

การปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและ  
ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมจากเศษใยฝ้าย

นางสาวกอแก้ว ปาลสุทธิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์นี้พร้อมทั้งไฟล์ต้นฉบับที่ส่งมาในการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

การปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและ  
ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมจากเศษใยฝ้าย

นางสาวกอแก้ว ปาลสุทธิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTY IMPROVEMENT OF POLYPROPYLENE BY POLY(BUTYLENE SUCCINATE) AND  
MICROCRYSTALLINE CELLULOSE PREPARED FROM WASTE COTTON FIBER

Miss Korkaew Palasuth

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University



กอกแก้ว ปาลสุทธิ : การปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมจากเศษใยฝ้าย. (PROPERTY IMPROVEMENT OF POLYPROPYLENE BY POLY(BUTYLENE SUCCINATE) AND MICRO CRYSTALLINE CELLULOSE PREPARED FROM WASTE COTTON FIBER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร, 109 หน้า.

คอมพอลสิตของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสและคอมพอลสิตของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสถูกเตรียมโดยการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่และขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดแบบ ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่ใช้ในงานนี้ถูกเตรียมโดยการไฮโดรไลซ์เศษใยฝ้ายด้วยกรดไฮโดรคลอริก คอมพอลสิตทั้งที่เดิมและไม่เติมสารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เตรียมได้ ถูกนำไปตรวจสอบสมบัติเชิงกล พฤติกรรมทางความร้อน และสัญญาณวิทยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสเข้าไปในพอลิโพรพิลีน มีผลทำให้ความทนแรงดึง ยังสัมมอดูลัส ความทนแรงกระแทกและอุณหภูมิการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น ขณะที่ การยืดตัว ณ จุดขาด ดิกรีของวาทเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอลสิต มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกล และเสถียรภาพทางความร้อนถูกปรับปรุงเมื่อเติมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้าไปในพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอลสิต ทั้งนี้เนื่องจากคอมพอลสิตที่ดัดแปรด้วยสารช่วยผสมมีความเข้ากันได้เชิงพื้นผิวมากกว่าคอมพอลสิตไม่ผ่านการดัดแปร นอกจากนี้ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังถูกใช้ในการเตรียมพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอลสิต ผลของอัตราส่วนผสมและสารช่วยผสมต่อสมบัติเชิงกล พฤติกรรมทางความร้อนและสัญญาณวิทยาได้ถูกตรวจสอบ พบว่าการเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกและสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอลสิต อย่างไรก็ตาม ขอบเขตของการปรับปรุงขึ้นกับและเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในคอมพอลสิต

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก....  
 ปีการศึกษา...2554.....

# #5372420423 MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : POLYPROPYLENE / POLY(BUTYLENE SUCCINATE) / POLYPROPYLENE -g-  
MALAIC ANHYDRIDE / MICROCRYSTALLINE CELLULOSE / COMPOSITES

KORKAEW PALASUTH : PROPERTY IMPROVEMENT OF POLYPROPYLENE BY  
POLY(BUTYLENE SUCCINATE) AND MICROCRYSTALLINECELLULOSE PREPARED  
FROM WASTE COTTON FIBER. ADVISOR : ASSOC. PROF. SAOWAROJ  
CHUAYJULJIT, 109 pp.

Polypropylene (PP)/microcrystalline cellulose (MCC) composites and PP/poly(butylene succinate) (PBS)/MCC composites were prepared by melt mixing on a twin screw extruder, followed by compression molding. MCC used in this work was prepared by hydrolyzing cotton waste with hydrochloric acid. The obtained composites with and without maleic anhydride grafted PP (PP-g-MA) as compatibilizer were investigated for their mechanical properties, thermal behaviors and morphology. The results indicated that the addition of MCC into PP had led to the increase of the tensile strength, Young's modulus, impact strength and crystallization temperature, whilst the elongation at break and degree of crystallinity of the PP/MCC composites were decreased. However, the mechanical properties and thermal stability were improved with the incorporation of PP-g-MA into the PP/MCC composites. This is because the modified composites had better interfacial compatibility than the unmodified composites. PBS was also employed to prepare PP/PBS/MCC composites. The effects of blend ratio and compatibilizer on mechanical properties, thermal behaviors and morphology were also investigated. The addition of PBS into the PP/MCC composites was found to improve their impact strength and thermal stability. However, the extent of such improvement depends upon and varied with the amount of MCC, PBS and PP-g-MA in the composites.

Department : .....Materials Science..... Student's signature.....

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

Academic Year : .....2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับคำแนะนำด้านวิชาการ ความเชื่อเพื่อเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำงานวิจัย อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือ และการแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ อย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคำแนะนำ การแก้ไขปัญหา และการสนับสนุนงานวิจัยเป็นอย่างดี และการทำเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุษมา แสงวัฒนาโรจน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ อรุณา สรวารี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
3. ดร. ชัยวัฒน์ นรگانต์กร ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและการวิจัย ตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
4. บริษัท เอ็ม ซี โปลิเมอร์ จำกัด ที่เชื่อเพื่อวัสดุดิบ สารเคมีสำหรับใช้ในงานวิจัย
5. บริษัท เคมีคัล อินโนเวชัน ที่เชื่อเพื่อวัสดุดิบ สารเคมีสำหรับใช้ในงานวิจัย และเชื่อเพื่อเครื่องมือในการทำงานวิจัย
6. บริษัท นันยางเท็กซ์ไทล์ จำกัด ที่เชื่อเพื่อวัสดุดิบ สำหรับใช้ในงานวิจัย
7. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เชื่อเพื่อสถานที่และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกระหว่างการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 พอลิโพรพิลีน.....	3
2.2 มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	6
2.3 พอลิบิวทิลีนซักซิเนต.....	8
2.4 วัสดุเชิงประกอบ .....	9
2.5 สารตัวเติม.....	11
2.6 การสลายตัวของพลาสติก.....	14
2.6.1 การย่อยสลายทางชีวภาพ.....	16
2.7 ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส.....	21
2.7.1 การเตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส.....	25
2.8 การผสมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสในพลาสติก.....	27
2.9 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก.....	27
2.9.1 การอัดแบบ (Compression molding) .....	27
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3 วิธีการทดลอง.....	31
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	31
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส.....	32



บทที่	หน้า
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมขึ้นทดสอบ.....	32
3.3.2 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	32
3.4 ขอบเขตการทดลอง.....	33
3.4.1 การเตรียมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส.....	33
3.4.1.1 การเตรียมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสจากเศษใยฝ้าย.....	33
3.4.2 การวิเคราะห์ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส.....	34
3.4.2.1 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD).....	34
3.4.2.2 การวัดขนาดอนุภาค.....	35
3.4.3 การเตรียมพอลิไพโรฟิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต.....	36
3.4.4 การเตรียมพอลิไพโรฟิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์ เซลลูโลสคอมพอสิต.....	37
3.5 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	38
3.6 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของคอมพอสิต.....	39
3.6.1 การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง.....	39
3.6.2 ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก.....	41
3.6.3 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน.....	42
3.6.3.1 ทดสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	42
3.6.3.2 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน.....	43
3.6.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	44
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	45
4.1 ลักษณะของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส.....	45
4.2 เปอร์เซ็นต์ของผลได้ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่ได้จากเศษใยฝ้าย.....	45
4.3 ผลวิเคราะห์ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส.....	45
4.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	45
4.3.2 การวัดขนาดอนุภาค.....	46
4.3.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	47
4.3.4 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	48

บทที่	หน้า
4.4 ผลการวิเคราะห์พอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต.....	48
4.4.1 .การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง .....	48
4.4.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก.....	52
4.4.3 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	54
4.4.4 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC.....	56
4.4.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	57
4.5 การวิเคราะห์พอลิโพรพิลีน/ พอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส คอมพอสิต.....	59
4.5.1 .การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง .....	59
4.5.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก.....	62
4.5.3 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	64
4.5.4 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC.....	66
4.5.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	67
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก.....	78
ภาคผนวก ข.....	81
ภาคผนวก ค.....	87
ภาคผนวก ง.....	89
ภาคผนวก จ.....	99
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	109

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	7
2.2	การใช้สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุในอุตสาหกรรมพลาสติก.....	14
2.3	ความทนทานต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ของพลาสติกประเภทต่างๆ.....	18
2.4	การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนชิ้นพลาสติกประเภทต่างๆ.....	19
2.5	ค่าความถี่จาก IR spectra ของ crystalline polysaccharide.....	24
3.1	สมบัติของพอลิโพรพิลีนเกรด HP500N.....	31
3.2	ส่วนผสมที่ใช้เตรียมพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิต.....	36
3.3	ส่วนผสมที่ใช้เตรียมพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิต.....	37
3.4	ขนาดขึ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638-03.....	39
4.1	ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และย้งสัมมอดุลล์ของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิต ทั้งที่ไม่ใส่และใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	50
4.2	ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิต ทั้งที่ไม่ใส่และใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	52
4.3	เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิตทั้งที่ไม่ใส่และใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ).....	54
4.4	สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิตทั้งที่ไม่ใส่และใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี.....	56
4.5	ความทนแรงดึง ย้งสัมมอดุลล์ และการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิต.....	59
4.6	ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิต.....	63

ตารางที่	หน้า
4.7	สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์ เซลลูโลสคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ). 64
4.8	สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์ เซลลูโลสคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริเมตรี..... 66

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ชนิดของพอลิโพรพิลีนตามลักษณะโครงสร้างสเตอริโอ (stereo configuration) a) isotactic, b) syndiotactic, และ c) atactic.....	5
2.2	การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของบิวทีน.....	6
2.3	การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน.....	7
2.4	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	7
2.5	โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต.....	8
2.6	วัสดุเชิงประกอบที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงลักษณะต่างๆ.....	10
2.7	รูปร่างของอนุภาคสารตัวเติม.....	12
2.8	กลไกการย่อยสลายแป้งในพลาสติกโดยจุลินทรีย์.....	17
2.9	การหายไปของเม็ดแป้งในพลาสติก.....	17
2.10	โครงสร้างของเซลลูโลส.....	21
2.11	การเรียงโมเลกุลของเซลลูโลส.....	22
2.12	โครงสร้างของผลึกเซลลูโลส.....	22
2.13	XRD ดิฟแฟร็กโตแกรมของเซลลูโลส I และ II และเซลลูโลสอสัณฐาน.....	23
2.14	การแตกหักของพันธะ $\beta$ -1, 4-glycosidic.....	26
2.15	ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์เซลลูโลสต่อ degree of polymerization... ..	26
2.16	เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) .....	27
2.17	เครื่องอัดแบบ.....	28
3.1	เครื่อง XRD ของ Bruker รุ่น D8.....	34
3.2	ส่วนประกอบของเครื่อง Laser Light Scattering ของ Malvern รุ่น Mastersizer S..	35
3.3	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	36
3.4	เครื่องอัดแบบ.....	38
3.5	ขั้นตอนทดสอบบดตีความทนแรงดึง.....	39
3.6	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD รุ่น LR 100K) .....	40
3.7	เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบ Izod (Dynisco SIMATIC-OP7).....	41
3.8	เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Perkin-Elmer, DSC 7).....	43

