

ตัวเต็มฝังไม้/โวลลาสโทไนต์เสริมแรงพอลิแล็กติกแอซิด/เอทิลีนไวนิลเอซีเตตไฮบริดคอมพอสิต

นายณัฐวุฒิ ทิพย์คำ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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.

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Wood flour/Wollastonite Fillers Reinforced Poly(Lactic Acid)/Ethylene Vinyl Acetate
Hybrid Composites

Mr. Natthawut Thipkham



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

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวเติมผงไม้/โพลลาสโทไนต์เสริมแรงพอลิแล็กติกแอซิด/ เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ไฮบริดคอมพอสิต
โดย	นายณัฐวุฒิ ทิพย์คำ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมณีพิสุทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมณีพิสุทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

5771984223 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS: POLY(LACTIC ACID), ETHYLENE VINYL ACETATE COPOLYMER, WOOD FLOUR, WOLLASTONITE, HYBRID COMPOSITE

NATTHAWUT THIPKHAM: Wood flour/Wollastonite Fillers Reinforced Poly(Lactic Acid)/Ethylene Vinyl Acetate Hybrid Composites. ADVISOR: ANYAPORN BOONMAHITTHISUD, Ph.D., CO-ADVISOR: PHASAWAT CHAIWUTTHINAN, Ph.D., 108 pp.

This work aimed to improve the toughness of poly(lactic acid) (PLA) by incorporating ethylene vinyl acetate (EVA), wood flour (WF) and/or wollastonite (WT). The impact strength (IS), flammability and water uptake were found to be improved, while tensile properties, flexural properties and thermal stability were decreased as a result of the inclusion of EVA in the PLA/EVA blends. According to the optimum impact strength, the 90/10 (wt%/wt%) PLA/EVA blend was selected for preparing composites with a fix filler content of 30 parts per hundred parts of resin, and the WF/WT (w/w) was 0/30, 10/20, 15/15, 20/10 and 0/30. The addition of either WF or WT to the 90/10 (w/w) PLA/EVA blend remarkably increased the tensile strength (TS), Young's modulus (E), flexural strength (FS), flexural modulus (FM), degree of crystallinity (χ_c), water uptake and biodegradability compared to those of the neat blend, but at the expense of the impact strength (IS), thermal stability, flammability and no significant change in the elongation at break (EB). Among the five composites, a single filler composite containing 30 phr WF exhibited the highest TS, FS and water uptake, while a single filler composite containing 30 phr WT exhibited the highest IS, E, FM, thermal stability and flammability. This indicated that there was no synergistic effect of these two fillers on the investigated properties. However, the hybrid filler composite containing 10/20 WF/WT had a compromise in these properties.

Department: Materials Science Student's Signature

Field of Study: Applied Polymer Science Advisor's Signature
and Textile Technology Co-Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้เพราะได้รับความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนาม ต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร ผู้คอยให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้ความรู้ทางด้านวิชาการ การแก้ไขปัญหา การสนับสนุนทุนในการวิจัย รวมทั้งจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง และอาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมทิทธิสุทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ที่คอยกระตุ้น ดักเตือนให้คำแนะนำ สนับสนุนทางด้านวิชาการ และเงินทุนสนับสนุนแก่ผู้วิจัยในทุกด้านตั้งแต่เริ่มงานวิจัยจนงานเสร็จสมบูรณ์

ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติเอ็มเทค (MTEC) ที่ให้ความช่วยเหลือด้านวัสดุอุปกรณ์ในการทำวิจัย สถานที่ทำงานวิจัย เครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย และอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ระหว่างดำเนินการวิจัย

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้คำปรึกษาและการสนับสนุนในการวิจัยด้านวัสดุ อุปกรณ์ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดสอบต่างๆ ระหว่างดำเนินการวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ประสบความสำเร็จจากการศึกษา ความสำเร็จ และกำลังใจทั้งหมดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และเพื่อน ที่สนับสนุนตลอดมา อีกทั้งคณาจารย์ทุกท่านผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA).....	3
2.1.1 โครงสร้างทางเคมีของ แล็กติกแอซิด และ พอลิแล็กติกแอซิด.....	3
2.1.2 กระบวนการผลิตพอลิแล็กติกแอซิด.....	3
2.1.3 ข้อดีและคุณสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด.....	6
2.1.4 ข้อเสียของพอลิแล็กติกแอซิด.....	7
2.2 เอทิลีนไวนิลแอสีเตต (Ethylene Vinyl Acetate, EVA).....	7
2.2.1 โครงสร้างทางเคมีของ เอทิลีนไวนิลแอสีเตต.....	7
2.2.2 กระบวนการผลิตเอทิลีนไวนิลแอสีเตต.....	8
2.2.3 สมบัติของเอทิลีนไวนิลแอสีเตต.....	9
2.2.4 ข้อดีของเอทิลีนไวนิลแอสีเตต.....	10
2.2.5 ข้อเสียของเอทิลีนไวนิลแอสีเตต.....	10
2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics).....	10
2.4 ผงไม้ (Wood Flour, WF).....	11
2.5 โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite, WT).....	13

2.6 คอมโพสิต (Composites)	15
2.7 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites).....	16
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	19
3.1 วัตถุประสงค์.....	19
3.2 เครื่องมือที่ใช้ผสมและขึ้นรูปขึ้นทดสอบ	19
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์	19
3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง	21
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	23
3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม	23
3.5.2 การเตรียมไฮบริดคอมโพสิต.....	25
3.6 การขึ้นรูปขึ้นตัวอย่าง	26
3.7 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ	26
3.7.1 วิเคราะห์ดรรชนีการหลอมไหล (MFI).....	26
3.7.2 สมบัติความแรงกระแทก (Impact Strength, IS).....	27
3.7.3 ทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (Tensile Properties, TS).....	28
3.7.4 ทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง (Flexural Properties, FS)	30
3.7.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimeter; DSC)	30
3.7.6 การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Thermogravimetric Analysis; TGA).....	32
3.7.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM).....	33
3.7.8 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	33

3.7.9 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน.....	34
3.7.10 วิเคราะห์ดัชนีการใช้ออกซิเจนจำกัด (Limited Oxygen Index; LOI).....	35
3.7.11 การทดสอบการลุกไหม้ (Flammability Test).....	36
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	38
4.1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ	38
4.2 ดรรชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index, MFI).....	39
4.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	40
4.3.1 ความทนแรงกระแทก (Impact strength).....	41
4.3.2 สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties).....	43
4.3.3 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง (Flexural properties).....	45
4.4 พฤติกรรมทางความร้อน (Thermal behaviors).....	48
4.4.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดผลึกด้วยเทคนิค DSC.....	48
4.4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	52
4.5 สมบัติด้านการติดไฟ (Flammability)	55
4.5.1 ดรรชนีออกซิเจนจำกัด (Limited Oxygen Index, LOI).....	55
4.5.2 อัตราการลามไฟ (Flame rate).....	57
4.6 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	57
4.7 การดูดซึมน้ำ (Water Uptake).....	61
4.8 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability).....	62
4.8.1 สมบัติด้านแรงดึงหลังฝังดิน	62
4.8.2 สัณฐานวิทยาหลังฝังดิน	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	66
5.1 สรุปผลการทดลอง	66

5.2 ข้อเสนอแนะ	68
รายการอ้างอิง	69
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก ตรรกษานิการหลอมไหล	73
ภาคผนวก ค เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC.....	82
ภาคผนวก ง เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA	92
ภาคผนวก จ การดูดซึมน้ำ.....	99
ภาคผนวก ฉ การลามไฟ.....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	108



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	แสดงสมบัติทางกายภาพบางส่วนของพอลิแล็กติกแอซิด.....	6
ตารางที่ 2.2	สมบัติของเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์.....	9
ตารางที่ 2.3	องค์ประกอบของโพลลาสโตนแต่ละเกรด.....	14
ตารางที่ 2.4	สมบัติของโพลลาสโตน.....	14
ตารางที่ 3.1	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม.....	23
ตารางที่ 3.2	อัตราส่วนของไฮบริดคอมพอสิต.....	25
ตารางที่ 3.3	การแบ่งมาตรฐานการลามไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94.....	37
ตารางที่ 4.1	สมบัติเชิงกลของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต.....	41
ตารางที่ 4.2	พฤติกรรมทางความร้อนของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA ที่ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC.....	48
ตารางที่ 4.3	สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่ อัตราส่วน WF/WT ต่างกัน.....	50
ตารางที่ 4.4	เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, EVA, WF, WT, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิตด้วยเทคนิค TGA.....	52
ตารางที่ 4.5	เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, EVA, WF, WT, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิตด้วยเทคนิค TGA (ต่อ).....	53

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 Optical isomer ของ lactic acid 3

รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตแล็กติกแอซิด จาก petrochemical 4

รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์ Poly(lactic acid)..... 5

รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนไวนิลเอซีเตต 7

รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตเม็ดเอทิลีนไวนิลเอซีเตต 8

รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนไวนิลเอซีเตต 9

รูปที่ 2.7 สัณฐานวิทยาของผงไม้สน..... 12

รูปที่ 2.8 ลักษณะทางกายภาพของไม้เนื้ออ่อน 12

รูปที่ 2.9 ผงไม้ Lignocel (เกรด C120)..... 13

รูปที่ 2.10 แร่วอลลาสโทไนต์ (ซ้าย) ผงวอลลาสโทไนต์ (กลาง) และสัณฐานวิทยาของวอลลาสโทไนต์ (ขวา) 13

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม 21

รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบสมบัติของไฮบริดคอมพอสิต 22

รูปที่ 3.3 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ 23

รูปที่ 3.4 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก..... 24

รูปที่ 3.5 เม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ 24

รูปที่ 3.6 ชิ้นทดสอบที่เตรียมได้จากเครื่องฉีดแบบ 24

รูปที่ 3.7 ระบบหล่อเย็นด้วยระบบลมพัด 25

รูปที่ 3.8 เครื่องฉีดแบบ 26

รูปที่ 3.9 เครื่องวัดทรานซ์มิสชันการลอมไฮล 27

รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก 27

รูปที่ 3.11	ขั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบ Izod.....	28
รูปที่ 3.12	เครื่องบากขึ้นงานทดสอบสมบัติต้านทานแรงกระแทก	28
รูปที่ 3.13	ขั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I.....	29
รูปที่ 3.14	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล	29
รูปที่ 3.15	การทดสอบสมบัติความทนแรงตัดโค้งแบบแรงกระทำสามจุด.....	30
รูปที่ 3.16	ขั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790.....	30
รูปที่ 3.17	เครื่องเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC).....	32
รูปที่ 3.18	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA).....	32
รูปที่ 3.19	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	33
รูปที่ 3.20	ขั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570.....	34
รูปที่ 3.21	การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน	34
รูปที่ 3.22	ขั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2863.....	35
รูปที่ 3.23	เครื่องทดสอบดรรชนีการใช้ออกซิเจนจำกัด (LOI).....	35
รูปที่ 3.24	เครื่องทดสอบการลุกไหม้ไฟ UL-94	36
รูปที่ 3.25	การทดสอบการลุกไหม้ไฟตามมาตรฐาน UL-94.....	36
รูปที่ 4.1	ขั้นทดสอบ (a) PLA, (b) EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA ที่อัตราส่วน (c) 90/10, (d) 80/20, (e) 70/30, (f) 60/40 และ (g) 50/50.....	38
รูปที่ 4.2	ขั้นทดสอบของ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต ด้วยในอัตราส่วน WF/WT: (a) 0/30, (b) 10/20, (c) 15/15, (d) 20/10 และ (e) 30/0.....	38
รูปที่ 4.3	ดรรชนีการหลอมไหลของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA	39
รูปที่ 4.4	ดรรชนีการหลอมไหลของ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต ด้วย WF/WT	40
รูปที่ 4.5	ความทนแรงกระแทกของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA	41
รูปที่ 4.6	ความทนแรงกระแทกของของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต	42
รูปที่ 4.7	สมบัติต้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งสัมมอดูลัส (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA.....	43

รูปที่ 4.8 สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยืดสัมพัทธ์ และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต	45
รูปที่ 4.9 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง: (a) ความทนแรงดัดโค้ง (b) มอดุลัสการดัดโค้ง ของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA	46
รูปที่ 4.10 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง: (a) ความทนแรงดัดโค้ง (b) มอดุลัสการดัดโค้ง ของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต	47
รูปที่ 4.11 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ PLA, EVA และ พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA.....	49
รูปที่ 4.12 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA	49
รูปที่ 4.13 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิตในอัตราส่วน WF/WT ต่างๆ กัน.....	51
รูปที่ 4.14 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ใน อัตราส่วน WF/WT ต่างๆ กัน.....	51
รูปที่ 4.15 TGA เทอร์โมแกรมของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVAในอัตราส่วน WF/WT ต่างๆ กัน.....	53
รูปที่ 4.16 TGA เทอร์โมแกรมของ WF, WT และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิตในอัตราส่วน WF/WT ต่างๆ กัน.....	54
รูปที่ 4.17 ทรานซึอานซมิททีวของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต	56
รูปที่ 4.18 ลักษณะขึ้นทศสอบภายหลังการทดสอบหาค่าทรานซึอานซมิททีวของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต	56
รูปที่ 4.19 อัตราการลามไฟของ PLA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA ที่อัตราส่วน 90/10 และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต	57
รูปที่ 4.20 สันฐานวิทยาของ (a) PLA, (b) EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA ที่อัตราส่วน (c) 90/10, (d) 80/20, (e) 70/30, (f) 60/40 และ (g) 50/50 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า.....	59

- รูปที่ 4.21** สัณฐานวิทยาของ (a) WF, (b) WT ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิตที่มี WF/WT เท่ากับ (c) 0/30, (d) 10/20, (e) 15/15, (f) 20/10 และ (g) 30/0 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า..... 60
- รูปที่ 4.22** การดูดซึมน้ำของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต..... 61
- รูปที่ 4.23** สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งสัมมอดูลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 วัน 63
- รูปที่ 4.24** สัณฐานวิทยาของ (a) PLA, (b) EVA, (c) พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิตที่มีอัตราส่วน WF/WT เป็น (d) 0/30, (e) 10/20, (f) 15/15, (g) 20/10 และ (h) 30/0 ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 0, 60 และ 120 วัน 65

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันการใช้พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastics) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทั้งนี้เพื่อแก้ไขหรือบรรเทาปัญหาที่เกิดจากขยะพลาสติกที่ถูกทิ้งไว้ในสิ่งแวดล้อมภายหลังการใช้งาน อีกทั้งยังมีกฎข้อบังคับด้านสิ่งแวดล้อมที่ผลักดันให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงการที่มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะพลาสติกที่สูงขึ้น โดยมุ่งหาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติและต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งในขณะนี้พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพที่ได้ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด ได้แก่ พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid)) ซึ่งเป็นแอลิแฟติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) ที่มีทั้งความแข็งแรงและ modulus สูง มีสมบัติการสักรัดกันปานกลาง และยังมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีน-เทเรฟทาเลต สามารถผลิตจากวัสดุมวลชีวภาพ (biomass) ที่ได้มาจากพืชที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น อ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งเป็นทรัพยากรที่สร้างทดแทนได้ (renewable resource) ในธรรมชาติ ซึ่งแต่เดิมนั้นพอลิแล็กติกแอซิดถูกใช้งานจำกัดอยู่เฉพาะในด้านการแพทย์ เช่น อุปกรณ์การปลูกถ่ายอวัยวะ (implant devices) วัสดุค้ำจุนการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (tissue scaffolds) และไหมละลาย (sutures) เป็นต้น เนื่องจากยังมีต้นทุนการผลิตสูง หาได้ยาก และพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่เมื่อได้มีการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ ที่ช่วยให้สามารถผลิตพอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในเชิงพาณิชย์ และมีต้นทุนการผลิตที่ลดต่ำลง จึงมีผลทำให้การใช้งานของพอลิแล็กติกแอซิดขยายออกไปสู่งานด้านบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภคต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อใช้ทดแทนพลาสติกเชิงพาณิชย์ที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ซึ่งในอนาคตคาดว่าพอลิแล็กติกแอซิดจะสามารถช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกที่มีอยู่เป็นจำนวนมากลงได้บ้างพอสมควร โดยพอลิแล็กติกแอซิดเมื่อถูกย่อยสลายจะเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำด้วยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียที่สำคัญของพอลิแล็กติกแอซิด คือ ความเปราะและการมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ซึ่งทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานและการขึ้นรูป ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับเอทิลีนไวนิลแอซีเตต (ethylene vinyl acetate) ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (random copolymer) ที่มีความยืดหยุ่นสูง โดยสมบัติของเอทิลีนไวนิลแอซีเตตขึ้นกับปริมาณของไวนิลแอซีเตตที่อยู่ในโคพอลิเมอร์ ถ้าหากมีปริมาณไวนิลแอซีเตตเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสม่ำเสมอของโครงสร้างลดลง และความเป็นผลึกลดลงด้วยเช่นกัน โดยเอทิลีนไวนิลแอซีเตตที่ใช้

ในงานวิจัยนี้มีร้อยละของไวนิลเอซีเทตประมาณ 19 ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าเป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ถูกดัดแปร (modified LDPE) และมีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายพลาสติกไซส์พีวีซี (plasticized PVC) ดังนั้น การใส่เอทิลีนไวนิลเอซีเทตเข้าไปในพอลิเอทิลีนกึ่งแข็งส่งผลให้พอลิเอทิลีนกึ่งแข็งมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นและความเปราะลดลง โดยไม่จำเป็นต้องใส่พลาสติกไซเซอร์ ซึ่งเป็นข้อดีเพราะความยืดหยุ่นของพลาสติกจะไม่ขึ้นกับพลาสติกไซเซอร์ที่อาจสูญเสียไปในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยังได้นำพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกึ่งแข็งและเอทิลีนไวนิลเอซีเทตอัตราส่วนผสมที่มีความทนแรงกระแทกสูงที่สุดไปใช้เตรียมเป็นไฮบริดคอมพอสิต (hybrid composite) ด้วยผงไม้ (wood flour) และโวลลาสโทไนต์ (wollastonite) ซึ่งสารตัวเติมเสริมแรงทั้งสองมีลักษณะเป็นเส้นใย โดยผงไม้เป็นเส้นใยเซลลูโลสจากธรรมชาติที่มีขนาดประมาณ 100–120 เมช (mesh) หรือประมาณ 125–150 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีราคาถูกจากโรงงานแปรรูปไม้และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ดังนั้น การใช้ผงไม้ในการเตรียมวัสดุคอมพอสิตนอกจากช่วยให้ผลิตภัณฑ์สามารถย่อยสลายทางชีวภาพแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผงไม้อีกด้วย ส่วนโวลลาสโทไนต์ซึ่งเป็นสารเสริมแรงอนินทรีย์ที่เกิดในธรรมชาติประเภทแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) มีโครงสร้างผลึกรูปเข็ม (needle-like) หากแต่ไม่มีอันตรายเหมือนเส้นใยของแร่อื่นๆ เช่น แอสเบสทอส เป็นต้น และยังมีราคาถูกกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับแร่อนินทรีย์อื่นๆ บางชนิด ปัจจุบันโวลลาสโทไนต์ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเป็นสารตัวเติมทั้งในอุตสาหกรรมพลาสติก ยาง และสี ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์ โดยโวลลาสโทไนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดประมาณ 1200 เมช หรือ 12 ไมโครเมตร ซึ่งการใช้โวลลาสโทไนต์ที่มีอนุภาคละเอียดมากๆ จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานการขีดถู และความทนแรงกระแทกสูงขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางหรือทางเลือกที่จะพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิเอทิลีนกึ่งแข็งให้มีสมบัติหลากหลายและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีราคาหรือต้นทุนการผลิตที่ยอมรับได้ โดยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมและ/หรือไฮบริดคอมพอสิตด้วยวัสดุเติมที่มีราคาถูกหรือเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีก ทั้งนี้เพื่อใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตมาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และเพื่อให้สามารถพัฒนาสู่อุตสาหกรรมที่ก้าวทันต่อกระแสโลกและสอดคล้องกับนโยบายและแนวทางการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

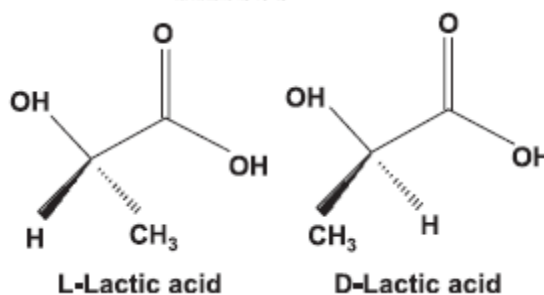
บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)

2.1.1 โครงสร้างทางเคมีของ แล็กติกแอซิด และ พอลิแล็กติกแอซิด [1-3]

พอลิแล็กติกแอซิด ที่เกี่ยวข้องกับการทำ polymerization ของ lactic acid monomer สูตรโมเลกุลทั่วไปของ lactic acid คือ HOCH_2COOH ซึ่งมีด้วยกัน 2 enantiomer คือ L- และ D-lactic acid ดังรูปที่ 2.1 โดยจะแตกต่างกันจากผลของ polarized ของแสง โดย L-Lactic acid จะหมุนไปตามระนาบของแสงตามเข็มนาฬิกา ส่วน D-lactic acid จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา

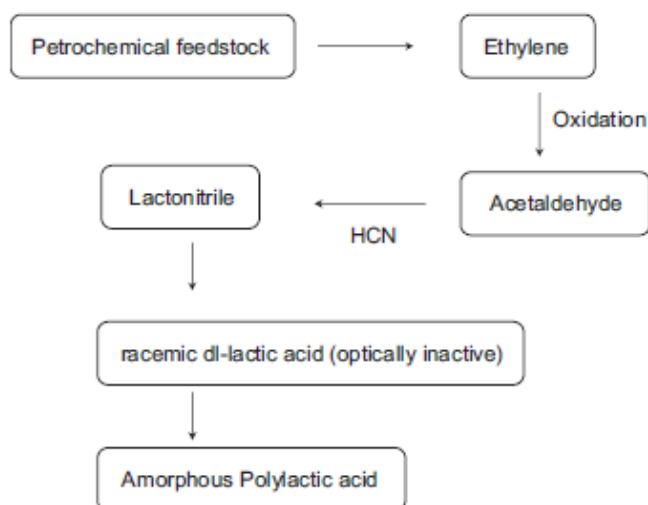


รูปที่ 2.1 Optical isomer ของ lactic acid [1]

2.1.2 กระบวนการผลิตพอลิแล็กติกแอซิด [1]

แล็กติกแอซิดเป็นผลิตภัณฑ์จากในกล้ามเนื้อของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในกระบวนการไกลโคไลซิส (glycolysis) และเกี่ยวกับวัฏจักรเครป (Kreb's cycle) โดยกรดไพรูวิก (pyruvic acid) และ อะซิโทลโคเอ (acetal CoA)

แล็กติกแอซิดสามารถทำได้ % yield ที่สูงๆโดยการหมักกากน้ำตาลหรือแป้งมันสำปะหลังหรือ dextrose จากข้าวโพด lactic acid เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักหรือจากกระบวนการ petrochemical feedstock กระบวนการผลิตแล็กติกแอซิดจากกระบวนการ petrochemical แสดงในรูปที่ 2.2

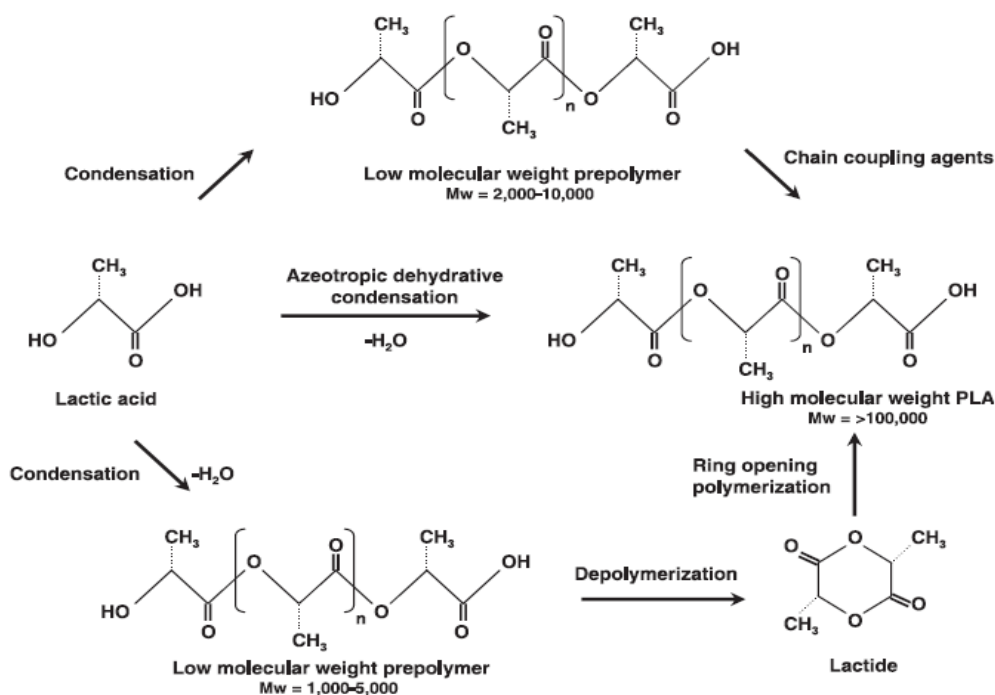


รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตแล็กติกแอซิด จาก petrochemical [1]

แล็กติกแอซิดที่ได้จากกระบวนการนี้จะเป็นแบบผสมระหว่าง L-lactic acid กับ D-lactic acid การผลิต lactic acid monomer ด้วยกระบวนการทาง petrochemical เป็นไปอย่างแพร่หลายจนกระทั่งปี 1990 กระบวนการหมักได้ถูกพัฒนาขึ้น ปัจจุบันกระบวนการหมักที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการหมักแบคทีเรียโดยใช้จุลินทรีย์ที่มีชื่อว่า lactobacillus จะได้เป็นแล็กติกแอซิดทางชีวภาพ lactic acid ที่ได้เป็น L-lactic acid มากกว่า 99.5% และนี่จึงเป็นเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่มีักผลิตแล็กติกแอซิดจากแหล่งที่สามารถทดแทนได้ (renewable resource) มากกว่าวิธีการทาง petrochemical

Cargill Dow Polymers เป็นบริษัทที่มีกระบวนการผลิต พอลิแล็กติกแอซิด ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก การทำ polymerization lactic acid ให้เป็น พอลิแล็กติกแอซิด ที่มีน้ำหนักโมเลกุลหลายๆทำได้สองวิธีคือดังรูปที่ 2.3 โดยสามารถทำได้สองวิธี คือ

- 1) ทำโดยการควบแน่นโดยตรง ซึ่งใช้ตัวทำละลายภายใต้สุญญากาศ
- 2) ใช้กระบวนการ dimer intermediate cycle (lactide) ซึ่งปราศจากตัวทำละลาย



รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์ Poly(lactic acid) [1]

การควบแน่นโดยตรง จะใช้ตัวทำละลายภายใต้สุญญากาศและอุณหภูมิสูงเพื่อเอาน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์ในการควบแน่นออกไป วิธีการนี้ใกล้เคียงกับวิธีของแคโรเทอร์ (Carothers) และถูกนำมาใช้โดยบริษัท Mitsui ผลที่ได้คือได้ intermediate polymer ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ chain coupling agent เช่น isocyanate, epoxide หรือ peroxide เพื่อให้ได้น้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น

สำหรับกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวทำละลายจะใช้ dimer intermediate cycle โดยปกติจะกล่าวถึง lactide ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำให้บริสุทธิ์ได้โดยการกลั่น โดยจะมีตัวเร่งที่ใช้ในการเปิดวง lactide ซึ่งเป็น intermediate จะเป็นตัวควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยการควบคุม residence time และอุณหภูมิในการผสม กับการควบคุมชนิดของตัวเร่งและความเข้มข้นของตัวเร่ง ซึ่งสามารถควบคุมอัตราส่วนและลำดับการเกิด D-lactic acid และ L-lactic acid ที่ออกมาในขั้นตอนสุดท้ายของการสังเคราะห์พอลิเมอร์ได้

เนื่องจากแล็กติกแอซิดเป็น chiral molecule (mirror image) การจัดเรียงตัวในสามมิติของ พอลิแล็กติกแอซิด อาจจะต้องปรับปรุงให้ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งการจัดเรียงตัวเป็น poly (L-lactic acid) จะมีผลึกสูง monomer ทั้งคู่ (ทั้ง D-lactic, L-lactic) ที่อยู่ในสายโซ่ของ พอลิแล็กติกแอซิด อาจจะมีโครงสร้างในสามมิติที่เหมือนกันอยู่ (L:L หรือ D:D) อยู่ด้วยกันหรือต่างโครงสร้างสามมิติที่แตกต่างกันอยู่ด้วยกัน (L/D) พอลิแล็กติกแอซิด ที่เป็น amorphous จะมีปริมาณของ D-lactic acid

อยู่มากกว่า 20% ในขณะที่ พอลิแล็กติกแอซิด ที่มีความเป็นผลึกสูงจะต้องมีปริมาณของ D-lactic acid อยู่ไม่น้อยกว่า 2 % ข้อดีของการหมักกลูโคสที่ได้จากข้าวโพดหรือมันสำปะหลังโดยใช้แบคทีเรียคือ ช่วยลดต้นทุนในการผลิตแล็กติกแอซิดของหลายๆบริษัทลง เช่น Cargill Dow Polymer LLC, Shimadzu Corp, Mitsui Chemicals, Musashino Co ซึ่งตลาดเป้าหมายของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิแล็กติกแอซิด เช่น พวง บรรจุก้อนฟิล์ม เส้นใย รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ไหมละลาย เป็นต้น

2.1.3 ข้อดีและคุณสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิด มีข้อดีหลายอย่าง เช่น เป็นวัสดุทางชีวภาพและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ สามารถแตกออกโดยทางความร้อนและกระบวนการที่มีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง มันสามารถผลิตได้จากพืชผลทางการเกษตรซึ่งเป็น renewable resources ซึ่งเป็นการช่วยเศรษฐกิจทางการเกษตรอีกด้วย ช่วยลดการปล่อย CO₂ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทาง petroleum based ในการผลิตพลาสติกทั่วไป ที่สำคัญมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุได้ เป็นพอลิเมอร์ค่อนข้างแข็ง มี อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) อยู่ในช่วงประมาณ 60-70° C มีอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ในช่วงประมาณ 160-170 องศาเซลเซียส คุณสมบัติทางกายภาพของพอลิแล็กติกแอซิดบางส่วนได้แสดงไว้ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางกายภาพบางส่วนของพอลิแล็กติกแอซิด [4]

Property	Units	Condition	Value
Degree of crystallinity X _c	%	L-PLA	0-37
Density ρ	g/cm ³	Amorphous	1.248
		Single crystal	1.290
Heat of fusion ΔH _f	KJ/mol	L-PLA complete crystalline	146
		L-PLA fiber	
		As-extruded	2.5
		After hot drawing	6.4
Heat capacity C _p	J/K/g	L-PLA with	
		M _v = 5300	0.60
		M _v = (0.2-6.91) × 10 ⁵	0.54
Glass transition temperature	K		326-337
Melting point	K		418-459
Decomposition temperature	K		500-528
Swelling in water %		pH 7 buffer	2
Intrinsic viscosity (η) in chloroform at 25 °C	dl/g		3.8-8.2
Radiation resistance	G value	Under nitrogen	
Co ⁶⁰ in benzene solution, 30 °C		Chain scission	26.5
		Cross linking	4.5
In water		Chain scission	
		Cross linking	23.0
			6.5
IR peaks	cm ⁻¹		
OH (alcohol/carboxylic)			3700-3450
-C = O			1750-1735
-COO			1600-1580
C-O			1200-1000
CH			950-700

2.1.4 ข้อเสียของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

1. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เป็นพอลิเมอร์ที่แข็งและเปราะ โดยมีความสามารถในการยืดตัวต่ำกว่า 10% ถึงแม้มีความทนแรงดึงและมอดุลัสเทียบได้กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(Ethylene Terephthalate), PET) ก็ตาม แต่มีสมบัติความทนแรงกระแทกที่ต่ำ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานในสภาวะที่ได้รับแรงกระแทกสูง

2. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำ และไม่ชอบน้ำ นอกจากนี้ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต สามารถเกิดการแตกสลายด้วยความร้อนจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ดังนั้น ก่อนนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไปใช้งานควรอบเม็ดให้แห้งเพื่อไล่ความชื้นที่มีอยู่ออกไปก่อนเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว

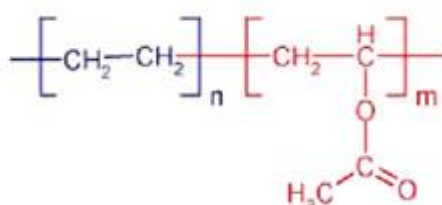
3. การปรับปรุงพื้นผิวของ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ทำได้ยาก เนื่องจากมีความเฉื่อยในการเกิดปฏิกิริยา

4 มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต เป็นวัสดุที่ไม่ชอบน้ำเนื่องจากมีมุมสัมผัสกับน้ำ (contact angle) ประมาณ 80 องศา ทำให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ การใช้งานของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตในร่างกายของสิ่งมีชีวิตอาจก่อให้เกิดการอักเสบขึ้นได้ เนื่องจาก ทำให้การไหลเวียนของเหลวภายในเซลล์ทำได้ยากขึ้นจากการขัดขวางของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีการดูดซึมน้ำที่ต่ำ

5. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต มีราคาที่ยากแพงเมื่อเทียบกับพลาสติกทางการค้าทั่วไป ทำให้เป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรม จึงนิยมนำพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ที่มีราคาที่ถูกกว่า เพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงอีกทั้งช่วยในเรื่องการปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น

2.2 เอทิลีนไวนิลเอซีเตต (Ethylene Vinyl Acetate, EVA)

