

การเตรียมและสมบัติของพอลิเล็กทริกแอซิด/พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง/ผงไม้/  
แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์คอมพอสิต



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2560  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID)/HIGH IMPACT POLYSTYRENE/  
WOOD FLOUR/MAGNESIUM HYDROXIDE COMPOSITES

Mr. Nattaburut Kongkraireug



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

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมและสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิสไตรีน  
ชนิดทนแรงกระแทกสูง/ผงไม้/แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์  
คอมพอสิต

โดย

นายณัฐบุรุษ คงไกรฤกษ์

สาขาวิชา

ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร. พศวรรษน์ ชัยวุฒินันท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โปธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. พศวรรษน์ ชัยวุฒินันท์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. อรทัย บุญดำเนิน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

ณัฐบุรุษ คงไกรฤกษ์ : การเตรียมและสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิสไตรีนชนิดทนแรง  
 กระแทกสูง/ผงไม้/แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์คอมพอสิต (PREPARATION AND PROPERTIES  
 OF POLY( LACTIC ACID) / HIGH IMPACT POLYSTYRENE/ WOOD  
 FLOUR/MAGNESIUM HYDROXIDE COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.  
 ดร. อัญญาพร บุญมทิตสิฐุทธิ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์, 86  
 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง ได้ถูก  
 เตรียมโดยการใส่ผงไม้และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ชั้นแรกพอลิแล็กติกแอซิดถูกผสมแบบหลอมเหลว  
 กับพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง 5 อัตราส่วน (ร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก) ในเครื่องอัดรีดแบบ  
 สกรูคู่ตามด้วยการฉีดแบบ จากการทดสอบ พบว่า การใส่พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูงลงในพอลิ  
 เมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง สามารถปรับปรุงความทนแรง  
 กระแทก (ร้อยละ 10 สูงที่สุด) การยืดตัว ณ จุดขาด (ร้อยละ 10 สูงที่สุด) และเสถียรภาพทางความ  
 ร้อน (ร้อยละ 10 สูงที่สุด) เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดล้วน หากแต่ความทนแรงดึง ยังสัมม  
 อดูล์สและความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลงตามปริมาณพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูงที่เพิ่มขึ้น โดย  
 พอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 80/20 เมื่อใส่ผงไม้ปริมาณ 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อเรซินร้อยละ 20 มีสมบัติ  
 เชิงกล (ความทนแรงดึง และ ยังสัมมอดูล์ส) ที่ดี จึงเลือกไปเตรียมคอมพอสิตด้วยแมกนีเซียมไฮดรอก  
 ซไซด์ โดยมีอัตราส่วนผงไม้/แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20/0, 20/20, 20/30 และ 20/40 จาก  
 การทดลอง พบว่า ผงไม้ช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง ยังสัมมอดูล์ส และ  
 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ ขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาด ความทนแรงดัดโค้ง  
 เสถียรภาพทางความร้อน และการต้านทานการลามไฟลดลง นอกจากนี้ เมื่อใส่แมกนีเซียมไฮดรอก  
 ซไซด์ใน 80/20/20 พอลิแล็กติกแอซิด/พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง/ผงไม้คอมพอสิต พบว่า  
 คอมพอสิตมียังสัมมอดูล์ส เสถียรภาพทางความร้อน การต้านทานการลามไฟและความสามารถในการ  
 ย่อยสลายเพิ่มขึ้นตามปริมาณแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5971958123 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: PLA (POLYLACTIC ACID) / HIGH IMPACT POLYSTYRENE (HIPS) / WOOD FLOUR / MAGNESIUM HYDROXIDE

NATTABURUT KONGKRAIREUG: PREPARATION AND PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID)/HIGH IMPACT POLYSTYRENE/WOOD FLOUR/MAGNESIUM HYDROXIDE COMPOSITES. ADVISOR: ASST. PROF. ANYAPORN BOONMAHITTHISUD, Ph.D., CO-ADVISOR: PHASAWAT CHAIWUTTHINAN, Ph.D., 86 pp.

In this research, composites of poly(lactic acid)/high impact polystyrene (HIPS) (PLA/HIPS) were prepared by incorporating wood flour (WF) and magnesium hydroxide (MH). PLA was first melt mixed with five loadings of HIPS (10-50 wt%) in a twin screw extruder, followed by injection molding. The addition of HIPS into the PLA/HIPS improved the impact strength (IS) (optimal at 20 wt%), elongation at break (EB) (optimal at 20 wt%) and thermal stability (optimal at 20 wt%) compared to those of the neat PLA, but the tensile strength (TS), Young's modulus (E) and flexural strength (FS) were decreased with increasing HIPS content. Based on the optimum mechanical properties (tensile strength and Young's modulus), the 80/20/20 PLA/HIPS/WF was selected for preparing composites with MH, and the WF/MH (phr/phr) was 20/0, 20/20, 20/30 and 20/40. The results revealed that the composite containing WF exhibited an improvement in the IS, TS, E and biodegradability, while the EB, FS, thermal stability and flame resistance decreased. Moreover, the inclusion of MH in the 80/20/20 PLA/HIPS/WF composite exhibited the E, thermal stability, flame resistance and biodegradability increased with increasing MH content.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Academic Year: 2017

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์อย่างสมบูรณ์ได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการ ตลอดจนความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ในการทำงานวิจัยจากท่านผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนามต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมทิตสิสุทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา กำลังใจ ในการทำวิจัยอย่างดียิ่งตลอดการทำงานวิจัยนี้ รวมถึงการแนะนำแนวทางในการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ดร.พศวรรณ์ ชัยวุฒินันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำ และอำนวยความสะดวกต่างๆ ในด้านอุปกรณ์ สารเคมี และสถานที่ในการทำงานวิจัย อย่างดียิ่ง

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนและเอื้อเฟื้อด้านวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือทดสอบต่างๆ รวมไปถึงสถานที่ในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือต่างๆ ในระหว่างการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป .....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.2 พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA).....	3
2.2.1 สมบัติของ PLA.....	5
2.3 พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (high impact polystyrene, HIPS).....	6
2.3.1 สมบัติของ HIPS .....	8
2.4 ผงไม้ (wood flour, WF) .....	8
2.5 การเผาไหม้.....	9
2.5.1 องค์ประกอบในการเผาไหม้.....	9
2.5.1.1 เชื้อเพลิง (fuel).....	9
2.5.1.2 ออกซิเจน (oxygen) .....	10
2.5.1.3 ความร้อน (heat).....	10
2.5.1.4. ปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction).....	11
2.5.2 ลักษณะการทำงานของสารต้านทานการติดไฟ .....	11
2.5.2.1 การสร้างชั้นป้องกัน.....	11

2.5.2.2 การเย็นตัว.....	11
2.5.2.3 การควบแน่น.....	11
2.5.2.4 การปลดปล่อยก๊าซ.....	12
2.6 แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (magnesium hydroxide, MH) .....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	14
3.1 วัตถุประสงค์.....	14
3.2 เครื่องมือที่ใช้ผสมและขึ้นรูปขึ้นทดสอบ .....	14
3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ .....	14
3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม .....	17
3.5.2 การเตรียมคอมพอสิต .....	18
3.6 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	18
3.7 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของขึ้นทดสอบ.....	19
3.7.1 การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength, IS) .....	19
3.7.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (tensile properties).....	20
3.7.3 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength, FS ).....	21
3.7.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimeter, DSC) .....	22
3.7.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analysis, TGA).....	23
3.7.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (DMA) .....	24
3.7.7 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM).....	25
3.7.8 การทดสอบการลุกไหม้ไฟ (flammability test).....	26
3.7.9 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption).....	27



3.7.10 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดิน (soil burial test)..... 28

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง ..... 29

4.1 ลักษณะชิ้นทดสอบ ..... 29

4.2 สมบัติเชิงกล (mechanical properties) ..... 30

4.2.1 ความทนแรงกระแทก (impact strength, TS) ..... 31

4.2.2 สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties)..... 34

4.2.3 ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength, FS)..... 37

4.3 พฤติกรรมทางความร้อน (thermal behaviors)..... 38

4.4 เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability)..... 41

4.5 สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical properties)..... 44

4.6 สัณฐานวิทยา (morphology) ..... 45

4.7 การลามไฟ (flammability)..... 48

4.8 การดูดซึมน้ำ (water absorption) ..... 50

4.9 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน ..... 51

4.9.1 สัณฐานวิทยา..... 51

4.9.2 สมบัติความทนแรงดึงหลังฝังดิน ..... 54

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ ..... 57

5.1 สรุปผลการทดลอง ..... 57

5.2 ข้อเสนอแนะ ..... 58

รายการอ้างอิง ..... 59

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 86



## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	โครงสร้างทางเคมีของ PLA.....	4
รูปที่ 2.2	กระบวนการสังเคราะห์ PLA .....	4
รูปที่ 2.3	โครงสร้างทางเคมีของ HIPS .....	7
รูปที่ 2.4	กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านอนุมูลอิสระของ HIPS .....	7
รูปที่ 2.5	สามเหลี่ยมการเกิดไฟ .....	9
รูปที่ 2.6	การสร้างชั้นป้องกันขอสารต้านทานการติดไฟ .....	11
รูปที่ 2.7	การสร้างถ่านชาร์ (char) .....	12
รูปที่ 2.8	กลไกการปลดปล่อยก๊าซ .....	12
รูปที่ 2.9	โครงสร้างทางเคมีของ MH .....	13
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการทดลอง .....	16
รูปที่ 3.2	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	17
รูปที่ 3.3	เครื่องฉีดแบบ .....	19
รูปที่ 3.4	เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก .....	19
รูปที่ 3.5	เครื่องบด .....	20
รูปที่ 3.6	ขั้นทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดตามมาตรฐาน ASTM D256.....	20
รูปที่ 3.7	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล .....	21
รูปที่ 3.8	ขั้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภท I.....	21
รูปที่ 3.9	การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งแบบแรงกระทำสามจุด .....	22
รูปที่ 3.10	ขั้นทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งมาตรฐาน ASTM D790.....	22
รูปที่ 3.11	เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ .....	23
รูปที่ 3.12	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ).....	24
รูปที่ 3.13	เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต.....	25

รูปที่ 3.14	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	25
รูปที่ 3.15	เคลือบทองในระบบสุญญากาศบนพื้นผิว.....	26
รูปที่ 3.16	ขั้นตอนทดสอบการลุกลามไฟ.....	26
รูปที่ 3.17	เครื่องทดสอบการเผาไหม้.....	27
รูปที่ 3.18	ลักษณะการวางชิ้นงานก่อนฝังกลบดิน .....	28
รูปที่ 4.1	ขั้นตอนทดสอบของ (a) PLA, (b) HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS .....	29
รูปที่ 4.2	ขั้นตอนทดสอบของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต WF/MH (phr/phr).....	30
รูปที่ 4.3	ความทนแรงกระแทกของ PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS .....	32
รูปที่ 4.4	ความทนแรงกระแทกของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต .....	33
รูปที่ 4.5	สมบัติความทนแรงดึงของ PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS .....	34
รูปที่ 4.6	สมบัติความทนแรงดึงของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต ในเทอมของ.....	36
รูปที่ 4.7	ความทนแรงดัดโค้ง ของ PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS .....	37
รูปที่ 4.8	ความทนแรงดัดโค้งของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต.....	38
รูปที่ 4.9	DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ PLA, HIPS, .....	40
รูปที่ 4.10	(a) TGA และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม .....	42
รูปที่ 4.11	(a) TGA และ(b) DTG เทอร์โมแกรมของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต.....	43
รูปที่ 4.12	สมบัติเชิงกลพลวัต: โมดูลัสสะสม ของ PLA, HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต.....	45
รูปที่ 4.13	สัณฐานวิทยาของ (a) WF และ (b) MH ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	46
รูปที่ 4.14	สัณฐานวิทยาของ (a) PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ที่อัตราส่วน (b) 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30 และ (e) 50/50 ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	46
รูปที่ 4.15	สัณฐานวิทยาของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตในอัตราส่วน WF/MH: (a) 0/0, (b) 20/0, (c) 20/20, (d) 20/30 และ (e) 20/40 ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	47
รูปที่ 4.16	อัตราการลามไฟของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต.....	48

รูปที่ 4.17 ชั้นทดสอบหลังการทดสอบ UL-94 ของ (a) PLA, (b) HIPS, 80/20 PLA/HIPS  
คอมพอสิต WF/MH เท่ากับ (c) 0/0, (d) 20/0, (e) 20/20, (f) 20/30, ..... 49

รูปที่ 4.18 การดูดซึมน้ำของ PLA, HIPS, และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต..... 50

รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA, (b) HIPS, คอมพอสิต WF/MH ..... 52

รูปที่ 4.20 ลักษณะชั้นทดสอบหลังฝังดิน ของ PLA, HIPS, และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต ..... 54

รูปที่ 4.21 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ย้งสั่มอดุลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาด  
ของ PLA, HIPS, และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตในอัตราส่วนต่างๆภายหลังจากฝังดิน ..... 55



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS.....	17
ตารางที่ 3.2	อัตราส่วนของคอมพอสิต .....	18
ตารางที่ 4.1	สมบัติเชิงกลของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS ....	31
ตารางที่ 4.2	พฤติกรรมทางความร้อนของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS และ 80/20....	39
ตารางที่ 4.3	เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, HIPS, WF, MH, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต .....	41



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

พลาสติกได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์เพิ่มมากขึ้นความต้องการในการใช้งานพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากจึงมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม ส่งผลให้พลาสติกย่อยสลายได้ยากหรือใช้เวลาในการย่อยสลายนานนับร้อยปี ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันได้มีนักวิจัยจำนวนมากพยายามหาแนวทางแก้ไขหรือลดปัญหาดังกล่าว รวมถึงการพัฒนาพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastics) ทั้งนี้เนื่องจากกระแสอนุรักษ์ธรรมชาติและ การตระหนักต่อปัญหาสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีกฎข้อบังคับด้านสิ่งแวดล้อมที่ผลักดันให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติกให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ทำให้ความต้องการพลาสติกชีวภาพในตลาดโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การค้นคว้าและพัฒนาพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพให้มีสมบัติหลากหลายควรได้รับการสนับสนุนทั้งจากทางภาครัฐและเอกชน เพื่อให้สามารถนำไปใช้แทนที่พลาสติกเชิงพาณิชย์แบบดั้งเดิมและเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมที่ก้าวทันกระแสโลก ปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพถูกนำมาจำหน่ายในทางการค้าบ้างแล้วทำให้ได้รับความสนใจและประสบความสำเร็จในระดับหนึ่ง หากแต่ข้อจำกัดด้านสมบัติและราคาของผลิตภัณฑ์ที่ทำให้พลาสติกย่อยสลายยังไม่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายมากนัก โดยงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) ซึ่งเป็นพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก พอลิแล็กติกแอซิดเป็นแอลิฟาติกพอลิเอสเทอร์แบบเส้น (linear aliphatic polyester) ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบเปิดวง (ring-opening polymerization) ของแล็กไทด์ (lactide) ซึ่งเป็นวงแหวนไดเมอร์ (cyclic dimer) ของกรดแล็กติกที่ได้จากการหมักน้ำตาลจากแหล่งคาร์โบไฮเดรต โดยส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด อ้อย และ มันสำปะหลัง เป็นต้น พอลิแล็กติกแอซิดมีสมบัติด้านความใส ไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดินในภาวะที่เหมาะสม หากแต่พอลิแล็กติกแอซิดยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติที่ค่อนข้างเปราะและมีความเหนียวต่ำ ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถ

ปรับปรุงพอลิแล็กติกแอซิดให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ให้ความสนใจพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและทนต่อแรงกระแทกได้สูง ได้แก่ พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (high impact polystyrene, HIPS) เป็นพลาสติกวิศวกรรมที่มีการใช้งานมานาน โดยสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ระหว่างมอนอเมอร์ของสไตรีน (styrene) และ 1,3 บิวทาไดอีน (1,3-butadiene) ทำให้พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูงมีสมดุลที่ีระหว่างความแข็งตึง (rigidity) และความยืดหยุ่น (flexibility) นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพและเป็นการลดต้นทุนให้กับผลิตภัณฑ์จึงมีการใช้สารตัวเติม ได้แก่ ผงไม้ ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นเซลลูโลส ได้จากเศษไม้เลื่อยหรือเศษไม้ที่เหลือทิ้งจากโรงงานไม้ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากแล้วนำมาผ่านกระบวนการบดให้เป็นผงที่มีอนุภาคนขนาดเล็ก โดยผงไม้เป็นสารตัวเติมที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมพลาสติกเนื่องจากมีราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา เป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ แต่ผงไม้นั้นเป็นสารตัวเติมที่ไม่ทนต่อการเผาไหม้อีกทั้งพลาสติกนั้นเป็นเชื้อเพลิงที่ดีสำหรับการติดไฟ จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารต้านทานการติดไฟ ได้แก่ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (magnesium hydroxide, MH) ซึ่งเป็นสารต้านทานการติดไฟประเภทที่ไม่เกิดฮาโลเจน (non-halogenated flame retardant) ในการต้านทานการติดไฟของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ถูกเผาไหม้ทำให้เกิดการสลายตัวของโลหะไฮดรอกไซด์ โดยระหว่างการเผาไหม้จะเกิดการปลดปล่อยไอน้ำออกมาและขณะเผาไหม้จะเกิดชั้นเถ้าชาร์ปกคลุมพื้นผิวของวัสดุก่อให้เกิดการต้านทานการติดไฟ

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การเตรียมคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง/ผงไม้/แมกนีเซียม ด้วยกระบวนการฉีดแบบ และศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลพลวัต สมบัติการติดไฟ สันฐานวิทยา และการย่อยสลายทางชีวภาพของคอมพอสิตที่เตรียมได้



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

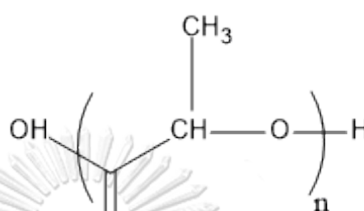
#### 2.1 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastics)

พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่มีการย่อยสลายด้วยเอนไซม์จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่มีอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งเมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะเหลือเพียงน้ำ มวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการย่อยสลายทางชีวภาพจะมีกระบวนการหลักๆ อยู่ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเป็นการย่อยสลายพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งการย่อยสลายครั้งแรกนี้จะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของโมเลกุลที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอก็จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปย่อยสลายครั้งที่ 2 ภายในเซลล์ ผลลัพธ์ที่ได้ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) นี้ก็คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (mineralization) ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และชีวมวล (biomass) [1, 2]

#### 2.2 พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA)

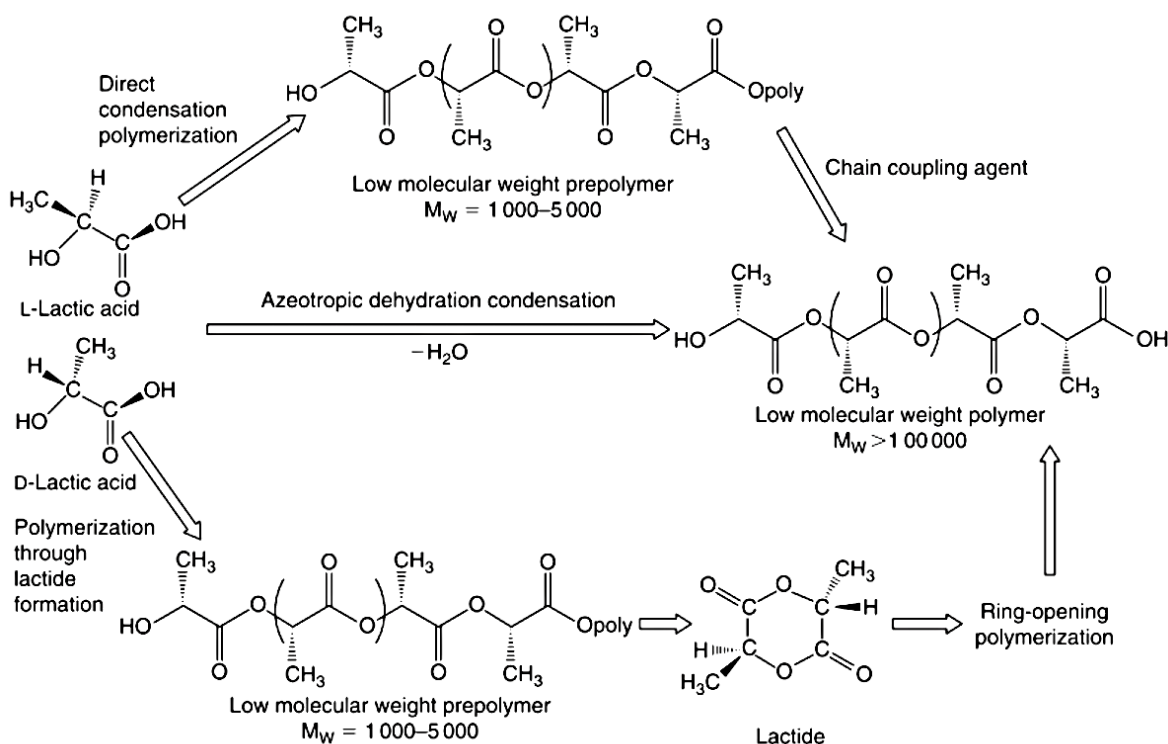
PLA เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มแอลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ดังแสดงโครงสร้างทางเคมีในรูปที่ 2.1 สังเคราะห์ได้จากกรดแล็กติกซึ่งสามารถผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาลของอ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลัง โดยพืชเหล่านี้จะมีการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งมี ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำเป็นวัตถุดิบในการผลิตแป้งและน้ำตาล จากนั้นจึงนำแป้งและน้ำตาลจากพืชเหล่านี้มาผ่านกระบวนการหมักโดยแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนเพื่อย่อยแป้งและน้ำตาลที่มีโมเลกุลใหญ่ได้เป็นกรดแล็กติก ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ PLA ดังนั้น พืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลักสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นทดแทนได้อย่างต่อเนื่อง PLA จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป การขึ้นรูปด้วยความร้อน การอัดขึ้นรูปการอัดรีด และการเป่าขึ้นรูป เป็นต้น ในอดีตการใช้งานของ PLA จัดอยู่ในผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตสูง

หาได้ยากและพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีโมเลกุลต่ำทำให้มีสมบัติเชิงกลต่ำ ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ ในการผลิต PLA ให้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสามารถใช้ในเชิงพาณิชย์ได้จึงทำให้การใช้งานของพอลิเมอร์ชนิดนี้เริ่มขยายออกไปโดย PLA เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้และผลิตได้จากวัตถุดิบที่สร้างทดแทนใหม่ได้ (renewable resources) จึงทำให้ PLA เริ่มเป็นที่น่าสนใจในทางการตลาดด้านบรรจุภัณฑ์ [3-5]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PLA

ในการผลิต PLA สามารถทำได้หลายวิธีดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการสังเคราะห์ PLA [6]

### 2.2.1 สมบัติของ PLA

PLA เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีความใส มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และไขมันสูง โดยที่ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถผ่านได้ดีหากแต่มีความคงทนต่อแรงกระแทกต่ำ โดย PLA มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 ช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting range) อยู่ในช่วงระหว่าง 173-178 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม PLA สามารถทนความร้อนได้ไม่เกิน 110 องศาเซลเซียส มีปริมาณความเป็นผลึก (crystallinity) ประมาณร้อยละ 37 และมีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) อยู่ในช่วงระหว่าง 60 ถึง 65 องศาเซลเซียส ซึ่ง PLA มีสมบัติพิเศษ คือ สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดิน นอกจากนี้ พบว่า PLA สามารถย่อยสลายได้ดีในโรงหมักขยะอินทรีย์ที่มีอุณหภูมิหมักประมาณ 60 องศาเซลเซียส ในตอนแรก PLA จะถูกย่อยสลายให้เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นภายใน 2 สัปดาห์ซึ่งสารประกอบและกรดแล็กติก จะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ด้วยการ metabolization แล้วเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และชีวมวล อีกทั้งมีสมบัติสกัดกัน (barrier properties) ที่ดีสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (biocompatibility) ได้ดี สามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ได้ เนื่องจากสามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตและไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ นอกจากนี้การผลิต PLA ใช้พลังงานน้อยกว่าการผลิตพลาสติกจากปิโตรเลียมปริมาณร้อยละ 20 ถึง 25 และคาดว่าจะสามารถลดพลังงานการผลิตได้อีกในอนาคต อย่างไรก็ตาม PLA มีสมบัติแข็งเปราะและมีความสามารถในการยึดตัวต่ำ อีกทั้งความแข็งแรงของ PLA ขณะอยู่ในรูปของพอลิเมอร์หลอม (melt strength) มีค่าต่ำ ทำให้มีปัญหาในการนำไปผลิตขึ้นรูปด้วยกระบวนการบางอย่าง เช่น กระบวนการอัดรีดและเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม เป็นต้นและเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากไม่ทำการอบไล่ความชื้นก่อนนำไปขึ้นรูป อาจเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างกระบวนการผลิตขึ้นรูปได้ ดังนั้นในการใช้งานจึงควรทำการอบเม็ด PLA ให้แห้งปราศจากความชื้นเสียก่อน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนดังกล่าว นอกจากนี้ด้วยราคาของ PLA ที่แพงเมื่อเทียบกับพลาสติกทางการค้าทั่วไป ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์จึงมีการนำ PLA ไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อการปรับปรุงสมบัติและลดต้นทุนการผลิต [7, 8]