ภาพที่	หน้า
3.9 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Mettler Toledo, TGA/SDTA 851 <sup>e</sup> ).....	43
3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Jeol, JSM 5800 LV) .....	44
4.1 ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่เตรียมได้.....	45
4.2 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่เตรียมจากการไฮโดรไลซ์ เศษใยฝ้าย.....	46
4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส.....	46
4.4 ฐานฐานวิทยาของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 3500 เท่า .....	47
4.5 TGA เทอร์โมแกรมของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส.....	48
4.6 ความทนแรงดึง (a) ยั่งสัมมอดุลัส (b) และการยืดตัว ณ จุดขาด (c) ของพอลิ- ไพโรฟิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิตทั้งที่ไม่ใส่และใส่พอลิไพโรฟิลีน กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	50
4.7 ความทนแรงกระแทกของพอลิไพโรฟิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต ทั้งที่ไม่ใส่และใส่พอลิไพโรฟิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	52
4.8 ฐานฐานวิทยาของพอลิไพโรฟิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต.....	58
4.9 ความทนแรงดึง (a) ยั่งสัมมอดุลัส (b) และการยืดตัว ณ จุดขาด (c) ของพอลิ- ไพโรฟิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต.....	61
4.10 ความทนแรงกระแทกของพอลิไพโรฟิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์ เซลลูโลสคอมพอสิต.....	62
4.11 ฐานฐานวิทยาพื้นผิวของรอยแตกหักพอลิไพโรฟิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโคร คริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิตที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	68

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุพอลิเมอร์ มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในรูปของผลิตภัณฑ์สิ่งทอ และพลาสติก ด้วยสมบัติเด่นหลายประการที่สามารถตอบสนองการใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เช่น น้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน ทนกรด ทนด่าง เป็นฉนวนความร้อนและไฟฟ้า ทนต่อสภาพดิน ฟ้า อากาศ ราคาถูกและขึ้นรูปได้ง่าย สามารถทำให้มีสีสันทัดตามต้องการได้ เนื่องจากความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมทำให้มีการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์อย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้มีอัตราการใช้งานวัสดุพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ถุกย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ และขณะนี้ยังไม่มีวิธีกำจัดขยะจากวัสดุพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพเพียงพอ โดยขยะเหล่านี้อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ขยะที่เกิดจากการใช้งานในอาคารบ้านเรือนหรือสำนักงาน และขยะที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งไม่สามารถถูกกำจัดได้ทันกับปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดปัญหาปริมาณขยะวัสดุพอลิเมอร์เพิ่มตามมาเช่นกัน

ดังนั้น การกำจัดและลดปริมาณของขยะวัสดุพอลิเมอร์อย่างมีประสิทธิภาพ และทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด ย่อมเป็นส่วนหนึ่งของการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งการกำจัดและลดปริมาณเศษขยะวัสดุพอลิเมอร์ทั้งที่อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์พลาสติกและสิ่งทออย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ การนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการใช้งาน หรือเศษที่เหลือทิ้งในขั้นตอนการแปรรูปไปผ่านการรีไซเคิลด้วยเทคนิคต่างๆ ทั้งวิธีทางกายภาพหรือทางเคมีเพื่อที่จะนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่อีก ซึ่งนอกจากเป็นการช่วยลดปริมาณขยะแล้ว ยังเป็นการประหยัดทรัพยากรธรรมชาติอีกด้วย และนอกจากการรีไซเคิลแล้ว การเตรียมผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหา

การทำพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแทนพลาสติกสังเคราะห์จากปิโตรเคมีเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและได้รับความสนใจในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากเศษหรือขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้น การใช้สารจากธรรมชาติที่สิ่งมีชีวิตสามารถย่อยสลายได้ เช่น การใช้กระดาษเซลลูโลส (ผลิตภัณฑ์จากเซลลูโลส) แทนพอลิเอทิลีนในการห่อของ แต่เซลลูโลสยังมีสมบัติบางประการที่ด้อยกว่าพอลิเอทิลีน เช่น สมบัติในการป้องกันและเก็บความชื้น ซึ่งยังคงเป็นสมบัติที่จำเป็นเมื่อนำมาใช้งาน ดังนั้น เพื่อให้ได้สมบัติของวัสดุตามต้องการควรเลือกพอลิเมอร์จากธรรมชาติ เช่น แป้ง เซลลูโลส และโปรตีน เป็นต้น มาใช้เป็นสาร

ตัวเติมในพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเพื่อให้เป็นพอลิเมอร์ผสมหรือวัสดุเชิงประกอบที่มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากสารตัวเติมเหล่านี้จะถูกจุลินทรีย์ที่มีในธรรมชาติบริโภคไปจึงเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของพอลิเมอร์ ทำให้จุลินทรีย์สามารถแทรกซึมเข้าไปในพอลิเมอร์สังเคราะห์ได้

การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่เป็นผลมาจากการที่วัสดุถูกทำลายโดยจุลินทรีย์ที่เรียกว่า microbial degradation ซึ่งจุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์หลากหลายชนิดที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับทั้งพอลิเมอร์สังเคราะห์และพอลิเมอร์ธรรมชาติ การทำลายพอลิเมอร์ด้วยเอนไซม์จัดเป็นกระบวนการทางเคมี เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับจุลินทรีย์เพื่อใช้เป็นอาหาร การเข้าทำลายของจุลินทรีย์ในพอลิเมอร์เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิกว้าง โดยอุณหภูมิที่มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มากที่สุด คือ 60-70 องศาเซลเซียส หรือเป็นการย่อยสลายโดยสิ่งมีชีวิตขนาดใหญ่ ที่เรียกว่า microorganism degradation เช่น หนอน สัตว์ที่มีฟันแทะ เช่น หนู หรือกระรอก

ในปัจจุบันเศษใยฝ้ายที่เหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมในแต่ละปี มีปริมาณสะสมจำนวนมาก จึงกลายเป็นปัญหาสำคัญของโรงงานในการกำจัดวัสดุเหลือทิ้ง จึงควรมหาแนวทางในการนำเศษใยฝ้ายเหล่านี้กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ รวมทั้งช่วยเพิ่มมูลค่าให้มากขึ้นอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วัสดุจากธรรมชาตินี้มาทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด เพื่อเตรียมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส และนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในพลาสติก อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เนื่องจากอนุภาคของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีรูปร่างเป็นเส้นใยจึงได้มีการใช้ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเป็นสารเสริมแรงกับพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น ไนลอน [1] พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [2] และยางธรรมชาติ [3] เป็นต้น และพบว่ามีการใช้ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเป็นสารเสริมแรงแทนการใช้สารเสริมแรงสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว ทัลค์ เป็นต้น

พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกเชิงพาณิชย์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เครื่องใช้ภายในบ้าน และอุปกรณ์รถยนต์ เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสม แต่พอลิโพรพิลีนยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ มี ความทนแรงกระแทกต่ำเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งการปรับปรุงความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนด้วยการใส่วัสดุคล้ายยางจะสามารถเพิ่มความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนให้เพิ่มมากขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้ทดลองเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นสารตัดแปรความทนแรงกระแทกให้กับพอลิโพรพิลีน และทำการเสริมแรงด้วยการใส่ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเป็นสารเสริมแรง นอกจากช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ ยังช่วยด้านการย่อยสลายพอลิโพรพิลีนด้วยกระบวนการทางชีวภาพอีกด้วย จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ได้มีการ



ปรับปรุงสมบัติ และลดต้นทุนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยการใส่สารเติมแต่ง เช่น เซลลูโลส แอซิเตด [4] แป้งข้าวโพด [5] ไคโตซาน [6] เป็นต้น และการใช้เส้นใยเซลลูโลสจากธรรมชาติในการเสริมแรง เช่น เปลือกข้าว [7] ชานอ้อย [8] เป็นต้น

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี จัดเป็นอะดิฟาทิกเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเตอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีสมบัติเชิงกลคล้ายกับเทอร์โมพลาสติกโดยทั่วไป เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีน เป็นต้น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีคุณสมบัติการหลอมเหลว ความแข็งแรง และความเหนียวใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีคุณสมบัติการหลอมเหลวและค่าความทนแรงดึงอยู่ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิโพรพิลีน และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์

อย่างไรก็ตาม พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว จึงมีปัญหาเรื่องความเข้ากันได้กับไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่มีขั้วจากหมู่ไฮดรอกซิล จึงมีการใส่สารเพิ่มเข้ากันได้ (compatibilizer) หรือสารคู่ควบ (coupling agent) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้ หรืออันตรกิริยาระหว่างวัฏภาค

ดังนั้น เพื่อตอบสนองความต้องการจึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์พลาสติกให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จะทดลองเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิโพรพิลีนด้วยพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งได้แก่ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) และไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส (microcrystalline cellulose, MCC) ซึ่งหากงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้มีสมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้น และยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 พอลิโพรพิลีน [9]

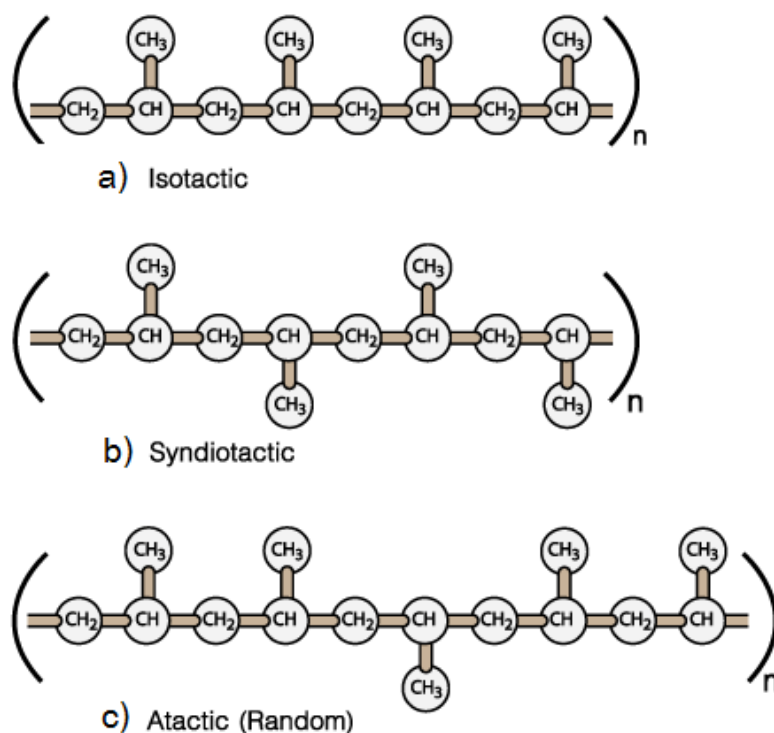
พอลิโพรพิลีนจัดเป็นพอลิเมอร์ประเภทโอเลฟินที่ถูกพัฒนามาแต่อดีต หลังจากที่พอลิเอทิลีนได้ออกสู่ตลาดราว 15 ปี ได้มีการพัฒนาสังเคราะห์พลาสติกชนิดใหม่ที่มีสมบัติแตกต่างจากพอลิเอทิลีน ซึ่งได้แก่ พอลิโพรพิลีน จากแก๊สโพรพิลีน ในปี พ.ศ. 2497 ศาตราจารย์กิลลิโอแนตตา (Prof. Giulio Natta) ชาวอิตาลี ได้มีการนำตั้งเร่งปฏิกิริยาจากงานวิจัยของ ศาตราจารย์คาร์ล ซีเกลอร์ (Prof. Karl Ziegler) ชาวเยอรมัน ซึ่ง Ziegler ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับความร้อนและความดันต่ำ ในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(HDPE) ทำให้พบว่าเกิดแก๊สโพรพิลีน(CH)ที่นำมาใช้ในการเตรียมพอลิโพรพิลีนที่น้ำหนักโมเลกุลสูงแตกต่างกันออกไป จากการปรับเปลี่ยนรูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสามารถแบ่งชนิดของพอลิโพรพิลีนตามลักษณะการจัดเรียงตัวของหมู่เมทิลได้ 3 แบบ ดังนี้

