



โครงการ  
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ วัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ

Graphene/poly(methyl methacrylate) composites forming by 3Dprinting

ชื่อนิสิต	นายคุณวุฒิ นราพล	เลขประจำตัว	5933208023
	นางสาวนันท์ชพร จิรวัดนาภรณ์	เลขประจำตัว	5933234223

ภาควิชา วัสดุศาสตร์  
แขนงวัสดุศาสตร์และสิ่งทอ

ปีการศึกษา 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

วัสดุเชิงประกอบแกรไฟีนพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ

Graphene/poly(methyl methacrylate) composites forming by 3D printing

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์

โดย

1. นายคุณวุฒิ นราพล เลขประจำตัว 5933208023
2. นางสาวนันท์ชพร จิรวัดนาภรณ์ เลขประจำตัว 5933234223

อนุมัติโดย



.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ปีการศึกษา 2562

หัวข้องานวิจัย	วัสดุเชิงประกอบแกรไฟน์/พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ		
ชื่อผู้วิจัย	นายคุณวุฒิ นราพล	เลขประจำตัว	5933208023
	นางสาวนันท์ชพร จิรวัดนาภรณ์	เลขประจำตัว	5933234223
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช		
ปีการศึกษา	2562		

### บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติเป็นเทคโนโลยีการขึ้นรูปวัสดุที่ได้รับความนิยมสูงอย่างมาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนแบบได้ไม่จำกัด รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การสร้างต้นแบบรวดเร็ว (rapid prototyping) พอลิเมทิลเมทาคริเลต หรือ อะคริลิก เป็นพอลิเมอร์ที่มีจุดเด่นในการนำมาใช้งานคือ มีความโปร่งใสคล้ายกระจก น้ำหนักเบา ทนแรงดูดซึด รวมทั้งสามารถขึ้นรูปได้ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ แต่มีข้อด้อยคือ มีความแข็งแรงเชิงกลต่ำ ไม่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า และมีการหดตัวค่อนข้างสูง ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน แกรไฟน์เป็นลักษณะรูปแบบหนึ่งของคาร์บอน มีสมบัติเด่นคือมีความแข็งแรงกว่าเหล็กกล้าที่มีความหนาที่เท่ากันถึงหนึ่งร้อยเท่า เป็นวัสดุที่เกือบโปร่งใส มีน้ำหนักเบา เป็นตัวนำความร้อนและเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ นิยมใช้เป็นตัวเสริมแรง (reinforcement filler) ในพลาสติกเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะสมบัติเชิงไฟฟ้าและความแข็งแรงของวัสดุงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพอลิเมทิลเมทาคริเลตร่วมกับแกรไฟน์ เพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบที่มีความแข็งแรงและสามารถนำไฟฟ้าได้ รวมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยอนุภาคแกรไฟน์ด้วยเทคนิคการพิมพ์สามมิติระบบเรซิน

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยอนุภาคแกรไฟน์เริ่มจากการเตรียมแกรไฟน์จากวิธีดัดแปรของฮัมเมอร์ และวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีแกรไฟน์ที่ได้โดยเทคนิคฟูเรียร์ แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน จากนั้นผสมแกรไฟน์ที่เตรียมขึ้นกับเรซินพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยมีอัตราส่วนแกรไฟน์ต่อเรซินพอลิเมทิลเมทาคริเลต 0.0 phr, 0.1 phr, 0.5 phr และ 1.0 phr ตามลำดับ แล้วขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติชนิดอ่างเรซิน วัดขนาดของชิ้นงานที่พิมพ์ได้จริงเปรียบเทียบกับขนาดของชิ้นงานที่ออกแบบไว้ เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำในการพิมพ์ชิ้นงานด้วยวัสดุเชิงประกอบ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของแกรไฟน์ต่อสมบัติความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้ง ความทนแรงกระแทก รวมทั้งเสถียรภาพทางความร้อน สมบัติการนำไฟฟ้าและสัญญาณวิทยาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการพิมพ์สามมิติ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเชิงประกอบพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เสริมแรงด้วยอนุภาคแกรไฟน์มาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องป้องกันไม่ให้เกิดไฟฟ้าสถิตในขณะใช้งาน

(งานวิจัยยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากสถานการณ์การระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 ห้ามนำไปอ้างอิง)

<b>Research title</b>	Graphene/poly(methyl methacrylate) composites forming by 3Dprinting		
<b>Researcher</b>	Kulnawoot Narapon	Student ID 5933208023	
	Nantachporn Jirawatanaporn	Student ID 5933234223	
<b>Department</b>	Materials Science		
<b>Advisor</b>	Professor Pranut Potiyaraj, Ph.D.		
<b>Academic Years</b>	2019		

---

### Abstract

The purposes of this study were (1) to develop PMMA with graphene composite materials for 3D printing application; (2) to investigate the properties of PMMA/graphene composite specimens preparing from the 3D printing technique and (3) to investigate the feasibility for the formulation of PMMA composite materials reinforced with graphene particles using resin 3D printing techniques. First, the preparation of graphene from graphite powder in a modified Hummer's method. Second, the graphene was mixed with PMMA 3D print resin by ultrasonicate. The graphene/PMMA composites were prepared in 4 proportions 0.0 phr, 0.1 phr, 0.5 phr and 1.0 phr. Third, the formulation of specimens by resin 3D printer and the measuring specimens compare with the 3D model to analyze the dimension accuracy. In addition, mechanical properties, electrical properties and morphology of the specimens from the developing composite material by 3D printing were studied. The effect of the graphene content in the composites was also investigated.

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานโครงการการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนเพื่อเสริมสร้างทักษะ และประสบการณ์ ซึ่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุน ความอนุเคราะห์ และความช่วยเหลือทั้งด้านการดำเนินงาน เงินทุนสนับสนุน และข้อมูลทางด้านวิชาการจากคณาจารย์ ตลอดทั้งทุก ๆ ท่านและหน่วยงานต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่กรุณามอบคำแนะนำ คำปรึกษา และความช่วยเหลือตลอดการศึกษาวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ชวนชม อ่วมเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ที่ช่วยดำเนินการอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติการพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ตลอดจนถึงตอนการปฏิบัติการต่าง ๆ จนบรรลุลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ นายอภิวัฒน์ พงศ์วิสุทธิรักษ์ และ นาย กิตตินนท์ สกกุลโกศทรัพย์ รุ่นพี่นิสิตนักศึกษาที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและกำลังใจระหว่างการทำทดลอง อีกทั้งยังแบ่งปันประสบการณ์การทำการวิจัยและสอนการใช้งานเครื่องมือต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจนเพื่อนนิสิตนักศึกษาที่ช่วยสนับสนุนและช่วยเหลือเป็นอย่างดี ตลอดจนส่งเสริมและให้กำลังใจให้คณะผู้จัดทำเป็นอย่างดี ทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัย

นางสาวนันท์ชพร จิรวัดนาภรณ์

นายคุณวุฒิ นราพล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 มูลเหตุจูงใจ และ ที่มาของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย .....	2
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์ .....	3
2.1 การพิมพ์สามมิติ (3D Printing).....	3
2.2 แกรฟีน(Graphene) .....	5
2.3 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (poly(methyl methacrylate), PMMA).....	9
2.4 วัสดุเชิงประกอบ (composite materials).....	10
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
บทที่ 3 วิธีการทดลอง .....	17
3.1 สารเคมีที่เกี่ยวข้อง .....	17
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม และขึ้นรูป.....	17
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติ .....	17
3.4 แผนภูมิข้อมูลการทดลอง .....	18
3.5 ขั้นตอนการทดลอง.....	19
3.5.1 การเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) จากแกรไฟต์ .....	19
3.5.2 การเตรียมแกรฟีน (Graphene) จากแกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) .....	19
3.5.3 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิเมทิลเมทาคริเลต/แกรฟีน .....	19
3.5.4 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ.....	20
3.6 การวิเคราะห์ และทดสอบชิ้นงาน .....	20
3.6.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometry, FT-IR).....	20

3.6.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน(X-ray diffractometer, XRD) .....	21
3.6.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	21
3.6.4 การทดสอบสมบัติด้านการพิมพ์ (Accuracy Test).....	23
3.6.5 การตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology).....	24
3.6.6 การศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity).....	25
3.7 แผนการดำเนินงาน .....	26
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	27
4.1 การสังเคราะห์แกรไฟีน และสมบัติของแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรไฟีน .....	27
4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี .....	27
4.2 สมบัติด้านการพิมพ์.....	28
4.2.1 การทดลองการพิมพ์สามมิติระบบ SLA.....	28
4.2.2 การทดลองการพิมพ์สามมิติระบบฉายแสงดิจิทัลด้วยจอโปรเจคเตอร์สู่สภาพเรซิน (Digital Light Processing, DLP).....	30
4.2.3 การทดลองการพิมพ์สามมิติระบบฉายแสงดิจิทัลด้วยจอโปรเจคเตอร์สู่สภาพเรซิน โดยใช้เรซินผสมแกรไฟีน .....	38
บทที่ 5 สรุปงานวิจัย และ ข้อเสนอแนะ .....	51
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก .....	54

## สารบัญรูปรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2. 1 เครื่องพิมพ์สามมิติชนิดอ่างเรซิน (ก) เครื่องพิมพ์สามมิติระบบ SLA รุ่น FORM2 ยี่ห้อ FORMLAB (ข) เครื่องพิมพ์สามมิติ ระบบ DLP รุ่น ELEGOO ยี่ห้อ MARS .....	5
รูปที่ 2. 2 ภาพจำลองความแข็งแรงของแกรฟีนที่สามารถรองรับน้ำหนักผ่านพื้นที่เล็ก ๆ ได้ (ซ้าย) และความเชื่อมโยงเชิงโครงสร้างของอัญรูปต่าง ๆ ของคาร์บอนผ่านโครงสร้าง 2 มิติของแกรฟีน (ขวา) <sup>[4]</sup> .....	6
รูปที่ 2. 3 แผนภาพจำลองการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยเทคนิค CVD และขั้นตอนการเคลื่อนย้ายแกรฟีนที่สังเคราะห์ได้ <sup>[4]</sup> .....	7
รูปที่ 2. 4 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชัน <sup>[4]</sup> .....	8
รูปที่ 2. 5 การนำแกรฟีนไปใช้ในส่วนประกอบของ OLEDs <sup>[4]</sup> .....	8
รูปที่ 2. 6 ภาพแสดงผลที่มีสมบัติการโค้งงอจากแกรฟีน <sup>[4]</sup> .....	9
รูปที่ 2. 7 โครงสร้างพอลิเมทิลเมทาคริเลต <sup>[15]</sup> .....	10
รูปที่ 2. 8 การเตรียมแกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีของฮัมเมอร์ วิธีฮัมเมอร์ดัดแปลง และวิธีฮัมเมอร์ปรับปรุง <sup>[8]</sup> .....	12
รูปที่ 2. 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tg และความสามารถในการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนกับปริมาณของ GO ในคอมพอสิต <sup>[10]</sup> .....	12
รูปที่ 2. 10 กราฟ STRESS-STRAIN CURVE ของGO/PMMA ที่อัตราส่วนต่างๆเทียบ PMMA บริสุทธิ์ <sup>[11]</sup> .....	13
รูปที่ 2. 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า มอดุลัส (MPa) กับ อุณหภูมิ (C) ของ NEAT PMMA PMMA/GRAPHENE NANOCOMPOSITE จากกระบวนการ TGA (THERMAL GRAVITY ANALYSIS) <sup>[12]</sup> .....	14
รูปที่ 2. 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (MPa) กับ ความเค้น (%) ของ PMMA GO และ GPMMA <sup>[13]</sup> .....	15
รูปที่ 2. 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักที่หายไปกับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ของ PMMA GO และ GPMMA จากกระบวนการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (TGA) <sup>[13]</sup> .....	15
รูปที่ 2. 14 วัดชิ้นงานหลังพิมพ์ทันทีเทียบกับกับชิ้นงานที่คงรูปอย่างสมบูรณ์โดยใช้เวอร์เนีย <sup>[14]</sup> .....	16
รูปที่ 3. 1 แผนผังการดำเนินการวิจัย .....	18
รูปที่ 3. 2 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) รุ่น NICOLET 6700 .....	21
รูปที่ 3. 3 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) รุ่น D8 ADVANCE .....	21
รูปที่ 3. 4 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบในรูปดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D638-14 TYPE V <sup>[1]</sup> .....	22
รูปที่ 3. 5 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล .....	22
รูปที่ 3. 6 ตัวอย่างชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-10 <sup>[1]</sup> .....	22
รูปที่ 3. 7 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-10 [REF] [REF].....	23



รูปที่ 3. 8 เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก รุ่น GT-7045-MDH .....	23
รูปที่ 3. 9 ตำแหน่งการวัดขนาดชิ้นงานดัมเบลที่เตรียมได้จากการพิมพ์สามมิติ.....	24
รูปที่ 3. 10 ตำแหน่งการวัดขนาดชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่เตรียมได้จากการพิมพ์สามมิติ .....	24
รูปที่ 3. 11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น SU3500 .....	25
รูปที่ 3. 12 เครื่องทดสอบไฟฟ้า (HIGH RESISTANCE METER) รุ่น 4339B .....	25
รูปที่ 4. 1 อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และแกรฟีน จากการสังเคราะห์ครั้งที่ 1 .....	28
รูปที่ 4. 2 ชิ้นงานดัมเบล โดยเครื่อง Form2 ระบบ SLA.....	28
รูปที่ 4. 3 ตำแหน่งการวัดขนาดชิ้นงานดัมเบลที่เตรียมได้จากการพิมพ์สามมิติ.....	29
รูปที่ 4. 4 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก โดยเครื่องForm2 ระบบ SLA .....	29
รูปที่ 4. 5 ตำแหน่งการวัดขนาดชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่เตรียมได้จากการพิมพ์สามมิติ.....	29
รูปที่ 4. 6 ทิศทางการพิมพ์ชิ้นงานดัมเบลครั้งที่ 1 บนโปรแกรม ChiTuBox.....	31
รูปที่ 4. 7 เครื่องพิมพ์ขณะทดลองการพิมพ์ .....	31
รูปที่ 4. 8 ชิ้นงานดัมเบลครั้งที่ 1 เครื่อง Elegoo ระบบ DLP.....	32
รูปที่ 4. 9 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกครั้งที่ 1 เครื่อง Elegoo ระบบ DLP .....	32
รูปที่ 4. 10 ทิศทางการพิมพ์ชิ้นงานดัมเบล บนโปรแกรม ChiTuBox.....	33
รูปที่ 4. 11 ชิ้นงานดัมเบลเครื่อง Elegoo ระบบ DLP โดยใช้ภาวะการพิมพ์ที่ 2 .....	33
รูปที่ 4.12 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกเครื่อง Elegoo ระบบ DLP โดยใช้ภาวะการพิมพ์ 2 .....	34
รูปที่ 4.13 ชิ้นงานดัมเบลที่มี light support ตรงกลางและ heavy support ด้านข้างชิ้นงาน บนโปรแกรม ChiTuBox .....	34
รูปที่ 4. 14 ชิ้นงานดัมเบลที่มี light support ตรงกลางและ heavy support ด้านข้าง โดยใช้ภาวะการพิมพ์ ที่ 2.....	35
รูปที่ 4.15 ชิ้นงานดัมเบลและชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกบนโปรแกรม ChiTuBox.....	35
รูปที่ 4. 16 ชิ้นงานดัมเบลในทิศทางพิมพ์ด้านยาวตามแนวแกน Y.....	36
รูปที่ 4.17 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกในทิศทางด้านยาวตามแกน Y .....	36
รูปที่ 4.18 การทดสอบของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่พิมพ์ด้วยระบบ SLA และ DLP .....	37
รูปที่ 4. 19 ชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.1 phr ครั้งที่ 1.....	39
รูปที่ 4. 20 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก MMA prepolymer/Graphene 0.1 phr ครั้งที่ 1.....	39
รูปที่ 4. 21 ชิ้นงานดัมเบลPMMA/graphene 0.1 phr สามมิติครั้งที่ 2.....	40
รูปที่ 4. 22 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA /Graphene 0.1 phr ครั้งที่ 2 .....	41
รูปที่ 4. 23 ชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.1 phr ครั้งที่ 3.....	41

รูปที่ 4. 24	ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA /Graphene 0.1 phr ครั้ง 3 .....	42
รูปที่ 4. 25	เครื่องพิมพ์ชิ้นงาน PMMA/graphene 0.5 phr.....	43
รูปที่ 4.26	ชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.5 phr ครั้งที่ 1 .....	43
รูปที่ 4. 27	ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 1 .....	44
รูปที่ 4. 28	ชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง.....	44
รูปที่ 4. 29	ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 2 .....	45
รูปที่ 4. 30	ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 3 .....	45
รูปที่ 4. 31	ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 4 .....	45
รูปที่ 4. 32	ชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 5 .....	46
รูปที่ 4. 33 ก	ขนาดชิ้นงานเฉลี่ยด้านความหนาของชิ้นงานดัมเบลที่พิมพ์ด้วยระบบ DLP.....	47
รูปที่ 4.34 ก	ขนาดชิ้นงานเฉลี่ยด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่พิมพ์ด้วยระบบ DLP .....	49

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2. 1 สมบัติของ NEAT PMMA และ PMMA/GRAPHENE NANOCOMPOSITE จากการวัด GPC TGA และ DMA.....	14
ตารางที่ 2. 2 ความหนาของการพิมพ์ของPHOTOPOLYMER ที่อัตราเร็วและกำลังของแสงเลเซอร์ที่ต่างกัน <sup>[14]</sup> .....	16
ตารางที่ 3. 1 อัตราส่วนของผสมระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA)/แกรฟีน (G) .....	20
ตารางที่ 3. 2 ระยะเวลาให้แสงแต่ละชั้น (EXPOSURE TIME [S]) และระยะเวลาให้แสงฐาน (BOTTOM EXPOSURE TIME [S]) ในการพิมพ์ชิ้นงาน แต่ละชั้นความสูง (LAYER HEIGHT (MM)) 0.05 มิลลิเมตร .....	20
ตารางที่ 3. 3 แผนการดำเนินงาน .....	26
ตารางที่ 4. 1 ขนาด ความหนาชิ้นงาน ความกว้างชิ้นงาน (W) ความกว้าง GAGE WIDTH (w) ความยาวชิ้นงาน (L) และความยาว GAGE LENGTH (L) ของชิ้นงานดัมเบลที่ถูกพิมพ์ขึ้นโดยเครื่อง FORM2 ระบบ SLA.....	29
ตารางที่ 4. 2 ขนาดความ (MM) ความยาว (MM) และความสูง (MM) ของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก ที่ถูกพิมพ์ขึ้นโดยเครื่อง FORM2 ระบบ SLA .....	30
ตารางที่ 4. 3 แสดงภาวะการพิมพ์ทดลองครั้งแรก.....	31
ตารางที่ 4. 4 ขนาด ความหนาชิ้นงาน ความกว้างชิ้นงาน (W) ความกว้าง GAGE WIDTH (w) ความยาวชิ้นงาน (L) และความยาว GAGE LENGTH (L) ของชิ้นงานดัมเบลที่ถูกพิมพ์ขึ้นโดยเครื่อง ELEGOO ระบบ DLP .....	32
ตารางที่ 4. 5 ขนาดความกว้าง (MM) ความยาว (MM) และความสูง (MM) ของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก ที่ถูกพิมพ์ขึ้น โดยเครื่อง ELEGOO ระบบ DLP.....	32
ตารางที่ 4. 6 แสดงภาวะการพิมพ์ที่ 2.....	33
ตารางที่ 4. 7 ขนาด ของชิ้นงานดัมเบล ที่ถูกพิมพ์ขึ้นโดยเครื่อง ELEGOO ระบบ DLP โดยใช้ภาวะการพิมพ์ 2	34
ตารางที่ 4. 8 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก ที่ถูกพิมพ์ขึ้น โดยเครื่อง ELEGOO ระบบ DLP โดยใช้ภาวะการพิมพ์ 2 .....	34
ตารางที่ 4. 9 ขนาดของชิ้นงานดัมเบลมี LIGHT SUPPORT ตรงกลางและ HEAVY SUPPORT ด้านข้างชิ้นงานภาวะการพิมพ์ 2 .....	35
ตารางที่ 4. 10 ขนาดของชิ้นงานดัมเบลในทิศทางด้านยาวตามแกนY .....	36
ตารางที่ 4. 11 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกในทิศทางด้านยาวตามแกนY .....	37
ตารางที่ 4. 12 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของวิธีการพิมพ์แบบต่างๆ ในระบบ DLP .....	38
ตารางที่ 4. 13 ขนาดของชิ้นงานดัมเบล PMMA /GRAPHENE 0.1 PHR ครั้ง 1 .....	39
ตารางที่ 4. 14ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA /GRAPHENE 0.1 PHR ครั้ง 1 .....	40