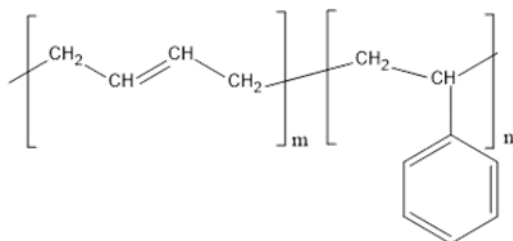
Farsetti และคณะ [9] ได้ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตโดยมีอัตราส่วนของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 100 โดยน้ำหนัก พบว่า มอดุลัสและความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตเพิ่มขึ้น แต่การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อมีการเติมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และจากการศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่า  $T_g$  ของ PLA ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตลงไป แสดงว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟเทเลตไม่สามารถเข้ากัน

Hamad และคณะ [10] ได้ทำการศึกษา PLA ผสมพอลิสไตรีน โดยศึกษาความเข้ากันได้และสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับ PLA ผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ซึ่งได้แก่ พอลิคาโพรแลคโตน (polycaprolactone) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (poly(methyl methacrylate)) และเอสตาร์ไบโออัลตรา (easter bio ultra) พบว่า พอลิเมอร์ผสมของ PLA/พอลิสไตรีน มีความทนแรงดึงสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมชนิดอื่นๆ เนื่องจาก PLA มีความเข้ากันได้ดีกับพอลิสไตรีน ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC) พบว่าพอลิเมอร์ผสมของ PLA/พอลิสไตรีนมี  $T_g$  เกิดเพียงตำแหน่งเดียว จึงทำให้เกิดการส่งผ่านแรง (stress transfer) ระหว่างพื้นผิว (interfacial tension) ที่ดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

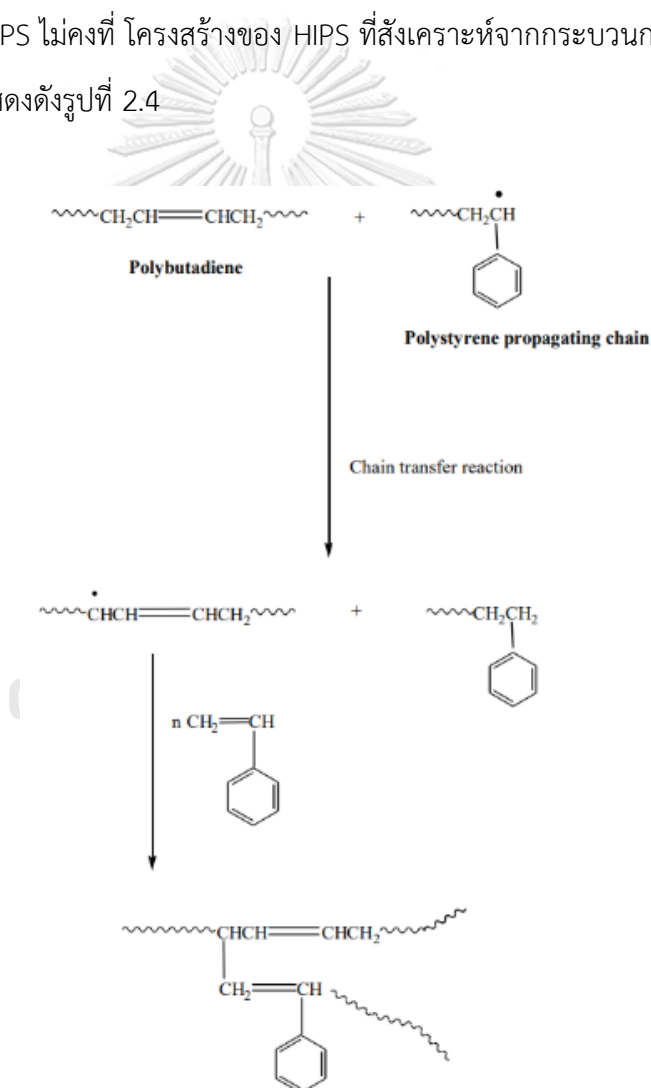
### 2.3 พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (high impact polystyrene, HIPS)

HIPS เป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มสไตรีนที่มีการใช้งานมานาน ปัจจุบันผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านอนุมูลอิสระ (free radical polymerization) ของมอนอเมอร์สไตรีน โดยมีการเติมบิวทาไดอีนมอนอเมอร์ลงไป เตรียมโดยละลาย 1,3 บิวทาไดอีน ในสไตรีนมอนอเมอร์ และปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (copolymerization) ดังแสดงโครงสร้างทางเคมีรูปที่ 2.3 เมื่อพิจารณาโครงสร้างของบิวทาไดอีน พบว่ามีตำแหน่ง allylic ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ว่องไวสามารถเกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันได้ ทำให้เกิดการจับตัวระหว่างเฟสของยางและเฟสของสไตรีนเมทริกซ์ ส่งผลให้พอลิสไตรีนสามารถเติบโตออกจากสายโซ่พอลิบิวทาไดอีน [11]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ HIPS

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการผลิต HIPS จะมีการเติมยางลงไปประมาณร้อยละ 15-30 โดยปริมาตร และมักจะไม่มี การเติมยางเกินร้อยละ 30 โดยปริมาตร เนื่องจากการเติมยางในปริมาณมาก ส่งผลให้สมบัติของ HIPS ไม่คงที่ โครงสร้างของ HIPS ที่สังเคราะห์จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบ free radical แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ผ่านอนุมูลอิสระของ HIPS [12]

### 2.3.1 สมบัติของ HIPS

HIPS เป็นพลาสติกที่มีความสมดุลทั้งในเรื่องความแข็งและความเหนียว (toughness) ทนต่อแรงเสียดสี (abrasion) และมีความทนแรงกระแทกดีเยี่ยม นอกจากนี้ HIPS สามารถคงสภาพรูปร่างได้ดี มีช่วงอุณหภูมิใช้งานกว้าง และสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายวิธี [13]

### 2.4 ผงไม้ (wood flour, WF)

ผงไม้เป็นสารตัวเติมประเภทอินทรีย์ ซึ่งได้จากการนำขี้เลื่อยเศษไม้หรือแผ่นไม้บางๆ มาบดเป็นผงให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ผงไม้ถูกนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ ไม่ทำความเสียหายให้กับเครื่องจักรในระหว่างกระบวนการผลิต สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ มีความแข็งตึง (stiffness) สูง ดูดซับเสียงได้ เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก องค์ประกอบหลักของผงไม้ ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ซึ่งการนำผงไม้มาใช้เป็นสารตัวเติมนอกจากช่วยลดต้นทุนในการผลิตแล้วยังช่วยลดการหดตัวและเพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์อีกด้วย [14]

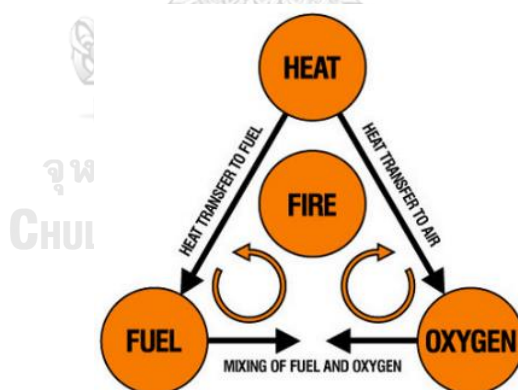
ขั้นตอนหลักในการผลิตผงไม้ ได้แก่ การลดขนาดและคัดแยกขนาด โดยถ้าวัตถุดิบที่ใช้มีขนาดใหญ่สามารถลดขนาดได้โดยใช้อุปกรณ์ เช่น เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (hammer mill) หรือเครื่องย่อยไม้ (chipper) บดให้ไม้กลายเป็นผงเล็กๆ เมื่อไม้ถูกบดจนเป็นผงแล้วจะถูกนำมาคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงกรอง โดยทั่วไปแล้วผงไม้ที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์นั้นมักให้คัดเลือกหลายเกรด โดยในงานวิจัยนี้ได้นำผงไม้ที่มีชื่อทางการค้า Lignocel C120 จากประเทศเยอรมัน เป็นผงไม้สนที่มีคุณภาพใกล้เคียงกัน โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 70-150 ไมโครเมตรและความหนาแน่น 100-135 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

Petinakis และคณะ [15] ได้ศึกษาอิทธิพลของแรงยึดเกาะระหว่าง PLA และผงไม้ต่อสมบัติเชิงกลของคอมพอสิต โดยมีอัตราส่วนของผงไม้เป็นร้อยละ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักพบว่า การเติมผงไม้มีผลทำให้ยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 95 เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ แต่ไม่มีผลต่อความทนแรงดึงของคอมพอสิต เนื่องจากการยึดเกาะกันที่ไม่ดีระหว่าง

เมทริกซ์ PLA และอนุภาคของผงไม้ การเติมสารคู่ควมเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานต (methylene diphenyl diisocyanate) ทำให้ความทนแรงดึงและยังสัมมอดูล์สของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และ 135 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะที่ดีระหว่าง PLA และผงไม้ ซึ่งสามารถยืนยันผลจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [16,17]

## 2.5 การเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีที่รวมระหว่างองค์ประกอบ 3 สิ่ง คือ เชื้อเพลิง (fuel) ออกซิเจน (oxygen) และ ความร้อน (heat) นอกจากองค์ประกอบดังกล่าวการเผาไหม้เกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) ของการสันดาป กล่าวคือ เชื้อเพลิงจะต้องได้รับความร้อนที่พื้นผิวมากพอที่จะติดไฟได้โดยใช้ออกซิเจนในปริมาณมากกว่าร้อยละ 16 ไฟจึงจะติดได้อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อใดที่ปฏิกิริยาลูกโซ่ขาดตอนลง การสันดาปจะหยุดลง ดังนั้นการสันดาปจะต้องมีสมดุลการเกิดไฟ แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สามเหลี่ยมการเกิดไฟ [18]

### 2.5.1 องค์ประกอบในการเผาไหม้

#### 2.5.1.1 เชื้อเพลิง (fuel)

วัตถุที่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้อย่างรวดเร็วในการเผาไหม้ เช่น ก๊าซ ไม้ กระดาษ น้ำมัน โลหะ พลาสติก เป็นต้น เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะก๊าซจะสามารถลุกไหม้ไฟได้ แต่

เชื้อเพลิงที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลวจะไม่สามารถลุกไหม้ไฟได้ ถ้าโมเลกุลที่ผิวของเชื้อเพลิงไม่อยู่ในสภาพที่เป็นก๊าซ การที่โมเลกุลของของแข็งหรือของเหลวจะสามารถแปรสภาพกลายเป็นก๊าซได้นั้นจะต้องอาศัยความร้อนที่แตกต่างกันตามชนิดของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ความแตกต่างของลักษณะการติดไฟของเชื้อเพลิงดังกล่าวขึ้นอยู่กับสมบัติ 4 ประการ

1) ความสามารถในการติดไฟของสาร (flamability limits) เป็นปริมาณไอของสารที่เป็นเชื้อเพลิงในอากาศที่มีสมบัติในการติดไฟได้ โดยปริมาณต่ำสุดของไอเชื้อเพลิงที่เป็นร้อยละในอากาศ ที่ทำให้สามารถจุดติดไฟได้เรียกว่า ค่าต่ำสุดของไอเชื้อเพลิง (lower flammable limit) ซึ่งสารเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีค่าต่ำสุดของไอเชื้อเพลิงแตกต่างกันไป

2) จุดวาบไฟ (flash point) คือ อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำให้เชื้อเพลิงคายไอออกมาผสมกับอากาศในอัตราส่วนที่เหมาะสม เมื่อมีประกายไฟจะเกิดการติดไฟเป็นไฟวาบขึ้นและดับลง

3) จุดติดไฟ (fire point) คือ อุณหภูมิของสารที่เป็นเชื้อเพลิงได้รับความร้อน จนถึงจุดที่จะติดไฟได้แต่การติดไฟนั้นจะต้องต่อเนื่องกันไป

4) ความหนาแน่นไอ (vapor density) คือ อัตราส่วนของน้ำหนักของสารเคมีในสถานะก๊าซต่อน้ำหนักของอากาศเมื่อมีปริมาณเท่ากัน โดยความหนาแน่นไอใช้เป็นสิ่งบ่งบอกให้ทราบว่าก๊าซนั้นจะหนักหรือเบากว่าอากาศ ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมอัคคีภัย

### 2.5.1.2 ออกซิเจน (oxygen)

อากาศที่อยู่รอบๆ ตัวเรานั้นมีก๊าซออกซิเจนเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 21 แต่การเผาไหม้แต่ละครั้งนั้นต้องการออกซิเจนประมาณร้อยละ 16 เท่านั้น ดังนั้นจะเห็นว่าเชื้อเพลิงทุกชนิดที่อยู่ในบรรยากาศรอบๆ ตัวเรานั้นจะถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจน ซึ่งมีปริมาณเพียงพอสำหรับการเผาไหม้ถ้าปริมาณออกซิเจนยังมากเชื้อเพลิงยิ่งติดไฟได้ดีขึ้น

### 2.5.1.3 ความร้อน (heat)

พลังงานที่ทำให้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดเกิดการเผาไหม้ พลังงานความร้อนจะถ่ายเทจากวัตถุหนึ่ง ไปอีกวัตถุหนึ่ง ที่มีอุณหภูมิต่างกัน



#### 2.5.1.4. ปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction)

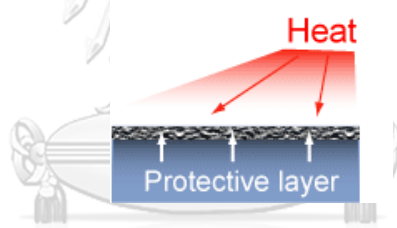
การเผาไหม้อย่างต่อเนื่องที่เริ่มตั้งแต่เชื้อเพลิงได้รับความร้อนจนติดไฟ

### 2.5.2 ลักษณะการทำงานของสารต้านทานการติดไฟ

โดยทั่วไปพลาสติกจะลุกไหม้ได้ง่ายเมื่อได้รับอุณหภูมิและมีออกซิเจนเพียงพอ ปัจจุบันมีการเติมสารต้านทานการติดไฟให้กับพอลิเมอร์ เพื่อให้เกิดการขัดขวางการลุกไหม้ โดยมีลักษณะของการทำงานดังนี้ [19, 20]

#### 2.5.2.1 การสร้างชั้นป้องกัน

สารต้านทานการติดไฟเมื่อเกิดการลุกไหม้จะสามารถสร้างชั้นป้องกันระหว่างเฟสวัสดุที่ถูกเผาไหม้และเฟสของก๊าซ จึงทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่ไม่สามารถเกิดขึ้นต่อได้ เกิดการต้านทานการติดไฟ นอกจากนี้ช่วยป้องกันก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการติดไฟ โดยสารประเภทสร้างชั้นป้องกันได้นั้นจะมีส่วนประกอบของฟอสฟอรัส แสดงดังรูป 2.6



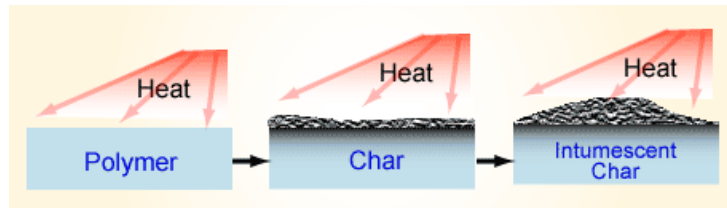
รูปที่ 2.6 การสร้างชั้นป้องกันของสารต้านทานการติดไฟ [20]

#### 2.5.2.2 การเย็นตัว

สารเติมแต่งประเภทนี้เมื่อถูกความร้อนจะเกิดการสลายตัว โดยขณะที่สารสลายตัวจะดูดความร้อน จึงทำให้อุณหภูมิและความร้อนนั้นต่ำกว่าจุดที่เกิดการเผาไหม้ โดยสารประเภทนี้จะมีส่วนประกอบของโลหะไฮดรอกไซด์

#### 2.5.2.3 การควบแน่น

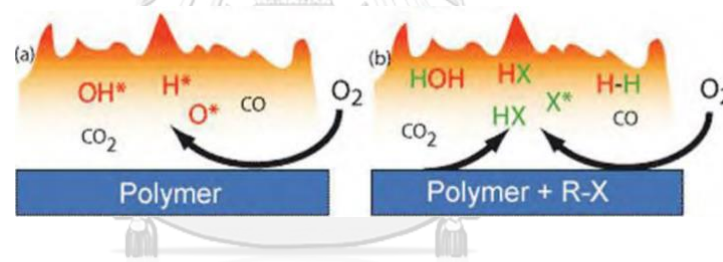
สารต้านการติดไฟเมื่อเกิดการเผาไหม้จะมีผงของคาร์บอน เมื่อมีปริมาณที่มากขึ้นจะก่อตัวเป็นถ่าน (char) โดยขี้ถ่านจะเป็นตัวขัดขวางของออกซิเจนและพื้นผิวของพอลิเมอร์ทำให้ไม่เกิดการลุกไหม้ต่อเนื่อง แสดงดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 การสร้างถ่านชาร์ (char) [20]

#### 2.5.2.4 การปลดปล่อยก๊าซ

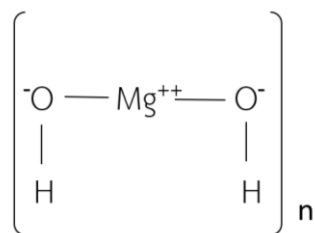
เมื่อสารเกิดการเผาไหม้จะเกิดการปลดปล่อยก๊าซที่เป็นอนุมูลอิสระ เช่น  $\cdot\text{Cl}$ ,  $\cdot\text{Br}$  ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับสารอนุมูลอิสระที่มีความว่องไว เช่น  $\cdot\text{H}$ ,  $\cdot\text{OH}$  ก่อให้เกิดกระบวนการคายความร้อน ทำให้ความร้อนในระบบลดลง แสดงดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 กลไกการปลดปล่อยก๊าซ [20]

#### 2.6 แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (magnesium hydroxide, MH)

MH เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ (metallic hydroxide) มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.9 กลไกการต้านการติดไฟของโลหะไฮดรอกไซด์ คือ ในระหว่างการเผาไหม้โลหะไฮดรอกไซด์มีการสลายตัวเป็นเถ้าและน้ำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนและลดความร้อน MH จัดเป็นสารหน่วงไฟชนิดโลหะไฮดรอกไซด์ที่ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยทางสุขภาพ มีคว้นน้อย มีความเป็นพิษต่ำ ในระหว่างการเผาไหม้ อย่งไรก็ตาม สารหน่วงไฟ MH นี้ส่งผลในทางลบต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ [21]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของ MH

Hao และคณะ [22] ได้ศึกษาการต้านทานการติดไฟของพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว/แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีอัตราส่วนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 35, 45 และ 55 โดยน้ำหนัก ผลของเครื่องทดสอบการเผาไหม้ (cone calorimeter) พบว่า เวลาในการเผาไหม้ (time to ignition) เพิ่มขึ้นตามปริมาณแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่าอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด (peak heat release rate,  $\text{HRR}_{\text{peak}}$ ) พบว่า พอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวมีค่า  $\text{HRR}_{\text{peak}}$  เท่ากับ 436 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตรและเมื่อผสมแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 35, 45 และ 55 มีค่า  $\text{HRR}_{\text{peak}}$  ลดลง 172, 149 และ 109 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์สามารถเป็นสารหน่วงไฟได้ดี

Wiriya และคณะ [23] ได้ศึกษาการเตรียมพอลิस्टาโรลชนิดทนแรงกระแทกสูงที่มีสมบัติต้านทานการติดไฟโดยการเติมสารต้านทานการติดไฟ 5 ชนิด ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรผิว (OMMT), แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH), bisphenol A bis-diphenylphosphate (BDP), 9,10-dihydro-9-oxa-10-phosphahenanthrene-10-oxide (DOPO), triphenyl phosphate (TPP) พบว่า การเติมสารต้านทานการติดไฟทั้ง 5 ชนิด ส่งผลให้มีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด (limiting oxygen index, LOI) เพิ่มขึ้นและการทดสอบการลุกลามไฟด้วยเครื่อง UL-94 พบว่า สารต้านทานการติดไฟชนิด BDP, DOPO และ TPP ผ่านมาตรฐานในระดับ V0 ขณะที่ HIPS/OMMT และ HIPS/MH ไม่ผ่านมาตรฐานในระดับ V0 หากแต่มีความทนแรงดึงและมอดุลัสเพิ่มขึ้น

### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุดิบ

1. เม็ดพอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เกรด 4043 D จากบริษัท เนเชอร์เวิร์คส์ เอเชียแปซิฟิก จำกัด

2. เม็ดพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง (high impact polystyrene, HIPS) เกรด H310 จากบริษัทไทยสไตรีนิกส์ จำกัด

3. ผงไม้สน (wood flour, WF) เกรด Lignocel C120 ขนาดอนุภาค 70-150 ไมโครเมตร จากบริษัท ดีเคเอสเอช (ประเทศไทย) จำกัด

4. แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (magnesium hydroxide, MH) ขนาดอนุภาค 20-30 ไมโครเมตร จากบริษัทจิน่า เซนซุย เคมีคอล จำกัด

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ผสมและขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) รุ่น LW-20-32 ของบริษัท LabTech Engineering (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

2. เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) รุ่น Battenfeld BA 250 CDC ขนาด 40 ตัน (ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม ฝ่ายพอลิเมอร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน)

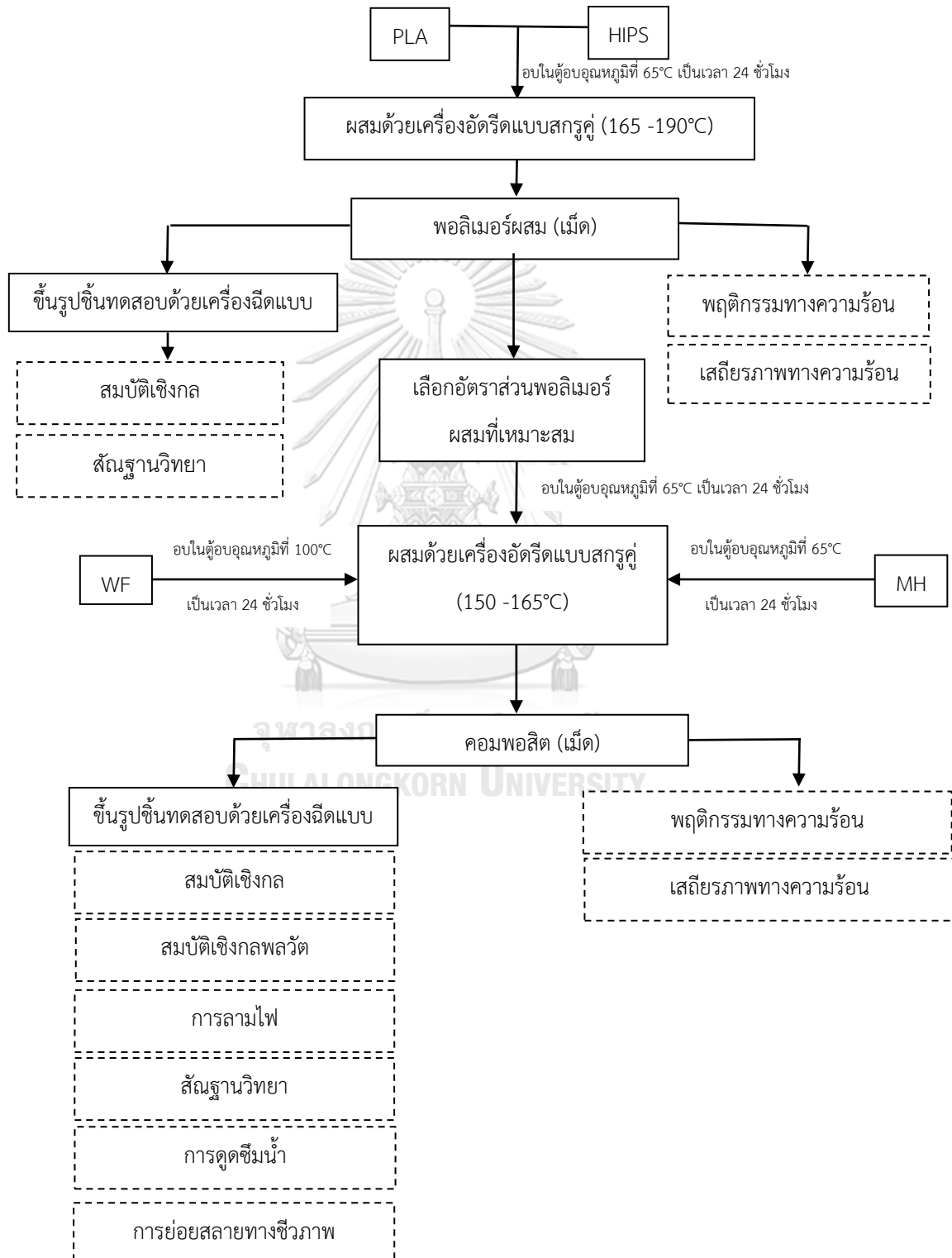
#### 3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ

1. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact testing machine) รุ่น CEAST, Resil Impactor (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

2. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) รุ่น Instron 5500R (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
3. เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural testing machine) รุ่น LLOYD 500 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) รุ่น Mettler Toledo DSC 1 STAR<sup>e</sup> System (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
5. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Mettler Toledo TGA/SDTA 851<sup>e</sup> (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
6. เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analyzer, DMA) รุ่น Mettler Toledo DMA 861<sup>e</sup> (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JEOL JSM-6480LV (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
8. เครื่องทดสอบการเผาไหม้ รุ่น HVUL 2 UL-94 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

### แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง

แผนภูมิขั้นตอนการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

## ขั้นตอนการทดลอง

### 3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

นำเม็ด PLA และ HIPS มาอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักและผสมตามอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (L/D = 40/1) (รูปที่ 11) โดยใช้ภาวะดังต่อไปนี้

อุณหภูมิ: 165-190 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบสกรูหมุน: 60 รอบ/นาที

ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (L/D): 32

ความเร็วรอบตัด: 12 รอบ/นาที

ระยะที่ตัด: 3.5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS

องค์ประกอบ	1	2	3	4	5	6	7
PLA (wt%)	100	90	80	70	60	50	0
HIPS (wt%)	0	10	20	30	40	50	100



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

### 3.5.2 การเตรียมคอมพอลิเมอร์

นำเม็ด PLA, HIPS และ MH มาอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ขณะที่ WF นำมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักและผสมตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้ภาวะดังต่อไปนี้

อุณหภูมิ: 150-165 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบสกรูหมุน: 80 รอบ/นาที

ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (L/D): 32

ความเร็วรอบตัด: 12 รอบ/นาที

ระยะที่ตัด: 3.5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของคอมพอลิเมอร์

องค์ประกอบ	1	2	3	4
PLA (wt%)	80	80	80	80
HIPS (wt%)	20	20	20	20
WF (phr)	20	20	20	20
MH (phr)	0	20	30	40

### 3.6 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมและคอมพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ในหัวข้อที่ 3.5.1 และ 3.5.2 ไปอบไล่ความชื้นอีกครั้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ (injection molding) ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้ภาวะดังต่อไปนี้

อุณหภูมิ: 150 - 190 องศาเซลเซียส

ความดันในการฉีด: 120 บาร์

เวลาในการหล่อเย็นในแม่แบบ: 60 วินาที





รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดยึดแบบ

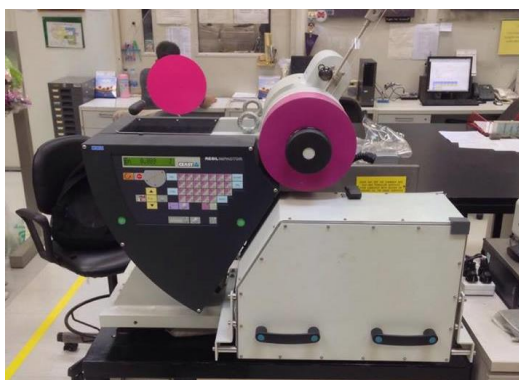
### 3.7 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของชิ้นทดสอบ

#### 3.7.1 การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength, IS)

การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตแบบไอซอด (Izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (รูปที่ 3.4) ทำโดยนำชิ้นทดสอบขนาดมาตรฐาน (12.7x63.5x3.2 มิลลิเมตร) ที่ได้จากการฉีดยึดแบบและนำไปบาก โดยใช้เครื่องบาก (รูปที่ 3.5) ให้กึ่งกลางของชิ้นทดสอบเป็นรูปตัววี (V-notch) (รูปที่ 3.6) จากนั้นทำการวัดความลึก (depth) และความกว้าง (width) ของรอยบาก โดยก่อนทดสอบให้เก็บชิ้นทดสอบในเตชิตเคเตอร์อย่างน้อยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก โดยใช้ภาว่ดังต่อไปนี้

น้ำหนักหัวค้อน: 1 จูล

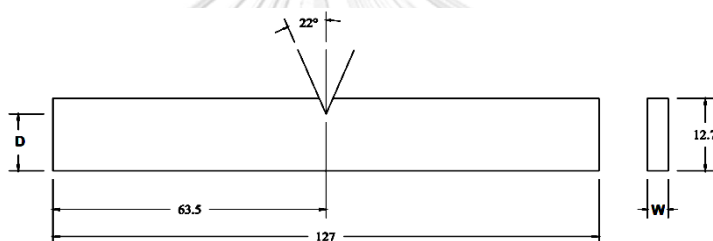
อุณหภูมิขณะทำการทดสอบ: 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก



รูปที่ 3.5 เครื่องบด



รูปที่ 3.6 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดตามมาตรฐาน ASTM D256

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

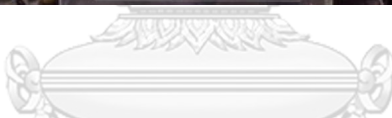
### 3.7.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (tensile properties)

การทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.7) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยนำชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (รูปที่ 3.8) มาวัดความกว้างและความหนาบริเวณระยะดึง (gauge length) ก่อนนำชิ้นทดสอบไปเก็บไว้ในเตชิตเตอร์อย่างน้อยเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลเพื่อหาค่าความทนแรงดึง (tensile strength, TS) ยังส์มอดุลัส (Young's modulus, E) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB) โดยใช้ภาวดังต่อไปนี้

ขนาด load cell: 10 กิโลนิวตัน

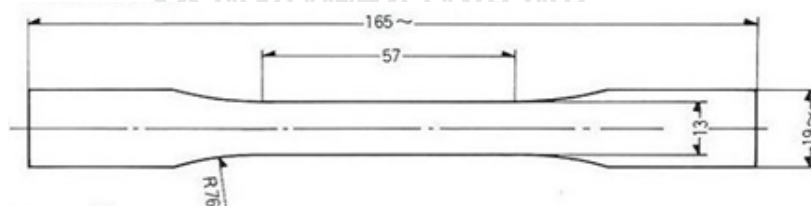
ระยะดิ่ง (gauge length): 50 มิลลิเมตร

ดิ่งอัตราเร็วคงที่: 50 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 ชิ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภท I

### 3.7.3 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength, FS )

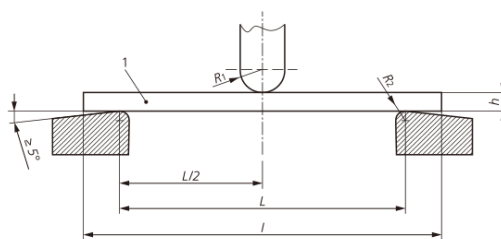
การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตแบบแรงกระทำ 3 จุด (three point bending) (รูปที่ 3.9) ตามมาตรฐาน ASTM D790 ด้วยเครื่องทดสอบ

ยูนิเวอร์แซล ทำการวัดขึ้นทดสอบให้มีขนาดเท่ากับ (127x12.7x3.2 มิลลิเมตร) ดังรูปที่ 3.10 ภายใต้อาณัติ  
ภาวณดั่งนี้

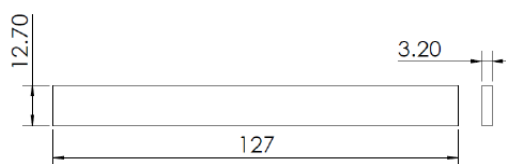
ขนาด Load cell: 1000 นิวตัน

ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ: 50 มิลลิเมตร

ให้แรงด้วยอัตราเร็วคงที่: 1.30 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.9 การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งแบบแรงกระทำสามจุด



รูปที่ 3.10 ชิ้นทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามมาตรฐาน ASTM D790

### 3.7.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimeter, DSC)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (รูปที่ 3.11) เพื่อหาอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ), และอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature,  $T_{cc}$ ) ทำการทดสอบโดยใส่ชิ้นทดสอบที่มีน้ำหนักประมาณ 8-15 มิลลิกรัม ลงในจานอะลูมิเนียมแล้วปิดผนึกด้วยฝาอะลูมิเนียมที่เจาะรู จากนั้นนำไปวางลงในเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ โดยทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ด้วยภาวะการทดสอบดั่งนี้ :

- เริ่มต้นอุณหภูมิทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที แล้วให้คงอุณหภูมิไว้ 10 นาที
- ลดอุณหภูมิจาก 200 องศาเซลเซียส จนถึง 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที แล้วให้คงอุณหภูมินี้ไว้ 10 นาที
- เพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งจาก 25 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที



รูปที่ 3.11 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

### 3.7.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analysis, TGA)

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA) (รูปที่ 3.12) เพื่อหาเสถียรภาพทางความร้อนกระทำโดยบรรจุชิ้นทดสอบประมาณ 10 มิลลิกรัมลงในครูซิเบิลอะลูมินา แล้วทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราให้ความร้อนที่ 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่ไหลผ่านด้วยอัตราเร็ว 20 มิลลิลิตร/นาที



รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

### 3.7.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (DMA)

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (รูปที่ 3.13) เพื่อหามอดูลัสสะสม (storage modulus) และอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว โดยใช้โหมดคานยื่นเดี่ยว (single cantilever) ขึ้นทดสอบมีขนาดตามมาตรฐาน (40×10×3 มิลลิเมตร) ภายใต้ภาวะดังนี้

การทดสอบอยู่ในช่วงอุณหภูมิ: 40 - 110 องศาเซลเซียส

อัตราการให้ความร้อนที่: 2 องศาเซลเซียส/นาที

ให้แรงด้วยอัตราคงที่: 0.2 นิวตัน

ความถี่: 1 เฮิรตซ์



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต

### 3.7.7 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกและบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.14) โดยทำการเคลือบทองในระบบสุญญากาศบนพื้นผิว (รูปที่ 3.15) ก่อนทำการตรวจสอบเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการนำอิเล็กตรอนของชิ้นงาน ภายใต้ภาวะดังนี้

พลังงานอิเล็กตรอน: 15 กิโลโวลต์ มหาวิทยาลัย

กำลังขยาย: 500 เท่า



รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

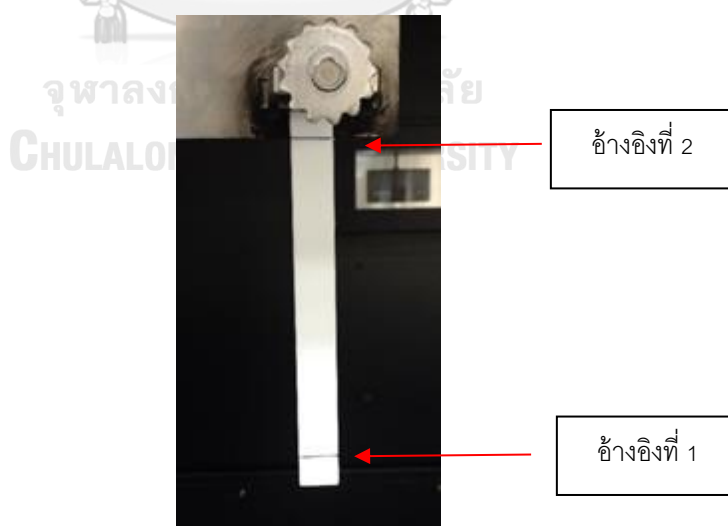




รูปที่ 3.15 เคลือบทองในระบบสุญญากาศบนพื้นผิว

### 3.7.8 การทดสอบการลุกไหม้ (flammability test)

การทดสอบการลุกไหม้เป็นไปตามมาตรฐาน UL-94 โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาดมาตรฐาน (127×12.7×3 มิลลิเมตร) (รูปที่ 3.16) ด้วยเครื่องทดสอบการเผาไหม้ (รูปที่ 3.17) โดยจับยึดชิ้นงานในแนวตั้ง แล้วลนไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยใช้ความสูงของเปลวไฟ 20 มิลลิเมตร หลังจากนั้นรอให้ชิ้นทดสอบถูกเผาจนถึงระยะอ้างอิงที่ 1 แล้วจับเวลาจนกว่าชิ้นทดสอบจะถูกเผาจนถึงระยะอ้างอิงที่ 2 ตามรูปที่ 3.16 โดยปล่อยให้ส่วนที่เกิดการเผาไหม้หยดลงบนสำลีที่รองไว้ด้านล่าง จากนั้นทำการหาอัตราการลุกไหม้ที่เกิดขึ้นในช่วง 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.16 ชิ้นทดสอบการลุกไหม้





รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบการเผาไหม้

### 3.7.9 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption)

การวิเคราะห์การดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D570 ทำการทดสอบโดยนำชิ้นทดสอบขนาด (5.1×12.7×3 มิลลิเมตร) ไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเก็บชิ้นทดสอบในเดซิเคเตอร์ก่อนนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ( $W_0$ ) จากนั้นนำชิ้นทดสอบแช่น้ำ ซึ่งในช่วง 7 วันแรกและต่อไปอีกทุกๆ 1 สัปดาห์ จะนำชิ้นทดสอบออกมาเช็ดให้แห้งด้วยกระดาษทิชชูก่อนนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกน้ำหนักของชิ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้น ( $W_i$ ) จนกระทั่งครบ 35 วันและนำน้ำหนักที่บันทึกได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซึมน้ำตามสมการที่ 3.1

$$\% \text{ Water absorption} = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3.1)$$

$W_0$  คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ

$W_i$  คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังการแช่น้ำในแต่ละวัน ( $i = 1- 35$ )

ทำการทดสอบทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นทำการทดสอบทุก 72 ชั่วโมง

### 3.7.10 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดิน (soil burial test)

ทำการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยนำชิ้นทดสอบไปฝังดินผสมปุ๋ยคอก (รูปที่ 3.18) เป็นเวลา 90 วัน แล้วเก็บชิ้นทดสอบทุก 30 วัน เพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล (สมบัติด้านความทนแรงดึง) และตรวจสอบสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวชิ้นทดสอบด้วยเครื่อง SEM ในการทดสอบเริ่มในวันที่ 18 มกราคม 2561 สิ้นสุดวันที่ 17 เมษายน 2561



รูปที่ 3.18 ลักษณะการวางชิ้นงานก่อนฝังกลบดิน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะชิ้นทดสอบ

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงลักษณะชิ้นทดสอบของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ในอัตราส่วนต่างๆ และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่ทำการเติม WF/MH ในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ



รูปที่ 4.1 ชิ้นทดสอบของ (a) PLA, (b) HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ที่อัตราส่วน (w/w) (c) 90/10, (d) 80/20, (e) 70/30, (f) 60/40 และ (g) 50/50



**รูปที่ 4.2** ชิ้นทดสอบของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่อัตราส่วน WF/MH (phr/phr)  
(a) 20/0, (b) 20/20, (c) 20/30 และ (d) 20/40

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า ชิ้นทดสอบ PLA (รูปที่ 4.1 (a)) มีลักษณะโปร่งใส ขณะที่ชิ้นทดสอบ HIPS (รูปที่ 4.1 (b)) มีสีขาวและลักษณะโปร่งแสง ซึ่งเมื่อผสม PLA และ HIPS ที่อัตราส่วนต่างๆ (รูปที่ 4.1 (c-g)) พบว่า ชิ้นทดสอบมีสีขาวและลักษณะทึบแสง และเมื่อนำพอลิเมอร์ผสมตามอัตราส่วนที่เลือกไว้ 80/20 PLA/HIPS ไปผสมกับสารตัวเติมผสมระหว่าง WF และ MH ที่อัตราส่วนต่างๆ (รูปที่ 4.2 (a-d)) พบว่า ชิ้นทดสอบมีสีน้ำตาลคล้ายไม้และลักษณะทึบแสง โดยมีเฉดสีอ่อนลงตามปริมาณ MH ที่เพิ่มขึ้น

#### 4.2 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

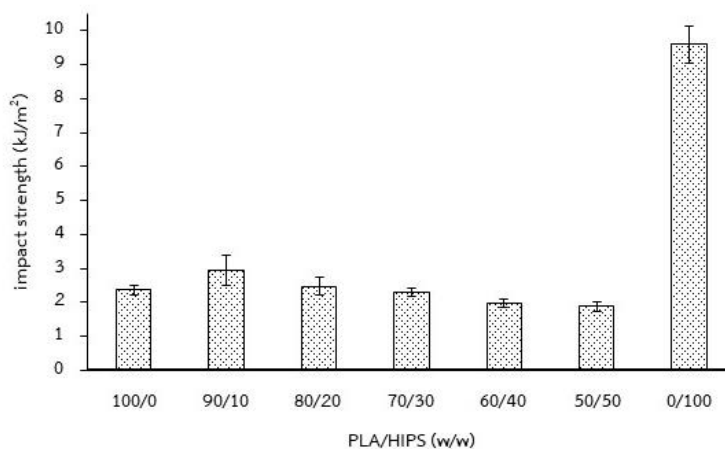
ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติเชิงกลของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต ในเทอมของความทนแรงกระแทก (impact strength, IS), ความทนแรงดึง (tensile strength, TS), ยังส์มอดุลัส (Young's modulus, E), การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB) และความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength, FS)

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต

Sample	IS (kJ/m <sup>2</sup> )	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)
PLA	2.4±0.15	62.4±5.9	2517.6±369	4.14±0.5	79.9±0.9
HIPS	9.6±0.54	21.2±2.0	1741.8±232	25.6±0.8	34.5±0.4
PLA/HIPS (w/w)					
90/10	3.0±0.43	45.5±2.9	2704.3±92	20.4±1.7	60.8±4.6
80/20	2.5±0.27	39.3±1.0	2625.3±65	18.2±2.4	56.3±0.7
70/30	2.3±0.13	30.6±3.2	2363.5±229	2.8±0.2	43.3±0.6
60/40	2.0±0.12	31.1±0.8	2352.9±52	6.8±2.1	44.4±0.9
50/50	1.9±0.15	32.0±0.7	2310.2±77	9.8±1.4	45.7±0.4
PLA/HIPS/WF/MH (w/w/phr/phr)					
80/20/20/0	2.6±0.24	57.7±0.8	3997.2±109	2.5±0.2	54.7±1.5
80/20/20/20	1.7±0.32	27.6±4.9	4292.2±65	1.0±0.2	22.9±4.1
80/20/20/30	1.3±0.29	34.2±4.1	4869.6±112	1.2±0.2	24.8±1.7
80/20/20/40	1.2±0.14	25.6±9.1	4720.9±534	1.5±0.5	19.3±1.5

#### 4.2.1 ความทนแรงกระแทก (impact strength, TS)

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงความทนแรงกระแทกของ PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ที่อัตราส่วนต่างๆ และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่เติม WF/MH ในอัตราส่วนต่างๆ ตามลำดับ

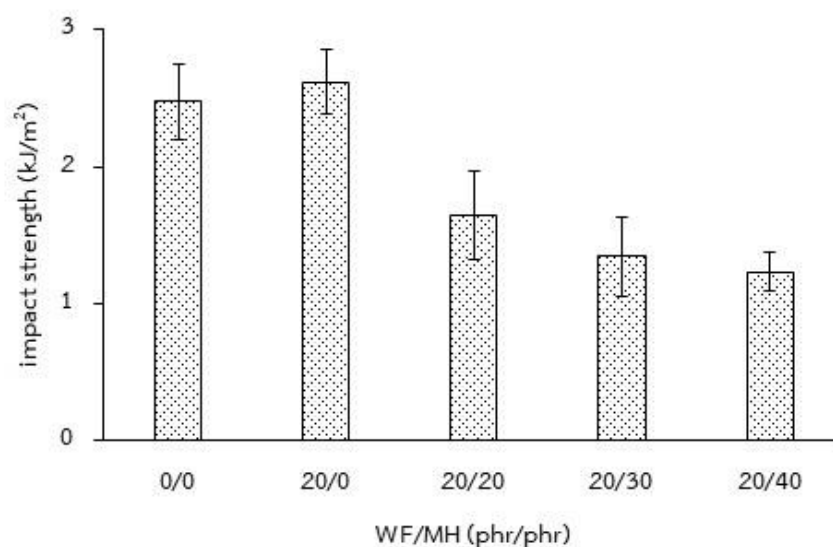


รูปที่ 4.3 ความทนแรงกระแทกของ PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 พบว่า PLA มีค่าความทนแรงกระแทกค่อนข้างต่ำ (2.4 kJ/m<sup>2</sup>) ซึ่งแสดงถึงพลาสติกที่มีลักษณะแข็งเปราะ เนื่องจาก PLA มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) ค่อนข้างสูง (~62 องศาเซลเซียส) ขณะที่ HIPS ถึงแม้จะมีค่า  $T_g$  ค่อนข้างสูง (~100 องศาเซลเซียส) หากแต่มีความทนแรงกระแทกที่สูง (9.6 kJ/m<sup>2</sup>) เนื่องจาก HIPS มีองค์ประกอบของยาง (พอลิบิวทาไดอิน) อยู่ในโครงสร้าง จึงช่วยส่งเสริมความทนแรงกระแทกได้ดี และเมื่อใส่ HIPS ใน PLA พบว่า พอลิเมอร์ผสม 90/10 และ 80/20 PLA/HIPS มีความทนแรงกระแทกสูงกว่า PLA ล้วน โดยเพิ่มจาก 2.4 kJ/m<sup>2</sup> เป็น 3.0 และ 2.5 kJ/m<sup>2</sup> ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจาก HIPS เกิดการกระจายตัวได้ดีใน PLA ส่งผลให้เกิดการส่งผ่านแรง (stress transfer) ได้ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่ HIPS ที่ปริมาณมากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS มีความทนแรงกระแทกลดลงตามปริมาณ HIPS ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.3-1.9 kJ/m<sup>2</sup> ทั้งนี้ เนื่องจากความไม่เข้ากันของ PLA และ HIPS เมื่อใส่ HIPS ในปริมาณเพิ่มขึ้น จึงทำให้ HIPS เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ (agglomeration) ส่งผลให้พื้นผิวสัมผัส (contact surface) ระหว่าง PLA และ HIPS ลดลงและการส่งผ่านแรงลดลง

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ในอัตราส่วนต่างๆ ไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับ WF ที่ปริมาณ 20 phr พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ที่อัตราส่วน 80/20 ให้สมบัติ

เชิงกลที่ดีที่สุด (แสดงในภาคผนวก ก) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ที่อัตราส่วน 80/20 ไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับ WF และ MH ต่อไป โดยมีอัตราส่วนของ WF/MH เป็น 20/0, 20/20, 20/30 และ 20/40 (phr/phr)