1. ไอโซแทกติก (isotactic) พอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวแบบไอโซแทกติก จะมีหมู่เมทิล (methyl) เกาะอยู่กับสายโซ่หลัก โดยจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันตลอดทั้งสายโซ่ ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบที่สุด จึงทำให้พอลิโพรพิลีนชนิดนี้มีความเป็นผลึก (Crystalline) ค่อนข้างสูง

2. ซินดีโอแทกติก (syndiotactic) พอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวแบบซินดีโอแทกติกจะมีหมู่เมทิล (methyl) เกาะสลับกันอยู่คนละข้างบนสายโซ่หลัก จึงมีความเป็นระเบียบลดลง ทำให้มีความเป็นผลึกลดลง

3. อะแทกติก (atactic) พอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวแบบซินดีโอแทกติก จะมีหมู่เมทิล (methyl) เกาะอยู่สลับกันแบบไม่เฉพาะเจาะจงบนสายโซ่หลัก ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้ไม่มีความเป็นระเบียบเหมือนกับซินดีโอแทกติก มีความเป็นผลึกน้อย หรือมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) มากกว่า

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตา ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิโพรพิลีนมอนอเมอร์ จะสามารถควบคุมการจัดเรียงตัวของหมู่เมทิลบนสายโซ่หลักได้ ทำให้เกิดโครงสร้างที่ต่างกัน 3 แบบดังกล่าว จากโครงสร้างที่ต่างกันทำให้มีสมบัติที่ต่างกัน โดยไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจะมีความหนาแน่นสูงเหมือนพอลิเอทิลีน มีจุดอ่อนตัวสูงกว่าและมีความแข็งแรงกว่าแบบอื่นๆ ซึ่งส่วนที่เป็นอสัณฐานจะทำให้ความแข็งแรงลดลง [10,11]



ภาพที่ 2.1 ชนิดของพอลิโพรพิลีนตามลักษณะโครงสร้างสเตอริโอ (stereo configuration)

a) isotactic, b) syndiotactic, และ c) atactic

### การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนสังเคราะห์จากการใส่แก๊สโพรพิลีนเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ (reactor) ภายใต้ความดันต่ำ (2-4 บาร์) ที่อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเฉื่อย เช่น บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ใช้ตัวกลางเฉื่อย เช่น น้ำมันดีเซล โทลูอีน หรือเฮกเซน ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตาที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ ไททาเนียมเตตระคลอไรด์-อะลูมิเนียมอัลคิล (TiCl<sub>4</sub>-RAI) เมื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์แล้วจะตกตะกอนออกมาหลังจากที่ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันสิ้นสุดลง เนื่องจากพอลิโพรพิลีนไม่ละลายในตัวกลางเฉื่อย ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตาจะถูกทำลายลงจากการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล เอทานอล หรือโพรพานอล สารทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้ (ยกเว้นพอลิเมอร์) สามารถสกัดออกได้ด้วยกรดไฮโดรคลอริกในแอลกอฮอล์ จากนั้นจึงนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปเซนตริฟิวจ์และทำให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส

## สมบัติของพอลิโพรพิลีน

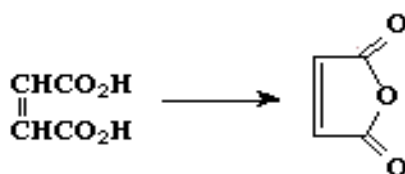
การสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาซีเกลอร์-เนตตาจะได้พอลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 60,000 ถึง 200,000 มีความเป็นผลึกสูง มีความหนาแน่น 0.905 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) 164-170 °C มีสมบัติเชิงกลดีมาก เช่น เหนียว แข็งแกร่ง และมีความทนแรงดึงสูง เนื่องจากมีความเป็นผลึกสูง นอกจากนี้ ความเป็นผลึกยังช่วยสกัดการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันได้ดี ไขมันและออกซิเจนซึมผ่านได้ดี สามารถทนกรดและเบสได้ดี ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าเกิน 80 °C ขึ้นไปจะละลายในไฮโดรคาร์บอนอะโรมาติก และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน พอลิโพรพิลีนมีจุดหลอมตัวสูงกว่าพอลิเอทิลีน จึงทนความร้อนได้ดีกว่าพอลิเอทิลีน มีความมัน (Gloss) ที่ดี มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีมากสามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีราคาถูก หากแต่พอลิโพรพิลีนยังมีข้อจำกัดในการใช้งานบางอย่าง เช่น เปราะ และแตกง่ายที่อุณหภูมิต่ำๆ เชื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่ชอบน้ำ ติดสียาก มีเสถียรภาพต่อความร้อน แสง และตัวออกซิไดซ์ต่ำกว่าพอลิเอทิลีน เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยไฮโดรเจนอะตอมที่เกิดพันธะกับคาร์บอนองศาที่ 3 (tertiary carbon atom) ดังนั้น พอลิโพรพิลีนทางการค้าต้องมีการเติมสารแอนติออกซิแดนต์ เพื่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้นเหมาะแก่การใช้งาน

## การใช้ประโยชน์

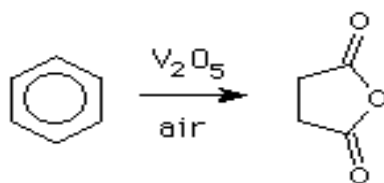
พอลิโพรพิลีนมักใช้ทำของใช้ในครัวเรือน แผ่นฟิล์มสำหรับห่อ ถุงพลาสติกใส่ของร้อนชนิดใส หลอด กล่องบรรจุอาหาร กล่องใส่แบตเตอรี่ กระเป๋า ถังขยะ อุปกรณ์รถยนต์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ บรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรม ขวดใส่สารเคมี กระป๋องน้ำมันเครื่อง อุปกรณ์ทางการแพทย์ และมีการนำไปทำเส้น (filament) ทำแปรง พรม เชือก กระสอบข้าว และถุงบรรจุปุ๋ย

## 2.2. มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [10]

มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารอินทรีย์ สังเคราะห์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของบิวทีน [12] ดังแสดงในภาพที่ 2.2 อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน ดังแสดงในภาพที่ 2.3 มีสูตรเคมี  $C_2H_2(CO)_2O$  สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์แสดงไว้ในตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.2 การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของบิวทีน [14]

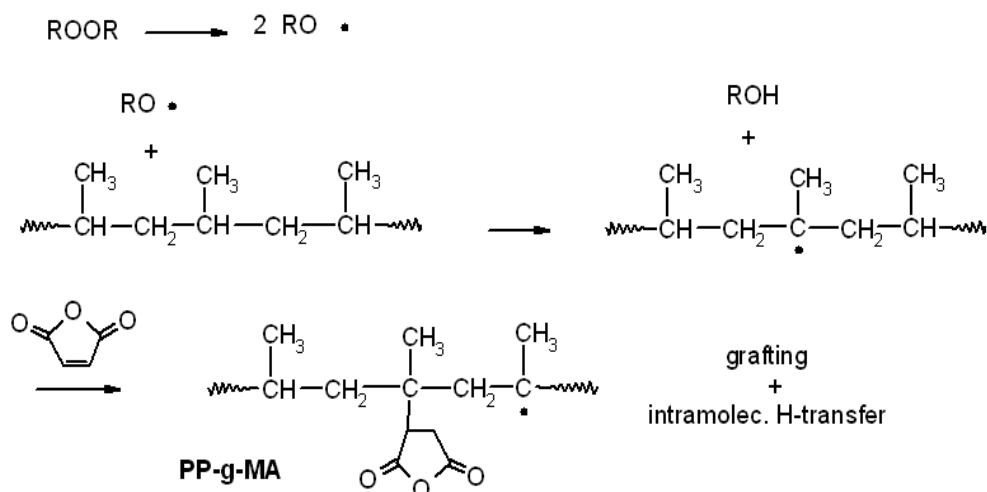


ภาพที่ 2.3 การสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเบนซีน [13]

ตาราง 2.1 สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [15]

Molar mass	98.06 g/mol
Appearance	White crystals
Density	1.48 g/cm <sup>3</sup>
Melting point	52.8 °C
Boiling point	202 °C

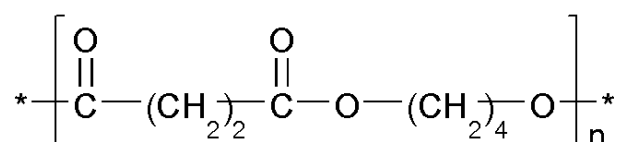
การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์แสดงไว้ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งสามารถทำได้ทั้งกระบวนการแบบหลอมเหลวและกระบวนการแบบสารละลาย โดยกระบวนการแบบหลอมเหลวสามารถผสมด้วยเครื่องมือในการผสมหลายประเภท เช่น เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว และเครื่องอัดรีดสกรูคู่ เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [16]

### 2.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [17-19]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี จัดเป็นอะดิฟาทิกเทอร์โมพลาสติก พอลิเอสเตอ์แบบเส้นเช่นเดียวกับพอลิแลกติกแอซิด โดยมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [17]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น (condensation polymerization) ระหว่าง 1,4 บิวเทนไดออล (1,4-butane diol) และซัคซินิกแอซิด (succinic acid) ได้เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกที่มีความยืดหยุ่นมากกว่าพอลิแลกติกแอซิด ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ แบคทีเรียและเชื้อรา นอกจากนี้ ยังสามารถย่อยสลายทางชีวภาพอย่างรวดเร็วในดิน ทะเล ทะเลสาบ และกองขยะ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีสมบัติเชิงกลคล้ายกับเทอร์โมพลาสติกโดยทั่วไป เช่น พอลิเอทิลีน พอลิพอฟิลีน และพอลิสไตรีน เป็นต้น มีความแข็งแรง และความเหนียวใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีอุณหภูมิการหลอมเหลว และค่าความทนแรงดึงอยู่ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิพอฟิลีน มีจุดหลอมเหลวประมาณ 90-120 องศาเซลเซียส คล้ายพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ -45 ถึง -10 องศาเซลเซียส และสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการเดียวกับที่ใช้กับพอลิโพลีเอทิลีนทั่วไป

#### สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพลาสติกที่มีสีขาวมีความหนาแน่น 1.23 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับพอลิแลกติกแอซิด แต่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าพอลิแลกติกแอซิดมาก และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วต่ำมาก โดยทั่วไปพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีสมบัติเชิงกลสูง และทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยไม่เสียสภาพ อีกทั้งสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์และยังย่อยสลายได้ดีอีกด้วย

## การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเกิดผ่านกระบวนการ hydrobio-degradable โดยเริ่มย่อยสลายทางชีวภาพผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ซึ่งจะเกิดที่ตำแหน่งพันธะเอสเทอร์ ส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลง และจากนั้นจึงเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ต่อไป

## การนำไปใช้ประโยชน์ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถใช้แทนพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีนและพอลิแลกติกแอซิด เป็นต้น ซึ่งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น หลอดฉีดยา ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง ขวดน้ำ ฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร ผลิตภัณฑ์อนามัย เบาะโฟม และใช้เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตร กระดาษต้นไม้ วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ย รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น ส่วนประกอบและชิ้นส่วนตกแต่งภายในรถยนต์

## 2.4 วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) [20]

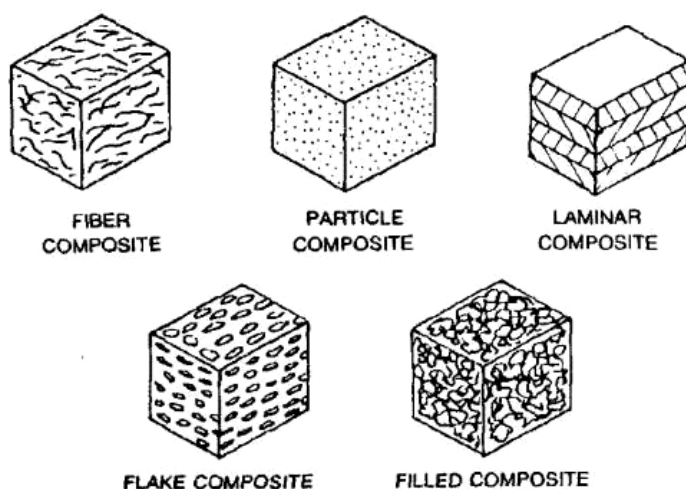
วัสดุเชิงประกอบ หมายถึง วัสดุซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิด มีวัฏภาคที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 วัฏภาค ขึ้น โดยวัสดุคอมพอสิตจะประกอบด้วยวัฏภาคเสริมแรง (reinforce phase) ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของเส้นใย อนุภาค แผ่นหรือชิ้นเล็กๆ ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจาย (dispersed phase) อยู่ในเมทริกซ์ (matrix) อาจเป็นโลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์ อีกทั้งยังสามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างวัฏภาคได้แม้ในระดับจุลภาค (microscopic)

การแบ่งประเภทของวัสดุเชิงประกอบอาจแบ่งตามเมทริกซ์ได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มที่มีพอลิเมอร์เป็นส่วนผสมหลัก (Fiber-reinforced polymers, FRP)
2. กลุ่มที่มีเซรามิกเป็นส่วนผสมหลัก (Ceramic-matrix composite, CMC)
3. กลุ่มที่มีโลหะเป็นส่วนผสมหลัก (Metal-matrix composite, MMC)

นอกจากนี้ วัสดุเชิงประกอบอาจแบ่งตามลักษณะของสารตัวเติมเสริมแรง ได้ดังนี้

1. คอมพอสิตที่มีสารตัวเติมเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibrous composites)
2. คอมพอสิตที่มีสารตัวเติมเสริมแรงเป็นอนุภาค (Particulate composites)
3. คอมพอสิตที่มีสารตัวเติมเสริมแรงเป็นชิ้นเล็กๆ (Flake composites)
4. คอมพอสิตที่มีสารตัวเติมเสริมแรงเป็นชั้นหรือแผ่น (Laminar or layered composites)



ภาพที่ 2.6 วัสดุเชิงประกอบที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงลักษณะต่างๆ

วัสดุพอลิเมอร์ในทางการค้าส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์คอมพอสิต เช่น อะคริลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีนโคพอลิเมอร์ โฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ ยางที่ผสมสารเติมแต่งต่างๆ ตามประเภทการใช้งาน เทอร์โมเซตเรซินผสมตัวเติม และพลาสติกผสมเส้นใยแก้ว เป็นต้น ความนิยมในการใช้วัสดุเชิงประกอบมากกว่าพอลิเมอร์เนื้อเดียว เนื่องจากมีข้อดีเหนือกว่าหลายประการ ได้แก่

- เพิ่มความเหนียว และความต้านแรงกระแทก
- เพิ่มความแข็งตึง ความแข็งแรง และคงรูปร่างได้ดีกว่า
- ปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า
- ลดต้นทุนการผลิต
- ทำให้อุณหภูมิการบิดตัวสูงขึ้น
- ลดการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ

จากข้อดีบางประการของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวนี้ อาจมีข้อเสียด้วย ดังนั้นการใช้งานวัสดุเชิงประกอบจึงควรพิจารณาทั้งข้อดีและข้อเสียของวัสดุแต่ละชนิด วัสดุเชิงประกอบมีข้อเสียบางประการ เช่น การขึ้นรูปยาก มีความหนืดเพิ่มขึ้น และอาจทำให้สมบัติเชิงกล และทางกายภาพบางประการลดลง เป็นต้น สมบัติของวัสดุเชิงประกอบจะขึ้นกับสมบัติของส่วนประกอบต่างๆที่ใช้ เช่น ลักษณะสัณฐานวิทยาของระบบ ลักษณะของตัวเติมและลักษณะผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่แตกต่างกัน เป็นต้น



ปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม (polymer-filler interaction) มี 4 แบบ คือ

1. อนุภาคเดี่ยวและอนุภาคที่รวมตัวเป็นกลุ่มของสารตัวเติมอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ และไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง
2. อนุภาคของสารตัวเติมกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยพอลิเมอร์จะเคลือบที่ผิวของสารตัวเติม พอลิเมอร์ผสมลักษณะนี้จะมีค่าความทนแรงดึงเพิ่มเล็กน้อย และมีการยึดตัวลดลง ซึ่งเป็นการผสมสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุนในการผลิต
3. เกิดการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และผิวของอนุภาคสารตัวเติม โดยความแข็งแรงของวัสดุประกอบจะเพิ่มขึ้น กรณีนี้การใส่สารตัวเติมจะมีลักษณะเป็นวัสดุเสริมแรง
4. เกิดพันธะทางเคมีระหว่างพอลิเมอร์และผิวของอนุภาคสารตัวเติม ซึ่งความแข็งแรงของวัสดุคอมพอสิตจะเพิ่มขึ้น กรณีนี้สารตัวเติมจะมีลักษณะเป็นวัสดุเสริมแรง

## 2.5 สารตัวเติม (Fillers) [21,22]

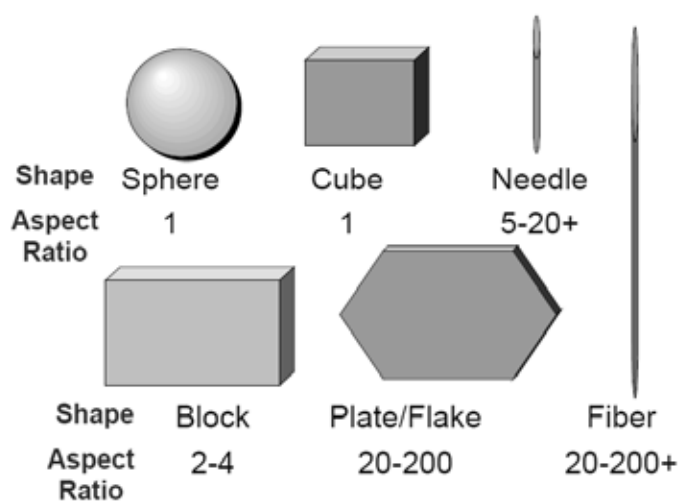
สารตัวเติม หมายถึง สารที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์ มีจุดประสงค์เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ สารตัวเติมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด ซึ่งเป็นทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ เช่น โพลลาสโตนท์ ทัลก์ แคลเซียมคาร์บอเนต แก้ว ไมกา และเยื่อไม้ เป็นต้น ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. สารตัวเติมชนิดไม่ทำปฏิกิริยา (inert filler) หรือสารเพิ่มเนื้อ (extender) เป็นสารตัวเติมสำหรับลดต้นทุนการผลิต จะทำให้สมบัติในเทอร์โมพลาสติกที่ผสมสารตัวเติมชนิดนี้ที่เปลี่ยนแปลงหลายประการ เช่น ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มอดุลัสการยึดตัว ความต้านการกดหัก ความต้านแรงบิดโค้งเพิ่มขึ้น ลดการหดตัว ความแข็งเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการบิดตัว (heat deflection temperature) เพิ่มขึ้น และลดต้นทุนการผลิต เป็นต้น

2. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมที่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของพลาสติกผสมให้ดีขึ้น ซึ่งสมบัติในเทอร์โมพลาสติกเมื่อผสมตัวเติมชนิดเสริมแรงเกิดการเปลี่ยนแปลงหลายประการ เช่น ความทนแรงดึง ความต้านแรงกดหัก มอดุลัส และการยึดตัวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการบิดตัวเพิ่มขึ้น ลดการหดตัว เป็นต้น

การนำสารตัวเติมไปใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติกจำเป็นต้องพิจารณาสมบัติที่สำคัญหลายประการเช่น

- ลักษณะอนุภาค (particle shape) อนุภาคของสารตัวเต็มมีรูปร่างต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ได้แก่ บล็อก (block) แผ่นหรือเกล็ด (plate or flake) ทรงเหลี่ยมลูกบาศก์ (cube) ทรงกลม (sphere) เส้นใย (fiber) แบบเข็มหรือแท่ง (needle or acicular) ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความหนาของอนุภาค (aspect ratio) แตกต่างกัน โดยจะมีอิทธิพลต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิตอย่างมาก



ภาพที่ 2.7 รูปร่างของอนุภาคสารตัวเต็ม

- การกระจายขนาดอนุภาค (particle size distribution) สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน จะวัดโดยใช้ตะแกรงร่อน ถ้ามีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน จะวัดโดยวิธีการตกตะกอน การกระจายขนาดอนุภาคจะมีอิทธิพลต่อสมบัติของพลาสติก

- พื้นที่ผิว (surface areas) การเพิ่มพื้นที่ผิวจะทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการยึดเกาะระหว่าง 2 วัสดุ คือ พอลิเมอร์ และสารตัวเต็มจะเกิดขึ้นที่ผิว ซึ่งสามารถวัดพื้นที่ผิวได้โดยใช้หลักการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ตามวิธีเบรนนอร์-เอ็มเม็ทเทลเลอร์ (BET)