ตารางที่ 4. 15 ขนาดของชิ้นงานดัมเบล PMMA /GRAPHENE 0.1 PHR ครั้ง 2 .....	40
ตารางที่ 4. 16ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA /GRAPHENE 0.1 PHR ครั้ง 2 .....	41
ตารางที่ 4. 17ขนาดของชิ้นงานดัมเบล PMMA/GRAPHENE 0.1 PHR ครั้ง 3 .....	42
ตารางที่ 4. 18ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA /GRAPHENE 0.1 PHR ครั้ง 3 .....	42
ตารางที่ 4. 19 ขนาดของชิ้นงานดัมเบล PMMA/GRAPHENE 0.5 PHR ครั้ง 1 .....	43
ตารางที่ 4. 20 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/GRAPHENE 0.5 PHR ครั้ง 1 .....	44
ตารางที่ 4. 21ขนาดของชิ้นงานดัมเบล PMMA/GRAPHENE 0.5 PHR ครั้ง 2 .....	45
ตารางที่ 4. 22ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/GRAPHENE 0.5 PHR ครั้ง 2 .....	45
ตารางที่ 4. 23 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/GRAPHENE 0.5 PHR ครั้ง 3 และ 4 .....	46
ตารางที่ 4. 24 ขนาดของชิ้นงานดัมเบล PMMA/GRAPHENE 0.5 PHR ครั้ง 5 .....	46

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 มูลเหตุจูงใจ และ ที่มาของโครงการวิจัย

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3-Dimensional printing, 3D printing) เป็นวิธีการขึ้นรูปวัสดุที่กำลังได้รับความนิยมและความสนใจมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากการพิมพ์สามมิติสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและสามารถขึ้นรูปได้ด้วยวัสดุหลายชนิด ทั้งเซรามิก พอลิเมอร์ และโลหะ รูปร่างของชิ้นงานที่นำมาขึ้นรูปสามารถออกแบบได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ การพิมพ์สามมิติถือเป็นเทคนิคหนึ่งในการขึ้นรูปแบบเติม (additive manufacturing) โดยใช้หลักการพิมพ์สองมิติในแนวระนาบ (ตามแนวแกน X และ Y) ทีละชั้นเรียงขึ้นไปในแนวสูง (แนวแกน Z) จนขึ้นเป็นตัวชิ้นงาน การพิมพ์สามมิติสามารถจำแนกเป็น 4 ระบบหลักๆ ได้แก่ Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA) / Digital Light Process (DLP), Powder Printing และ Selective Laser Sintering (SLS) โดยปกติเครื่องพิมพ์สามมิติที่นิยมจะเป็นเครื่องสามมิติระบบ FDM ซึ่งสร้างชิ้นงานโดยการฉีดพลาสติกผ่านปลายหัวฉีด มีข้อเสียคือพลาสติกสามารถแข็งติดที่ปลายหัวฉีดแล้วใช้ไม่ได้อีกต่อไป รวมทั้งความละเอียดของชิ้นงานค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิค SLA/DLP ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมและเหมาะกับการขึ้นรูปชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดสูงและมีขนาดเล็ก โดย SLA/DLP หรือระบบลาดเรซิน มีหลักการทำงาน คือ เครื่องพิมพ์จะทำหน้าที่ฉายแสงไปที่ตัวลาดซึ่งบรรจุเรซินที่มีความไวต่อแสง (photosensitive resin) ทำให้เกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยแสง (photopolymerization) เกิดการแข็งตัวเฉพาะจุดที่ให้แสงและเกิดเป็นรูปร่างที่ได้ออกแบบไว้ การพิมพ์ระบบลาดเรซินส่วนใหญ่เป็นการสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและมีความละเอียดสูง เช่น งานโมเดลฟิกเกอร์ ออกแบบเครื่องประดับ เป็นต้น

PMMA หรือ “อะคริลิก” มีชื่อทางการค้า อาทิ Plexiglas<sup>®</sup>, Lucite<sup>®</sup> หรือ Perspex<sup>®</sup> เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะโปร่งใส มีโครงสร้างเส้นสายเป็นแบบอะแทคติก (atactic) คือ โครงสร้างโมเลกุลมีกิ่งหรือแขนงที่ไม่แน่นอน สันยาวสลับกันไม่ในรูปแบบ โดยสมบัติคือ มีความใสคล้ายกระจก ทนต่อสารเคมีหลากหลายประเภท ยกเว้นตัวทำละลายบางชนิด เช่น คลอโรฟอร์ม มีจุดอ่อนตัวต่ำ ทนต่อการขีดข่วน ไม่ดูดความชื้น และเป็นฉนวนทางไฟฟ้า เป็นเรซินชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการพิมพ์สามมิติแบบเรซิน แต่มีข้อเสียคือ มีการหดตัวสูง และความแข็งแรงเชิงกลต่ำ การเพิ่มสมบัติของ PMMA ให้สามารถนำไฟฟ้าได้มากขึ้นสามารถใช้เทคนิคการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบกับตัวเติมที่นำไฟฟ้าได้ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้แกรฟีน ซึ่งมีความแข็งแรงเชิงกลและสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม

แกรฟีนเป็นลักษณะรูปแบบหนึ่งของคาร์บอนมีโครงสร้างคล้ายเพชรและฟูลเลอร์รีน โดยลักษณะการเรียงตัวของแกรฟีนจะเรียงตัวเป็นรูปเรขาคณิตหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้ง มีความหนาเท่ากับอะตอมของคาร์บอน ทำให้แกรฟีนมีสมบัติพิเศษ คือ มีความแข็งแรงกว่าเหล็กกล้าที่มีความหนาที่เท่ากันถึงหนึ่งร้อยเท่า เป็นวัสดุเกือบโปร่งใส มีน้ำหนักเบา เป็นตัวนำความร้อนเนื่องจากโครงสร้างที่เกิดจากการรวมตัวของคาร์บอนเพียง

อย่างเดียว มีความหนาแน่นต่อพื้นที่ถึง  $2630 \text{ m}^2/\text{g}$  และเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากการเกิดพันธะในระดับชั้นพลังงานแบบ  $sp^2$  ของคาร์บอนอะตอมที่เกิดพันธะเป็นบริเวณกว้างทั่วทั้งแผ่นแกรฟีน ปัจจุบันมีความสนใจนำแกรฟีนมาเป็นตัวเสริมแรง (reinforcement filler) ในพลาสติกเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติที่ดีมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะสมบัติเชิงไฟฟ้าและความแข็งแรงของวัสดุ อย่างไรก็ตาม แกรฟีนที่มีจำหน่ายทางการค้ายังมีราคาสูง ทำให้เกิดข้อจำกัดในการนำมาใช้งาน

งานวิจัยนี้จึงได้เตรียมแกรฟีนจากสารตั้งต้นแกรไฟต์ซึ่งมีราคาถูก เพื่อนำแกรฟีนที่ได้มาพัฒนาเป็นวัสดุเชิงประกอบร่วมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล และความสามารถในการนำไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น เพื่อใช้ประโยชน์ในการผลิตเป็นส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ชั้นส่วนที่ต้องป้องกันไม่ให้เกิดไฟฟ้าสถิตในขณะใช้งาน

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพื่อใช้สำหรับกระบวนการพิมพ์สามมิติ
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยเครื่องพิมพ์สามมิติที่ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลต
3. เพื่อศึกษาสมบัติของชิ้นงานจากวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ ได้แก่ ความแม่นยำในการพิมพ์ สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และ สมบัติเชิงกล เช่น สมบัติต้านแรงดึง ความทนแรงดัดงอ และ ความทนแรงกระแทก

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 การพิมพ์สามมิติ (3D Printing)

การพิมพ์สามมิติ (3D Printing, 3DP) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ข้อมูลจากการออกแบบข้อมูลสามมิติ computer-aided design (CAD) มาขึ้นรูปเป็นวัตถุทางกายภาพ โดยเครื่องพิมพ์สามมิติส่วนใหญ่จะใช้เทคนิคการแปลงข้อมูลโมเดล CAD จากสามมิติ มาเป็นข้อมูลในรูปแบบสองมิติแต่ละชั้นของการพิมพ์ <sup>[1]</sup> ในปัจจุบันมีการนิยามความหมายของ “การพิมพ์สามมิติ” โดยใช้แทนความหมายของกระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยการเติมวัสดุ (additive manufacturing, AM) ซึ่งสามารถจำแนกได้หลากหลายถึง 7 ประเภทตามมาตรฐาน ISO/ASTM52900-15 ได้แก่ <sup>[2]</sup>

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

กระบวนการพิมพ์สามมิติที่นิยมใช้ในปัจจุบัน <sup>[3]</sup> ได้แก่

- ระบบฉีดเส้นพลาสติก (Fused deposition modelling, FDM) การหลอมเส้นพลาสติกที่ต้องการให้กลายเป็นของเหลวและฉีดออกมาเป็นเส้นผ่านหัวฉีด

- ระบบผงยิปซัม (powder 3D printer) เป็นการขึ้นรูปโดยการฉีดสารยิปซัม/ผงพลาสติกเป็นตัวกลางในการขึ้นชิ้นงานเครื่องจะพิมพ์ผงยิปซัมลงไปบนฐานพิมพ์และใช้สารยิปซัมติดลงไปผสมผงยิปซัมเข้าด้วยกัน
- ระบบหลอมผงพลาสติก, ผงโลหะและเซรามิก (selective laser sintering ,SLS) การขึ้นรูปโดยการถ่ายโอนพลังงานโดยตรง (directed energy deposition)
- ระบบเรซินเหลวที่ขึ้นรูปโดยการฉายแสง (stereolithography, SLA และ Digital Light Processing, DLP)

### การพิมพ์สามมิติระบบเรซินเหลวที่ขึ้นรูปโดยการฉายแสง (stereolithography, SLA และ Digital Light Processing, DLP)

เป็นเทคนิคการพิมพ์สามมิติที่กำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบัน โดยมีหลักการทำงานคือ เครื่องพิมพ์สามมิติระบบนี้จะฉายแสงไปที่ตัวกลางใสเรซินที่มีความไวแสง (Photopolymer) โดยอาศัยระบบการเคลื่อนที่ 3 แกน แสงเลเซอร์จะฉายแสงตามแนวระนาบ XY 2 มิติพิมพ์เป็นภาพตัดขวาง (cross section) ของชิ้นงานในอ่างเรซิน เรซินจะแข็งตัวเฉพาะจุดที่โดนแสง ทำให้เกิดรูปร่างในชั้นๆหนึ่ง เมื่อชั้นที่ถูกฉายแสงดังกล่าวนี้สมบูรณ์ฐานพิมพ์จะเคลื่อนที่ขึ้นในแนวแกน Z เพื่อพิมพ์ชั้นถัดไป โดยกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องไปจนชิ้นงานเสร็จสมบูรณ์ ปัจจุบันเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติโดยการฉายแสงแบบแ่งเรซิน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบหลักๆ ได้แก่ ระบบ Stereolithography (SLA) และระบบ Digital Light Processing (DLP) ซึ่งระบบการพิมพ์สามมิติแบบอ่างเรซิน เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่ต้องการรายละเอียดสูง และ งานที่ต้องการพื้นผิวที่เรียบเนียน เช่น Molds Patterns โดยมรการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม และกลุ่มนักออกแบบผลิตภัณฑ์ ไปจนถึง กลุ่มทันตกรรม จิวเวอรี่ และการผลิตโมเดลต่างๆ



(ก) เครื่องพิมพ์สามมิติระบบ SLA รุ่น Form2 ยี่ห้อ Formlab





(ข) เครื่องพิมพ์สามมิติ ระบบ DLP รุ่น Elegoo ยี่ห้อ Mars

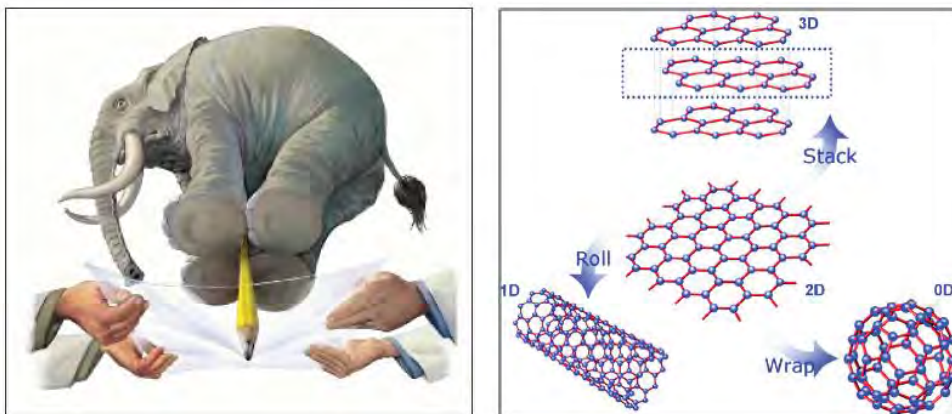
**รูปที่ 2.1** เครื่องพิมพ์สามมิติชนิดอ่างเรซิน (ก) เครื่องพิมพ์สามมิติระบบ SLA รุ่น Form2 ยี่ห้อ Formlab

(ข) เครื่องพิมพ์สามมิติ ระบบ DLP รุ่น Elegoo ยี่ห้อ Mars

หลักการทำงานของเครื่องพิมพ์ระบบ SLA/DLP นั้นคล้ายกับการ “ปั้นน้ำให้เป็นตัว” โดยส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ ถาดใส่น้ำเรซิน ฐานพิมพ์เคลื่อนที่ และ แหล่งกำเนิดแสง น้ำเรซินคือเรซินไวแสง (photo-sensitive resin) เรซินชนิดนี้จะแข็งตัวเป็นก้อนพลาสติกเมื่อถูกแสงที่อยู่ช่วงความถี่ในช่วง 360-420 nm เนื่องจากระบบ SLA/DLP ใช้แหล่งกำเนิดแสงจึงสามารถสร้างชิ้นงานที่มีความละเอียดสูงได้ แต่ยังมีข้อจำกัดคือสามารถสร้างชิ้นงานในขนาดที่จำกัด

## 2.2 แกรฟีน(Graphene)

แกรฟีน (Graphene) คือ อะตอมของคาร์บอน (carbon atom) ที่มีการจัดเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) ด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่ความแข็งแรงสูงทำให้แกรฟีนมีความแข็งแรงมากกว่าเพชรและเหล็กกล้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของแกรฟีน <sup>[4]</sup>



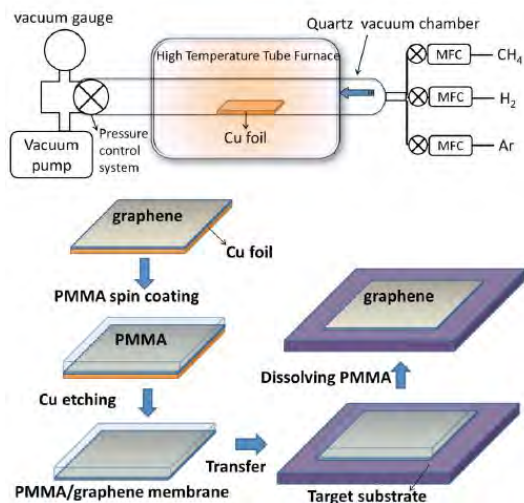
**รูปที่ 2. 2** ภาพจำลองความแข็งแรงของแกรฟีนที่สามารถรองรับน้ำหนักผ่านพื้นที่เล็ก ๆ ได้ (ซ้าย) และความเชื่อมโยงเชิงโครงสร้างของอัญรูปต่าง ๆ ของคาร์บอนผ่านโครงสร้าง 2 มิติของแกรฟีน (ขวา) <sup>[4]</sup>

แกรฟีนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าวัสดุนำไฟฟ้าทั่วไป เช่น ทองแดง เนื่องจากสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนบริเวณผิวได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมประกอบไปด้วยออร์บิทัล  $2s$ ,  $2p_x$ ,  $2p_y$  และ  $2p_z$  โดยออร์บิทัลเหล่านี้สามารถผสมกันไปได้ก่อให้เกิดโครงสร้างลูกผสมแบบต่าง ๆ โดยในกรณีของแกรฟีนจะเกิดการผสมกันระหว่างออร์บิทัล  $s$  และ  $p_x$ ,  $p_y$  เกิดเป็นออร์บิทัลลูกผสมชนิด  $sp^3$  ซึ่งจะเกิดเป็นพันธะ  $\sigma$  3 พันธะ และเหลือออร์บิทัล  $p_z$  ซึ่งจะเกิดเป็นพันธะ  $\pi$  1 พันธะและพันธะ  $\pi$  ของแต่ละอะตอมของคาร์บอนสามารถเกิดการไฮบริดเซชัน (hybridization) เกิดเป็นแถบของ  $\pi$  และ  $\pi^*$  ส่งผลให้แกรฟีนมีสมบัติทางไฟฟ้าที่พิเศษ<sup>[5]</sup> นอกจากนี้แกรฟีนยังมีน้ำหนักที่เบามากในทางทฤษฎีเมื่อเทียบอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อพื้นที่ผิว แกรฟีน 1 กรัม จะสามารถมีพื้นที่ผิวถึง 2,360 ตารางเมตร

การสังเคราะห์แกรฟีนสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมที่นิยมและเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้มี 2 วิธี ได้แก่

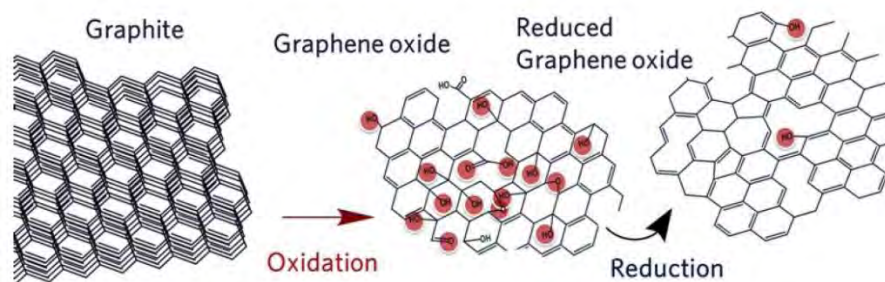
1. การผลิตแกรฟีนโดย chemical vapor deposition หรือ CVD โดยเริ่มจากการปล่อยก๊าซมีเทน( $CH_4$ ) ที่อุณหภูมิห้องเข้าไปในเตาเผาที่มีก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) อยู่ด้วยเล็กน้อย เมื่อก๊าซมีเทนสัมผัสกับโลหะ เช่น ทองแดงหรือนิกเกิลที่อุณหภูมิสูงระดับ  $1000^\circ C$  จะเกิดการสลายตัวเหลือเพียงอะตอมของคาร์บอนเกาะอยู่บนแผ่นโลหะและจัดเรียงโครงสร้างเป็นแกรฟีนได้ในภาวะที่เหมาะสม แม้การสลายตัวของก๊าซมีเทนรวมถึงการเกิดโครงสร้างแบบแกรฟีนนั้นต้องใช้ความร้อนสูงถึง  $2500^\circ C$  แต่โลหะทองแดงหรือนิกเกิลนั้นมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้อุณหภูมิที่ใช้ลดลงอย่างมาก <sup>[6]</sup> จากนั้นแกรฟีนที่อยู่บนโลหะจะถูกเคลือบผิวด้านบนด้วยโพลีเมอร์ โพลีเมทิลเมทาไครเลต หรือ พีเอ็มเอ็มเอ (poly(methyl methacrylate), PMMA) แล้วกำจัดเอาแผ่นโลหะออกโดยกระบวนการกัดกรวด (etching) จากนั้นเคลื่อนย้ายแผ่นแกรฟีนที่เคลือบด้วย PMMA ไปวางบนวัสดุหรือชิ้นงานที่ต้องการ ตามด้วยการละลายเอา PMMA ออกในที่สุดซึ่งแกรฟีนที่ผลิตขึ้นโดยเทคนิค CVD นี้เป็นแก

รฟีนที่มีคุณภาพสูง สามารถควบคุมจำนวนชั้นของแกรฟีนได้ และมีการนำไฟฟ้าที่ดีจึงเหมาะอย่างยิ่งกับการนำไปใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ [5]