2.2.1 โครงสร้างทางเคมีของ เอทิลีนไวนิลเอซีเตต



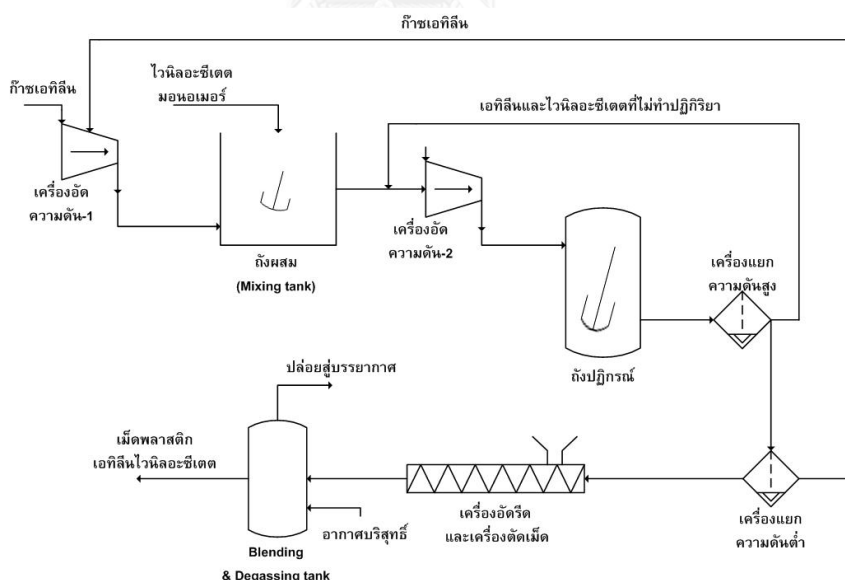
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนไวนิลเอซีเตต [5]

เอทิลีนไวนิลเอซีเตต [5] เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีลักษณะสายโซ่โมเลกุลเป็นสายยาวของเอทิลีน และมีสายโซ่ของไวนิลเอซีเตตกระจายตัวเป็นกลุ่มในสายโซ่โมเลกุล ในลักษณะโครงสร้างที่ไม่เป็น

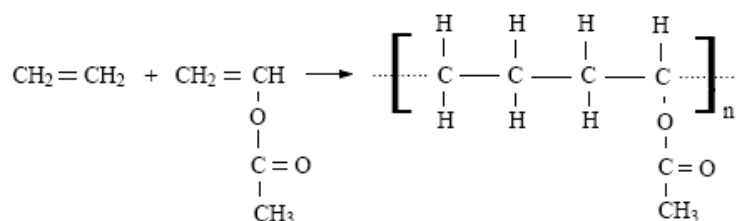
ระเบียบ หรือเรียกว่าเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (Random Copolymer) และเนื่องจาก พอลิเมอร์ชนิดนี้เกิดจากการรวมมอนอเมอร์ 2 ชนิดคือ เอทิลีนมอนอเมอร์กับไวนิลเอซีเตตมอนอเมอร์

2.2.2 กระบวนการผลิตเอทิลีนไวนิลเอซีเตต [6]

กระบวนการผลิตเอทิลีนไวนิลเอซีเตต แสดงดังในรูปที่ 2.5 โดยในขั้นตอนแรกจะนำก๊าซเอทิลีนเข้าสู่เครื่องอัดความดันเพื่อเพิ่มความดันไปที่ 197 - 300 บรรยากาศ (atm) เพื่อนำไปผสมกับไวนิลเอซีเตตมอนอเมอร์ที่ถึงผสม จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปเพิ่มความดันจนถึง 1,480 - 1,974 atm และลดอุณหภูมิเหลือ 15 องศาเซลเซียส ก่อนเข้าไปทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันดังแสดงในรูปที่ 2.6 ที่ถึงปฏิกรณ์ พอลิเมอร์หนักจากถึงปฏิกรณ์ถูกทำให้เย็น และลดความดันด้วยเครื่องแยกความดันสูง (high pressure separator) ส่วนก๊าซเอทิลีนและไวนิลเอซีเตตมอนอเมอร์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากัน จะถูกนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตจากนั้นนำพอลิเมอร์มาลดความดันจนถึง 0.49 atm ด้วยเครื่องแยกความดันต่ำ (low pressure separator) ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จะถูกส่งไปยังเครื่องอัดรีด (extruder) จากนั้นทำการเติมสารเติมแต่ง (additive) ต่างๆ ก่อนฉีดผ่านหัวตายและตัดเป็นเม็ดพลาสติก นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปเก็บที่ไซโลที่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดไอ เพื่อให้ความเข้มข้นของไวนิลเอซีเตตมอนอเมอร์คงเหลือในผลิตภัณฑ์น้อยกว่า 1,000 ppm



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตเม็ดเอทิลีนไวนิลเอซีเตต [6]



รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนไวนิลแอสีเตต [6]

2.2.3 สมบัติของเอทิลีนไวนิลแอสีเตต

สมบัติของเอทิลีนไวนิลแอสีเตตเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของไวนิลแอสีเตตในโมเลกุล [7] โดยปริมาณของสารไวนิลแอสีเตตในโมเลกุลมีผลกระทบต่อเอทิลีนไวนิลแอสีเตตดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของเอทิลีนไวนิลแอสีเตต [8]

สมบัติของเอทิลีนไวนิลแอสีเตต	ปริมาณของไวนิลแอสีเตต	
	ปริมาณน้อย	ปริมาณมาก
ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีน (Crystallinity)	ลดลง	มากขึ้น
จุดหลอมเหลว (Boiling Point)	ลดลง	มากขึ้น
ค่ามอดุลัส (Modulus)	ลดลง	มากขึ้น
ความแข็ง (Hardness)	ลดลง	มากขึ้น
สภาพขั้ว (Polarity)	สูงขึ้น	ลดลง
ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊ส	ลดลง	มากขึ้น
ความทนทานต่อแรงกระแทก	มากขึ้น	ลดลง
ความทนทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์	ลดลง	มากขึ้น
ความใส	มากขึ้น	ลดลง

ในเรื่องความเป็นผลึก เมื่อปริมาณไวนิลแอสีเตตเพิ่มขึ้นทำให้ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนลดลง และมีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) มากขึ้น ซึ่งเมื่อมีปริมาณของไวนิลแอสีเตตมากกว่าร้อยละ 40 เอทิลีนไวนิลแอสีเตตจะมีความเป็นอสัณฐานในโมเลกุลอย่างสมบูรณ์

เมื่อพิจารณาถึงความสามารถเข้าได้กับสารอื่น เมื่อเอทิลีนไวนิลแอซีเตดมีปริมาณไวนิลแอซีเตดเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการเข้าได้กับสารอื่นจะสูงขึ้น ทำให้สามารถนำสารเอทิลีนไวนิลแอซีเตดไปผสมรวมกับโพลีเมอร์ชนิดอื่นที่มีสภาพขี้ เช่น พลาสติกไซส์พีวีซี (plasticized PVC) ได้ ซึ่งโดยปกติพอลิเอทิลีนทั่วไปไม่สามารถผสมเข้ากับพลาสติกไซส์พีวีซี และยังเอทิลีนไวนิลแอซีเตดมีปริมาณไวนิลแอซีเตดมากขึ้นก็ยังช่วยให้เข้าได้กับพลาสติกไซส์พีวีซีได้ง่ายยิ่งขึ้น เป็นต้น นอกจากนี้เอทิลีนไวนิลแอซีเตดที่มีไวนิลแอซีเตดมากยังมีความสามารถรับสารเพิ่มเนื้อ (fillers) หรือผงสี (pigments) ต่าง ๆ ได้ในปริมาณมากโดยไม่เกิดผลเสียต่อสมบัติทางกายภาพ เช่น ในผลิตภัณฑ์เอทิลีนไวนิลแอซีเตดที่ใช้สำหรับงานกันไฟฟ้าสถิตนั้น ผู้ผลิตสามารถผสมผงถ่าน (carbon black) ลงไปในเนื้อเอทิลีนไวนิลแอซีเตดได้มากถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ด้วยสมบัติที่สามารถเข้าได้กับสารอื่นได้ดีจึงสามารถนำเอทิลีนไวนิลแอซีเตดไปปรับแต่งสมบัติ ก่อนใช้งานหรือใช้เป็นตัวปรับแต่งสมบัติให้กับโพลีเมอร์อื่นได้

2.2.4 ข้อดีของเอทิลีนไวนิลแอซีเตด

1. มีสมบัติที่หลากหลายต่อการประยุกต์ใช้งาน
2. จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการขึ้นรูปโดยทั่วไปเหมือนพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ
3. มีความทนทานต่อการซึมผ่านของแก๊สได้ค่อนข้างดี
4. ไม่ติดไฟที่อุณหภูมิห้อง

2.2.5 ข้อเสียของเอทิลีนไวนิลแอซีเตด

1. ความแข็งแรงต่ำเมื่อมีปริมาณไวนิลแอซีเตดในปริมาณที่มาก
2. ทนความร้อนได้ต่ำ
3. เมื่อให้ความร้อนขณะขึ้นรูปมากเกินไปหมู่ไวนิลแอซีเตด ของพอลิเมอร์จะสลายตัวให้กรดแอซีติก (acetic acid) ออกมาซึ่งสังเกตได้จากมีกลิ่นน้ำส้มสายชูเกิดขึ้น ดังนั้นการทำแม่พิมพ์และตาย (die) สำหรับอีวีเอจึงควรเลือกใช้โลหะที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน

2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) [9, 10]

ผลิตภัณฑ์พลาสติกโดยทั่วไปที่ใช้ในชีวิตประจำวันมักมีความคงทนและไม่ย่อยสลายได้ง่าย ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ อันเป็นที่มาของปัญหาในการกำจัดเศษหรือขยะพลาสติกจำนวนมากที่ตกค้างอยู่ในสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ การเผาทำลายขยะพลาสติกยังทำให้เกิดมลภาวะเป็นพิษ เช่น ภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ฝนกรด (acid rain) เป็นต้น ในปัจจุบันได้มีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) มาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในงานด้าน

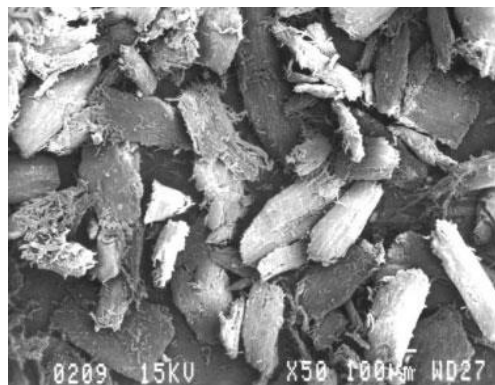
บรรจุภัณฑ์ วัสดุคลุมผิวดินทางการเกษตร และ สิ่งทอ เป็นต้น โดยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เริ่มตั้งแต่การประสบความสำเร็จในการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพในระดับอุตสาหกรรม อาทิเช่น บริษัท Cargill Dow และ Nature Works ได้ใช้ข้าวโพดเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตกรดแล็กติก และ พอลิแล็กติกแอซิด และบริษัท Metabolix ได้ทำการผลิตพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoate) โดยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีแหล่งกำเนิดจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) โปรตีน (proteins) พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต และ พอลิแล็กติกแอซิด เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีแหล่งกำเนิดจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี เช่น พอลิแคโพรแลกโตน (poly(ϵ -caprolactone)) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol)) เป็นต้น ในอนาคตมีแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากการค้นพบและพัฒนากระบวนการผลิตที่ทำให้ได้พลาสติกที่มีราคาถูกลงและมีสมบัติดีขึ้น อีกทั้งการมีกฎข้อบังคับ รวมถึงการมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่สูงขึ้น ทำให้บริษัทต่างๆ เร่งพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพให้มีสมบัติหลากหลายมากยิ่งขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานในอนาคตได้

การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นกระบวนการย่อยสลายที่เกิดจากเชื้อรา จุลินทรีย์ และ แบคทีเรีย [10] ที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการย่อยสลายที่เกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายสายโซ่พอลิเมอร์ โดยเมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอที่จะสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปภายในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นสุดท้าย คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) น้ำ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass) เป็นต้น

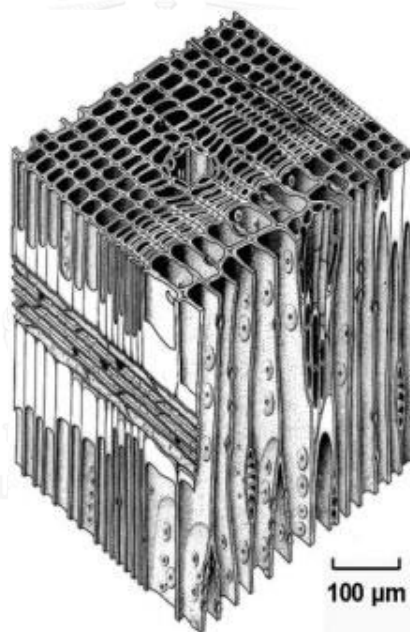
2.4 ผงไม้ (Wood Flour, WF) [2, 11]

ผงไม้ เป็นเส้นใยที่ได้มาจากธรรมชาตินำมาบดเป็นผง โดยจะมีองค์ประกอบหลักเป็น สารอินทรีย์อยู่ 3 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และ ลิกนิน (lignin) ซึ่งผงไม้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยผงไม้ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุเหลือใช้จาก โรงงานและอุตสาหกรรมไม้ มีลักษณะเป็นผงละเอียด น้ำหนักเบา ซึ่งปัจจุบันมีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ที่มีความละเอียดของอนุภาคให้เลือกหลายชนิด ราคาไม่สูงมากนัก จึงนิยมนำผงไม้มาใช้เป็นสารตัวเติม ในพอลิเมอร์คอมพอสิตอย่างแพร่หลาย ทั้งกับเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตพลาสติก นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป เช่น สามารถฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีด

แบบ หรือ อัดแบบ โดยไม่ทำให้เครื่องจักรหรือแม่พิมพ์สึกหรอ เนื่องจากอนุภาคของผงไม้มีความแข็ง (hardness) ต่ำกว่าอนุภาคของสารอนินทรีย์



รูปที่ 2.7 สัณฐานวิทยาของผงไม้สน [12]



รูปที่ 2.8 ลักษณะทางกายภาพของไม้เนื้ออ่อน [12]

ผงไม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีชื่อทางการค้าว่า Lignocel (เกรด C120) ที่ผลิตโดยบริษัท J. Retenmaier & Sohne (Rosenberg, Germany) โดยผงไม้นี้ทำมาจากไม้สนซึ่งเป็นไม้เนื้ออ่อนที่มีคุณภาพเดียวกัน โดยมีลักษณะเป็นผงละเอียด น้ำหนักเบา สีน้ำตาลอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 มีขนาดอนุภาค 100-120 เมช หรือ ขนาดอนุภาค 70-150 ไมโครเมตร และความหนาแน่นรวม 100-135 กรัม/ลิตร [12]



รูปที่ 2.9 ผงไม้ Lignocel (เกรด C120)

2.5 โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite, WT) [13-15]

โวลลาสโทไนต์เป็นแร่แคลเซียมซิลิเกต (calciumsilicate, CaSiO_3) ที่ได้จากธรรมชาติมีลักษณะเป็นแท่งผลึกรูปแท่งเข็ม (acicular or Needle-like) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ขวา) องค์ประกอบและสมบัติของโวลลาสโทไนต์แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ โวลลาสโทไนต์ถูกตั้งชื่อตามนักเคมีและแร่วิทยาชาวอังกฤษผู้ค้นพบ คือ W.H. Wollaston โวลลาสโทไนต์บริสุทธิ์จะมีสีขาว แต่เมื่อมีสิ่งเจือปน จะเปลี่ยนเป็นสีครีม ชมพู หรือสีแดง โวลลาสโทไนต์สังเคราะห์ได้จากกระบวนการให้ความร้อนและความดัน (hydrothermal) ซึ่งจะเปลี่ยนหินปูน (limestone) เป็นโวลลาสโทไนต์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้สารปราศจากโลหะปนเปื้อนจึงใช้แม่เหล็กในการคัดแยกสิ่งเจือปนดังกล่าว โวลลาสโทไนต์ถูกนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมมากในช่วงปี ค.ศ.1950 ทั้งอุตสาหกรรมพลาสติก สี อุปกรณ์ทนการขีดสี เซรามิก และโลหะ ในปัจจุบันเริ่มนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุคอมพอสิตทางการแพทย์ โวลลาสโทไนต์เกรดผงมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างต่ำ (3:1, 5:1) มีความละเอียดให้เลือกตั้งแต่ 5000 เมช (3×9 ไมโครเมตร) 1200 เมช (4×12 ไมโครเมตร) 400 เมช (8×24 ไมโครเมตร) 325 เมช (14×56 ไมโครเมตร) 200 เมช (19×95 ไมโครเมตร) เกรดที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างสูง (10:1, 20:1) มักใช้สำหรับเสริมแรงในพลาสติก มีความยาวแท่งผลึกตั้งแต่ 30-825 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.10 แร่โวลลาสโทไนต์ (ซ้าย) ผงโวลลาสโทไนต์ (กลาง) และสัณฐานวิทยาของโวลลาสโทไนต์ (ขวา) [14]

สมบัติเฉพาะของโวลลาสโทไนต์ คือ มีความแข็ง 4.5 โมห์ ค่ามอดุลัส 30,000 เมกะพาสคัล ซึ่งใกล้เคียงกับแร่ซิลิเกตชนิดอื่นๆ มีสีขาว มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ อัตราการดูดซึมน้ำต่ำ จุดติดไฟได้ยาก มีความเป็นอัลคาไลน์สามารถแยกออกจากแร่ที่มีความเป็นกรดได้ดี โวลลาสโทไนต์เป็นสารเสริมแรงตัวเลือกทดแทนการใช้เส้นใยแก้วได้ และมีอันตรายต่อสุขภาพน้อยกว่าแร่ใยหิน (asbestos) สามารถใช้ร่วมกับสารปรับปรุงผิวประเภทไซเลน-ไททานเต และ เอสเทอร์ เพื่อลดการเกาะตัวกัน ทำให้กระจายตัวในเมทริกได้ดี อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ไม่มีขั้วกับสารตัวเติมมีขั้วด้วยซิลโฟนิลเอไซด์ไซเลนก็จะทำให้โวลลาสโทไนต์กระจายตัวยึดกับพอลิเมอร์ได้ดีมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของโวลลาสโทไนต์แต่ละเกรด [13]

Composition	KEMOLIT [®]	VANSIL [®]	NYCO [®]
CaO	47	44.0	47
SiO ₂	49.5	50.0	50.0
MgO	0.2	1.5	0.3
Al ₂ O ₃	0.6	1.8	0.3
Fe ₂ O ₃	0.43	0.3	1.0
TiO ₂	Traces	Not report	0.05
MnO	0.29	<0.1	0.1
Na ₂ O	0.02	0.2	Not report
K ₂ O	0.11	Not report	0.1

ตารางที่ 2.4 สมบัติของโวลลาสโทไนต์ [14]

Property	
Color	White
Crystal system	Triclinic
Specific gravity	2.8-2.9
Coefficient of thermal expansion, K ⁻¹	6.5 × 10 ⁻⁶
Specific heat, J kg ⁻¹ K ⁻¹	1003
Melting point, °C	1540
Transition temperature, °C (pseudowollastonite)	1200
Hardness (Mohs)	4.5-5

Refractive index	1.63-1.67
pH (10 wt. % slurry)	9.0-11
Loss on ignition, % (950 °C)	0.1-6
Thermal conductivity. W m ⁻¹ K ⁻¹	2.5
Dielectric constant, 10 ⁴ Hz	6

การใส่โวลลาสโทไนต์ลงไปสามารถเพิ่มยั้งสัมมอดูลัส ความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้ง และ อุณหภูมิการอ่อนตัว ยั้งสัมมอดูลัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเช่นเดียวกับความทนแรงกระแทก ในขณะที่เส้นใยแก้วจะช่วยให้เพิ่มความทนแรงกระแทกได้มากกว่าโวลลาสโทไนต์ อันเนื่องมาจาก ความแข็งแรงของโวลลาสโทไนต์เอง ข้อดีอื่นๆ ได้แก่ เนื่องจากการขยายตัวอันเนื่องมาจากความร้อนที่ต่ำจึงไม่ทำให้ชิ้นงานหดตัวหลังจากออกจากแม่แบบ ส่งผลทำให้ชิ้นงานมีเสถียรภาพทางรูปร่างดี (dimensional stability)

2.6 คอมโพสิต (Composites) [16, 17]

คอมโพสิต คือ วัสดุผสมตั้งแต่ 2 กลุ่มวัสดุหลักขึ้นไป โดยวัสดุในคอมโพสิตต้องไม่ละลายซึ่งกันและกัน หรือไม่ผสมรวมกันเป็นเนื้อเดียวกัน โดยจะมีวัสดุชนิดหนึ่งเป็นเมทริก (matrix) และวัสดุอีกชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดกระจายตัว (disperse) อยู่ในเมทริกอย่างสม่ำเสมอ เรียกว่าส่วนเสริมแรง (reinforcement) โดยสมบัติของคอมโพสิตเป็นการรวมสมบัติที่ดีของวัสดุแต่ละชนิดเอาไว้ด้วยกัน ซึ่งองค์ประกอบของคอมโพสิต สามารถแบ่งได้เป็น

- เมทริกซ์ (matrix phase) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุที่มีความต่อเนื่องกัน โดยเมทริกซ์ที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ และโลหะ เป็นต้น

- ส่วนเสริมแรง (reinforcement phase) สามารถจำแนกตามลักษณะทางสัณฐานวิทยาได้ เช่น อนุภาค เส้นใย และ วิสเกอร์ โดยอนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ด หรือผง เช่น ผงถ่านดำ ซิลิกอนคาร์ไบด์ เป็นต้น และถ้าพิจารณาอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อ เส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio, L/D) ถ้าอัตราส่วน ของสารเสริมแรงดังกล่าวมากกว่า 100 ขึ้นไปสารเสริมแรงชนิดนั้นจะถูกจัดเป็นเส้นใย (fiber) ซึ่งสามารถจำแนกต่อได้ตามความยาว คือ เป็นเส้นใยต่อเนื่อง (continuous fiber) และ เส้นใยไม่ต่อเนื่อง (discontinuous fiber) โดยที่สามารถจำแนกเส้นใยแบบไม่ต่อเนื่องตามอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) ได้เป็น เส้นใยยาว (long fiber) ซึ่งมีอัตราส่วน L/ D สูงกว่า 1,000 ขึ้นไป และเส้นใยสั้น (short fiber) ซึ่งมี อัตราส่วน L/D สูงกว่า 1,000 โดยเส้นใยมีทั้งที่เป็นเส้นใยอินทรีย์และเส้นใยอนินทรีย์ โดยตัวอย่างเส้นใยอินทรีย์ เช่น เส้นใยไนลอน

เส้นใยอะรามิต เส้นใยเซลลูโลส เป็นต้น ส่วนเส้นใยอนินทรีย์อาจเป็นเส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น

2.7 พอลิเมอร์คอมพอสิต (Polymer composites) [16]

โดยธรรมชาติพอลิเมอร์เป็นสารประกอบ อินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นหน่วยซ้ำ เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่สูงนัก มีความหนาแน่นต่ำ และมีความทนทานต่อการกัดกร่อน การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการ เติมเส้นใย หรือ อนุภาค เสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดเป็นวัสดุคอมพอสิตที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยพอลิเมอร์คอมพอสิต เป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมากในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากพอลิเมอร์คอมพอสิตมีสมบัติด้านความแข็งแรงสูงและความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้มีน้ำหนักเบาแต่ยังคงแข็งแรงอยู่ แต่สารเสริมแรงที่ให้สมบัติดังกล่าวมักมีราคาแพง (เส้นใยแก้ว เส้นใยอะรามิต หรือ เส้นใยคาร์บอน) จึงส่งผลต่อต้นทุนที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์คอมพอสิตให้สูงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังมีการนำเอาสารเสริมแรงมากกว่า 2 ชนิด ขึ้นไปมาเสริมสมบัติซึ่งกันและกัน เกิดเป็นวัสดุไฮบริดคอมพอสิต (hybrid composite) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติเกื้อกันหรือส่งเสริมให้สมบัติด้านใดด้านหนึ่งดีขึ้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cong V. และคณะ [18] ได้ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิแล็กติกแอซิดและเอทิลีนไว-นिलแอซีเทตโดยทำการจำกัดสัดส่วนของไวนิลแอซีเทตในเอทิลีนไวนิลแอซีเทตที่ 18% และมีการเปรียบเทียบอัตราส่วนการผสมของพอลิแล็กติกแอซิดและเอทิลีนไวนิลแอซีเทต 80 : 20 และ 60 : 40 แล้วนำไปทำการทดสอบการย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์โดยการฝังดิน พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 80 : 20 มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่าที่อัตราส่วน 60 : 40 อย่างชัดเจนอีกทั้งยังสามารถเพิ่มความเหนียวให้กับพอลิเมอร์ผสมได้ดีกว่าพอลิแล็กติกแอซิด ส่วนในเรื่องของการย่อยสลายที่อัตราส่วน 60 : 40 สามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่า กล่าวคือ ใช้เวลาในการย่อยสลายน้อยกว่า

Ma P. และคณะ [19] ทำการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิแล็กติกแอซิดและเอทิลีนไว-นिलแอซีเทตโดยทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของไวนิลแอซีเทตในเอทิลีนไวนิลแอซีเทตเป็น 40% 50% 60% 70% 80% และ 90% และมีการจำกัดอัตราส่วนการผสมของพอลิแล็กติกแอซิดและเอทิลีนไว-นिलแอซีเทต 80 : 20 พบว่าที่สัดส่วนของไวนิลแอซีเทตในเอทิลีนไวนิลแอซีเทต ยิ่งมาก ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองจะมากขึ้นด้วย แต่ที่สัดส่วนของไวนิลแอซีเทตในเอทิลีนไวนิลแอซีเทตเป็น 50% ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกได้ดีที่สุดและให้ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด จากนั้นเมื่อได้สัดส่วนของไวนิลแอซีเทตในเอทิลีนไวนิลแอซีเทตที่เหมาะสมแล้วก็ได้ทำการเปรียบเทียบ

อัตราส่วนในการผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนแอกไซด์และเอทิลีนไวนิลเอซีเตตตั้งแต่ 100/0 ถึง 70/30 พบว่ายังมีปริมาณ เอทิลีนไวนิลเอซีเตตเพิ่มมากขึ้นความต้านทานต่อแรงกระแทก และการยืดตัวเพิ่มมากขึ้น แต่ก็ทำให้สมบัติทางด้านความแข็งแรงเช่น ความแข็งแรงต่อการดึงยึด และความแข็งแรงต่อการดัดโค้ง ลดลงตามปริมาณเอทิลีนไวนิลเอซีเตตที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

Liu R. และคณะ [20] ทำการเปรียบเทียบการใช้ผงไม้ ผงเซลลูโลส และผงลิกนิน เป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิเอทิลีนแอกไซด์ พบว่า ผงเซลลูโลสให้สมบัติเชิงกลโดยรวมได้ดีที่สุดเนื่องจากมีการกำจัดส่วนที่ไม่ช่วยในการเสริมแรงหรือส่วนที่ไม่เข้ากับพอลิเอทิลีนแอกไซด์ออกไป เช่น ลิกนินและเฮมิเซลลูโลส จึงทำให้ผงเซลลูโลสมีความสามารถในการโอนถ่ายแรงจากพอลิเอทิลีนแอกไซด์ได้ดี ทำให้สมบัติเชิงกลดีตามไปด้วย รองลงมาคือ ผงไม้และผงลิกนิน ในเรื่องของการดูดซึมน้ำนั้นผงไม้สามารถดูดซึมน้ำได้มากที่สุด เนื่องจากประกอบไปด้วย เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่ค่อนข้างชอบน้ำจึงทำให้สามารถดูดซึมน้ำได้มาก ส่วนผงลิกนินนั้นดูดซึมน้ำได้น้อยที่สุด เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของลิกนินนั้นประกอบไปด้วยวงอโรมาติกที่ไม่ชอบน้ำอยู่มากจึงทำให้สามารถดูดซึมน้ำได้น้อย

Petinakis และคณะ [21] ได้ทดลองเตรียมคอมพอสิตระหว่างพอลิเอทิลีนแอกไซด์และผงไม้ เพื่อศึกษาผลของแรงยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีนแอกไซด์และผงไม้ พบว่า ผงไม้ไม่มีผลทำให้ความทนแรงดึงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น แสดงถึงการไม่มีแรงยึดเกาะที่ดีระหว่างพอลิเอทิลีนแอกไซด์และผงไม้ หากแต่ผงไม้มีผลทำให้มอดุลัสของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 95 เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนแอกไซด์บริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม การเติมสารคู่ควบ (coupling agent) เมทิลไดเฟนิลไดไอโซไซยาเนต (methyl diphenyl diisocyanate) มีผลทำให้ความทนแรงดึงและมอดุลัสของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และ 135 ตามลำดับ แสดงถึงการมีแรงยึดเกาะที่ดีขึ้นระหว่างพอลิเอทิลีนแอกไซด์และผงไม้

Saravari O. และคณะ [22] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์/โวลลาสโทไนต์ (PP/EOC/wollastonite) คอมพอสิตเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน/เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ และพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ จากการทดสอบพบว่า การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ปริมาณร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนักในพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนและการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าสูงขึ้น ขณะที่ ความทนแรงดึงยังสัมมอดุลัส (young's modulus) มอดุลัสสะสม (storage modulus) ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) และ มอดุลัสแรงดัดโค้ง (flexural modulus) มีค่าลดลงต่ำกว่าของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม การเติมโวลลาสโทไนต์ที่มีขนาดอนุภาคระดับ 1200 เมช เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมมีผลทำ

ให้ยังสัมมูลัส มอดูลัสสะสม ความทนแรงดัดโค้ง มอดูลัสแรงดัดโค้ง และความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น การใส่เอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์และโพลลาสโตนีในพอลิโพรพิลีน มีผลทำให้สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์มีความสมดุมากขึ้น นอกจากนี้ เสถียรภาพทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ไม่ได้รับการปรับปรุงมากนัก แต่ร้อยละของถ่าน (% char) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามปริมาณโพลลาสโตนีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้การลุกไหม้ของผลิตภัณฑ์ลดลง

Risbud M. และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุเสริมองค์ประกอบระหว่างพอลิ-บิวทิลีนเทรฟทาเลตและโพลลาสโตนี พบว่า ยิ่งใส่ โพลลาสโตนีมากขึ้นจะทำให้ค่ามัมสัมผัสระหว่างพื้นผิวของวัสดุเสริมองค์ประกอบและอากาศมากขึ้นบ่งบอกถึงสมบัติการไม่ชอบน้ำที่มากขึ้น อีกทั้งการใส่โพลลาสโตนีลงไปยังช่วยทำให้สมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุดีขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้ในการใส่โพลลาสโตนีนั้นต้องไม่มากกว่า 30 % โดยน้ำหนัก มิเช่นนั้นจะทำให้สมบัติเชิงกลลดลงอันเนื่องมาจากการเกิดการเกาะกลุ่มกันทำให้กลายเป็นจุดศูนย์รวมแรงอันเป็นสาเหตุให้เกิดการเสียรูปของวัสดุ ณ จุดดังกล่าว

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

1. เม็ดพอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เกรด 4043 D จากบริษัท Nature Work LLC (USA)
2. เม็ดเอทิลีนไวนิลแอซีเตต (ethylene Vinyl Acetate, EVA) ที่มีปริมาณไวนิลแอซีเตต ร้อยละ 19 โดยน้ำหนัก จากบริษัท Exxon Mobil Cooperation (USA)
3. โวลลาสโทไนต์ (wollastonite, WT) เกรด HJ-2000 ขนาดอนุภาค 5-10 ไมโครเมตร จากบริษัท H&J Mineral Fiber Technology Co., Ltd. (China)
4. ผงไม้สน (wood flour, WF) เกรด Lignocel C120 ขนาดอนุภาค 70-150 ไมโครเมตร จากบริษัท J. Rettenaer and Söhne (JRs) (Germany)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ผสมและขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder) รุ่น LW-20-32 ของบริษัท LabTech Engineering (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ; MTEC)
2. เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) รุ่น Battenfeld BA 250 CDC ขนาด 40 ตัน (ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม ฝ่ายพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน)