- การจัดเรียงตัวของอนุภาค (particle packing) เป็นความสามารถในการจัดเรียงของอนุภาคในวัสดุคอมพอสิต จะพิจารณาในรูปของสัดส่วนการรวมตัว (packing fraction) ซึ่งได้แก่ ปริมาตรทั้งหมดที่สารตัวเต็มใช้ในการจัดเรียงตัวในปริมาตรของพอลิเมอร์เมื่อปริมาณสารตัวเต็มที่ใช้สูงสุด ดังนั้น การใช้สารตัวเต็มที่มีค่าสัดส่วนการรวมตัวสูงแสดงว่ามีพอลิเมอร์แทรก

อยู่ระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมมาก มีการสัมผัสกันของอนุภาคต่ำ ซึ่งจะทำให้วัสดุคอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลดี

- ส่วนประกอบทางเคมี (chemical composition) เป็นสมบัติที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิตที่ทำการขึ้นรูป

สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุ (mineral fillers) ในธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่จะมีรูปร่างของอนุภาคแบบเดี่ยว แต่จะมีบางชนิด เช่น ทัลค์ เคาลิน โดยทั่วไปมีรูปร่างอนุภาคเป็นแบบแผ่นแต่จะมีรูปร่างอนุภาคแบบอื่นปะปนอยู่ด้วย ขึ้นอยู่กับแหล่งวัตถุดิบและกระบวนการผลิต [23]

ผลของการใช้สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุจะขึ้นกับ

- ขนาดของอนุภาค (size)
- รูปร่างของอนุภาค (shape)
- พื้นที่ผิวของอนุภาค (surface area)
- ความเข้ากันได้ของอนุภาคสารตัวเติมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ (particle-matrix compatibility)

ตาราง 2.2 การใช้สารตัวเติมที่ได้จากแร่ธาตุในอุตสาหกรรมพลาสติก [24]

สารตัวเติมจากแร่ธาตุ	พอลิเมอร์	หมายเหตุ
แบไรต์ (Barytes)	PU	ช่วยเพิ่มความถ่วงจำเพาะ
แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)	PVC, ABS, fluoroplastics, polyolefins, PP, PS, epoxy, phenolic, TPE, PU	เป็นสารตัวเติมที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย
เฟลด์สปาร์ (Feldspar)	PVC, acrylic, PP, PS, epoxy	ทนทานต่อสภาพอากาศและสารเคมี

สารตัวเติมจากแร่ธาตุ	พอลิเมอร์	หมายเหตุ
เคลลิน (Kaolin)	TPE, nylon, polyolefins, PU, PVC	ใช้งานมากที่สุดในการทำสายไฟ และสายเคเบิล
ไมกา (Mica)	PP, ABS, fluoroplastics, nylon, PC, TPE, polyolefins, thermosets	มีเสถียรภาพทางรูปร่าง ช่วยในการเสริมแรงได้
ซิลิกา (Silica)	epoxy, ABS, polyolefins, PS, PVC, TPES, PU	เสริมความแข็งแรงให้กับพลาสติก
ทัลค์ (Talc)	PP, Nylon, polyolefins, PVC, phenolic, PU, PS	ทำให้พลาสติกมีความแข็งตึง และความต้านทานต่อการคืบ
โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite)	Nylon, PC, TPE, PP, PS, polyolefins, thermosets	เพิ่มความทนแรงดึง

## 2.6 การสลายตัวของพลาสติก

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์พลาสติก ซึ่งมีอัตราการใช้งานสูงและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกในอนาคต เมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุชนิดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติเด่นหลายประการ และทำให้ปริมาณขยะที่เกิดจากบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ใช้แล้วเพิ่มมากขึ้นจนก่อให้เกิดเป็นปัญหากับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากขยะพลาสติกเหล่านี้ใช้เวลาในการย่อยสลายตามธรรมชาติค่อนข้างนานหรืออาจจะไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ ดังนั้น นักวิจัยจึงสนใจที่จะผลิตพลาสติกชนิดที่ย่อยสลายได้ (degradable plastics) ขึ้นมา เพื่อย่นระยะเวลาในการสลายตัวของพลาสติกให้เร็วขึ้น ซึ่งมีการใช้กันมานานแล้วทางด้านการแพทย์ วัสดุทางการแพทย์ เช่น ไหมละลายได้สำหรับเย็บแผล แคปซูลบรรจุยาคุมกำเนิดชนิดฝัง และแคปซูลบรรจุยาต่างๆ เป็นต้น ซึ่งล้วนเป็นพลาสติกสังเคราะห์จากสารที่มีในธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส และกรดแลกติก เป็นต้น

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ หมายถึง พลาสติกสังเคราะห์ที่มนุษย์ทำขึ้น ซึ่งจะสามารถย่อยสลายจนกระทั่งในที่สุดจะรวมตัวเป็นเนื้อดิน และการสลายตัวตามธรรมชาติของพลาสติกสามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การสลายตัวโดยสภาวะแวดล้อม (Environment degradation) คือ พลาสติกจะเกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ จากผลของสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ แสงอาทิตย์ ความร้อน น้ำ สภาพอากาศ และจุลินทรีย์ เป็นต้น

2. การสลายตัวด้วยแสง (Photodegradation) คือ พลาสติกจะเกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ เมื่อได้รับแสงอาทิตย์ หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet radiation) ซึ่งจะต้องทำให้พลาสติกได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงในช่วงระยะเวลาหนึ่งจึงจะเกิดการเสื่อมสภาพ โดยพลาสติกมีลักษณะเปราะแตกหักเป็นชิ้นเล็กๆได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าได้มีการใช้พลาสติกประเภทนี้เหมาะสำหรับด้านการเกษตร โดยจะใช้แผ่นพลาสติกคลุมดินในการเพาะปลูก มีข้อดี คือ สามารถควบคุมระดับความชื้นในดิน และจะลดภาวะการถนิน้ำ ป้องกันแมลง สามารถควบคุมอุณหภูมิของดินได้โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นประมาณ 5.5 องศาเซลเซียส เมื่อใช้พลาสติกชนิดใส และจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1.7-2.7 องศาเซลเซียส เมื่อใช้พลาสติกสีดำหรือสีคล้ำ และเมื่อผ่านพ้นฤดูการเพาะปลูกแล้ว พลาสติกนี้จะกรอบปนได้ โดยเฉพาะถ้าใช้พลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีนที่สลายออกไซด์ ในการคลุมดิน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการย่อยด้วยแสงแล้วนี้จะไม่ส่งผลต่อวัฏจักรของคาร์บอน (carbon cycle) ในดินเลย

3. การสลายตัวโดยการทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนหรือโอโซนในอากาศ (oxidation degradation)

4. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) คือ การที่พลาสติกเกิดการสลายตัวเกิดจากการย่อยสลายธาตุคาร์บอนในโมเลกุลโดยจุลินทรีย์ (microorganism) เช่น แบคทีเรีย (bacteria) และเชื้อรา (fungi) อาจทำได้โดยการเติมสารอินทรีย์ซึ่งเป็นอาหารของจุลินทรีย์ลงในขั้นตอนของการผสมพลาสติกเพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายโดยการปล่อยน้ำย่อย หรือเอนไซม์ (enzyme) ออกมาย่อยสลายสารที่เป็นอาหาร อย่างไรก็ตาม ต้องมีความชื้น อุณหภูมิ และอากาศที่เหมาะสม และจะใช้เวลาในการย่อยสลายนานประมาณ 2-3 ปี มีผลการทดลองย่อยสลายพลาสติกด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยทำการพ่นเชื้อจุลินทรีย์ (*Aspergillus niger*, *Penicillium funiculosum*, *Chaetium globosum*, *Gliocodium vireus*, *Aureobasidium pullulans*) ลงบนชิ้นพลาสติกซึ่งวางอยู่บนก้อนขี้เลื่อยเชื้อที่มีสารอาหารอื่นๆ ครอบด้วย ยกเว้นสารอาหารที่เป็นธาตุคาร์บอน จากนั้นทำการเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิประมาณ 28-30 องศาเซลเซียส เวลา 21 วัน พบว่าเชื้อเจริญจะเติบโตได้ดีที่สุดบนชิ้นพลาสติกประเภทพอลิเอสเตอร์ที่เตรียมมาจากอะดิฟาทิกเอสเทอร์ไดออกไซด์ และเจริญได้น้อยบนส่วนพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน และพีวีซีที่ใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นพลาสติกไซเซออร์

### 2.6.1 การย่อยสลายทางชีวภาพ [25-30]

พอลิเมอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส แป้ง และโปรตีน เป็นพอลิเมอร์ที่สิ่งมีชีวิต เช่น จุลินทรีย์จะสามารถย่อยสลายได้ แต่พอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนใหญ่จะไม่ได้ถูกย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากสารสังเคราะห์เหล่านี้เพิ่งเกิดขึ้นไม่นานมานี้ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ยังไม่ยาวนานพอที่สร้างสิ่งมีชีวิตที่มีวิวัฒนาการมาเพื่อให้สามารถในการย่อยสลายสารสังเคราะห์ได้ ดังนั้นการเพิ่มความสามารถของการถูกย่อยสลายของพลาสติกให้มากขึ้น นิยมกันใช้กันมาก ได้แก่

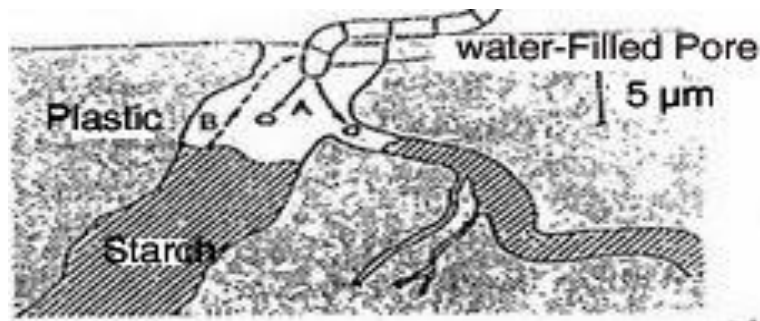
1. การใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) แทนพลาสติกสังเคราะห์ ซึ่งสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การใช้เซลลูโลส (cellophane) ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากเซลลูโลสแทนพอลิเอทิลีนในการห่อสิ่งของ แต่ยังคงสมบัติบางประการ เช่น สมบัติในการกันและเก็บความชื้น มีความแข็งแรงต่ำ ความสามารถเชื่อมให้ติดกันด้วยความร้อน และมีอายุการใช้งานสั้น

2. การสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ๆ ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งมีหลายชนิดเช่น acrolein-acrylic acid polymers, polyamidotriazoles, polyphosphazenes พอลิเมอร์เหล่านี้ได้มาจาก amino acid ester และ acrylonitrile copolymer ที่ผ่านการไฮโดรไลซ์แล้ว

3. การใช้พอลิเมอร์ผสม โดยนำพอลิเมอร์ธรรมชาติผสมกับพลาสติก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ ซึ่งพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยม ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส และโปรตีน เป็นต้น มีการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์สังเคราะห์เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ เมื่อสารเหล่านี้ถูกจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติบริโภคเข้าไปจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของพอลิเมอร์ จุลินทรีย์จะแทรกซึมเข้าไปในพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งถือเป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์สังเคราะห์นั่นเอง