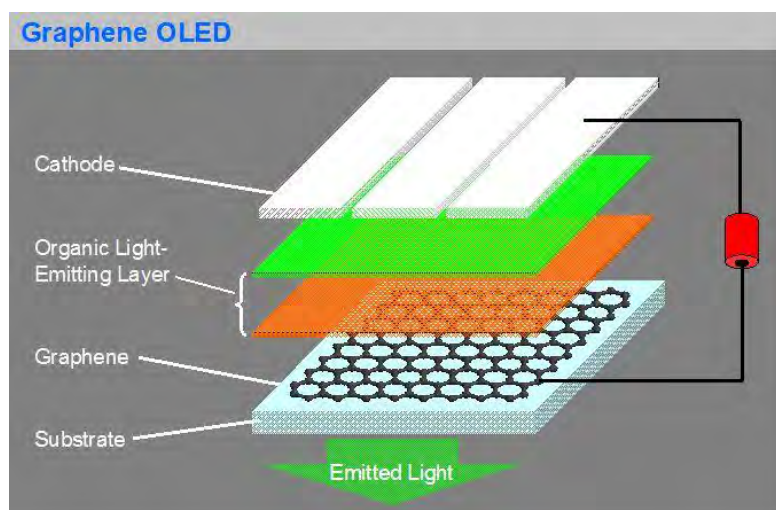
รูปที่ 2.3 แผนภาพจำลองการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยเทคนิค CVD และขั้นตอนการเคลื่อนย้ายแกรฟีนที่สังเคราะห์ได้ [4]

- การผลิตแกรฟีนโดยกระบวนการทางเคมี เริ่มจากการออกซิไดซ์แกรไฟต์เพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ไปกั้นระหว่างชั้นของแกรไฟต์ให้ห่างออกจากกัน (exfoliation) และเรียกผลผลิตที่ได้ว่า แกรไฟต์ออกไซด์ หรือแกรฟีนออกไซด์ ขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ (แกรฟีนออกไซด์ 1 ชั้น มีความหนา ประมาณ 0.9 นาโนเมตรเท่านั้น) [4] จากนั้นจึงทำปฏิกิริยารีดักชัน เพื่อลดจำนวนหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน ลง และ เพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าให้มากขึ้นด้วยซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถผลิตแกรฟีนได้ในจำนวนมาก ๆ และมีต้นทุนต่ำกว่าวิธีแรกมาก แต่แกรฟีนที่ได้จะมีสมบัติหรือคุณภาพที่ด้อยกว่า แต่ยังมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี เช่น การนำไปใช้ในวัสดุคอมโพสิตเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ [7]



รูปที่ 2. 4 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชัน <sup>[4]</sup>

เนื่องจากโครงสร้าง hexagonal1 ชั้นของแกรฟีน จะมีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 2.3% หรือค่าความโปร่งแสงประมาณ 97-98 % ทำให้แกรฟีนเป็นตัวเลือกในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในอุตสาหกรรม เช่น หน้าจอโทรศัพท์ แผงเซลล์สุริยะ ทรานซิสเตอร์ หรืออุปกรณ์เปล่งแสงอินทรีย์ (organic light emitting diodes, OLEDs) ที่ต้องการความโปร่งแสงที่สูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 <sup>[4]</sup>



รูปที่ 2. 5 การนำแกรฟีนไปใช้ในส่วนประกอบของ OLEDs <sup>[4]</sup>

ปัจจุบันแกรฟีนสามารถนำมาใช้ทดแทนอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide, ITO) ใช้ในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการสมบัติการโค้งงอ เช่น แผงเซลล์สุริยะที่มีความบางและโค้งงอหรือหน้าจอแสดงผลที่โค้งงอได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่า ทนต่อสารเคมีการกัดกร่อน และมีความยืดหยุ่นสูงกว่า อีกทั้ง แกรฟีนยังมีค่าความเครียดต่อการแตกหัก (fracture strain) สูงกว่าอินเดียมออกไซด์ถึง 10 เท่า <sup>[5]</sup>

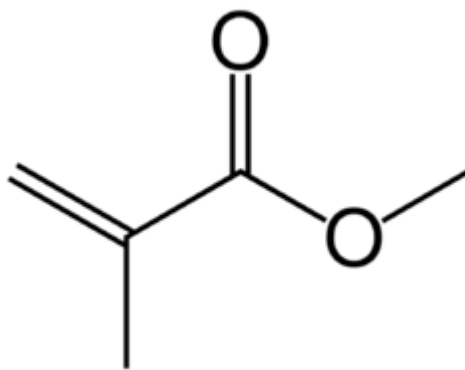


รูปที่ 2. 6 ภาพแสดงผลที่มีสมบัติการโค้งงอจากแกรฟีน<sup>[4]</sup>

### 2.3 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (poly(methyl methacrylate), PMMA)

พอลิเมทิล เมทาคริเลต(Poly(Methyl Methacrylate),PMMA) หรือ อะคริลิกพลาสติก (Acrylic Plastic) เป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง มีชื่อทางการค้าหลายชื่อ เช่น Plexiglas, Lucite และ Perspex เป็นต้น โดยมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.7 ซึ่งอะคริลิกพลาสติกได้จากการนำมอนอเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลต (Methyl Methacrylate, MMA) มาทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) ซึ่งสามารถเกิดกระบวนการได้หลายแบบ เช่นการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน (Emulsion Polymerization) และ การเกิดพอลิเมอร์แบบบัลค์ (Bulk Polymerization) โดยพลาสติกชนิดนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายๆด้าน เช่น เป็นกระจกบนเครื่องบิน ป้ายโฆษณา กระจกตู้ปลา ชิ้นส่วนรถยนต์ และวัสดุทางการแพทย์ เป็นต้น เนื่องจากพอลิเมทิล เมทาคริเลต มีสมบัติโดดเด่นเรื่องความมันเงา (gloss) ความโปร่งใส (transparent) แข็งแรง และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย และ มีความหนาแน่นต่ำ อะคริลิกพลาสติกจึงเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้แทนแก้วในอุตสาหกรรมหลายๆด้าน โดยสมบัติเฉพาะของอะคริลิกพลาสติกมีดังนี้<sup>[6]</sup>

- มีความหนาแน่น 1.15 – 1.19 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
- มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 130 – 140 องศาเซียส และจุดเดือด 200 องศาเซลเซียส
- มีความทนทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าแก้วและพอลิสไตรีน
- แสงสว่างสามารถส่องผ่านเนื้อพลาสติกได้ถึงร้อยละ 92 และ มีการสะท้อนกลับที่ผิวประมาณร้อยละ 4
- มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมดีกว่าพลาสติกชนิดอื่น จึงนิยมใช้ทำวัสดุที่ใช้งานกลางแจ้ง
- อะคริลิกพลาสติกมีเนื้อที่อ่อน สามารถเกิดรอยขีดขูดได้ง่าย



รูปที่ 2. 7 โครงสร้างพอลิเมทิลเมทาคริเลต<sup>[15]</sup>

## 2.4 วัสดุเชิงประกอบ (composite materials)

วัสดุเชิงประกอบ คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างที่แตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน โดยวัสดุผสมที่ได้จะมีสมบัติใหม่และสามารถแบ่งแยกความแตกต่างระหว่างวัสดุเริ่มต้นทั้งสองชนิดได้ด้วยตาเปล่าหรือยังมีเฟสแยกกันอยู่อย่างชัดเจน โดยทั่วไปจะมีวัสดุตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นเฟสหลักหรือเมทริกซ์ (matrix) และวัสดุที่เหลือทำหน้าที่เป็นเฟสกระจายตัว (dispersed phase) จะกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรง (reinforced phase) ควบคู่ไปด้วย <sup>[7]</sup>

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

โดยสามารถแบ่งวัสดุเชิงประกอบออกตามประเภทของเฟสที่กระจายตัว สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทได้แก่ <sup>[7]</sup>

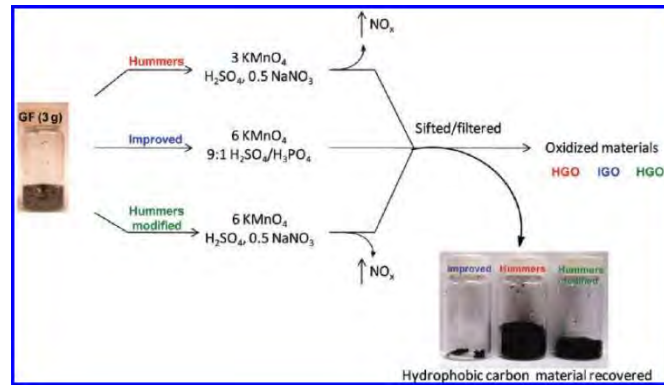
1. วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาค (particle-reinforced composite) คือวัสดุเชิงประกอบที่เฟสกระจายตัวส่วนใหญ่ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง (reinforcement) ให้กับวัสดุ
2. วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced composite) คือวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งวัสดุจะมีความแข็งแรงและความแข็งดิ่งสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก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

แบ่งตามชนิดของเนื้อหลัก สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ <sup>[7]</sup>

1. วัสดุเชิงประกอบประเภทพอลิเมอร์ (polymer matrix composite, PMC) คือ ผลิตภัณฑ์ ไฟเบอร์กลาส โดยมีพอลิเมอร์เป็นเฟสหลัก (matrix) และวัสดุเสริมแรง (reinforcing agent)
2. วัสดุเชิงประกอบประเภทเซรามิก (ceramic matrix composite, CMC) คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีวัสดุเสริมแรงเป็นวัสดุจากพวกเซรามิก เพื่อปรับสมบัติด้านความเปราะ และช่วยเสริมความเหนียวลดการแตกร้าว
3. วัสดุเชิงประกอบประเภทโลหะ (metal matrix composite, MMC) คือ วัสดุเชิงประกอบที่มีเฟสหลักประกอบด้วยโลหะหรือโลหะผสมเช่น เหล็ก อะลูมิเนียม สังกะสี ฯลฯ และมีเฟสวัสดุเสริมแรงใช้วัสดุที่เป็นอนุภาค (particle) เส้นใย (fiber) เส้นใยสั้น (whisker) ทั้งที่เป็น เซรามิก และพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบประเภทนี้มักใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ และอากาศยาน

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

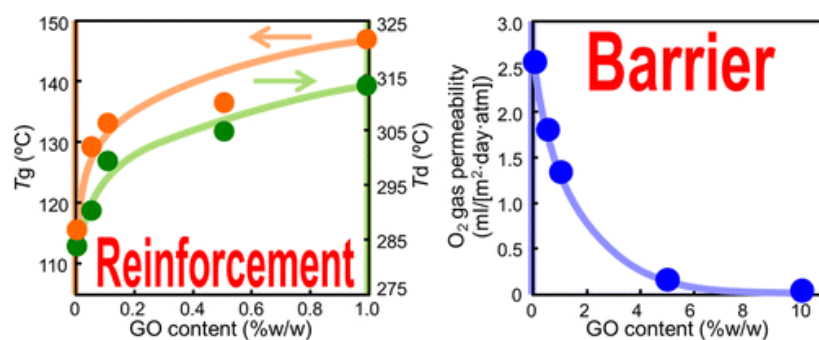
แกรฟีนสามารถเตรียมได้จากการนำแกรฟีนออกไซด์มาทำปฏิกิริยารีดักชัน ในขณะที่แกรฟีนออกไซด์สามารถเตรียมได้จากเทคนิคของ Hummer (HGO) ซึ่งได้รับความนิยมกันโดยทั่วไป วิธี HGO นี้เป็นการนำแกรไฟต์มาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและโซเดียมไนเตรตในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ซึ่งอาจทำให้เกิดก๊าซพิษ คือ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ไดไนโตรเจนเททระออกไซด์ และคลอรีนไดออกไซด์ และหาไม่ควบคุมให้ดีอาจเกิดการระเบิดอย่างรุนแรงในขณะที่ทำปฏิกิริยาได้ จึงมีการพัฒนาวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีของ Hummer (HGO+) และวิธีสังเคราะห์แบบ Improved (IGO) ซึ่งไม่ใช้หรือใช้โซเดียมไนเตรตในปริมาณที่น้อยลงในขณะที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 Marcano และคณะ <sup>[8]</sup> ได้เปรียบเทียบการสังเคราะห์และสมบัติการนำไฟฟ้าของแกรฟีนออกไซด์ (graphene oxide) จากทั้งสามวิธีพบว่า วิธี HGO+ และ IGO สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการสังเคราะห์แบบ HGO นอกจากนี้เมื่อนำแผ่นแกรฟีนที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบความสามารถในการนำไฟฟ้าพบว่าแผ่นแกรฟีนที่ได้จากวิธีการสังเคราะห์แบบ IGO สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าแผ่นแกรฟีนที่ได้จากวิธีการสังเคราะห์แบบ HGO+



รูปที่ 2. 8 การเตรียมแกรไฟีนออกไซด์ด้วยวิธีของฮัมเมอร์ วิธีฮัมเมอร์ดัดแปลง และวิธีฮัมเมอร์ปรับปรุง [8]

แกรไฟีนสามารถนำมาใช้เป็นตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) ในวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต (polymer composite) ได้ จากการศึกษาวิจัยของ Das และ Prusty [9] ที่นำแกรไฟีนมาใช้เป็นตัวเติมเสริมแรงในพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ PS PVA PU PET PC และ PVDF แล้วศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของคอมพอสิตที่ได้พบว่าคอมพอสิตมีความสามารถในการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น เนื่องจากสมบัติเด่นของแกรไฟีนที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีมาก จึงทำให้คอมพอสิตที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้นทั้งสามด้านนี้

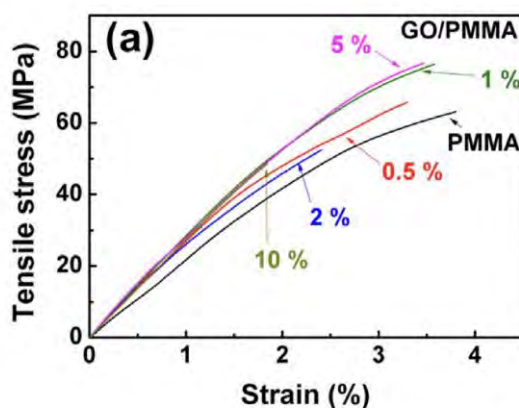
Morimune และคณะ [10] ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่างแกรไฟีนออกไซด์กับ PMMA (poly(methyl methacrylate)) โดยวิธี organic solution ซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น โดยผลของการศึกษาพบว่าคอมพอสิตที่ได้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดี และมีความสามารถในการป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ดีมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2. 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tg และความสามารถในการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนกับปริมาณของ GO ในคอมพอสิต [10]



Valles และคณะ<sup>[11]</sup> นำ graphene oxide (GO) และ base-washed graphene oxide (bwGO) มาใช้เป็นตัวเติมเสริมแรงใน PMMA โดยศึกษาเปรียบเทียบผลของการเสริมแรงด้วยแกรฟีนออกไซด์ทั้งสองประเภท พบว่าการเสริมแรงด้วยแกรฟีนออกไซด์ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ที่สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบการเสริมแรงด้วย GO และ bwGO พบว่า GO สามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพความร้อนได้สูงกว่า bwGO นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบความทนแรงดึงจากชิ้นงานทดสอบ จากรูป 2.9 ยังพบว่าพอลิเมอร์ที่ใส่ตัวเติมเสริมแรง GO มีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ GO ในพอลิเมอร์ยังสามารถช่วยเพิ่มความทนแรงดึงให้สูงขึ้น จนถึงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หากมากกว่าที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักสมบัติความทนแรงดึงจะต่ำกว่า PMMA บริสุทธิ์และแสดงพฤติกรรมแข็งเปราะคล้ายแก้ว ในการทดลองจึงคาดการณ์ปริมาณการเติมแกรฟีนในเรซินอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-5 โดยน้ำหนัก เพื่อไม่ให้ PMMA เสียสมบัติเชิงกลไป



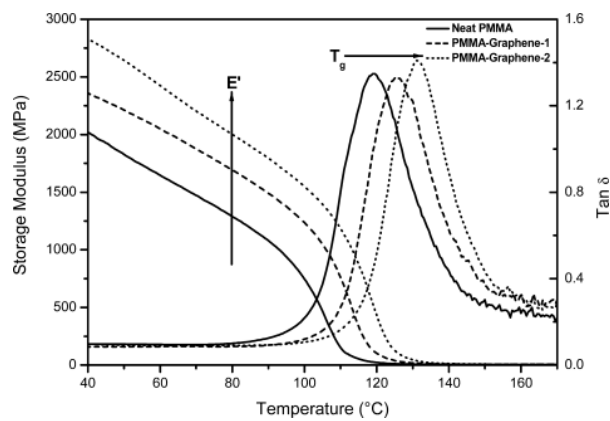
รูปที่ 2.10 กราฟ stress-strain curve ของGO/PMMA ที่อัตราส่วนต่างๆเทียบ PMMA บริสุทธิ์<sup>[11]</sup>

Pramoda และ คณะ<sup>[12]</sup> ได้ศึกษาการทำ nanocomposite ระหว่าง PMMA (poly(methyl methacrylate)) กับ Graphene โดยวิธีการแบบใหม่โดยทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์ ซึ่งจะปรับปรุงสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของ nanocomposite เมื่อได้ composite แล้วพบว่าสมบัติทางความร้อนดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดย  $T_g$  เพิ่มขึ้น โดย  $T_g$  เพิ่มขึ้นจาก 119 องศาเซลเซียส เป็น 131 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับ PMMA บริสุทธิ์ และค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นจาก 1.29 GPa เป็น 2 GPa ซึ่งสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลดีขึ้นอย่างมากแบบมีนัยสำคัญหลังการเตรียมเป็น nanocomposite

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ Neat PMMA และ PMMA/graphene nanocomposite จากการวัด GPC TGA และ DMA

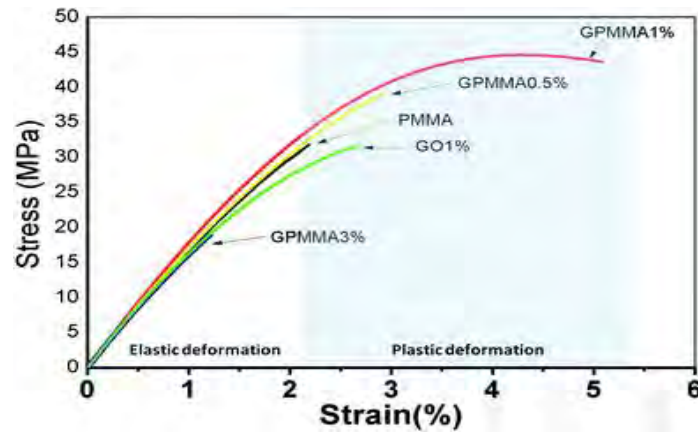
Sample	GPC		TGA		DMA	
	Molecular Weight (g/mol)	Polydispersivity	$T_{5 \text{ wt}\% \text{ loss}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Residue (%)	Modulus (GPa)	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
Neat PMMA	245,000	2.2	274	–	1.29	119.5
PMMA-Graphene-1	172,000 <sup>a</sup>	1.84	293	0.1	1.69	125.5
PMMA-Graphene-2	173,000 <sup>a</sup>	1.8	300	0.5	2.00	131.2

<sup>a</sup> PMMA chains filtered out from the nanocomposites.

