพบว่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณการเพิ่มขึ้นทดสอบส่งผลต่อสมบัติความทนแรงดึงของขึ้นทดสอบอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ปริมาณการเพิ่มขึ้นทดสอบที่ 20% มีค่าทนแรงดึง 8.07 MPa ที่ปริมาณการเพิ่มขึ้นทดสอบเพิ่มขึ้นที่ 50 % มีค่าทนแรงดึง (8.49 MPa) และที่ปริมาณการเพิ่มขึ้นทดสอบที่ 100% มีค่าทนแรงดึงที่ 60.52 MPa ทั้งนี้เนื่องจากขึ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นทดสอบมีค่ามากขึ้น ทำให้มีปริมาณเนื้อพลาสติกที่สูงขึ้น และเพิ่มพื้น

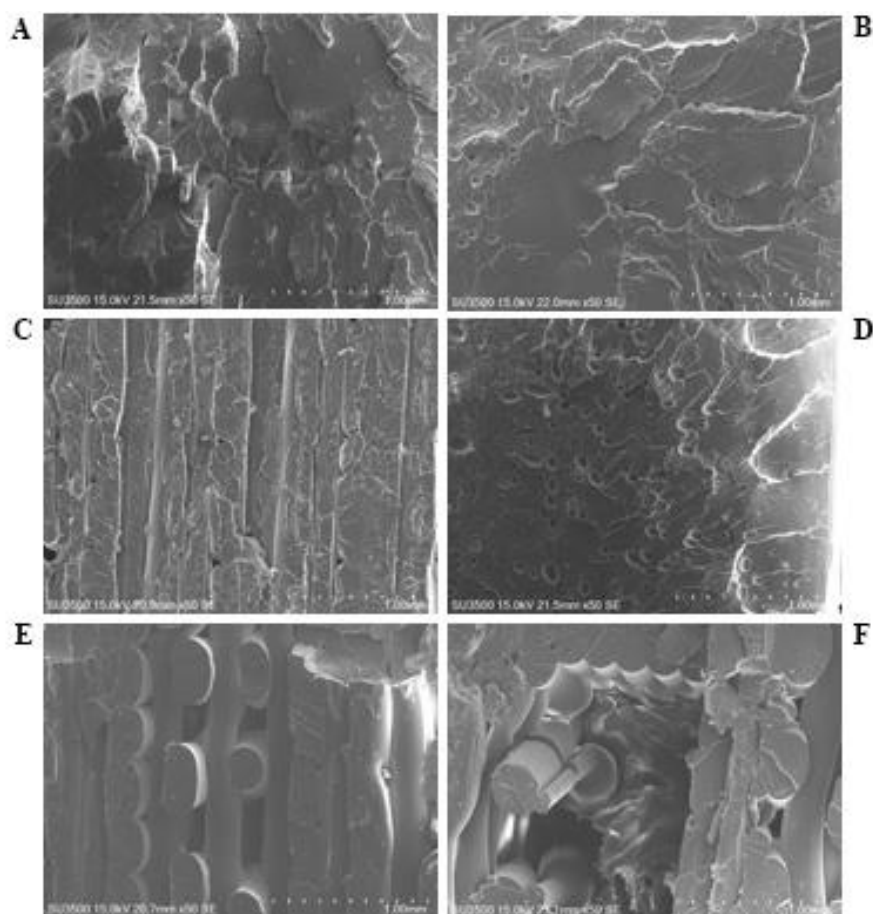
ที่ในการรับแรงดึงมากขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดจากช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในชั้นทดสอบที่สังเกตจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.10 ช่องว่างมีปริมาณลดลงเมื่อมีเมื่อปริมาณการเติมชั้นทดสอบจากที่ 20% ไปที่ 50%



รูปที่ 4.9 ค่าความทนแรงดึงของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ

นอกจากปริมาณการเติมชั้นทดสอบแล้ว ทิศทางการพิมพ์ชั้นทดสอบ และการตัดกันของโครงด้านในชั้นทดสอบ ต่างมีผลต่อความทนแรงดึงของชั้นทดสอบเช่นกัน โดยสังเกตได้จากรูปที่ 4.10 ซึ่งพบว่าค่าความทนแรงดึงของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวนอน ให้ค่าความทนแรงดึงที่สูงกว่าชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวตั้ง เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างชั้นงานขณะพิมพ์จากการพิมพ์ทีละชั้น ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นในแนวตั้งของการพิมพ์ที่มีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในขณะที่เมื่อพิมพ์ชั้นงานในลักษณะแนวนอนชั้นงานมีความต่อเนื่องที่มากกว่า ดังนั้นชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวตั้งจะเกิดการแตกหักได้ง่ายกว่าชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวนอนที่มีโครงด้านในเป็นเส้นพอลิเมอร์ที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของการตัดกันของโครงด้านในชั้นทดสอบ พบว่าการตัดกันของโครงด้านในชั้นทดสอบแบบ $0^\circ/+90^\circ$ (60.52 MPa) ให้ความทนแรงดึงของชั้นทดสอบ สูงกว่าการตัดกันของโครงด้านในชั้นทดสอบแบบ $+45^\circ/-45^\circ$ (52.91 MPa) ทั้งนี้เพราะการตัดกันของโครงด้านในชั้นทดสอบแบบ $0^\circ/+90^\circ$ สามารถกระจายแรงดึงออกไปในแนวตั้งฉากได้ ทำให้มีการกระจายแรงได้ดีว่าการตัดกันของโครงด้านในชั้นทดสอบแบบ $+45^\circ/-45^\circ$

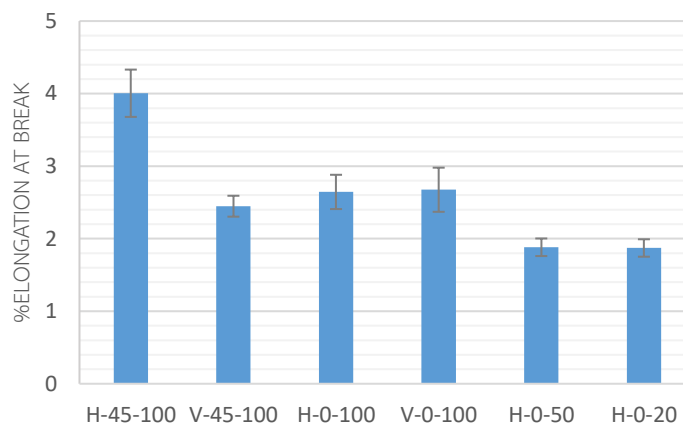


รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณพื้นผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบ (A) H-45-100, (B) V-45-100, (C) H-0-100, (D) V-0-100, (E) H-0-50 และ (F) H-0-20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

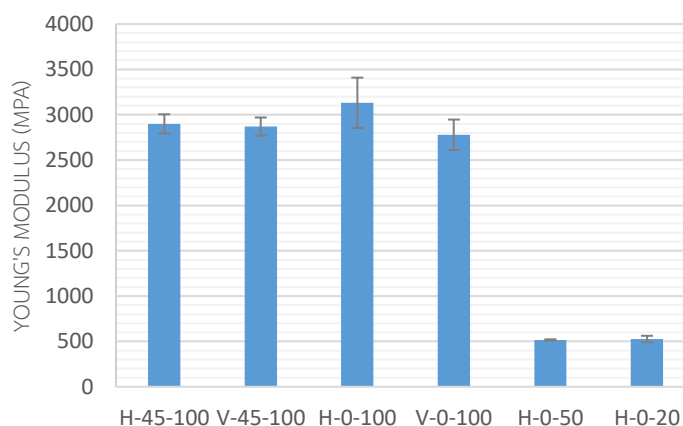
รูปที่ 4.11 แสดงอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบต่อความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ โดยเปอร์เซ็นต์ปริมาณการเติมชิ้นทดสอบส่งผลต่อความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณการเติมชิ้นทดสอบมากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงขึ้น โดยที่ 20% ให้เปอร์เซ็นต์ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่ 1.88% ในขณะที่ปริมาณการเติมชิ้นทดสอบที่ 50% และ 100% ให้เปอร์เซ็นต์ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่ 1.87% และ 2.64% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากช่องว่างที่ลดลงภายในชิ้นทดสอบที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มขึ้นทำให้เพิ่มพื้นที่ในการรับแรงดึงยืดมากขึ้น ในส่วนทิศทางการพิมพ์ชิ้นทดสอบมีการแสดงอิทธิพลต่อความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.10 เมื่อทำการพิมพ์ที่มีการตัดกันของโครงด้านในชิ้นทดสอบแบบ $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ เปรียบเทียบกับ $0^{\circ}/+90^{\circ}$ พบว่ามีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวอนที่มี การตัดกันของโครงด้านในชิ้นทดสอบแบบ $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ มีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบสูงที่สุด (4.00%) ทั้งนี้เนื่องจากการตัดกันของ

โครงสร้างขึ้นทดสอบแบบ $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ สามารถช่วยให้เกิดการยึดตัว การกระจายแรง และการส่งผ่านแรงของขึ้นทดสอบได้ดีกว่าการตัดกันของโครงสร้างขึ้นทดสอบแบบ $0^{\circ}/+90^{\circ}$



รูปที่ 4.11 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ

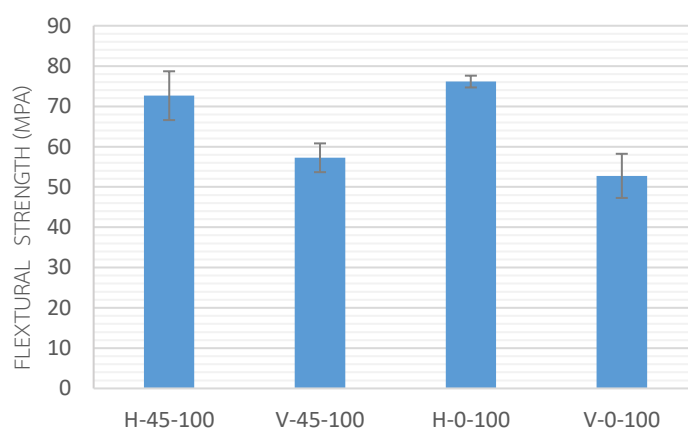
รูปที่ 4.12 แสดงอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบต่อยังสัมมอดูลัสของขึ้นทดสอบ โดยเปอร์เซ็นต์ปริมาณการเติมขึ้นทดสอบส่งผลต่อยังสัมมอดูลัสของขึ้นทดสอบอย่างเห็นได้ชัด โดยพบว่ายังสัมมอดูลัสมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีเปอร์เซ็นต์ปริมาณการเติมขึ้นทดสอบสูงขึ้น ดังนั้นปริมาณการเติมขึ้นทดสอบที่ 20% (526.87 MPa) และ 50% (516.04 MPa) กับที่ 100% (3132.32 MPa) ในส่วนทิศทางการพิมพ์ขึ้นทดสอบพบว่าขึ้นทดสอบแบบ การพิมพ์ที่มีการตัดกันของโครงสร้าง $0^{\circ}/+90^{\circ}$ จะให้ยังสัมมอดูลัสของขึ้นทดสอบสูงสุด (3132.32 MPa) เมื่อเปรียบกับการพิมพ์ที่มีการตัดกันของโครงสร้าง $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ (2899.86 MPa) และมีผลสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด