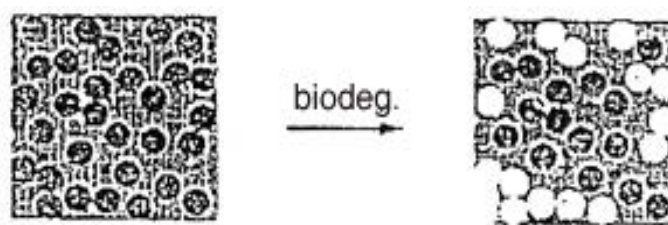
การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นผลจากการที่วัสดุถูกทำลายโดยจุลินทรีย์ ที่เรียกว่า microbial degradation ซึ่งจุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์ที่หลากหลายชนิด และสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ การทำลายพอลิเมอร์ด้วยเอนไซม์นั้นจัดเป็นกระบวนการทางเคมี ซึ่งถูกเหนี่ยวนำด้วยจุลินทรีย์เพื่อให้ได้อาหาร เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับจุลินทรีย์ ซึ่งพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมนำมาผสมกับพลาสติก คือ แป้ง ซึ่งแป้งจะแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของพลาสติก กลไกการย่อยสลายตัวของพลาสติก ในขั้นแรกจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์อะไมเลส (amylase) เข้าย่อยสลายแป้งในพลาสติกผ่านตัวกลางที่เป็น

น้ำ ทำให้แป้งมีโมเลกุลเล็กลงจนสามารถเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.8 และ 2.9



(A คือ การแพร่ของอะไมเลสไปยังแป้ง, B คือ การแพร่ของแป้งที่ถูกย่อยไปยังจุลินทรีย์)

ภาพที่ 2.8 กลไกการย่อยสลายแป้งในพลาสติกโดยจุลินทรีย์ [2, 31]



ภาพที่ 2.9 การหายไปของเม็ดแป้งในพลาสติก [2, 31]

การที่เม็ดแป้งหายจากเนื้อของพลาสติกทำให้พลาสติกนุ่มลงและมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ต่อจากนั้น โลหะและน้ำที่มีอยู่ในดินจะเกิดปฏิกิริยา Auto-oxidation เกิดสารเปอร์ออกไซด์ ซึ่งอัตราการย่อยสลาย ขึ้นกับสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ความเป็นกรด-ด่าง และชนิดของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน รวมถึงความหนาของพลาสติกด้วย

จากการศึกษาพบว่าพลาสติกแต่ละชนิดมีความทนทานต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 ซึ่งแสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนชิ้นพลาสติกประเภทต่างๆ

ตารางที่ 2.3 ความทนทานต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ของพลาสติกประเภทต่างๆ [31]

พอลิเมอร์	การใช้งาน	ความทนทานต่อจุลินทรีย์*
polyethylene	Packaging film, insulation container	VH
Polypropylene	Packaging film	VH
poly (vinyl alcohol)	Packaging film of high chemical stability	VH
Poly (vinylidene chloride)	Packaging film, varnish, fabric	H
poly(vinyl acetate)	Packaging film, varnish, fabric	M
Poly(vinyl alcohol)	Packaging film	H
Polystyrene	Film, foam	H
Poly(methyl methacrylate)	Plexiglas	H
Polytetrafluoroethylene	Insulation	H
Polytrifluorochloroethylene	Insulation	H
Cellulose acetate	Acetate rayon	H
Polyamide	Fabric	L
Poly(ethylene terephthalate)	Fabric	H
Silicone	Coating	H
Phenol formaldehyde	Insulation	H
Urea formaldehyde	Insulation	H

\* VH = very high, H = high, M = moderate, L= low, F= fair



ตารางที่ 2.4 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนชิ้นพลาสติกประเภทต่างๆ [30]

Polymer	Growth rating *
1. Polyethylene (household wrap)	2
2. PVC-epoxidized soybean oil plasticizer	3
3. Polypropylene	1
4. Polystyrene	1
5. Poly(vinylidene chloride)	1
6. Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS)	0
7. ABS-polycarbonate blend	0
8. Butadiene-acrylonitrile rubber	0
9. Styrene-acrylonitrile copolymer	0
10. Rubber-modified polystyrene	0
11. Styrene-butadiene block copolymer	1
12. Poly(methyl methacrylate)	0
13. Poly(ethylene terephthalate)	0
14. Poly(cylohexanedimethanol terephthalate)	0
15. Bisphenol A polycarbonate	0
16. Poly-4 methyl-1-pentene	0
17. Polyisobutylene	0
18. Chlorosulfonated polyethylene	0
19. Cellulose acetate or butyrate	0
20. Nylon-6, nylon-66, nylon-12	0
21. Polyurethane (polyester)	4
22. Caprolactone polyester	4
23. Caprolactone polyester urethane	4
24. Poly(vinyl butyral)	0
25. Polyformaldehyde	0

\* 0 : none, 1 : trace of growth (<10%), 2 : light growth (10-30%),

3 : medium growth (30-60%), 4 : heavy growth (60% to complete coverage)

จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ที่มีความว่องไวต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จะปลดปล่อยเอนไซม์ซึ่งทำให้พอลิเมอร์แตกออกเป็นส่วนเล็กๆ ซึ่งเอนไซม์จะเป็นโปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ และมีหมู่ที่ชอบน้ำ ได้แก่  $-COOH$ ,  $-OH$  และ  $-NH_2$  เป็นองค์ประกอบ และเมื่อพอลิเมอร์ถูกทำให้แตกออกเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลระดับ 500 ถึง 800 จากนั้นก็จะสามารถถูกกินโดยเชื้อจุลินทรีย์ การแตกตัวประเภทนี้เกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมดังต่อไปนี้

1. มีเชื้อจุลินทรีย์ เช่น เชื้อรา หรือเชื้อแบคทีเรีย
2. มีออกซิเจน ความชื้น และธาตุอาหาร
3. มีอุณหภูมิประมาณ 30-60 องศาเซลเซียส
4. มี pH ประมาณ 5-8

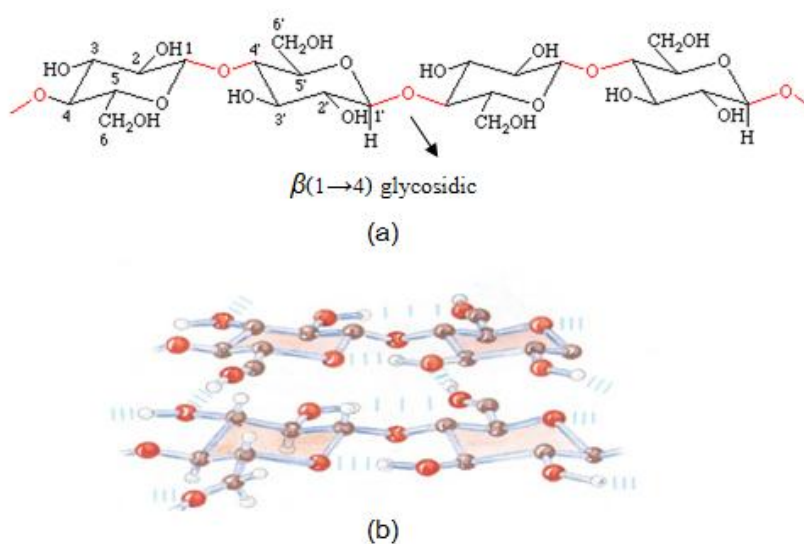
ปัจจุบันเกิดการพัฒนากว้างขวางในด้านเทคโนโลยีและการตลาดของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้หมด ปัญหาก็คือวัสดุเหล่านี้มีราคาแพงมากเมื่อเทียบกับพลาสติกที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ทั่วไป แต่ยังมีการใช้งานในหลายประเภท เช่น ผลิตภัณฑ์ที่จะไปทำให้เกิดเป็นขยะในทะเล หรือพลาสติกที่ใช้ในการเกษตร เช่น ถุงใส่ปุ๋ย หมุดรองตีกอัลฟ บรรจุภัณฑ์อาหาร แผ่นฟิล์มทำผ้าอ้อม แคปซูลยา และเครื่องมือทางการแพทย์ที่ใช้แล้วทิ้ง เป็นต้น

ตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์แล้วสามารถย่อยสลายโดยธรรมชาติได้หมด

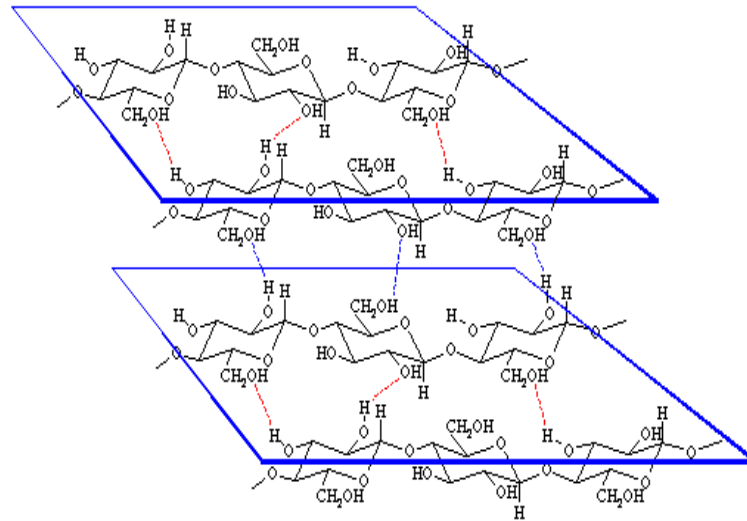
1. Warner Lambert's Noven เป็น starch-based polymer
2. Cargill ผลิต polylactic acid จากข้าวโพด
3. Ecochem ซึ่งเป็นบริษัทร่วมทุนระหว่าง Dupont กับ Con Agra พัฒนา polylactic based homo และ copolymer
4. Polyhydroxybutyl valerate aliphatic polyester โดยบริษัท ICI ประเทศอังกฤษ ใช้ชื่อทางการค้าว่า Biopol
5. Novamont's Master ซึ่งเป็นแป้ง 60% ซึ่งได้รับการยอมรับจาก FDA
6. Union Carbide ผลิต polycaprolactone
7. Air Product ผลิต polyvinyl alcohol vinnex resin สามารถละลายได้ในน้ำ และสามารถสลายตัวได้ทั้งในน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ในสภาวะที่มีความชื้นและแบคทีเรียในดิน

## 2.7 ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส(microcrystalline cellulose) [31-37]

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) เกิดจากมอนอเมอร์ชื่อแอนไฮโดรกลูโคไพราโนส (anhydroglucopyranose) ประกอบด้วยหน่วยย่อยของ D-glucose ในรูป  $\beta$ -D-glucopyranose เกิดการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic linkage) เป็นสายยาว ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 กับคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ในโมเลกุลถัดไป เกิดการจัดเรียงตัวของหน่วยย่อย D-glucose ในลักษณะ chair form ดังแสดงในภาพที่ 2.10 การจัดเรียงตัวเช่นนี้ จะทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสเกิดการเรียงตัวขนานกันอย่างมีระเบียบ เรียกว่า บริเวณที่เป็นผลึก (crystalline region) ส่วนบริเวณที่มีการจัดเรียงโมเลกุลไม่เป็นระเบียบ เรียกว่า บริเวณที่เป็นอสัณฐาน (amorphous region) ดังแสดงในภาพที่ 2.11