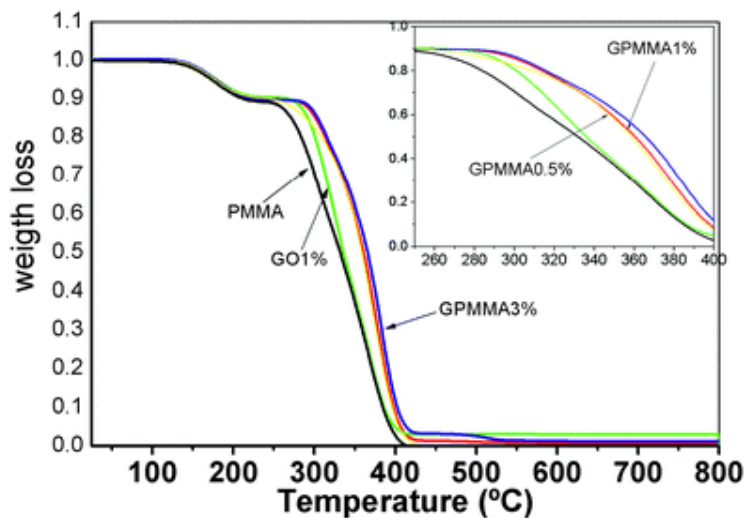


รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า โมดูลัส (MPa) กับ อุณหภูมิ (C) ของ Neat PMMA PMMA/graphene nanocomposite จากกระบวนการ TGA (Thermal Gravity Analysis) [12]

Gonçalves และ คณะ<sup>[13]</sup> ได้ศึกษาการนำ GO (Graphene oxide) มาทำเป็นสารเสริมแรงให้กับ PMMA โดยการทำให้อนุภาคของ GO (Graphene oxide) นั้นไปกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างของ PMMA โดยกำหนดปริมาณ GO (Graphene oxide) ที่ 1 % และ 3 % ในการทำเป็นสารเสริมแรงใน PMMA โดยพบว่า GO (Graphene oxide) สามารถเพิ่มสมบัติทางด้านความร้อนและสมบัติเชิงกลได้แบบมีนัยสำคัญ ซึ่งเติม GO (Graphene oxide) ที่ 0.5 และ 1 %w/w นั้น สมบัติทางความร้อนนั้นมีค่าที่สูงขึ้น แต่ ที่ 3 % นั้นมีสมบัติที่ด้อยลง



รูปที่ 2. 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเคียด (MPa) กับ ความเค้น (%) ของ PMMA GO และ GPMMA <sup>[13]</sup>



รูปที่ 2. 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักที่หายไปกับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ของ PMMA GO และ GPMMA จากกระบวนการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (TGA) <sup>[13]</sup>

การขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยวิธีการพิมพ์สามมิติกำลังได้รับความสนใจ โดยเทคนิคหนึ่งที่มีการนำมาใช้งานทางการค้าโดยทั่วไปคือเทคนิค stereolithography (SLA) Zhao และคณะ <sup>[14]</sup> พอลิยูรีเทนจำรูป (shape memory polyurethane) มาขึ้นรูปด้วยเทคนิค SLA โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เตรียมทดลองหา condition การพิมพ์จากค่าในตาราง 2.2 โดยจะดูผลจากความสมบูรณ์ของชิ้นงานว่ามีขนาดและรายละเอียดตรงความต้องการหรือไม่ เพื่อป้องกันการพิมพ์ที่ล้มเหลวและการสิ้นเปลืองเรซินโดยไม่จำเป็น หลังการพิมพ์ชิ้นงานจะหดตัวลงไปการเลือก condition จึงมีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานเช่นกัน ดังภาพ 2.14 สามารถวัดการหดตัวของชิ้นงานโดยใช้เวอร์เนียวัดชิ้นงานหลังพิมพ์ทันทีเทียบกับกับชิ้นงานที่คงรูปร่างสมบูรณ์

**ตารางที่ 2. 2** ความหนาการพิมพ์ของphotopolymer ที่อัตราเร็วและกำลังของแสงเลเซอร์ที่ต่างกัน <sup>[14]</sup>

The curing depths of photopolymer at different scanning speeds and exposure energies.

n	1	2	3	4	5	6
Scanning Speed [mm/s]	500	1000	2000	3000	4000	5000
Curing depth [mm]	2.807	2.256	1.825	1.515	1.358	1.171
Laser energy [mJ/cm <sup>2</sup> ]	500.0	250.0	125.0	83.3	62.5	50.0



**รูปที่ 2. 14** วัดชิ้นงานหลังพิมพ์ทันทีเทียบกับกับชิ้นงานที่คงรูปอย่างสมบูรณ์โดยใช้เวอร์เนีย <sup>[14]</sup>

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 สารเคมีที่เกี่ยวข้อง

1. พอลิเมทิลเมทาคริเลต
2. แกรไฟต์ (graphite)
3. กรดแอลแอสคอร์บิก ( $C_6H_8O_6$ )
4. กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ )
5. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $KMnO_4$ )
6. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ )
7. คลอโรฟอร์ม ( $CHCl_3$ )
8. น้ำกลั่นปราศจากไอออน

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูป

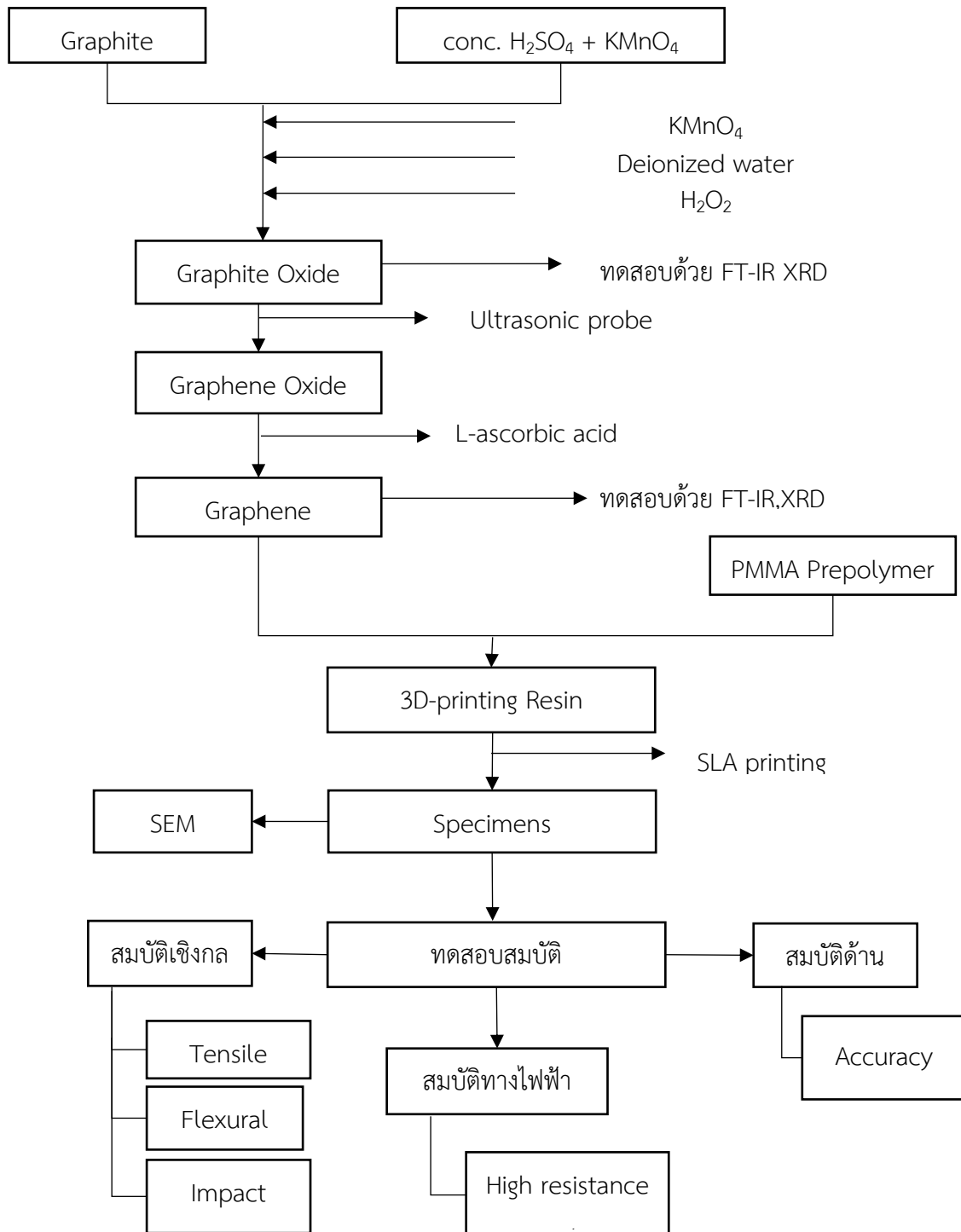
1. เครื่องกำเนิดคลื่นความถี่สูงชนิดโพรบ (ultrasonic probe sonicator)
2. เครื่องพิมพ์สามมิติระบบ stereolithography (SLA) และระบบ digital light processing (DLP)

#### 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติ

1. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)
2. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer, XRD)
3. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA)
4. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC)
5. เครื่องทดสอบแรงดึง หรือ เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine)
6. เครื่องทดสอบด้านความทนแรงกระแทก (impact testing machine)
7. เครื่องวิเคราะห์ค่าความต้านทานของวัสดุ (high resistance meter)
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

### 3.4 แผนภูมิข้อมูลการทดลอง

แผนภูมิขั้นตอนการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

### 3.5 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.5.1 การเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์ (graphite oxide) จากแกรไฟต์

สังเคราะห์แกรไฟต์ออกไซด์ โดยใช้วิธีการที่ดัดแปลงมาจากวิธีของแฮมเมอร์ (modified Hummer's method) ดังนี้

1. นำแกรไฟต์ 9 กรัม ผสมลงในสารละลายระหว่างกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตร 200 มิลลิลิตรและโซเดียมไนเตรต 4.5 กรัม เมื่อผสมเสร็จหล่อเย็นให้อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส
2. หลังจากนั้นนำโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 27 กรัม ผสมอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลา 30 นาที หลังจากนั้นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
3. เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด หยุดปฏิกิริยา โดยการเติมสารที่ทำปฏิกิริยาลงในของผสมระหว่างน้ำเย็น 800 มิลลิลิตร กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิลิตร
4. นำไปทำให้เป็นกลางด้วยการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และแยกชั้นแกรไฟต์ออกไซด์ ออกจากน้ำโดยการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จนกว่าสารจะเป็นกลาง
5. นำแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
6. หลังจากนั้นนำแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้มากระจายตัวในน้ำปราศจากไอออน ที่อัตราส่วนแกรไฟต์ออกไซด์ต่อน้ำปราศจากไอออน 2 กรัม/ลิตร แล้วกระจายตัวด้วยคลื่นความถี่สูงที่ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จะได้แกรฟีนออกไซด์

#### 3.5.2 การเตรียมแกรฟีน (graphene) จากแกรฟีนออกไซด์ (graphene oxide)

เตรียมแกรฟีนจากแกรฟีนออกไซด์โดยการนำแกรฟีนออกไซด์ที่ได้มาสั่นด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic probe sonicator) เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาเติมกรดแอสคอร์บิก 10 กรัมต่อแกรฟีน 1 กรัม พร้อมกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แกรฟีนที่ใช้ในการทดลองมี 2 รูปแบบแบบแรกนำแกรฟีนที่ได้ไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) และเก็บในรูปแบบผงแห้ง เพื่อนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

#### 3.5.3 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิเมทิลเมทาคริเลต/แกรฟีน

นำแกรฟีนที่เตรียมได้มากระจายตัวโดยการชั่งแกรฟีนตามอัตราส่วน 0.1 0.5 และ 1 phr ต่อเรซินของเหลวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตพรีพอลิเมอร์ 100 มิลลิลิตร นำแกรฟีนที่ชั่งมาใส่ลงขวดที่บรรจุเรซิน 100 มิลลิลิตรแล้วใช้ probe ในการกระจายตัวด้วยเครื่อง ultrasonicate

**ตารางที่ 3.1** อัตราส่วนของผสมระหว่างพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA)/แกรฟีน (G)

องค์ประกอบ	PMMA	PMMA/G0.1	PMMA/G0.5	PMMA/G1.0
แกรฟีน [g]	0	0.1	0.5	1
พอลิเมทิลเมทาคริเลต [g]	100	100	100	100

### 3.5.4 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

ขึ้นรูปชิ้นงานจากวัสดุเชิงประกอบเมทิลเมทาคริเลต/แกรฟีนด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติแบบ Direct Light Process (DLP) รุ่น Elegoo [Mars] เพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการพิมพ์ โดยการนำเรซินตามอัตราส่วนจากตารางที่ 3.1 มาทดลองพิมพ์สามมิติโดยใช้ค่าจากตารางที่ 3.2

Laser Wavelength = 405 nm

**ตารางที่ 3.2** ระยะเวลาให้แสงแต่ละชั้น (exposure time [s]) และระยะเวลาให้แสงฐาน (Bottom exposure time [s]) ในการพิมพ์ขึ้นงาน แต่ละชั้นความสูง (Layer Height (mm)) 0.05 มิลลิเมตร

Conditions	1	2	3	4	5	6	7
exposure time [s]	8	10	10	10	12	20	25
Bottom exposure time [s]	40	40	60	80	80	80	80

### 3.6 การวิเคราะห์ และทดสอบชิ้นงาน

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

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





รูปที่ 3. 2 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) รุ่น Nicolet 6700

### 3.6.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffractometer, XRD)

เพื่อศึกษาสารตัวอย่างด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (actometer, XRD) ของแกรไฟต์แกรไฟต์ ออกไซด์ และแกรไฟน โดยนำมาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างด้วยการสังเกตมุมหักเหของรังสีเอกซ์ ที่เปลี่ยนแปลง และระยะห่างระหว่างระนาบของสารตัวอย่าง

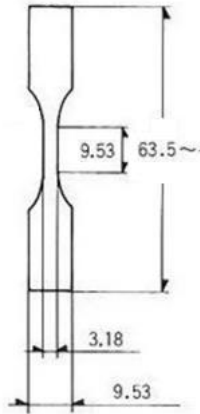


รูปที่ 3. 3 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) รุ่น D8 Advance

### 3.6.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties)

#### 3.6.3.1 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (tensile properties)

เตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638-14 โดยการเตรียมชิ้นทดสอบในรูปดัมเบล (dumbbell, type I) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 นำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.5) โดยใช้ load cell ขนาด 10 กิโลนิวตัน และอัตราเร็วในการดึงยึด 50 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้น ต่อ 1 ตัวอย่าง พร้อมวิเคราะห์ความทนแรงดึง (tensile strength) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) และยังสัมมอดูลัส (Young's modulus)



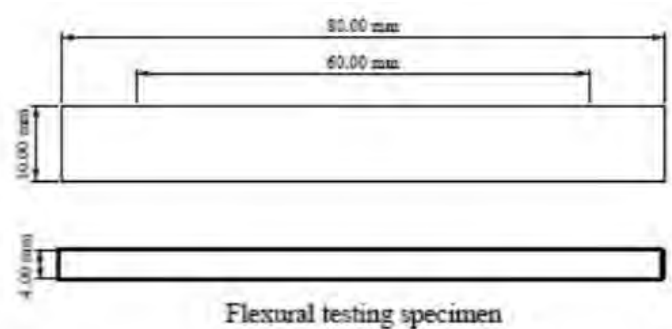
รูปที่ 3. 4 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบในรูปดัมเบลตามมาตรฐาน ASTM D638-14 type V



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล

### 3.6.3.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength)

เตรียมชิ้นงานตัวอย่างทดสอบและทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-10 โดยการเตรียมชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูป 3.6

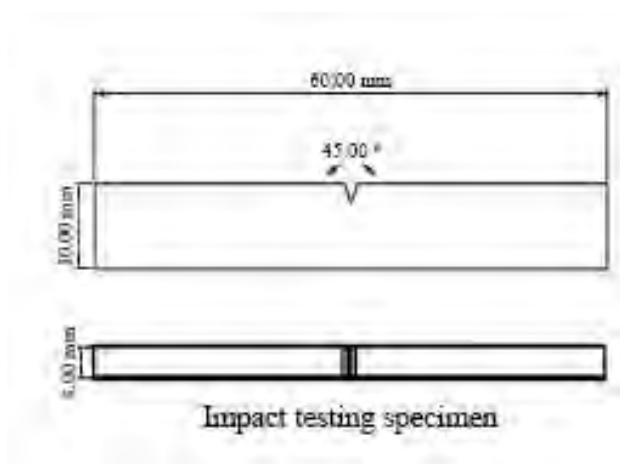


รูปที่ 3. 6 ตัวอย่างชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-10

จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลในรูปที่ 3.6 โดยทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง พร้อมวิเคราะห์ค่าความทนแรงดัดโค้งของชิ้นทดสอบ

### 3.6.3.3 การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength)

เตรียมชิ้นตัวอย่างที่จะนำไปทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จากนั้นนำไปทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก ยี่ห้อ GOTTECH รุ่น GT-7045-MDH (รูปที่ 3.8) โดยทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง พร้อมวิเคราะห์ค่าความทนแรงกระแทก



รูปที่ 3.7 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256-10

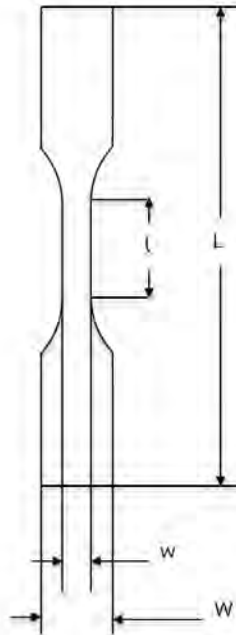


รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบสมบัติด้านความทนแรงกระแทก รุ่น GT-7045-MDH

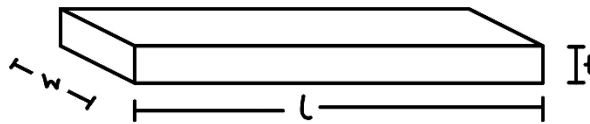
### 3.6.4 การทดสอบสมบัติด้านการพิมพ์ (accuracy test)

เตรียมแบบชิ้นงานตัวอย่างโดยกำหนดความสูง ความกว้าง และ ความยาว อย่างน้อย 3 ครั้งแล้วนำไปพิมพ์สามมิติออกมาชิ้นงานค่าละ 3 ชิ้น จะสังเกตผลโดยการวัดความสูง ความกว้าง และ ความยาว (รูปที่ 3.9

-3.10) เทียบกับแบบชิ้นงานก่อนพิมพ์ รวมทั้งวัดองศาบริเวณมุมของชิ้นงาน เพื่อให้ทราบความแม่นยำในการพิมพ์ชิ้นงานอย่างง่าย



รูปที่ 3. 9 ตำแหน่งการวัดขนาดชิ้นงานดัมเบลที่เตรียมได้จากการพิมพ์สามมิติ



รูปที่ 3. 10 ตำแหน่งการวัดขนาดชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่เตรียมได้จากการพิมพ์สามมิติ

### 3.6.5 การตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานและบริเวณรอยแตก (fracture surface) ของชิ้นทดสอบหลังการแตกหักถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) และสามารถเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาพื้นผิวบริเวณรอยแตกของชิ้นทดสอบ ได้โดยการนำชิ้นทดสอบที่แตกหักหลังผ่านการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง มาตัดให้ได้ความยาวขนาด 3-5 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวไปเคลือบทองในลักษณะวางราบโดยหยาบบริเวณรอยแตกขึ้น เพื่อนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของแกรไฟีนอย่างคร่าว ๆ โดยศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 15 กิโลโวลต์



รูปที่ 3. 11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น SU3500

### 3.6.6 การศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)

ศึกษาความสามารถในการนำไฟฟ้าของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความเป็นฉนวนของวัสดุ (รูปที่ 3.12) โดยการใช้ขั้วทดสอบลักษณะเข็ม กดทดสอบบริเวณปลายของชิ้นงานทั้งสองด้านที่ระยะห่าง 1, 2, 3, 4, และ 5 เซนติเมตร แล้วจึงวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 10 โวลต์ ก่อนจะนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3. 12 เครื่องทดสอบไฟฟ้า (High resistance meter) รุ่น 4339B



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การสังเคราะห์แกรฟีน และสมบัติของแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์ และแกรฟีน

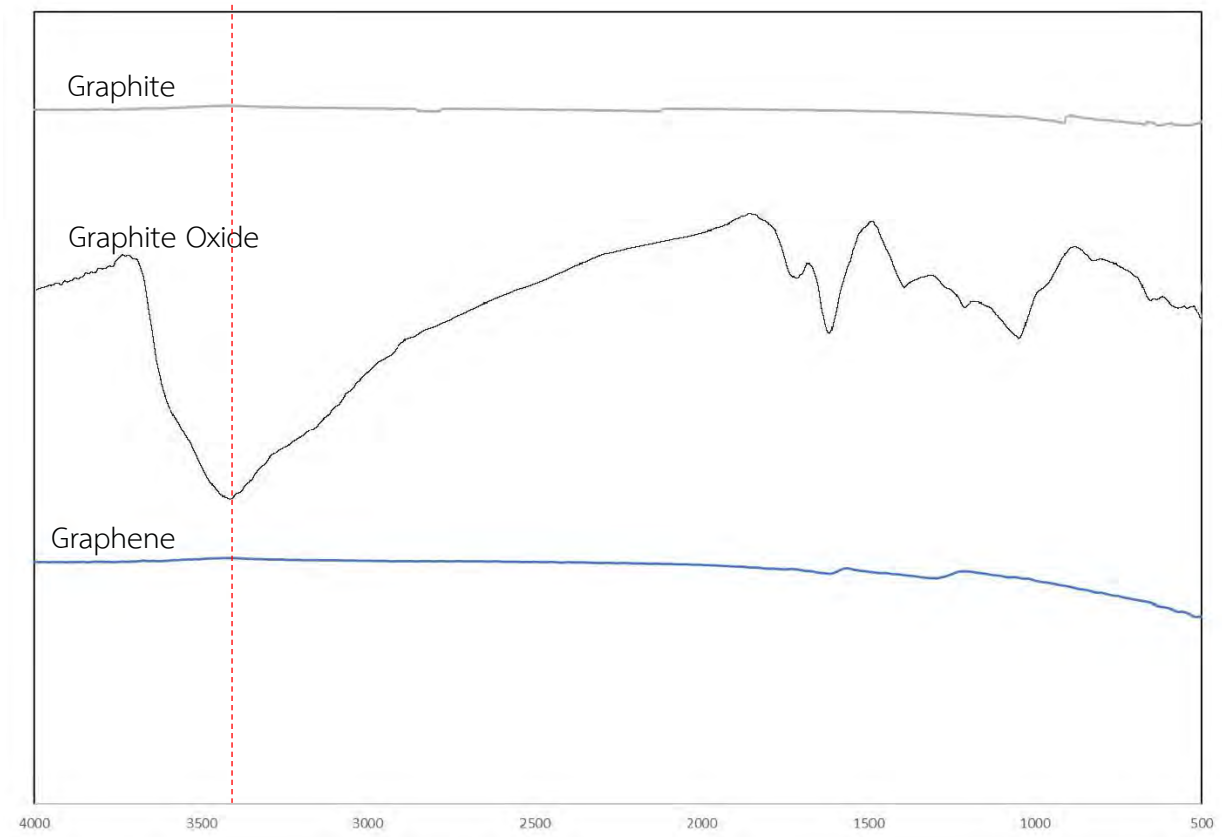
งานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้วิธีสังเคราะห์แกรฟีนโดยวิธีการแฮมเมอร์ (Hummer's method) โดยการสังเคราะห์หนึ่งครั้งจะได้แกรฟีนประมาณ 10-14 กรัม แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการใช้แกรฟีนในปริมาณมากกว่าปริมาณที่สามารถสังเคราะห์ต่อครั้ง ผู้วิจัยต้องสังเคราะห์จำนวนหลายครั้งเพื่อให้ได้ปริมาณที่ต้องการ เพื่อให้แน่ใจว่าแกรฟีนที่ได้จากการสังเคราะห์ในแต่ละครั้งมีสมบัติเหมือนกัน จึงได้ตรวจสอบสมบัติเฉพาะตัวของแกรฟีนจากการสังเคราะห์แต่ละครั้ง ดังนี้