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

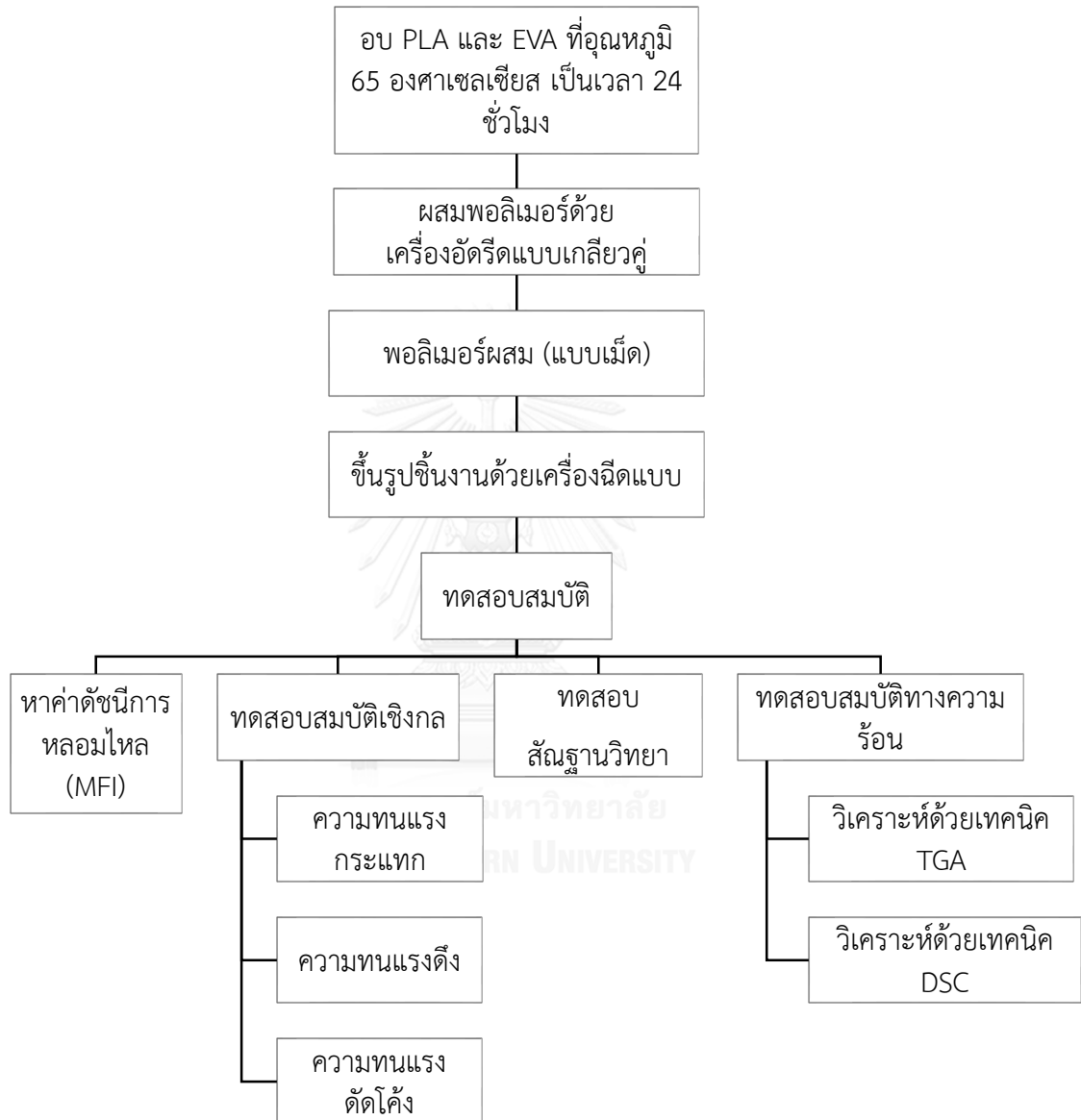
1. เครื่องทดสอบดรรชนีการหลอมไหล (melt flow indexer) รุ่น Kayeness 7053 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact testing machine) รุ่น CEAST, Resil Impactor (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
3. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) รุ่น Instron 5500R (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
4. เครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) รุ่น Mettler Toledo DSC 1 STAR^c System (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

5. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Mettler Toledo TGA/SDTA 851^e (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JEOL JSM-6480LV (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
7. เครื่องวัดดัชนีออกซิเจนจำกัด (limit oxygen index, LOI) รุ่น Stanton Redcroft (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
8. เครื่องทดสอบการลุกลามไฟตามมาตรฐาน UL-94 รุ่น ATLAS HVUL 2 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)



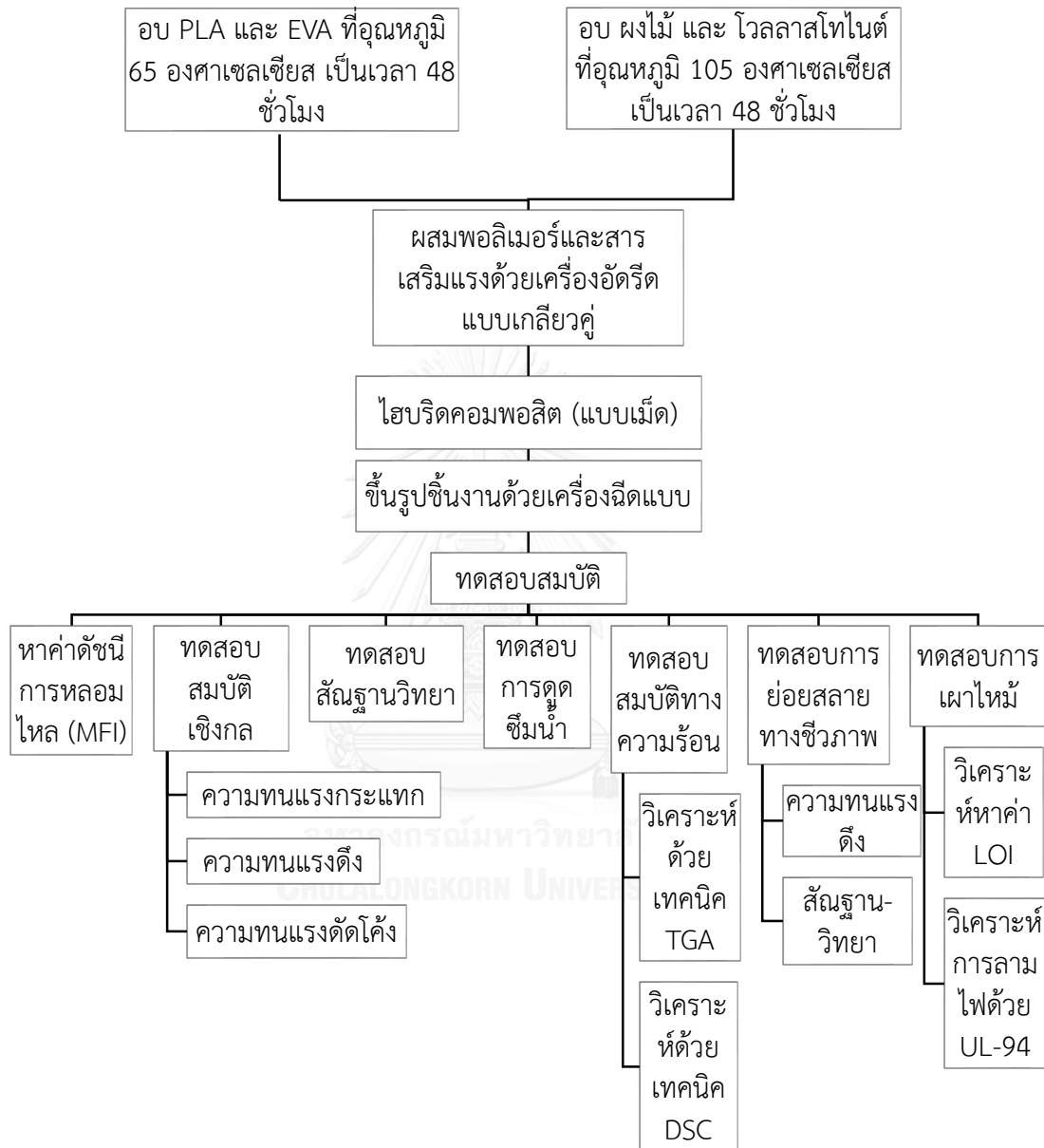
3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมได้แสดงไว้รูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบสมบัติของไฮบริดคอมพอสิตได้แสดงไว้รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบสมบัติของไฮบริดคอมพอสิต

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสม โดยนำพอลิแล็กติกแอซิดและเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์มาไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้น ทำการผสม พอลิแล็กติกแอซิดและเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (L/D = 40/1) (รูปที่ 3.3) โดยใช้รังกาน้ำในการหล่อเย็น แล้วใช้เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (รูปที่ 3.4) ทำการตัดเป็นเม็ดขนาดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ได้เม็ดพอลิเมอร์ผสม ดังรูปที่ 3.5 ภายใต้สภาวะดังต่อไปนี้

อุณหภูมิ: 110-180 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบสกรูหมุน: 40-60 รอบ/นาที

ความเร็วรอบตัด: 9.5-11.0 รอบ/นาที

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม

สูตร	PLA/EVA	ปริมาณ (kg)	
		PLA	EVA
1	100/0	2.50	0.00
2	90/10	2.25	0.25
3	80/20	2.00	0.50
4	70/30	1.75	0.75
5	60/40	1.50	1.00
6	50/50	1.25	1.25
7	0/100	0.00	2.50



รูปที่ 3.3 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่



รูปที่ 3.4 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก



รูปที่ 3.5 เม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่

จากนั้นนำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ (injection molding) (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อ 3.6) ได้ชิ้นงานตัวอย่างดังรูปที่ 3.6 เป็นชิ้นทดสอบ โดยตั้งอุณหภูมิของการฉีดที่ 110-180 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.6 ชิ้นทดสอบที่เตรียมได้จากเครื่องฉีดแบบ

3.5.2 การเตรียมไฮบริดคอมพอสิต

ทำการเตรียมไฮบริดคอมพอสิต โดยนำพอลิแล็กติกแอซิดและเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์มาไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ส่วนผงไม้และโพลลาสโตนไนด์จะนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้น ทำการผสมพอลิแล็กติกแอซิด เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ ผงไม้และโพลลาสโตนไนด์ในอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ โดยใช้ลมเป่าในการหล่อเย็น ดังรูปที่ 3.7 ภายใต้สภาวะดังต่อไปนี้

อุณหภูมิ: 120-180 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบสกรูหมุน: 30-40 รอบ/นาที

ความเร็วรอบตัด: 8.5-10.0 รอบ/นาที

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของไฮบริดคอมพอสิต

สูตร	PLA/EVA/WF/WT	ปริมาณ (kg)			
		PLA	EVA	WF	WT
1	90/10/0/30	1.80	0.20	0	0.60
2	90/10/10/20	1.80	0.20	0.10	0.20
3	90/10/15/15	1.80	0.20	0.30	0.30
4	90/10/20/10	1.80	0.20	0.20	0.10
5	90/10/30/0	1.80	0.20	0.60	0



รูปที่ 3.7 ระบบหล่อเย็นด้วยระบบลมพัด

3.6 การขึ้นรูปชิ้นตัวอย่าง

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมและไฮบริดคอมพอสิตที่เตรียมได้ในหัวข้อที่ 3.5.1 และ 3.5.2 ไปอบไล่ความชื้นอีกครั้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการขึ้นรูป ชิ้นทดสอบเพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ด้วยเครื่องฉีดแบบ (injection molding) ดังรูปที่ 3.8 ภายใต้อุณหภูมิดังต่อไปนี้

อุณหภูมิ: 110-180 องศาเซลเซียส

ความดันการฉีด: 120 บาร์

เวลาหล่อเย็นในแม่แบบ: 60 วินาที



รูปที่ 3.8 เครื่องฉีดแบบ

3.7 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

3.7.1 วิเคราะห์ดรรชนีการลอมไหล (MFI)

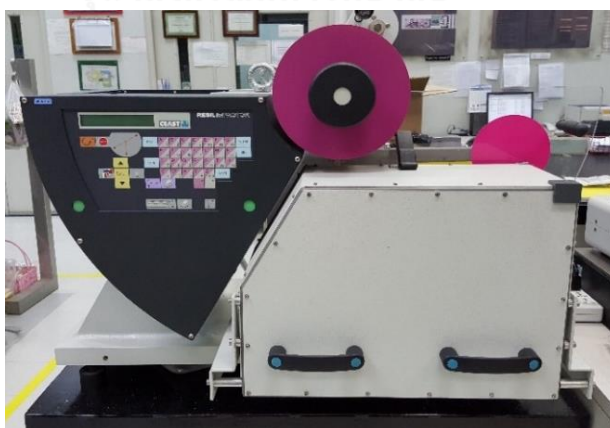
ทดสอบหาค่าดรรชนีการลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมและไฮบริดคอมพอสิต ด้วยเครื่องทดสอบดรรชนีการลอมไหล (รูปที่ 3.9) โดยใช้ภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ด้วยน้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม จากนั้นคำนวณและบันทึกผลในหน่วย กรัม/10 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D1238



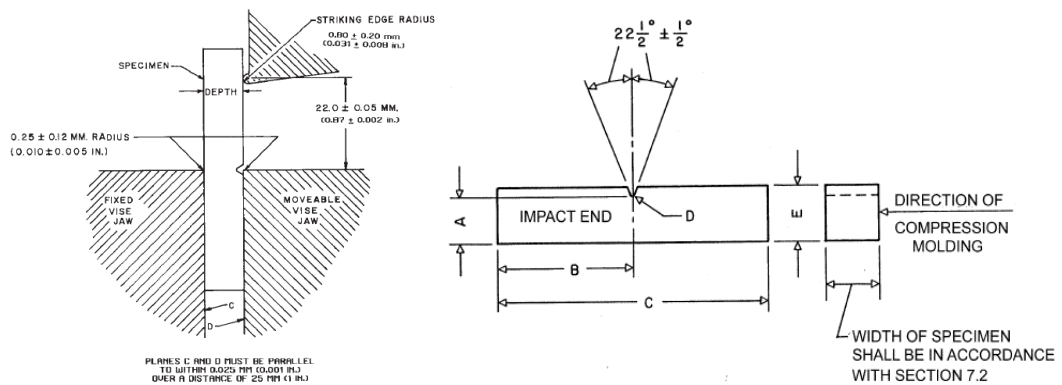
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดดรชนีการหลอมไหล

3.7.2 สมบัติความแรงกระแทก (Impact Strength, IS)

การทดสอบสมบัติความแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมและไฮบริดคอมพอสิตแบบไอซอด (Izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (รูปที่ 3.10) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด $63.5 \times 12.7 \times 3.2$ มิลลิเมตร (รูปที่ 3.11) และทำรอยบากเป็นรูปตัววี (V-notch) ด้วยเครื่องบากชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.12 แล้วทำการทดสอบ ภายใต้ภาวะการทดสอบ ดังนี้ : น้ำหนักค้อน 1 จูล ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 48



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก



รูปที่ 3.11 ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบ Izod

โดย	A	10.16 ± 0.05	มิลลิเมตร
	B	31.8 ± 1.00	มิลลิเมตร
	C	63.5 ± 2.00	มิลลิเมตร
	D	$0.25R \pm 0.05$	มิลลิเมตร
	E	12.70 ± 0.20	มิลลิเมตร

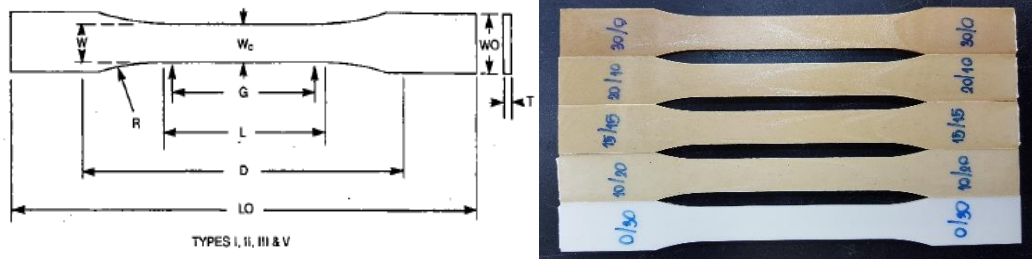


รูปที่ 3.12 เครื่องบาชั่งงานทดสอบสมบัติด้านทานแรงกระแทก

3.7.3 ทดสอบสมบัติความทนแรงดึง (Tensile Properties, TS)

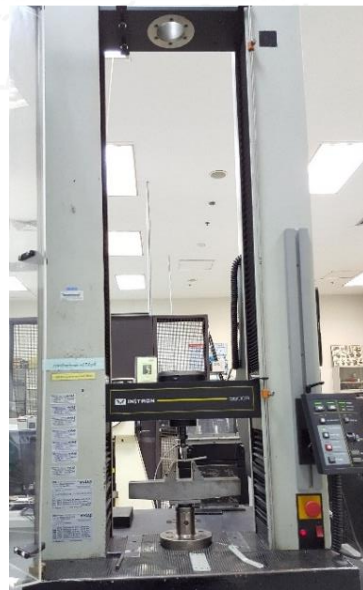
การทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมและไฮบริดคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I (รูปที่ 3.13) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.14) เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (tensile Strength) ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation

at Break) โดยมีระยะดิ่ง (gauge Length) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร ขนาด load cell เท่ากับ 10 กิโลนิวตัน และดิ่งด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 50 มิลลิเมตร/นาที ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.13 ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I

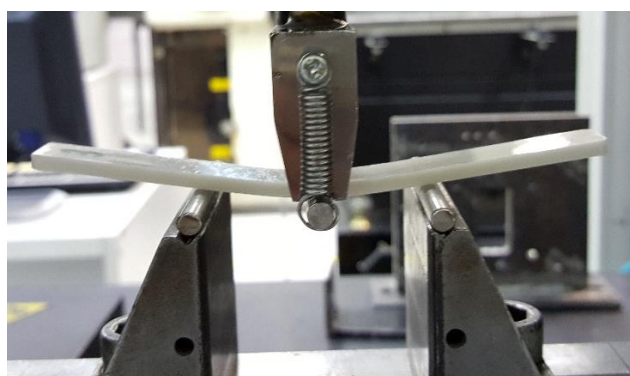
W	ความกว้างส่วนแคบ	13 ± 0.50	มิลลิเมตร
L	ความยาวส่วนแคบ	57 ± 2.25	มิลลิเมตร
WO	ความกว้างโดยรวม	19 ± 0.75	มิลลิเมตร
LO	ความยาวตลอดชิ้นทดสอบ	165 ± 6.50	มิลลิเมตร
G	ความยาวส่วนเกจ	50 ± 2.00	มิลลิเมตร
D	ระยะระหว่างกริป	115 ± 4.50	มิลลิเมตร
R	รัศมี	76 ± 3.00	มิลลิเมตร
T	ความหนา	3.2 ± 0.40	มิลลิเมตร



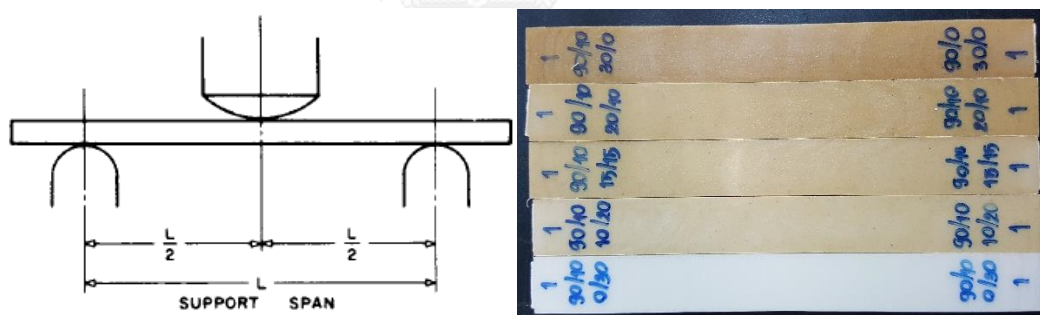
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล

3.7.4 ทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง (Flexural Properties, FS)

การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมและไฮบริดคอมพอสิตแบบแรงกระทำสามจุด (three-point bending) (รูปที่ 3.15) ตามมาตรฐาน ASTM D790 ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล โดยมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 50 มิลลิเมตร ขนาด load cell เท่ากับ 10 กิโลนิวตัน ดัดโค้งด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 1.30 มิลลิเมตร/นาที และกำหนดขนาดของชิ้นทดสอบเท่ากับ $127 \times 12.7 \times 3.2$ มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้งแบบแรงกระทำสามจุด



รูปที่ 3.16 ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790

3.7.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (Differential Scanning Calorimeter; DSC)

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมและไฮบริดคอมพอสิต ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (รูปที่ 3.17) โดยใส่เม็ดชิ้นทดสอบประมาณ 3-5 มิลลิกรัม ในจานอะลูมิเนียมแล้วปิดผนึกด้วยฝาอะลูมิเนียมที่เจาะรู แล้วทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนภายใต้สภาวะการทดสอบดังนี้:

- เริ่มต้นการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 10 นาที
- ลดอุณหภูมิจาก 200 องศาเซลเซียส จนถึง -50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที คงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 10 นาที
- เพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งจาก -50 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนสามารถทำได้โดยนำเทอร์โมแกรม (thermogram) ที่ได้จากเทคนิค DSC ไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) เอนทัลปีการหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m) เอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization enthalpy, ΔH_{cc}) อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_{cc}) โดยคำนวณหาระดับการเกิดผลึก (degree of crystallization, X_c) ได้จากสมการที่ 3.1 [3]

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{w \times \Delta H_m} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย ΔH_m คือ เอนทัลปีการหลอมเหลว

ΔH_{cc} คือ เอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น

ΔH_m คือ เอนทัลปีการหลอมเหลวของพอลิแล็กติกแอซิดที่เกิดผลึก 100% = 93.6 J/g และ เอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ที่เกิดผลึก 100% = 44 J/g [24]

w คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิแล็กติกแอซิดหรือเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ในพอลิเมอร์ผสมและไฮบริดคอมพอสิต



รูปที่ 3.17 เครื่องเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

3.7.6 การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Thermogravimetric Analysis; TGA)

วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและไฮบริดคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (รูปที่ 3.18) โดยสภาวะที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลของแก๊ส 20 มิลลิลิตร/นาที โดยเทอร์โมแกรมที่ได้แสดงน้ำหนักที่สูญเสียไป (weight loss) เมื่อเมื่อดำเนินการทดสอบได้รับความร้อน รวมทั้งปริมาณเถ้า (char) ที่เหลือ



รูปที่ 3.18 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA)

3.7.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

ตรวจสอบสัณฐานบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนแรงดึงและบริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 3.19 ที่กำลังขยาย 500 1000 และ 1500 เท่า กำลังไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยทำการเคลือบทองบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบก่อนทำการตรวจสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำอิเล็กตรอนของชิ้นงาน



รูปที่ 3.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.7.8 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

การวิเคราะห์การดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D570 ทำการทดสอบโดยการนำชิ้นทดสอบขนาด กว้าง 1 นิ้ว (25.4 มิลลิเมตร) ยาว 3 นิ้ว (76.3 มิลลิเมตร) หนา 1/8 นิ้ว (3.2 มิลลิเมตร) ไปใส่ในน้ำกลั่น ดังในรูปที่ 3.20 เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหา % water absorption หรือ ร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานตามสมการที่ 3.2 [20]

$$\% \text{ water absorption} = \frac{\text{wet weight} - \text{dry weight}}{\text{dry weight}} \times 100 \quad (3.2)$$

ทำการทดสอบทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลาเจ็ดวัน หลังจากนั้นทำการทดสอบทุกสองสัปดาห์ จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ หรือมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นไม่เกิน 0.01 % หรือเพิ่มขึ้นไม่เกิน 0.001 กรัม



รูปที่ 3.20 ซึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570

3.7.9 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดินทำโดยการเริ่มเตรียมดินผสมจาก ดินและปุ๋ยคอกที่อัตราส่วน 1:1 ใส่ลงในเชิงพลาสติกขนาด 50 x 60 นิ้ว ใส่ดินลงไปสูงประมาณ 20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.21 แล้วทำการฝังชิ้นงานในแนวตั้ง จากนั้นใส่ดินเพิ่มอีก 20 เซนติเมตร มีการควบคุมความชื้นในดินโดยการรดน้ำ 2 ลิตร ทุกอาทิตย์ตลอดระยะเวลาการทดสอบ 4 เดือน โดยในแต่ละเดือนจะมีการขุดชิ้นงานขึ้นมาทดสอบสมบัติความทนแรงดึงและตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบด้วยเทคนิค SEM



รูปที่ 3.21 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน

3.7.10 วิเคราะห์ดัชนีการใช้ออกซิเจนจำกัด (Limited Oxygen Index; LOI)

เทคนิคนี้เป็นการหาปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิ้นทดสอบสามารถติดไฟได้ เพื่อนำไปใช้การวิเคราะห์ถึงความสามารถในการทนไฟของชิ้นทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D2863 กำหนดขนาดชิ้นทดสอบ $6.5 \times 100 \times 3$ มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.22 กำหนดขนาดของเปลวไฟสูง 2 เซนติเมตร โดยการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนค่าปริมาณแก๊สออกซิเจนแล้วทำการเผาชิ้นงานด้วย เปลวไฟเป็นเวลา 10 วินาที ก่อนนำเปลวไฟ หากชิ้นทดสอบเกิดการติดไฟแล้วสามารถดับได้เองขณะ เกิดการลามไฟของชิ้นงานไม่เกิน 1 เซนติเมตร จะถือว่าปริมาณออกซิเจนที่ใช้นั้นคือปริมาณออกซิเจน ที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิ้นงานสามารถติดไฟหรือ คือ ค่า LOI แต่หากไม่ติดไฟหรือไม่สามารถดับ ด้วยตัวเองก็ต้องทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของแก๊สออกซิเจนจนกว่าจะได้ปริมาณที่เหมาะสม เครื่อง ทดสอบ LOI แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2863



รูปที่ 3.23 เครื่องทดสอบดัชนีการใช้ออกซิเจนจำกัด (LOI)

3.7.11 การทดสอบการลุกลามไฟ (Flammability Test)

ทดสอบการลุกลามไฟเป็นไปตามมาตรฐาน UL-94 โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด 130 × 13 × 3 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องทดสอบการลุกลามไฟ UL-94 ดังรูปที่ 3.24 โดยการทดสอบจะเป็นการเผาไหม้ในแนวตั้ง (vertical test) กำหนดให้เปลวไฟสูง 20 มิลลิเมตร เอียง 45 องศา ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.25 โดยจะมีการวางสำลีฝ้ายไว้ข้างล่างเพื่อศึกษาการติดไฟของการหลอมหยดขนาดชิ้นงานทดสอบกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D3801 กำหนดระยะการลามไฟที่ 100 มิลลิเมตร โดยในการทดสอบจะทำการจ่อเปลวไฟที่ชิ้นงานเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นนำเปลวไฟออกสังเกตการณ์ลามไฟและจับเวลาการลามไฟจนถึงระยะที่กำหนด (100 mm) เพื่อคำนวณหาอัตราการลามไฟ จากสมการที่ 3.3 โดยการแบ่งมาตรฐานการลามไฟจะเป็นดังตารางที่ 3.3 [25]

$$\text{อัตราการลามไฟ} = \frac{\text{ระยะการลามไฟ}}{\text{เวลาในการลามไฟ}} \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.24 เครื่องทดสอบการลุกลามไฟ UL-94



รูปที่ 3.25 การทดสอบการลุกลามไฟตามมาตรฐาน UL-94

ตารางที่ 3.3 การแบ่งมาตรฐานการลามไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 [25]

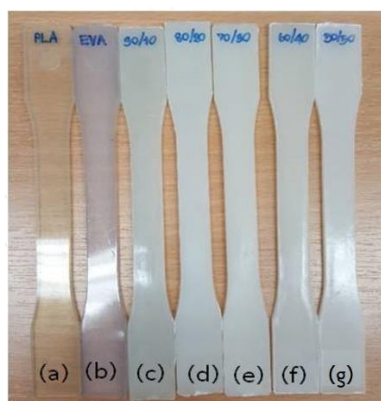
Rating	ลักษณะการลามไฟ
V-0	เมื่อทำการติดไฟครั้งแรกสามารถดับในเวลา 10 วินาที และเมื่อติดไฟครั้งที่สองสามารถดับได้ในเวลา 30 วินาที เวลารวมการเผาไหม้ทั้งหมดไม่เกิน 50 วินาที และการหลอมหยดไม่ทำให้ฝ้ายติดไฟ
V-1	เมื่อทำการติดไฟครั้งแรกสามารถดับในเวลา 30 วินาที และเมื่อติดไฟครั้งที่สองสามารถดับได้ในเวลา 60 วินาที เวลารวมการเผาไหม้ทั้งหมดไม่เกิน 250 วินาที และการหลอมหยดไม่ทำให้ฝ้ายติดไฟ
V-2	เมื่อทำการติดไฟครั้งแรกสามารถดับในเวลา 30 วินาที และเมื่อติดไฟครั้งที่สองสามารถดับได้ในเวลา 60 วินาที เวลารวมการเผาไหม้ทั้งหมดไม่เกิน 250 วินาที และการหลอมหยดทำให้ฝ้ายติดไฟ

บทที่ 4

วิเคราะห์ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะชิ้นงานทดสอบ

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงลักษณะของชิ้นทดสอบ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA (90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 wt%/wt%) และ ไฮบริดคอมพอสิตของ 90/10 PLA/EVA ด้วย ผงไม้ (WF) และ โวลลาสโทไนต์ (WT) โดยมีปริมาณรวมของ WF และ WT เท่ากับ 30 phr และที่ WF/WT ต่างๆ (0/30, 10/20, 15/15, 20/10 และ 30/0) ซึ่งขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ



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

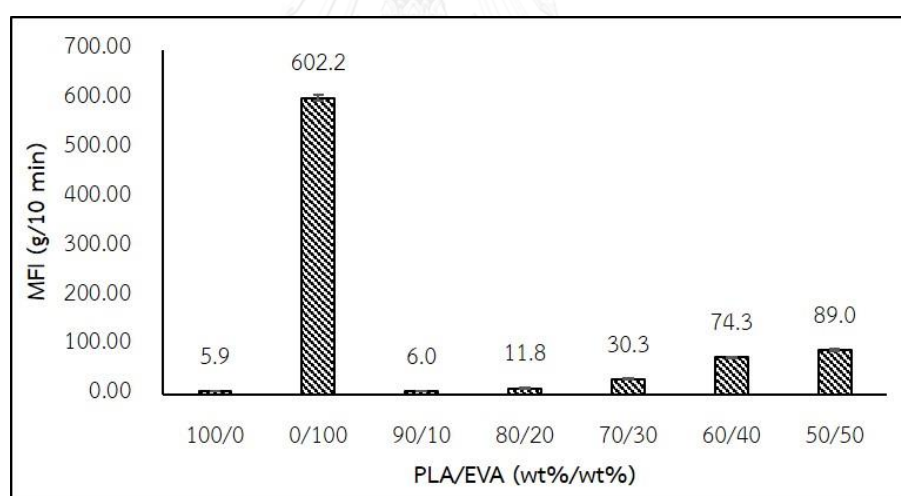


รูปที่ 4.2 ชิ้นทดสอบของ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต ด้วยในอัตราส่วน WF/WT: (a) 0/30, (b) 10/20, (c) 15/15, (d) 20/10 และ (e) 30/0

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า ชั้นทดสอบ PLA (รูปที่ 4.1(a)) มีลักษณะโปร่งใสและมีความแข็ง ขณะที่ชั้นทดสอบ EVA (รูปที่ 4.1(b)) มีสีขาว โปร่งแสง ยืดหยุ่นและสามารถโค้งงอได้ ซึ่งเมื่อผสม PLA กับ EVA พบว่า ชั้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA (รูปที่ 4.1(c-g)) มีสีขาวและทึบแสง ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA ในพอลิเมอร์ผสม พบว่า ชั้นทดสอบสามารถโค้งงอได้ และเมื่อนำพอลิเมอร์ผสมตามอัตราส่วนที่เลือกไว้ (90/10 PLA/EVA) ไปผสมกับ WF และ WT ปริมาณรวม 30 phr โดยมี WF/WT ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า ไฮบริดคอมพอสิตมีความแข็งเพิ่มขึ้นและไม่สามารถดัดโค้งขึ้นทดสอบได้ สำหรับคอมพอสิตที่เติม WT ล้วน (0/30 WF/WT) พบว่า มีสีขาวอมเทา (รูปที่ 4.2(a)) และมีเฉดสีน้ำตาลคล้ายไม้เข้มขึ้นตามปริมาณของ WF ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.2(b-e))

4.2 ดรรชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index, MFI)

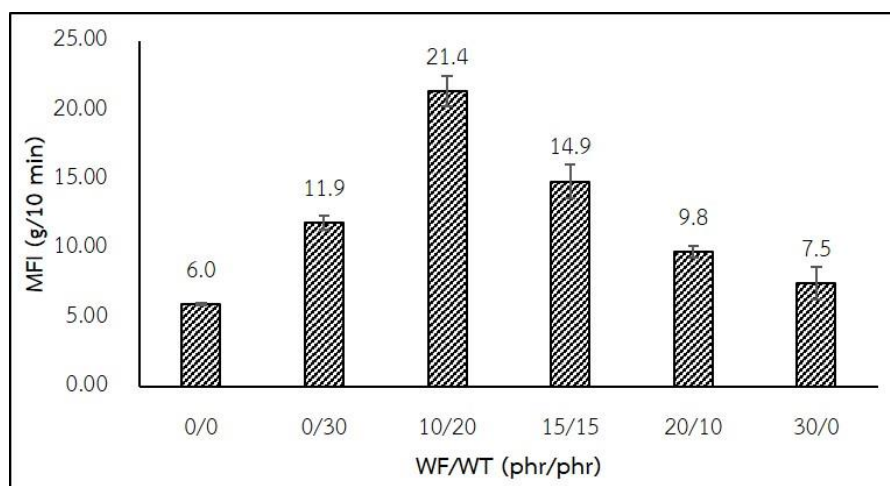
รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลการทดสอบหา ดรรชนีการหลอมไหลตามมาตรฐาน ASTM D1238 เมื่อใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม และอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต



รูปที่ 4.3 ดรรชนีการหลอมไหลของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA

จากรูปที่ 4.3 พบว่า ดรรชนีการหลอมไหลของ PLA และ EVA มีค่าเท่ากับ 5.9 และ 602.2 กรัม/10 นาที ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่า EVA สามารถไหลได้ง่ายกว่า PLA อีกทั้งมีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ต่ำมาก (81.1 °C) ดังนั้น การผสม EVA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงและไหลง่ายกับ PLA มีผลทำให้ดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และมีค่าอยู่ในช่วง 6.0–89.0 กรัม/10 นาที เนื่องจาก EVA มีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ต่ำ จึงกลายเป็นวัสดุภาคที่

เคลื่อนที่ (mobile phase) ทำหน้าที่เสมือนสารหล่อลื่น (lubricant) ให้สายโซ่ของ PLA สามารถเคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้น [18]



รูปที่ 4.4 ดรรชนีการหลอมไหลของ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต ด้วย WF/WT

จากรูปที่ 4.4 พบว่า ไฮบริดคอมพอสิตของ 90/10 PLA/EVA ด้วย WF/WT ทุกอัตราส่วนมี ดรรชนีการหลอมไหลสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA ทั้งนี้อาจเนื่องจากมีแรงยึดเกาะระหว่าง สารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ต่ำ และการมีโครงข่ายของสารตัวเติมที่ช่วยเพิ่มช่องว่างเข้าไปใน ไฮบริดคอมพอสิต จึงทำให้ไฮบริดคอมพอสิตไหลง่ายขึ้น โดยคอมพอสิตที่ใส่แต่ WT เท่านั้น (WF/WT: 0/30) และที่ WF/WT เท่ากับ 10/20 มีดรรชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (เพิ่มจาก 6 g/10 เป็น 11.9 และ 21.4 g/10 นาที ตามลำดับ) ก่อนที่จะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณ WF ในไฮบริด คอมพอสิตเพิ่มขึ้น (WF/WT: 15/15, 20/10 และ 30/0 ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของ WF มี ขนาดใหญ่และมีพื้นผิวที่หยาบและขรุขระมากกว่าของ WT จึงสามารถขัดขวางการไหลและเพิ่มแรง ยึดเกาะทางกายภาพระหว่าง WF และพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังนั้น ไฮบริดคอมพอสิตจึงมีดรรชนีการ หลอมไหลลดลง