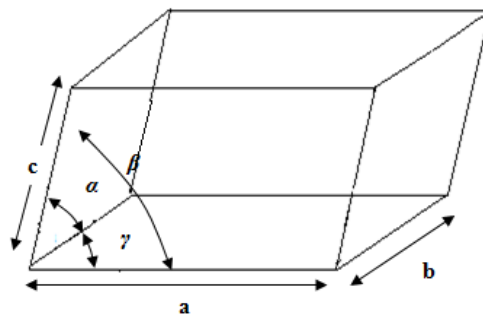


ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของเซลลูโลส



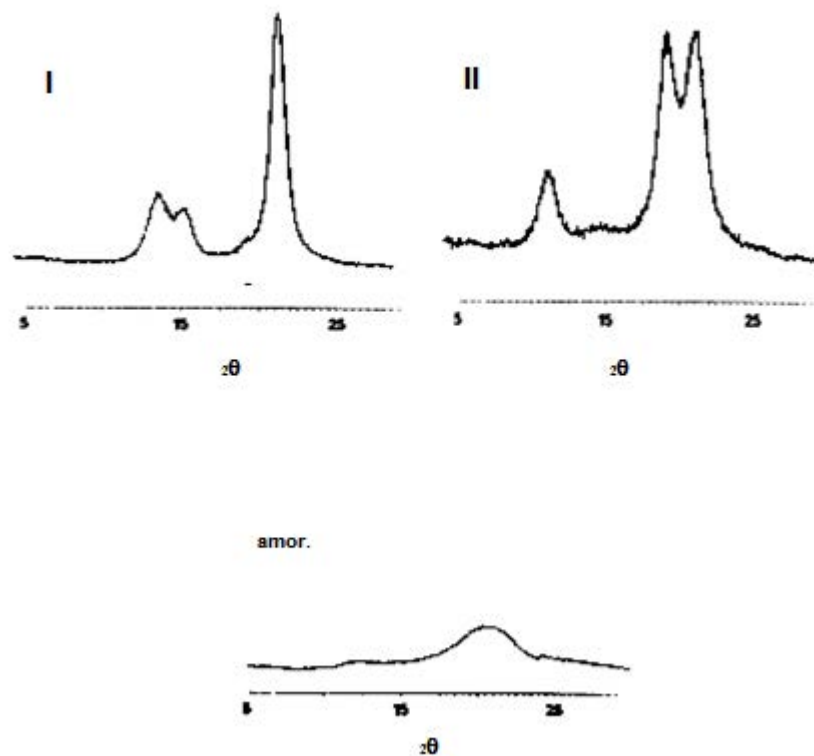
ภาพที่ 2.11 การเรียงโมเลกุลของเซลลูโลส

การเกิดโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส โดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ ผลึกเซลลูโลส I และผลึกเซลลูโลส II ซึ่งเซลลูโลส I มี 2 แบบ คือ เซลลูโลส  $I_\alpha$  โดยมีค่า  $a = 8.27 \text{ \AA}$ ,  $b = 10.38 \text{ \AA}$ ,  $c = 7.85 \text{ \AA}$ ,  $\beta = 96.3^\circ \text{ \AA}$  และเซลลูโลส  $I_\beta$  โดยมีค่า  $a = 8.02 \text{ \AA}$ ,  $b = 10.42 \text{ \AA}$ ,  $c = 7.44 \text{ \AA}$ ,  $\beta = 98.33^\circ \text{ \AA}$  ซึ่งความเสถียรของโครงสร้างของเซลลูโลส  $I_\alpha$  จะน้อยกว่าเซลลูโลส  $I_\beta$  จึงทำให้พบเซลลูโลส  $I_\beta$  ในธรรมชาติมากกว่า เช่น ฝ้าย และวามี ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.12 และผลึกเซลลูโลส II เกิดจากการตัดแปรเซลลูโลส I คือ เซลลูโลสที่ได้จากการคืนสภาพ (regenerated cellulose) เช่น ไลโอเซลล์ (lyocell) หรือวิสโคส (viscose) โดยมีค่า  $a = 8.02 \text{ \AA}$ ,  $b = 10.42 \text{ \AA}$ ,  $c = 7.44 \text{ \AA}$ ,  $\beta = 98.33^\circ \text{ \AA}$ ,  $\gamma = 116.8^\circ \text{ \AA}$  ซึ่งโครงสร้างของเซลลูโลส I จะมีระดับโครงสร้างสูงกว่าโครงสร้างของเซลลูโลส II แต่ผลึกของเซลลูโลส II จะมีความแข็งแรงมากกว่าผลึกของเซลลูโลส I โดยมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.12 [34,36]



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของผลึกเซลลูโลส [34,36]

ลักษณะการเชื่อมต่อนพันธะของโครงสร้างผลึกที่มีความแตกต่างกันระหว่างผลึกเซลลูโลส I และผลึกเซลลูโลส II จะทำให้เกิดการดูดซับลำแสงคลื่นอินฟราเรด (IR) ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และเกิดการหักเหของแสงที่แตกต่างกัน เมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 XRD ดิฟแฟรกโตแกรมของเซลลูโลส I และ II และเซลลูโลสอสัณฐาน [38]

ตารางที่ 2.5 ค่าความถี่จาก IR spectra ของ crystalline polysaccharide

Frequency (cm <sup>-1</sup> )	Assignment	Component
3488	-OH stretching intramolecular hydrogen bonds	Cellulose II
3447	-OH stretching intramolecular hydrogen bonds	Cellulose II
3405	-OH stretching intramolecular hydrogen bonds	Cellulose I
3350	-OH stretching intramolecular hydrogen bonds	Cellulose I and II
3175	-OH stretching intramolecular hydrogen bonds	Cellulose II
2970	CH stretching	Cellulose I and II
2945	CH stretching	Cellulose I (2945), Cellulose II (2955)
2900	CH stretching	Cellulose I and II
2853	CH <sub>2</sub> asymmetric stretching	Cellulose I and II
1635	-OH of water absorbed from cellulose	Cellulose I (1630), Cellulose II (1620)
1455	-OH in plane bending	Cellulose I (1455), Cellulose II (1470)
1420	CH <sub>2</sub> symmetric bending	Cellulose I and II
1375	CH bending	Cellulose I and II
1335	-OH in plane bending	Cellulose I (1336), Cellulose II (1335)
1315	CH <sub>2</sub> wagging	Cellulose I (1317), Cellulose II (1315)
1278	CH bending	Cellulose I (1282), Cellulose II (1278)
1200	-OH in plane bending	Cellulose I (1205), Cellulose II (1200)
1155	C-O-C asymmetric stretching	Cellulose I (1155), Cellulose II (1162)
1111	Ring asymmetric stretching	Cellulose I (1111), Cellulose II (1007)
1055	C-O stretching	Cellulose I and II
1035	Stretching C-O	Cellulose I and II
893	Group C <sub>1</sub> frequency	Cellulose I (895), Cellulose II (893)

### 2.7.1 การเตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

การเตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสเกิดจากการย่อยสลายส่วนที่เป็นอสัณฐานของเซลลูโลสออกจากเส้นใยเซลลูโลสให้คงเหลือแต่ส่วนที่เป็นผลึกในระดับจุลภาค

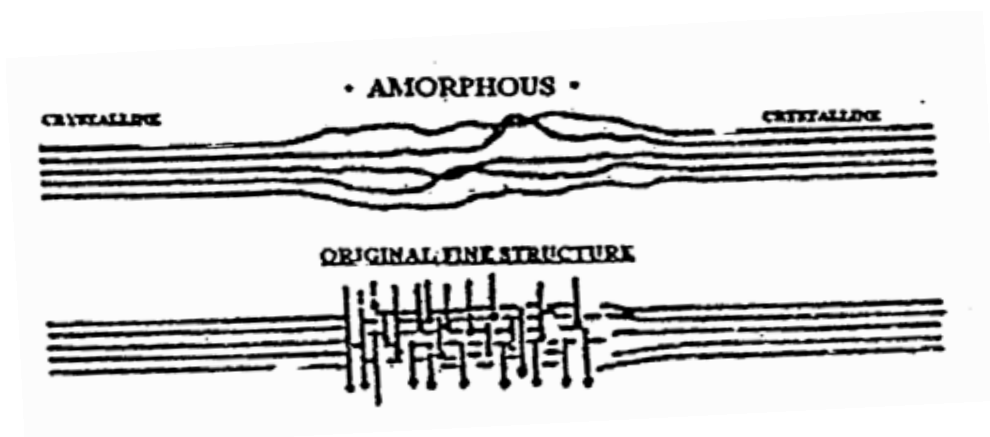
การเตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ

1. **การไฮโดรไลซ์เซลลูโลสด้วยเอนไซม์** คือ เอนไซม์เซลลูโลสสามารถเร่งการไฮโดรไลซ์เซลลูโลสที่ภาวะปกติ (อุณหภูมิห้อง และความดันปกติ) ซึ่งมีข้อดีคือเอนไซม์นั้นจะมีความเจาะจงในการเข้าทำปฏิกิริยา ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่ไม่ใช่เซลลูโลส จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ แต่ยังมีข้อเสีย คือ ใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์นานกว่าจะได้ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส อีกทั้งเอนไซม์ที่มีราคาแพงจึงไม่เหมาะในวงการอุตสาหกรรม

2. **การไฮโดรไลซ์เซลลูโลสด้วยกรด** คือ การนำกรดไปไฮโดรไลซ์เซลลูโลสให้สั้นลง ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากกว่า อีกทั้งกรดยังสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสได้อย่างรวดเร็ว กรดที่ใช้มีราคาไม่แพงและหาได้ง่าย เหมาะสมในวงการอุตสาหกรรมมากกว่าการไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์

กลไกในการเกิดไฮโดรไลซ์เซลลูโลสด้วยกรด มีดังนี้

1. เกิดการแตกสลายเซลลูโลสในสายโซ่โมเลกุล (cellulose depolymerization) โดยเกิดการแตกหักของพันธะที่อ่อนแอของหมู่ที่ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายภายในโครงสร้างของเซลลูโลส
2. เกิดการแตกหักของพันธะ  $\beta$ -1,4-glycosidic บนสายโซ่เซลลูโลสในบริเวณที่จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (amorphous หรือ non-crystalline region) ทำให้เกิดเป็นสายสั้นๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.14
3. เกิด Leveling-off degree of polymerization โดยพันธะ  $\beta$ -1,4-Glycosidic บนสายโซ่เซลลูโลสในบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (crystalline region) เกิดการแตกออกซึ่งในขั้นนี้ก็จะเกิดภายหลังจากการแตกหักของพันธะ  $\beta$ -1,4-Glycosidic ในขั้นที่ 2 เสร็จสมบูรณ์แล้ว



ภาพที่ 2.14 การแตกหักของพันธะ  $\beta$ -1, 4-glycosidic [27,33]