รูปที่ 4.12 ยังสัมมอดูลัสของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ

4.3.2 สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง

จากผลการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติในแนวนอน จะให้ค่าความทนแรงดัดโค้งสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวตั้งอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการพิมพ์ชิ้นงานในแนวตั้งมีความต่อเนื่องของโครงสร้างต่ำกว่าในแนวนอน ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของการพิมพ์ที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเมื่อทำการดัดโค้งชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวตั้งเกิดการทำให้คลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของการพิมพ์ทำให้ชั้นของการพิมพ์ทำให้เกิดการแยกตัวของชิ้นทดสอบจึงเกิดการแตกหักได้ง่าย ในขณะที่ชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวนอนที่มีโครงสร้างเป็นเส้นพอลิเมอร์ที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เมื่อทำการดัดโค้งชิ้นทดสอบจะเกิดการยึดตัวตามแนวเส้นพิมพ์จึงทำให้มีค่าความทนแรงดัดโค้งสูงกว่า



รูปที่ 4.13 ค่าความทนแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ

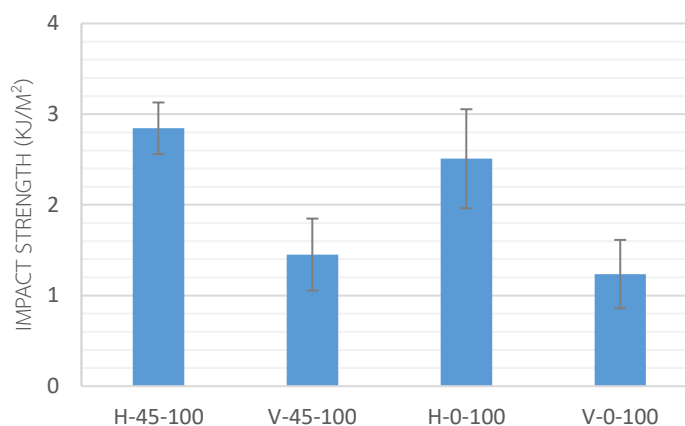
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของการตัดกันของโครงสร้างในชิ้นทดสอบ พบว่าการตัดกันของโครงสร้างในชิ้นทดสอบแบบ $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ (72.65 MPa) ให้ค่าความทนแรงดัดโค้งใกล้เคียงกับการตัดกันของโครงสร้างในชิ้นทดสอบแบบ $0^{\circ}/+90^{\circ}$ (76.15 MPa) ทั้งนี้เพราะการตัดกันของโครงสร้างในชิ้นทดสอบทั้งสองแบบที่สามารถเกิดการยึดตัวตามแนวเส้นพิมพ์ได้ดี

4.3.3 สมบัติด้านความทนแรงกระแทก

จากผลการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทกดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติในแนวนอน มีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวตั้งอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากความต่อเนื่องของโครงสร้างในแนวตั้งที่ต่ำทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของการพิมพ์ที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อให้แรงกระแทกต่อชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวตั้งเกิดการทำให้คลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของการพิมพ์ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักได้ง่ายกว่าชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวนอนที่มีโครงสร้างเป็นเส้นพอลิเมอร์ที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ และเมื่อทำการเปรียบเทียบ

อิทธิพลของการตัดกันของโครงด้านในชั้นทดสอบ พบว่าการตัดกันของโครงด้านในชั้นทดสอบแบบ +45°/-45° (2.84 KJ/m²) จะให้ค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่าการตัดกันของโครงด้านในชั้นทดสอบแบบ 0°/+90° (2.51 KJ/m²) ทั้งนี้เพราะการตัดกันของโครงด้านในชั้นทดสอบแบบ +45°/-45° สามารถกระจายแรงกระแทกที่กระทำต่อชั้นทดสอบได้ดีว่าการตัดกันของโครงด้านในชั้นทดสอบแบบ 0°/+90°



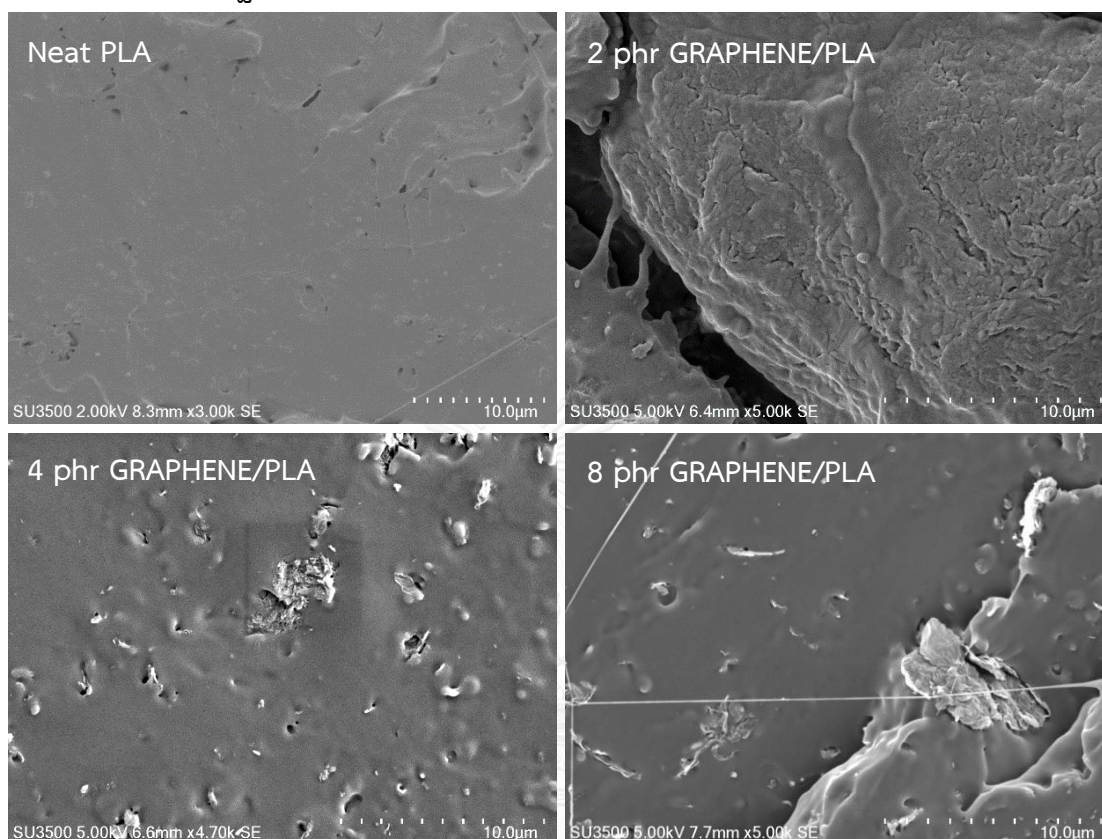
รูปที่ 4.14 ค่าความทนแรงกระแทกของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ

จากผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของชั้นทดสอบ เพื่อคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติดังที่ได้กล่าวข้างต้น พบว่าตัวอย่าง H-45-100 และ H-0-100 ต่างมีสมบัติที่เหมาะสมแก่การนำมาขึ้นรูปโดยมีจุดเด่นที่ต่างกันคือตัวอย่าง H-45-100 มีความยืดหยุ่นสูงที่สุด ณ จุดขาดที่มากกว่า สามารถรับแรงกระแทกได้ดีว่า ในขณะที่ตัวอย่าง H-0-100 จะมีค่าการต้านทานแรงดึง และมีค่าความทนแรงดัดโค้งที่สูงกว่า โดยทั้งสองแบบต่างมียังสัมดูลัสที่ใกล้เคียงกัน เพื่อไม่ให้เกิดการเรียงตัวของเส้นพิมพ์ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น จึงได้เลือกตัวแปรที่ใช้ในการพิมพ์ของตัวอย่าง H-45-100 ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบของพอลิแล็กติกแอซิด/แกรไฟีน

4.4 สมบัติของชั้นทดสอบวัสดุเชิงประกอบของพอลิแล็กติกแอซิด/แกรฟีนที่ขึ้นรูปด้วย

กระบวนการพิมพ์สามมิติ

4.4.1 ลักษณะสัณฐานวิทยา



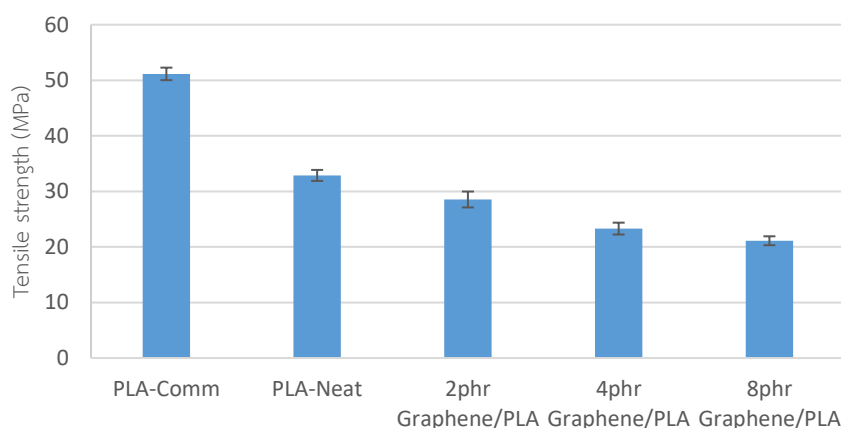
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณพื้นผิวของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปจาก เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ

การวิเคราะห์บริเวณพื้นผิวย่อยแตกของชั้นทดสอบ เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนในชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมที่ 2 4 และ 8 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยลักษณะพื้นผิวย่อยแตกของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ จะมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ แต่เมื่อทำการเติมแกรฟีนเข้าไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ พื้นผิวย่อยแตกของพอลิแล็กติกแอซิดมีผิวที่ขรุขระมากขึ้นตามปริมาณของอนุภาคแกรฟีนที่ใส่ลงไป ทั้งนี้จะเห็นว่าแกรฟีนจะกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ของวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็กติกแอซิด แต่ไม่ได้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากสภาพข้อที่

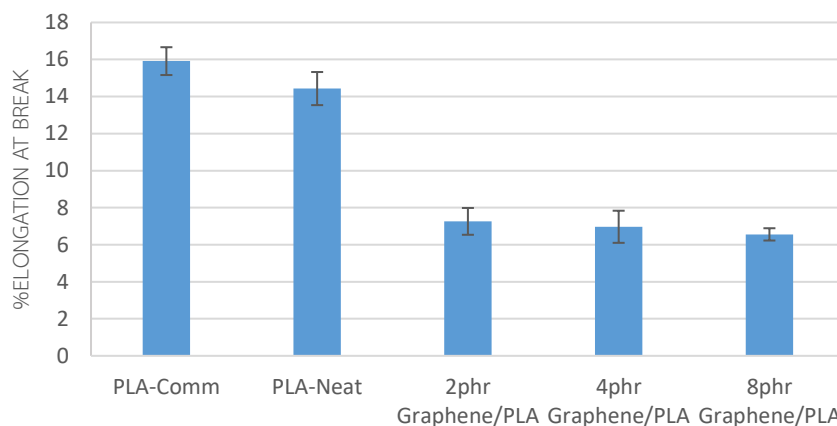
แตกต่างกัน ของโครงสร้างของแกรฟีนที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างที่ไม่มีข้อประกอบด้วย อะตอมคาร์บอนเรียงต่อกันเท่านั้น ในขณะที่พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีข้อจากโครงสร้างที่ ประกอบด้วยพันธะเอสเทอร์ ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิด จึงไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันโดยสมบูรณ์ และจากการที่ใส่ปริมาณอนุภาคแกรฟีนไปเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกัน เป็นกลุ่มก้อนของแกรฟีนเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนถึงการจับกลุ่มรวมกันของ อนุภาคแกรฟีน เป็นผลมาจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อมีปริมาณแกรฟีนที่เพิ่มขึ้น [39]