##### 4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การวิเคราะห์ของหมู่ฟังก์ชันของแกรไฟต์เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในรูปแบบที่ 4.1 พบว่าเส้นสเปกตรัมไม่ปรากฏพีกของหมู่ฟังก์ชันอื่นเลย เนื่องจากแกรไฟต์มีแต่อะตอมของคาร์บอนที่เชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์เพียงอย่างเดียวในโครงสร้างจึงไม่พบพีกบนเส้นสเปกตรัม

ส่วนต่อมาคือการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากการออกซิเดชัน แกรไฟต์ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น โซเดียมไนเตรต และ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแกรไฟต์เกิดหมู่ฟังก์ชันคือพันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับออกซิเจนขึ้น แสดงออกมาบนสเปกตรัมบริเวณตำแหน่ง  $3400\text{ cm}^{-1}$   $1700\text{ cm}^{-1}$  และ  $1200\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ในการสั่นของ หมู่ไฮดรอกซิล (C-OH) หมู่คาร์บอนิล (C=O) หมู่คาร์บอกซิลิก ( $-(\text{C}=\text{O})-\text{OH}$ ) และหมู่อีพ็อกไซด์ (C-O-C) ตามลำดับ นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง  $1620\text{ cm}^{-1}$  ยังปรากฏพีกซึ่งมีลักษณะความถี่การสั่นใกล้เคียงกับอะตอมของคาร์บอนที่เกิดพันธะคู่กับอะตอมคาร์บอนใกล้เคียง ( $-\text{C}=\text{C}-$ ) จากที่กล่าวมาทำให้สามารถยืนยันโครงสร้างที่ประกอบด้วยฟังก์ชันของอะตอมออกซิเจนกับอะตอมของคาร์บอนไดออกไซด์

นอกจากที่ได้วิเคราะห์แกรไฟต์และแกรไฟต์ออกไซด์ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์แกรฟีนที่ได้จากการทำปฏิกิริยารีดักชันของแกรฟีนออกไซด์กับกรดแอสคอร์บิก เมื่อนำสเปกตรัมของแกรฟีนออกไซด์มาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของแกรฟีนพบว่าพีกที่บริเวณตำแหน่ง  $3400\text{ cm}^{-1}$  พีกได้หายไป จึงสามารถยืนยันจากกราฟได้ว่าสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้อย่างสมบูรณ์จนได้ผลิตภัณฑ์เป็นแกรฟีน



รูปที่ 4. 1 อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคแกรไฟต์ แกรฟีนออกไซด์ และแกรฟีน จากการสังเคราะห์ครั้งที่ 1

## 4.2 สมบัติด้านการพิมพ์

การพิมพ์ชิ้นงานสามมิติจำเป็นต้องมีรูปร่างที่แน่นอนและภาวะที่เหมาะสมในการพิมพ์ชิ้นให้ออกมาสมบูรณ์ จึงต้องมีการเปรียบเทียบรูปร่างหลังพิมพ์ชิ้นงานระหว่างแต่ละภาวะกับชิ้นงานมาตรฐาน โดยชิ้นงานมาตรฐานจะใช้เครื่อง Form2 ระบบ SLA ในการพิมพ์ เนื่องจากการพิมพ์ที่แม่นยำ ชิ้นงานมีความคมชัด โอกาสเกิดจุดบกพร่องบนชิ้นงานต่ำ แต่ข้อเสียคือไม่สามารถปรับภาวะการพิมพ์ได้ จึงนำมาใช้พิมพ์ได้เพียงชิ้นงานที่กำหนดเป็นรูปทรงมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงรูปทรงที่ควรจากการพิมพ์ครั้งอื่น

### 4.2.1 การทดลองการพิมพ์สามมิติระบบ SLA

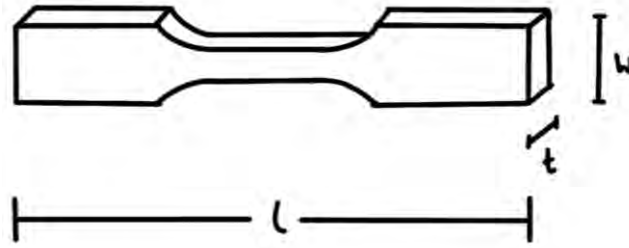
ในการทดลองพิมพ์ชิ้นงาน ผู้ทดลองได้ทดลองพิมพ์ชิ้นงานสามมิติทดสอบแรงดึงรูปดัมเบล และชิ้นงานสามมิติทดสอบแรงกระแทก โดยเครื่อง Form2 ระบบ SLA



รูปที่ 4. 2 ชิ้นงานดัมเบล โดยเครื่อง Form2 ระบบ SLA



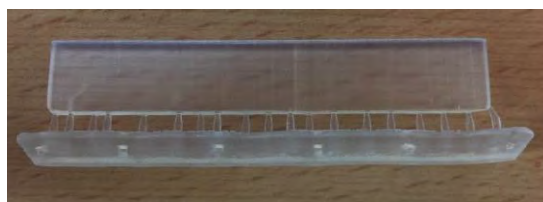
วัดขนาดชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์สามมิติ ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูป 4.3



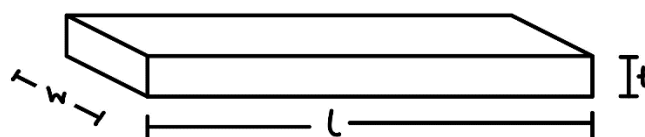
รูปที่ 4. 3 ตำแหน่งการวัดขนาดชิ้นงานดัมเบลที่เตรียมได้จากการพิมพ์สามมิติ

ตารางที่ 4.1 ขนาดของชิ้นงานดัมเบลที่พิมพ์ด้วยเครื่อง Form2 ระบบ SLA

	ความหนา (mm)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm)	ความกว้างชิ้นงาน , W (mm)	ความยาว guage length, l (mm)	ความกว้าง gage width, w (mm)
โมเดลต้นแบบ (STL file)	3.10	63.60	9.70	8.15	3.30
ชิ้นงานดัมเบล 1	3.10	63.60	9.70	8.13	3.30
ชิ้นงานดัมเบล 2	3.10	63.60	9.70	8.15	3.30
ชิ้นงานดัมเบล 3	3.10	63.60	9.70	8.13	3.30
ค่าเฉลี่ย	3.10	63.60	9.70	8.14	3.30
S.D.	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00



รูปที่ 4. 4 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก โดยเครื่อง Form2 ระบบ SLA



รูปที่ 4. 5 ตำแหน่งการวัดขนาดชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่เตรียมได้จากการพิมพ์สามมิติ

**ตารางที่ 4.2** ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่พิมพ์ด้วยเครื่อง Form2 ระบบ SLA

	ความหนา (mm)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm)
โมเดลต้นแบบ (STL file)	2.4	61.0	11.0
ชิ้นงานImpact 1	2.4	61.0	11.0
ชิ้นงานImpact 2	2.4	61.0	11.0
ชิ้นงานImpact 3	2.4	61.0	11.0
ค่าเฉลี่ย	2.4	61.0	11.0
S.D.	0.0	0.0	0.0

จากการทดสอบการพิมพ์ พบว่าชิ้นงานที่พิมพ์ได้จากเครื่อง Form2 ระบบ SLA มีขนาดเท่ากับโมเดลต้นแบบที่ออกแบบไว้ สามารถกล่าวได้ว่าการพิมพ์ด้วยระบบ SLA ให้ความแม่นยำในการพิมพ์สูง เนื่องจากการพิมพ์ด้วยเลเซอร์แสดงเป็น dot spot ให้ความละเอียดและความแม่นยำสูง แต่มีข้อเสียคือใช้เวลานานในการพิมพ์ชิ้นงาน

#### 4.2.2 การทดลองการพิมพ์สามมิติระบบฉายแสงดิจิทัลด้วยจีโอโปรเจกเตอร์สู่สภาพเรซิน (Digital Light Processing, DLP)

สำหรับการทดสอบการพิมพ์ชิ้นงานด้วยระบบฉายแสงดิจิทัลด้วยจีโอโปรเจกเตอร์สู่สภาพเรซิน หรือ DLP นั้น ผู้ทดลองได้เริ่มต้นโดยการหาภาวะที่เหมาะสมในการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติ โดยใช้ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงรูปดัมเบลและชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก เป็นต้นแบบ โดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติ Elegoo ระบบ DLP โดยใช้ภาวะตั้งต้นในการทดสอบอ้างอิงจากภาวะที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องระบบ SLA โดยใช้ exposure time 20 วินาที และ Bottom exposure time 80 วินาทีในการพิมพ์ชิ้นงาน แต่ละชั้นความสูง (layer height (mm)) 0.05 มิลลิเมตร โดยกำหนดทิศทางการพิมพ์ให้วางชิ้นงานด้านกว้างตามแนวแกน Y และด้านยาวในแนวแกน X ตามรูปที่ 4.6 ภาวะที่ใช้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4. 3 ภาวะการพิมพ์ทดลองครั้งแรก

Layer Height	0.05 mm
Bottom Layer Count	5
exposure time	20 s
Bottom exposure time	80 s
Light-off Delay	0 s
Bottom Light-off Delay	1 s

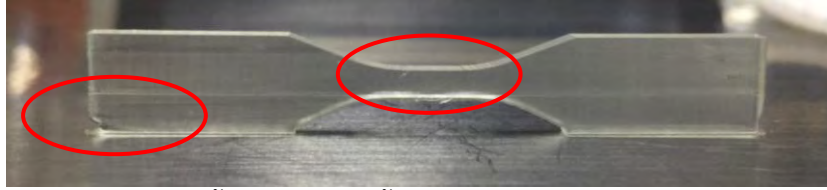


รูปที่ 4. 6 ทิศทางการพิมพ์ชิ้นงานดัมเบลครั้งที่ 1 บนโปรแกรม ChiTuBox



รูปที่ 4. 7 เครื่องพิมพ์ขณะทดลองการพิมพ์

รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะเครื่องพิมพ์สามมิติ Elegoo ขณะพิมพ์ชิ้นงาน จากการทดลองการพิมพ์ชิ้นงานดัมเบลชั้นที่ 1 ปรากฏว่าชิ้นงานที่ได้นั้นเกิดการโค้งงอเล็กน้อยบริเวณกลางชิ้นงานส่วนที่มีลักษณะคอด และบริเวณฐานเกิดการฉีกขาดจากการพิมพ์ ดังในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4. 8 ชิ้นงานดัมเบลครั้งที่ 1 เครื่อง Elegoo ระบบ DLP

ตารางที่ 4. 4 ขนาดของชิ้นงานดัมเบลที่พิมพ์ด้วยเครื่อง Elegoo ระบบ DLP

	ความหนา (mm)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm)	ความยาว guage length,l (mm)	ความกว้าง gage width, w (mm)
ชิ้นงานดัมเบล	3.10	63.10	9.40	7.87	3.00

จากการทดลองการพิมพ์ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกชิ้นที่ 1 ปรากฏว่าชิ้นงานที่ได้นั้นเกิดการโค้งงอเล็กน้อยบริเวณกลางชิ้นงานบริเวณฐานเกิดการฉีกขาดจากการพิมพ์ ดังในรูปที่ 4.9

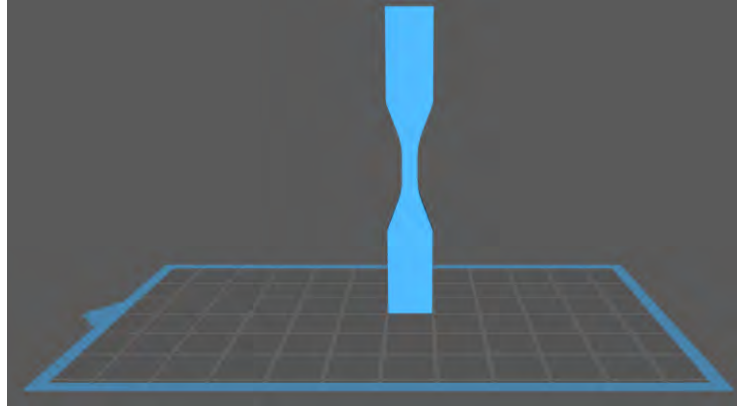


รูปที่ 4. 9 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกครั้งที่ 1 เครื่อง Elegoo ระบบ DLP

ตารางที่ 4.5 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่พิมพ์ด้วยเครื่อง Elegoo ระบบ DLP

	ความหนา (mm)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm)
ชิ้นงาน Impact	2.20	59.00	9.70

จุดบกพร่องที่กล่าวมานั้นเกิดจากลักษณะการตั้งชิ้นงานของเครื่องพิมพ์สามมิติขณะพิมพ์ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการปรับทิศทางกรพิมพ์ชิ้นงาน โดยการทดลองพิมพ์สามมิติครั้งถัดไปจะกำหนดทิศทางของชิ้นงานในลักษณะการวางด้านกว้างตามแนวแกน X และด้านยาวในแนวแกน Y ตามรูปที่ 4.10 หรืออาจทดลองเปลี่ยนภาวะการพิมพ์โดยเพิ่มเวลาการให้แสงกับชิ้นงานในแต่ละชั้น exposure time เป็น 25 วินาทีตามตารางที่ 4.6

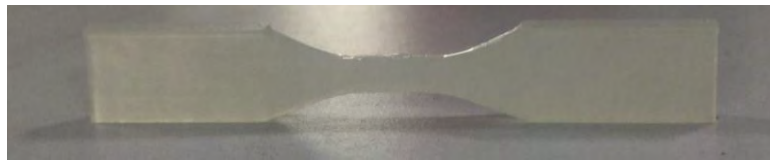


รูปที่ 4. 10 ทิศทางการพิมพ์ชิ้นงานดัมเบล บนโปรแกรม ChiTuBox

ตารางที่ 4. 6 ภาวะการพิมพ์ที่ 2

Layer Height	0.05 mm
Bottom Layer Count	5
exposure time	25 s
Bottom exposure time	80 s
Light-off Delay	0 s
Bottom Light-off Delay	1 s

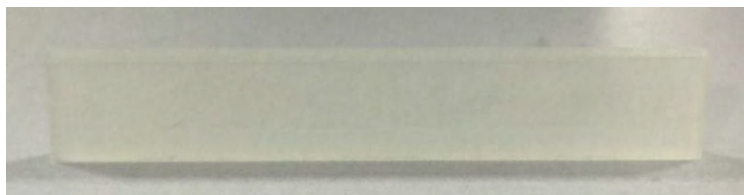
ผลการทดลองหาพิมพ์ชิ้นงานหลังการพิมพ์โดยใช้ภาวะการพิมพ์ที่ 2 ตามตาราง 4.6 โดยทดลองพิมพ์ชิ้นงานดัมเบลและชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4. 11 ชิ้นงานดัมเบลเครื่อง Elegoo ระบบ DLP โดยใช้ภาวะการพิมพ์ที่ 2

ตารางที่ 4.7 ขนาดของชิ้นงานดัมเบลที่พิมพ์ด้วยเครื่อง Elegoo ระบบ DLP โดยใช้ภาวะการพิมพ์ที่ 2

	ความหนา (mm)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm)	ความกว้างชิ้นงาน , W (mm)	ความยาว guage length, l (mm)	ความกว้าง gage width, w (mm)
ชิ้นงานดัมเบล	3.10	63.28	9.60	7.85	3.08

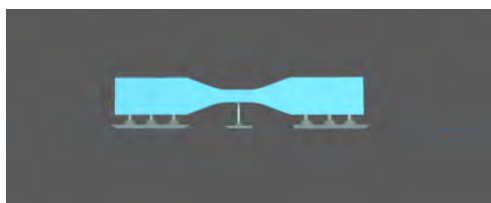


รูปที่ 4.12 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกเครื่อง Elegoo ระบบ DLP โดยใช้ภาวะการพิมพ์ 2

ตารางที่ 4.8 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่พิมพ์ด้วยเครื่อง Elegoo ระบบ DLP โดยใช้ภาวะการพิมพ์ 2

	ความหนา (mm)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm)
ชิ้นงานImpact	2.37	59.70	11.10

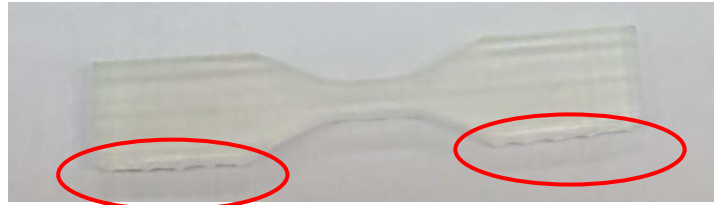
จากการเปลี่ยนภาวะโดยให้ exposure time มากขึ้นเป็น 25 วินาที ทำให้ชิ้นงานพิมพ์ออกมามีความสมบูรณ์มากขึ้น แต่ชิ้นงานดัมเบลบริเวณส่วนคอดเกิดความโค้งงออย่างที่ไม่ได้ต้องการตามแบบเพียงเล็กน้อย จึงใช้วิธีแก้ไข 2 วิธี คือ ทดลองการพิมพ์โดยเปลี่ยนทิศทางารพิมพ์ของชิ้นงานตามรูป 4.13 อีกวิธีคือทดลองพิมพ์ชิ้นงานในแนวทิศทางเดิมโดยเพิ่ม support span บริเวณส่วนคอดและบริเวณป้านของชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดเท่ากันทุกส่วน ดังรูปที่ 4.13 นอกจากนี้ปัญหาดังกล่าว ยังมีปัญหาอื่นอีก เช่น พิมพ์ชิ้นงานไม่สมบูรณ์พิมพ์สำเร็จแค่ครึ่งชิ้นในบางครั้ง



รูปที่ 4.13 ชิ้นงานดัมเบลที่มี light support ตรงกลางและ heavy support ด้านข้างชิ้นงาน บนโปรแกรม

ChiTuBox

ทดสอบการพิมพ์หลังการเพิ่ม support span บนชิ้นงานดัมเบลได้ผลว่า ชิ้นงานดัมเบลมีความสม่ำเสมอด้านขนาดชิ้นงานในแต่ละด้านมากขึ้น แต่ใช้เวลาในการพิมพ์ชิ้นงานเพิ่มขึ้นและชิ้นงานเกิดรอยขรุขระจากการเติม heavy support ด้านข้างชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.14

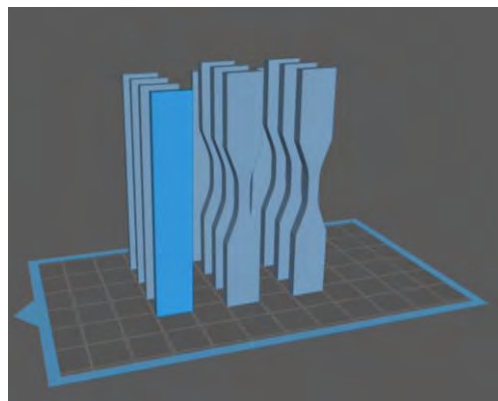


รูปที่ 4.14 ชิ้นงานดัมเบลที่มี light support ตรงกลางและ heavy support ด้านข้าง โดยใช้ภาวะการพิมพ์ที่ 2

ตารางที่ 4.9 ขนาดของชิ้นงานดัมเบลที่มี light support ตรงกลางและ heavy support ด้านข้าง โดยใช้ภาวะการพิมพ์ที่ 2