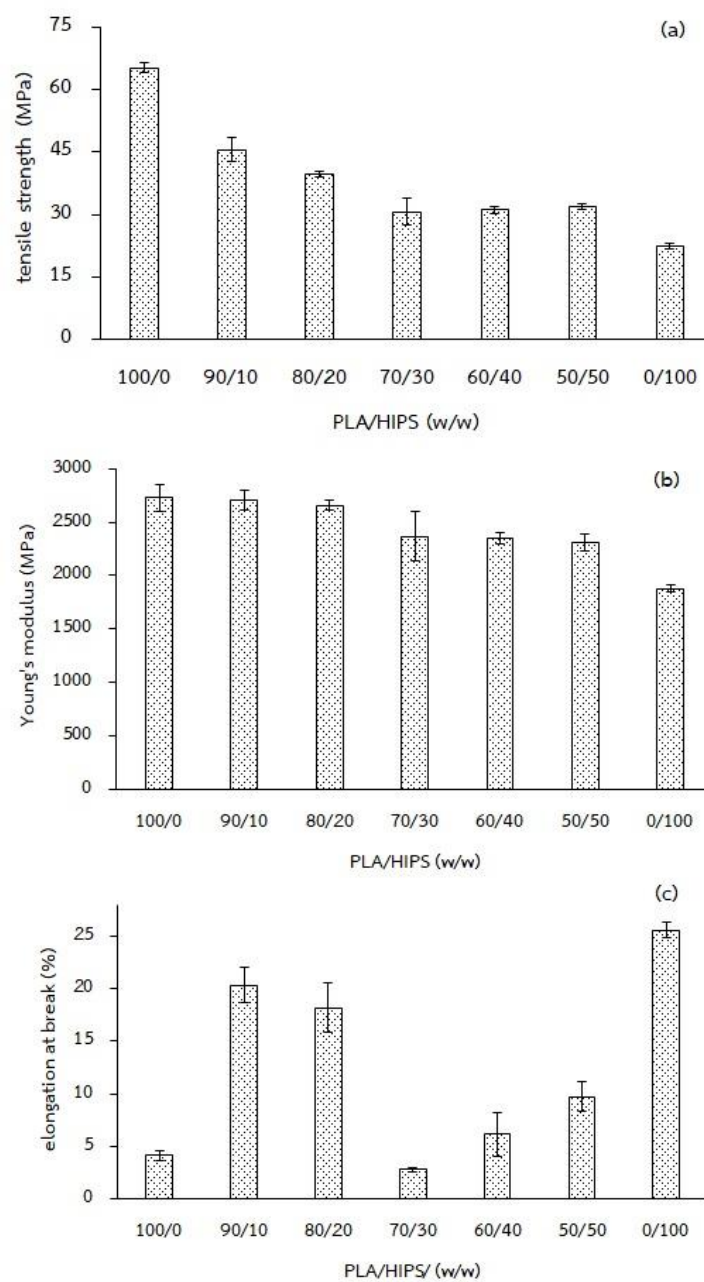


รูปที่ 4.4 ความทนแรงกระแทกของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4 พบว่า ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตที่เติม WF ปริมาณ 20 phr มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ( $2.6 \text{ kJ/m}^2$ ) เนื่องจาก WF เกิดการกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ หากแต่เมื่อใส่ MH ใน 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิต ส่งผลให้ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าอยู่ในช่วง  $1.7\text{-}1.2 \text{ kJ/m}^2$  ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของ MH มีความแข็งตึง (stiffness) สูง จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ อีกทั้งเกิดการเกาะกลุ่มกันของ MH บนอนุภาคของ WF จึงก่อให้เกิดการรวมตัวขนาดใหญ่และการกระจายตัวไม่ดีของสารตัวเติม WF และ MH ส่งผลให้เกิดการกระจายแรงได้ไม่สม่ำเสมอ และความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตมีค่าลดลง [24]

#### 4.2.2 สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties)

รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงสมบัติความทนแรงดึงของ PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ที่อัตราส่วนต่างๆ และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่เติม WF/MH ในอัตราส่วนต่างๆ ตามลำดับ



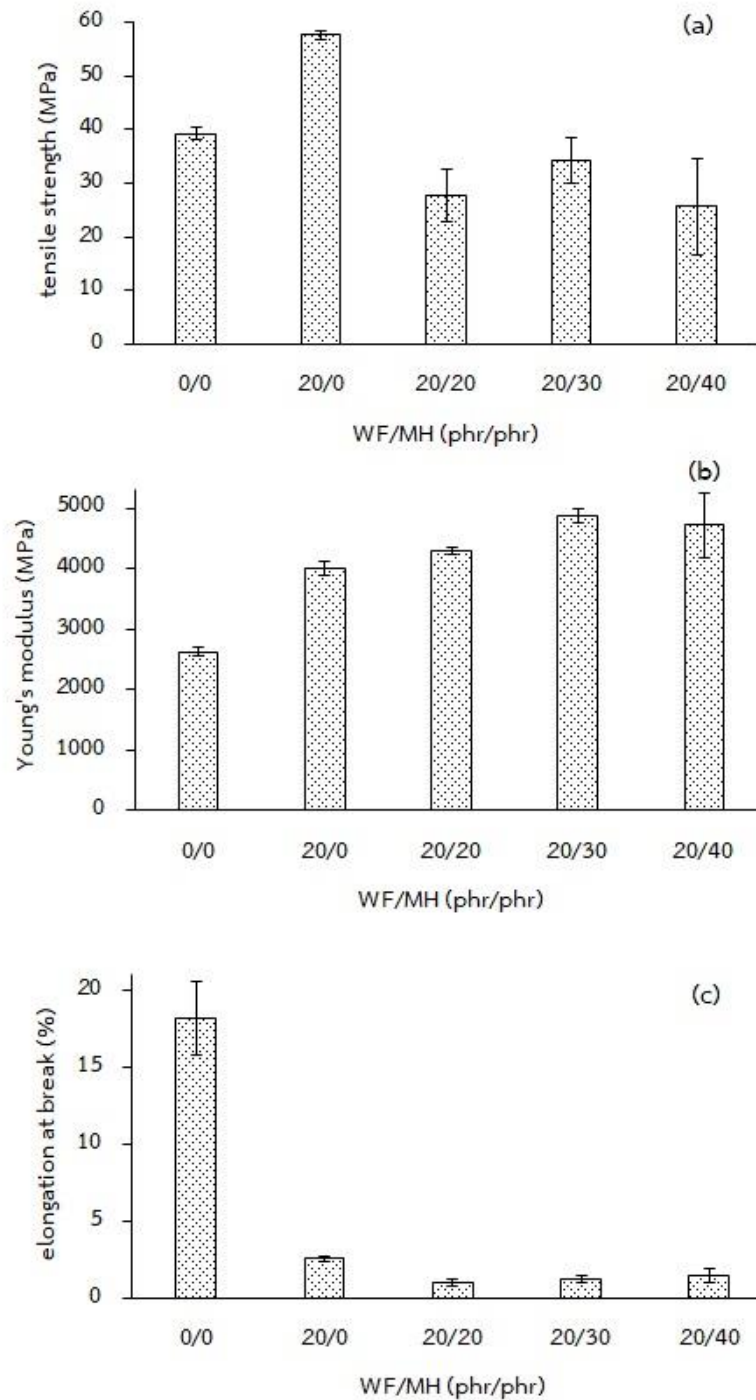
รูปที่ 4.5 สมบัติความทนแรงดึงของ PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ในเทอมของ (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งส์มอดุลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด



จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5(a) พบว่า ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PLA ล้วน (62.4 MPa) และมีค่าลดลงเมื่อ HIPS มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 45.5-32 MPa เนื่องจากความทนแรงดึงที่ต่ำของ HIPS (21.23 MPa)

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5(b) พบว่า พอลิเมอร์ผสม 90/10 และ 80/20 PLA/HIPS มีค้ำยงัสมอดูล์สูงกว่า PLA ล้วน โดยเพิ่มจาก 2517.6 MPa เป็น 2704.3 และ 2625.3 MPa ตามลำดับ เนื่องจาก HIPS มีการกระจายตัวได้ดีใน PLA อย่งไรก็ตาม เมื่อใส่ HIPS ที่ปริมาณมากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS มีค้ำยงัสมอดูล์ลดลงตามปริมาณ HIPS ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2363.5-2310.2 MPa ทั้งนี้เนื่องจาก HIPS มีค้ำยงัสมอดูล์ที่ต่ำ (1741.8 MPa) อีกทั้งเกิดการเกาะกลุ่มกันของ HIPS ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5(c) พบว่า พอลิเมอร์ผสม 90/10 และ 80/20 PLA/HIPS มีการยืดตัว ณ จุดขาด สูงกว่า PLA ล้วน อย่งไรก็ตาม โดยเพิ่มจาก 4.14% เป็น 20.4 และ 18.2% MPa ตามลำดับ เนื่องจากการยืดตัว ณ จุดขาดที่สูงของ HIPS (25.6%) อย่งไรก็ตาม เมื่อใส่ HIPS มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความไม่เข้ากันของ PLA และ HIPS และการมีพื้นผิวสัมผัสที่ลดลง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.6 สมบัติความทนแรงดึงของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต ในเทอมของ  
(a) ความทนแรงดึง, (b) ยังส์มอดุลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6(a) พบว่า ความทนแรงดึงของคอมพอสิตที่เติม WF ปริมาณ 20 phr มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS อย่างเห็นได้ชัด โดยเพิ่มจาก 39.3

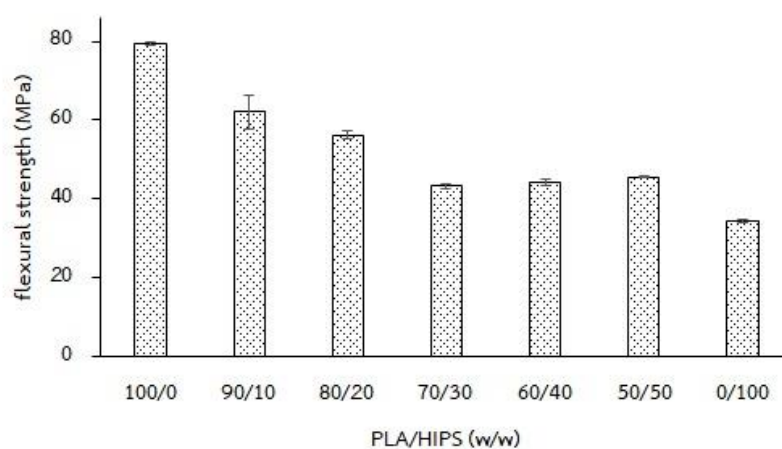
MPa เป็น 57.7 MPa เนื่องจาก WF มีความเข้ากันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี จึงทำให้มีการส่งผ่านแรงระหว่าง WF กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี นอกจากนี้ WF ยังมีลักษณะพื้นผิวที่หยาบและขรุขระ จึงทำให้มีแรงยึดเกาะทางกายภาพกับพอลิเมอร์เมทริกซ์เพิ่มขึ้น อีกทั้งมีการจัดเรียงตัวตามแนวการฉีดขึ้นงานของเครื่องฉีดแบบ หากแต่เมื่อใส่ MH ใน 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิต ส่งผลให้ความทนแรงดึงของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 34.2-25.6 MPa เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของ MH ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6(b) พบว่า ยังสัมพันธ์ของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS (2625 MPa) อย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 3997.2-4869.6 MPa เนื่องจากความแข็งตัวของสารตัวเติม WF และ MH

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6(c) พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS (18.2%) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.5-1% เนื่องจากสารตัวเติม WF และ MH ที่มีความแข็งสูง จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์

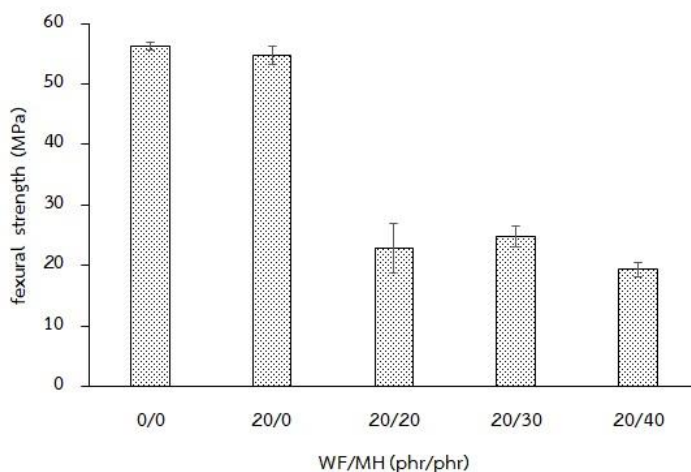
#### 4.2.3 ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength, FS)

รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงความทนแรงดัดโค้งของ PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ที่อัตราส่วนต่างๆ และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่เติม WF/MH ในอัตราส่วนต่างๆ ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ความทนแรงดัดโค้ง ของ PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PLA ล้วน (79.9 MPa) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 60.8-43.3 MPa เนื่องจากความทนแรงดัดโค้งที่ต่ำของ HIPS (34.5 MPa) ดังนั้นเมื่อเติม HIPS ที่มีความอ่อนโค้งลงใน PLA ที่มีความแข็ง จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดัดโค้งลดลง



รูปที่ 4.8 ความทนแรงดัดโค้งของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8 (a) พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตที่เติม WF ปริมาณ 20 phr มีค่าลดลงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ (54.7 MPa) เนื่องจาก WF เกิดการกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ หากแต่เมื่อใส่ MH ใน 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิต ส่งผลให้ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 24.8-19.3 MPa เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของ MH ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

#### 4.3 พฤติกรรมทางความร้อน (thermal behaviors)

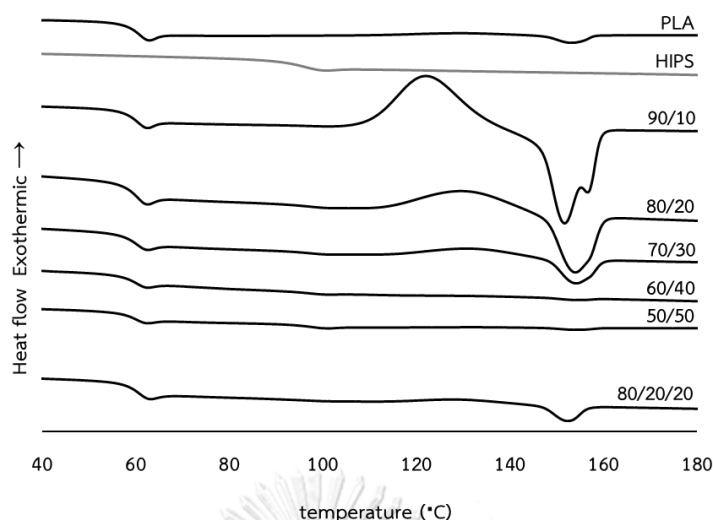
ตารางที่ 4.2 แสดงพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่เติม WF/MH ในอัตราส่วนต่างๆ ในเทอมของ  $T_g$ , อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature,  $T_{cc}$ ), และอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ), ซึ่งหาได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความ

ร้อนครั้งที่สอง (second heating scan) ส่วนขั้นตอนทำให้เย็น (cooling scan) ในงานวิจัยนี้ไม่พบอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ของ PLA เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีอัตราการเกิดผลึกช้ามาก ดังนั้นเมื่อขึ้นตัวอย่างที่หลอมเหลวถูกลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที จึงทำให้โมเลกุลของ PLA ไม่มีเวลาพอในการจัดเรียงตัวเป็นผลึก

**ตารางที่ 4.2** พฤติกรรมทางความร้อนของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต

sample	PLA			HIPS
	$T_g$ (°C)	$T_{cc}$ (°C)	$T_m$ (°C)	$T_g$ (°C)
PLA	62.6	130.4	153.5	-
HIPS	-	-	-	100.7
PLA/HIPS (w/w)				
90/10	62.2	122.1	151.3,156.6	-
80/20	62.1	130.1	153.6	100.5
70/30	62.2	132.0	153.7	100.1
60/40	62.0	135.0	153.6	100.2
50/50	62.1	134.1	154.2	100.4
PLA/HIPS/WF/MH (w/w/phr/phr)				
80/20/20/0	62.6	129.7	152.1,	100.6

รูปที่ 4.9 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของ PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ที่อัตราส่วนต่างๆ และ 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิตเติม WF/MH ในอัตราส่วนต่างๆ ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง



**รูปที่ 4.9** DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.9 พบว่า PLA มี  $T_g$  เท่ากับ 62.6 องศาเซลเซียส ขณะที่ HIPS มี  $T_g$  เท่ากับ 100.7 องศาเซลเซียส และเมื่อใส่ HIPS ลงใน PLA พบว่า ปรากฏ  $T_g$  ที่ 2 ตำแหน่ง คือ ประมาณ 62 และ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงค่า  $T_g$  ของ PLA และ HIPS ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า PLA และ HIPS มีการผสมกันแบบไม่เป็นเนื้อเดียว (immiscible blend) อย่างไรก็ตาม ไม่พบ  $T_g$  ของ HIPS ที่พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/HIPS เนื่องจากมีปริมาณของ HIPS เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ พบว่า PLA ล้วน มี  $T_{cc}$  เท่ากับ 130.4 องศาเซลเซียส และในพอลิเมอร์ผสม  $T_{cc}$  ของ PLA จะลดลงในช่วงแรกที่มีปริมาณ HIPS เป็น 10 wt% จากนั้น  $T_{cc}$  จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ HIPS ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใส่ HIPS ใน PLA ทำให้โมเลกุลของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมจัดเรียงตัวเกิดผลึกได้ช้าลง เนื่องจากถูกขัดขวางด้วยโมเลกุลของ HIPS และเมื่อพิจารณาค่า  $T_m$  พบว่า PLA ล้วน มีค่า  $T_m$  เท่ากับ 153.5 องศาเซลเซียส ขณะที่ไม่พบ  $T_m$  ของ HIPS เนื่องจาก HIPS มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (amorphous) และในพอลิเมอร์ผสม 90/10 พบว่า ปรากฏพีคการหลอมเหลว 2 ตำแหน่ง ที่ 153.3 และ 156.6 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจาก PLA เกิดผลึกที่ไม่สมบูรณ์และเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่า (153.3 องศาเซลเซียส) แล้ว PLA หลอมเหลวสามารถเกิดผลึกใหม่ (recrystallization) ที่มีโครงสร้างสมบูรณ์มากกว่าและเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่า (156.6 องศาเซลเซียส) สำหรับ 80/20 PLA/HIPS ที่มีการใส่ WF 20 phr พบว่า มีพฤติกรรมทางความร้อน ( $T_g$ ,  $T_{cc}$  และ  $T_m$ ) เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 80/20

PLA/HIPS หากแต่เมื่อใส่ MH ใน 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิต พบว่า ไม่สามารถหาพฤติกรรมทางความร้อนจากการให้ความร้อนครั้งที่สองได้ เนื่องจาก MH เกิดการการสลายตัวเมื่อถูกความร้อนเมื่อให้ความร้อนตั้งแต่ครั้งแรกและครั้งที่สองจึงไม่มีพฤติกรรมทางความร้อนเกิดขึ้น

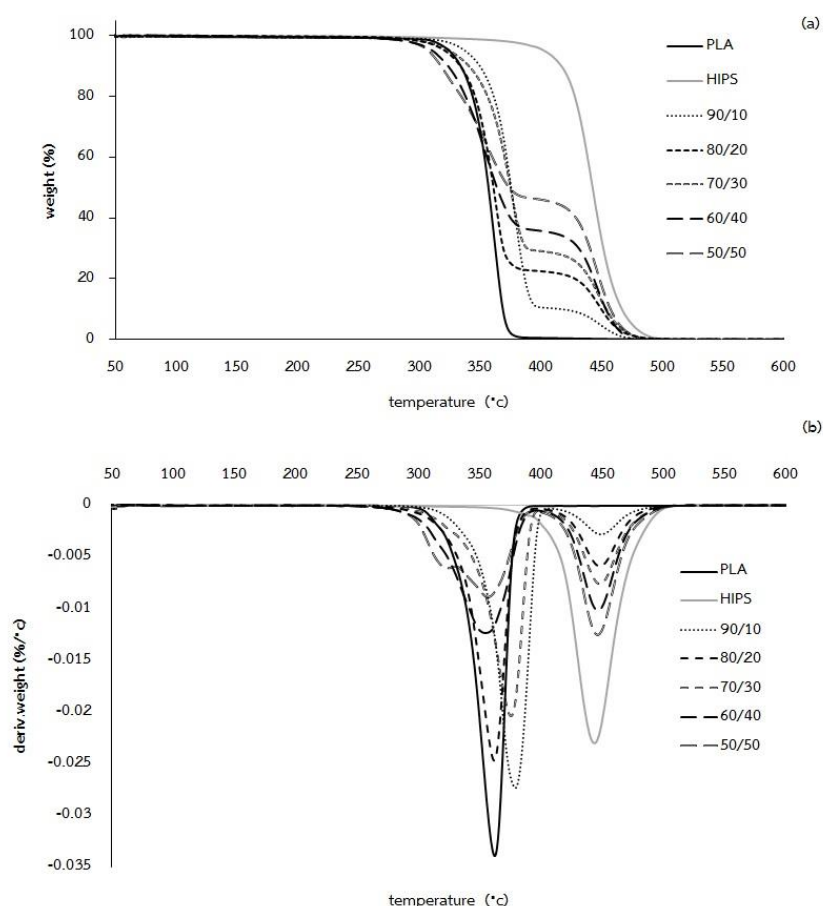
#### 4.4 เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability)

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์หาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของ PLA, HIPS พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตเติม WF/MH ในอัตราส่วนต่างๆ ในเทอมของอุณหภูมิเริ่มสลายตัว ( $T_{onset}$ ), อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด ( $T_{max}$ ), อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ( $T_{end\ set}$ ) และปริมาณเถ้า (char) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, HIPS, WF, MH, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต

Sample	$T_{onset1}$ (°C)	$T_{max1}$ (°C)	$T_{end\ set1}$ (°C)	$T_{onset2}$ (°C)	$T_{max2}$ (°C)	$T_{end\ set2}$ (°C)	$T_{onset3}$ (°C)	$T_{max3}$ (°C)	$T_{end\ set3}$ (°C)	char (%)
PLA	-	-	-	334.6	362.4	377.2	-	-	-	-
HIPS	-	-	-	-	-	-	414.0	443.5	474.9	-
PLA/HIPS (w/w)										
90/10	-	-	-	353.6	379.1	396.8	422.5	449.3	476.2	-
80/20	-	-	-	347.1	378.2	398.7	421.2	448.2	475.3	-
70/30	-	-	-	344.6	375.6	391.1	420.8	448.2	475.9	-
60/40	-	-	-	309.7	354.5	384.9	420.8	446.4	474.0	-
50/50	-	-	-	297.9	356.8	385.0	420.3	466.3	474.3	-
PLA/HIPS/WF/MH (w/w/phr/phr)										
80/20/20/0	-	-	-	314.0	353.2	368.8	414.5	438.8	462.5	-
80/20/20/20	241.5	257.7	284.2	337.5	361.1	381.1	434.7	463.5	485.7	18.7
80/20/20/30	240.4	255.7	270.7	332.7	357.6	377.3	430.7	461.5	483.3	23.4
80/20/20/40	237.5	252.9	264.9	326.4	353.0	373.7	432.5	455.0	484.0	30.8

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดง TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของของ PLA, HIPS และ พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ที่อัตราส่วนต่างๆ และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่เติม WF/MH ใน อัตราส่วนต่างๆ ตามลำดับ

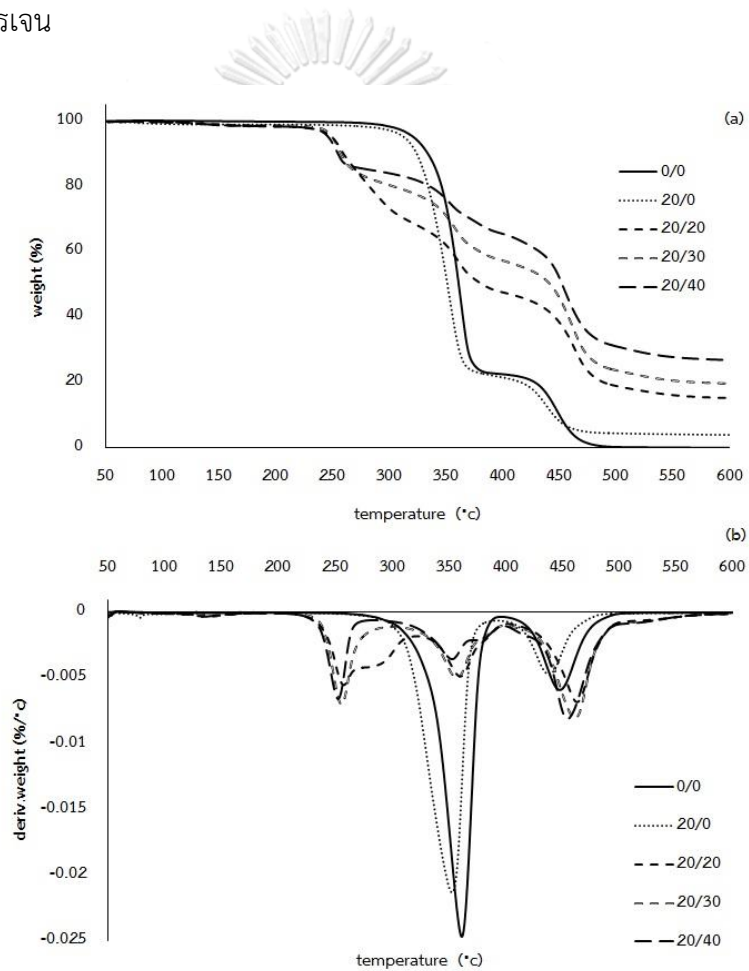


รูปที่ 4.10 (a) TGA และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.10 พบว่า PLA มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 334.6–377.2 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิสลายตัวสูงสุดที่ 362.4 องศาเซลเซียส ขณะที่ HIPS มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 414–474.9 องศาเซลเซียสและมีอุณหภูมิสลายตัวสูงสุดที่ 443.5 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า HIPS มีเสถียรภาพทางความร้อนมากกว่า PLA อย่างชัดเจน เมื่อใส่ HIPS ใน PLA พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัว 2 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นการสลายตัวของ PLA และชั้นที่สองเป็นการสลายตัวของ HIPS โดยพบว่าพอลิเมอร์ผสม 90/10, 80/20