4.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

สมบัติเชิงกลของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ใน เทอมของความทนแรงกระแทก (impact strength, IS), ความทนแรงดึง (tensile strength, TS), ยังส์มอดุลัส (Young's modulus, E), การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB), ความทน แรงดัดโค้ง (flexural strength, FS) และมอดุลัสการดัดโค้ง (flexural modulus, FM) ได้รวบรวมไว้ ในตารางที่ 4.1

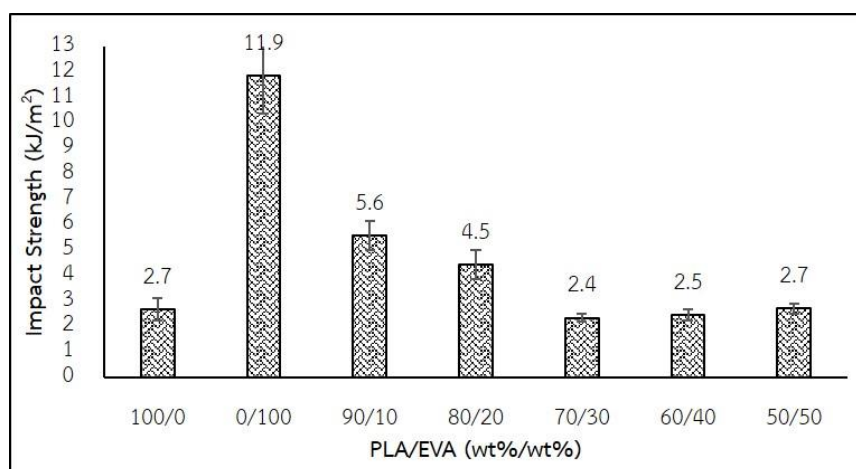
ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA

ไฮบริดคอมพอสิต

Sample	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
PLA	2.7±0.4	67.2±1.4	2912±54.3	4.1±0.5	100.5±2.0	3634±82.6
EVA	11.9±1.5	4.2±0.1	29±0.7	342±43	1.4±0.1	30±0.5
PLA/EVA						
90/10	5.6±0.6	39.9±5.9	2317±66.6	2.7±0.2	54.17±2.9	2740±69.5
80/20	4.4±0.6	28.6±0.2	1809±45.7	3.5±0.2	36.7±1.0	2264±392.8
70/30	2.3±0.2	15.5±0.5	1233±39.2	2.5±0.1	21.4±0.5	1439±38.8
60/40	2.4±0.2	8.8±0.4	755±20.8	2.4±0.2	12.1±0.6	852±48.1
50/50	2.6±0.2	6.8±0.2	518±7.89	2.7±0.2	10.6±0.2	623±10.6
PLA/EVA/WF/WT						
90/10/0/30	3.8±0.1	43.4±0.9	4184±84.1	2.8±0.2	66.2±1.2	5485±133.0
90/10/10/20	3.2±0.1	49.2±0.8	4212±84.0	2.9±0.1	74.0±1.0	5060±130.0
90/10/15/15	3.0±0.1	51.6±0.3	4091±46.4	2.7±0.2	77.7±0.8	5181±47.0
90/10/20/10	2.9±0.2	52.8±0.5	3978±126.0	2.56±0.1	80.0±0.8	5127±136.0
90/10/30/0	2.8±0.1	54.9±0.7	3866±57.1	2.4±0.2	80.6±1.3	5176±54.0

4.3.1 ความทนแรงกระแทก (Impact strength)

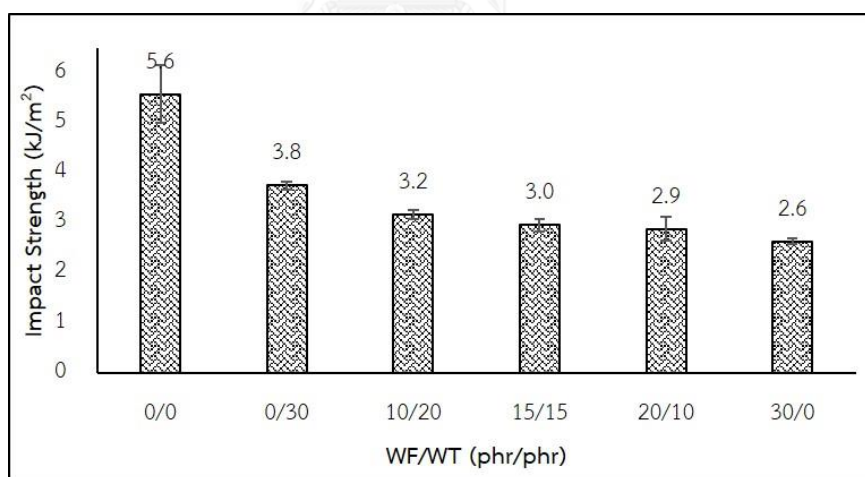
รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงความทนแรงกระแทกของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต



รูปที่ 4.5 ความทนแรงกระแทกของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5 พบว่า PLA มีค่าความทนแรงกระแทกต่ำมาก (2.7 kJ/m^2) ซึ่งเป็นคุณลักษณะของพลาสติกที่แข็งเปราะ เนื่องจาก PLA มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ที่ค่อนข้างสูง (~ 60 องศาเซลเซียส) ขณะที่ EVA มีความทนแรงกระแทกที่ค่อนข้างสูง (11.9 kJ/m^2) ซึ่งเป็นคุณลักษณะของพลาสติกที่เหนียว เนื่องจาก EVA มี T_g ต่ำ (~ -25 องศาเซลเซียส) และเมื่อใส่ EVA ใน PLA พบว่า พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA มีความทนแรงกระแทกมากที่สุด โดยเพิ่มจาก 2.7 kJ/m^2 เป็น 5.6 kJ/m^2 (107.4%) ทั้งนี้เนื่องจาก EVA มีความยืดหยุ่นมากกว่า PLA จึงอาจกล่าวได้ว่าอัตราส่วนของ PLA/EVA ที่ 90/10 เป็นอัตราส่วนวิกฤติ (critical ratio) ซึ่งถ้าใส่ EVA มากกว่า 10 wt% พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงกระแทกลดลง เนื่องจาก EVA เกิดการเกาะกลุ่ม (agglomerate) ซึ่งมีผลทำให้พื้นผิวสัมผัส (contact surface) ระหว่าง PLA และ EVA ลดลง และการส่งผ่านแรงลดลง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA ที่มีความทนแรงกระแทกสูงที่สุด ไปเตรียมไฮบริดคอมพอสิตด้วยสารตัวเติม 2 ชนิด ได้แก่ WF และ WT โดยให้ปริมาณสารตัวเติมทั้งหมดรวมกันเท่ากับ 30 phr และอัตราส่วนของ WF/WT เท่ากับ 0/30, 10/20, 15/15, 20/10 และ 30/0



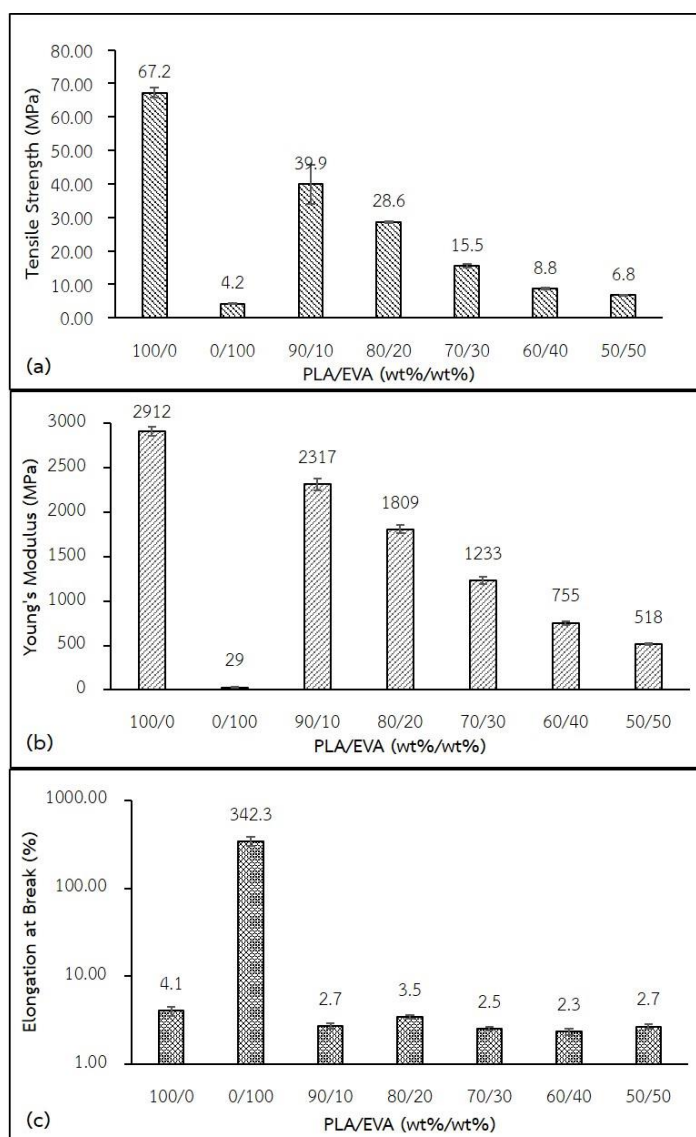
รูปที่ 4.6 ความทนแรงกระแทกของของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6 พบว่า ความทนแรงกระแทกของไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA เนื่องจากอนุภาคของสารตัวเติม WT และ WF มีความแข็งตึง (stiffness) จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้ความทนแรงกระแทกของไฮบริดคอมพอสิตมีค่าลดลง หากแต่ยังมีค่าสูงกว่า PLA ล้วน ยกเว้นอัตราส่วน WF/WT ที่ 30/0 ที่มีค่าต่ำกว่า PLA ล้วน นอกจากนี้ พบว่า คอมพอสิตที่ใส่ WF

อย่างเดียว (WF/WT 0/30) มีความทนแรงกระแทกสูงที่สุด คือ 3.8 kJ/m^2 ขณะที่การเติม WF ในไฮบริดคอมพอสิตส่งผลให้ความทนแรงกระแทกลดลงตามปริมาณของ WF ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าอยู่ในช่วง $2.6\text{--}3.2 \text{ kJ/m}^2$ ทั้งนี้เนื่องจาก WF มีอนุภาคที่ใหญ่กว่า WT มาก จึงมีพื้นผิวสัมผัสกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่น้อยกว่า ซึ่งทำให้มีการส่งผ่านแรงระหว่างเมทริกซ์กับ WF น้อยกว่า

4.3.2 สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)

รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงสมบัติด้านแรงดึง (ความทนแรงดึง ยังสัมมอดุลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด) ของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต



รูปที่ 4.7 สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยังสัมมอดุลัส (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7(a) พบว่า ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PLA ล้วน (67.2 MPa) และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของ EVA ที่เพิ่มขึ้น (มีค่าอยู่ในช่วง 6.8–39.9 MPa) เนื่องจาก EVA มีความทนแรงดึงที่ต่ำกว่ามาก (4.2 MPa)

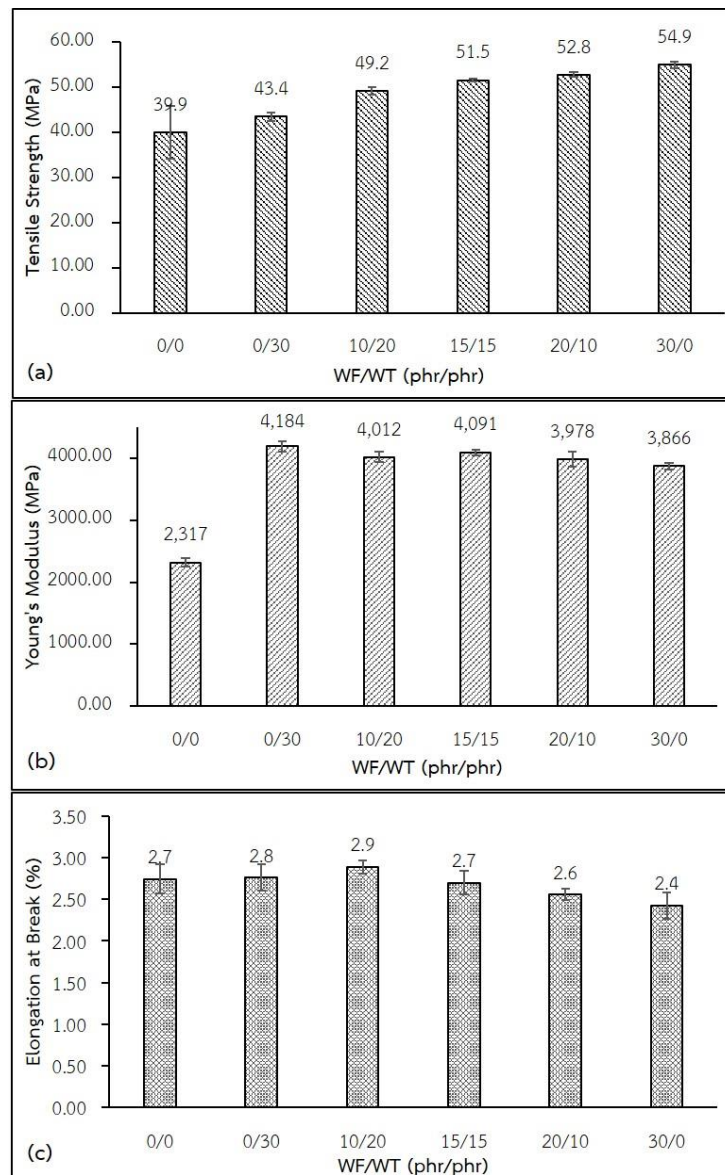
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7(b) พบว่า ยังสัมพันธ์ของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่าของ PLA ล้วน (2912 MPa) และมีค่าลดลงตามปริมาณของ EVA ที่เพิ่มขึ้น (มีค่าอยู่ในช่วง 518–2317 MPa) เนื่องจาก EVA มียังสัมพันธ์ที่ต่ำมาก (29 MPa)

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7(c) พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่าของ PLA ล้วน (4.1%) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.7–3.5% เนื่องจากความไม่เข้ากันของ PLA และ EVA และการมีแรงยึดเกาะที่ต่ำ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8(a) พบว่า ความทนแรงดึงของไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA (39.9 MPa) และมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ WF ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 43.4–54.9 MPa หรือลดลงตามปริมาณของ WT ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก WF เป็นเส้นใยเซลลูโลสที่มีการเกี่ยวพันของสายโซ่ (chain entanglement) กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้มากกว่า และมีความเข้ากันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่า WT ซึ่งเป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ จึงทำให้มีการส่งผ่านแรงระหว่าง WF กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่า นอกจากนี้ WF ยังมีลักษณะพื้นผิวที่หยาบและขรุขระ จึงทำให้มีแรงยึดเกาะทางกายภาพกับพอลิเมอร์เมทริกซ์เพิ่มขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8(b) พบว่า ยังสัมพันธ์ของไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA (2317 MPa) อย่างเห็นได้ชัด และมีค่าอยู่ในช่วง 3866–4212 MPa โดยไฮบริดคอมพอสิตที่มีปริมาณ WT มากกว่า WF มียังสัมพันธ์สูงกว่าไฮบริดคอมพอสิตที่มีปริมาณ WT เท่ากันหรือน้อยกว่า WF ทั้งนี้เนื่องจาก WT เป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ที่มีความแข็งตึงมากกว่า WF จึงทำให้ไฮบริดคอมพอสิตมีความแข็งตึงหรือยังสัมพันธ์สูงกว่า

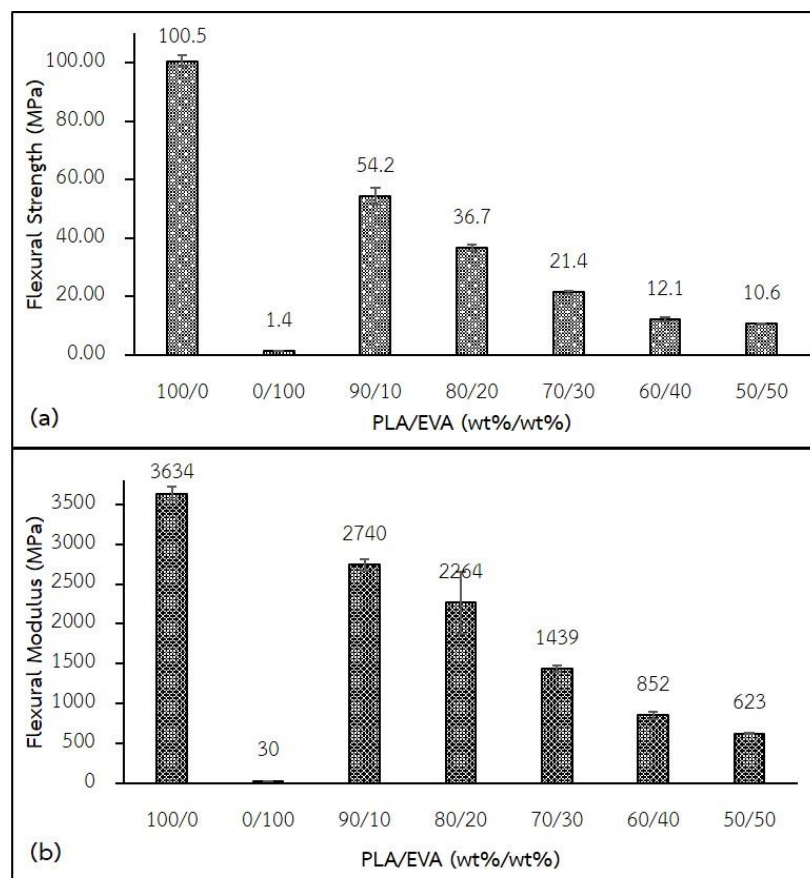
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8(c) พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกับของ 90/10 PLA/EVA (2.7%) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.4–2.9% ถึงแม้ว่าสารตัวเติมมีอนุภาคที่แข็งตึงมากกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์ก็ตาม แต่เนื่องจากภายในโครงสร้างของไฮบริดคอมพอสิตมีช่องว่างที่เกิดจากโครงข่ายของสารตัวเติม ดังนั้น เมื่อไฮบริดคอมพอสิตได้รับแรงดึงจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลถูกดึงเข้าไปในช่องว่างเหล่านั้นก่อนเกิดการแตกหัก จึงส่งผลให้การยืดตัว ณ จุดขาดของไฮบริดคอมพอสิตไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก



รูปที่ 4.8 สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งส์มอดุลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต

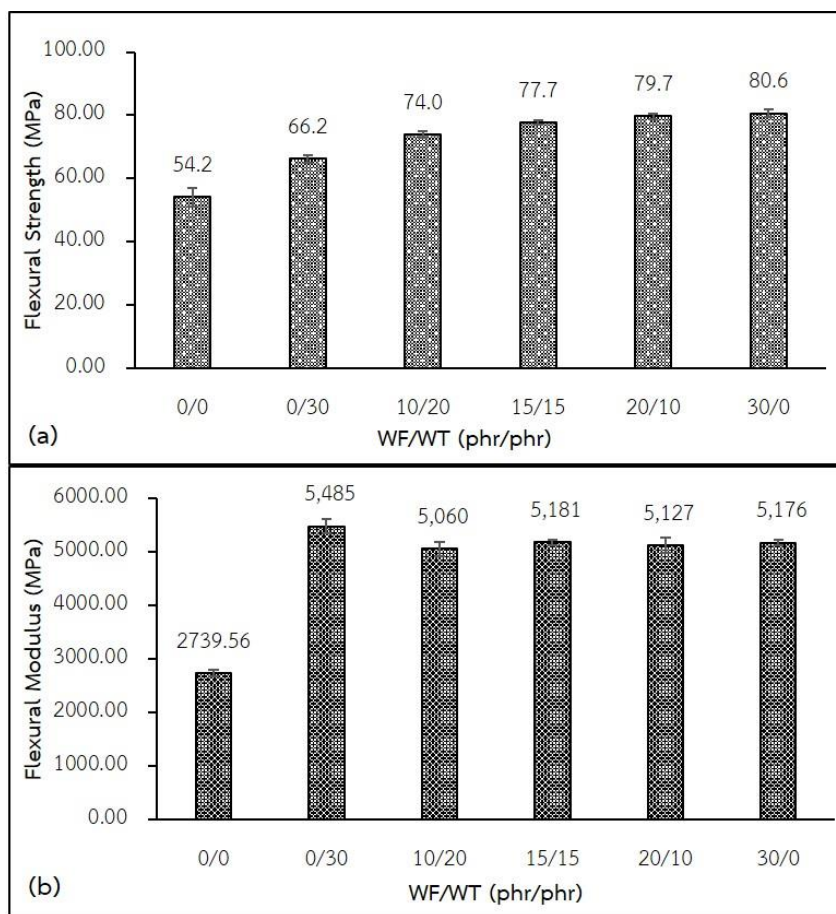
4.3.3 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง (Flexural properties)

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงสมบัติความทนแรงดัดโค้งของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต



รูปที่ 4.9 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง: (a) ความทนแรงดัดโค้ง (b) โมดูลัสการดัดโค้ง ของ PLA, EVA และ โพลีเมอร์ผสม PLA/EVA

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.9 พบว่า โพลีเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีความทนแรงดัดโค้ง (รูปที่ 4.9(a)) และโมดูลัสแรงดัดโค้ง (รูปที่ 4.9(b)) ต่ำกว่าของ PLA ล้วน และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของ EVA ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก EVA มีความทนแรงดัดโค้งและโมดูลัสแรงดัดโค้ง (1.4 MPa และ 30 MPa ตามลำดับ) ต่ำกว่าของ PLA (100.5 MPa และ 3634 MPa ตามลำดับ) มาก ดังนั้น เมื่อเติม EVA ที่มีความอ่อนนุ่มกว่าเข้าไปใน PLA ที่มีความแข็งมากกว่า จึงมีผลทำให้โพลีเมอร์ผสมมีความทนแรงดัดโค้งและโมดูลัสแรงดัดโค้งลดลง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 10.6–54.2 MPa และ 623–2740 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 สมบัติความทนแรงดัดโค้ง: (a) ความทนแรงดัดโค้ง (b) โมดูลัสการดัดโค้ง ของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.10(a) พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วน มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA (54.2 MPa) และมีค่าอยู่ในช่วง 66.2–80.6 MPa ทั้งนี้เนื่องจาก WF และ WT เป็นสารตัวเติมที่มีความแข็งสูง จึงทำให้ไฮบริดคอมพอสิตมีความทนแรงดัดโค้งสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่า คอมพอสิตที่ใส่แต่ WF มีความทนแรงดัดโค้งสูงสุด (80.6 MPa) ในขณะที่คอมพอสิตที่ใส่แต่ WT มีความทนแรงดัดโค้งต่ำที่สุด (66.2 MPa) ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของ WF เกิดการพันกันกับสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้มากกว่า WT อีกทั้งยังมีลักษณะพื้นผิวที่หยาบและขรุขระซึ่งช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะทางกายภาพกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงส่งผลให้ไฮบริดคอมพอสิตสามารถรับแรงดัดโค้งได้มากขึ้นตามปริมาณของ WF ที่เพิ่มขึ้น หรือ WT ที่ลดลง

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.10(b) พบว่า โมดูลัสการดัดโค้งของไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วน มีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA (2740 MPa) และมีค่าอยู่ในช่วง 5060–5485 MPa โดย

พบว่า คอมพอลิทีที่ใส่แต่ WF มีมอดูลัสแรงดัดโค้งสูงสุด (5485 MPa) และมีค่าลดลงเมื่อใส่ WT เข้าไปด้วย อย่างไรก็ตาม มอดูลัสแรงดัดโค้งของไฮบริดคอมพอลิทีมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

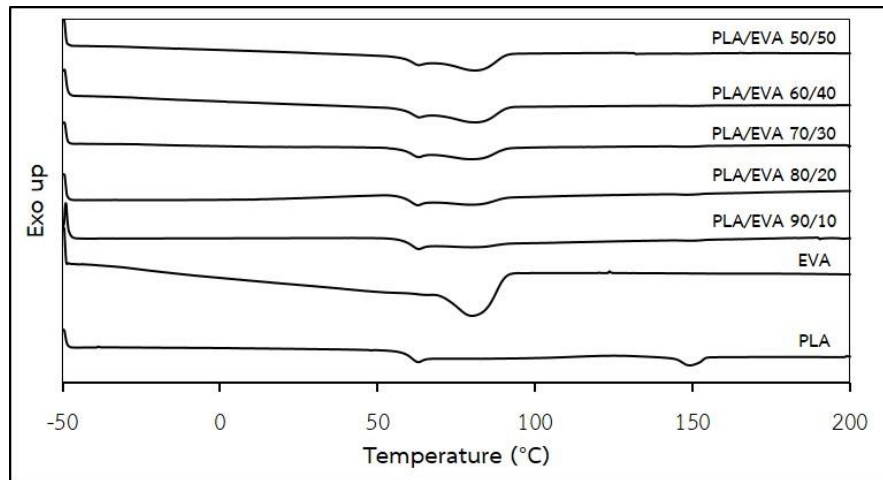
4.4 พฤติกรรมทางความร้อน (Thermal behaviors)

4.4.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมกาเกิดผลึกด้วยเทคนิค DSC

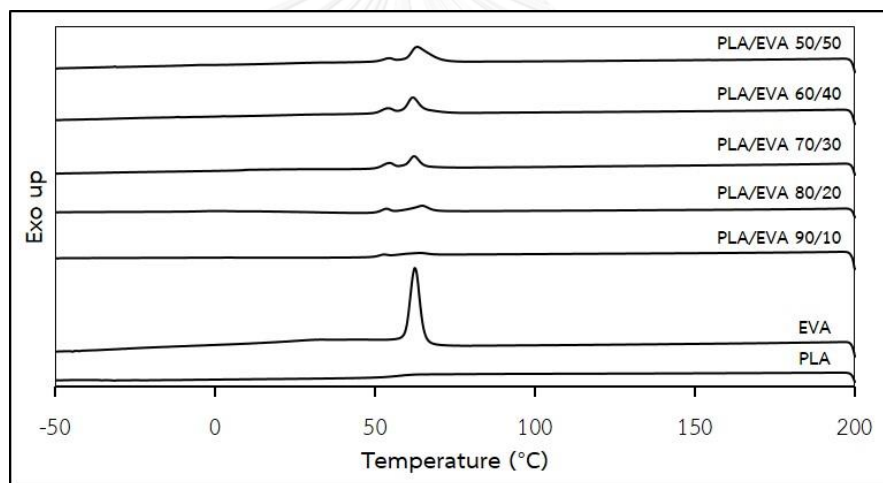
ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอลิทีได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ในเทอมของ T_g , อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c), เอนทัลปีการเกิดผลึก (crystallization enthalpy, ΔH_c), อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_{cc}), เอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization enthalpy, ΔH_{cc}), T_m และเอนทัลปีการหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m) ซึ่งหาได้จาก DSC เทอร์โมแกรม จากนั้นสามารถคำนวณหา ระดับการเกิดผลึก (degree of crystallinity, χ_c) ได้จากสมการที่ 3.1

ตารางที่ 4.2 พฤติกรรมทางความร้อนของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC

Sample PLA/EVA	EVA						PLA				
	T_g (°C)	$T_{c,1}$ (°C)	$T_{c,2}$ (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	χ_c (%)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)
100/0	-	-	-	-	-	-	59.4	123.3	1.4	149.0	2.74
0/100	-25.4	62.4	-	81.1	20.4	46.4	-	-	-	-	-
90/10	-	63.9	58.8	82.5	1.5	34.6	58.8	-	-	149.8	0.3
80/20	-	64.6	58.3	81.6	3.5	39.4	58.3	-	-	148.8	0.3
70/30	-	62.2	60.1	81.8	5.6	42.6	60.1	-	-	148.9	0.2
60/40	-	61.8	60.0	82.1	7.6	43.0	60.0	-	-	149.8	0.1
50/50	-	63.1	60.1	81.8	7.1	32.3	60.1	-	-	-	-



รูปที่ 4.11 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ PLA, EVA และ พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA



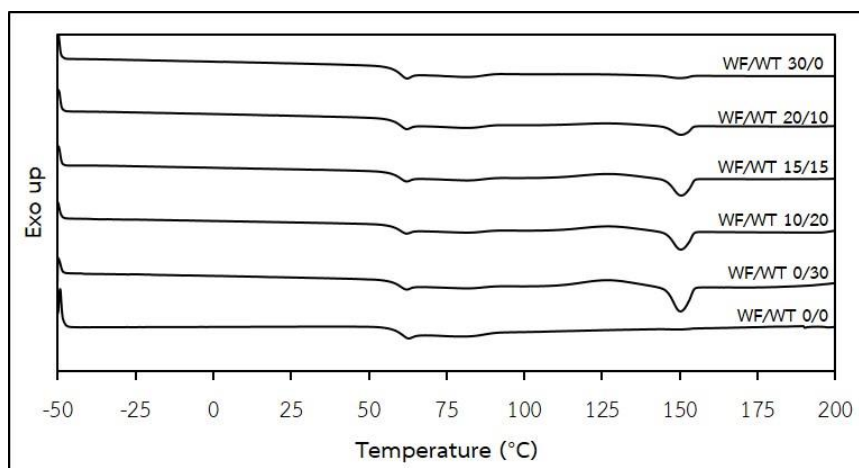
รูปที่ 4.12 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA

จากตารางที่ 4.2 รูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12 พบว่า PLA มี T_g และ T_m เท่ากับ 59.4 และ 149 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ EVA มี T_g และ T_m เท่ากับ -25.4 และ 81.1 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อผสม EVA กับ PLA พบว่า T_m ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงให้เห็นว่า PLA และ EVA มีความไม่เข้ากันในพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตามไม่พบ T_g ของ EVA ในพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ พบว่า PLA มี T_{cc} เท่ากับ 123.3 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ PLA เกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำในขั้นตอนการให้ความร้อนด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที่ โดย T_m ของ PLA สัมพันธ์กับผลึกที่เกิดระหว่างกระบวนการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำนี้เท่านั้น และ

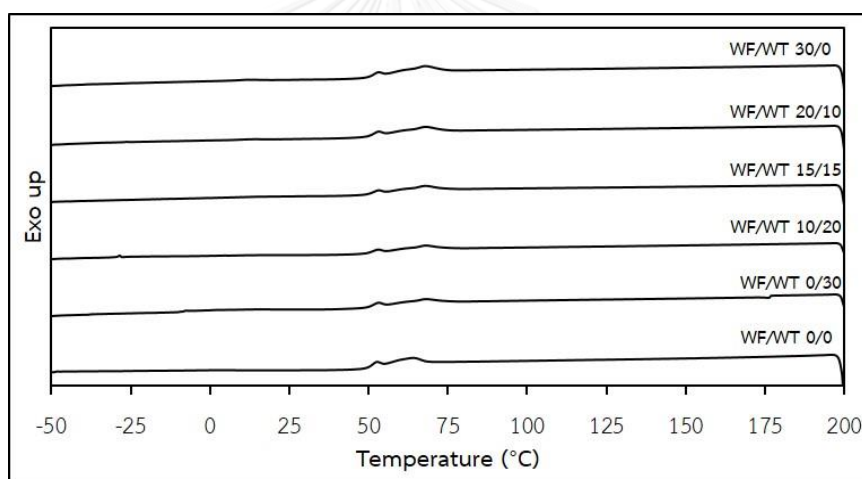
เมื่อใส่ EVA ใน PLA มีผลทำให้ไม่พบ T_{cc} ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วน ซึ่งแสดงว่า PLA ยังคงมีความเป็นอสัณฐาน ทั้งนี้อาจเนื่องจากการจัดเรียงโมเลกุลของ PLA ถูกขัดขวางด้วยโมเลกุลของ EVA ในขั้นตอนการให้ความร้อน อีกทั้งยังไม่พบ T_c ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมในทุกอัตราส่วน เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่ใช้ในการทดสอบเร็วเกินกว่าที่พฤติกรรมทางความร้อนของ PLA ที่เกิดผลึกยากอยู่แล้ว ทำให้ไม่พบ T_c ของ PLA หากแต่สามารถพบ T_c ของ EVA ในพอลิเมอร์ผสมสองตำแหน่งในช่วงอุณหภูมิ 61.1-64.6 องศาเซลเซียส และ 52.5-54.2 องศาเซลเซียส โดยตำแหน่งแรกเป็นการเกิดผลึกของเอทิลีน ขณะที่ตำแหน่งที่สองเป็นการเกิดผลึกของไวนิลเอซีเทต ตามลำดับ ซึ่งต่างจากตัว EVA ล้วน ที่พบ T_c เพียงค่าเดียวที่ 62.4 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า PLA มีผลต่อการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลของ EVA [7, 26] อย่างไรก็ตาม χ_c ของ EVA มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากโมเลกุลของ PLA ขัดขวางการจัดเรียงตัวของ EVA ส่วน PLA นั้น ไม่สามารถหา χ_c ได้เนื่องจาก อัตราการลดอุณหภูมิไม่เหมาะสมที่จะทำให้ PLA เกิดผลึกได้

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ 90/10 PLA/EVA คอมพอลิเมอร์ ที่อัตราส่วน WF/WT ต่างกัน

Sample PLA/EVA/ WF/WT	EVA					PLA				
	$T_{c,1}$ (°C)	$T_{c,2}$ (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	χ_c (%)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)
90/10/0/0	63.9	52.5	82.5	1.5	34.6	58.8	-	-	149.8	0.3
90/10/0/30	68.2	53.2	82.1	1.0	22.7	58.3	127.5	7.5	150.4	8.5
90/10/10/20	68.2	52.9	82.1	0.9	20.7	58.2	127.2	4.7	150.4	5.8
90/10/15/15	67.9	53.0	82.1	1.0	22.5	57.8	127.5	3.9	150.6	5.6
90/10/20/10	68.0	53.0	82.6	0.9	21.4	59.0	126.6	1.23	150.4	2.8
90/10/30/0	68.1	53.0	82.1	1.1	25.4	58.7	-	-	149.9	0.8