4.4.2 สมบัติด้านแรงดึง

ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของชิ้นทดสอบ และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้น ทดสอบของเส้นพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่อัตราส่วนแกรฟีน ต่าง ๆ ถูกแสดงในรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 พบว่าความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สาม มิติที่มีสัดส่วนการเติมที่ 2, 4, และ 8 phr จะมีค่าความทนแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้น ทดสอบที่ลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ ซึ่ง สามารถสรุปได้ว่าปริมาณการเติมแกรฟีนชิ้นต่ำที่ 2 phr ไม่ส่งผลในการส่งเสริมการเสริมแรงแก่พอลิ แล็กติกแอซิด ทั้งนี้เนื่องจากกระจายตัวได้ไม่ดีของอนุภาคแกรฟีนในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เกิดจากการ จับตัวรวมกันเองเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคแกรฟีน และขัดขวางการเลื่อนผ่านของสายโซ่ นอกจากนี้ ยังพบว่าการกระจายตัวของแกรฟีนในพอลิเมอร์เมทริกซ์ของวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็กติกแอซิด ไม่ได้ เข้าเป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากสภาพข้อที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูป 4.15

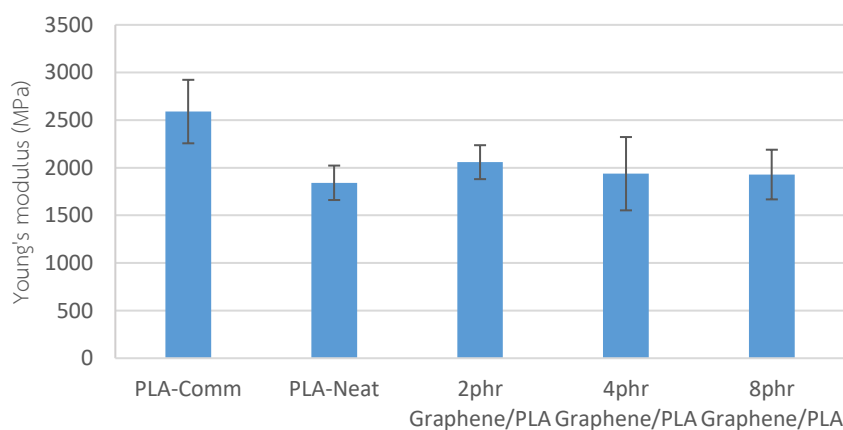


รูปที่ 4.16 ความทนแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ เกรดทางการค้า, เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของ แกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ



รูปที่ 4.17 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า, เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ

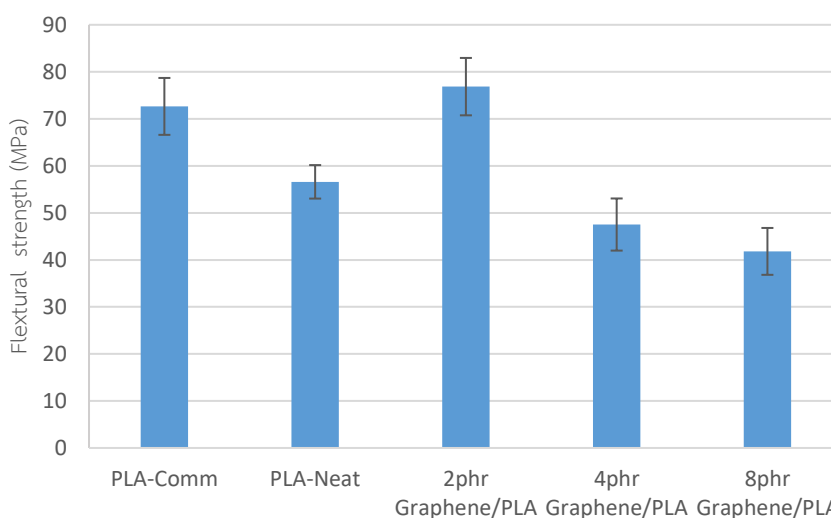
จากรูปที่ 4.18 พบว่ายังสัมมอดูลัสของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นวัสดุพอลิแล็กติกแอซิด และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติม 2, 4, และ 8 phr ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์



รูปที่ 4.18 ยังสัมมอดูลัสของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า, เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ

4.4.3 สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง

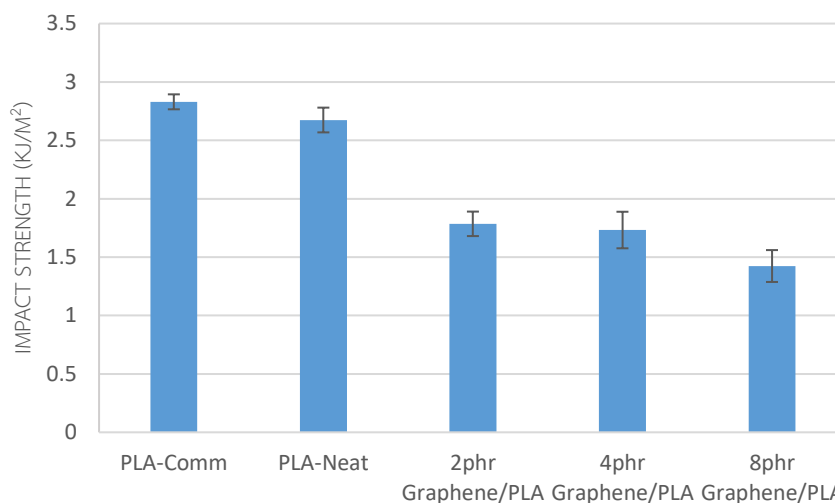
ผลการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งถูกแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมแกรฟีนที่ 2 phr มีความทนแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบสูงที่สุด (76.85 MPa) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกับชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า (72.65 MPa) ในขณะที่ชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมที่ 4 และ 8 phr จะมีค่าความทนแรงดัดโค้งที่ลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์อย่างเห็นได้ชัด ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเติมอนุภาคแกรฟีนที่ปริมาณต่ำ (2 phr) จะช่วยให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคแกรฟีนในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่า ส่งผลให้เกิดการประสานยึดพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี ในขณะที่การเติมอนุภาคแกรฟีนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคแกรฟีนมีโอกาสเกิดการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มที่สูงขึ้น และไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์เนื่องจากสภาพผิวที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูป 4.15 จึงทำให้ชิ้นทดสอบมีค่าความทนแรงดัดโค้งลดลง



รูปที่ 4.19 ค่าความทนแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า, เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ

4.4.4 สมบัติด้านความทนแรงกระแทก

ผลการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทกถูกแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมที่ 2, 4, และ 8 phr มีค่าความทนแรงกระแทกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพอลิแล็กติกแอซิดทางการค้า และสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์อย่างเห็นได้ชัด และพบว่าค่าความทนแรงกระแทกที่ลดลงเมื่อปริมาณแกรฟีนที่เติมมีมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแกรฟีนที่สูงขึ้นตามปริมาณการเติม นอกจากนี้ยังพบความไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากสภาพข้อที่แตกต่างกันของอนุภาคแกรฟีน และพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูป 4.15 ซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้เกิดการสะสมความเค้นก่อรอยแตก และสามารถเกิดการพัฒนาเป็นรอยแตกได้



รูปที่ 4.20 ความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า, เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์ และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่สัดส่วนการเติมต่าง ๆ

4.4.5 สมบัติด้านการนำไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติจากเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า, เส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ, และเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมที่ 2, 4, และ 8 phr ที่ทำการวัดด้วยเครื่องทดสอบไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistance, R) และค่าสภาพนำไฟฟ้า (conductivity, σ) คำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$\sigma = l/RA \quad (4.2)$$

โดยที่ l = ระยะห่างระหว่างปลายขั้วไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เมตร
 A = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นทองแดง มีหน่วยเป็น ตารางเมตร
 โดยที่มีค่าคงที่เท่ากับ 6.25×10^{-4} ตารางเมตร

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของชั้นทดสอบที่ระยะห่างระหว่างขั้วทดสอบ 5 เซนติเมตร

	Resistance (Ω)	Conductivity (S/m)
Commercial PLA	1.00×10^{12}	8.00×10^{-11}
Neat PLA	1.00×10^{12}	8.00×10^{-11}
2phr GRAPHENE/PLA	2.74×10^9	2.92×10^{-8}
4phr GRAPHENE/PLA	2.08×10^9	3.84×10^{-8}
8phr GRAPHENE/PLA	1.89×10^9	4.24×10^{-8}

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติจากเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิเอทิลีนทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ เมื่อเทียบกับชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติจากเส้นพอลิเอทิลีนทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า และเส้นพอลิเอทิลีนทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติมีค่าที่ลดต่ำลงเมื่อมีการเติมแกรฟีน และลดลงมากขึ้นเมื่อมีการเติมแกรฟีนในปริมาณที่สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติจากเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิเอทิลีนทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติที่ปริมาณการเติมที่ 8 phr มีค่าลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติจากเส้นพอลิเอทิลีนทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า และเส้นพอลิเอทิลีนทิกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ แสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นของสภาพการนำไฟฟ้าของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ เนื่องจากอนุภาคแกรฟีน ซึ่งมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีจากโครงสร้างของแกรฟีนที่ประกอบด้วยวงแหวนหกเหลี่ยมของอะตอมคาร์บอนชั้นเดียว และสร้างพันธะโควาเลนต์แบบ sp² ไฮบริดเซชัน ซึ่งลักษณะของโครงสร้างแกรฟีนนี้ จึงทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกขึ้น และทำให้เกิดการนำไฟฟ้า [40] แสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาคของแกรฟีนสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเอทิลีนทิกแอซิดบริสุทธิ์ได้ และมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุเชิงประกอบของพอลิเอทิลีนทิกแอซิด/แกรฟีนเหมาะสมแก่การนำมาใช้เป็นวัสดุต้านไฟฟ้าสถิต [41, 42]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อสมบัติของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการพิมพ์แบบสามมิติ ได้แก่ ทิศทางการพิมพ์ขึ้นทดสอบ การตัดกันของโครงด้านในขึ้นทดสอบ และปริมาณการเติมขึ้นทดสอบในหน่วยเปอร์เซ็นต์ต์ และเพื่อศึกษาผลของการเติมแกรฟีนต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ดัชนีการหลอมไหล และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็กติกแอซิด โดยการเตรียมแกรฟีนขึ้นเองในห้องปฏิบัติการจากผงแกรไฟต์ด้วยเทคนิคที่ดัดแปลงจากวิธีการของฮัมเมอร์ รวมทั้งใช้ตัววัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้แก่กรดแอสคอร์บิก แล้วจึงนำแกรฟีนที่ได้มาเตรียมเป็นมาสเตอร์แบดซ์โดยใช้เทคนิคการตกตะกอนร่วม ก่อนนำไปผสมพอลิแล็กติกแอซิดด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลวที่อัตราส่วน 2, 4, และ 8 phr ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เพื่อขึ้นรูปเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติและม้วนเก็บโดยเครื่องม้วนเก็บเส้นที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปเป็นขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติ โดยจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปัจจัยการขึ้นรูปทั้งสามปัจจัยที่ศึกษาล้วนส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ กล่าวคือ
 - ทิศทางการพิมพ์ขึ้นทดสอบที่เหมาะสมกับลักษณะงานจะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลแก่ชิ้นงานได้ โดยพบว่าค่าสมบัติเชิงกลของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวอนซึ่งมีโครงด้านในเป็นเส้นพอลิเมอร์ที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในทิศทางเดียวกับการทดสอบ ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปในแนวตั้งที่มีโครงสร้างเป็นชั้นของการพิมพ์ทิศทางเดียวกับการทดสอบ ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของการพิมพ์มีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างชิ้นงานขณะพิมพ์ในการพิมพ์ทีละชั้น
 - การตัดกันของโครงด้านในแบบ $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ จะให้ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และการรับแรงกระแทกที่สูงกว่า ส่วนแบบ $0^{\circ}/+90^{\circ}$ จะให้ค่าการต้านทางแรงดึง และค่าความทนแรงดัดโค้งที่สูงกว่า
 - การลดปริมาณการเติมขึ้นทดสอบส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด
2. สามารถเตรียมแกรฟีนจากแกรไฟต์ด้วยเทคนิคที่ดัดแปลงจากวิธีการของฮัมเมอร์ได้
3. สามารถเตรียมเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติจากวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็กติกแอซิดกับแกรฟีนได้

4. การเติมอนุภาคแกรฟีนในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้สมบัติด้านแรงดึง และความทนแรงกระแทกลดต่ำลง
5. ความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นที่ปริมาณการเติมที่ 2 phr และลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเติม
6. เมื่อปริมาณการเติมแกรฟีนเพิ่มขึ้น ชิ้นงานที่ได้มีแนวโน้มของค่าดัชนีการหลอมไหล และอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงขึ้น
7. ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็กติกแอซิดกับแกรฟีนสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ได้เติมแกรฟีน จึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมแกรฟีนช่วยเพิ่มสมบัติในด้านการต้านไฟฟ้าสถิตให้กับวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็กติกแอซิดได้
8. ปริมาณการเติมแกรฟีนที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ 2 phr

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษารูปแบบของโครงสร้างในชิ้นงานที่มีลักษณะที่ต่างออกไป เช่น รูปวงแหวนหกเหลี่ยม ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน
2. ศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดให้มีการกระจายตัวของแกรฟีนที่ดีขึ้น
3. พัฒนาวีธีคัดขนาดอนุภาคแกรฟีนในแต่ละขั้นตอนเพื่อป้องกันการติดขัดของหัวพิมพ์

รายการอ้างอิง

1. Jiang, L. and J. Zhang, *9 - Biodegradable and Biobased Polymers A2 - Kutz, Myer*, in *Applied Plastics Engineering Handbook*. 2011, William Andrew Publishing: Oxford. p. 145-158.
2. Chepurwar, C. *Application of graphene in modern electronics*. 2011; Available from: <https://www.slideshare.net/cscckg/application-of-graphene-in-electronics>.
3. Cummins, K. *The rise of additive manufacturing*. 2010; Available from: <https://www.theengineer.co.uk/issues/24-may-2010/the-rise-of-additive-manufacturing/>.
4. Rifkin, J., *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*. 2011: St. Martin's Press.
5. Taufik, M. and P.K. Jain, *Role of build orientation in layered manufacturing: a review*. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 2013. **27**(1): p. 47-73.
6. International, A., *Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology*, in *ISO / ASTM52900-15*. 2015, ASTM International: West Conshohocken, PA.
7. Wikipedia, *3D printing*. 2017.
8. 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.
9. Torrado, A.R., et al., *Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing*. *Additive Manufacturing*, 2015. **6**: p. 16-29.
10. Tymrak, B.M., M. Kreiger, and J.M. Pearce, *Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions*. *Materials & Design*, 2014. **58**: p. 242-246.

11. International, A., *Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities*, in ASTM D6400-12. 2012, ASTM International: West Conshohocken, PA.
12. <http://www.ima-ichimura.jp>, กระบวนการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ กระบวนการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ, Editor. 2010.
13. Madhavan Nampoothiri, K., N.R. Nair, and R.P. John, *An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research*. Bioresource Technology, 2010. **101**(22): p. 8493-8501.
14. Yu, L. and L. Chen, *Polymeric Materials from Renewable Resources*, in *Biodegradable Polymer Blends and Composites from Renewable Resources*. 2009, John Wiley & Sons, Inc. p. 1-15.
15. Pelouze, T.J., *Synthesis of low-molecular weight polylactic acid*. Ann Chimie, 1845. **13**: p. 257-262.
16. Bischoff, C.A. and P. Walden, *J. Ueber Derivate der Glycolsäure*. Justus Liebigs Annalen der Chemie, 1894. **279**(1-2): p. 45-70.
17. Watson, P.D., *Lactic Acid Polymers as Constituents of Synthetic Resins and Coatings*. Industrial & Engineering Chemistry, 1948. **40**(8): p. 1393-1397.
18. Ray, S.S. and J. Ramontja, *Poly lactide-Based Nanocomposites*, in *Biodegradable Polymer Blends and Composites from Renewable Resources*. 2009, John Wiley & Sons, Inc. p. 389-413.
19. ลักษณะโครงสร้างของกรดแล็กติก 2013.
20. Gupta, A.P. and V. Kumar, *New emerging trends in synthetic biodegradable polymers – Polylactide: A critique*. European Polymer Journal, 2007. **43**(10): p. 4053-4074.
21. 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.
22. Kenny, C., วิธีการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดแบบต่าง ๆ. 2016.
23. Avérous, L., *Chapter 21 - Polylactic Acid: Synthesis, Properties and Applications A2 - Belgacem, Mohamed Naceur*, in *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*, A. Gandini, Editor. 2008, Elsevier: Amsterdam. p. 433-450.

24. Novoselov, K.S., et al., *Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films*. Science, 2004. **306**(5696): p. 666-669.
25. Hummers, W.S. and R.E. Offeman, *Preparation of Graphitic Oxide*. Journal of the American Chemical Society, 1958. **80**(6): p. 1339-1339.
26. Kim, H., A.A. Abdala, and C.W. Macosko, *Graphene/Polymer Nanocomposites*. Macromolecules, 2010. **43**(16): p. 6515-6530.
27. Marcano, D.C., et al., *Improved Synthesis of Graphene Oxide*. ACS Nano, 2010. **4**(8): p. 4806-4814.
28. Neto, A.C., et al., *The electronic properties of graphene*. Reviews of modern physics, 2009. **81**(1): p. 109.
29. Dul, S., L. Fambri, and A. Pegoretti, *Fused deposition modelling with ABS-graphene nanocomposites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016. **85**: p. 181-191.
30. Pang, H., et al., *An electrically conducting polymer/graphene composite with a very low percolation threshold*. Materials Letters, 2010. **64**(20): p. 2226-2229.
31. Zhang, J., et al., *Reduction of graphene oxide via L-ascorbic acid*. Chem Commun (Camb), 2010. **46**(7): p. 1112-4.
32. Autodesk, *123D Design*. 2016, Autodesk.
33. Choi, E.-Y., et al., *Noncovalent functionalization of graphene with end-functional polymers*. Journal of Materials Chemistry, 2010. **20**(10): p. 1907-1912.
34. Zhang, X., et al., *Graphene nanosheets synthesis via chemical reduction of graphene oxide using sodium acetate trihydrate solution*. Synthetic Metals, 2014. **193**: p. 132-138.
35. Song, P., et al., *Fabrication of exfoliated graphene-based polypropylene nanocomposites with enhanced mechanical and thermal properties*. Polymer, 2011. **52**(18): p. 4001-4010.
36. Tiwari, A., *Innovative Graphene Technologies: Developments & Characterisation*. Vol. 1. 2013: Smithers Information Limited.

37. Mezghani, K. and J.E. Spruiell, *High speed melt spinning of poly(L-lactic acid) filaments*. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 1998. **36**(6): p. 1005-1012.
38. Srithep, Y., et al., *Processing and characterization of recycled poly(ethylene terephthalate) blends with chain extenders, thermoplastic elastomer, and/or poly(butylene adipate-co-terephthalate)*. Polymer Engineering & Science, 2011. **51**(6): p. 1023-1032.
39. Geng, Y., S.J. Wang, and J.K. Kim, *Preparation of graphite nanoplatelets and graphene sheets*. J Colloid Interface Sci, 2009. **336**(2): p. 592-8.
40. Fuente, J.d.L. *electrical properties*. 2016; Available from: <http://www.graphenea.com/pages/graphene-properties#.V3JCVb4pp34>.
41. Ali, F.B. and R. Mohan, *Thermal, mechanical, and rheological properties of biodegradable polybutylene succinate/carbon nanotubes nanocomposites*. Polymer Composites, 2010. **31**(8): p. 1309-1314.
42. สถานสถิต, ค., et al., สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงไฟฟ้าของ LLDPE ที่เติมพอลิพีโรลและคาร์บอนแบล็ก. Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok (วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ), 2012. **21**(2): p. 8.

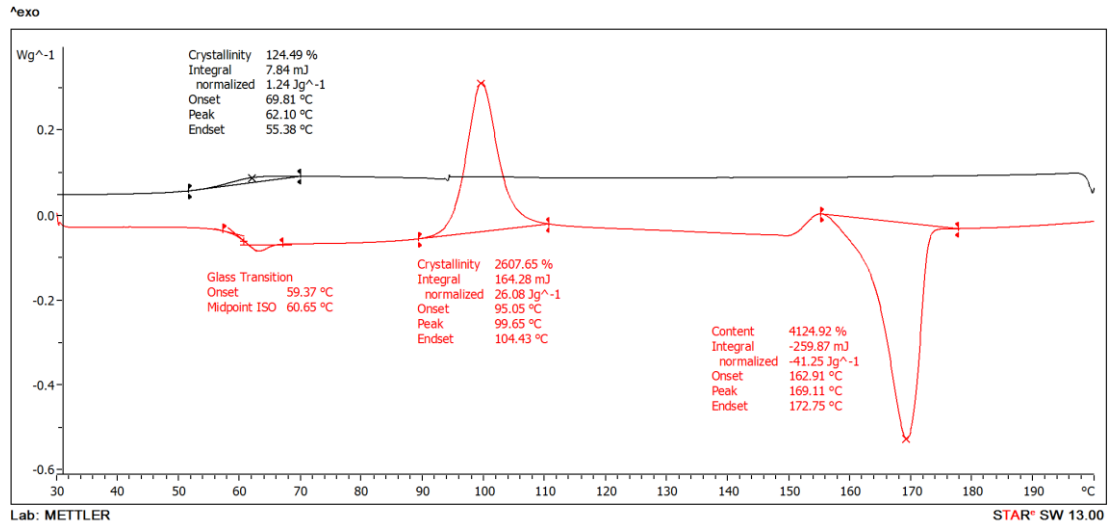


ภาคผนวก ก.