และ 70/30 PLA/HIPS มี  $T_{\text{onset}}$  สูงกว่า PLA ล้วน โดยเพิ่มจาก 334.6 องศาเซลเซียส เป็น 353.6, 347.1 และ 344.6 MPa ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใส่ HIPS ใน PLA ช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนให้กับพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่ HIPS ใน PLA ที่ปริมาณมากกว่า 30 wt% พบว่า  $T_{\text{onset}2}$  มีค่าลดลงต่ำกว่า PLA ล้วน อาจเนื่องมาจากความไม่เข้ากันของ PLA/HIPS ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเฟสที่ความร้อนสามารถแพร่ผ่านเข้าไปได้มากขึ้น ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมลดลง นอกจากนี้ พบว่า PLA, HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ทุกอัตราส่วนไม่มีแก้วเหลืออยู่เลย แสดงให้เห็นว่าขึ้นทดสอบเกิดการสลายตัวได้หมดที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

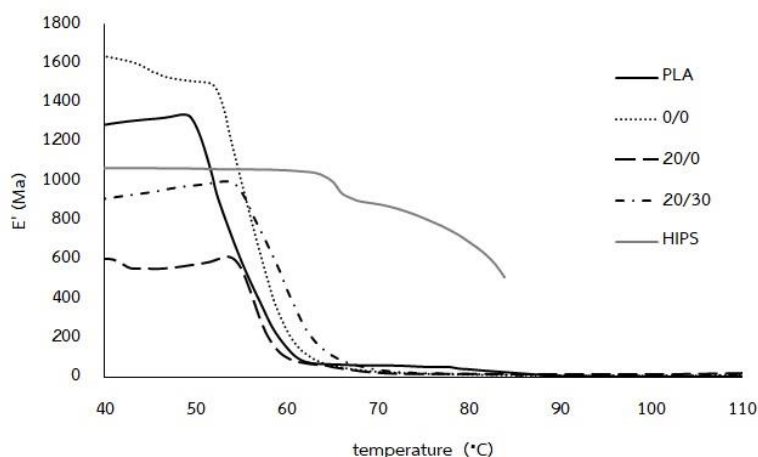


รูปที่ 4.11 (a) TGA และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอลิเมอร์

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.11 พบว่า WF มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 316-378 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 364.8 องศาเซลเซียส ขณะที่ MH ช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 373-426 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 405 องศาเซลเซียส (แสดงในภาคผนวก ค) และเมื่อใส่ WF ในพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS พบว่า คอมพอสิตมีการสลายตัว 2 ชั้น เช่นเดียวกับกับพอลิเมอร์ผสม โดยชั้นแรกเป็นการสลายตัวของ PLA (ในช่วง 314-368.8 องศาเซลเซียส) และชั้นที่สองเป็นการสลายตัวของ HIPS (ในช่วง 414.5-462.5 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ทั้งนี้เนื่องจาก WF มีการสลายตัวที่ต่ำ นอกจากนี้การใส่ MH ใน 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิต พบการสลายตัว 3 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นการสลายตัวเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และชั้นที่สองและสามเป็นการสลายตัวของ PLA และ HIPS ตามลำดับ โดยพบว่า การใส่ MH ส่งผลให้ เสถียรภาพทางความร้อนของ 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิตได้รับการปรับปรุง เนื่องจาก MH สามารถดูดซับความร้อนและสลายตัวเป็นเถ้าปกคลุมชั้นทดสอบไม่ให้ความร้อนแพร่ผ่านไปถึง โดยจะเห็นได้จากปริมาณเถ้าของคอมพอสิตเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ MH ที่เพิ่มมากขึ้น

#### 4.5 สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical properties)

สมบัติเชิงกลพลวัตของ PLA ล้วน และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตในอัตราส่วน 0/0, 20/0 และ 20/30 WF/MH ด้วยเทคนิค DMA ในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 110 องศาเซลเซียส ได้แสดงในลักษณะ DMA เทอร์โมแกรม ในรูปที่ 4.12 ในเทอมของมอดูลัสสะสม (storage modulus,  $E'$ )

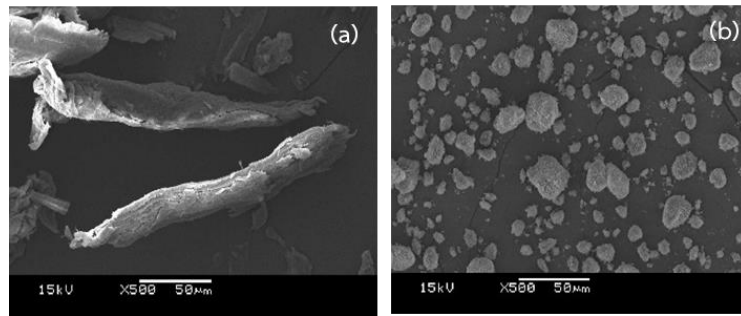


รูปที่ 4.12 สมบัติเชิงกลพลวัต: โมดูลัสสะสมของ PLA, HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต

จากรูปที่ 4.12 พบว่า โมดูลัสสะสมของ PLA มีค่าสูงกว่า HIPS เนื่องจาก PLA เป็นวัสดุที่มีความแข็งตึงสูงกว่า HIPS หากแต่เมื่อใส่ HIPS ใน PLA พบว่า โมดูลัสสะสมของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่า PLA ล้วน เนื่องจาก HIPS สามารถกระจายตัวได้ดีใน PLA เมทริกซ์จึงอาจเกิดการขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์โมเลกุล ซึ่งเป็นผลสอดคล้องกับยังส์โมดูลัสจากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS ที่เติม WF และ MH ในอัตราส่วน 20/0 และ 20/30 (WF/MH) พบว่า โมดูลัสสะสมของคอมพอสิตมีค่าต่ำกว่า PLA ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากอันตรกิริยาที่ต่ำระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้เกิดปริมาตรอิสระ (free volume) ภายในเมทริกซ์ จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ณ อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  ดังนั้น คอมพอสิตจึงมีโมดูลัสสะสมลดลงหากแต่การใส่ MH ใน 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิต พบว่า โมดูลัสสะสมมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความแข็งตึงของ MH

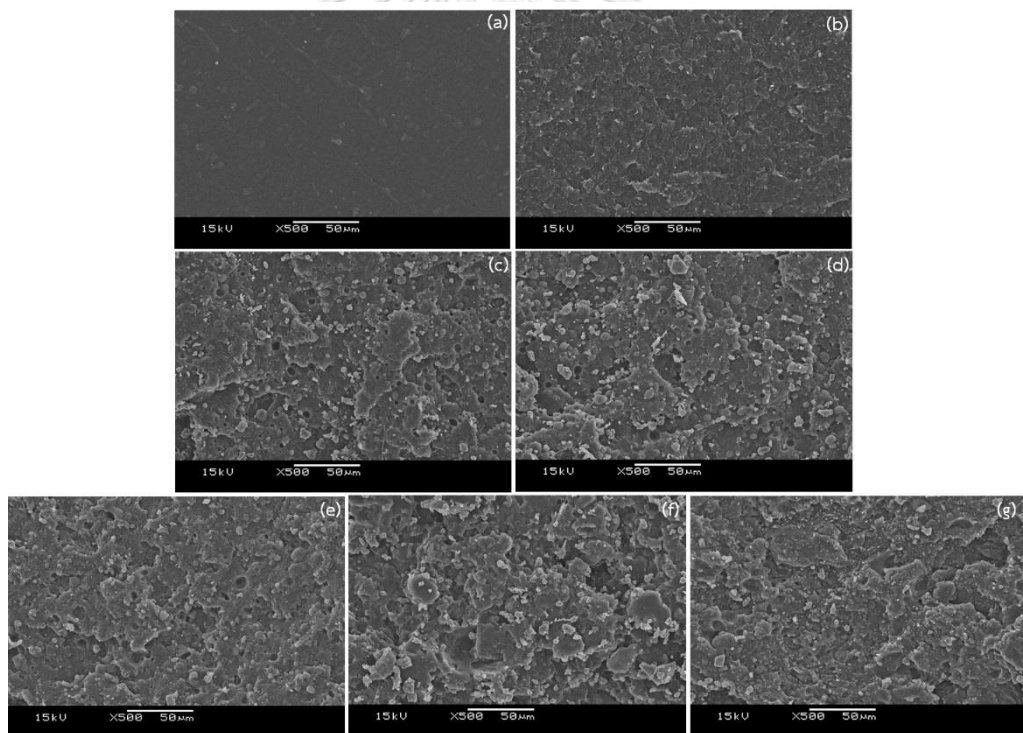
#### 4.6 สัณฐานวิทยา (morphology)

รูปที่ 4.13 แสดงสัณฐานวิทยาของ WF และ MH ที่ตรวจสอบด้วย SEM ภายใต้กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า อนุภาคของ WF มีรูปร่างเป็นแท่งขนาดใหญ่และมีพื้นผิวขรุขระ (รูปที่ 4.13(a)) ขณะที่ MH มีรูปร่างเป็นก้อนกลมขนาดไม่แน่นอน (รูปที่ 4.13(b))



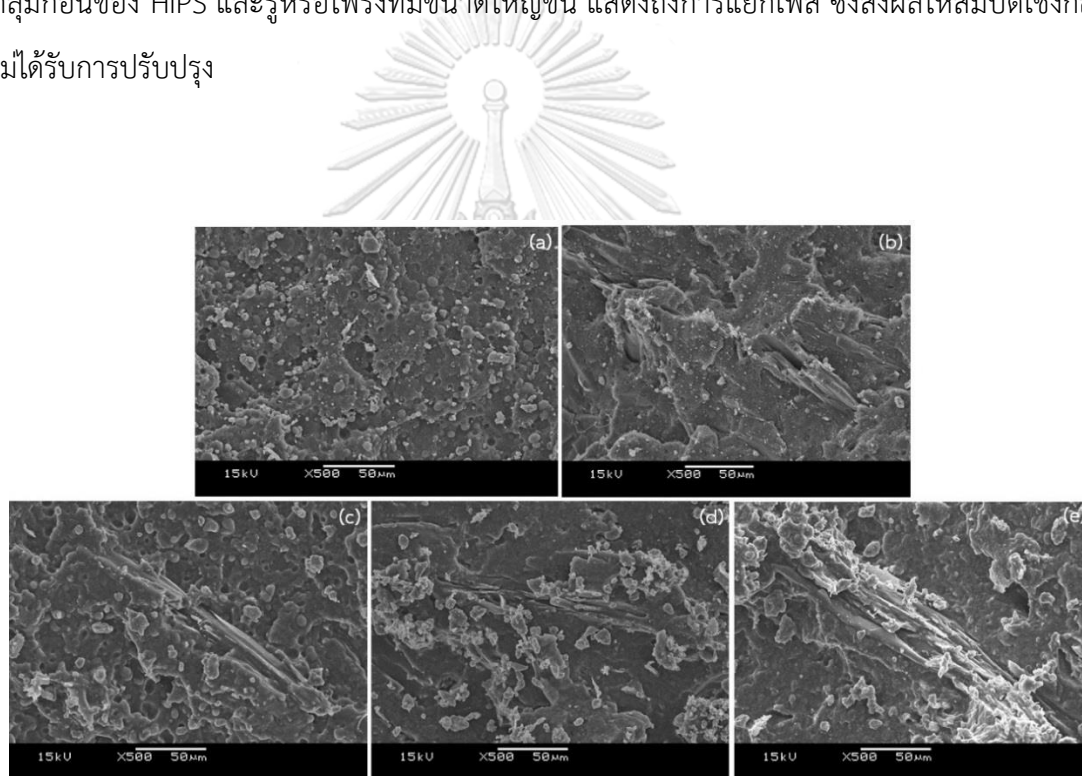
รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของ (a) WF และ (b) MH ที่กำลังขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักจากการทดสอบความทนแรงกระแทกของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตในอัตราส่วน WF/MH ต่างๆ กัน ตามลำดับ ซึ่งตรวจสอบด้วย SEM ภายใต้อัตราส่วนขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA, (b) HIPS และพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS ที่อัตราส่วน (c) 90/10, (d) 80/20, (e) 70/30, (f) 60/40 และ (g) 50/50 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.14 พบว่า PLA มีพื้นผิวรอยแตกหักที่ค่อนข้างเรียบ (รูปที่ 4.14(a)) ซึ่งแสดงลักษณะของวัสดุที่แข็งเปราะ ในขณะที่ HIPS (รูปที่ 4.14(b)) มีพื้นผิวรอยแตกค่อนข้างขรุขระและมีลักษณะเป็นคลื่นเล็กๆ ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น และเมื่อใส่ HIPS ใน PLA ที่ปริมาณต่ำๆ (10 และ 20 wt%) (รูปที่ 4.14(c) และ d)) พบว่า อนุภาคของ HIPS กระจายตัวได้ดีในเนื้อ PLA เมทริกซ์ ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมอัตราส่วนเหล่านี้มีความทนแรงกระแทกและยังสัมผัสที่ดี หากแต่พบรูเล็กๆ ซึ่งเกิดจากการที่ HIPS ถูกดึงออกจากเมทริกซ์ของ PLA แสดงถึงแรงยึดเหนี่ยวที่ต่ำระหว่าง PLA และ HIPS อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่ HIPS ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 4.14(e-g)) จะพบกลุ่มก้อนของ HIPS และรูหรือโพรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงถึงการแยกเฟส ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลไม่ได้รับการปรับปรุง



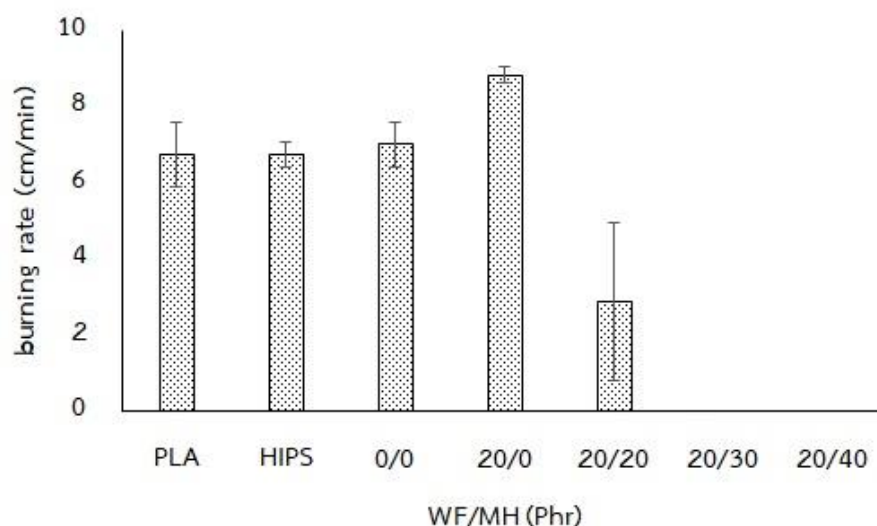
**รูปที่ 4.15** สัณฐานวิทยาของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตในอัตราส่วน WF/MH: (a) 0/0 (b) 20/0, (c) 20/20, (d) 20/30 และ (e) 20/40 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.15 พบว่า เกิดช่องว่างเล็กน้อยบริเวณพื้นผิวรอยต่อระหว่างอนุภาค WF และพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งแสดงถึงแรงยึดเกาะระหว่างเฟสที่ต่ำ หากแต่ลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระของ WF

ทำให้เกิดแรงยึดเกาะทางกายภาพกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้ WF ไม่เกิดการหลุดออกเมื่อได้รับแรงกระแทก นอกจากนี้ เมื่อใส่ MH จะสังเกตเห็นการเกาะกลุ่มของ MH บนพื้นผิวของพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยเฉพาะบริเวณที่มี WF อยู่ ส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มขนาดใหญ่ของสารตัวเติม WF และ MH ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลที่ไม่ได้รับการปรับปรุงเมื่อใส่ MH ในคอมพอสิต

#### 4.7 การลามไฟ (flammability)

รูปที่ 4.16 แสดงค่าอัตราการลามไฟของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS ในอัตราส่วนต่างๆ และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่เติม WF/MH ในอัตราส่วนต่างๆ ตามมาตรฐาน UL-94 โดยการทดสอบในแนวตั้ง (vertical burning- test)



รูปที่ 4.16 อัตราการลามไฟของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต



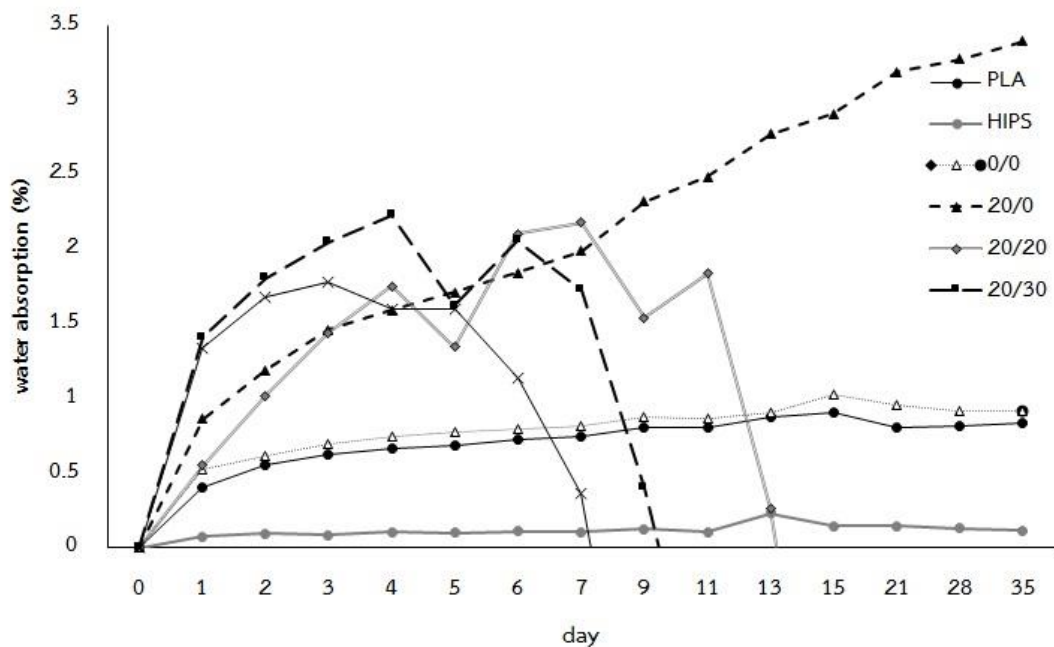
รูปที่ 4.17 ชิ้นทดสอบหลังการทดสอบ UL-94 ของ (a) PLA, (b) HIPS, 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่มีอัตราส่วน WF/MH เท่ากับ (c) 0/0 (d) 20/0, (e) 20/20, (f) 20/30, และ (g) 20/40

จากรูปที่ 4.16 พบว่า PLA มีอัตราการลามไฟเท่ากับ 6.76 cm/min ขณะที่ HIPS มีอัตราการลามไฟเท่ากับ 6.74 cm/min ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับ PLA แสดงให้เห็นว่า PLA และ HIPS เกิดการลามไฟได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อใส่ HIPS และ WF ใน PLA พบว่า มีอัตราการลามไฟเพิ่มขึ้นเท่ากับ 7.03 และ 8.83 cm/min ตามลำดับ เนื่องจากแรงยึดเกาะระหว่างเฟสไม่ดี ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเฟสที่ทำให้ออกซิเจนสามารถแทรกเข้าไปได้ง่ายและเป็นตัวช่วยให้เกิดการลามไฟต่อไป อีกทั้ง HIPS ที่มีส่วนประกอบของยาง (พอลิบิวทาไดอิน) ที่เป็นวัสดุที่ติดไฟได้ดี และ WF สารอินทรีย์ที่เกิดการติดไฟได้ดีเช่นกัน จึงทำให้ชิ้นงานมีอัตราการลามไฟสูงกว่า PLA ล้วน อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่ MH ในคอมพอสิตเพียง 20 phr ส่งผลให้อัตราการลามไฟลดลงถึง 4.53 cm/min และเมื่อเติม MH ในปริมาณมากกว่า 30 phr สามารถทำให้วัสดุดับไฟได้ด้วยตัวเอง เนื่องจาก MH เป็นสารต้านทานการติดไฟโดยการดูดความร้อน และเมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้นจะมีการสลายตัวเปลี่ยนเป็นออกไซด์ของแมกนีเซียม (magnesium oxide) และน้ำ นอกจากนี้ คอมพอสิตในอัตราส่วน 20/30 และ 20/40 (WF/MH) ถูกจัดอยู่ในเกณฑ์ V-2 และ V-0 ตามลำดับ และรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าชิ้นทดสอบของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS และ 80/20/20 PLA/HIPS/WF

คอมพอสิต เกิดการลามไฟจนหมดแล้ว แต่เมื่อใส่สารตัวเติม MH ใน 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิต จะสังเกตเห็นการลามไฟที่ลดลงจนกระทั่งไม่เกิดการลามไฟของชิ้นทดสอบ

#### 4.8 การดูดซึมน้ำ (water absorption)

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและจำนวนวันที่ทำการทดสอบของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS และ 80/20 PLA/PBAT คอมพอสิต



รูปที่ 4.18 การดูดซึมน้ำของ PLA, HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต

จากรูปที่ 4.18 พบว่า PLA, พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต มีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 4 วันแรกของการทดสอบ ขณะที่ HIPS ไม่มีการดูดซึมน้ำ เนื่องจาก HIPS มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และเมื่อใส่ HIPS ใน PLA พบว่า พอลิเมอร์ผสมสามารถดูดซึมน้ำได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากช่องว่างระหว่างเฟสที่เกิดขึ้น ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ การดูดซึมน้ำของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่มีอัตราส่วน 20/0 (WF/MH) พบว่า มีอัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากเกิดช่องว่างระหว่าง

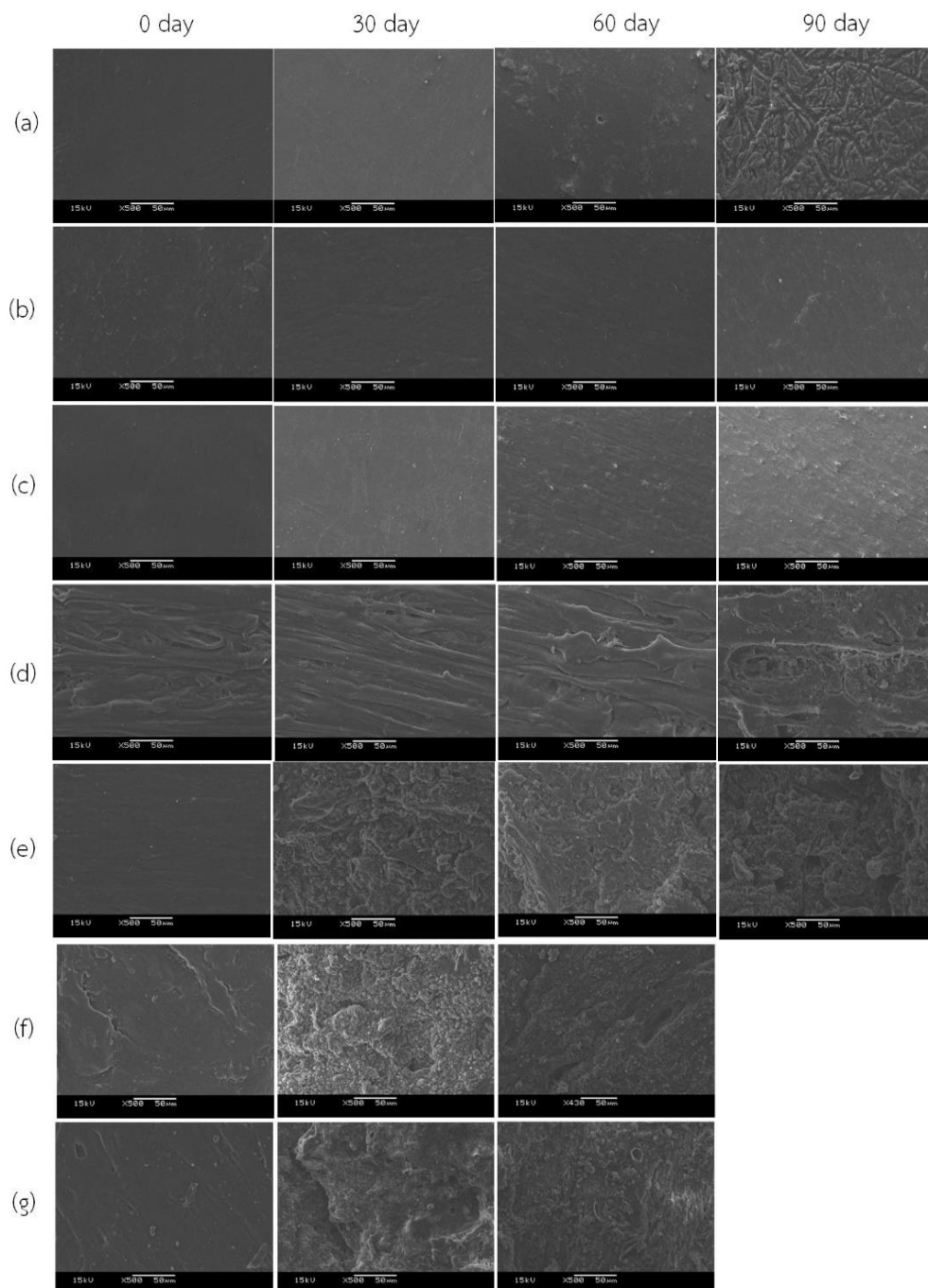


รอยต่อของ WF กับเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ รวมทั้ง WF นั้นมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ชอบน้ำส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากขึ้น แสดงให้เห็นความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ที่เคลื่อนตัวเข้าไปในชิ้นงานโดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลางได้มากขึ้น ขณะที่ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่อัตราส่วน 20/20, 20/30 และ 20/40 (WF/MH) พบว่า มีอัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และหลังจากผ่านการแช่ไปเป็นเวลา 5 วัน พบว่า อัตราการดูดซึมน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการทดสอบมากกว่า 5 วัน พบว่า ชิ้นทดสอบของ PLA/HIPS/WF/MH คอมพอสิตเริ่มเกิดการเปื่อยและร่อนทำให้สูญเสียรูปชิ้นทดสอบ จนไม่สามารถทำการทดสอบได้ ซึ่งเกิดจากการดูดซึมน้ำที่มากขึ้นของทั้ง WF และ MH ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบ แสดงให้เห็นการใส่ MH ช่วยส่งเสริมการย่อยสลายของคอมพอสิต