รูปที่ 4.13 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิตในอัตราส่วน WF/WT ต่างๆ กัน



รูปที่ 4.14 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ในอัตราส่วน WF/WT ต่างๆ กัน

จากตารางที่ 4.3 พบว่า T_g และ T_m ของ PLA ในไฮบริดคอมพอสิตอยู่ในช่วง 57.8–59 องศาเซลเซียส และ 149.9–150.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ T_m ของ EVA ในไฮบริดคอมพอสิตอยู่ในช่วง 82.1–82.6 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใส่ WF และ/หรือ WT ไม่มีผลต่อทั้ง T_g และ T_m ของ PLA และ EVA ในไฮบริดคอมพอสิต นอกจากนี้ ยังสามารถพบ T_{cc} ของ PLA ในไฮบริดคอมพอสิต ทั้งๆ ที่ไม่พบในพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารตัวเติมทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับ PLA โดย T_{cc} ของ PLA ในไฮบริดคอมพอสิตมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 126.6–127.5 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นว่า T_{cc} ของ PLA ในไฮบริดคอมพอสิตไม่ขึ้นกับปริมาณหรือชนิดของสาร

ตัวเติม อย่างไรก็ตาม ไม่พบ T_{cc} ของ PLA ในคอมพอสิตที่มีแต่ WF เท่านั้น ซึ่งอาจเป็นเพราะอนุภาคของ WF ที่มีขนาดใหญ่ขัดขวางการจัดเรียงตัวของ PLA ในส่วนของ T_c พบว่า EVA ในไฮบริดคอมพอสิตมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่าพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA ประมาณ 5 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าการเติมสารตัวเติมต่างๆ ส่งผลให้ EVA สามารถเกิดผลึกได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม χ_c ของ EVA ในไฮบริดคอมพอสิตมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA เนื่องจากการจัดเรียงตัวของ EVA ถูกขัดขวางด้วยสารตัวเติมต่างๆ

4.4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิตได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.4 ในเทอมของอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_{onset}), อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (T_{max}), อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ($T_{end\ set}$) และปริมาณเถ้า (char) ที่เหลืออยู่

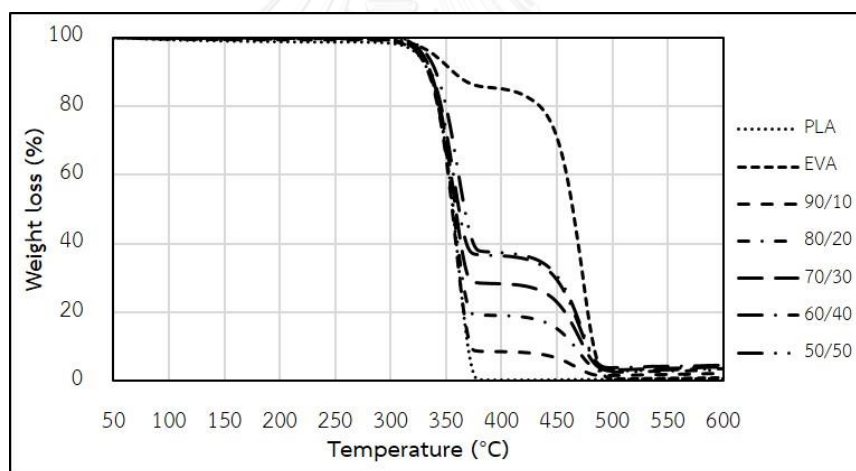
ตารางที่ 4.4 เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, EVA, WF, WT, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิตด้วยเทคนิค TGA

Sample	T_{onset} (°C)		T_{max} (°C)		T_{endset} (°C)		char (%)
PLA	329.8		360.1		380.0		0.3
EVA	313.3	438.2	351.2	473.1	381.0	495.4	0.7
WF	313.1	413.2	364.8	432.5	358.8	455.1	20.7
WT	-		-		-		98.8
PLA/EVA (wt%/wt%)							
90/10	328.7	431.2	358.7	466.9	377.6	490.8	1.8
80/20	326.5	432.0	356.9	468.9	375.8	493.1	2.7
70/30	325.7	432.8	356.6	469.9	375.4	493.9	3.3
60/40	323.8	432.6	356.7	469.7	375.6	494.1	4.0
50/50	328.7	434.8	360.9	471.9	381.6	496.1	3.3

ตารางที่ 4.5 เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, EVA, WF, WT, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริคมพอลิस्टด้วยเทคนิค TGA (ต่อ)

sample	T_{onset} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{endset} ($^{\circ}\text{C}$)	char (%)			
PLA/EVA/WF/WT (wt%/wt%/phr/phr)							
90/10/0/30	319.5	429.4	348.2	467.3	326.4	490.8	23.9
90/10/10/20	300.4	434.3	346.4	467.7	365.7	491.2	18.0
90/10/15/15	298.5	430.5	345.9	468.1	366.4	4919.4	15.7
90/10/20/10	298.3	428.6	345.0	467.7	366.7	491.7	13.4
90/10/30/0	315.7	431.9	348.0	468.8	367.8	492.6	7.2

รูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของ PLA, EVA, WF, WT, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต

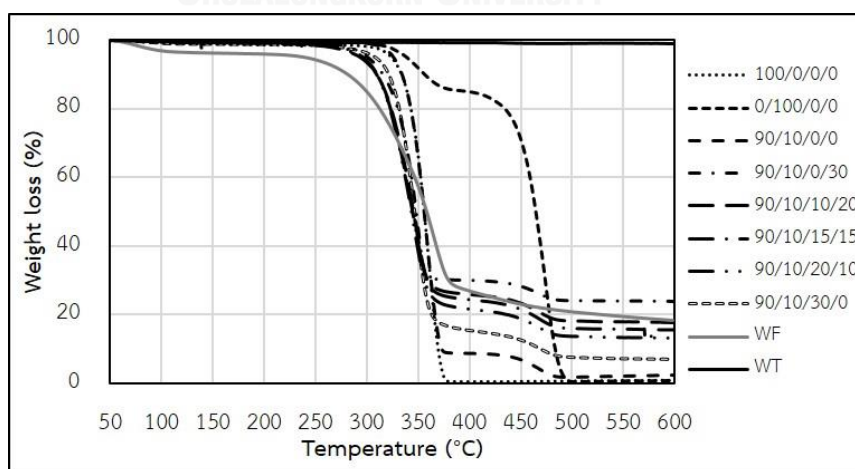


รูปที่ 4.15 TGA เทอร์โมแกรมของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA ในอัตราส่วน WF/WT ต่างๆ กัน

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.15 พบว่า PLA มีการสลายตัวขึ้นเดียวในช่วงอุณหภูมิ 329.8–380 องศาเซลเซียส โดยมี T_{max} ที่ 360 องศาเซลเซียส และมีการย่อยสลายได้เกือบทั้งหมด (ถ้า 0.3%) ขณะที่ EVA มีการสลายตัว 2 ชั้น โดยชั้นแรกอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 313.3–381.0 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวในส่วนของไวนิลแอสีเทตที่มี T_{max} เท่ากับ 351.2 องศาเซลเซียส และชั้นที่สองในช่วงอุณหภูมิ 438.2–495.4 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวในส่วนของเอทิลีนที่มี T_{max} เท่ากับ 473 องศาเซลเซียส โดยมีการย่อยสลายเกือบทั้งหมด (ถ้า 0.7%) และเมื่อผสม EVA เข้าไปใน PLA

พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีการสลายตัว 2 ชั้นเช่นเดียวกัน โดยอุณหภูมิเริ่มสลายตัวในชั้นแรกของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มลดลง 1.2–6.0 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับของ PLA ล้วน แต่ในทางกลับกันพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวในชั้นแรกเพิ่มขึ้น 10.5–15.4 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับ EVA ล้วน เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ EVA ในชั้นแรกซึ่งเป็นการสลายตัวของไวนิลเอซีเทตมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ PLA อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิเริ่มสลายตัวในชั้นที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มลดลง 3.4–7.0 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับของ EVA ล้วน ซึ่งเป็นส่วนการสลายตัวของเอทิลีนใน EVA ทั้งนี้อาจเนื่องจากความไม่เข้ากันและการมีแรงยึดเกาะของพอลิเมอร์ทั้งสองนั้นไม่ดี และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวในชั้นแรก พบว่า อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวในชั้นแรกของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มลดลง 2.0–5.6 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับของ EVA ล้วน ในขณะที่อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวในชั้นที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มลดลง 0.4–4.6 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับของ EVA ล้วน ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่าการใส่ EVA ใน PLA มีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการสลายตัวเร็วขึ้น หากแต่สิ้นสุดการสลายตัวช้าลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA ล้วน นอกจากนี้พบว่า T_{max} ของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนในชั้นแรกมีค่าลดลง 0.1–3.5 องศาเซลเซียส ในขณะที่ T_{max} ของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนในชั้นที่ 2 มีค่าลดลง 1.2–6.2 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ การใส่ EVA ใน PLA ยังเพิ่มปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนอีกด้วย

รูปที่ 4.16 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิตในช่วงอุณหภูมิ 50–200 องศาเซลเซียส



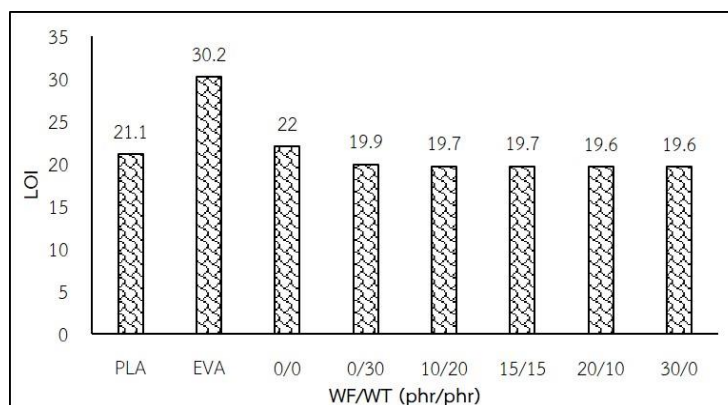
รูปที่ 4.16 TGA เทอร์โมแกรมของ WF, WT และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิตในอัตราส่วน WF/WT ต่างๆ กัน

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.16 พบว่า WF มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวที่ค่อนข้างกว้าง โดยมีการสลายตัว 2 ชั้น โดยในชั้นแรกพบการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 313.1–358.8 องศาเซลเซียส และการสลายตัวชั้นที่ 2 ในช่วงอุณหภูมิ 413.2–455.1 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส [20] และมี T_{max} ในการสลายตัวชั้นแรกที่ 364.8 องศาเซลเซียส และในการสลายตัวชั้นที่ 2 ที่ 432.5 องศาเซลเซียส ในขณะที่ WT ไม่เกิดการสลายตัวภายใต้ภาวะของการทดสอบ ซึ่งเมื่อเติม WF และ WT ในพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA พบว่า อุณหภูมิเริ่มสลายตัวชั้นแรกและชั้นที่ 2 ของไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วน มีแนวโน้มต่ำกว่าของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA ทั้งนี้เนื่องจาก การกระจายตัวของสารตัวเติมที่ไม่ดี การมีแรงยึดเกาะระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่ำ การมีโครงสร้างโครงข่ายของสารตัวเติม หรือการที่ WF มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวในชั้นแรกต่ำกว่าของ PLA และอุณหภูมิเริ่มสลายตัวในชั้นที่ 2 ต่ำกว่าของ EVA และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวในชั้นแรก พบว่า อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวในชั้นแรกของไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA ในขณะที่อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวในชั้นที่ 2 ของไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าที่เกิดขึ้นและ WT ในไฮบริดคอมพอสิตช่วยสกัดกั้นความร้อนที่ส่งเข้าไปยังพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวในชั้นที่ 2 สูงขึ้น นอกจากนี้ พบว่า T_{max} ของไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วนในการสลายตัวชั้นแรกมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA หากแต่ T_{max} ของไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วนในการสลายตัวชั้นที่ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA ก็ด้วยเหตุผลเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งปริมาณเถ้าของไฮบริดคอมพอสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น

4.5 สมบัติด้านการติดไฟ (Flammability)

4.5.1 ดรรชนีออกซิเจนจำกัด (Limited Oxygen Index, LOI)

รูปที่ 4.17 แสดงค่าดรรชนีออกซิเจนจำกัดของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต



รูปที่ 4.17 ธรรมชาติออกซิเจนจำกัดของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต

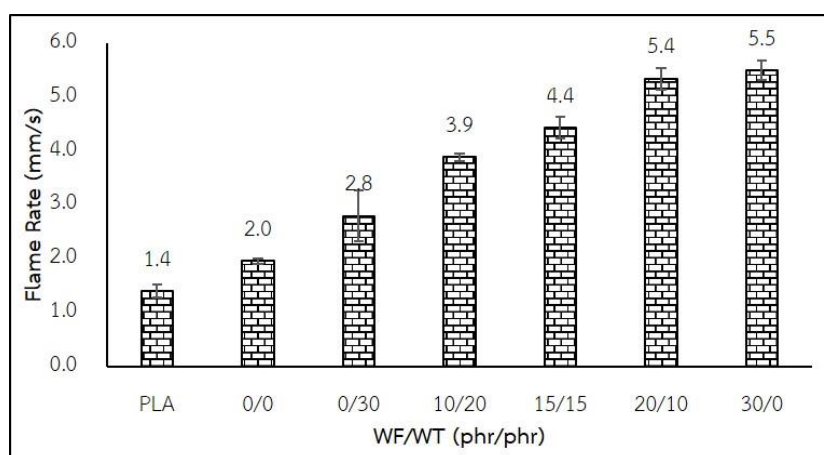


รูปที่ 4.18 ลักษณะชิ้นทดสอบภายหลังการทดสอบหาค่าธรรมชาติออกซิเจนจำกัดของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต

จากรูปที่ 4.17 พบว่า PLA มีค่าธรรมชาติออกซิเจนจำกัดเท่ากับ 21.1 ขณะที่ EVA ไม่สามารถติดไฟได้ในภาวะปกติ โดยมีค่าธรรมชาติออกซิเจนจำกัดสูงถึง 30.2 นอกจากนี้ พบว่า ธรรมชาติออกซิเจนจำกัดของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA มีค่ามากกว่าของ PLA ล้วนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ธรรมชาติออกซิเจนจำกัดของไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ และมีค่าต่ำกว่าของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการลอมหายด ดังรูปที่ 4.18 พบว่า ชิ้นทดสอบเมื่อติดไฟแล้วจะเกิดการลอมหายดลงมาตามทางยาว แต่เมื่อเพิ่มสารตัวเติมเข้าไป ไม่ว่าจะเป็น WF หรือ WT ลักษณะการลอมหายดนั้นสังเกตเห็นได้น้อยลงอย่างชัดเจนและแต่ละชิ้นงานไม่ได้มีการลอมหายดที่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากเกิดเถ้าคาร์บอนคลุมชิ้นทดสอบซึ่งป้องกันไม่ให้เกิดการลอมหายดของชิ้นทดสอบต่อไป

4.5.2 อัตราการลามไฟ (Flame rate)

รูปที่ 4.18 แสดงค่าอัตราการลามไฟของ PLA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ตามมาตรฐาน UL-94 โดยการทดสอบในแนวตั้ง (vertical burning test)



รูปที่ 4.19 อัตราการลามไฟของ PLA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA ที่อัตราส่วน 90/10 และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต

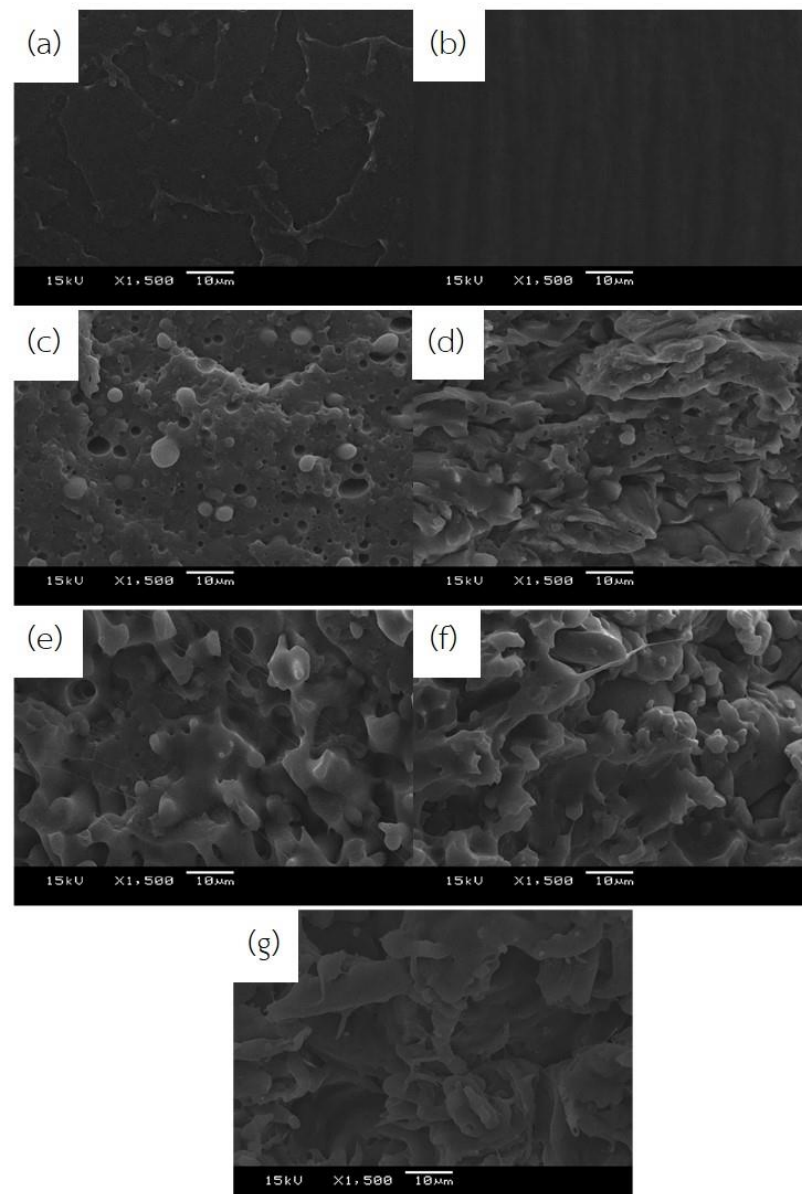
จากรูปที่ 4.18 พบว่า ชิ้นทดสอบทั้งหมดเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง และมีการหลอมหยด ดังนั้น จึงจัดอยู่ในเกณฑ์ V-2 ตามมาตรฐาน UL-94 ขณะที่ EVA ไม่สามารถติดไฟในภาวะของการทดสอบ จึงไม่สามารถหาค่าอัตราการลามไฟได้ นอกจากนี้ พบว่า PLA สามารถดับไฟได้เองในการจุดไฟครั้งแรก และเมื่อจุดไฟครั้งที่ 2 พบว่า การติดไฟจะลามไปจนสุดระยะการทดสอบที่ 100 มิลลิเมตร โดยมีอัตราการลามไฟเท่ากับ 1.4 มิลลิเมตร/วินาที และเมื่อเติม WF ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA พบว่า การลามไฟของไฮบริดคอมพอสิตเกิดเร็วขึ้นตามปริมาณ WF ที่ใส่เข้าไป เนื่องจาก WF ติดไฟได้ง่าย แต่เมื่อใส่ WT พบว่า ไฮบริดคอมพอสิตมีอัตราการลามไฟลดลง เนื่องจาก WT ทำให้เกิดเถ้าปกคลุมพื้นผิวของชิ้นทดสอบ จึงสามารถยับยั้งการลามไฟได้ หากแต่ยังมีอัตราการลามไฟเร็วกว่า PLA ล้วน เนื่องจากมีแรงยึดเกาะระหว่างเฟสของ WT และพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่ดีเกิดช่องว่างระหว่างเฟสที่ทำให้ออกซิเจนสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย จึงเป็นตัวช่วยทำให้เกิดการลุกติดไฟ

4.6 สัณฐานวิทยา (Morphology)

รูปที่ 4.19 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของ PLA, EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA 90/10 ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้กำลังขยาย 1500 เท่า

จากรูปที่ 4.19(a) พบว่า PLA มีพื้นผิวรอยแตกหักเนื่องจากจากแรงดึงที่ค่อนข้างเรียบ ซึ่งแสดงถึงวัสดุที่มีความแข็งแรงเปราะ ในขณะที่ EVA มีพื้นผิวรอยแตกหักจากแรงดึงเป็นริ้วๆ และคลื่นกระจายทั่วไปบนพื้นผิว ซึ่งแสดงถึงวัสดุที่มีความเหนียวและยืดหยุ่น และเมื่อเติม EVA ลงใน PLA ปริมาณ 10 wt% พบว่า มีแรงยึดเกาะระหว่าง PLA และ EVA ต่ำ จึงมองเห็นรูเล็กๆ ซึ่งเกิดจากการที่ EVA ถูกดึงออกจากเมทริกซ์ของ PLA กระจายอยู่ทั่วไป อย่างไรก็ตาม การมีอนุภาคที่ยืดหยุ่นขนาดเล็กของ EVA กระจายอยู่ในเมทริกซ์ที่แข็งของ PLA มีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนนี้มีความทนแรงกระแทกที่ดี ซึ่งต่างจากพอลิเมอร์ผสมอื่นๆ ที่มีปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.19(d-f)) โดยสามารถสังเกตเห็นการเกาะกลุ่มของ EVA ซึ่งทำให้เกิดรูหรือโพรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อถูกดึงออกมา และมีแนวโน้มเกิดการแยกเฟส (รูปที่ 4.19(g)) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลไม่ได้รับการปรับปรุง



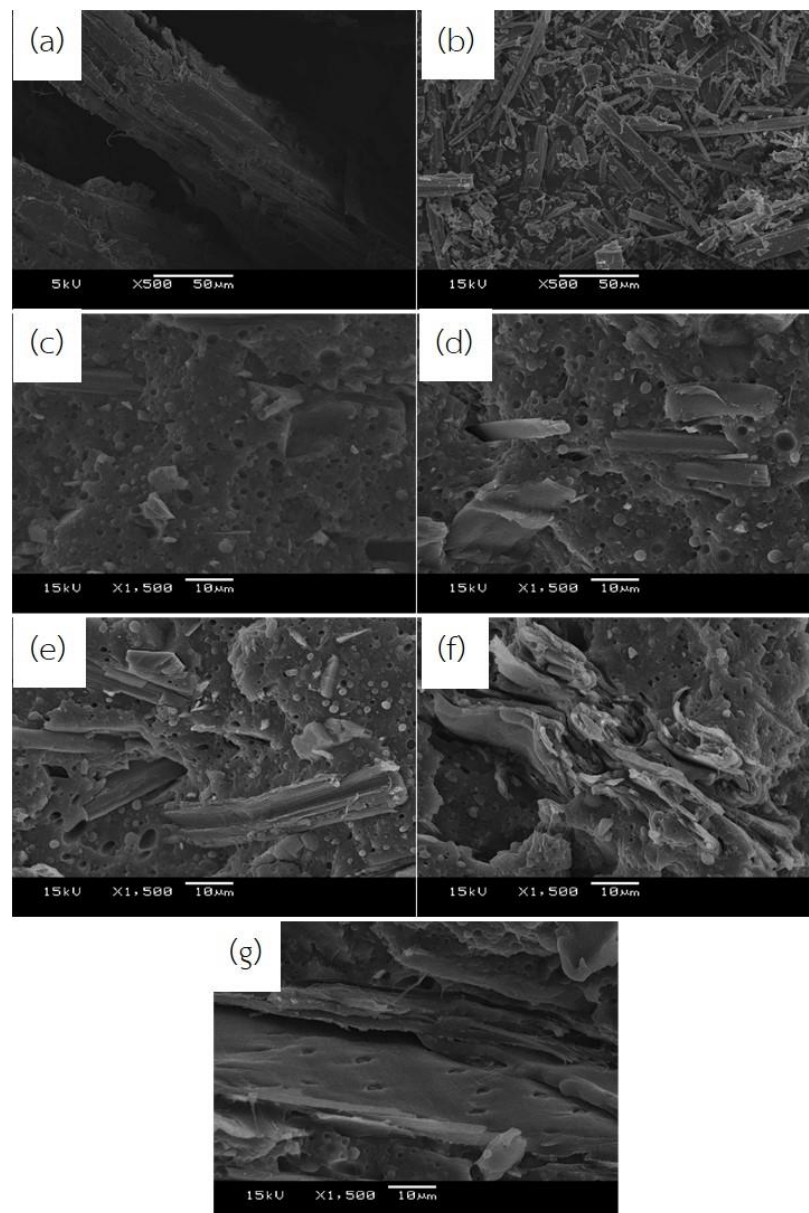


รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA, (b) EVA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA ที่อัตราส่วน (c) 90/10, (d) 80/20, (e) 70/30, (f) 60/40 และ (g) 50/50 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

รูปที่ 4.20 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของ WF, WT และ PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อได้ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้กำลังขยาย 1500 เท่า

จากรูปที่ 4.20(a) และ 4.20 (b) พบว่า WF และ WT มีลักษณะอนุภาคเป็นแท่งหรือเข็มที่มี aspect ratio สูงกว่าสารตัวเติมอนินทรีย์ทั่วไป โดยรูปที่ 4.20(c) เป็นคอมพอสิตที่ใส่เพียง WT อย่างเดียว ซึ่งยังสังเกตเห็นรูเล็กๆ ที่เกิดจากการที่ EVA ถูกดึงออกมา รวมทั้งมี WT บางส่วนที่ยื่นออกมา

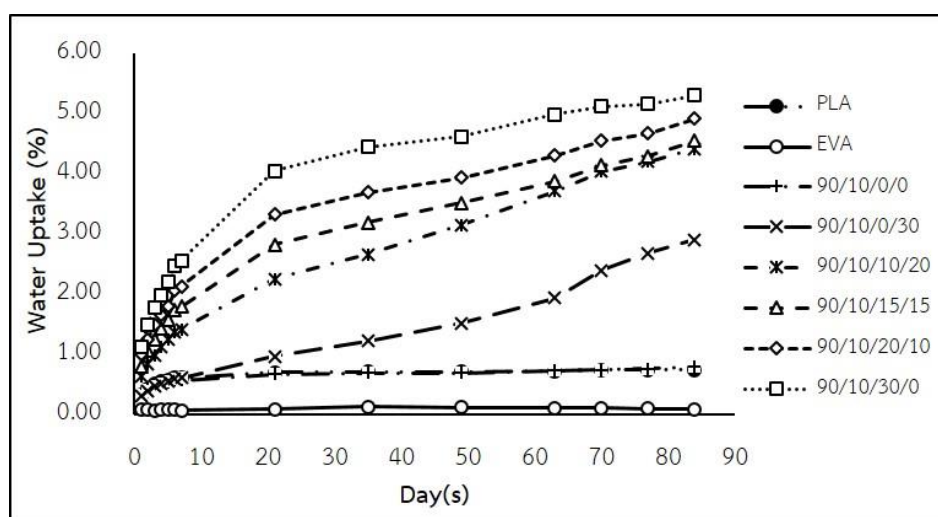
เมื่อได้รับแรงดึงและบางส่วนที่ฝังอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ผสม และเมื่อใส่ WF ในไฮบริดคอมพอสิต (รูปที่ 4.20(d-g)) จะสังเกตเห็นอนุภาคขนาดใหญ่ของ WF หลุดออกมา เนื่องจากการเกาะกลุ่มของอนุภาค WF ทำให้แรงยึดเกาะระหว่าง WF และพอลิเมอร์ผสมลดลง จึงสังเกตเห็นช่องว่างระหว่างรอยต่อของ WF และพอลิเมอร์ผสมได้อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลของไฮบริดคอมพอสิตที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของ (a) WF, (b) WT ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิตที่มี WF/WT เท่ากับ (c) 0/30, (d) 10/20, (e) 15/15, (f) 20/10 และ (g) 30/0 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

4.7 การดูดซึมน้ำ (Water Uptake)

รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%) และจำนวนวันที่ทำการทดสอบของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต



รูปที่ 4.22 การดูดซึมน้ำของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต

จากรูปที่ 4.21 พบว่า PLA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิตมีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 7 วันแรกของการทดสอบ และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราที่ลดลงตามจำนวนวันที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการดูดซึมน้ำเริ่มช้าลงและเข้าใกล้จุดอิ่มตัว ขณะที่ EVA มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงไม่ดูดซึมน้ำ ดังนั้น การเติม EVA ปริมาณ 10 wt% ใน PLA จึงไม่มีผลทำให้การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงไปมากนัก และมีค่าใกล้เคียงกับ PLA ล้วน อย่างไรก็ตาม ไฮบริดคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีปริมาณการดูดซึมน้ำสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA โดยเฉพาะไฮบริดคอมพอสิตที่มีปริมาณ WF สูง เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างรอยต่อของสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ รวมทั้งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่อยู่ในโมเลกุลของ WF เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำผ่านพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้ไฮบริดคอมพอสิตสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มการย่อยสลายทางชีวภาพของไฮบริดคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติม WF อีกด้วย เพราะเอนไซม์ของจุลินทรีย์สามารถเคลื่อนเข้าไปย่อยสลายพอลิเมอร์โดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลางได้มากขึ้น

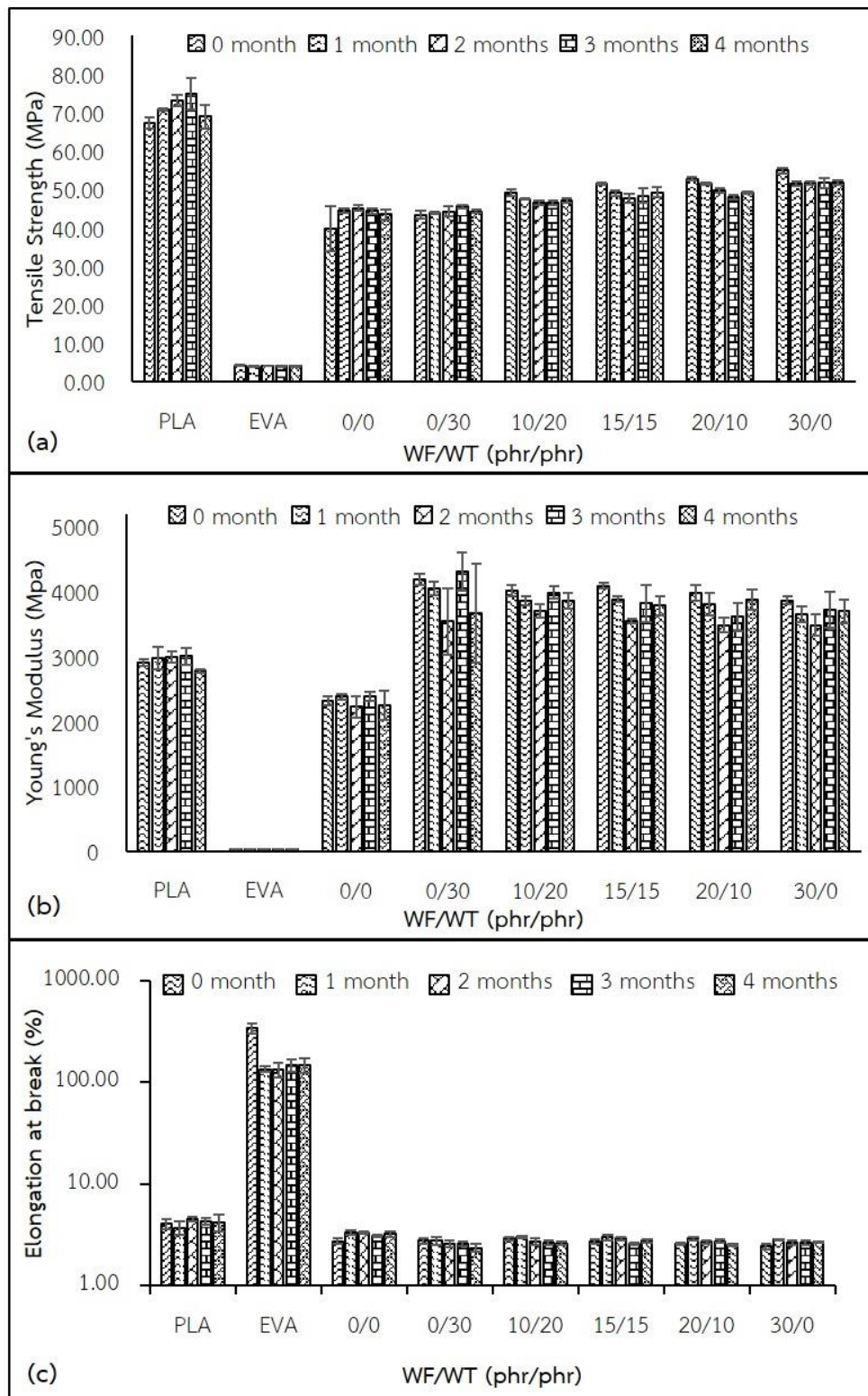
4.8 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability)

การศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการทดสอบโดยการฝังดินภายใต้สภาวะควบคุมทั้งอัตราส่วนผสมของดิน (ปุ๋ยคอก : ดิน เป็น 1 : 1) ระยะเวลาในการรดน้ำหน้าดิน ปริมาณน้ำที่ใส่รดในแต่ละครั้ง รวมถึง ความลึกของการฝังดิน

4.8.1 สมบัติด้านแรงดึงหลังฝังดิน

สมบัติด้านแรงดึง (ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์กับการยืดตัว ณ จุดขาด) ของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต หลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 วัน แสดงไว้ในรูปที่ 4.22