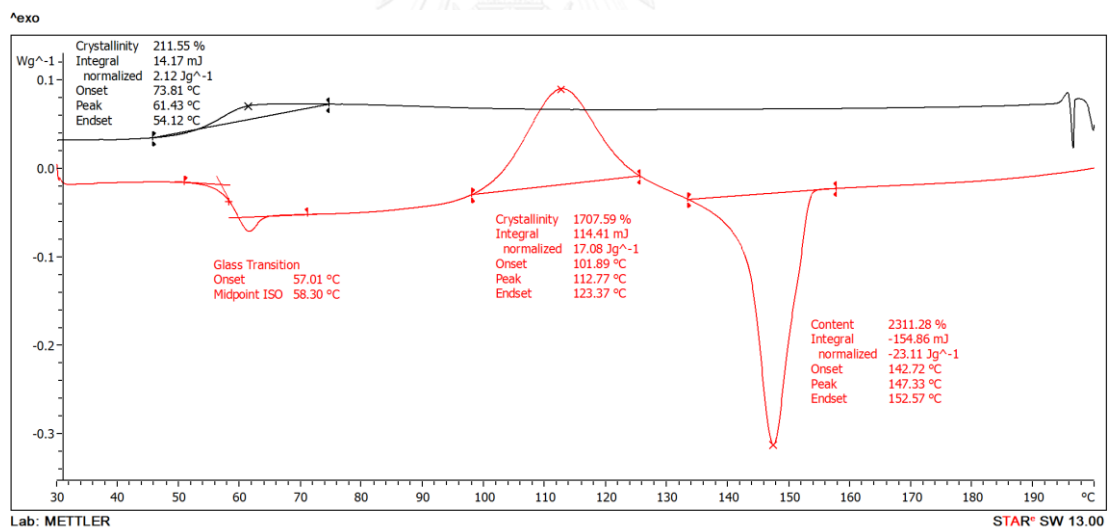
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

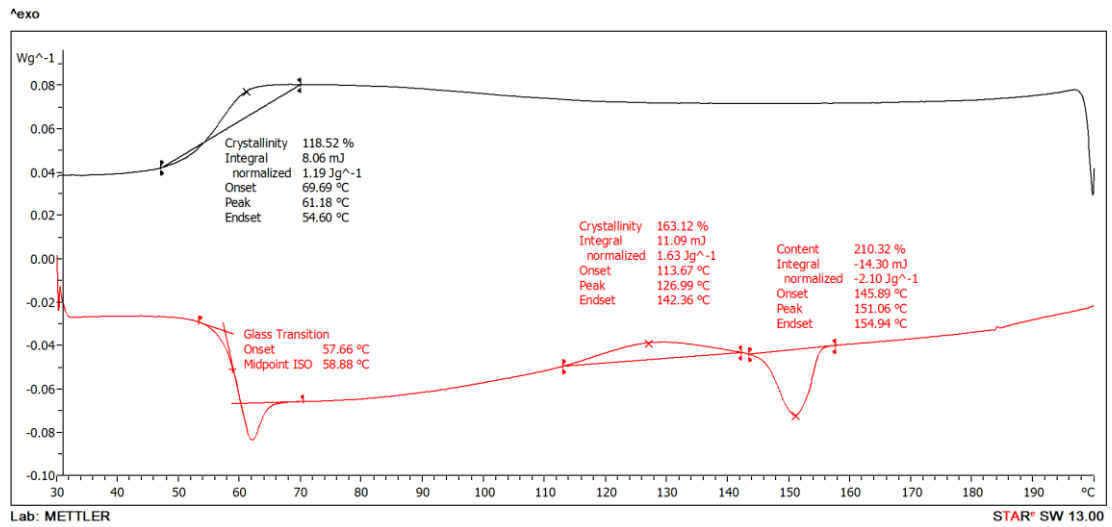
การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี



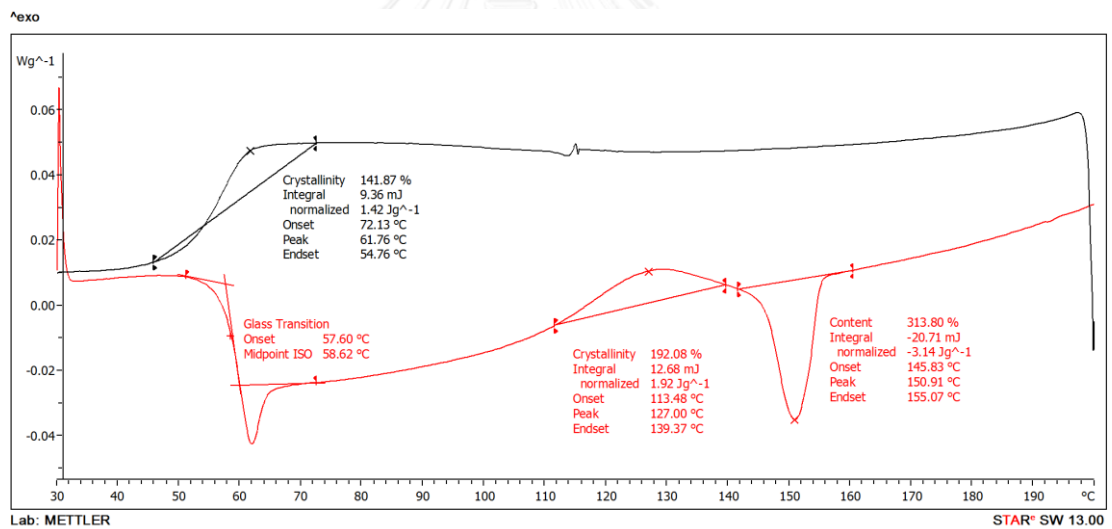
รูปที่ ก.1 เทอร์โมแกรมระหว่างการเย็นตัว และเทอร์โมแกรมระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า



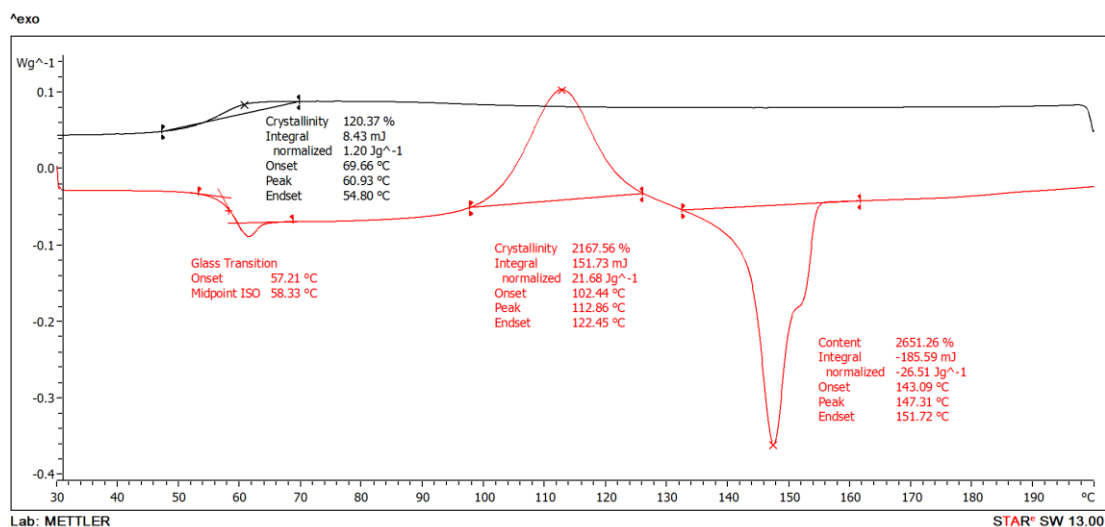
รูปที่ ก.2 เทอร์โมแกรมระหว่างการเย็นตัว และเทอร์โมแกรมระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นพอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติบริสุทธิ์



รูปที่ ก.3 เทอร์โมแกรมระหว่างการเย็นตัว และเทอร์โมแกรมระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมแกรไฟีนที่ 2 phr



รูปที่ ก.4 เทอร์โมแกรมระหว่างการเย็นตัว และเทอร์โมแกรมระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรไฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมแกรไฟีนที่ 4 phr



รูปที่ ก.5 เทอร์โมแกรมระหว่างการเย็นตัว และเทอร์โมแกรมระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมแกรฟีนที่ 8 phr

ตารางที่ ก.1 แสดงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ และพลังงานการหลอมผลึกของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ

	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์	พลังงานหลอมผลึก (จูลต่อกรัม)
PLA (Commercial)	1	23.05
Neat PLA	1	41.45
2 phr GRAPHENE/PLA	0.98	24.69
4 phr GRAPHENE/PLA	0.96	2.27
8 phr GRAPHENE/PLA	0.93	3.23

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณผลึก (X_c) ของเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมแกรฟีนที่ 2 phr

$$\text{จากสมการ} \quad X_c (\%) = (\Delta H_f (\text{PLA}) \times 100) / (\Delta H^\circ (\text{PLA}) \times w)$$

$$\text{โดย} \quad \Delta H_f = \text{เอนทัลปีของพอลิแล็กติกแอซิด}$$

$$\Delta H^\circ = \text{เอนทัลปีของพอลิแล็กติกแอซิดที่เกิดผลึก 100\%}$$

(มีค่าเท่ากับ 93 จูล/กรัม)

$$w = \text{อัตราส่วนของพอลิแล็กติกแอซิดในเส้นวัสดุเชิงประกอบ}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad X_c = (24.69 \times 100) / (93 \times 100/102) = 26.03\%$$



ภาคผนวก ข.
การทดสอบหาดัชนีการหลอมไหล

ตารางที่ ข.1 ดัชนีการหลอมไหลของเส้นสำหรับการพิมพ์สามมิติ

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	PLA (Commercial)	43.25	43.75	42.5	42.75	42.75	43
2	Neat PLA (4043D)	9.75	9	10.5	9.25	9	9.5
3	2phr GRAPHENE/PLA	19.4	20.1	19.3	19.8	19.4	19.6
4	4phr GRAPHENE/PLA	20.35	19.85	20.3	21.3	20.7	20.5
5	8phr GRAPHENE/PLA	21.1	20.85	20.75	20.45	20.85	20.8

การวิเคราะห์ผลการทดสอบหาดัชนีการหลอมไหลของเส้นสำหรับพิมพ์สามมิติด้วยวิธีการทางสถิติ

Oneway

Descriptives

MFI

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1	5	43.0000	.50000	.22361	42.3792	43.6208
2	5	9.5000	.63738	.28504	8.7086	10.2914
3	5	19.6000	.33912	.15166	19.1789	20.0211
4	5	22.5000	4.12810	1.84614	17.3743	27.6257
5	5	20.8000	.23452	.10488	20.5088	21.0912
Total	25	23.0800	11.30230	2.26046	18.4146	27.7454

ANOVA

MFI

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2994.340	4	748.585	209.482	.000
Within Groups	71.470	20	3.574		
Total	3065.810	24			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: MFI

Tukey HSD

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	33.50000*	1.19558	.000	29.9224	37.0776
	3	23.40000*	1.19558	.000	19.8224	26.9776
	4	20.50000*	1.19558	.000	16.9224	24.0776
	5	22.20000*	1.19558	.000	18.6224	25.7776
2	1	-33.50000*	1.19558	.000	-37.0776	-29.9224
	3	-10.10000*	1.19558	.000	-13.6776	-6.5224
	4	-13.00000*	1.19558	.000	-16.5776	-9.4224
	5	-11.30000*	1.19558	.000	-14.8776	-7.7224
3	1	-23.40000*	1.19558	.000	-26.9776	-19.8224
	2	10.10000*	1.19558	.000	6.5224	13.6776
	4	-2.90000	1.19558	.149	-6.4776	.6776
	5	-1.20000	1.19558	.851	-4.7776	2.3776
4	1	-20.50000*	1.19558	.000	-24.0776	-16.9224
	2	13.00000*	1.19558	.000	9.4224	16.5776
	3	2.90000	1.19558	.149	-.6776	6.4776
	5	1.70000	1.19558	.621	-1.8776	5.2776
5	1	-22.20000*	1.19558	.000	-25.7776	-18.6224
	2	11.30000*	1.19558	.000	7.7224	14.8776
	3	1.20000	1.19558	.851	-2.3776	4.7776
	4	-1.70000	1.19558	.621	-5.2776	1.8776

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



ภาคผนวก ค.

ผลของตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปต่อสมบัติเชิงกลของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยเส้นพอลิแล็กติกแอซิด
สำหรับการพิมพ์สามมิติเกรดทางการค้า

สมบัติด้านแรงดึง

ความทนแรงดึงของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ

ตารางที่ ค.1 ค่าความทนแรงดึงของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (MPa)

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	H-45-100	52.72	52.58	53.24	53.07	52.94	52.91
2	V-45-100	48.49	49.21	48.81	48.71	48.92	48.83
3	H-0-100	60.43	60.72	60.39	60.98	60.08	60.52
4	V-0-100	51.29	51.48	51.98	51.89	51.64	51.66
5	H-0-50	8.42	8.48	8.72	8.6	8.24	8.49
6	H-0-20	8.02	8.05	8.1	8.11	8.05	8.07

การวิเคราะห์ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงดึงของขึ้นทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ

Oneway

Descriptives

Tensile strength

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1	5	52.9100	.26476	.11841	52.5813	53.2387
2	5	48.8280	.26593	.11893	48.4978	49.1582
3	5	60.5200	.34286	.15333	60.0943	60.9457
4	5	51.6560	.28501	.12746	51.3021	52.0099
5	5	8.4920	.18199	.08139	8.2660	8.7180
6	5	8.0660	.03782	.01691	8.0190	8.1130
Total	30	38.4120	21.96878	4.01093	30.2087	46.6153

ANOVA

Tensile strength

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	13994.692	5	2798.938	44884.753	.000
Within Groups	1.497	24	.062		
Total	13996.188	29			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Tensile strength

Tukey HSD

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	4.08200*	.15793	.000	3.5937	4.5703
	3	-7.61000*	.15793	.000	-8.0983	-7.1217
	4	1.25400*	.15793	.000	.7657	1.7423
	5	44.41800*	.15793	.000	43.9297	44.9063
	6	44.84400*	.15793	.000	44.3557	45.3323
2	1	-4.08200*	.15793	.000	-4.5703	-3.5937
	3	-11.69200*	.15793	.000	-12.1803	-11.2037
	4	-2.82800*	.15793	.000	-3.3163	-2.3397
	5	40.33600*	.15793	.000	39.8477	40.8243
	6	40.76200*	.15793	.000	40.2737	41.2503
3	1	7.61000*	.15793	.000	7.1217	8.0983
	2	11.69200*	.15793	.000	11.2037	12.1803
	4	8.86400*	.15793	.000	8.3757	9.3523
	5	52.02800*	.15793	.000	51.5397	52.5163
	6	52.45400*	.15793	.000	51.9657	52.9423
4	1	-1.25400*	.15793	.000	-1.7423	-.7657
	2	2.82800*	.15793	.000	2.3397	3.3163
	3	-8.86400*	.15793	.000	-9.3523	-8.3757
	5	43.16400*	.15793	.000	42.6757	43.6523
	6	43.59000*	.15793	.000	43.1017	44.0783
5	1	-44.41800*	.15793	.000	-44.9063	-43.9297
	2	-40.33600*	.15793	.000	-40.8243	-39.8477
	3	-52.02800*	.15793	.000	-52.5163	-51.5397
	4	-43.16400*	.15793	.000	-43.6523	-42.6757
	6	.42600	.15793	.113	-.0623	.9143

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Tensile strength

Tukey HSD

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
6	1	-44.84400*	.15793	.000	-45.3323	-44.3557
	2	-40.76200*	.15793	.000	-41.2503	-40.2737
	3	-52.45400*	.15793	.000	-52.9423	-51.9657
	4	-43.59000*	.15793	.000	-44.0783	-43.1017
	5	-.42600	.15793	.113	-.9143	.0623

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ

ตารางที่ ค.2 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (%)

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	H-45-100	4.08	4.04	4.12	3.9	3.89	4.00
2	V-45-100	2.41	2.68	2.56	2.35	2.24	2.45
3	H-0-100	2.56	2.63	2.72	2.59	2.68	2.64
4	V-0-100	2.63	2.72	2.59	2.69	2.74	2.67
5	H-0-50	1.91	1.93	1.86	1.87	1.84	1.88
6	H-0-20	1.81	1.91	1.84	1.9	1.89	1.87

การวิเคราะห์ผลการทดสอบหาความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ

Oneway

Descriptives

%Elongation at break

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1	5	4.0060	.10526	.04707	3.8753	4.1367
2	5	2.4480	.17370	.07768	2.2323	2.6637
3	5	2.6360	.06504	.02909	2.5552	2.7168
4	5	2.6740	.06269	.02804	2.5962	2.7518
5	5	1.8820	.03701	.01655	1.8360	1.9280
6	5	1.8700	.04301	.01924	1.8166	1.9234
Total	30	2.5860	.73062	.13339	2.3132	2.8588

ANOVA

%Elongation at break

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	15.270	5	3.054	348.162	.000
Within Groups	.211	24	.009		
Total	15.480	29			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: %Elongation at break

Tukey HSD

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	1.55800*	.05923	.000	1.3749	1.7411
	3	1.37000*	.05923	.000	1.1869	1.5531
	4	1.33200*	.05923	.000	1.1489	1.5151
	5	2.12400*	.05923	.000	1.9409	2.3071
	6	2.13600*	.05923	.000	1.9529	2.3191
2	1	-1.55800*	.05923	.000	-1.7411	-1.3749
	3	-.18800*	.05923	.042	-.3711	-.0049
	4	-.22600*	.05923	.010	-.4091	-.0429
	5	.56600*	.05923	.000	.3829	.7491
	6	.57800*	.05923	.000	.3949	.7611
3	1	-1.37000*	.05923	.000	-1.5531	-1.1869
	2	.18800*	.05923	.042	.0049	.3711
	4	-.03800	.05923	.987	-.2211	.1451
	5	.75400*	.05923	.000	.5709	.9371
	6	.76600*	.05923	.000	.5829	.9491
4	1	-1.33200*	.05923	.000	-1.5151	-1.1489
	2	.22600*	.05923	.010	.0429	.4091
	3	.03800	.05923	.987	-.1451	.2211
	5	.79200*	.05923	.000	.6089	.9751
	6	.80400*	.05923	.000	.6209	.9871
5	1	-2.12400*	.05923	.000	-2.3071	-1.9409
	2	-.56600*	.05923	.000	-.7491	-.3829
	3	-.75400*	.05923	.000	-.9371	-.5709
	4	-.79200*	.05923	.000	-.9751	-.6089
	6	.01200	.05923	1.000	-.1711	.1951
6	1	-2.13600*	.05923	.000	-2.3191	-1.9529
	2	-.57800*	.05923	.000	-.7611	-.3949
	3	-.76600*	.05923	.000	-.9491	-.5829
	4	-.80400*	.05923	.000	-.9871	-.6209
	5	-.01200	.05923	1.000	-.1951	.1711

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ยังส์มอดุลัสของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ

ตารางที่ ค.3 ยังส์มอดุลัสของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (MPa)

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	H-45-100	2899.72	2899.82	2900.01	2899.78	2899.97	2899.86
2	V-45-100	2870.12	2869.98	2869.89	2870.07	2869.93	2870.00
3	H-0-100	3132.23	3132.48	3132.21	3132.29	3132.37	3132.32
4	V-0-100	2779.35	2779.38	2779.23	2779.5	2779.27	2779.35
5	H-0-50	516.04	516.03	516	516.08	516.07	516.04
6	H-0-20	526.88	526.96	526.78	526.84	526.89	526.87

การวิเคราะห์ผลการทดสอบหา ยังส์มอดุลัสของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ

Oneway

Descriptives

Young's modulus

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1	5	2899.8600	.12470	.05577	2899.7052	2900.0148
2	5	2869.9980	.09576	.04283	2869.8791	2870.1169
3	5	3132.3160	.11082	.04956	3132.1784	3132.4536
4	5	2779.3460	.10502	.04697	2779.2156	2779.4764
5	5	516.0440	.03209	.01435	516.0042	516.0838
6	5	526.8700	.06633	.02966	526.7876	526.9524
Total	30	2120.7390	1155.26786	210.92209	1689.3549	2552.1231

ANOVA

Young's modulus

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	38704671.106	5	7740934.221	868791719.560	.000
Within Groups	.214	24	.009		
Total	38704671.320	29			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Young's modulus

Tukey HSD

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	29.86200*	.05970	.000	29.6774	30.0466
	3	-232.45600*	.05970	.000	-232.6406	-232.2714
	4	120.51400*	.05970	.000	120.3294	120.6986
	5	2383.81600*	.05970	.000	2383.6314	2384.0006
	6	2372.99000*	.05970	.000	2372.8054	2373.1746
2	1	-29.86200*	.05970	.000	-30.0466	-29.6774
	3	-262.31800*	.05970	.000	-262.5026	-262.1334
	4	90.65200*	.05970	.000	90.4674	90.8366
	5	2353.95400*	.05970	.000	2353.7694	2354.1386
	6	2343.12800*	.05970	.000	2342.9434	2343.3126
3	1	232.45600*	.05970	.000	232.2714	232.6406
	2	262.31800*	.05970	.000	262.1334	262.5026
	4	352.97000*	.05970	.000	352.7854	353.1546
	5	2616.27200*	.05970	.000	2616.0874	2616.4566
	6	2605.44600*	.05970	.000	2605.2614	2605.6306
4	1	-120.51400*	.05970	.000	-120.6986	-120.3294
	2	-90.65200*	.05970	.000	-90.8366	-90.4674
	3	-352.97000*	.05970	.000	-353.1546	-352.7854
	5	2263.30200*	.05970	.000	2263.1174	2263.4866
	6	2252.47600*	.05970	.000	2252.2914	2252.6606
5	1	-2383.81600*	.05970	.000	-2384.0006	-2383.6314
	2	-2353.95400*	.05970	.000	-2354.1386	-2353.7694
	3	-2616.27200*	.05970	.000	-2616.4566	-2616.0874
	4	-2263.30200*	.05970	.000	-2263.4866	-2263.1174
	6	-10.82600*	.05970	.000	-11.0106	-10.6414
6	1	-2372.99000*	.05970	.000	-2373.1746	-2372.8054
	2	-2343.12800*	.05970	.000	-2343.3126	-2342.9434
	3	-2605.44600*	.05970	.000	-2605.6306	-2605.2614
	4	-2252.47600*	.05970	.000	-2252.6606	-2252.2914
	5	10.82600*	.05970	.000	10.6414	11.0106