#### 4.9 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน

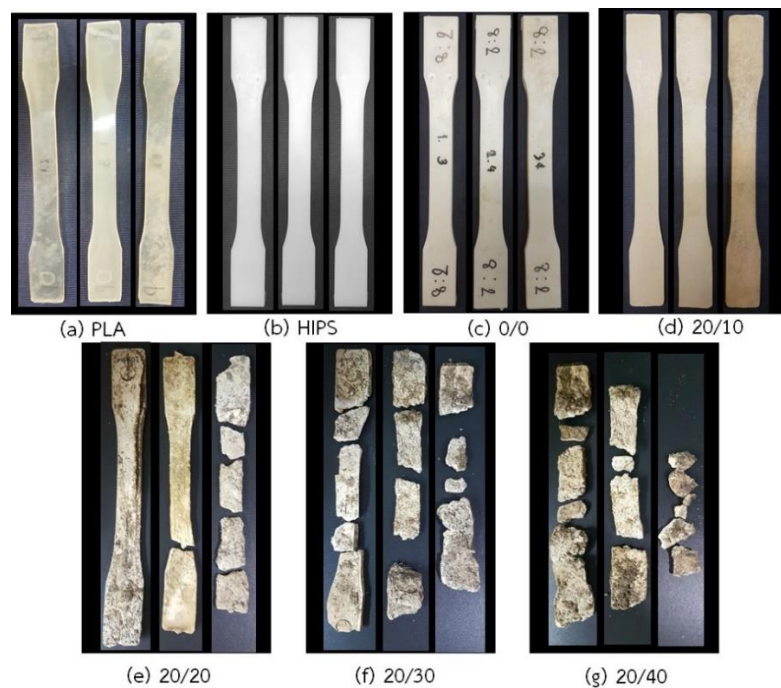
##### 4.9.1 สันฐานวิทยา

รูปที่ 4.19 แสดงสันฐานวิทยาบนพื้นผิวชิ้นทดสอบของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS ในอัตราส่วนต่างๆ และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่เติม WF/MH ในอัตราส่วนต่างๆ ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60 และ 90 วัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA, (b) HIPS, คอมพอสิตที่มีอัตราส่วน WF/MH เท่ากับ (c) 0/0 (d) 20/0, (e) 20/20, (f) 20/30, และ (g) 20/40 ที่กำลังขยาย 500 เท่า ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60 และ 90 วัน

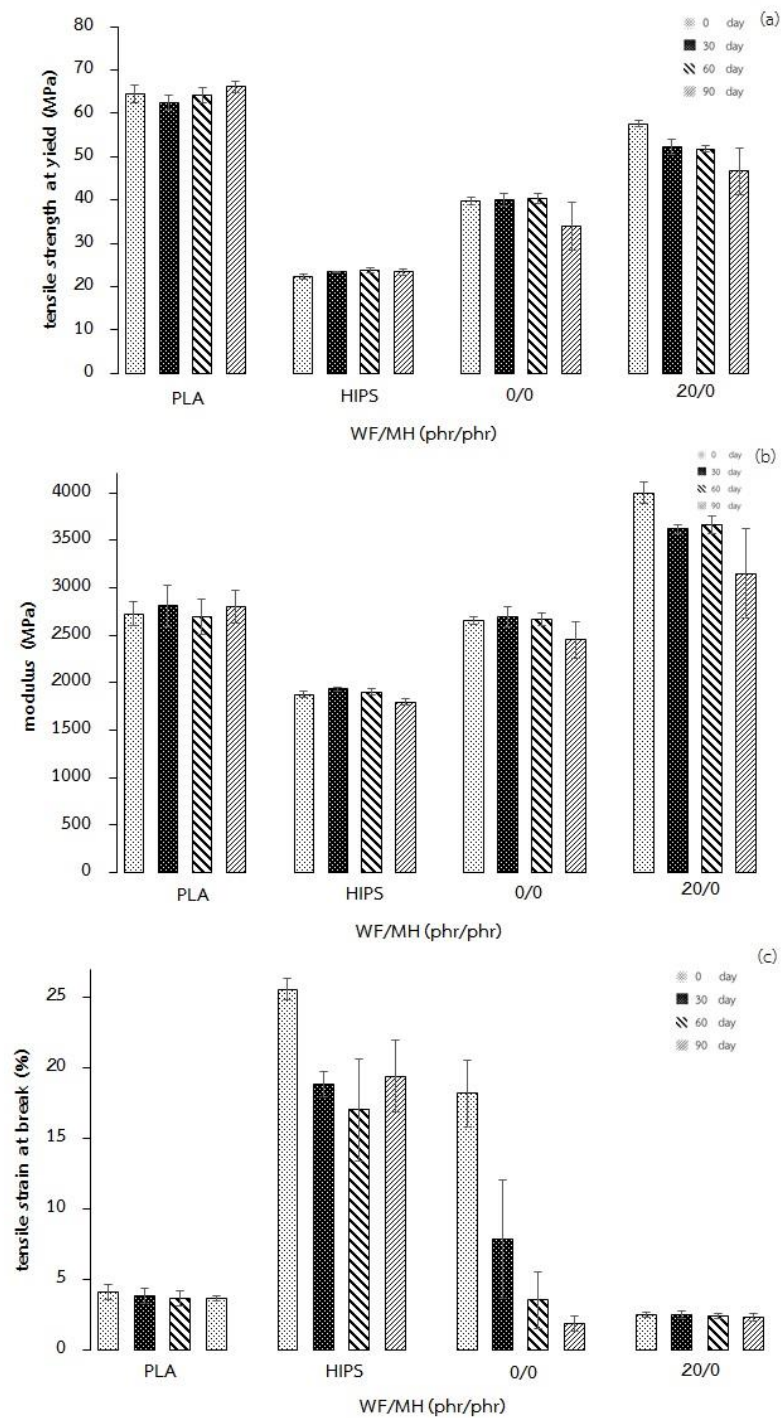
จากรูปที่ 4.19 พบว่า พื้นผิวของชิ้นทดสอบก่อนทำการฝังดินมีลักษณะค่อนข้างเรียบหลังจากฝังดิน พบว่า PLA (รูปที่ 4.19(a)) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (30 วัน) และเมื่อเวลาฝังดินผ่านไป 60 วัน บริเวณพื้นผิวมีรอยหยาบและรูพรุนเกิดขึ้น และเกิดการกร่อนที่ผิวชิ้นทดสอบมากขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเวลาฝังดินผ่านไป 90 วัน แสดงให้เห็นว่า PLA สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ ขณะที่ HIPS ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.19(b)) แสดงให้เห็นว่า HIPS ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เมื่อใส่ HIPS ใน PLA (รูปที่ 4.19(c)) พบว่า เกิดรอยแตกเป็นทางยาวที่พื้นผิวของชิ้นทดสอบหลังจากฝังดินเป็นเวลา 60 วัน และมีรอยหยาบและรอยแตกเพิ่มขึ้นหลังฝังดิน 90 วัน หากแต่รอยแตกจากการสลายตัวของพื้นผิวน้อยกว่า PLA ล้วน เนื่องจากการใส่ HIPS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ใน PLA ส่งผลให้การย่อยสลายทางชีวภาพของชิ้นทดสอบเกิดได้ช้าลง นอกจากนี้ การใส่ WF ในพอลิเมอร์ผสม (รูปที่ 4.19(d)) ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวอย่างชัดเจนโดยช่วงแรกจะเกิดรอยลึกบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบมากขึ้น และเกิดการกร่อนของชิ้นทดสอบเมื่อฝังดินเป็นเวลา 90 วัน แสดงให้เห็นว่าการเติม WF ช่วยทำให้เกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้น ขณะที่การใส่ MH (รูปที่ 4.19(e-g)) สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบได้อย่างชัดเจนเมื่อฝังดินเป็นเวลา 30 วัน โดยพื้นผิวมีรอยหยาบและแตกหัก และเมื่อฝังดินเป็นเวลามากขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวมีรอยหยาบลดลง หากแต่มีลักษณะรอยลึกเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายทางชีวภาพของชิ้นทดสอบมากขึ้น นอกจากนี้ ในการทดสอบนั้นไม่สามารถทำการตรวจสอบสัญญาณวิทยาของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่อัตราส่วน 20/30 และ 20/40 (WF/MH) หลังจากฝังดินเป็นเวลา 90 วัน เนื่องจากชิ้นทดสอบเกิดการเสียหายไม่สามารถทำการตรวจสอบได้ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ลักษณะชิ้นทดสอบหลังฝังดินเป็นเวลา 30, 60 และ 90 วัน ของ PLA, HIPS, และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตในอัตราส่วนต่างๆ

#### 4.9.2 สมบัติความทนแรงดึงหลังฝังดิน

รูปที่ 4.21 แสดงสมบัติความทนแรงดึงของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS ในอัตราส่วนต่างๆ และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตที่เติม WF/MH ในอัตราส่วนต่างๆ หลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60 และ 90 วัน



รูปที่ 4.21 สมบัติความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งส์มอดุลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ PLA, HIPS, และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตในอัตราส่วนต่างๆภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60 และ 90 วัน

จากรูปที่ 4.21 พบว่า ความทนแรงดึงและค่ายังสัมมูล์ของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากการฝังดินในเวลาไม่มากพอจึงเกิดการย่อยสลายที่พื้นผิวของชิ้นงานเท่านั้น ดังนั้น ภายในชิ้นทดสอบจึงยังคงสภาพเดิมอยู่ในช่วงระยะเวลาของการทดสอบ ขณะที่การยึดตัว ณ จุดขาดของ HIPS และพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการฝังดินอาจทำให้เกิดแรงกดต่อชิ้นทดสอบที่มีความอ่อนตัว อย่างไรก็ตาม การใส่ WF ในพอลิเมอร์ผสม พบว่า มีความทนแรงดึงและยังสัมมูล์ลดลงเมื่อผ่านการฝังดินมากกว่า PLA ล้วน เนื่องจาก ชิ้นทดสอบเกิดการย่อยสลายได้มากกว่า PLA ล้วน ดังที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ ชิ้นทดสอบ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต ที่อัตราส่วน 20/20, 20/30 และ 20/40 (WF/MH) ไม่สามารถทดสอบสมบัติความทนแรงดึงหลังการฝังดิน เนื่องจากชิ้นทดสอบเกิดการย่อยสลายจนไม่สามารถนำมาทดสอบได้ดังรูปที่ 4.20



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง และความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS พบว่า การใส่ HIPS ลงใน PLA ทำให้ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ และความทนแรงดัดโค้งลดลงหากแต่สมบัติความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น โดยพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS เมื่อนำไปเตรียมเป็นคอมพอสิตด้วย WF ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด จึงเลือกนำไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับ WF และ MH ที่อัตราส่วนต่างๆ (20/0, 20/20, 20/30, และ 20/40 phr/phr)

5.1.2 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง และความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิต PLA/HIPS/WF/MH พบว่า การใส่ WF ในพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS ทำให้ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ เพิ่มขึ้น หากแต่การยืดตัว ณ จุดขาด และความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS และการใส่ MH ใน 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิต ทำให้สมบัติเชิงกลทั้งหมดมีค่าลดลง ยกเว้นค่ายังสัมพันธ์ มีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.3 จากการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS มีการผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และการเติม HIPS ลงใน PLA ทำให้โมเลกุลของ PLA เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกช้าลง และเมื่อใส่สารตัวเติม WF ในพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS พบว่า พฤติกรรมทางความร้อนของคอมพอสิตมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ

5.1.4 จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่า การเติม HIPS ลงใน PLA ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม HIPS ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และเมื่อใส่สารตัวเติม WF ในพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่สารตัวเติม MH ใน 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิต ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.5 จากการศึกษาอัตราการลามไฟ พบว่า การใส่ HIPS ใน PLA ทำให้อัตราการลามไฟไม่เปลี่ยนแปลง หากแต่เมื่อใส่สารตัวเติม WF ในพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS พบว่า อัตราการลามไฟของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่สารตัวเติม MH ใน 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิต ทำให้อัตราการลามไฟลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อทำการเติม MH ที่ปริมาณมากกว่า 30 phr พบว่า วัสดุสามารถดับไฟได้ด้วยตัวเอง

5.1.6 จากการศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ พบว่า PLA มีการดูดซึมน้ำที่ค่อนข้างต่ำ ขณะที่ HIPS ไม่เกิดการดูดซึมน้ำ และเมื่อใส่ HIPS ใน PLA ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า มีการดูดซึมน้ำสูงขึ้นเล็กน้อย และเมื่อใส่สารตัวเติม WF และ MH ในพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS พบว่า การดูดซึมน้ำของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด หากแต่การดูดซึมน้ำหลัง 4 วัน 80/20/20 PLA/HIPS/WF คอมพอสิต ที่ใส่ MH ทุกอัตราส่วน มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากชั้นทดสอบเกิดการเปื่อยและร่อนออกขณะทำการทดสอบ

5.1.7 จากการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่า PLA, พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS และ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต สามารถเกิดการย่อยสลายได้ในภาวะการทดสอบ และสามารถย่อยสลายได้เร็วขึ้น ตามปริมาณ WF และ MH ที่เพิ่มขึ้น หากแต่ HIPS ไม่สามารถเกิดการย่อยสลายได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทดลองใช้สารช่วยผสม (compatibilizer) ระหว่าง PLA และ HIPS เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด
2. ทดลองดัดแปรผิวของ WF และ MH เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์
3. ทดลองใช้สารต้านทานการติดไฟชนิดอื่นร่วมกับ MH



### รายการอ้างอิง

- [1] Laycock, B., et al. Lifetime prediction of biodegradable polymers. Progress in Polymer Science 71 (2017): 144-189.
- [2] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. พลาสติกย่อยสลายได้นวัตกรรมเพื่อโลก [Online]. 2018. Available from:  
<http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/39.pdf>
- [3] Garlotta, D. A literature review of poly (lactic acid). Journal of Polymers and the Environment 9(2) (2001): 63-84.
- [4] Sasipong, S. Silver nano/poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) nanocomposite:perparation. Master of Engineering Program, Material Science and Engineering Silpakorn University, 2012.
- [5] Odian, G. Principles of polymerization. John Wiley & Sons, 2004.
- [6] Lim, L.-T., Auras, R., and Rubino, M. Processing technologies for poly (lactic acid). Progress in polymer science 33(8) (2008): 820-852.
- [7] Corre, Y.-M., Duchet, J., Reignier, J., and Maazouz, A. Melt strengthening of poly (lactic acid) through reactive extrusion with epoxy-functionalized chains. Rheologica Acta 50(7-8) (2011): 613-629.
- [8] Patel, M., Marscheider-Weidemann, F., Schleich, J., Hüsing, B., and Angerer, G. Techno-economic feasibility of large-scale production of bio-based polymers in Europe. Technical Report EUR 22103 (2005).
- [9] Farsetti, S., Cioni, B., and Lazzeri, A. Physico-Mechanical Properties of Biodegradable Rubber Toughened Polymers. in Macromolecular Symposia, pp. 82-89: Wiley Online Library, 2011.
- [10] Hamad, K., Kaseem, M., Deri, F., and Ko, Y.G. Mechanical properties and compatibility of polylactic acid/polystyrene polymer blend. Materials Letters 164 (2016): 409-412.
- [11] Polystyrene [Online]. 2018. Available from:  
<http://www.pslc.ws/mactest/styrene.htm>. [ 4 May 2018]

- [12] วุฒิกนกกาญจน์., จ. ปฏิกริยาการดัดแปรโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2016.
- [13] internacional, P. HIPS (High impact polystyrene) [Online]. 2017. Available from: [http:// www.plasticsintl.com/datasheets/Polystyrene.pdf](http://www.plasticsintl.com/datasheets/Polystyrene.pdf)
- [14] หอมเขียว, ช. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 11 (2015): 2.
- [15] Petinakis, E., Yu, L., Edward, G., Dean, K., Liu, H., and Scully, A.D. Effect of matrix–particle interfacial adhesion on the mechanical properties of poly (lactic acid)/wood-flour micro-composites. Journal of Polymers and the Environment 17(2) (2009): 83.
- [16] Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J.-M., and Dubois, P. New prospects in flame retardant polymer materials: from fundamentals to nanocomposites. Materials Science and Engineering: R: Reports 63(3) (2009): 100-125.
- [17] การเผาไหม้(combustion) [Online]. 2018. Available from: <http://mte.kmutt.ac.th/elearning/themodanamic/web3/CHAP3/three11-33-1.htm> [14 May 2018]
- [18] Ch.Choochuay. อัคคีภัยกับการจำลองด้านพลศาสตร์ [Online]. 2012. Available from: <http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/fire/item/146-%E0%B8%AD%E0%B8%B1%E0%B8%84%E0%B8%84%E0%B8%B5%E0%B8%A0%E0%B8%B1%E0%B8%A2> [17 November 2012]
- [19] Chanprapanon, W., Suppakarn, N., and Jarukumjorn, K. Effect of organoclay types on mechanical properties and flammability of polypropylene/sisal fiber composites. in Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials (ICCM'11): Citeseer, 2011.
- [20] Flame Retardants [Online]. 2011. Available from: <https://polymer-additives.specialchem.com/selection-guide/flame-retardants-center#content> [4 May 2018]
- [21] Papich, M.G. Magnesium Hydroxide. in Saunders Handbook of Veterinary Drugs (Fourth Edition), pp. 467-468. St. Louis: W.B. Saunders, 2016.

- [22] Tang, H., Zhou, X.-b., and Liu, X.-l. Effect of magnesium hydroxide on the flame retardant properties of unsaturated polyester resin. Procedia Engineering 52 (2013): 336-341.
- [23] Gilman, J.W., et al. Flammability properties of polymer– layered-silicate nanocomposites. Polypropylene and polystyrene nanocomposites. Chemistry of materials 12(7) (2000): 1866-1873.
- [24] Liang, J.-Z. Tensile and flexural properties of polypropylene composites filled with highly effective flame retardant magnesium hydroxide. Polymer Testing 60 (2017): 110-116.





## ภาคผนวก ก

## สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก-1 สมบัติเชิงกลของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS

sample	IS (kJ/m <sup>2</sup> )	TS (MPa)	E (MPa)	EB (MPa)	FS (MPa)
PLA	2.159488	49.64	2020.14	3.45	79.51
	2.259683	64.9	2545.92	4.82	79.12
	2.285898	63.95	1978.15	4.44	79.27
	2.348609	60.94	2639	3.99	79.96
	2.486073	64.26	2851.2	4.63	-
	2.595981	66.66	2779.04	3.67	-
	2.452768	66.44	2809.78	4.01	-
<b>Avg.</b>	2.37	62.4	2517.6	4.1	79.465
<b>SD.</b>	0.150226	5.9	369.464	0.5	0.367015
HIPS	8.850018	21.97	1842.05	27.18	34.27
	9.927555	22.98	1844.7	25.03	34.64
	9.764253	18.19	1423.79	25.13	34.02
	8.776264	18.54	1383.13	25.74	35.01
	9.894056	21.59	1914.16	25.07	-
	9.884414	22.48	1883.07	25.38	-
	10.0335	22.87	1901.44	25.5	-
<b>Avg.</b>	9.59	21.2	1741.8	25.6	34.485
<b>SD.</b>	0.536946	2.0	232.9389	0.8	0.432859
<b>PLA/HIPS (w/w)</b>					
<b>90/10</b>	2.719049	46.61	2679.42	21.7	64.32
	3.503922	47.59	2591.67	19.58	65.09
	3.321831	47.43	2655.67	20.04	62.94

sample	IS (kJ/m <sup>2</sup> )	TS (MPa)	E (MPa)	EB (MPa)	FS (MPa)
<b>PLA/HIPS (w/w)</b>					
<b>90/10</b>	2.401726	47.54	2655.82	22.44	55.8
	3.247682	46.78	2866.18	19.15	-
	2.979623	41.29	2695.35	17.79	-
	2.473514	41.26	2786.07	21.83	-
<b>Avg.</b>	2.95	45.5	2704.3	20.4	62.0375
<b>SD.</b>	0.431192	2.9	92.18757	1.7	4.252391
<b>80/20</b>	2.263567	41.09	2688.66	17.99	55.87
	3.030247	39.73	2533.38	18.36	57.46
	2.530396	39.05	2707.21	15.38	56.26
	2.50166	38.95	2613.73	23.13	55.53
	2.206531	37.49	2555.85	18.03	-
	2.317294	39.13	2612.47	17.19	-
	2.470775	39.63	2665.52	17.32	-
<b>Avg.</b>	2.47	39.3	2625.3	18.2	56.28
<b>SD.</b>	0.274998	1.1	65.71712	2.4	0.841309
<b>70/30</b>	2.290513	31.89	2438.85	2.96	42.62
	2.263778	33.6	2485.19	2.78	43.28
	2.37828	26.21	2019.23	2.47	44.05
	2.542102	25.64	2042.58	2.87	43.29
	2.147278	32.16	2485.1	2.67	-
	2.215885	32.45	2528.2	2.79	-
	2.248599	32.25	2545.1	2.99	-
<b>Avg.</b>	2.30	30.6	2363.5	2.8	43.31
<b>SD.</b>	0.128555	3.2	229.8147	0.2	0.584523
<b>60/40</b>	1.893399	31.01	2376.06	7.09	44.17
	2.200897	29.82	2300.64	3.98	43.3
	1.868554	30.29	2291.95	4.02	45.33

sample	IS (kJ/m <sup>2</sup> )	TS (MPa)	E (MPa)	EB (MPa)	FS (MPa)
PLA/HIPS (w/w)					
<b>60/40</b>	1.958216	31.55	2305.03	9.37	44.74
	2.082739	32.21	2387.65	7	-
	1.904502	31.09	2381.96	4.37	-
	1.928008	31.84	2427.22	7.41	-
<b>Avg.</b>	1.98	31.1	2352.9	6.2	44.385
<b>SD.</b>	0.121153	0.8	52.99282	2.1	0.864581
<b>50/50</b>	1.560206	30.71	2202.82	8.59	45.75
	1.898091	32.14	2313.44	11.92	45.16
	1.97607	31.66	2219.05	9.21	45.75
	1.900749	31.92	2375.84	11.43	45.57
	1.897011	32.8	2378.26	8.9	-
	1.879699	32.76	2390.47	8.2	-
	2.032402	32.13	2291.28	10.03	-
<b>Avg.</b>	1.88	32.0	2310.2	9.8	45.5575
<b>SD.</b>	0.150408	0.7	77.01871	1.4	0.278253

ตารางที่ ก-2 สมบัติเชิงกลของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม PLA/HIPS คอมพอสิต WF 20 phr

Sample	IS (kJ/m <sup>2</sup> )	TS (MPa)	E (MPa)	EB (MPa)
<b>PLA/HIPS/WF (w/w/phr)</b>				
<b>100/0/20</b>	2.437536	65.56	4095.84	2.1
	2.104793	64.01	40697.92	2.5
	2.26502	63.91	3987.8	2.3
	2.19801	65.67	4002.78	2.5
	2.372799	65.45	4020.66	2.2
	2.416147	65.25	4132.73	2.4
	2.310276	61.73	3782.74	2.34
<b>Avg.</b>	2.3	64.5	4013.2	2.3
<b>SD.</b>	0.120789	1.4	114.2309	0.1
<b>0/100/20</b>	2.461979	25.14	2756.06	3.01
	2.30957	26.33	2738.51	2.87
	2.3883	24.92	2711.69	1.82
	2.462326	24.87	2678.05	1.94
	2.893001	25.07	2766.9	1.78
	2.522068	25	2755.62	2.24
	2.67177	24.46	2695.1	2.24
<b>Avg.</b>	2.5	25.1	2728.8	2.3
<b>SD.</b>	0.195706	0.6	34.18651	0.5
<b>90/10/20</b>	2.610791	50.13	3662.19	3.11
	1.751807	52.37	3854.41	2.77
	2.62494	52.47	3907.99	2.73
	2.220008	52.67	3932.71	2.65
	2.362278	51.88	3848.14	2.64
	2.318397	50.31	3667.64	2.83
	2.346971	50.48	3670	2.85