จากรูปที่ 4.22 พบว่า สมบัติด้านแรงดึงของชิ้นทดสอบทั้งหมดยังมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้ง PLA และ EVA ล้วน, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA หรือ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต ที่อัตราส่วนต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากการย่อยสลายทางชีวภาพจะเริ่มที่บริเวณพื้นผิวก่อน ดังนั้น ภายในชิ้นทดสอบจึงยังคงสภาพเดิมอยู่ในช่วงระยะเวลาของการทดสอบ ซึ่งการย่อยสลายทางชีวภาพที่พื้นผิวอาจตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อยืนยันการย่อยสลายทางชีวภาพที่เกิดขึ้น สำหรับการใส่ EVA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เข้าไปใน PLA อาจทำให้การย่อยสลายทางชีวภาพของชิ้นทดสอบเกิดได้ช้าลง นอกจากนี้ สารตัวเติมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น WF หรือ WT ยังฝังตัวอยู่ในชิ้นทดสอบ ดังนั้น จึงไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพมากนัก จนกว่าชิ้นทดสอบจะยอมให้เอนไซม์ของจุลินทรีย์เคลื่อนเข้าไปย่อยสลาย PLA และ WF ภายในชิ้นทดสอบผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ นอกจากนี้ PLA ยังเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีภายใต้สภาวะขยะ (compost) หากแต่จะย่อยสลายทางชีวภาพได้ไม่ดีภายใต้ภาวะปกติ

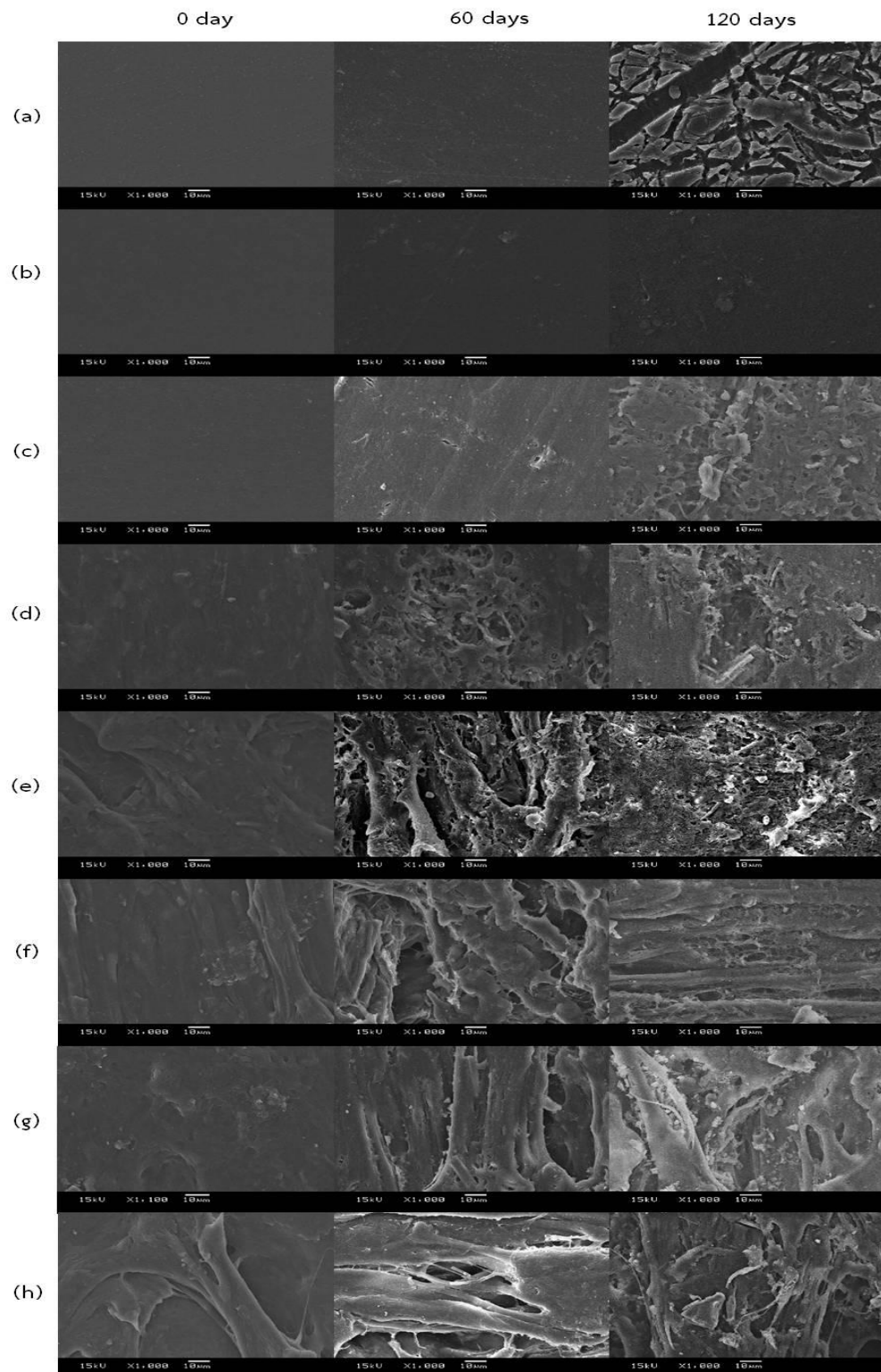


รูปที่ 4.23 สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยังส์มอดุลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิตภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 วัน

4.8.2 สันฐานวิทยาหลังฝังดิน

รูปที่ 4.23 แสดงสันฐานวิทยาบนพื้นผิวชั้นทดสอบของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิต ภายหลังฝังดินเป็นเวลา 0, 60 และ 120 วัน

จากรูปที่ 4.23 พบว่า ชั้นทดสอบทั้งหมดก่อนฝังดินมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ ซึ่งภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 60 วัน พบว่า พื้นผิวของ PLA (รูปที่ 4.19(a) คอลัมน์กลาง) และ EVA (รูปที่ 4.23(b) คอลัมน์กลาง) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือการย่อยสลายทางชีวภาพ อย่างไรก็ตาม ภายหลังฝังดินเป็นเวลา 120 วัน พบว่า พื้นผิวของ PLA ได้เกิดรอยแตกเป็นร่องเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไปอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.23(a) คอลัมน์ขวา) ซึ่งแสดงว่าบนพื้นผิวของ PLA ได้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ ขณะที่ไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของ EVA (รูปที่ 4.23(b) คอลัมน์ขวา) เนื่องจาก EVA เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้และยังมีความไม่ชอบน้ำอีกด้วย ซึ่งเมื่อเติม EVA ปริมาณ 10 wt% ใน PLA พบว่า มีหลุมเล็กๆ บนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 4.23(c) คอลัมน์กลาง) ภายหลังฝังดินเป็นเวลา 60 วัน แต่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนมากขึ้นภายหลังฝังดินเป็นเวลา 120 วัน (รูปที่ 4.23(c) คอลัมน์ขวา) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของ PLA ในพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม การใส่ WF และ WT ในไฮบริดคอมพอสิตมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวอย่างเห็นได้ชัด โดยจะสังเกตเห็นการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยเกิดเป็นโพรงลึกเข้าไปในชั้นทดสอบกว้างขึ้นตามปริมาณของ WF และระยะเวลาของการฝังดินที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.23(e-h)) เมื่อเปรียบเทียบกับที่ใส่แต่ WT เท่านั้น (รูปที่ 4.23(d) ทั้งนี้เนื่องด้วยเหตุผลเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA, (b) EVA, (c) พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA ไฮบริดคอมพอสิตที่มีอัตราส่วน WF/WT เป็น (d) 0/30, (e) 10/20, (f) 15/15, (g) 20/10 และ (h) 30/0 ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 0, 60 และ 120 วัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของ PLA ด้วยการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด และ เอทิลีนไวนิลแอซีเตต (PLA/EVA) และคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด เอทิลีนไวนิลแอซีเตต ผงไม้ (WF) และ โพลลาสโทไนต์ (WT) (PLA/EVA/WF/WT) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบหาค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA มีค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มมากขึ้น เมื่อเติมปริมาณ EVA เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเติม WF และ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA พบว่า MFI น้อยที่สุด หรือ มีความหนืดมากที่สุด เอทิลีนไวนิลแอซีเตต (EVA) มีค่าดัชนีการหลอมไหลมากที่สุด หรือ ก็คือมีความหนืดน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาถึง พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA พบว่า คอมพอสิตมีดัชนีการหลอมไหลที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม และมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นการเติม WT ที่ปริมาณ 30 phr (0/30 WF/WT) มีดัชนีการหลอมไหลลดลง

5.1.2 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทก แรงดึง และแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA พบว่า การเติม EVA ลงใน PLA ทำให้ความเค้นแรงดึง ยังสัมพันธ์ การยืดตัว ณ จุดขาด ความเค้นแรงดัดโค้ง และ โมดูลัสแรงดัดโค้ง ลดลง แต่สมบัติด้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีสมบัติด้านทานแรงกระแทก และ สมบัติด้านทานแรงดึงสูงที่สุด จึงนำไปเตรียมเป็นไฮบริดคอมพอสิตกับ WF และ WT ที่อัตราส่วนต่างๆ (0/30, 10/20, 15/15, 20/10 และ 30/0 phr/phr)

5.1.3 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทก แรงดึง และแรงดัดโค้งของคอมพอสิต PLA/EVA/WF/WT พบว่า การเติม WF และ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA ทำให้สมบัติด้านทานแรงดึง ยังสัมพันธ์ การยืดตัว ณ จุดขาด และ ความเค้นแรงดัดโค้ง เพิ่มขึ้น หากแต่สมบัติด้านทานแรงกระแทก มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA อย่างไรก็ตาม คอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าสมบัติด้านทานแรงกระแทก ยังสัมพันธ์ และ โมดูลัสแรงดัดโค้ง ที่สูงกว่า PLA โดยพบว่า ไฮบริดคอมพอสิตที่มีอัตราส่วนของ WF ต่อ WT เป็น 10/20 มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

5.1.4 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า การเติม EVA ลงใน PLA ทำให้ระดับการเกิดผลึกของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมลดลง และเมื่อใส่สารตัวเติม WF และ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA พบว่า ระดับการเกิดผลึกของ EVA ในคอมพอสิตมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม ส่วน PLA นั้นไม่สามารถวัดปริมาณผลึกที่ชัดเจนได้

5.1.5 จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่า การเติม EVA ลงใน PLA ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณ EVA ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อใส่สารตัวเติม WF และ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตมีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสที่ไม่ดีของสารตัวเติมและเมทริกซ์พอลิเมอร์

5.1.6 จากการศึกษาหาค่าดรรชนีออกซิเจนจำกัด พบว่า EVA ไม่เกิดการติดไฟที่สภาวะปกติ (ออกซิเจน 21 wt%) ขณะที่ PLA นั้นสามารถติดไฟได้และสามารถดับได้เองในสภาวะปกติ การเติม EVA ลงใน PLA ทำให้ค่าดรรชนีออกซิเจนจำกัดลดลง และเมื่อใส่สารตัวเติม WF และ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA พบว่า ดรรชนีออกซิเจนจำกัดของคอมพอสิตมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และลดลงตามปริมาณ WF ที่เพิ่มขึ้น

5.1.7 จากการศึกษาการลามไฟ พบว่า การเติม EVA ลงใน PLA ทำให้อัตราการลามไฟเพิ่มขึ้น และเมื่อใส่สารตัวเติม WF และ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA พบว่า อัตราการลามไฟของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และเพิ่มขึ้นตามปริมาณ WF ที่เพิ่มขึ้น

5.1.8 จากการศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ พบว่า PLA และ EVA มีการดูดซึมน้ำที่ค่อนข้างต่ำ โดย PLA สูงกว่า EVA เล็กน้อย และเมื่อเติม EVA ลงใน PLA ปริมาณ 10 wt% พบว่า มีการดูดซึมน้ำสูงขึ้น และเมื่อใส่สารตัวเติม WF และ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA พบว่า การดูดซึมน้ำของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และเพิ่มขึ้นตามปริมาณ WF ที่เพิ่มขึ้น

5.1.9 จากการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่า PLA, พอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต สามารถเกิดการย่อยสลายได้ในสภาวะการทดสอบ และสามารถย่อยสลายได้เร็วขึ้น ตามปริมาณ WF ที่เพิ่มขึ้น หากแต่ EVA ไม่สามารถเกิดการย่อยสลายได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการใช้สารช่วยผสม (compatibilizer) ระหว่าง PLA และ EVA เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

2. ศึกษาการดัดแปรผิวของ WF และ WT ด้วยสารควบคู่ (coupling agent) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์

3. ศึกษาการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะควบคุมที่สามารถวัดปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจริงในการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวัดอัตราการย่อยสลายได้โดยตรง

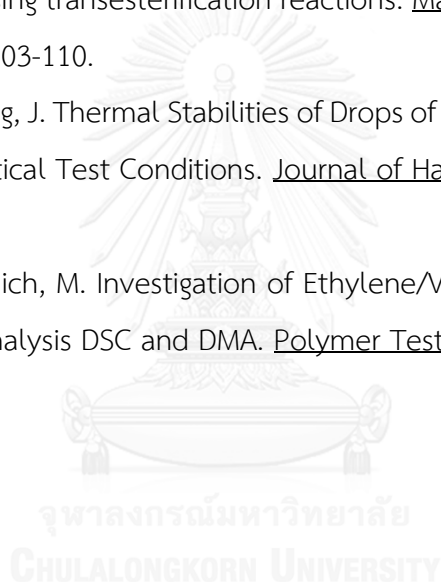


รายการอ้างอิง

1. Gupta, B., Revagade, N., Hilborn, J. Poly(lactic acid) fiber: An overview. Progress in Polymer Science. 2007; 32(4): 455-482.
2. Csizmadia, R., Faludi, G., Renner, K., Móczó, J., Pukánszky, B. PLA/wood biocomposites: Improving Composite Strength by Chemical Treatment of the Fibers. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2013; 53: 46-53.
3. Chuayjuljit, S., Wongwaiwattanukul, C., Chaiwutthinan, P., Prasassarakich, P. Biodegradable Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Succinate)/Wood Flour Composites. Physical and Morphological Properties. [2016, June 1]. Available from: <http://dx.doi.org/10.1002/pc.23886>.
4. Oksman, K., Skrifvars, M., Selin, J.F. Natural Fibres as Reinforcement in Poly(lactic Acid); (PLA) composites. Composites Science and Technology. 2003; 63(9): 1317-1324.
5. Marais, S., Bureau, E., Gouanvé, F., Ben, Salem, E., Hirata, Y., Andrio, A., et al. Transport of Water and Gases through EVA/PVC Blend Films—Permeation and DSC Investigations. Polymer Testing. 2004; 23(4): 475-486.
6. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. คู่มือจัดการสารเคมีอันตรายสูงไวไฟอะซิเตตมอนอเมอร์ (Vinyl Acetate Monomer). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2551.
7. Drabczyk, K., Panek, P., A Comparative Study of EVA with and without Thermal History for Different Lamination Process Parameters. Materials Science and Engineering: B. 2012; 177(15): 1378-1383.
8. Kröhnke, C., Edenbaum, J., Reinhold, V.N. Plastics Additives and Modifiers Handbook. Advanced Materials. 1992; 4(9): 11-13.
9. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. [2016, June 23]. Available from: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/bio_de_plas.html.
10. Funabashi, M., Ninomiya, F., Kunioka, M. Biodegradability Evaluation of Polymers by ISO 14855-2. International Journal of Molecular Sciences. 2009; 10(8): 3635-3654.

11. Gwon, J.G., Lee, S.Y., Chun, S.J., Doh, G.H., Kim, J.H. Physical and Mechanical Properties of Wood–Plastic Composites Hybridized with Inorganic Fillers. Journal of Composite Materials. 2012; 46(3): 301-309.
12. Clemons, C.M., Caulfield, D.F. Wood Flour. Functional Fillers for Plastics. New York: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2005. p. 249-270.
13. Vanderbilt. Mineral Technical Data. [2016, June 2]. Available from: http://www.vanderbiltminerals.com/product_categories/product_listing/category/paint-and-coatings-products-vansil-wollastonites.
14. Xanthos M. Wollastonite. Functional Fillers for Plastics. New York: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2005. p. 241-247.
15. Liang, J.Z., Li, B., Ruan, J.Q. Crystallization Properties and Thermal Stability of Polypropylene Composites Filled with Wollastonite. Polymer Testing. 2015; 42(0): 185-191.
16. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. คอมพอสิตคืออะไร. [2016, June 3]. Available from: <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/79->.
17. Matta, A.K., Rao, R.U., Suman, K.N.S., Rambabu, V. Preparation and Characterization of Biodegradable PLA/PCL Polymeric Blends. Procedia Materials Science. 2014; 6: 1266-1270.
18. Van, C.D, Hoang, T., Giang, N.V., Ha, N.T., Lam, T.D., Sumita, M. A Novel Enzymatic Biodegradable Route for PLA/EVA Blends Under Agricultural Soil of Vietnam. Materials Science and Engineering: C. 2012; 32(3): 558-563.
19. Ma, P., Hristova-Bogaerds, D.G., Goossens, J.G.P., Spoelstra, A.B., Zhang, Y., Lemstra, P.J. Toughening of Poly(Lactic Acid) by Ethylene-co-Vinyl Acetate Copolymer with Different Vinyl Acetate Contents. European Polymer Journal. 2012; 48(1): 146-154.
20. Liu, R., Peng, Y., Cao, J., Chen, Y. Comparison on Properties of Lignocellulosic Flour/Polymer Composites by Using Wood, Cellulose, and Lignin Flours as Fillers. Composites Science and Technology. 2014; 103(0): 1-7.
21. Petinakis, E., Yu, L., Edward, G., Dean, K., Liu, H., 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. 2009; 17(2): 83-94.
22. Saravari, O., Waipunya, H., Chuayjuljit, S. Effects of Ethylene Octene Copolymer and Ultrafine Wollastonite on the Properties and Morphology of Polypropylene-Based Composites. Journal of Elastomers and Plastics. 2014; 46(2): 175-186.
23. Risbud, M., Nabi, S.D., Jog, J., Bhonde, R. Preparation, Characterization and In Vitro Biocompatibility Evaluation of Poly(Butylene Terephthalate)/Wollastonite Composites. Biomaterials. 2001; 22(12): 1591-1597.
24. Moura, I., Nogueira, R., Bounor-Legare, V., Machado, A.V. Synthesis of EVA-g-PLA copolymers using transesterification reactions. Materials Chemistry and Physics. 2012; 134(1): 103-110.
25. Wang, Y., Zhang, J. Thermal Stabilities of Drops of Burning Thermoplastics Under the UL 94 Vertical Test Conditions. Journal of Hazardous Materials. 2013; 246-247: 103-109.
26. Stark, W., Jaunich, M. Investigation of Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer (EVA) by Thermal Analysis DSC and DMA. Polymer Testing. 2011; 30(2): 236-42.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
 ตรีชนีการหลอมไหล

ตารางที่ ก-1 ตรีชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA

ชิ้นงาน	ตรีชนีการหลอมไหล (กรัม/10นาทิจ)
PLA	6.50
	6.35
	4.85
ค่าเฉลี่ย	5.90
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.91
90/10	6.00
	6.01
	5.86
ค่าเฉลี่ย	5.96
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.08
80/20	12.31
	11.55
	11.50
ค่าเฉลี่ย	11.79
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.45
70/30	29.51
	29.72
	31.63
ค่าเฉลี่ย	30.29
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.17

ตารางที่ ก-1 ดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA (ต่อ)

PLA/ EVA	ดรรชนีการหลอมไหล (กรัม/10นาที)
60/40	75.34
	73.98
	73.42
ค่าเฉลี่ย	74.25
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.99
50/50	90.72
	86.43
	89.90
ค่าเฉลี่ย	89.02
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.28
EVA	601.91
	607.42
	597.12
ค่าเฉลี่ย	602.15
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	5.16

ตารางที่ ก-2 ดรรชนีการหลอมไหลของ 90/10 PLA/EVA คอมพอลิสมืออัตราส่วน WF/WT ต่างกัน

PLA/EVA/WF/WT	ดรรชนีการหลอมไหล (กรัม/10นาทึ)
0/30	12.15
	11.33
	12.17
ค่าเฉลี่ย	11.88
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.48
10/20	22.25
	21.77
	20.22
ค่าเฉลี่ย	21.41
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.06
15/15	16.12
	15.03
	13.49
ค่าเฉลี่ย	14.88
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.33
20/10	10.07
	9.96
	9.31
ค่าเฉลี่ย	9.78
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.41
30/0	8.64
	7.59
	6.27
ค่าเฉลี่ย	7.50
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.19

ภาคผนวก ข

สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ข-1 สมบัติเชิงกลของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA

Sample	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
PLA	2.48	68.45	2999	3.87	99.53	3631
	2.23	65.46	2912	3.67	97.69	3537
	2.97	66.97	2930	3.82	100.73	3636
	2.35	65.50	2890	3.46	101.89	3603
	2.23	66.94	2855	4.22	102.60	3764
	3.19	68.28	2844	4.54	-	-
	3.20	69.12	2950	4.78	-	-
ค่าเฉลี่ย	2.67	67.25	2912	4.05	100.49	3634
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.44	1.44	54.32	0.48	1.95	82.59
EVA	11.28	4.19	30	322.75	1.40	30.80
	11.13	3.94	29	258.70	1.43	29.66
	13.27	4.21	29	358.61	1.39	29.45
	13.35	4.31	29	362.75	1.40	30.14
	13.59	4.29	28	355.07	1.39	29.98
	10.37	4.35	29	395.98	-	-
	10.08	4.21	28	341.96	-	-
ค่าเฉลี่ย	11.87	4.21	29	342.26	1.40	30
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	1.50	0.13	0.74	43.01	0.02	0.52

ตารางที่ ข-2 สมบัติเชิงกลของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA (ต่อ)

PLA/EVA	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
90/10	6.07	44.54	2388	2.97	49.45	2643
	6.73	44.13	2417	2.79	53.71	2713
	5.09	41.88	2272	2.79	55.89	2824
	6.21	43.02	2304	2.80	54.97	2732
	5.34	42.76	2331	2.73	56.83	2786
	5.51	32.97	2281	2.38	-	-
	6.19	30.06	2228	2.76	-	-
ค่าเฉลี่ย	5.88	39.91	2317	2.75	54.17	2740
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.58	5.86	66.59	0.18	2.88	69.48
80/20	4.14	28.54	1885	3.47	37.74	2164
	4.10	28.63	1772	3.72	36.67	2094
	4.05	28.67	1782	3.62	37.12	2041
	3.80	29.10	1859	3.50	36.52	2962
	5.01	28.48	1772	3.40	35.23	2059
	4.72	28.33	1814	3.39	-	-
	5.30	28.56	1782	3.19	-	-
ค่าเฉลี่ย	4.45	28.62	1809	3.47	36.66	2264
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.56	0.24	45.68	0.17	0.93	392.80

ตารางที่ ข-3 สมบัติเชิงกลของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA (ต่อ)

PLA/EVA	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
70/30	2.22	16.02	1273	2.67	20.97	1385
	2.55	15.77	1241	2.37	21.34	1480
	2.29	15.92	1276	2.62	21.93	1458
	2.20	15.22	1227	2.44	20.77	1458
	2.38	15.39	1166	2.45	21.77	1412
	2.27	14.69	1201	2.58	-	-
	2.57	15.40	1244	2.65	-	-
ค่าเฉลี่ย	2.35	15.49	1233	2.54	21.36	1439
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.15	0.46	39.25	0.12	0.50	38.76
60/40	2.68	8.56	744	2.75	13.15	922
	2.65	8.96	786	2.17	11.66	829
	2.40	8.51	744	2.22	11.74	819
	2.69	9.37	781	2.29	11.67	810
	2.21	8.30	740	2.46	12.30	882
	2.22	8.72	732	2.30	-	-
	2.31	8.85	758	2.25	-	-
ค่าเฉลี่ย	2.45	8.75	755	2.35	12.10	852
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.22	0.35	20.80	0.20	0.64	48.11

ตารางที่ ข-4 สมบัติเชิงกลของ PLA, EVA, พอลิเมอร์ผสม PLA/EVA (ต่อ)

PLA/EVA	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
50/50	2.44	7.01	518	2.89	10.74	639
	2.57	6.87	520	2.60	10.66	620
	2.65	6.64	503	2.83	10.66	617
	2.73	6.65	530	2.60	10.30	628
	2.98	6.84	520	2.46	10.49	612
	2.77	6.55	517	2.74	-	-
	2.84	6.87	518	2.66	-	-
ค่าเฉลี่ย	2.71	6.78	518	2.68	10.57	623
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.18	0.16	7.88	0.15	0.18	10.63

ตารางที่ ข-5 สมบัติเชิงกลของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT ต่างกัน

WT/WF	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
0/30	3.79	44.16	4,103	2.93	67.53	5,689
	3.67	42.90	4,273	2.86	67.26	5,453
	3.84	42.84	4,322	2.60	66.03	5,410
	3.69	42.84	4,163	2.54	65.40	5,531
	3.80	43.94	4,160	2.74	64.84	5,342
	3.74	44.96	4,096	2.95	-	-
	3.69	42.41	4,171	2.71	-	-
ค่าเฉลี่ย	3.75	43.44	4184.00	2.76	66.21	5,485
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.07	0.93	84.12	0.16	1.16	133

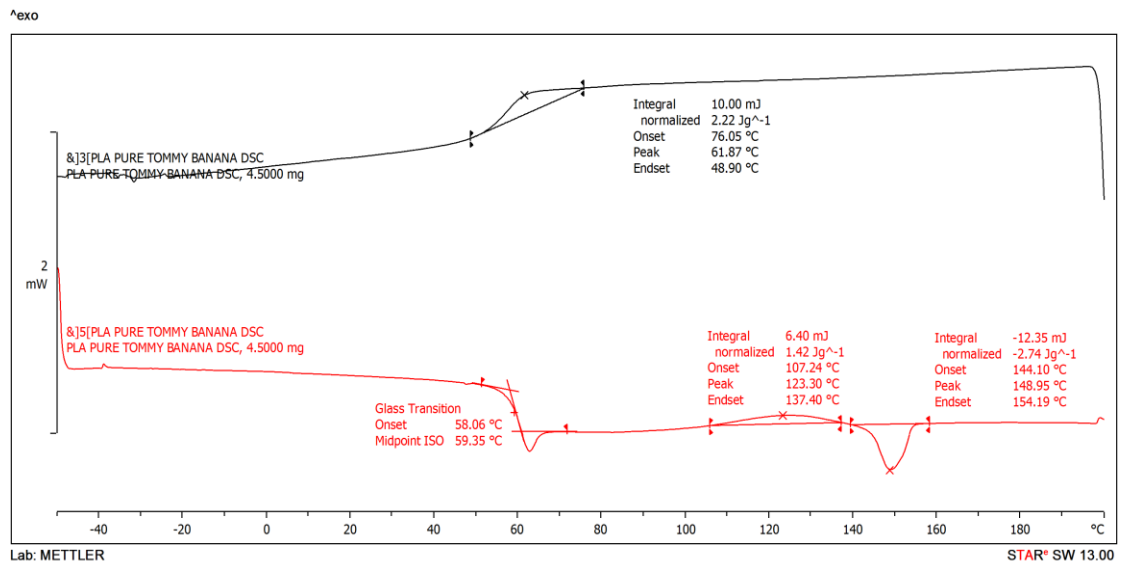
ตารางที่ ข-6 สมบัติเชิงกลของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT ต่างกัน

WF/WT	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
10/20	3.18	48.32	3,928	2.93	74.04	4,884
	3.28	50.16	4,162	2.94	72.59	4,972
	3.18	49.59	4,055	2.78	73.93	5,134
	3.22	50.00	3,930	2.82	75.54	5,207
	3.08	48.64	4,009	2.83	73.99	5,104
	3.25	49.23	4,046	2.96	-	-
	3.02	48.16	3,957	2.98	-	-
ค่าเฉลี่ย	3.17	49.16	4012.43	2.89	74.02	5,060
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.09	0.80	83.98	0.08	1.04	130
15/15	3.13	51.26	4,102	2.62	76.57	5,168
	3.11	51.90	4,173	2.79	78.20	5,217
	2.78	51.49	4,089	2.66	78.59	5,240
	2.98	51.81	4,074	2.69	77.56	5,156
	2.87	51.25	4,019	2.86	77.49	5,125
	2.92	51.38	4,073	2.83	-	-
	2.94	51.75	4,108	2.44	-	-
ค่าเฉลี่ย	2.96	51.55	4091.14	2.70	77.68	5,181
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.12	0.27	46.43	0.15	0.77	47

ตารางที่ ข-7 สมบัติเชิงกลของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT ต่างกัน

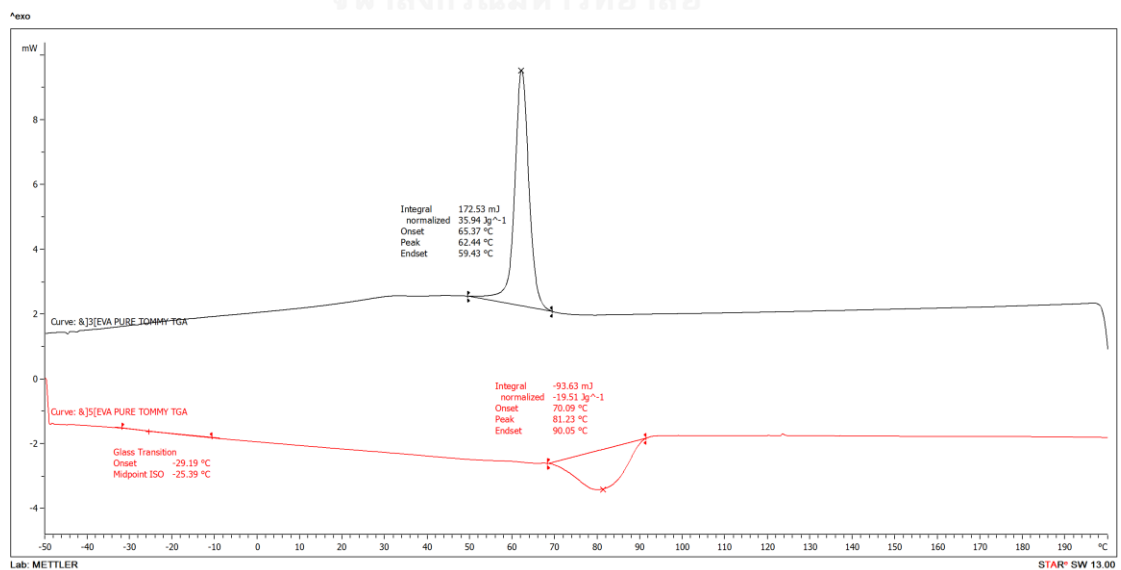
WF/WT	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
20/10	3.07	53.30	4,071	2.58	79.93	5,070
	2.90	53.57	4,094	2.63	80.57	5,333
	3.05	52.28	3,804	2.53	79.33	5,080
	2.39	52.23	4,113	2.64	78.54	4,974
	3.03	52.89	4,016	2.55	79.91	5,178
	2.85	52.59	3,909	2.52	-	-
	2.87	52.45	3,842	2.46	-	-
ค่าเฉลี่ย	2.88	52.76	3978.43	2.56	79.66	5,127
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.24	0.52	126.03	0.06	0.76	136
30/0	2.56	53.54	3,844	2.49	79.07	5,121
	2.64	54.93	3,894	2.42	79.54	5,122
	2.59	55.32	3,901	2.63	82.02	5,226
	2.72	54.88	3,792	2.44	81.51	5,179
	2.66	55.64	3,964	2.23	80.98	5,232
	2.55	54.49	3,830	2.21	-	-
	2.69	55.51	3,840	2.56	-	-
ค่าเฉลี่ย	2.63	54.90	3866.43	2.43	80.62	5,176
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.06	0.72	57.07	0.16	1.27	54

ภาคผนวก ค
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC

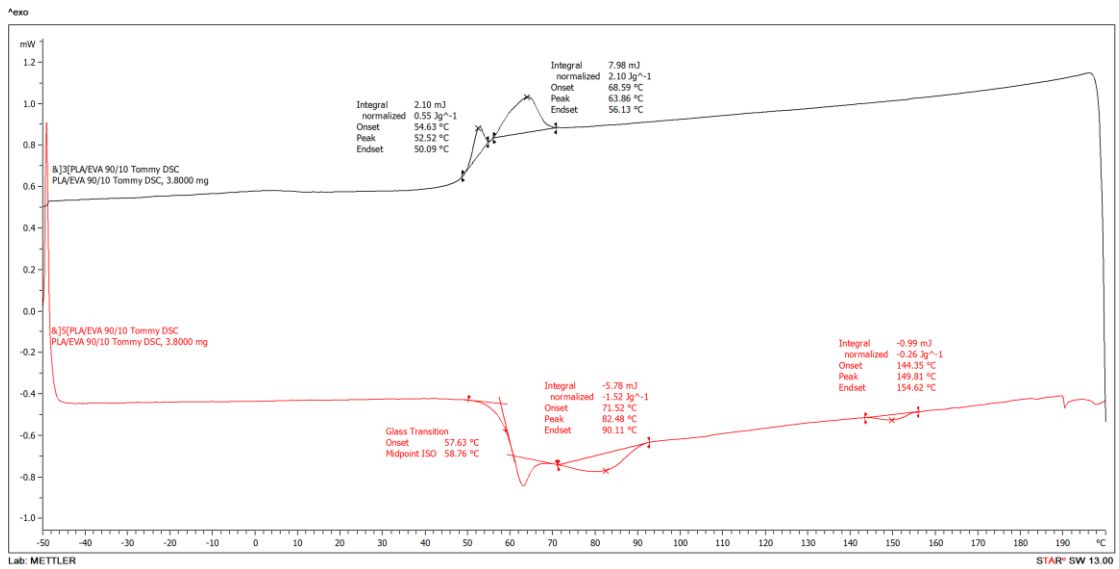


รูปที่ ค-1 DSC เทอร์โมแกรมของ PLA

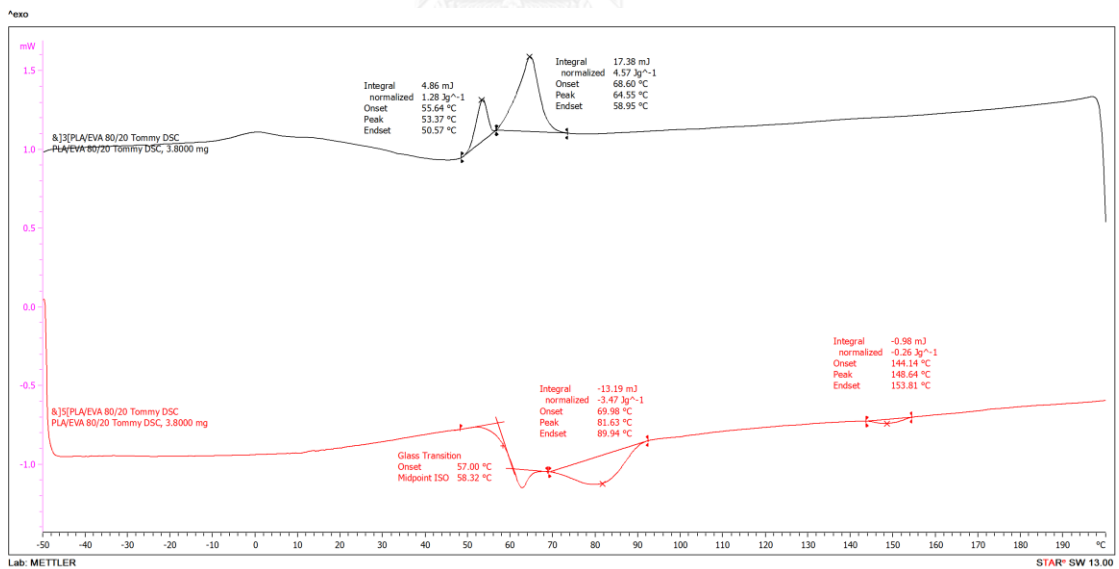
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