	ความหนา (mm)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm)	ความยาว guage length, l (mm)	ความกว้าง gage width, w (mm)
ชิ้นงานดัมเบล	3.03	63.23	9.72	7.83	3.07

ทดลองการพิมพ์โดยเปลี่ยนทิศทางการพิมพ์ของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยพิมพ์ชิ้นงานดัมเบลและชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกอย่างละ 6 ชิ้น โดยเรียงดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ชิ้นงานดัมเบลและชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกบนโปรแกรม ChiTuBox

ผลที่ได้คือได้ชิ้นงานดัมเบล 6 ชิ้น และชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก 2 ชิ้น คาดว่าเกิดจากการจัดวางที่เรียงชิดเกินไป ขนาดชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.16 ชิ้นงานดัมเบลในทิศทางพิมพ์ด้านยาวตามแนวแกน Y

ตารางที่ 4.10 ขนาดของชิ้นงานดัมเบลในทิศทางด้านยาวตามแกน Y

	ความหนา (mm)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm)	ความยาว guage length, l (mm)	ความกว้าง gage width, w (mm)
ชิ้นงานดัมเบล1	2.95	60.25	9.20	7.01	3.00
ชิ้นงานดัมเบล2	3.00	60.10	9.35	7.03	3.00
ชิ้นงานดัมเบล3	3.00	60.10	9.38	7.01	3.00
ชิ้นงานดัมเบล4	3.00	60.10	9.28	7.02	3.00
ชิ้นงานดัมเบล5	3.03	60.10	9.25	7.03	3.05
ชิ้นงานดัมเบล6	2.95	60.15	9.25	7.01	2.95
ค่าเฉลี่ย	2.98	60.13	9.28	7.02	3.00
S.D.	0.03	0.06	0.06	0.01	0.03



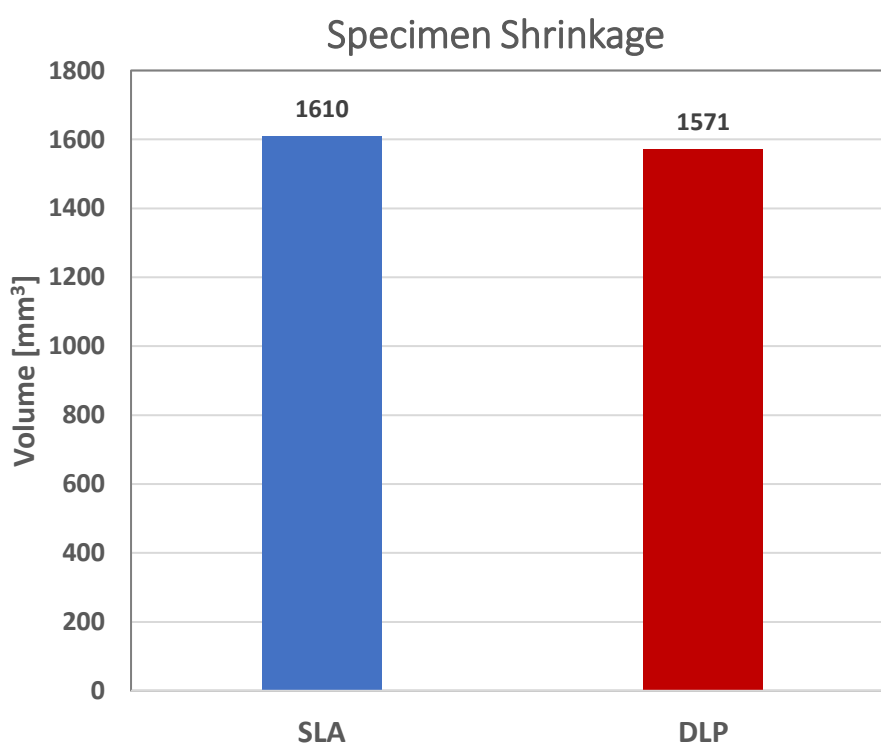
รูปที่ 4.17 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกในทิศทางด้านยาวตามแกน Y



**ตารางที่ 4.11** ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกในทิศทางด้านยาวตามแกน Y

	ความหนา (mm)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm)
ชิ้นงานImpact1	2.30	56.58	9.72
ชิ้นงานImpact2	2.28	56.65	9.72
ค่าเฉลี่ย	2.29	56.63	9.72
S.D.	0.02	0.04	0.00

หลังจากการทดลองพิมพ์ชิ้นงานจากระบบ SLA และ DLP นำชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกมาเปรียบเทียบค่าการหด จากแบบที่ออกแบบไว้มีปริมาตร 1,610 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ได้ผลว่า ชิ้นงาน SLA ไม่มีการหดตัว และ ชิ้นงาน DLP มีการหดตัว 2.42% เมื่อเทียบปริมาตรของต้นแบบ



**รูปที่ 4.18** การหดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่พิมพ์ด้วยระบบ SLA และ DLP

**ตารางที่ 4.12** ข้อดี-ข้อเสียของวิธีการพิมพ์แบบต่างๆ ในระบบ DLP

วิธีการพิมพ์	ข้อดี	ข้อเสีย
การพิมพ์ด้านยาวตามแนวแกนX (การพิมพ์แนวนอน)	- ใช้เวลาในการพิมพ์น้อยสุด	- ชิ้นงานมีด้านยาวไม่เท่ากัน ตลอดชิ้นงาน - จำนวนพิมพ์ต่อครั้งต่ำ - ชิ้นงานดัมเบลส่วนคอดไม่มี สัดส่วนเพี้ยนไม่สมมาตร ส่วน ที่เพี้ยนส่งผลต่อการทดสอบ
การพิมพ์ด้านยาวตามแนวแกนXมี support span	- ใช้เวลาในการพิมพ์น้อยกว่า การพิมพ์ด้านยาวตาม แนวแกนY	- เกิดรอยจาก support span บนชิ้นงาน - ชิ้นงานพิมพ์สำเร็จไม่สำเร็จ บ้าง
การพิมพ์ด้านยาวตามแนวแกนY (การพิมพ์แนวตั้ง)	- ได้ชิ้นงานสมมาตร - สามารถขึ้นชิ้นงานได้ที่ละ จำนวนมากๆ	- ใช้เวลาในการพิมพ์มาก
การพิมพ์ด้านยาวตามแนวแกนY มี support span	- ได้ชิ้นงานสมมาตร	- พิมพ์ชิ้นงานส่วนใหญ่ไม่สำเร็จ ขึ้นชิ้นงานได้ยาก - ใช้เวลาในการพิมพ์มาก

จากการทดลองการพิมพ์สามมิติระบบฉายแสงดิจิทัลด้วยจอโปรเจคเตอร์สู่ถาดเรซินโดยใช้เรซิน PMMA บริสุทธิ์ ชิ้นงานที่ได้ทั้งดัมเบลและชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกมีการหดตัวเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ได้จากเครื่อง Form 2 ระบบ SLA

#### 4.2.3 ผลการพิมพ์สามมิติระบบฉายแสงดิจิทัลด้วยจอโปรเจคเตอร์สู่ถาดเรซินโดยใช้เรซินผสมแกรฟีน

เนื่องจากเครื่องพิมพ์เครื่อง Form2 ระบบ SLA มีความจำเพาะกับชนิดเรซินที่นำมาใช้งานจึงไม่สามารถนำเรซินผสมมาทดลองพิมพ์ในระบบเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบ ในทดลองใช้ภาวะ 2 ตาราง 4.6 ทดลองการพิมพ์ที่สามารถพิมพ์เรซินผสม PMMA/graphene

**การทดลองพิมพ์ PMMA /Graphene โดยมีแกรฟีน 0.1 phr**

**ครั้งที่ 1** พิมพ์ชิ้นงานดัมเบล3 ชิ้น ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก 3 ชิ้น

**สำเร็จ** ชิ้นงานดัมเบล3 ชิ้น ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก 2 ชิ้น



รูปที่ 4. 19 ชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.1 phr ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4. 13 ขนาดของชิ้นงานดัมเบล PMMA /Graphene 0.1 phr ครั้งที่ 1

	ความหนา (mm)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm)	ความกว้างชิ้นงาน , W (mm)	ความยาว guage length,l (mm)	ความกว้าง gage width, w (mm)
ชิ้นงานดัมเบล1	3.07	62.39	9.28	8.02	3.04
ชิ้นงานดัมเบล2	3.03	62.41	9.18	8.12	3.02
ชิ้นงานดัมเบล3	3.03	62.38	9.18	8.08	2.99
เฉลี่ย	3.04	62.40	9.21	8.07	3.02
S.D.	0.03	0.01	0.06	0.04	0.04



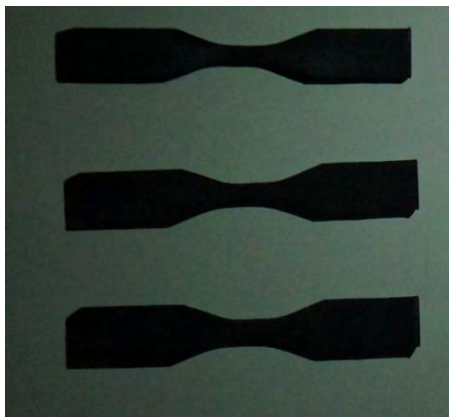
รูปที่ 4. 20 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก MMA prepolymer/Graphene 0.1 phr ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4. 14 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA /Graphene 0.1 phr ครั้งที่ 1

	ความหนา (mm.)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm.)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm.)
ชิ้นงาน Impact1	2.32	58.68	9.57
ชิ้นงาน Impact2	2.33	58.68	9.66
เฉลี่ย	2.32	58.68	9.62
S.D.	0.03	0.00	0.06

ครั้งที่ 2 พิมพ์ชิ้นงานดัมเบล 3 ชิ้น ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก 3 ชิ้น

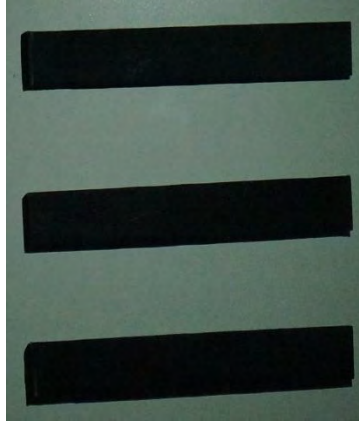
สำเร็จ ทั้งหมด



รูปที่ 4. 21 ชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.1 phr สามมิติครั้งที่ 2

ตารางที่ 4. 15 ขนาดของชิ้นงานดัมเบล PMMA /Graphene 0.1 phr ครั้งที่ 2

	ความหนา (mm.)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm.)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm.)	ความยาว guage length, l (mm.)	ความกว้าง gage width, w (mm.)
ชิ้นงานดัมเบล1	3.08	62.19	9.25	6.51	3.05
ชิ้นงานดัมเบล2	3.06	62.11	9.25	7.05	2.96
ชิ้นงานดัมเบล3	3.08	62.26	9.33	6.61	3.07
เฉลี่ย	3.07	62.18	9.28	6.72	3.02
S.D.	0.02	0.07	0.04	0.04	0.06



รูปที่ 4. 22 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA /Graphene 0.1 phr ครั้ง 2

ตารางที่ 4. 16 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA /Graphene 0.1 phr ครั้ง 2

	ความหนา (mm.)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm.)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm.)
ชิ้นงานImpact	2.36	58.61	9.71
ชิ้นงานImpact	2.35	58.61	9.75
ชิ้นงานImpact	2.37	58.57	9.73
เฉลี่ย	2.36	58.60	9.73
S.D.	0.03	0.03	0.02

ครั้ง 3 พิมพ์ชิ้นงานดัมเบล3 ชิ้น ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก 3 ชิ้น

สำเร็จ ชิ้นงานดัมเบล3 ชิ้น ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก 2 ชิ้น



รูปที่ 4. 23 ชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.1 phr ครั้งที่ 3

**ตารางที่ 4.17** ขนาดของชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.1 phr ครั้งที่ 3

	ความหนา (mm.)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm.)	ความกว้างชิ้นงาน , W (mm.)	ความยาว guage length,l (mm.)	ความกว้าง gage width, w (mm.)
ชิ้นงานดัมเบล1	3.03	62.39	9.31	6.78	3.03
ชิ้นงานดัมเบล2	3.05	62.26	9.34	6.94	3.07
ชิ้นงานดัมเบล3	3.05	62.27	9.30	6.89	3.00
เฉลี่ย	3.04	62.31	9.32	6.87	3.04
S.D.	0.01	0.06	0.05	0.07	0.04



**รูปที่ 4. 24** ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA /Graphene 0.1 phr ครั้งที่ 3

**ตารางที่ 4. 18** ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA /Graphene 0.1 phr ครั้งที่ 3

	ความหนา (mm.)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm.)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm.)
ชิ้นงานImpact1	2.33	58.75	9.75
ชิ้นงานImpact2	2.32	58.73	9.74
เฉลี่ย	2.33	58.74	9.75
S.D.	0.03	0.03	0.01

การทดลองพิมพ์ชิ้นงาน PMMA/graphene โดยมีแกรฟีน 0.1 phr ได้ชิ้นงานส่วนใหญ่มีลักษณะใกล้เคียงชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์จากเครื่อง Form 2 ระบบ SLA เพียงแต่มีการหดตัวเพียงเล็กน้อย

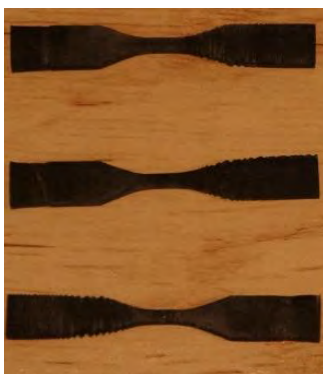
**การทดลองพิมพ์ PMMA /Graphene โดยมีแกรฟีน 0.5 phr**

**ครั้งที่ 1** พิมพ์ชิ้นงานดัมเบล3 ชิ้น ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก 3 ชิ้น

**สำเร็จ** ทั้งหมด แต่ชิ้นงานเป็นรอยฟันปลาทั่วทั้งชิ้นงาน



รูปที่ 4.25 เครื่องพิมพ์ชั้นงาน PMMA/graphene 0.5 phr



รูปที่ 4.26 ชั้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.5 phr ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.19 ขนาดของชั้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.5 phr ครั้งที่ 1

	ความหนา (mm.)	ความยาวชั้นงาน, L (mm.)	ความกว้างชั้นงาน , W (mm.)	ความยาว guage length, l (mm.)	ความกว้าง guage width, w (mm.)
ชั้นงานดัมเบล 1	2.98	62.00	8.75	7.96	2.87
ชั้นงานดัมเบล 2	2.97	62.00	8.93	7.87	2.83
ชั้นงานดัมเบล 3	3.00	62.10	9.10	7.93	2.9
เฉลี่ย	2.98	62.03	8.92	7.92	2.87
S.D.	0.12	0.07	0.16	0.04	0.08



รูปที่ 4. 27 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 1

ตารางที่ 4. 20 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 1

	ความหนา (mm.)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm.)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm.)
ชิ้นงานImpact1	2.13	57.90	9.20
ชิ้นงานImpact2	2.11	58.35	9.23
ชิ้นงานImpact3	2.11	58.18	9.21
เฉลี่ย	2.11	58.20	9.21
S.D.	0.02	0.20	0.24

การพิมพ์ครั้งที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนจากเครื่องพิมพ์ขัดข้องจึงทำให้พิมพ์ชิ้นงานออกมามีรูปร่างแปลกเกิดรอยคล้ายฟันปลาบนผิวชิ้นงาน

ครั้งที่ 2 พิมพ์ชิ้นงานดัมเบล 1 ชิ้น ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก 1 ชิ้น

สำเร็จ ทั้งหมด



รูปที่ 4. 28 ชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง



ตารางที่ 4. 21 ขนาดของชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 2

	ความหนา (mm.)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm.)	ความกว้างชิ้นงาน , W (mm.)	ความยาว guage length,l (mm.)	ความกว้าง guage width,w (mm.)
ชิ้นงานดัมเบล	2.92	62.55	9.10	7.10	2.87



รูปที่ 4. 29 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 2

ตารางที่ 4. 22ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 2

	ความหนา (mm.)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm.)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm.)
ชิ้นงานImpact	2.17	58.91	9.53

ครั้ง 3 และ 4 พิมพ์ชิ้นงานดัมเบล 3 ชิ้น ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก 3 ชิ้น

สำเร็จ ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก ครั้งละ 1 ชิ้น



รูปที่ 4. 30 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 3



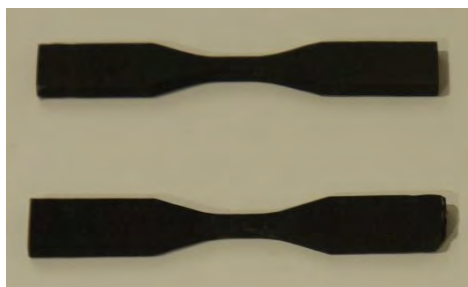
รูปที่ 4. 31 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 4

**ตารางที่ 4.23** ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก PMMA/graphene 0.5 phr ครั้งที่ 3 และครั้งที่ 4

	ความหนา (mm.)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm.)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm.)
ชิ้นงานImpact ครั้งที่ 3	2.22	58.40	9.50
ชิ้นงานImpact ครั้งที่ 4	2.21	58.37	9.52

**ครั้ง 5** พิมพ์ชิ้นงานดัมเบล 3 ชิ้น ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก 3 ชิ้น

**สำเร็จ** ชิ้นงานดัมเบล 2 ชิ้น



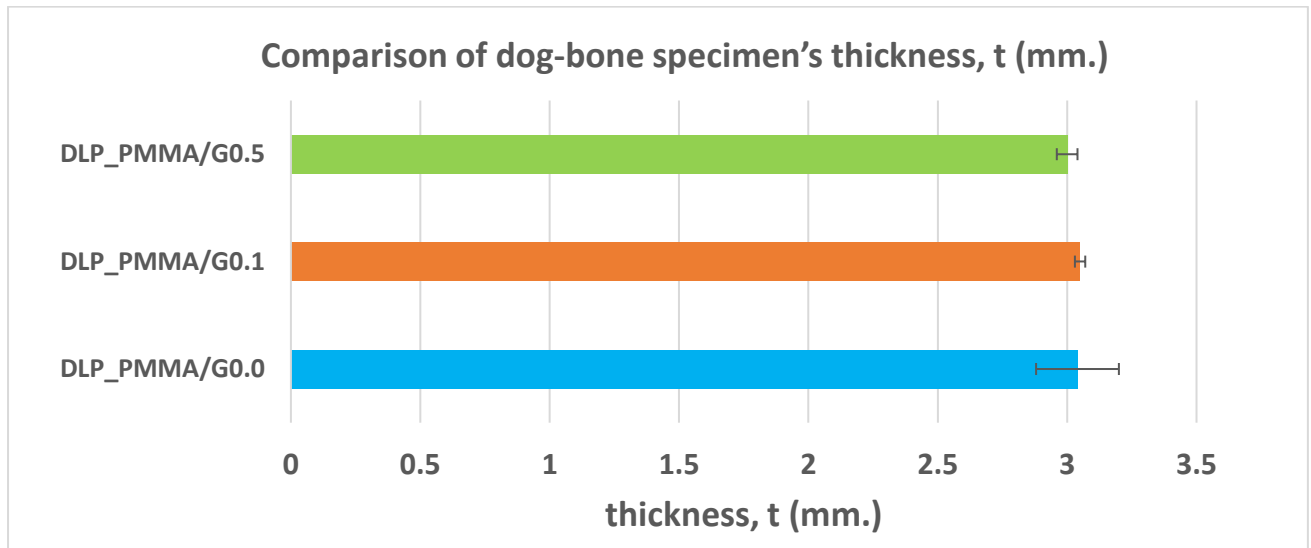
**รูปที่ 4. 32** ชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 5