Sample	IS (kJ/m <sup>2</sup> )	TS (MPa)	E (MPa)	EB (MPa)
<b>PLA/HIPS/WF (w/w/phr)</b>				
<b>Avg.</b>	2.3	51.5	3791.9	2.8
<b>SD.</b>	0.292376	1.1	120.7612	0.2
<b>80/20/20</b>	2.372799	57.7	4007.09	2.44
	2.538096	57.8	4015.49	2.7
	2.67268	57.39	4085.31	2.39
	2.379856	59.07	4160.15	2.55
	2.511603	56.44	3979.51	2.3
	2.85748	57.74	3827.41	2.62
	2.98926	57.45	3905.23	2.72
<b>Avg.</b>	2.6	57.7	3997.2	2.5
<b>SD.</b>	0.235483	0.8	109.8093	0.2
<b>70/30/20</b>	2.269765	46.67	3614.7	2.76
	2.182921	43.83	3611.71	2.66
	2.075173	44.61	3633.52	2.5
	2.212096	45.25	3666.15	2.65
	2.054489	46.54	3704.99	2.69
	2.090021	45	3744.11	2.53
	2.055909	45.13	3662.62	2.75
<b>Avg.</b>	2.1	45.3	3662.5	2.6
<b>SD.</b>	0.086351	1.0	48.61965	0.1
<b>60/40/20</b>	2.061046	37.97	3374.88	1.62
	2.09751	31.99	3368.04	1.15
	1.95128	30.32	3350.46	1.08
	2.100618	36.9	3500.15	1.49
	1.853082	37.74	3482.23	1.75
	1.88805	29.07	3468.27	1
	1.886017	37.18	3438.49	1.47

Sample	IS (kJ/m <sup>2</sup> )	TS (MPa)	E (MPa)	EB (MPa)
<b>PLA/HIPS/WF (w/w/phr)</b>				
<b>Avg.</b>	2.0	34.5	3426.1	1.4
<b>SD.</b>	0.107296	3.8	60.93939	0.3
<b>50/50/20</b>	1.825973	35.89	3191.23	2.13
	1.818915	35.68	3334.5	1.94
	2.012684	35.53	3311.72	2.29
	2.870177	35.48	3218.71	1.9
	1.885894	36.57	3357.53	2.02
	1.927892	35.68	3326.82	2.11
	1.980217	37.71	3324.82	2.22
<b>Avg.</b>	2.0	36.1	3295.0	2.1
<b>SD.</b>	0.370645	0.8	63.56088	0.1

ตารางที่ ก-3 สมบัติเชิงกลของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต WF/MH ในอัตราส่วนต่างๆ

Sample	IS (kJ/m <sup>2</sup> )	TS (MPa)	E (MPa)	EB (MPa)	FS (MPa)	FM (MPa)
WF/MH (phr/phr)						
20/20	1.943389	26.24	4194.65	1.06	23.77	948.2
	1.415604	30.23	4254.91	1.16	21.1	2363
	1.142375	30.84	4349.18	1.12	21.23	2363
	1.926876	31.11	4331.79	1.11	29.5	2338
	1.517374	-	-	-	18.85	1364
	1.559088	-	-	-	-	-
<b>Avg.</b>	1.6	29.6	4282.6	1.1	22.89	1753.3
<b>SD.</b>	0.327216	2.3	71.54133	0.0	4.084	710.43
20/30	1.194935	31.26	4965.01	1.08	23.64	3845
	1.210265	30.28	5009.18	0.94	22.77	872.4
	1.536523	32.31	4741.37	1.32	24.94	907.4
	1.041879	37.72	4814.64	1.38	25.27	3000
	1.77779	-	-	-	27.19	3332
	1.596852	-	-	-	-	-
<b>Avg.</b>	1.3	32.9	4882.6	1.2	24.762	2395.36
<b>SD.</b>	0.291031	3.3	125.6694	0.2	1.68	997.56
20/40	1.223354	24.97	5278.62	0.96	18.56	2714
	1.485268	18.2	5035.79	1.2	18.85	3228
	1.066474	37.73	4763.86	1.71	18.25	2958
	1.273566	31.36	4658.72	2.17	19.72	3200
	1.208276	-	-	-	21.1	3237
	1.287753	-	-	-	-	-
<b>Avg.</b>	1.2	28.1	4934.2	1.5	19.296	3067.4
<b>SD.</b>	0.139731	8.4	279.1956	0.5	1.147	228.42

ตารางที่ ก-4 สมบัติเชิงกลของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม 80/20/20 PLA/HIPS/WF

ภายหลังจากการฝังดิน 30, 60, และ 90 วัน

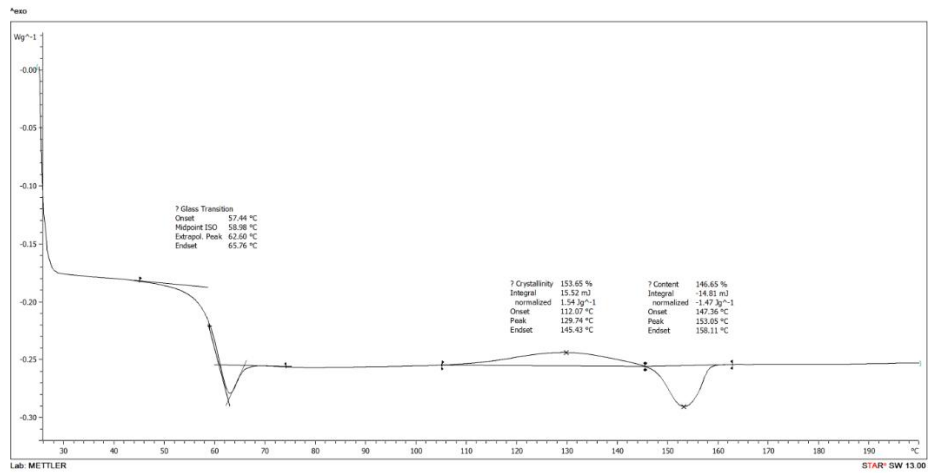
sample	TS			E			EB		
	30	60	90	30	60	90	30	60	90
PLA	63.7	61.8	66.2	2616.6	2608.5	2992.2	4.1	4.2	3.4
	62.8	63.7	66.7	2538.2	2546.5	2822.8	3.6	4.2	3.6
	66.4	65.2	67.9	3019.7	2997.9	2884.1	4.5	3.1	3.8
	66.6	66.0	64.8	2917.4	2590.7	2778.4	3.2	3.5	3.8
	65.7	64.1	64.8	2960.5	2728.8	2534.1	3.4	3.2	3.5
<b>Avg.</b>	62.4	64.2	66.1	2810.5	2694.5	2802.3	3.8	3.68	3.6
<b>SD.</b>	1.7	1.6	1.31	217.6	182.5	170.0	0.5	0.50	0.17
HIPS	23.3	23.7	23.3	1938.8	1934.5	1826.7	19.3	13.4	20.6
	23.5	23.2	24.0	1949.5	1871.9	1800.4	19.0	15.3	21.2
	23.6	24.4	23.4	1904.7	1902.3	1797.1	19.9	17.2	15.0
	23.5	24.1	22.3	1935.4	1884.1	1746.7	18.2	16.0	19.5
	23.5	23.2	23.8	1948.4	1919.4	1822.6	17.6	23.0	20.6
<b>Avg.</b>	23.5	23.7	23.4	1935.4	1902.4	1798.7	18.8	17.0	19.4
<b>SD.</b>	0.1	0.5	0.6	18.1	25.4	31.8	0.9	3.6	2.5
80/20	41.3	40.9	33	2785.0	2679.4	2161.1	8.0	2.3	2.4
	41.3	41.0	38.2	2731.9	2632.1	2528.9	10.0	2.4	1.9
	40.1	40.3	40.6	2778.6	2737.6	2660.1	13.5	3.9	2.4
	39.8	40.6	29.9	2599.8	2718.0	2540	3.4	2.2	1.3
	38.1	38.8	27.6	2560.2	2569.6	2359.7	4.1	6.8	1.3
<b>Avg.</b>	40.1	40.3	33.8	2691.1	2667.4	2449.9	7.8	3.5	1.9
<b>SD.</b>	1.3	0.9	5.4	104.4	67.9	193.7	4.2	1.9	0.5
80/20/20	51.9	52.2	37.4	3612.8	3802.0	2307.1	2.7	2.3	2.6
	53.4	50.8	50.6	3557.2	3623.5	3423.7	2.4	2.4	2.4
	52.0	52.1	46.5	3640.5	3660.4	3356.6	2.4	2.4	
	52.9	52.0	50.2	3623.7	3585.7	3320.7	2.1	2.7	2.3

sample	TS			E			EB		
	30	60	90	30	60	90	30	60	90
80/20/20	53.8	51.8	48.4	3649.7	3646.6	3328.2	2.7	2.3	2.4
Avg.	52.8	51.8	46.6	3616.8	3663.6	3147.3	2.5	2.4	2.3
SD.	0.8	0.5	5.4	36.2	82.3	471.4	0.2	0.1	0.2

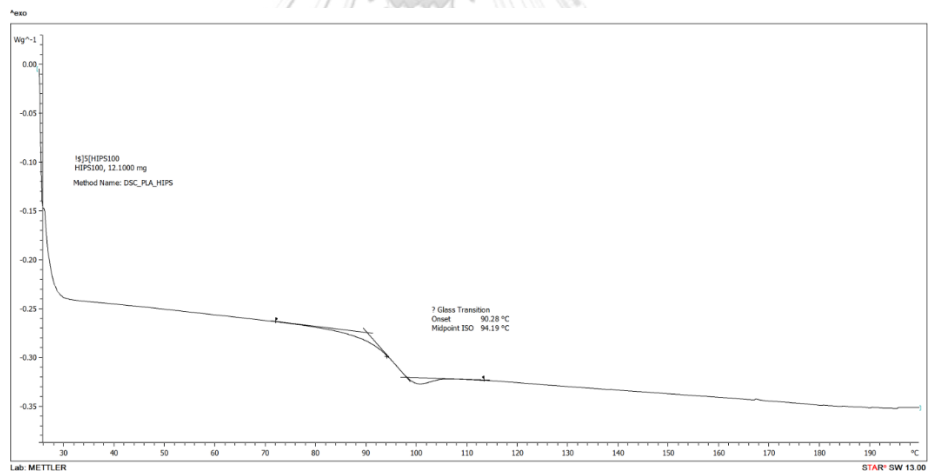


## ภาคผนวก ข

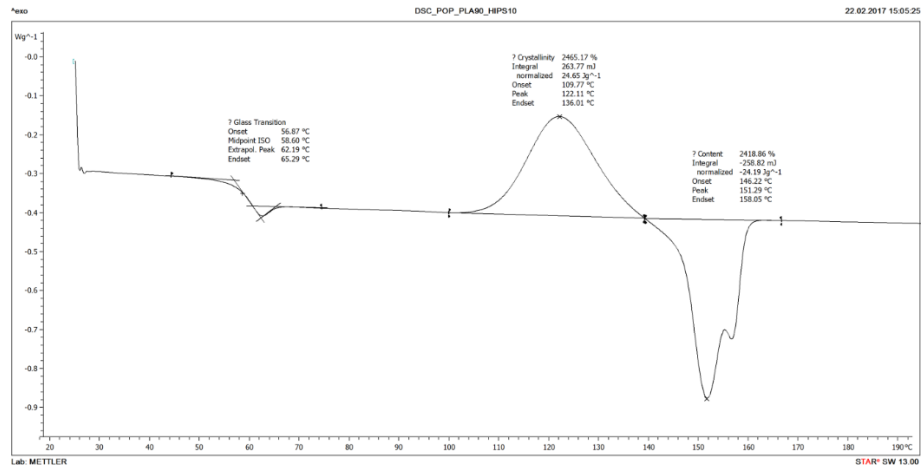
## เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC



รูปที่ ข-1 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ PLA

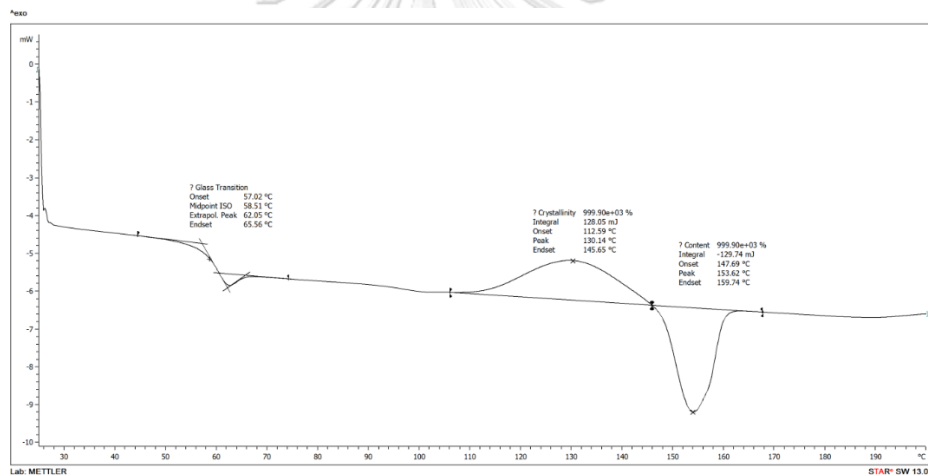


รูปที่ ข-2 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ HIPS



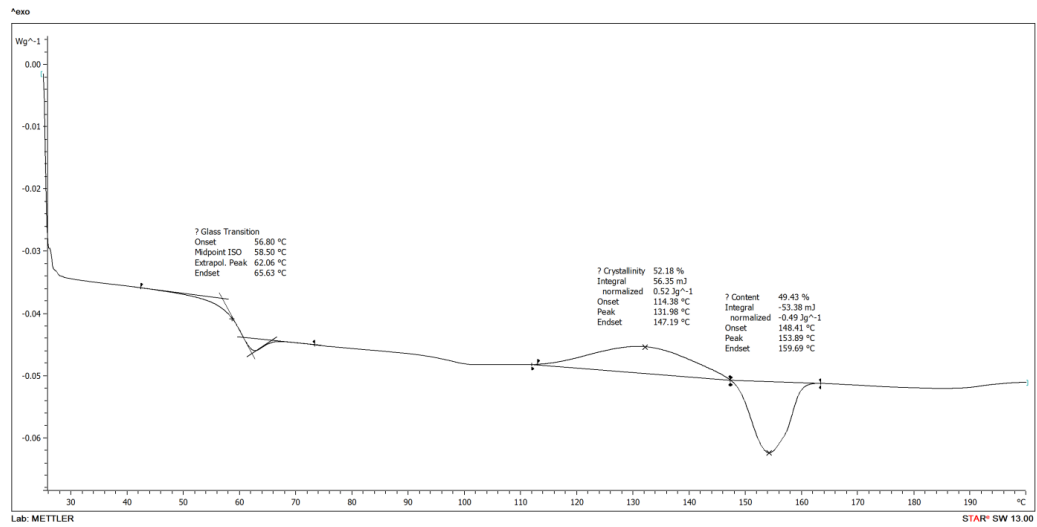
รูปที่ ข-3 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของพอลิเมอร์ผสม 90/10

PLA/HIPS

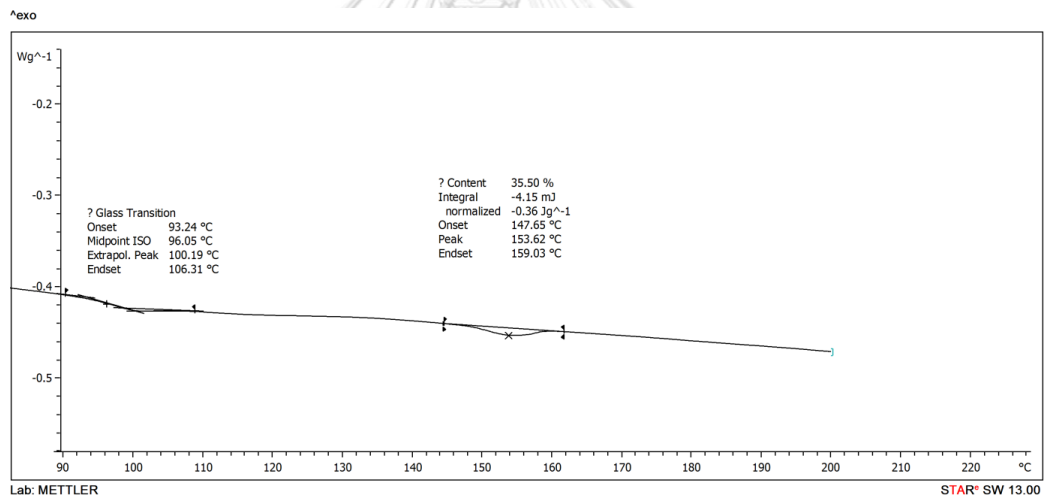


รูปที่ ข-4 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของพอลิเมอร์ผสม 80/20

PLA/HIPS

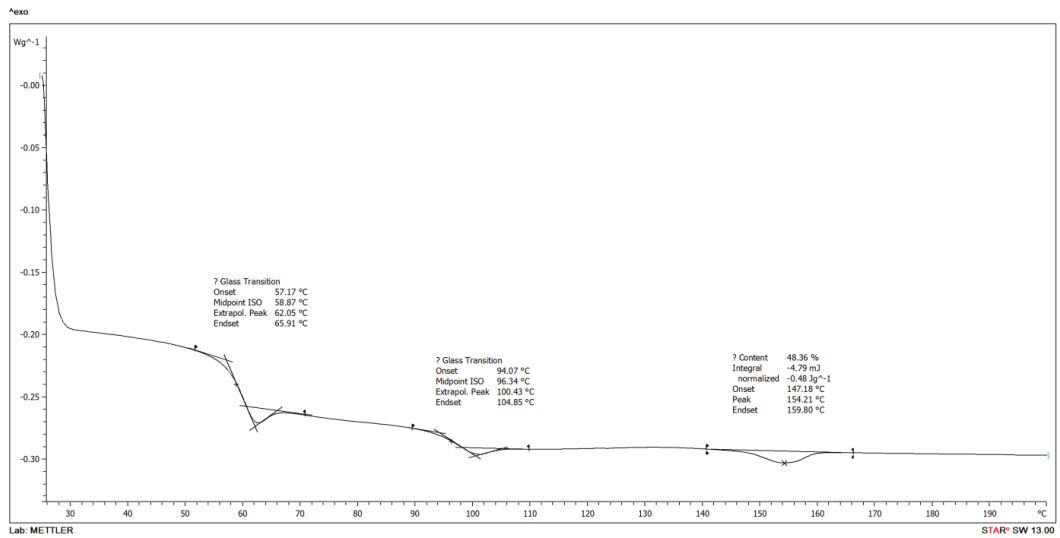


รูปที่ ข-5 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/HIPS

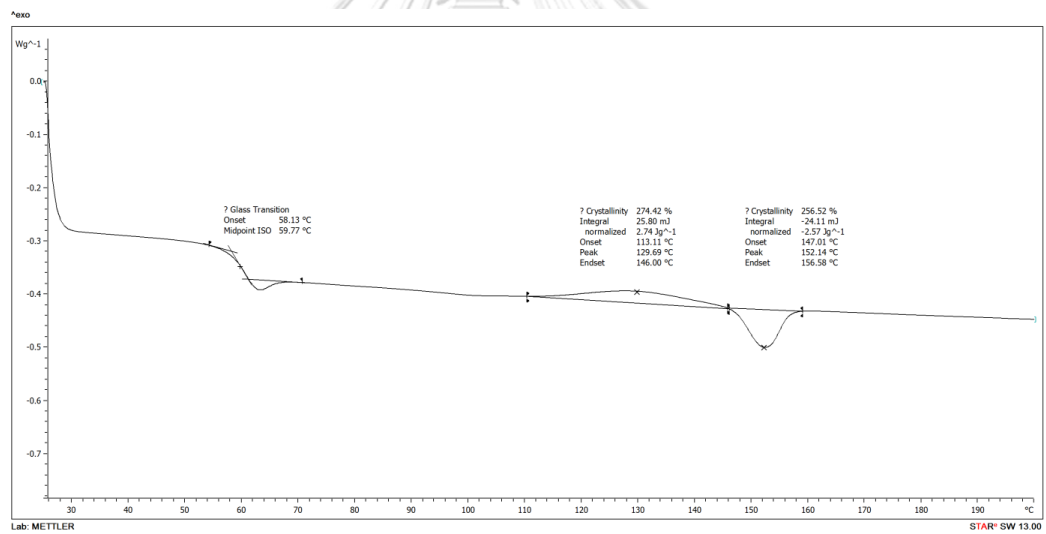


รูปที่ ข-6 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของพอลิเมอร์ผสม 60/40 PLA/HIPS



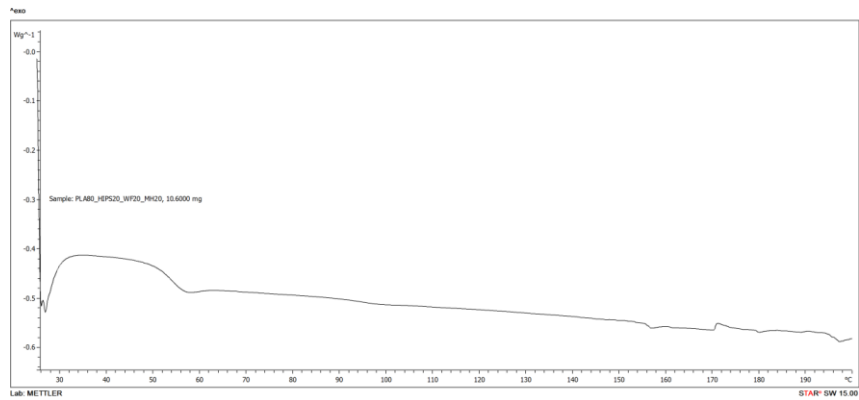


รูปที่ ข-7 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของพอลิเมอร์ผสม 50/50 PLA/HIPS

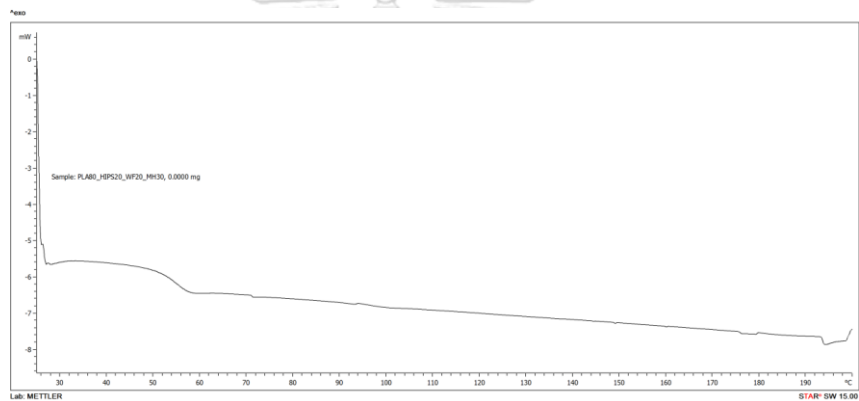


รูปที่ ข-8 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต

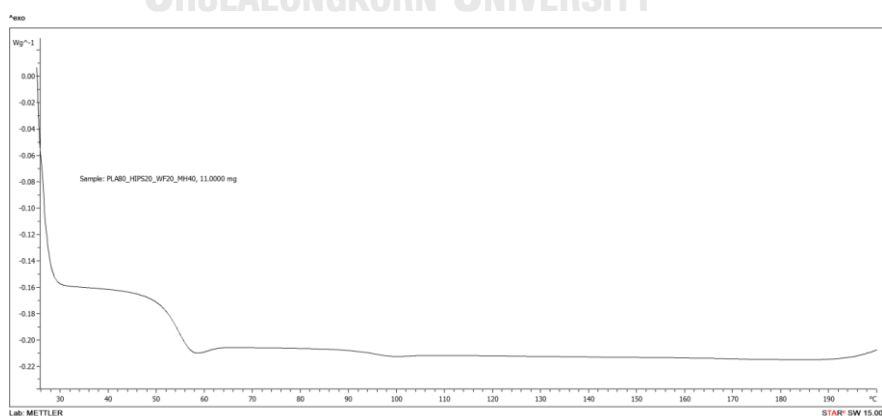
อัตราส่วน 20/0 WF/MH



รูปที่ ข-9 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ 80/20 PLA/HIPS  
คอมพอสิตอัตราส่วน 20/20 WF/MH