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง

ตารางที่ ค.4 ค่าความทนแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (MPa)

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	H-45-100	67.73	77.60	76.75	76.60	64.56	72.65
2	V-45-100	57.12	54.55	53.54	62.59	58.40	57.24
3	H-0-100	75.59	73.94	77.71	77.05	76.47	76.15
4	V-0-100	43.02	55.70	55.64	55.34	54.03	52.75

การวิเคราะห์ผลการทดสอบหาความทนแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ

Oneway

Descriptives

Flexural strength

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1	5	72.6480	6.05329	2.70712	65.1318	80.1642
2	5	57.2400	3.56751	1.59544	52.8103	61.6697
3	5	76.1520	1.46148	.65359	74.3373	77.9667
4	5	52.7460	5.47891	2.45024	45.9430	59.5490
Total	20	64.6965	10.97950	2.45509	59.5579	69.8351

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ANOVA

Flexural strength

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1964.343	3	654.781	32.127	.000
Within Groups	326.096	16	20.381		
Total	2290.439	19			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Flexural strength

Tukey HSD

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	15.40800*	2.85524	.000	7.2391	23.5769
	3	-3.50400	2.85524	.619	-11.6729	4.6649
	4	19.90200*	2.85524	.000	11.7331	28.0709
2	1	-15.40800*	2.85524	.000	-23.5769	-7.2391
	3	-18.91200*	2.85524	.000	-27.0809	-10.7431
	4	4.49400	2.85524	.420	-3.6749	12.6629
3	1	3.50400	2.85524	.619	-4.6649	11.6729
	2	18.91200*	2.85524	.000	10.7431	27.0809
	4	23.40600*	2.85524	.000	15.2371	31.5749
4	1	-19.90200*	2.85524	.000	-28.0709	-11.7331
	2	-4.49400	2.85524	.420	-12.6629	3.6749
	3	-23.40600*	2.85524	.000	-31.5749	-15.2371

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



สมบัติด้านความทนแรงกระแทก

ตารางที่ ค.5 ค่าความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (J/m^2)

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	H-45-100	2627.27	2755.05	3340.90	2794.05	2706.39	2844.73
2	V-45-100	1292.62	1995.74	1189.49	1048.83	1730.31	1451.40
3	H-0-100	2679.81	2523.02	3096.33	1612.52	2630.84	2508.50
4	V-0-100	1743.42	1305.41	989.36	762.29	1380.34	1236.16

การวิเคราะห์ผลการทดสอบหาความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ

Oneway

Descriptives

Impact strength

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1	5	2844.7320	284.26328	127.12640	2491.7725	3197.6915
2	5	1451.3980	396.85242	177.47780	958.6406	1944.1554
3	5	2508.5040	546.08820	244.21807	1830.4459	3186.5621
4	5	1236.1640	376.94799	168.57627	768.1212	1704.2068
Total	20	2010.1995	794.55741	177.66844	1638.3352	2382.0638

ANOVA

Impact strength

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	9280709.700	3	3093569.900	18.235	.000
Within Groups	2714398.257	16	169649.891		
Total	11995107.956	19			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Impact strength

Tukey HSD

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	1393.33400*	260.49944	.000	648.0399	2138.6281
	3	336.22800	260.49944	.582	-409.0661	1081.5221
	4	1608.56800*	260.49944	.000	863.2739	2353.8621
2	1	-1393.33400*	260.49944	.000	-2138.6281	-648.0399
	3	-1057.10600*	260.49944	.005	-1802.4001	-311.8119
	4	215.23400	260.49944	.841	-530.0601	960.5281
3	1	-336.22800	260.49944	.582	-1081.5221	409.0661
	2	1057.10600*	260.49944	.005	311.8119	1802.4001
	4	1272.34000*	260.49944	.001	527.0459	2017.6341
4	1	-1608.56800*	260.49944	.000	-2353.8621	-863.2739
	2	-215.23400	260.49944	.841	-960.5281	530.0601
	3	-1272.34000*	260.49944	.001	-2017.6341	-527.0459

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.





ภาคผนวก ง.

สมบัติของชั้นทดสอบวัสดุเชิงประกอบของพอลิแล็กติกแอซิด/แกรฟีนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติ

สมบัติด้านแรงดึง

ความทนแรงดึงของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ

ตารางที่ ง.1 ค่าความทนแรงดึงของชั้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (MPa)

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	PLA (Commercial)	51.80	50.27	50.20	50.63	52.80	51.14
2	Neat PLA (4043D)	33.47	33.78	31.23	33.08	32.81	32.87
3	2phr GRAPHENE/PLA	28.92	30.29	27.90	26.48	29.11	28.54
4	4phr GRAPHENE/PLA	24.91	22.53	22.54	22.63	23.89	23.30
5	8phr GRAPHENE/PLA	21.40	20.15	22.22	21.25	20.53	21.11

การวิเคราะห์ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงดึงของชั้นทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ

Oneway**Descriptives**

Tensile strength

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1	5	51.1400	1.12825	.50457	49.7391	52.5409
2	5	32.8740	.99062	.44302	31.6440	34.1040
3	5	28.5400	1.43047	.63973	26.7638	30.3162
4	5	23.3000	1.06766	.47747	21.9743	24.6257
5	5	21.1100	.80526	.36012	20.1101	22.1099
Total	25	31.3928	10.95811	2.19162	26.8695	35.9161

ANOVA

Tensile strength

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2857.569	4	714.392	586.637	.000
Within Groups	24.356	20	1.218		
Total	2881.924	24			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Tensile strength

Tukey HSD

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	18.26600*	.69793	.000	16.1775	20.3545
	3	22.60000*	.69793	.000	20.5115	24.6885
	4	27.84000*	.69793	.000	25.7515	29.9285
	5	30.03000*	.69793	.000	27.9415	32.1185
2	1	-18.26600*	.69793	.000	-20.3545	-16.1775
	3	4.33400*	.69793	.000	2.2455	6.4225
	4	9.57400*	.69793	.000	7.4855	11.6625
	5	11.76400*	.69793	.000	9.6755	13.8525
3	1	-22.60000*	.69793	.000	-24.6885	-20.5115
	2	-4.33400*	.69793	.000	-6.4225	-2.2455
	4	5.24000*	.69793	.000	3.1515	7.3285
	5	7.43000*	.69793	.000	5.3415	9.5185
4	1	-27.84000*	.69793	.000	-29.9285	-25.7515
	2	-9.57400*	.69793	.000	-11.6625	-7.4855
	3	-5.24000*	.69793	.000	-7.3285	-3.1515
	5	2.19000*	.69793	.037	.1015	4.2785
5	1	-30.03000*	.69793	.000	-32.1185	-27.9415
	2	-11.76400*	.69793	.000	-13.8525	-9.6755
	3	-7.43000*	.69793	.000	-9.5185	-5.3415
	4	-2.19000*	.69793	.037	-4.2785	-.1015

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ

ตารางที่ ง.2 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (%)

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	PLA (Commercial)	15.00	17.00	15.84	16.20	15.52	15.91
2	Neat PLA (4043D)	14.40	13.79	14.80	13.44	15.72	14.43
3	2phr GRAPHENE/PLA	6.20	8.08	7.64	6.92	7.46	7.26
4	4phr GRAPHENE/PLA	6.32	8.28	7.30	6.83	6.11	6.97
5	8phr GRAPHENE/PLA	6.72	6.01	6.53	6.65	6.88	6.56

การวิเคราะห์ผลการทดสอบหาความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ

Oneway

Descriptives

%Elongation at break

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1	5	15.9120	.75121	.33595	14.9792	16.8448
2	5	14.4680	.96316	.43074	13.2721	15.6639
3	5	10.4140	4.33539	1.93884	5.0309	15.7971
4	5	7.2480	.72092	.32240	6.3529	8.1431
5	5	6.7860	.43627	.19511	6.2443	7.3277
Total	25	10.9656	4.21124	.84225	9.2273	12.7039

ANOVA

%Elongation at break

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	341.638	4	85.409	20.338	.000
Within Groups	83.990	20	4.200		
Total	425.628	24			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: %Elongation at break

Tukey HSD

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	1.44400	1.29607	.797	-2.4343	5.3223
	3	5.49800*	1.29607	.003	1.6197	9.3763
	4	8.66400*	1.29607	.000	4.7857	12.5423
	5	9.12600*	1.29607	.000	5.2477	13.0043
2	1	-1.44400	1.29607	.797	-5.3223	2.4343
	3	4.05400*	1.29607	.038	.1757	7.9323
	4	7.22000*	1.29607	.000	3.3417	11.0983
	5	7.68200*	1.29607	.000	3.8037	11.5603
3	1	-5.49800*	1.29607	.003	-9.3763	-1.6197
	2	-4.05400*	1.29607	.038	-7.9323	-.1757
	4	3.16600	1.29607	.145	-.7123	7.0443
	5	3.62800	1.29607	.074	-.2503	7.5063
4	1	-8.66400*	1.29607	.000	-12.5423	-4.7857
	2	-7.22000*	1.29607	.000	-11.0983	-3.3417
	3	-3.16600	1.29607	.145	-7.0443	.7123
	5	.46200	1.29607	.996	-3.4163	4.3403
5	1	-9.12600*	1.29607	.000	-13.0043	-5.2477
	2	-7.68200*	1.29607	.000	-11.5603	-3.8037
	3	-3.62800	1.29607	.074	-7.5063	.2503
	4	-.46200	1.29607	.996	-4.3403	3.4163

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ยังส์มอดุลัสของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ

ตารางที่ ง.3 ยังส์มอดุลัสของขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (MPa)

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	PLA (Commercial)	2424.00	2923.70	2095.60	2689.10	2816.10	2589.70
2	Neat PLA (4043D)	1817.90	1977.30	1698.00	2070.70	1644.70	1841.72
3	2phr GRAPHENE/PLA	2338.40	1869.30	2103.85	2017.20	1963.40	2058.43
4	4phr GRAPHENE/PLA	2614.70	1658.50	1836.60	1759.80	1817.40	1937.40
5	8phr GRAPHENE/PLA	2321.00	1692.08	2056.54	1837.40	1735.26	1928.46

การวิเคราะห์ผลการทดสอบหา ยังส์มอดุลัสของขึ้นทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ

Oneway

Descriptives

Young's modulus

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1	5	2589.7000	333.27339	149.04439	2175.8864	3003.5136
2	5	1841.7200	180.86838	80.88680	1617.1422	2066.2978
3	5	2058.4300	178.14808	79.67024	1837.2299	2279.6301
4	5	1937.4000	384.91002	172.13699	1459.4711	2415.3289
5	5	1928.4560	260.76129	116.61600	1604.6781	2252.2339
Total	25	2071.1412	374.52287	74.90457	1916.5458	2225.7366

ANOVA

Young's modulus

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1799723.328	4	449930.832	5.744	.003
Within Groups	1566693.762	20	78334.688		
Total	3366417.090	24			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Young's modulus