**ตารางที่ 4.24** ขนาดของชิ้นงานดัมเบล PMMA/graphene 0.5 phr ครั้ง 5

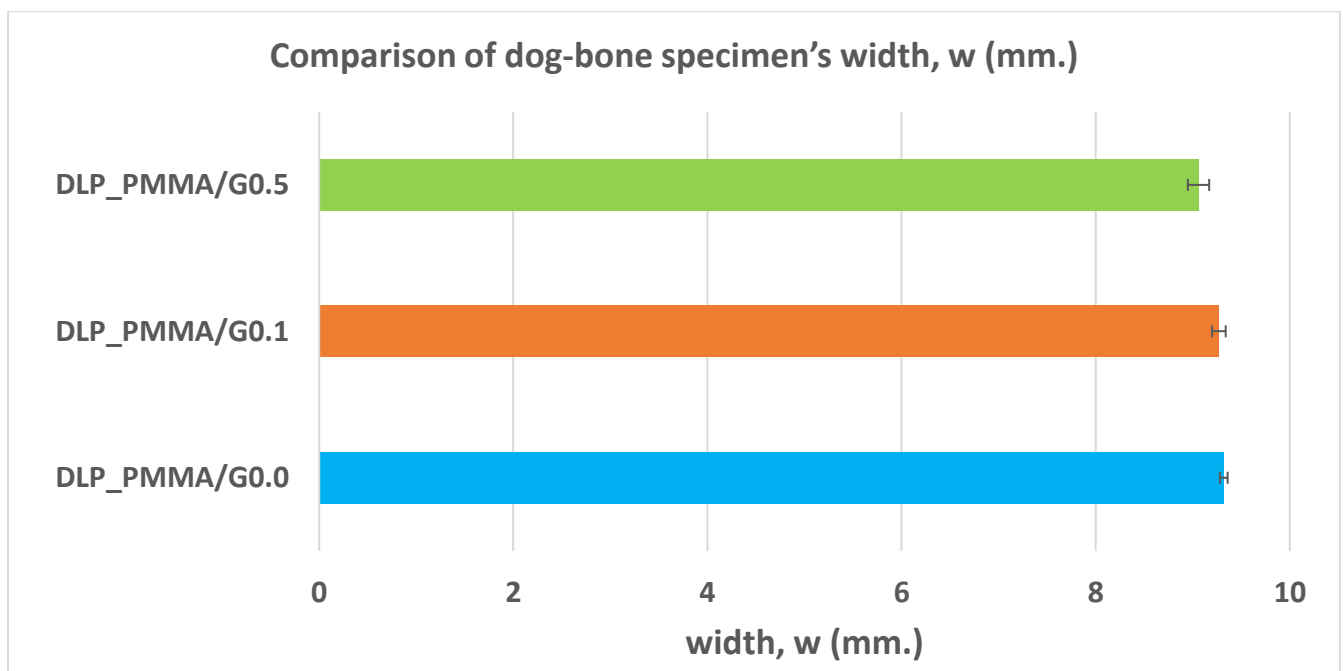
	ความหนา (mm.)	ความยาวชิ้นงาน, L (mm.)	ความกว้างชิ้นงาน, W (mm.)	ความยาว guage length, l (mm.)	ความกว้าง guage width, w (mm.)
ชิ้นงานดัมเบล	3.01	61.95	9.13	7.01	2.91
ชิ้นงานดัมเบล	3.02	62.12	9.20	7.08	3.02
เฉลี่ย	3.02	62.03	9.17	7.04	2.96
S.D.	0.02	0.11	0.04	0.04	0.07

จากข้อมูลผลการทดลองจึงนำมาคิดค่าเฉลี่ยออกมาเป็นกราฟขนาดชิ้นงานทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ ด้านความหนา ด้านความกว้าง และ ด้านความยาว ตามลำดับ จากรูปที่ 4.33

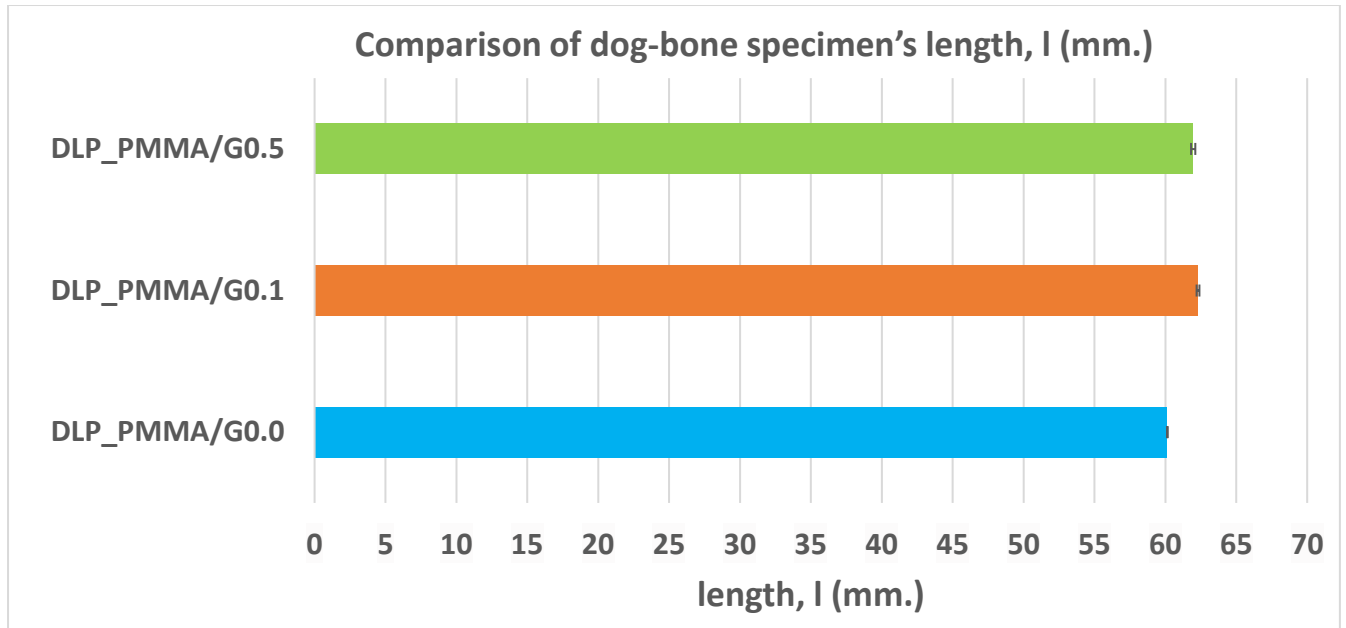
## การวัดขนาดชิ้นงานดัมเบล



รูปที่ 4.33 ก ขนาดชิ้นงานเฉลี่ยด้านความหนาของชิ้นงานดัมเบลที่พิมพ์ด้วยระบบ DLP

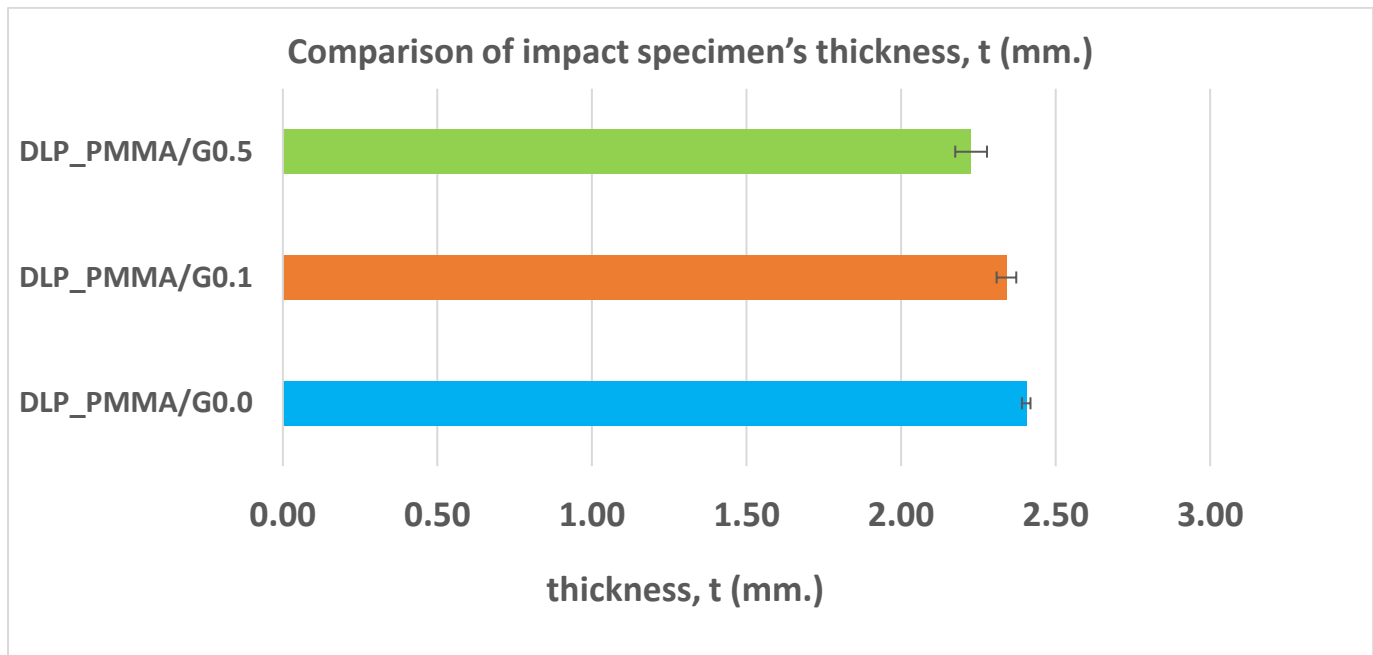


รูปที่ 4.33 ข ขนาดชิ้นงานเฉลี่ยด้านความกว้างของชิ้นงานดัมเบลที่พิมพ์ด้วยระบบ DLP

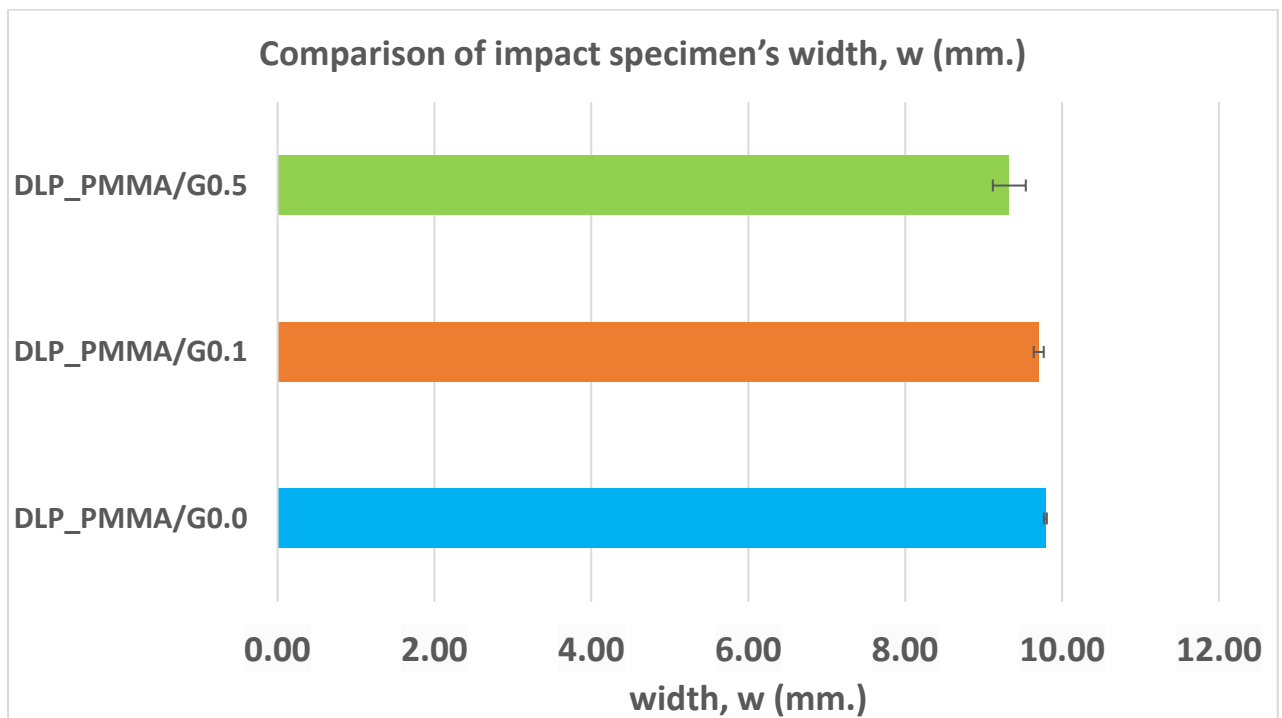


รูปที่ 4.33 ค ขนาดชิ้นงานเฉลี่ยด้านความยาวของชิ้นงานดัมเบลที่พิมพ์ด้วยระบบ DLP

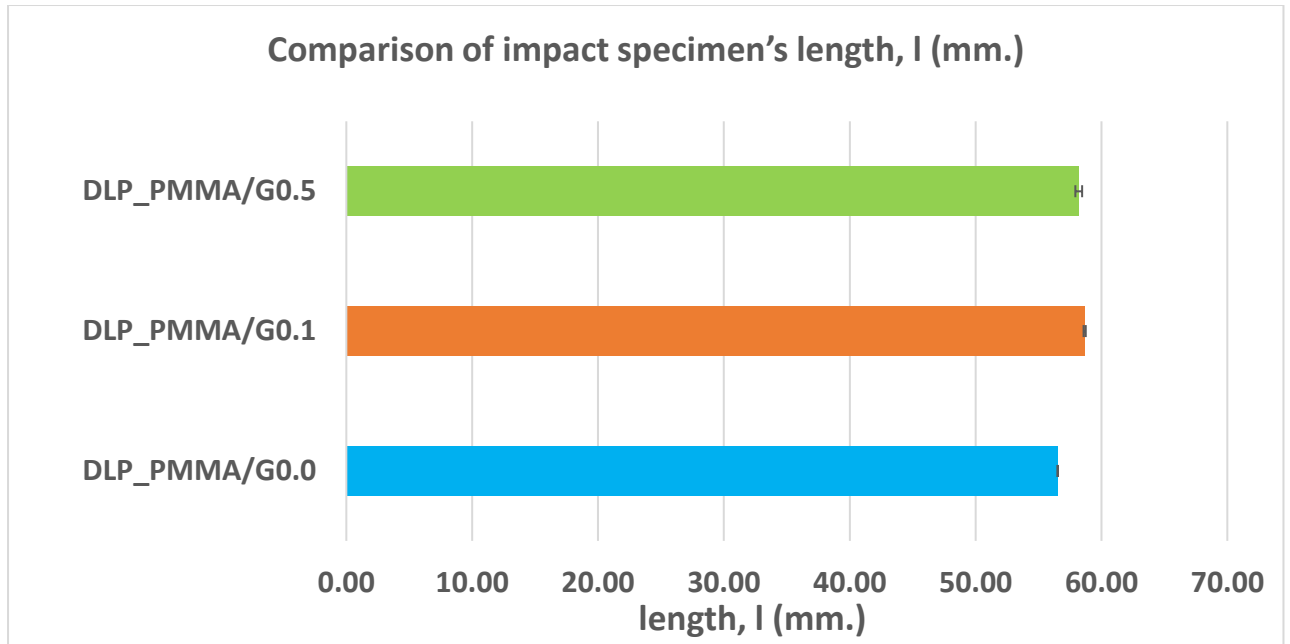
## การวัดขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก



รูปที่ 4.34 ก ขนาดชิ้นงานเฉลี่ยด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่พิมพ์ด้วยระบบ DLP

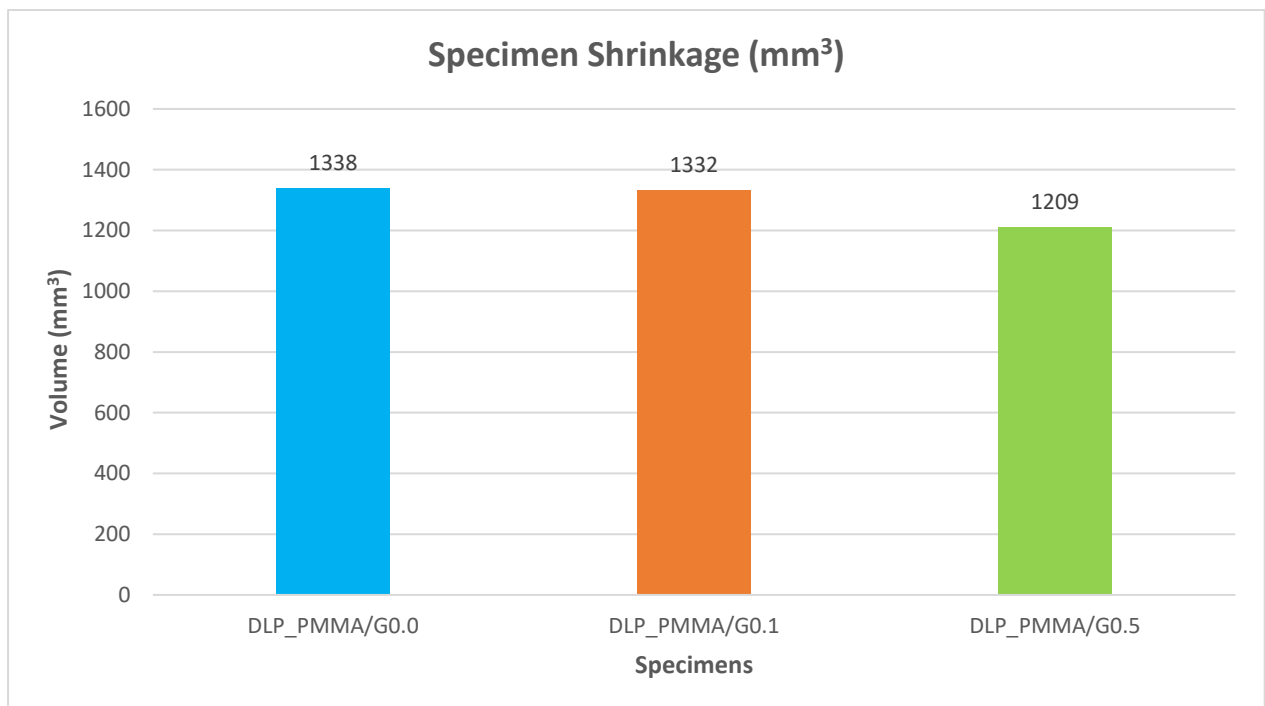


รูปที่ 4.34 ข ขนาดชิ้นงานเฉลี่ยด้านความกว้างของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่พิมพ์ด้วยระบบ DLP



รูปที่ 4.34 ค ขนาดชิ้นงานเฉลี่ยด้านความยาวของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่พิมพ์ด้วยระบบ DLP

เมื่อนำผลค่าเฉลี่ยแต่ละด้านมาคำนวณปริมาตรหาการหดตัวเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติมแกรฟีน จากรูปที่ 4.32 พบว่าชิ้นงานที่มีการใส่แกรฟีนที่ 0.1 phr มีการหดตัว 0.45% และชิ้นงานที่มีการใส่แกรฟีน 0.5 phr มีการหดตัว 9.64% แสดงว่าการเติมแกรฟีนส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงาน



รูปที่ 4.35 การหดตัวของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกที่พิมพ์ด้วยระบบ DLP

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของการวิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพื่อใช้สำหรับกระบวนการพิมพ์สามมิติ และเพื่อศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยเครื่องพิมพ์สามมิติที่มีต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบระหว่างแกรฟีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลต และศึกษาผลของการเติมแกรฟีนต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้า โดยแกรฟีนที่ใช้ในงานวิจัยนั้นเตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการเตรียมด้วยเทคนิคที่ดัดแปลงจากวิธีการฮัมเมอร์ ซึ่งงานวิจัยใช้ตัววัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้แก่กรดแอสคอร์บิก แล้วจึงนำมาแกรฟีนที่เตรียมได้มาผสมกับพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยให้มีการกระจายตัวได้ดีด้วยเครื่องอัลตราโซนิค ผสมในอัตราส่วน 0.1 0.5 และ 1 phr จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติ จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สามารถเตรียมแกรฟีนจากแกรไฟต์ด้วยเทคนิคที่ดัดแปลงจากวิธีการของแฮมเมอร์ได้
2. สามารถเตรียมเรซินวัสดุเชิงประกอบพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับแกรฟีนสำหรับการพิมพ์สามมิติได้
3. การพิมพ์สามมิติระบบ SLA (stereolithography) ให้ความแม่นยำที่สูงกว่าการพิมพ์สามมิติระบบ DLP (digital light processing) แต่ใช้เวลานาน
4. การพิมพ์สามมิติระบบ DLP สามารถพิมพ์ได้รวดเร็วกว่าการพิมพ์สามมิติระบบ DLP และความแม่นยำในการพิมพ์ยังอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้
5. ภาวะที่เหมาะสมในการพิมพ์สามมิติระบบ DLP ในงานวิจัยนี้คือระยะเวลาในการบ่มตัวชั้นงาน (body layer exposure time) 25 วินาที และระยะเวลาในการบ่มฐานชั้นงาน (base layer exposure time) 80 วินาที โดยพิมพ์ขึ้นสามมิติในแนวแกน Y หรือแนวตั้ง
6. การเติมแกรฟีนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ชิ้นงานนั้นหดตัวมากยิ่งขึ้นหลังการขึ้นรูปแบบสามมิติ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบแกรฟีน/พอลิเมทิลเมทาคริเลตให้มีการกระจายตัวที่ดีมากยิ่งขึ้น
2. ศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปสามมิติเพิ่มเติม ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า และการดูการกระจายตัวของแกรฟีนที่กระจายในวัสดุเชิงประกอบผ่านการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM, Scanning Electron Microscope)