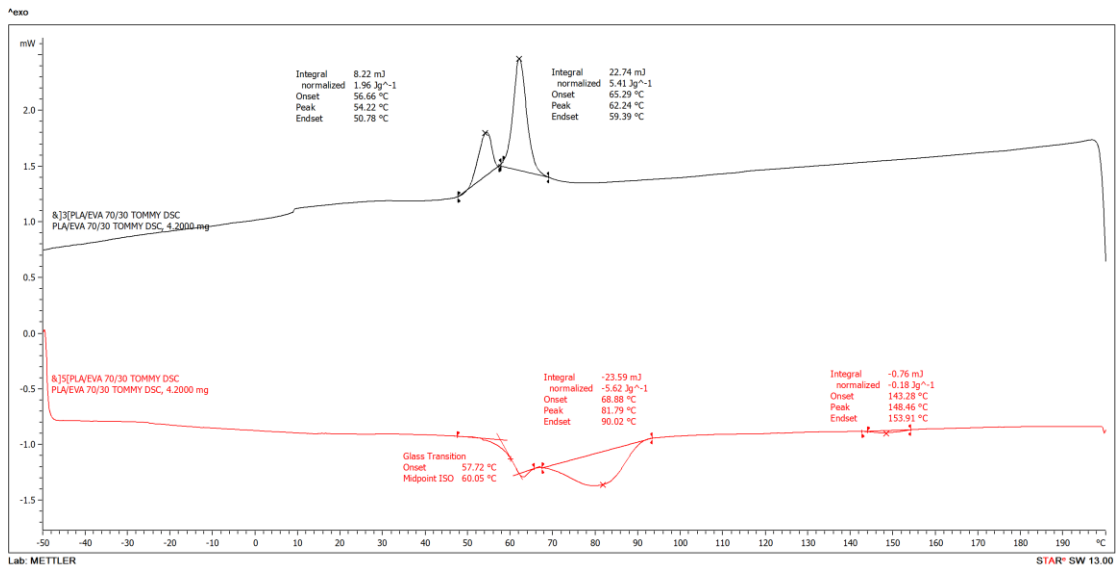
รูปที่ ค-2 DSC เทอร์โมแกรมของ EVA



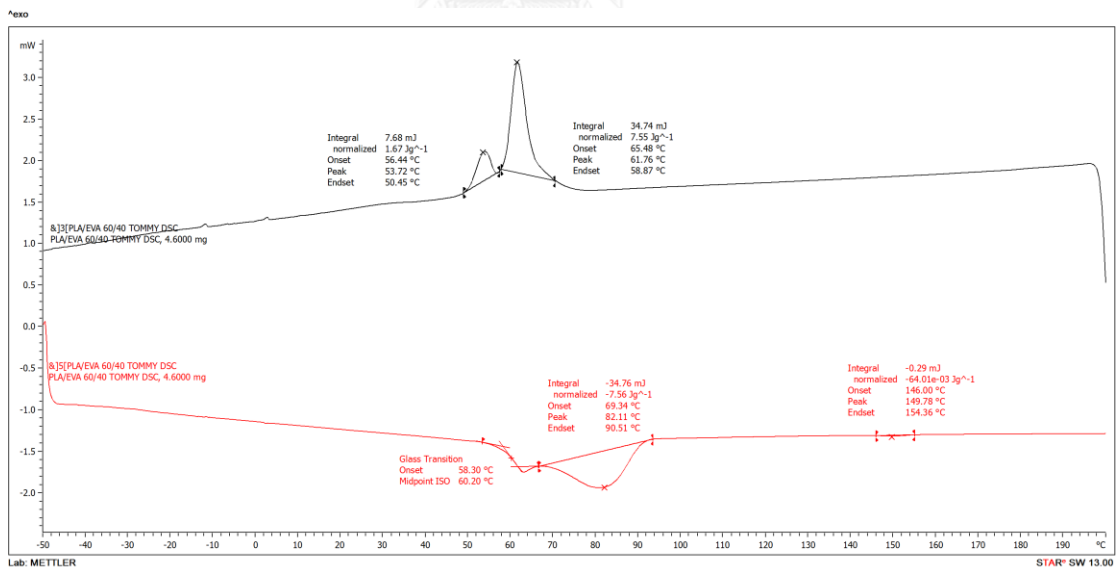
รูปที่ ค-3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA



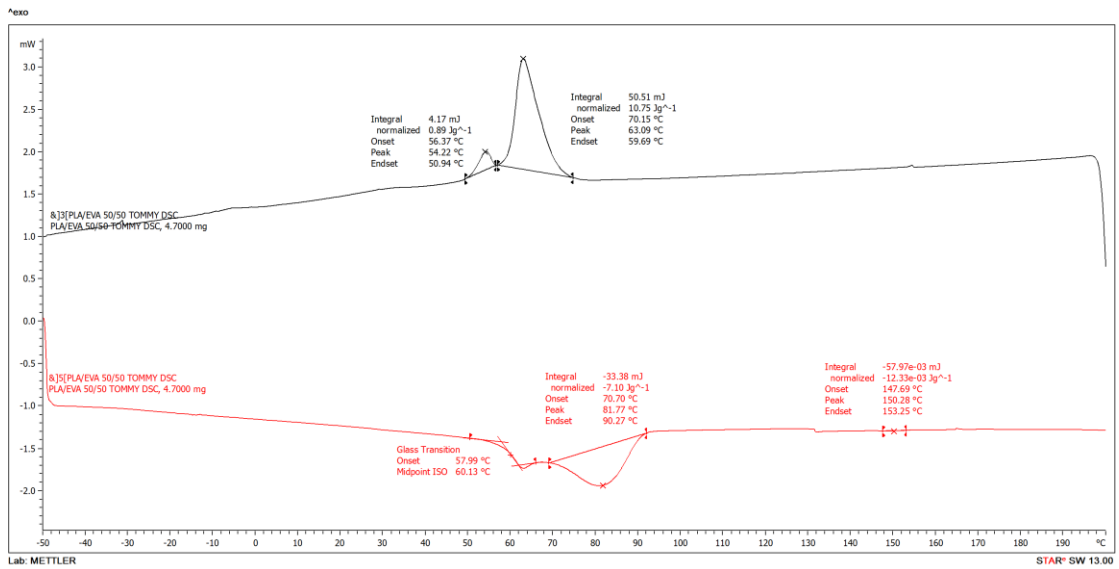
รูปที่ ค-4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 80/20 PLA/EVA



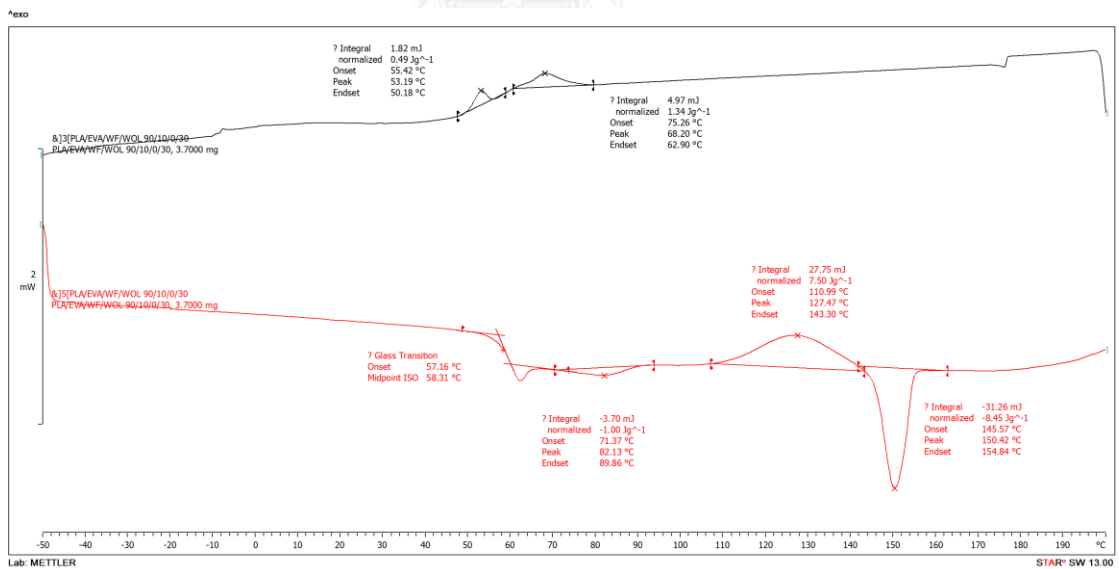
รูปที่ ค-5 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/EVA



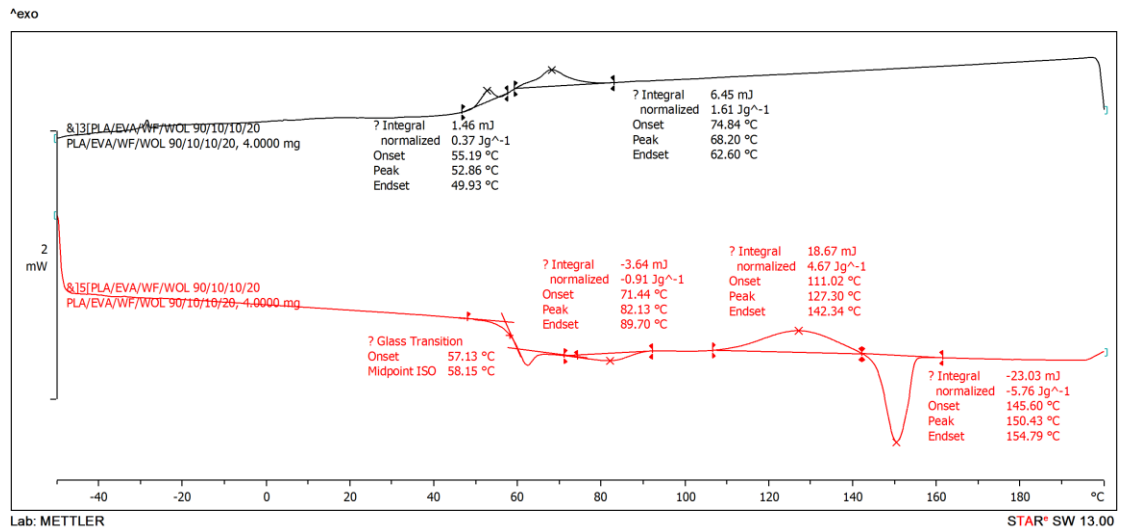
รูปที่ ค-6 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 60/40 PLA/EVA



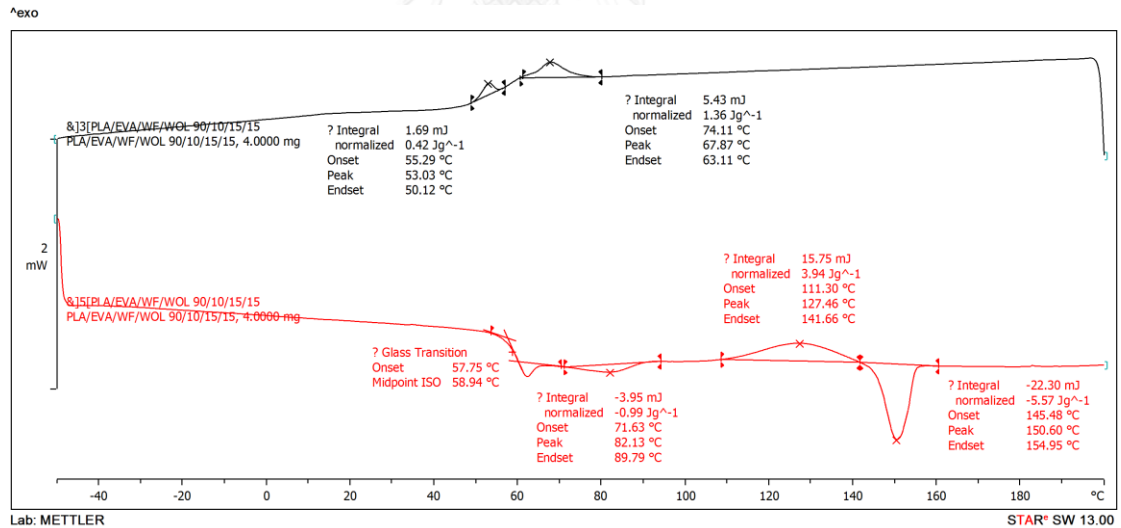
รูปที่ ค-7 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 50/50 PLA/EVA



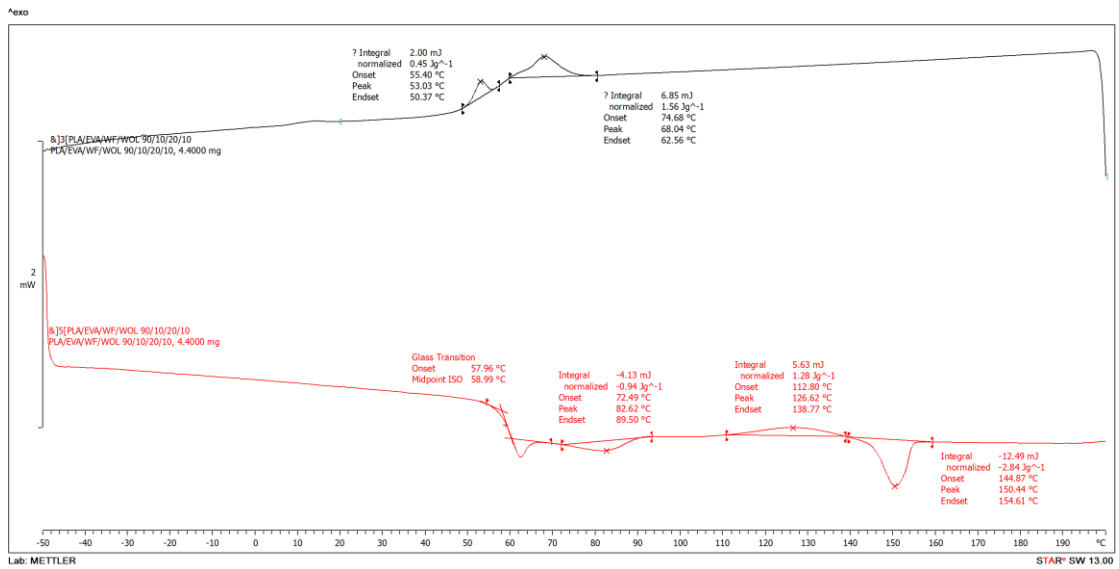
รูปที่ ค-8 DSC เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 0/30



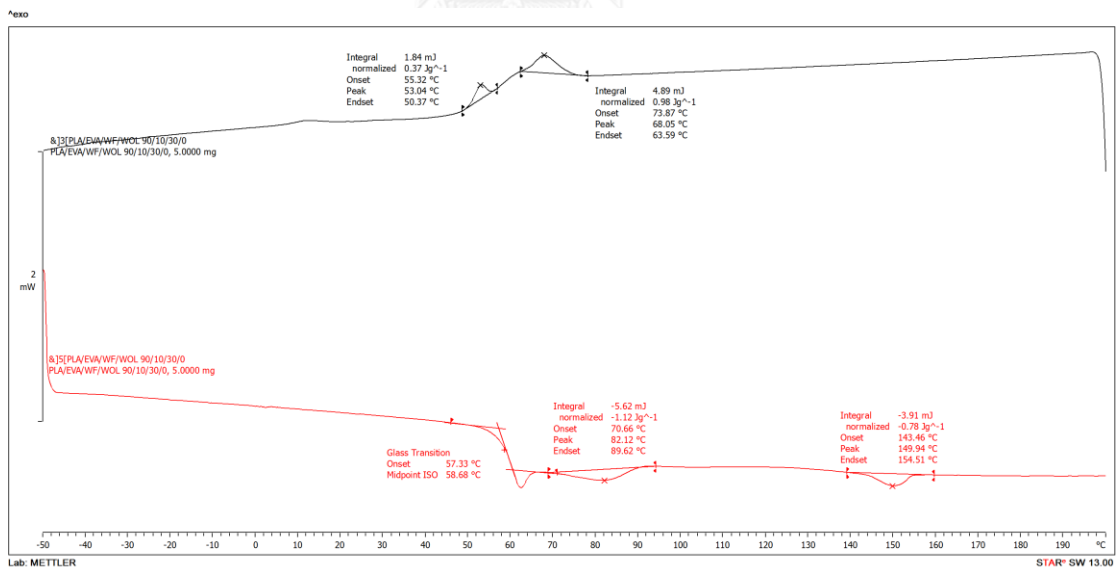
รูปที่ ค-9 DSC เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 10/20



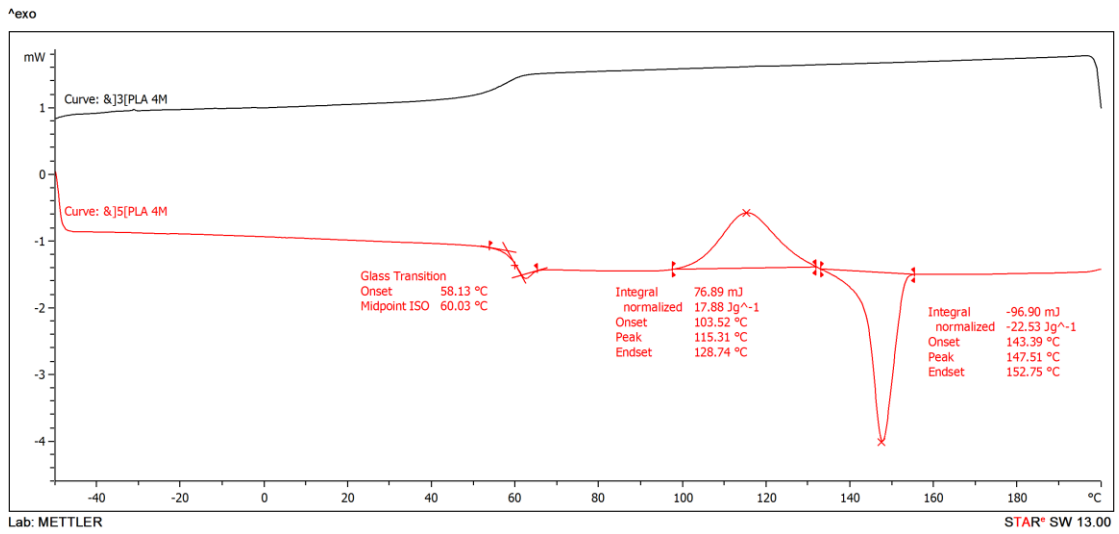
รูปที่ ค-10 DSC เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 15/15



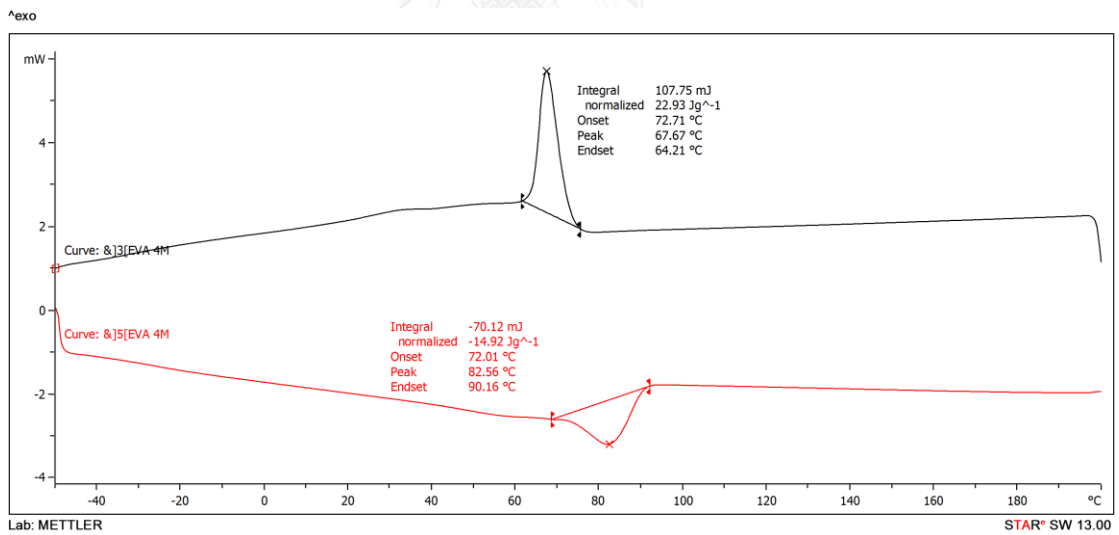
รูปที่ ค-11 DSC เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 20/10



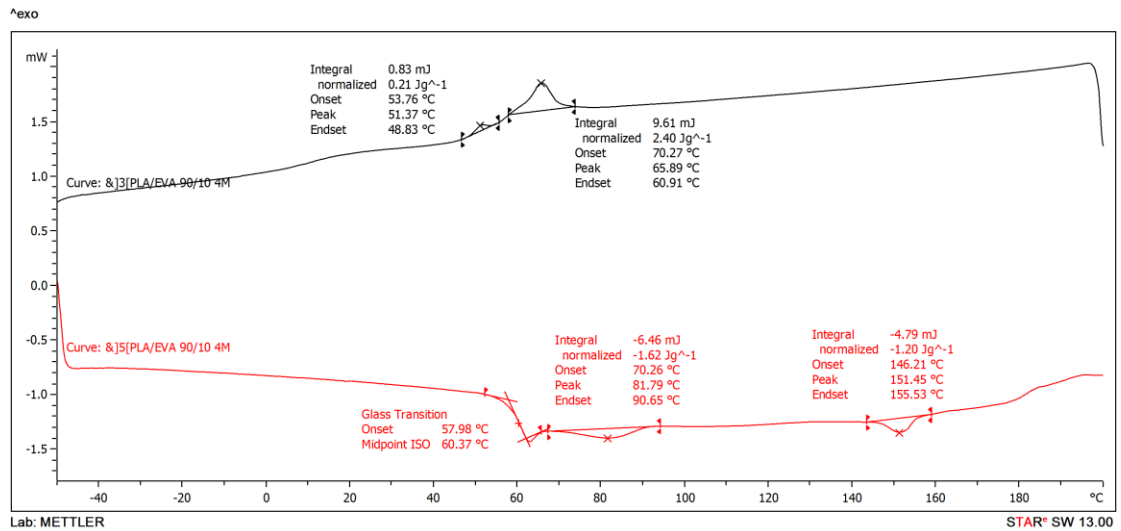
รูปที่ ค-12 DSC เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 30/0



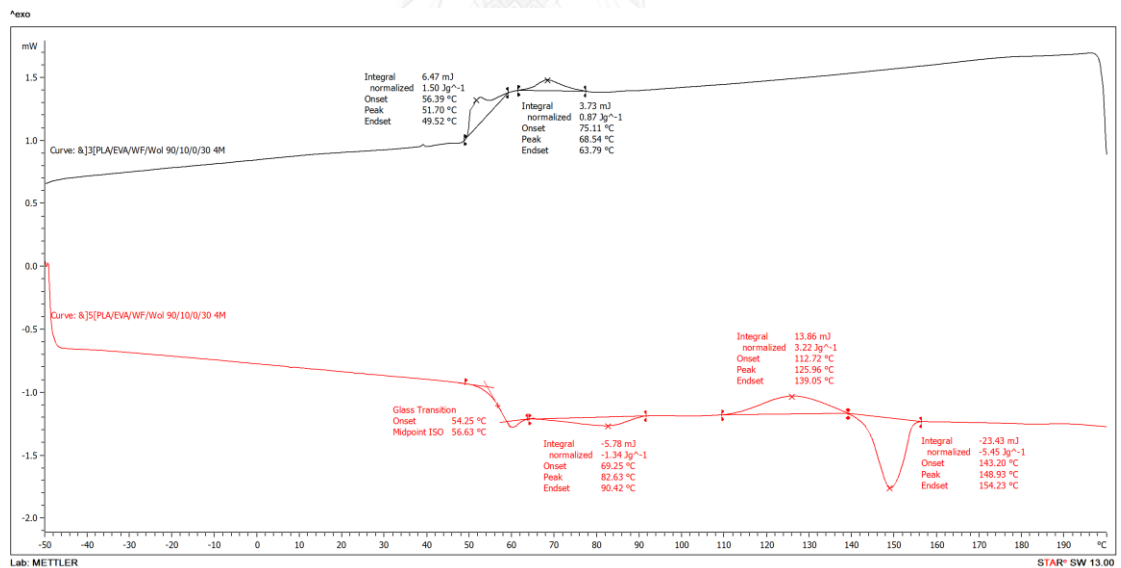
รูปที่ ค-13 DSC เทอร์โมแกรมของ PLA หลังจากฝังดินแล้ว 4 เดือน



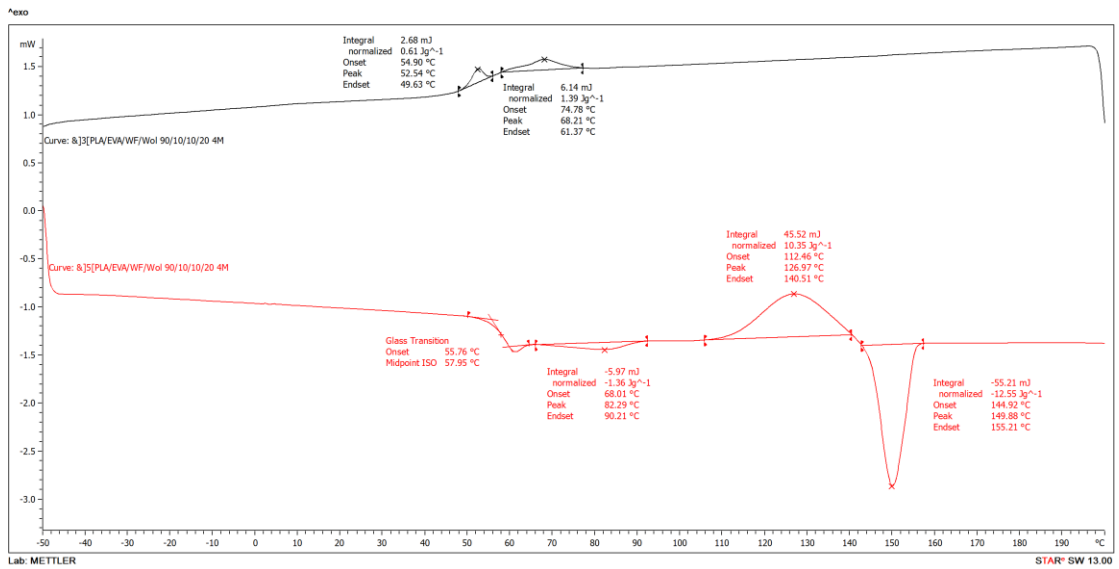
รูปที่ ค-14 DSC เทอร์โมแกรมของ EVA หลังจากฝังดินแล้ว 4 เดือน



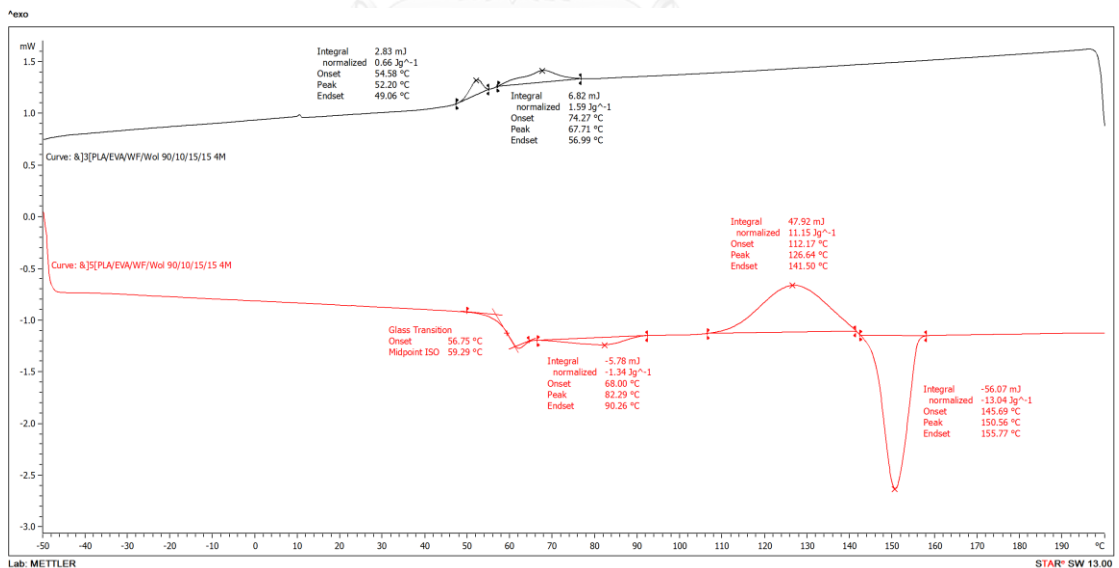
รูปที่ ค-15 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA 90/10 หลังจากฝังดินแล้ว 4 เดือน



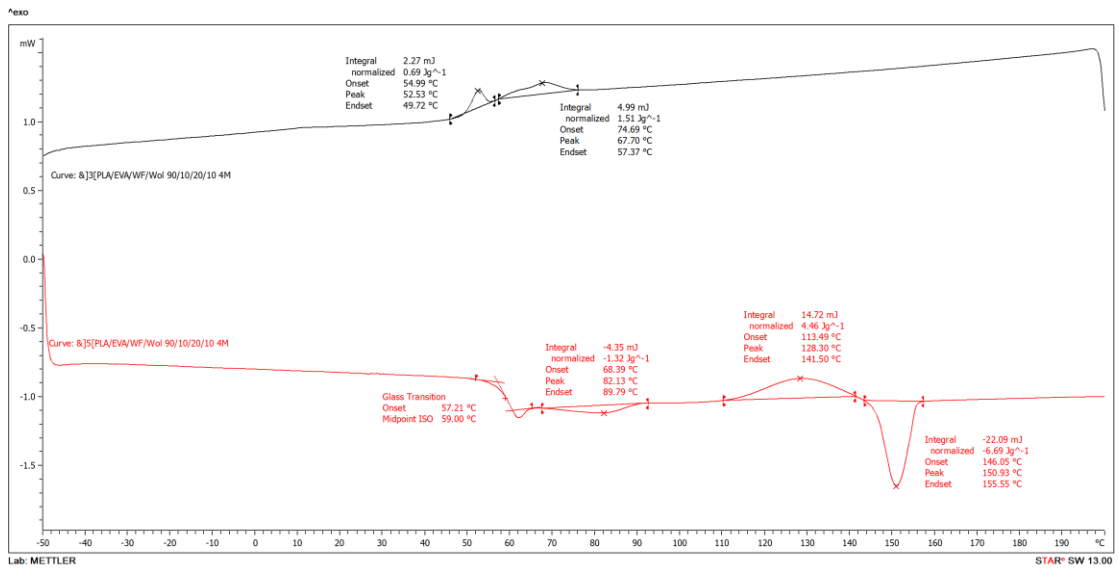
รูปที่ ค-16 DSC เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 0/30 หลังจากฝังดินแล้ว 4 เดือน



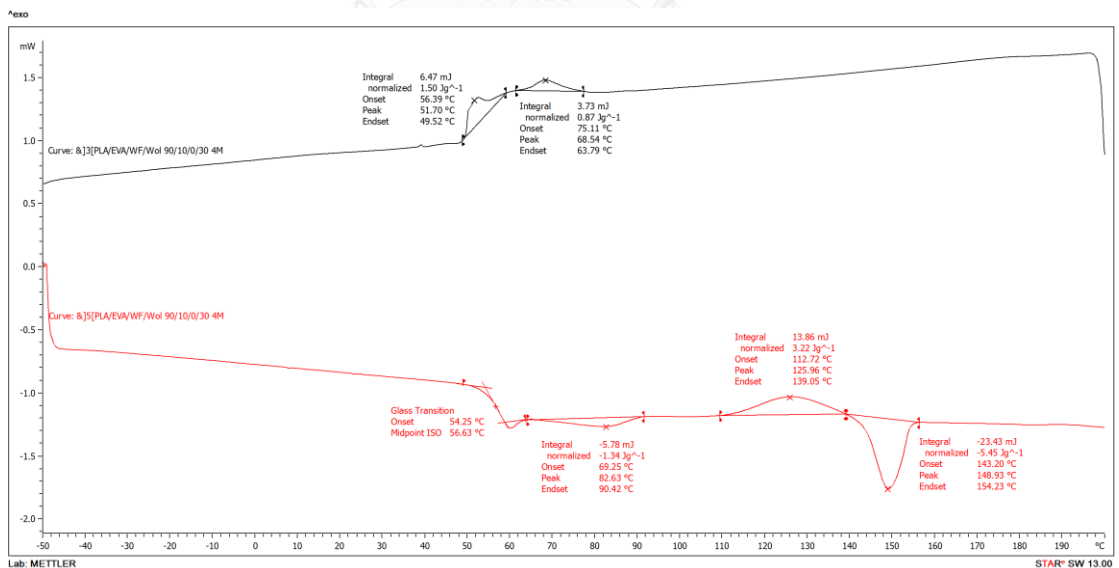
รูปที่ ค-17 DSC เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 10/20 หลังจากฝังดินแล้ว 4 เดือน