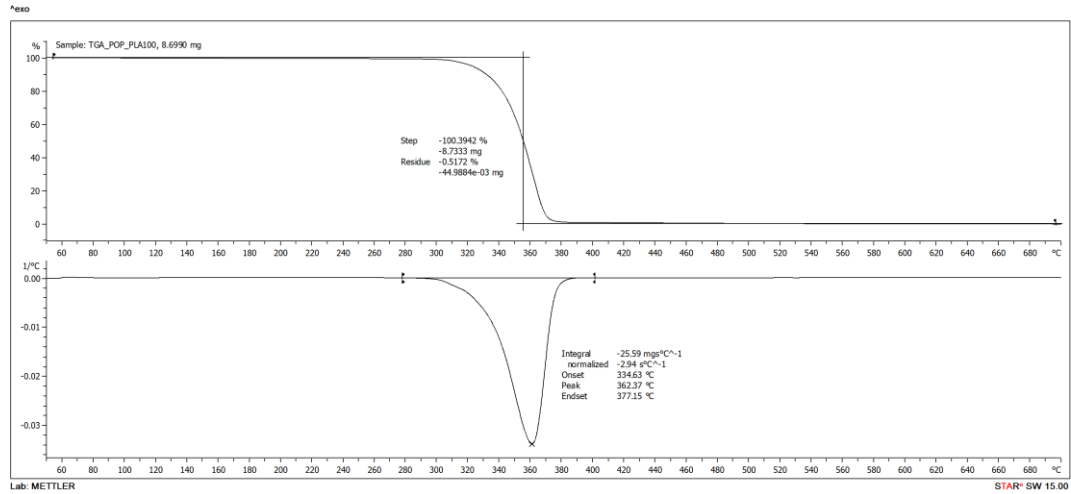
รูปที่ ข-10 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ 80/20 PLA/HIPS  
คอมพอสิตอัตราส่วน 20/30 WF/MH



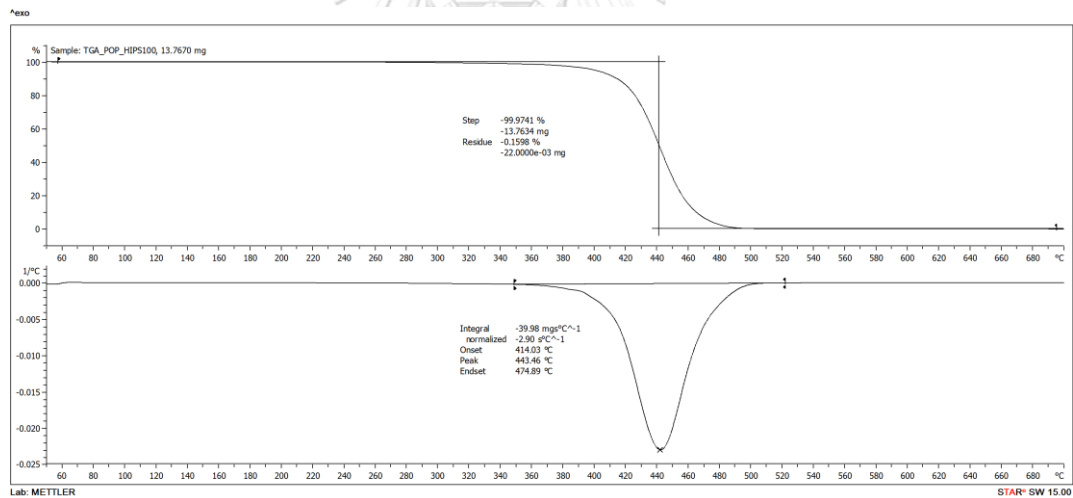
รูปที่ ข-11 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ 80/20 PLA/HIPS  
คอมพอสิตอัตราส่วน 20/40 WF/MH

## ภาคผนวก ค

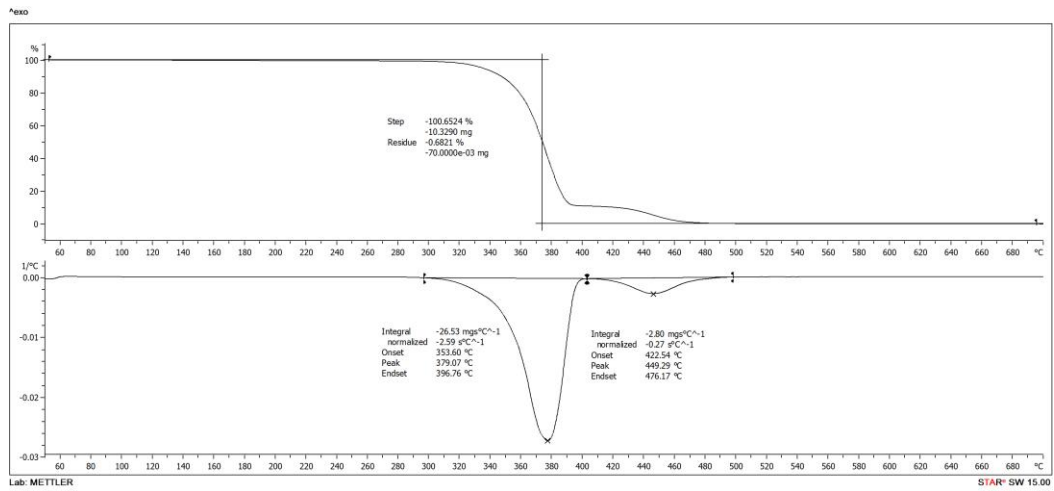
## เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA



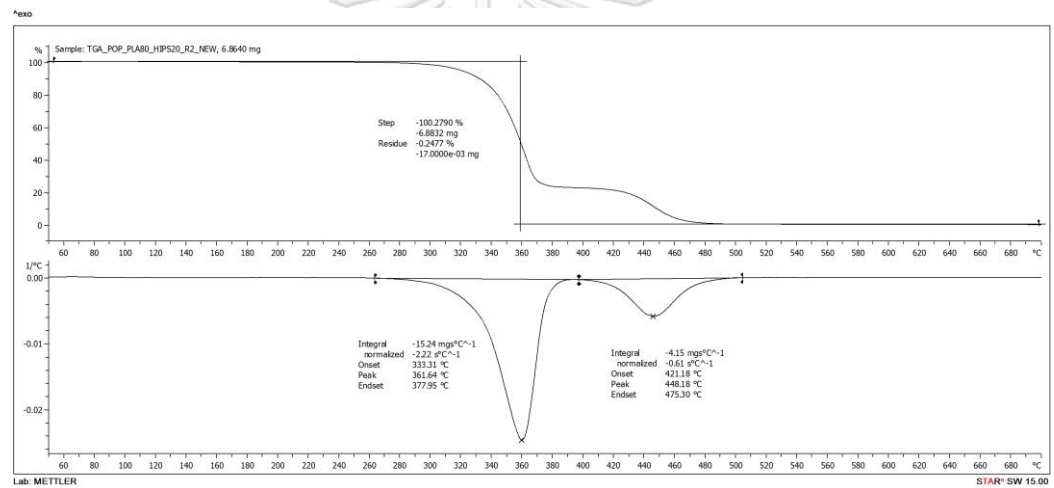
รูปที่ ค-1 TGA เทอร์โมแกรมของ PLA



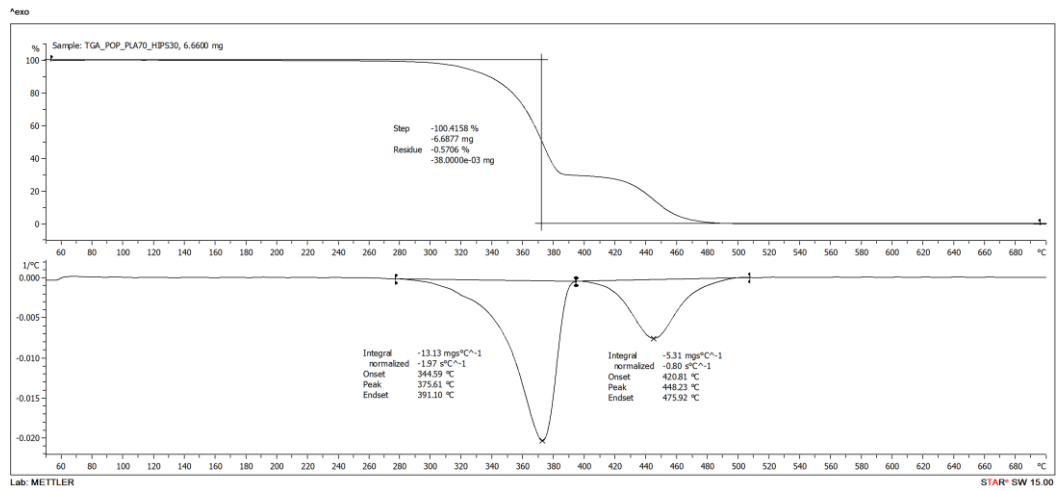
รูปที่ ค-2 TGA เทอร์โมแกรมของ HIPS



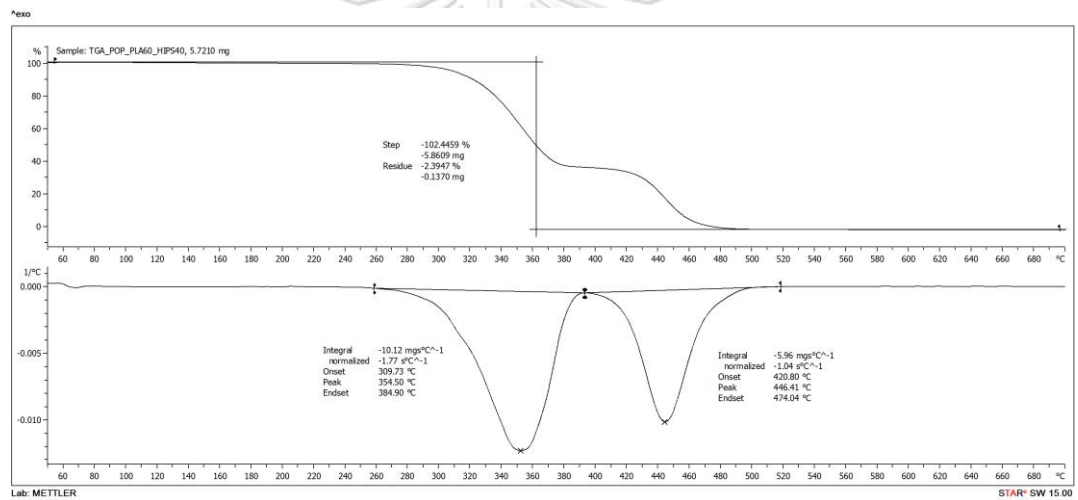
รูปที่ ค-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/HIPS



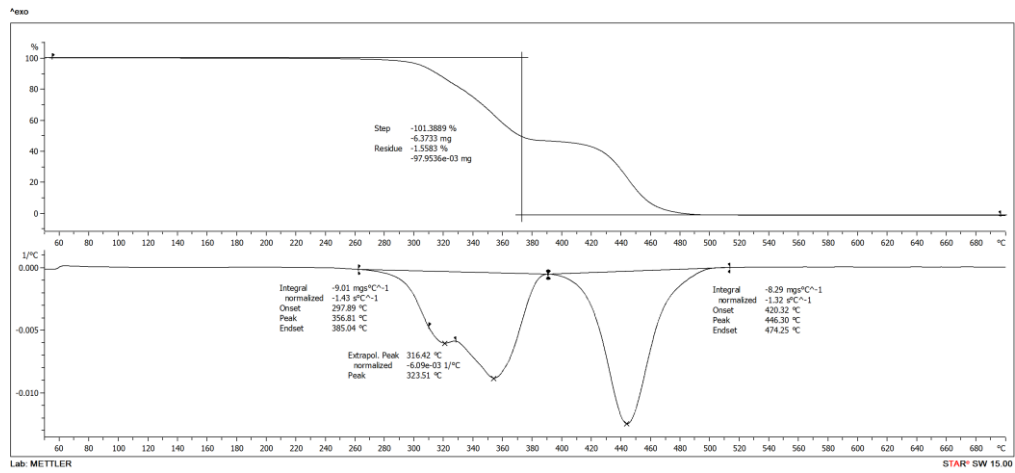
รูปที่ ค-4 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS



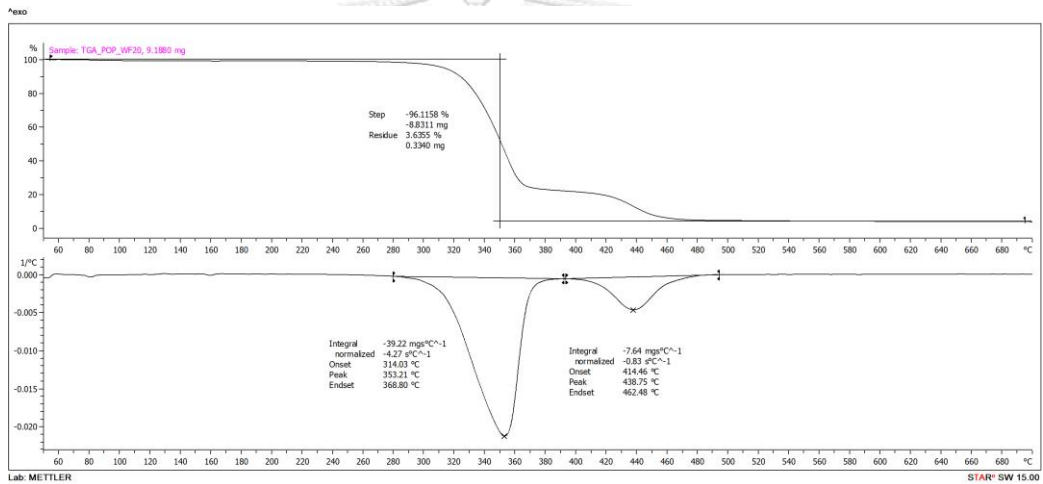
รูปที่ ค-5 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/HIPS



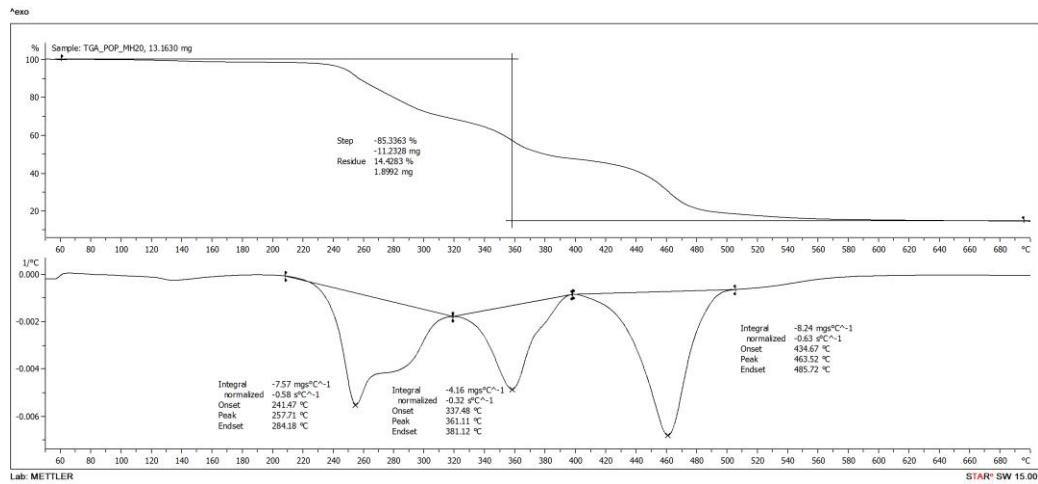
รูปที่ ค-6 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 60/40 PLA/HIPS



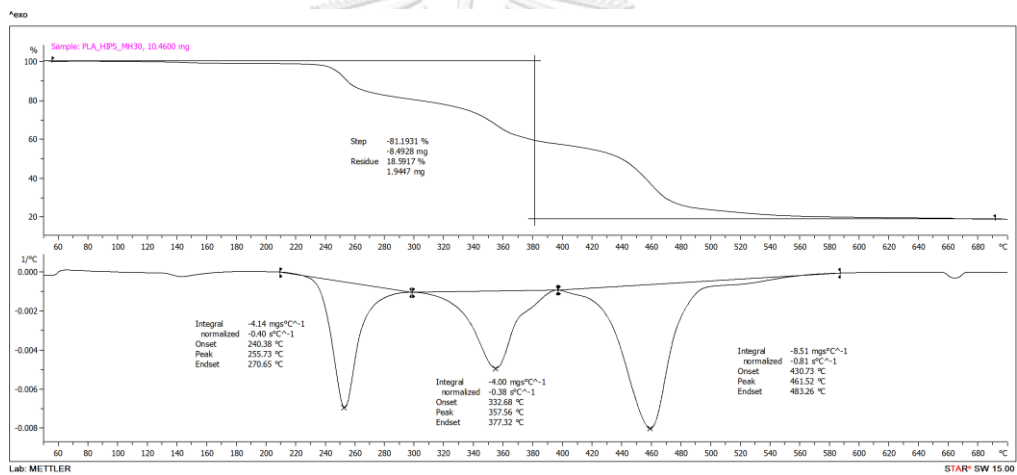
รูปที่ ค-7 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 50/50 PLA/HIPS



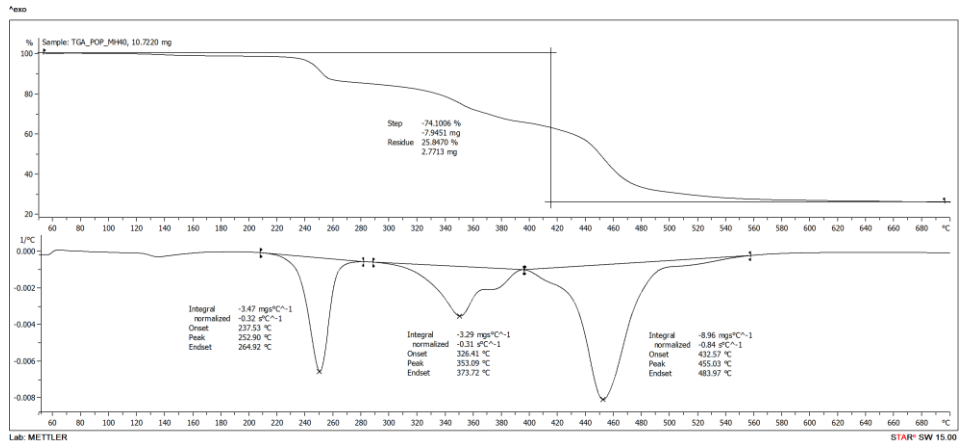
รูปที่ ค-8 TGA เทอร์โมแกรมของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิต้อัตราส่วน 20/0 WF/MH



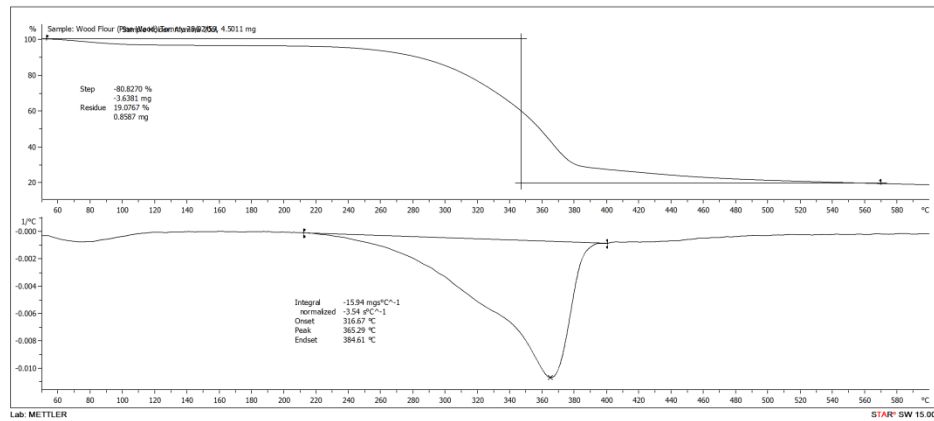
รูปที่ ค-9 TGA เทอร์โมแกรมของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตอัตราส่วน 20/20 WF/MH



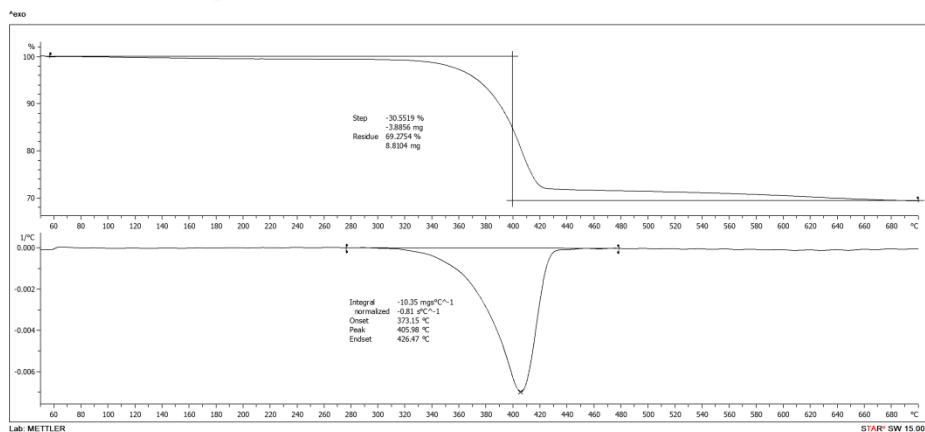
รูปที่ ค-10 TGA เทอร์โมแกรมของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตอัตราส่วน 20/30 WF/MH



รูปที่ ค-11 TGA เทอร์โมแกรมของ 80/20 PLA/HIPS คอมพอสิตอัตราส่วน 20/40 WF/MH



รูปที่ ค-12 TGA เทอร์โมแกรมของ WF จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค-13 TGA เทอร์โมแกรมของ MH



ภาคผนวก ง  
อัตราการลามไฟ

ตาราง ง-1 อัตราการลามไฟของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS และ 80/20

PLA/HIPS คอมพอสิตในอัตราส่วนต่างๆ

PLA/HIPS/WF/MH (w/w/phr/phr)	burn rate (cm/min)
100/0/0/0	6.12244898
	5.82524272
	6.85714286
	7.01754386
	7.98934754
Avg.	6.76234519
SD.	0.84665163
0/100/0/0	7.18562874
	6.55021834
	6.78733032
	6.85714286
	6.34249471
Avg.	6.74456299
SD.	0.31955868
80/20/0/0	6.98181818
	6.07361963
	7.65100671
	7.16129032
	7.26708075
Avg.	7.02696312
SD.	0.58652207
80/20/20/0	8.63309353

PLA/HIPS/WF/MH (w/w/phr/phr)	burn rate (cm/min)
80/20/20/0	8.92857143
	9.06344411
	8.57142857
	8.92857143
Avg.	8.82502181
SD.	0.21179957
80/20/20/20	3.06122449
	6.00000000
Avg.	4.53061224
SD.	2.07802809
80/20/20/30	0.53571429
	5.10638298
	3.66972477
	2.44897959
	1.30434783
Avg.	2.61302989
SD.	1.82949549
80/20/20/40	0.86956522
	0.18404908
	0.375
	0.13483146
	0.24691358
Avg.	0.36207187
SD.	0.29761904

## ภาคผนวก จ

## การดูดซึมน้ำ

ตาราง จ-1 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของ PLA, HIPS, พอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/HIPS และ 80/20

PLA/HIPS คอมพอสิตที่อัตราส่วน WF/MH ในอัตราส่วนต่างๆ

day	การดูดซึมน้ำ(%)						
	PLA/HIPS/WF/MH (w/w/phr/phr)						
	PLA	HIPS	80/20/0/0	80/20/20/0	80/20/20/20	80/20/20/30	80/20/20/40
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0.004053	0.000765	0.005217	0.008646	0.005536	0.014098	0.013405
3	0.005525	0.000969	0.006208	0.011931	0.010205	0.018078	0.016753
4	0.006255	0.000874	0.006953	0.014601	0.014393	0.020478	0.017813
5	0.006668	0.001051	0.007453	0.015904	0.017548	0.022278	0.016022
6	0.006858	0.000997	0.007741	0.017121	0.013443	0.016208	0.016022
7	0.007229	0.001092	0.007996	0.018445	0.021026	0.020598	0.011391
8	0.00744	0.001051	0.008177	0.019888	0.021789	0.017288	0.003677
10	0.008043	0.001256	0.008816	0.023226	0.015417	0.00403	-0.01915
12	0.008022	0.001065	0.00872	0.024863	0.018384	-0.01323	-0.07665
14	0.008784	0.002307	0.009114	0.027727	0.002674	-0.07426	-0.12593
16	0.009091	0.001474	0.010264	0.029094	-0.02417	-0.1338	-
22	0.008107	0.001488	0.00953	0.031873	-0.05021	-	-
29	0.008202	0.001297	0.009178	0.032734	-0.05678	-	-
36	0.008393	0.001147	0.009189	0.033951	-	-	-

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐบุรุษ คงไกรฤกษ์ เกิดวันที่ 8 เมษายน 2536 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา เทคโนโลยีวัสดุพอลิเมอร์ คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2557 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559