Tukey HSD

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	747.98000*	177.01377	.003	218.2885	1277.6715
	3	531.27000*	177.01377	.049	1.5785	1060.9615
	4	652.30000*	177.01377	.011	122.6085	1181.9915
	5	661.24400*	177.01377	.010	131.5525	1190.9355
2	1	-747.98000*	177.01377	.003	-1277.6715	-218.2885
	3	-216.71000	177.01377	.738	-746.4015	312.9815
	4	-95.68000	177.01377	.982	-625.3715	434.0115
	5	-86.73600	177.01377	.987	-616.4275	442.9555
3	1	-531.27000*	177.01377	.049	-1060.9615	-1.5785
	2	216.71000	177.01377	.738	-312.9815	746.4015
	4	121.03000	177.01377	.958	-408.6615	650.7215
	5	129.97400	177.01377	.946	-399.7175	659.6655
4	1	-652.30000*	177.01377	.011	-1181.9915	-122.6085
	2	95.68000	177.01377	.982	-434.0115	625.3715
	3	-121.03000	177.01377	.958	-650.7215	408.6615
	5	8.94400	177.01377	1.000	-520.7475	538.6355
5	1	-661.24400*	177.01377	.010	-1190.9355	-131.5525
	2	86.73600	177.01377	.987	-442.9555	616.4275
	3	-129.97400	177.01377	.946	-659.6655	399.7175
	4	-8.94400	177.01377	1.000	-538.6355	520.7475

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

สมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง

ตารางที่ ง.4 ค่าความทนแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (MPa)

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	PLA (Commercial)	67.73	77.6	76.75	76.60	64.56	72.65
2	Neat PLA (4043D)	51.53	58.62	58.43	60.11	54.32	56.60
3	2phr GRAPHENE/PLA	85.52	72.27	75.75	80.21	70.50	76.85
4	4phr GRAPHENE/PLA	55.84	41.88	45.51	50.16	44.21	47.52
5	8phr GRAPHENE/PLA	48.56	36.31	45.12	38.48	40.57	41.81

การวิเคราะห์ผลการทดสอบหาความทนแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ

Oneway

Descriptives

Flexural strength

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1	5	72.6480	6.05329	2.70712	65.1318	80.1642
2	5	56.6020	3.55853	1.59143	52.1835	61.0205
3	5	76.8500	6.10261	2.72917	69.2726	84.4274
4	5	47.5200	5.54522	2.47990	40.6347	54.4053
5	5	41.8080	4.98485	2.22929	35.6185	47.9975
Total	25	59.0856	14.80200	2.96040	52.9756	65.1956

ANOVA

Flexural strength

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4689.797	4	1172.449	41.241	.000
Within Groups	568.582	20	28.429		
Total	5258.380	24			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Flexural strength

Tukey HSD

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	16.04600*	3.37219	.001	5.9552	26.1368
	3	-4.20200	3.37219	.725	-14.2928	5.8888
	4	25.12800*	3.37219	.000	15.0372	35.2188
	5	30.84000*	3.37219	.000	20.7492	40.9308
2	1	-16.04600*	3.37219	.001	-26.1368	-5.9552
	3	-20.24800*	3.37219	.000	-30.3388	-10.1572
	4	9.08200	3.37219	.091	-1.0088	19.1728
	5	14.79400*	3.37219	.002	4.7032	24.8848
3	1	4.20200	3.37219	.725	-5.8888	14.2928
	2	20.24800*	3.37219	.000	10.1572	30.3388
	4	29.33000*	3.37219	.000	19.2392	39.4208
	5	35.04200*	3.37219	.000	24.9512	45.1328
4	1	-25.12800*	3.37219	.000	-35.2188	-15.0372
	2	-9.08200	3.37219	.091	-19.1728	1.0088
	3	-29.33000*	3.37219	.000	-39.4208	-19.2392
	5	5.71200	3.37219	.460	-4.3788	15.8028
5	1	-30.84000*	3.37219	.000	-40.9308	-20.7492
	2	-14.79400*	3.37219	.002	-24.8848	-4.7032
	3	-35.04200*	3.37219	.000	-45.1328	-24.9512
	4	-5.71200	3.37219	.460	-15.8028	4.3788

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

สมบัติด้านความทนแรงกระแทก

ตารางที่ ๓.5 ค่าความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการสามมิติ (J/m²)

ลำดับ	ตัวอย่าง	ครั้งที่ทำการทดสอบ					ค่าเฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
1	PLA (Commercial)	2902.67	2762.80	2853.40	2868.39	2762.23	2829.90
2	Neat PLA (4043D)	2745.19	2501.20	2654.59	2767.49	2702.41	2674.18
3	2phr GRAPHENE/PLA	1660.71	1928.81	1745.3	1850.20	1740.40	1785.08
4	4phr GRAPHENE/PLA	1937.71	1822.48	1705.98	1669.40	1525.20	1732.15
5	8phr GRAPHENE/PLA	1560.00	1263.69	1472.30	1529.10	1294.00	1423.82

การวิเคราะห์ผลการทดสอบหาความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ

Oneway

Descriptives

Impact strength

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Bound	Upper Bound
1	5	2829.8980	64.05240	28.64511	2750.3664	2909.4296
2	5	2674.1760	105.89140	47.35608	2542.6945	2805.6575
3	5	1785.0840	104.81600	46.87514	1654.9377	1915.2303
4	5	1732.1540	156.41704	69.95182	1537.9366	1926.3714
5	5	1423.8180	136.44965	61.02214	1254.3934	1593.2426
Total	25	2089.0260	578.97924	115.79585	1850.0351	2328.0169

ANOVA

Impact strength

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7767659.449	4	1941914.862	139.934	.000
Within Groups	277547.561	20	13877.378		
Total	8045207.011	24			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Impact strength

Tukey HSD

(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1	2	155.72200	74.50471	.263	-67.2240	378.6680
	3	1044.81400*	74.50471	.000	821.8680	1267.7600
	4	1097.74400*	74.50471	.000	874.7980	1320.6900
	5	1406.08000*	74.50471	.000	1183.1340	1629.0260
2	1	-155.72200	74.50471	.263	-378.6680	67.2240
	3	889.09200*	74.50471	.000	666.1460	1112.0380
	4	942.02200*	74.50471	.000	719.0760	1164.9680
	5	1250.35800*	74.50471	.000	1027.4120	1473.3040
3	1	-1044.81400*	74.50471	.000	-1267.7600	-821.8680
	2	-889.09200*	74.50471	.000	-1112.0380	-666.1460
	4	52.93000	74.50471	.952	-170.0160	275.8760
	5	361.26600*	74.50471	.001	138.3200	584.2120
4	1	-1097.74400*	74.50471	.000	-1320.6900	-874.7980
	2	-942.02200*	74.50471	.000	-1164.9680	-719.0760
	3	-52.93000	74.50471	.952	-275.8760	170.0160
	5	308.33600*	74.50471	.004	85.3900	531.2820
5	1	-1406.08000*	74.50471	.000	-1629.0260	-1183.1340
	2	-1250.35800*	74.50471	.000	-1473.3040	-1027.4120
	3	-361.26600*	74.50471	.001	-584.2120	-138.3200
	4	-308.33600*	74.50471	.004	-531.2820	-85.3900

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



ภาคผนวก จ.
ผลการทดสอบการนำไฟฟ้า

ตารางที่ จ.1 ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่ความต่างศักย์ 10 โวลต์

ระยะห่างระหว่างขั้วทดสอบ (cm)	ค่ากระแสไฟฟ้า ($\times 10^{-9}$ A)				
	1	2	3	4	5
PLA (Commercial)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Neat PLA	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2 phr GRAPHENE/PLA	4.69	4.40	4.31	3.98	3.65
4 phr GRAPHENE/PLA	5.24	5.15	5.05	4.95	4.8
8 phr GRAPHENE/PLA	5.62	5.56	5.46	5.41	5.3

ตัวอย่างการคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistance, R) บริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบ จากเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมแกรฟีนที่ 2 phr

จากสมการ $R = V/I$

โดยที่ $V =$ ค่าความต่างศักย์ หน่วย โวลต์

$I =$ ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ หน่วย แอมป์

ดังนั้น $R = 10/(3.65 \times 10^{-9}) = 2.74 \times 10^9$ โอห์ม

ตารางที่ จ.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบ

ระยะห่างของขั้วทดสอบ (cm)	ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Ω)				
	1	2	3	4	5
PLA (Commercial)	1.00×10^{12}	1.00×10^{12}	1.00×10^{12}	1.00×10^{12}	1.00×10^{12}
Neat PLA	1.00×10^{12}	1.00×10^{12}	1.00×10^{12}	1.00×10^{12}	1.00×10^{12}
2 phr GRAPHENE/PLA	2.13×10^9	2.27×10^9	2.32×10^9	2.51×10^9	2.74×10^9
4 phr GRAPHENE/PLA	1.91×10^9	1.94×10^9	1.98×10^9	2.02×10^9	2.08×10^9
8 phr GRAPHENE/PLA	1.78×10^9	1.80×10^9	1.83×10^9	1.85×10^9	1.89×10^9

ตารางที่ จ.3 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของชั้นทดสอบ

ระยะห่างของขั้วทดสอบ (cm)	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (S/m)				
	1	2	3	4	5
PLA (Commercial)	1.60×10^{-11}	3.20×10^{-11}	4.80×10^{-11}	6.40×10^{-11}	8.00×10^{-11}
Neat PLA	1.60×10^{-11}	3.20×10^{-11}	4.80×10^{-11}	6.40×10^{-11}	8.00×10^{-11}
2 phr GRAPHENE/PLA	5.84×10^{-09}	1.17×10^{-8}	1.75×10^{-8}	2.34×10^{-8}	2.92×10^{-8}
4 phr GRAPHENE/PLA	7.68×10^{-09}	1.54×10^{-8}	2.30×10^{-8}	3.07×10^{-8}	3.84×10^{-8}
8 phr GRAPHENE/PLA	8.48×10^{-09}	1.70×10^{-8}	2.54×10^{-8}	3.39×10^{-8}	4.24×10^{-8}

ตัวอย่างการคำนวณค่าสภาพการนำไฟฟ้า (conductivity, σ) บริเวณพื้นผิวของชั้นทดสอบ จากเส้นวัสดุเชิงประกอบของแกรฟีน/พอลิแล็กติกแอซิดสำหรับการพิมพ์สามมิติ ที่มีสัดส่วนการเติมแกรฟีนที่ 2 phr ที่ระยะ 5 เซนติเมตร

จากสมการ $\sigma = l/RA$

โดยที่ $l =$ ระยะห่างระหว่างปลายขั้วไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เมตร

$A =$ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นทองแดง มีหน่วยเป็น ตารางเมตร
โดยที่มีค่าคงที่เท่ากับ 6.25×10^{-4} ตารางเมตร

ดังนั้น Conductivity = $(5 \times 10^{-2}) / (2.74 \times 10^{-9} \times 6.25 \times 10^{-4}) = 2.92 \times 10^{-8}$ ซีเมนต์/เมตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อภิวัฒน์ พงศ์วิสุทธิรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ แขนงพอลิเมอร์ และสิ่งทอ จากภาควิชา วัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 หลังจากนั้นจึงเข้า ศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์ และ เทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558

ผลงานจากการนาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกนำเสนอในการประชุม ดังนี้

1. 2017 Asian Conference on Engineering and Natural Sciences ณ เมืองซัปโปะโระ จังหวัดฮกไกโด ประเทศญี่ปุ่น ในหัวข้อ Development of Graphene and Graphene Oxide Bioplastic Composites for Novel Applications