รูปที่ ค-18 DSC เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 15/15 หลังจากฝังดินแล้ว 4 เดือน

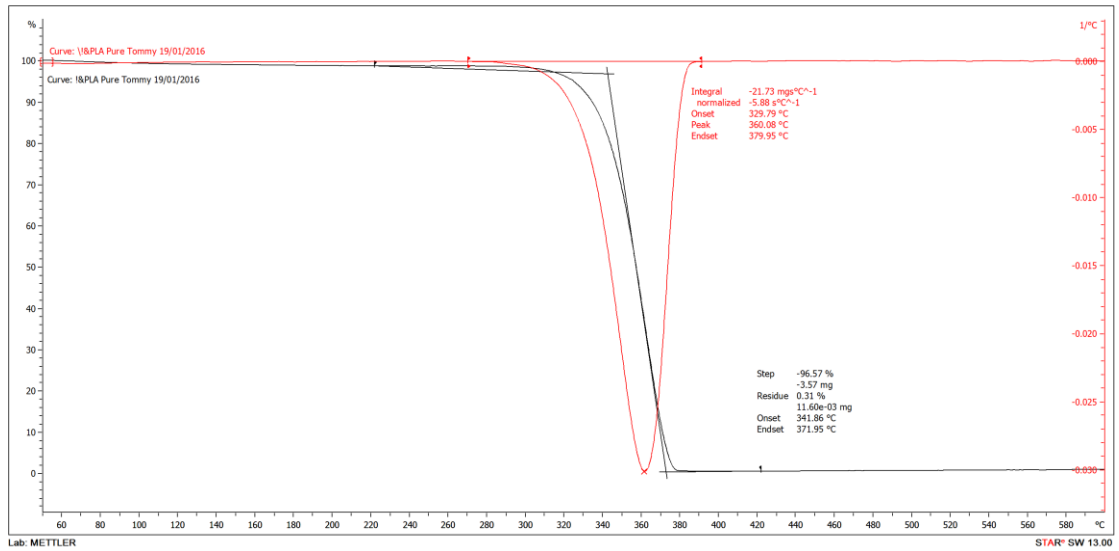


รูปที่ ค-19 DSC เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอปอลิเมอร์ ที่อัตราส่วน WF/WT 20/10 หลังจากฝังกินแล้ว 4 เดือน

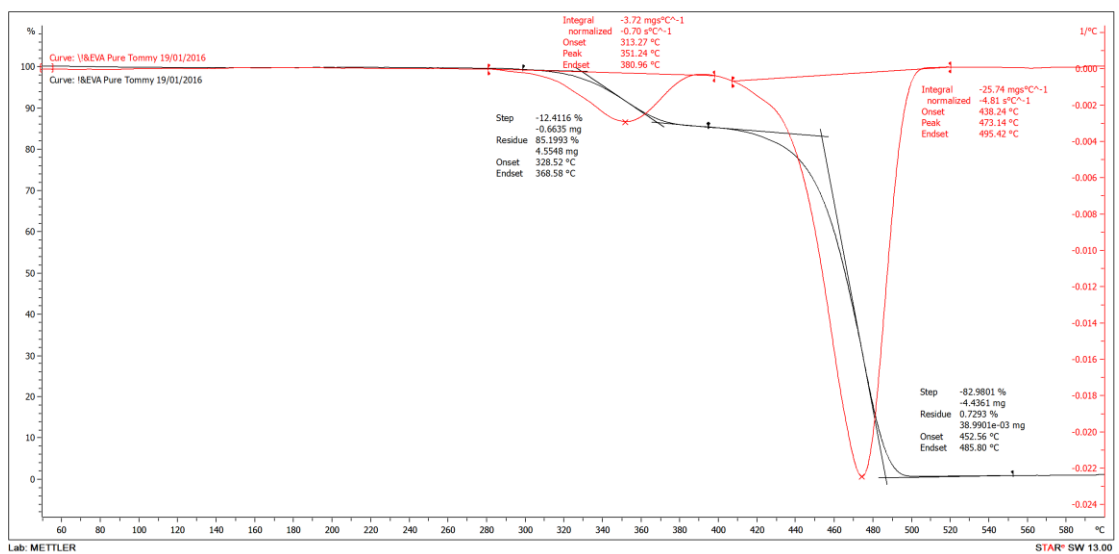


รูปที่ ค-20 DSC เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอปอลิเมอร์ ที่อัตราส่วน WF/WT 30/0 หลังจากฝังกินแล้ว 4 เดือน

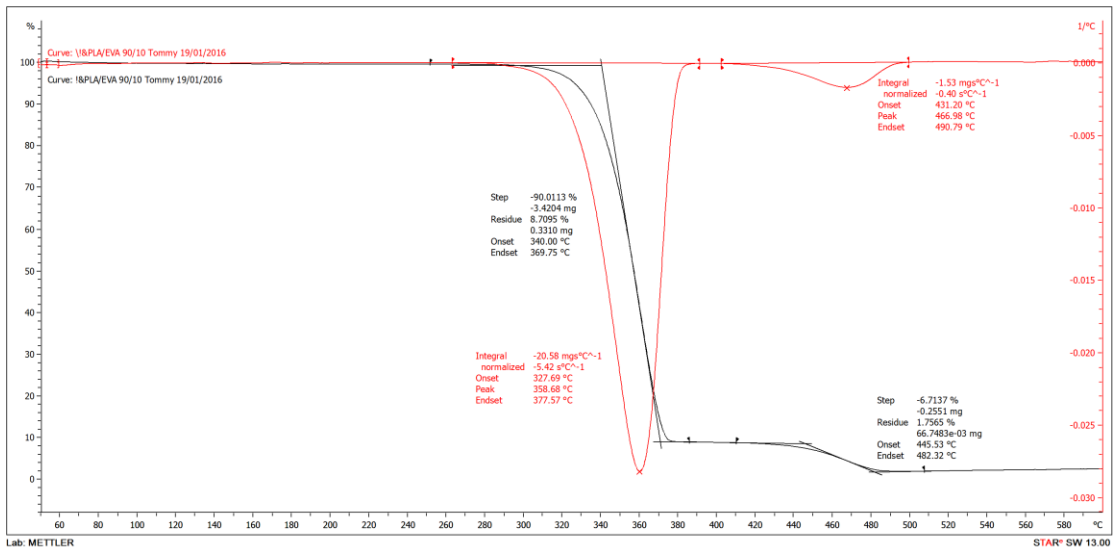
ภาคผนวก ง
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA



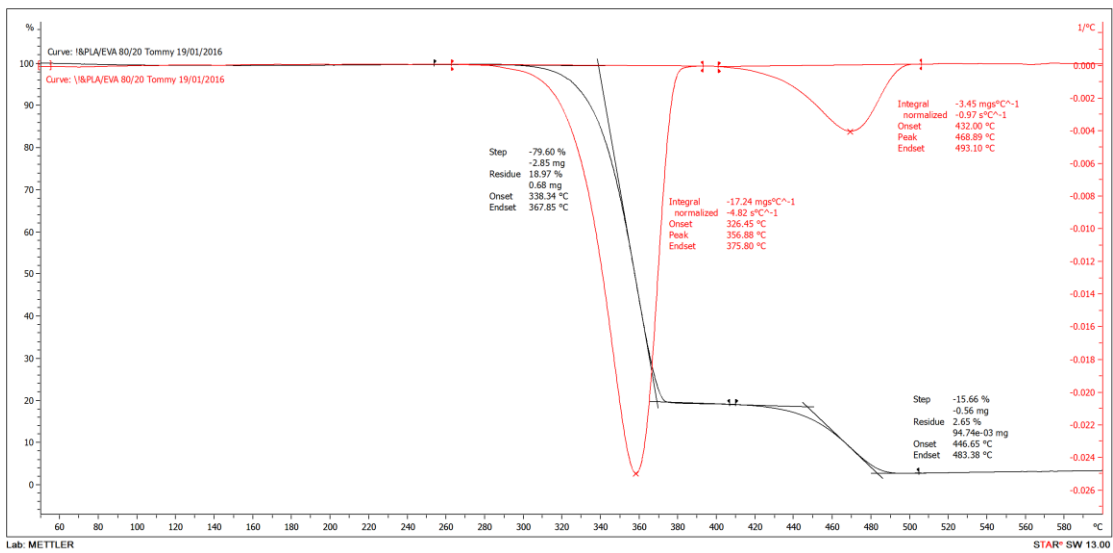
รูปที่ ง-1 TGA เทอร์โมแกรมของ PLA



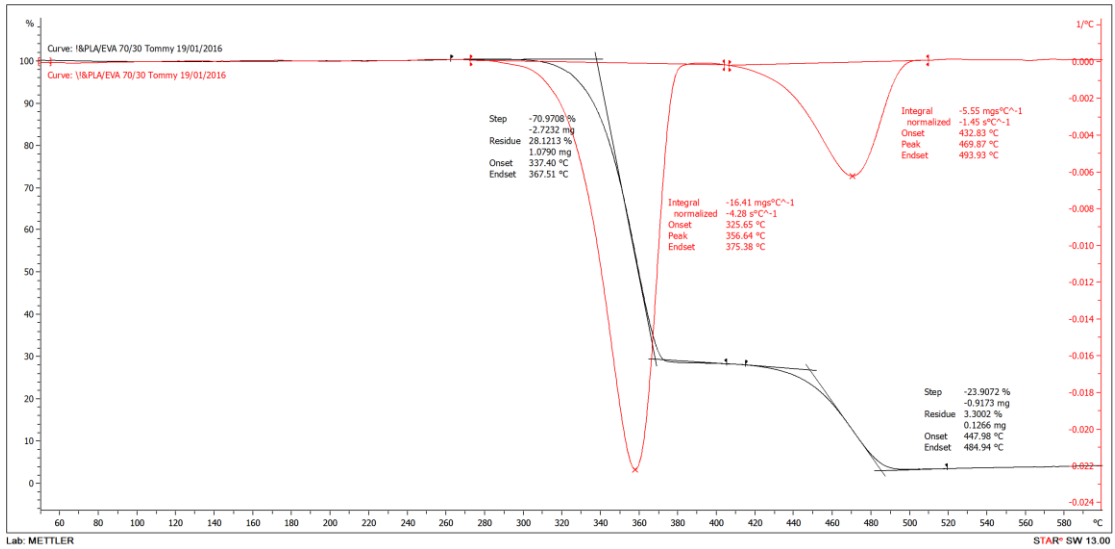
รูปที่ ง-2 TGA เทอร์โมแกรมของ EVA



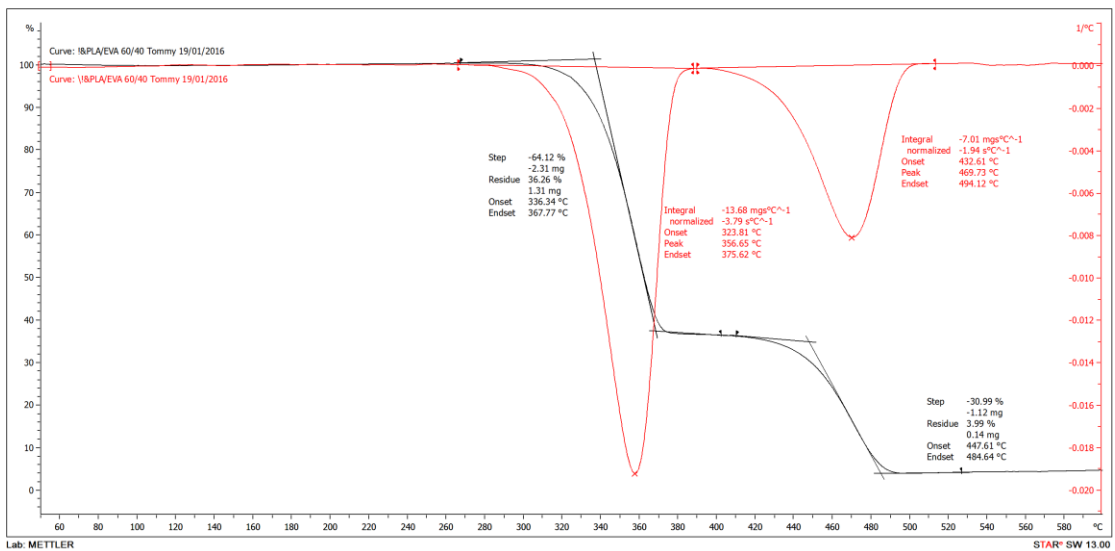
รูปที่ ง-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA 90/10



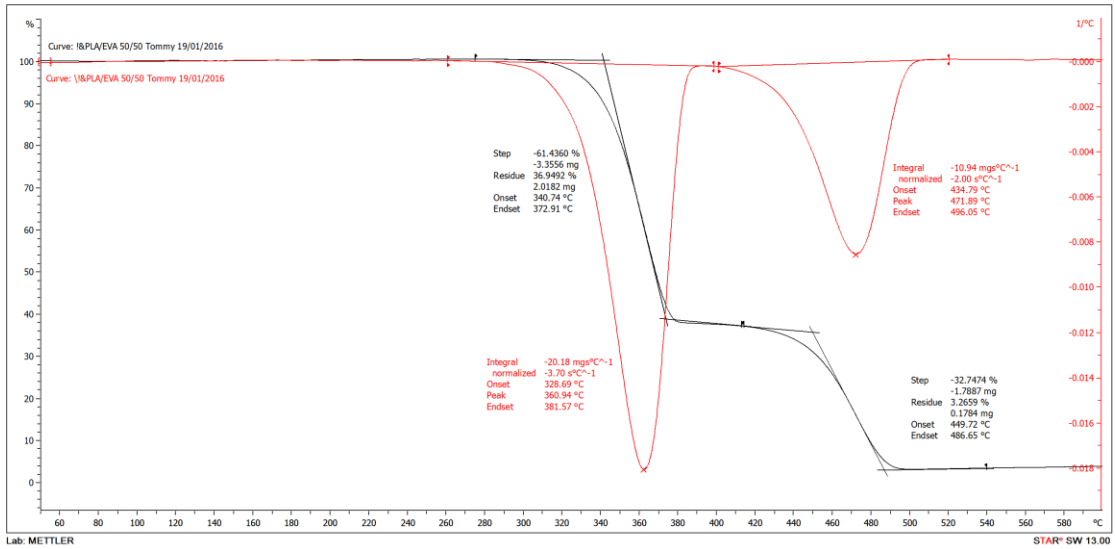
รูปที่ ง-4 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA 80/20



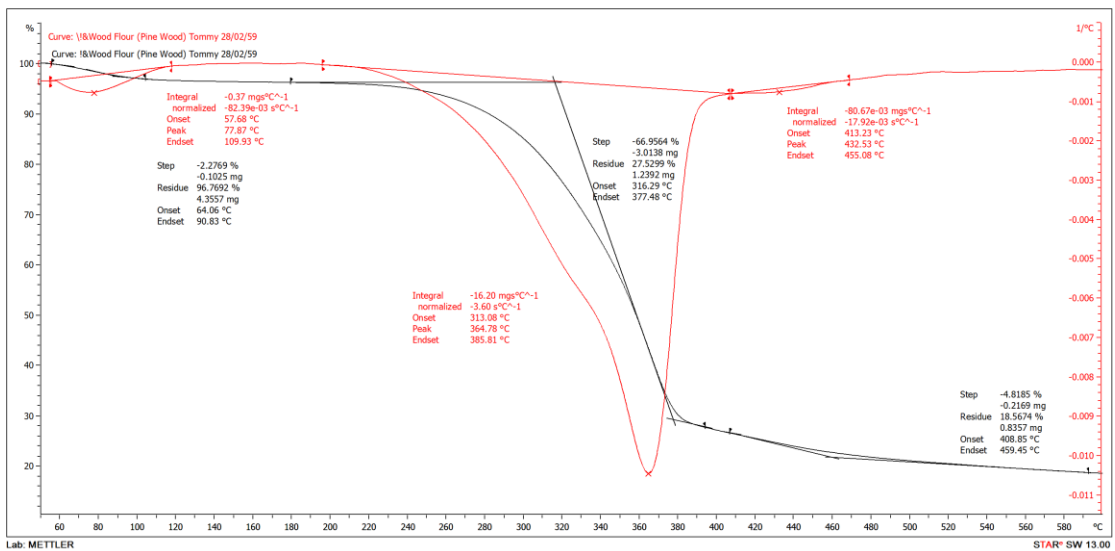
รูปที่ ง-5 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA 70/30



รูปที่ ง-6 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA 60/40



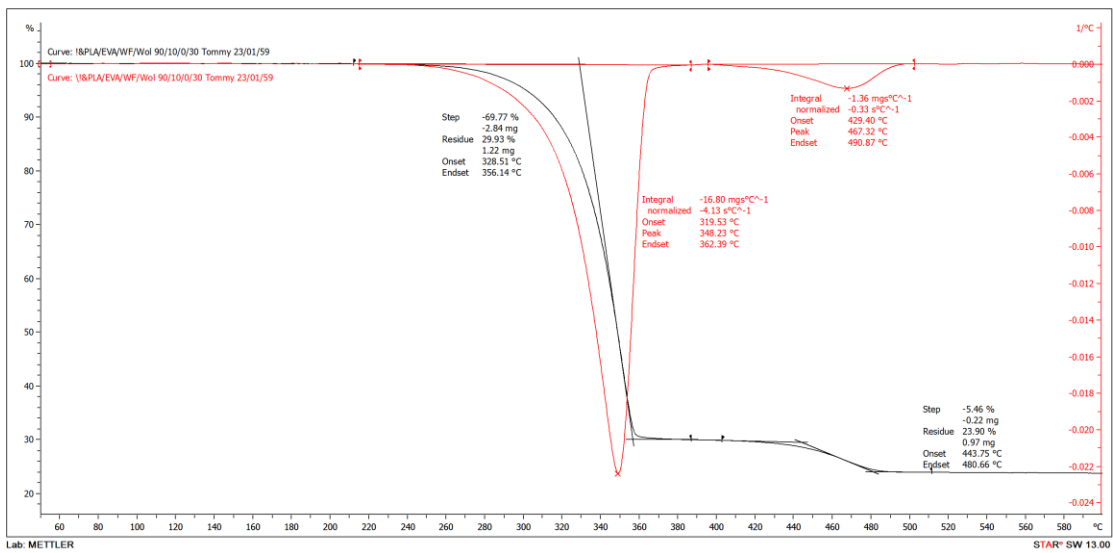
รูปที่ ง-7 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/EVA 50/50



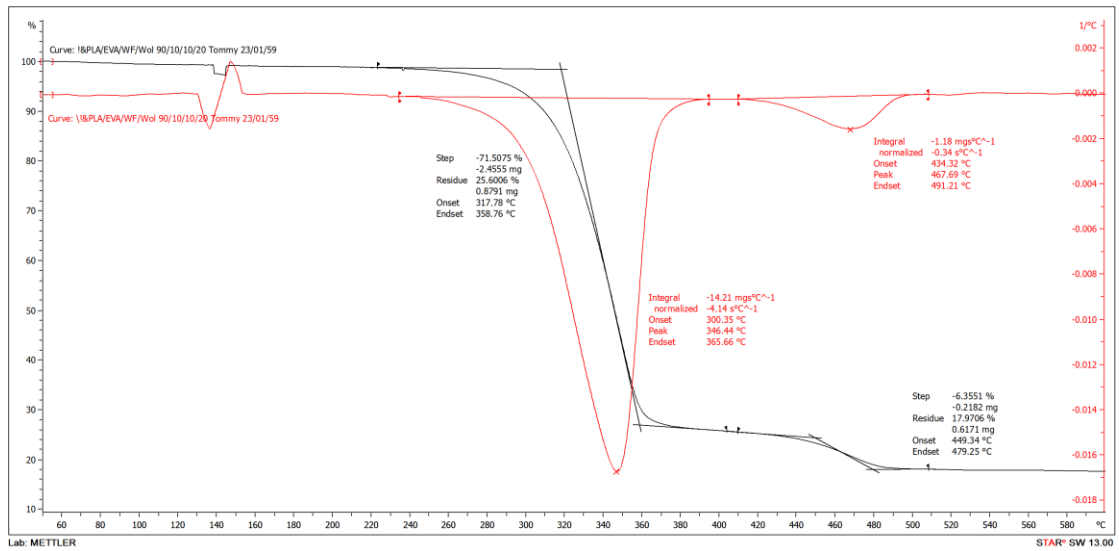
รูปที่ ง-8 TGA เทอร์โมแกรมของผงไม้ (wood flour, WF)



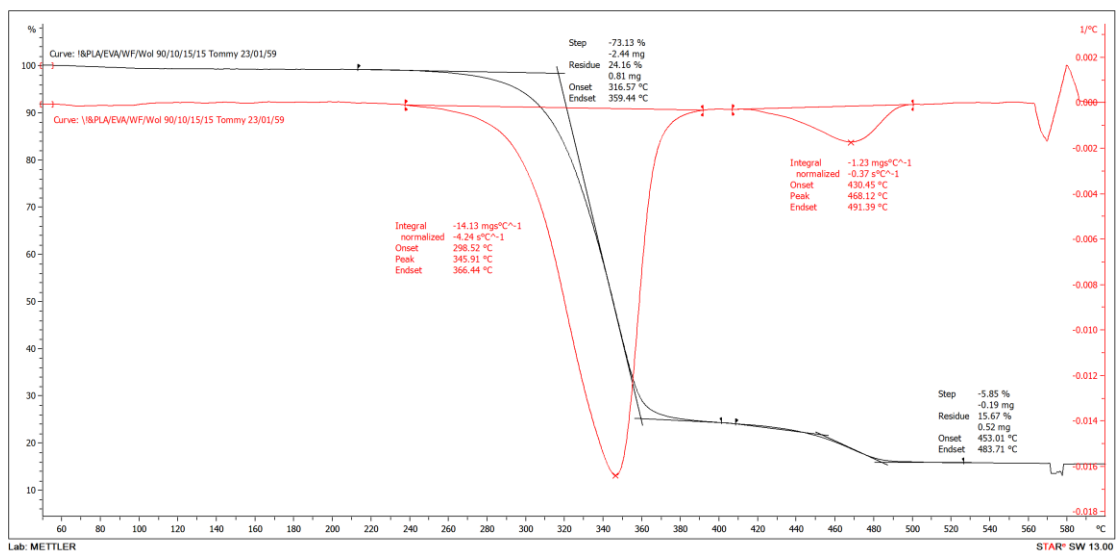
รูปที่ ง-9 TGA เทอร์โมแกรมของโวลลาสโตไนต์ (wollastonite, WT)



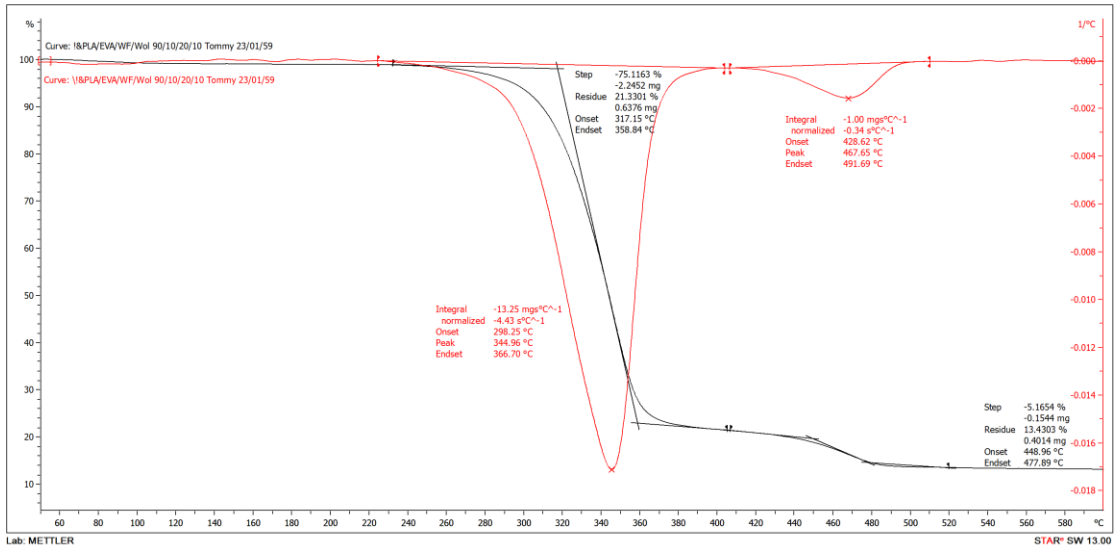
รูปที่ ง-10 TGA เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 0/30



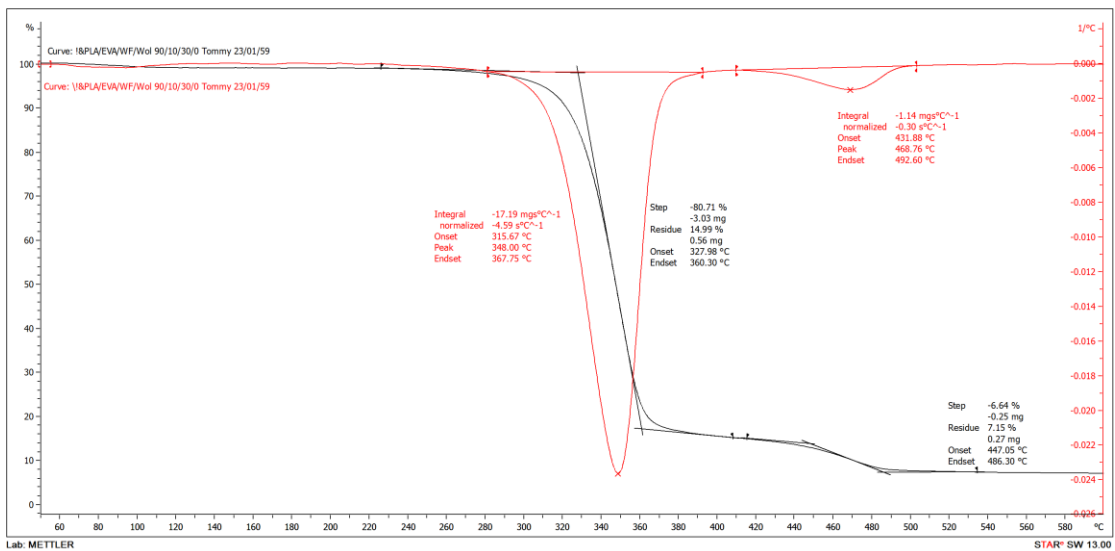
รูปที่ ง-11 TGA เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอลิเมอร์ ที่อัตราส่วน WF/WT 10/20



รูปที่ ง-12 TGA เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอลิเมอร์ ที่อัตราส่วน WF/WT 15/15



รูปที่ ง-13 TGA เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 20/10



รูปที่ ง-13 TGA เทอร์โมแกรมของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 30/0

ภาคผนวก จ
การดูดซึมน้ำ

ตารางที่ จ-1 การดูดซึมน้ำของ PLA

PLA วันที่	% การดูดซึมน้ำ			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
1	0.34	0.34	0.33	0.34
2	0.43	0.43	0.43	0.43
3	0.51	0.49	0.50	0.50
4	0.56	0.55	0.55	0.55
5	0.57	0.57	0.57	0.57
6	0.60	0.61	0.61	0.61
7	0.62	0.61	0.60	0.61
21	0.70	0.70	0.70	0.70
35	0.71	0.71	0.71	0.71
49	0.70	0.72	0.71	0.71
63	0.71	0.72	0.72	0.72
70	0.75	0.73	0.74	0.74
77	0.74	0.75	0.75	0.74
84	0.75	0.74	0.73	0.74

ตารางที่ จ-2 การดูดซึมน้ำของ EVA

EVA วันที่	การดูดซึมน้ำ (%)			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
1	0.10	0.08	0.08	0.09
2	0.07	0.07	0.09	0.08
3	0.08	0.07	0.06	0.07
4	0.08	0.08	0.07	0.08
5	0.10	0.07	0.05	0.07
6	0.09	0.08	0.07	0.08
7	0.07	0.07	0.06	0.07
21	0.11	0.08	0.08	0.09
35	0.22	0.10	0.08	0.13
49	0.11	0.13	0.10	0.11
63	0.10	0.12	0.10	0.11
70	0.13	0.08	0.10	0.10
77	0.13	0.08	0.09	0.10
84	0.09	0.07	0.10	0.09

ตารางที่ จ-3 การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA

90/10 วันที่	% การดูดซึมน้ำ			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
1	0.33	0.34	0.34	0.34
2	0.40	0.41	0.42	0.41
3	0.46	0.47	0.50	0.48
4	0.53	0.51	0.51	0.52
5	0.52	0.53	0.54	0.53
6	0.58	0.57	0.57	0.57
7	0.56	0.56	0.57	0.56
21	0.67	0.67	0.67	0.67
35	0.68	0.69	0.71	0.69
49	0.66	0.70	0.69	0.68
63	0.69	0.73	0.76	0.73
70	0.69	0.77	0.76	0.74
77	0.71	0.78	0.79	0.76
84	0.73	0.81	0.82	0.79

ตารางที่ จ-4 การดูดซึมน้ำของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 0/30

วันที่	% การดูดซึมน้ำ			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
1	0.32	0.31	0.31	0.32
2	0.37	0.38	0.40	0.38
3	0.45	0.46	0.47	0.46
4	0.51	0.52	0.52	0.52
5	0.54	0.55	0.56	0.55
6	0.59	0.59	0.60	0.60
7	0.60	0.61	0.62	0.61
21	0.97	0.97	0.97	0.97
35	1.24	1.22	1.21	1.22
49	1.53	1.50	1.50	1.51
63	1.98	1.93	1.89	1.93
70	2.56	2.32	2.31	2.40
77	2.95	2.55	2.56	2.68
84	3.30	2.74	2.68	2.91

ตารางที่ จ-5 การดูดซึมน้ำของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 10/20

10/20 วันที่	% การดูดซึมน้ำ			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
1	0.64	0.64	0.62	0.63
2	0.83	0.84	0.82	0.83
3	0.98	0.99	0.98	0.98
4	1.13	1.14	1.13	1.13
5	1.24	1.26	1.24	1.24
6	1.37	1.37	1.36	1.36
7	1.41	1.42	1.41	1.41
21	2.24	2.26	2.24	2.25
35	2.67	2.66	2.65	2.66
49	3.15	3.15	3.15	3.15
63	3.70	3.74	3.70	3.71
70	4.01	4.08	4.02	4.04
77	4.15	4.20	4.24	4.20
84	4.40	4.43	4.41	4.41

ตารางที่ จ-6 การดูดซึมน้ำของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 15/15

15/15 วันที่	% การดูดซึมน้ำ			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
1	0.80	0.79	0.81	0.80
2	1.08	1.05	1.08	1.07
3	1.26	1.23	1.27	1.25
4	1.44	1.42	1.46	1.44
5	1.59	1.52	1.58	1.56
6	1.74	1.70	1.77	1.73
7	1.80	1.77	1.82	1.79
21	2.81	2.83	2.82	2.82
35	3.15	3.24	3.17	3.19
49	3.46	3.61	3.46	3.51
63	3.80	4.03	3.78	3.87
70	4.07	4.29	4.04	4.13
77	4.24	4.42	4.21	4.29
84	4.50	4.68	4.48	4.55

ตารางที่ จ-7 การดูดซึมน้ำของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 20/10

20/10 วันที่	% การดูดซึมน้ำ			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
1	1.01	1.03	0.97	1.00
2	1.24	1.29	1.22	1.25
3	1.48	1.53	1.46	1.49
4	1.66	1.69	1.64	1.66
5	1.80	1.87	1.70	1.79
6	2.03	2.11	2.03	2.05
7	2.10	2.18	2.11	2.13
21	3.21	3.38	3.36	3.32
35	3.56	3.73	3.79	3.69
49	3.79	3.96	4.06	3.94
63	4.12	4.35	4.45	4.31
70	4.37	4.58	4.68	4.54
77	4.48	4.70	4.81	4.67
84	4.74	4.97	5.05	4.92

ตารางที่ จ-8 การดูดซึมน้ำของ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT 30/0

30/0 วันที่	% การดูดซึมน้ำ			
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
1	1.13	1.10	1.14	1.13
2	1.50	1.47	1.52	1.49
3	1.78	1.74	1.81	1.78
4	1.98	1.93	2.03	1.98
5	2.22	2.15	2.24	2.20
6	2.49	2.45	2.51	2.48
7	2.56	2.51	2.59	2.56
21	4.06	4.01	4.05	4.04
35	4.50	4.40	4.42	4.44
49	4.70	4.59	4.57	4.62
63	5.02	5.00	4.95	4.99
70	5.19	5.10	5.05	5.11
77	5.22	5.15	5.10	5.15
84	5.36	5.31	5.23	5.30

ภาคผนวก ฉ
การลามไฟ

ตารางที่ ฉ-1 การลามไฟของ PLA EVA โพลีเมอร์ผสม 90/10 PLA/EVA และ 90/10 PLA/EVA คอมพอสิต ที่อัตราส่วน WF/WT ต่างกัน

WF/WT	เวลา (วินาที)			อัตราการลามไฟ (มิลลิเมตร/วินาที)				
	1	2	3	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
PLA	65.5	78.1	70.6	1.527	1.280	1.416	1.41	0.12
EVA	-	-	-	-	-	-	-	-
0/0	50.2	52.5	50.5	1.992	1.905	1.980	1.96	0.05
0/30	40.3	29.9	38.9	2.481	3.344	2.571	2.80	0.47
10/20	25.7	26.2	25.2	3.891	3.817	3.968	3.89	0.08
15/15	23.6	21.6	22.4	4.237	4.630	4.464	4.44	0.20
20/10	18.0	19.4	18.7	5.556	5.155	5.348	5.35	0.20
30/0	18.3	18.7	17.5	5.464	5.348	5.714	5.51	0.19

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐวุฒิ ทิพย์คำ เกิดเมื่อวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ในปีการศึกษา 2556 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