## เอกสารอ้างอิง

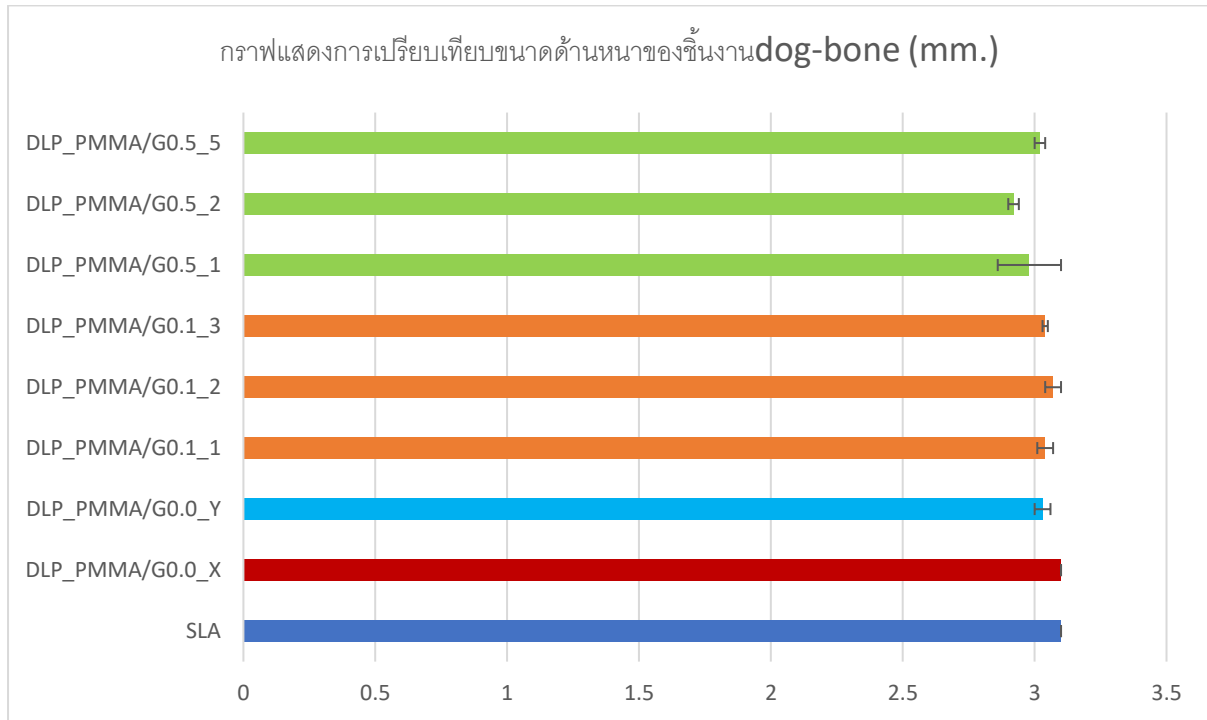
1. Dawoud M., Taha I., and S.J. Ebeid. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016. 21: p. 39-45.
2. International, A., Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology, in ISO / ASTM52900-15. 2015, ASTM International: West Conshohocken, PA.
3. Septillion Webmaster.ความแตกต่างระหว่างเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ FDM VS. SLA VS. SLS แบบไหนเหมาะกับธุรกิจของคุณ.2017 ; Available from : <https://www.septillion.co.th/ความแตกต่างระหว่างเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ FDM VS. SLA VS. SLS แบบไหนเหมาะกับธุรกิจของคุณ.2017>
4. ดร.ศิริกาญจน์ วิเศษสุวรรณภูมิ, แกรฟีนวัสดุ 2มิติ เพื่ออนาคต, M.T.E.C. 2017, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. p.95-69.
5. วิศณุสรณ์ ชาติอารยะวดี, แกรฟีน ตอนที่ 2: สมบัติและการนำไปประยุกต์ใช้, วารสารนเรศวรพะเยา, 2014. p. 17-26.
6. ดร.นงลักษณ์ เรืองวิเศษ, เมทิลเมทาคริเลต METHYL METHACRYLATE, สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. p. 1-8.
7. A. Pongwisuthiruchte 3D-PRINTED GRAPHENE/POLY (LACTIC ACID) COMPOSITES. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology. 2016, Department of Materials Science Faculty of Science Chulalongkorn University. p. 3-6, 16-19, 23, 26-27
8. Marcano D.C., Kosynkin D.V., Berlin J.M., Sinitskii A., Sun A., Slesarev A., Alemany L.B., Lu W. and J.M. Tour. Improved Synthesis of Graphene Oxide. *ACS Nano*. 2010 ; p. 4806-4816
9. Das T.K. and S. Prusty. Graphene-Based Polymer Composites and Their Applications. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2013 ; p. 319-331
10. Morimune S., Nishino T. and T. Goto . Ecological Approach to Graphene Oxide Reinforced Poly(methyl methacrylate) Nanocomposites. *ACS Applied Material & Interfaces*. 2012 ; p. 3596-3601
11. Valles C., Kinloch I.A., Young R.J., Wilson N.R. and J.P. Rourke. Graphene oxide and base-washed graphene oxide as reinforcements in PMMA nanocomposites. *Composite Science and Technology*. 2013 ; p. 158-164



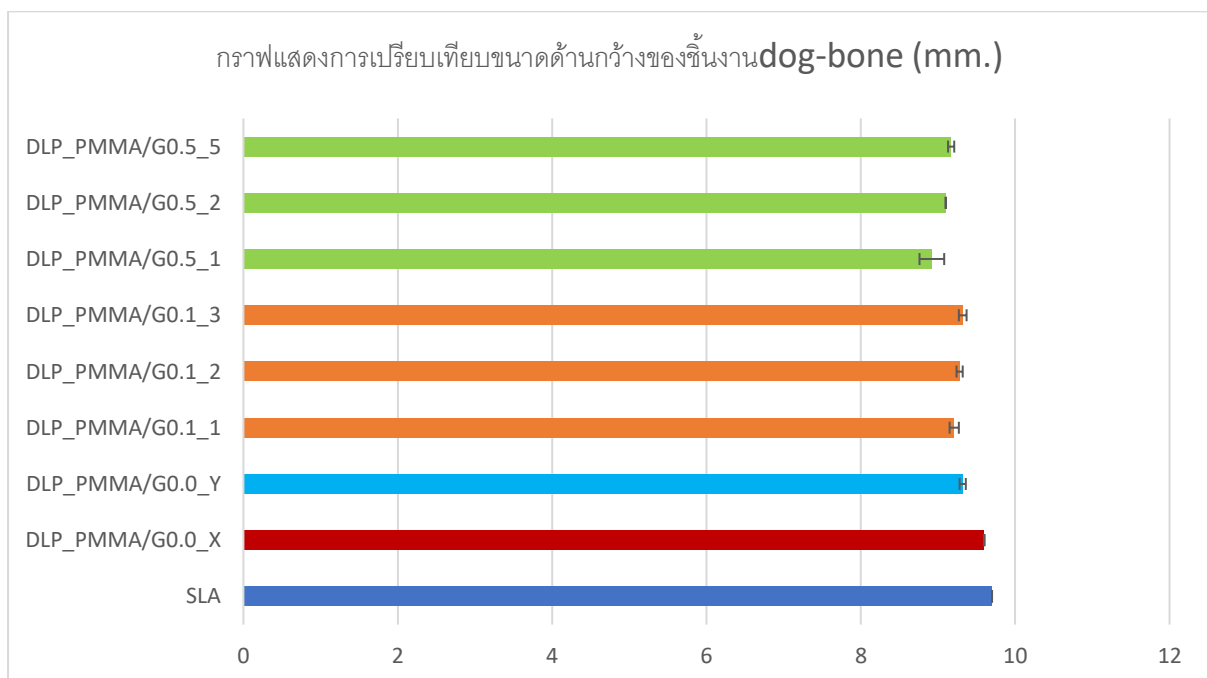
12. PRAMODA K.P., HUSSAIN H., KOH H.M., TAN H.R. and C.B. HE. Covalent Bonded Polymer–Graphene Nanocomposites. PART A: POLYMER CHEMISTRY DOI 10.1002/POLA. 2010 ; p. 4266
13. Gonçalves G., Marques P.A.A.P., Barros-Timmons A., Bdkin I., Singh M.K., Emamic N. and J. Grácioa. Graphene oxide modified with PMMA via ATRP as a reinforcement filler. 2010 ; p. 9927
14. Zhao T., Yu R., Li X., Cheng B., Zhang Y., Yang X., Zhao X., Zhao Y. and W. Huang. 4D printing of shape memory polyurethane via stereolithography. European Polymer Journal. 2018 ; p. 120-126
15. Bauer W., "Methacrylic Acid and Derivatives". Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 2002. Weinheim: Wiley-VCH. doi:10.1002/14356007.a16\_441

## ภาคผนวก

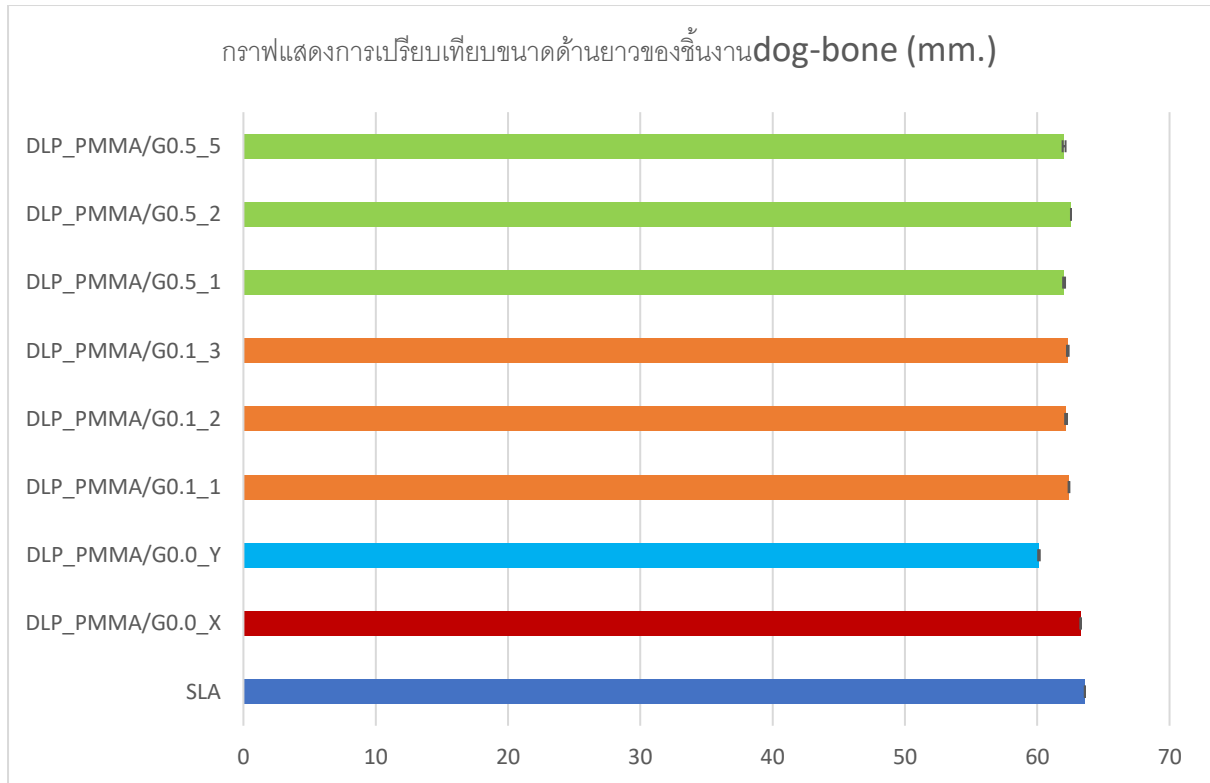
### ผลการวัดขนาดชิ้นงานตัวอย่าง ชิ้นงานดัมเบล



รูปที่ 1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดด้านหนาของชิ้นงานdog-bone (mm.)

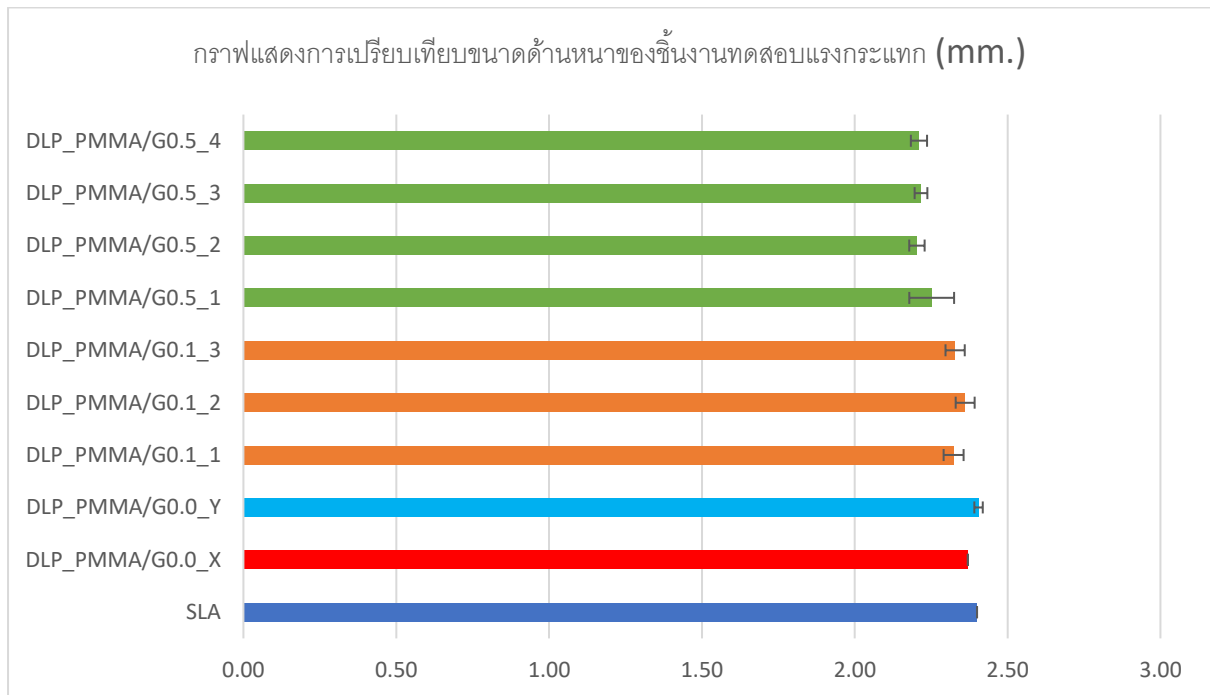


รูปที่ 2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดด้านกว้างของชิ้นงานdog-bone (mm.)

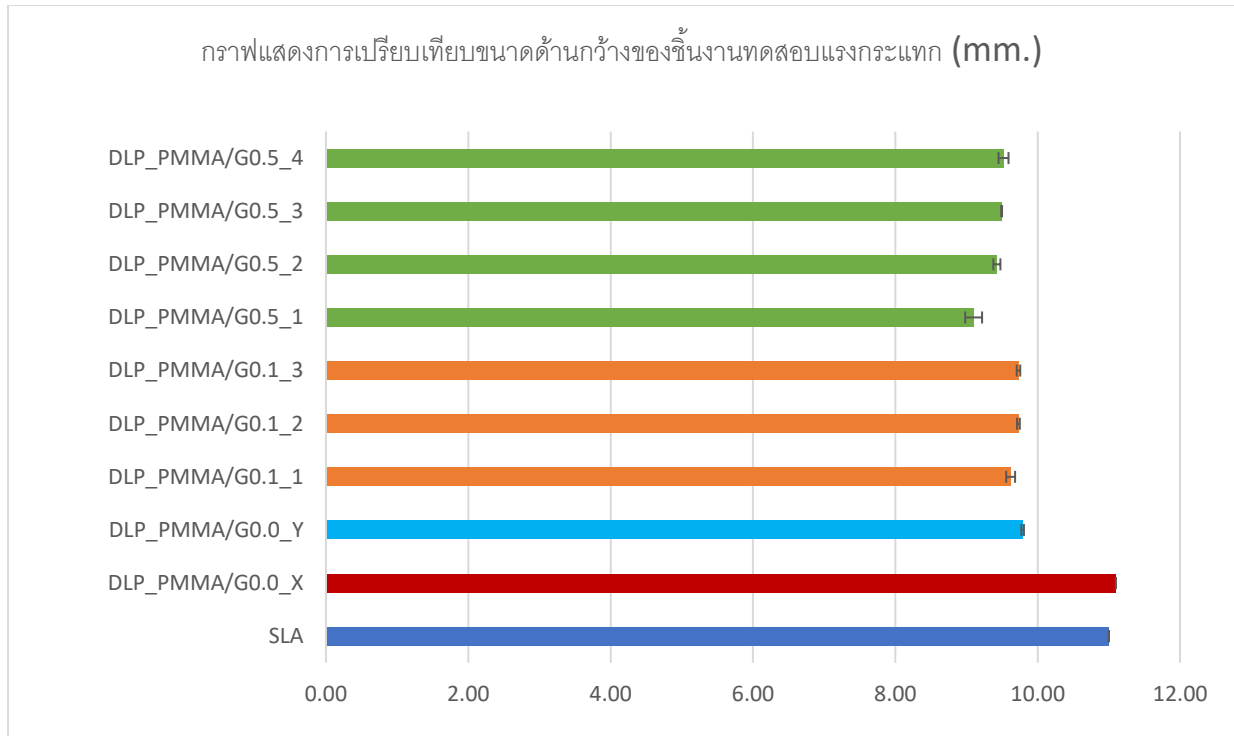


รูป 3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดด้านยาวของชิ้นงานdog-bone (mm.)

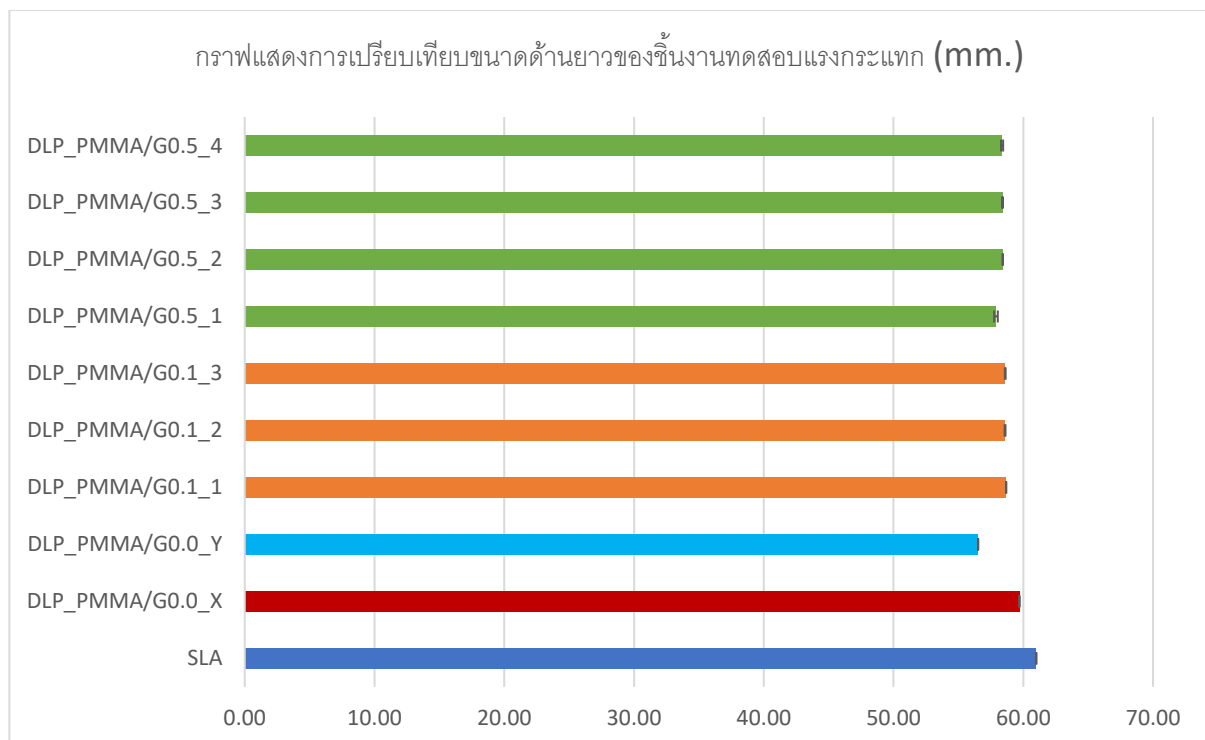
### ผลการวัดขนาดชิ้นงานตัวอย่าง ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก



รูปที่ 4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดด้านหนาของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก (mm.)



รูปที่ 5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดด้านกว้างของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก (mm.)



รูปที่ 6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบขนาดด้านยาวของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก (mm.)