ปัจจัยที่มีผลต่อการไฮโดรไลซ์เซลลูโลสด้วยกรด ได้แก่

1. ชนิดของกรด : การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดที่แรงเกินไปจะทำให้พันธะ  $\beta$ -1,4-glycosidic บนสายโซ่เซลลูโลสแตกออกเกิดเป็นสายที่สั้นมากๆ และระยะเวลาในการไฮโดรไลซ์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้กรดอ่อน
2. อุณหภูมิ : อุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ที่สูงจะทำให้เกิดการไฮโดรไลซ์เกิดง่ายขึ้น ได้สายโซ่เซลลูโลสที่สั้นมาก (degree of polymerization ต่ำ) ดังแสดงในภาพที่ 2.15

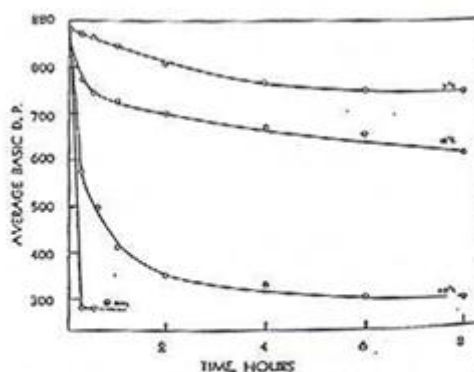


Figure 2. Hydrolysis of Native Cellulose (Cotton Linters Pulp)  
5.0 N hydrochloric acid with increasing temperature

ภาพที่ 2.15 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์เซลลูโลสต่อ degree of polymerization [27,33]



## 2.8 การผสมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสในพลาสติก

การผสมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสในพลาสติกที่นิยมใช้กันมี 2 วิธี คือ

**การผสมทางเคมี (Chemical blending)** ทำการผสมแบบสารละลาย (solution blending) เช่น การผสมกับ poly (ethylene-co-acrylic acid) (EAA) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นต้น

**การผสมทางกายภาพ (Physical blending)** เช่น การผสมด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill)

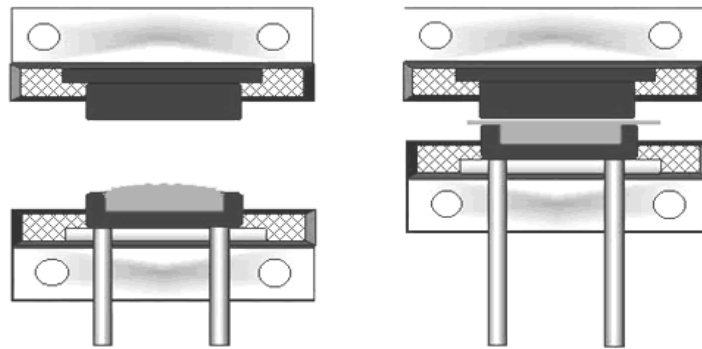
## 2.9 กระบวนการขึ้นรูปพลาสติก

### 2.9.1 การอัดแบบ (Compression molding)

เป็นวิธีการขึ้นรูปสำหรับวัสดุหลายชนิด เช่น เซรามิก โลหะ พอลิเมอร์ และวัสดุคอมพอสิต การขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการอัดแบบ ทำได้โดยเติมผงหรือเม็ดพลาสติกในแม่พิมพ์ และใช้ความดันอัดปิดแม่พิมพ์พร้อมกับให้ความร้อน ทำให้พลาสติกเข้าไปแทนที่ในหลุมที่เป็นรูปทรงของชิ้นงาน มีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ แท่นอัด (press) จะประกอบด้วยลูกสูบที่สามารถให้แรงอัดได้ และแม่พิมพ์ (mould) ดังแสดงในภาพที่ 2.17

พอลิเมอร์ที่นิยมใช้วิธีการขึ้นรูปแบบนี้คือ

- พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (Thermosetting polymer)
- คอมพาวนด์ (Compounds)
- พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic polymer)



ภาพที่ 2.17 เครื่องอัดแบบ [39]

ปัจจัยในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ

- ปริมาณวัสดุที่เหมาะสม
- คุณสมบัติที่ใช้ในการอัด และการเลือกใช้อุปกรณ์ให้ความร้อน
- ความดันหรือแรงที่ใช้ในการอัด ซึ่งจำเป็นต้องปรับให้เหมาะสมเพื่อป้องกันและลดการเกิดครีป (flash) บริเวณรอยประกบของแม่พิมพ์ จะขึ้นอยู่กับทำให้ความร้อนก่อนอัด ความสูงของชิ้นงาน ความหนา รูปทรงของชิ้นงาน และความเรียบของผิวแม่พิมพ์ [40]

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Battista [33] ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการไฮโดรไลซิสและการเกิดผลึกของเซลลูโลส โดยศึกษาผลของเวลาต่อน้ำหนักที่สูญหายและระดับการเกิดผลึกของเซลลูโลส โดยใช้กรดทั้งในภาวะรุนแรง (กรดไฮโดรคลอริก 2.5 และ 5.0 N ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส) และภาวะไม่รุนแรง (กรดไฮโดรคลอริก 5.0 N ที่อุณหภูมิ 5, 18 และ 40 องศาเซลเซียส) โดยทำการทดลองกับฝ่ายบริสุทธิ์ ฝ่ายที่ผ่านการฟอกสี เยื่อไม้ และเรยอน ซึ่งพบว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริก 2.5 N ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที เป็นภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

Chuayjuljit และคณะ [3] ได้ทดลองเตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสจากเศษผ้าฝ้ายด้วยการไฮโดรไลซิสเศษผ้าฝ้ายด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.5 นอร์แมล ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อใช้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มพีวีซี ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมได้มีผลทำให้ทั้งความทนแรงดึง มอดุลัส และการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มพีวีซีเพิ่มขึ้นตามปริมาณไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น

Gcwabaza และคณะ [43] ได้ศึกษาสมบัติและสัณฐานวิทยาของพอลิไพโรฟิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ออร์แกโนเคลย์นาโนคอมพอสิตที่เตรียมด้วยการผสมแบบหลอมเหลวและขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิไพโรฟิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคงที่เท่ากับ 70/30 และออร์แกโนเคลย์ปริมาณร้อยละ 0.5-5 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลอง พบว่า การใส่ออร์แกโนเคลย์ร้อยละ 5 มีผลทำให้ขนาดโดเมนของพอลิไพโรฟิลีนซัคซิเนตมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของพอลิไพโรฟิลีน ซึ่งแสดงถึงการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างวัฏภาค และส่งผลให้ทั้งสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้น

Panaitescu และคณะ [42] ได้ทดลองเตรียมคอมพอสิตของพอลิไพโรฟิลีนด้วยไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่มีในทางการค้าและใช้พอลิไพโรฟิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม โดยใช้ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสปริมาณร้อยละ 5, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และพอลิไพโรฟิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยการผสมแบบหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 175-180 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าค่าย้งสมอดุลัสของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณไมโครคริสตัลลิน

เซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ความทนแรงดึงและมอดุลัสของชิ้นงานได้ถูกปรับปรุงเมื่อเติมสาร  
คู่ควบเข้าไปในพอลิเอเธอร์คอมพอสิต

Chaiwutthinun และคณะ [44] ได้ทดลองเตรียมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์  
เซลลูโลสคอมพอสิตโดยใช้เซลลูโลสที่เตรียมได้จากการไฮโดรไลซ์เศษผ้าฝ้ายด้วยกรดไฮโดรคลอริก  
ความเข้มข้น 2.5 นอร์แมล ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในปริมาณ 10, 20 และ  
30 ส่วนโดยน้ำหนักต่อพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 100 ส่วน ด้วยการผสมในเครื่องอินเทอร์นัลมิกเซอร์  
และขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง พบว่า ยังสัมมอ-  
ดูลัสของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น แต่มีผลทำให้ความ  
ทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม พบว่า การใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสมี  
ผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตน้อยมาก และจะทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิ-  
บิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

1. เศษใยฝ้ายดิบ ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท นันยางเท็กซ์ไทล์ จำกัด
2. เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน (HP500N) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เอ็ชเอ็มซี โปลิเมอร์ จำกัด (HMC Polymers Co., Ltd) ซึ่งมีสมบัติดังตารางที่ 3.1
3. เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนซ็อกซิเนต ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติเอ็มเทค (MTEC)
4. เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Fusabond 514D) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเคมีคัล อินโนเวชัน (Chemical Innovation)
5. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 N (AR Grade จากบริษัท J.T. Baker)
6. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 1 (AR Grade จากบริษัท J.T. Baker)
7. น้ำกลั่น

#### ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิโพรพิลีนเกรด HP500N

สมบัติ	หน่วย	มาตรฐานการทดสอบ	HP500N
ดรรชนีการหลอมไหล (230 °C)	g/10min	ASTM D1238	12
ความหนาแน่น	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792B	0.90
ความทนแรงดึง	MPa	ASTM D638	34
การยืดตัว	%	ASTM D638	10
ความต้านแรงดัดโค้ง	MPa	ASTM D790A	1480
ความทนแรงกระแทกแบบไอซอด	J/m	ASTD D256A	25
อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน	°C	ASTM D648	97

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส

1. อุปกรณ์เครื่องแก้ว
2. เทอร์โมมิเตอร์
3. แท่งแม่เหล็ก (magnetic bar)
4. แท่นให้ความร้อน (hot plate)
5. กระจกชนิดมัส
6. กระจกทรง
7. เดซิเคเตอร์
8. ตู้อบ
9. เครื่องบดละเอียด ของ Fritsch รุ่น 14.702

### 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมขึ้นทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) รุ่น Thermo prism
2. เครื่องอัดแบบ (compression molding machine) ของ Lab Tech Engineering

#### 3.3.2 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

1. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) ของ Rigaku รุ่น TTRAX III
2. เครื่องเลเซอร์ไลท์สแกทเทอริง (Laser Light Scattering) ของ Malvern รุ่น Master- sizer S
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของ Jeol รุ่น JSM 5800 LV
4. เครื่อง Universal Testing Machine ของ LLOYD รุ่น LR 100K
5. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ของ METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851°
6. เครื่องวิเคราะห์ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ของ Perkin-Elmer รุ่น DSC 7

### 3.4 ขอบเขตการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือ

- การเตรียมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสจากเศษใยฝ้าย
- การวิเคราะห์ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส
- การเตรียมพอลิไพร์พีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต
- การเตรียมพอลิไพร์พีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต
- การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของคอมพอสิตที่เตรียมได้

#### 3.4.1 การเตรียมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส

##### 3.4.1.1 การเตรียมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสจากเศษใยฝ้าย

1. ชั่งเศษใยฝ้ายดิบ และนำมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.5 นอร์แมล ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
2. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ จากนั้นใช้น้ำกลั่นบริสุทธิ์ล้างอีกครั้ง
3. กรองไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่เตรียมได้ แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
4. นำไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่ผ่านการอบแล้วไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด
5. นำไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่ผ่านการบดแล้วไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหำร้อยละของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่ไฮโดรไลซ์ได้ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

$$\% \text{ MC} = W_1/W_0 \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ  $W_0$  = น้ำหนักเศษใยฝ้ายที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์

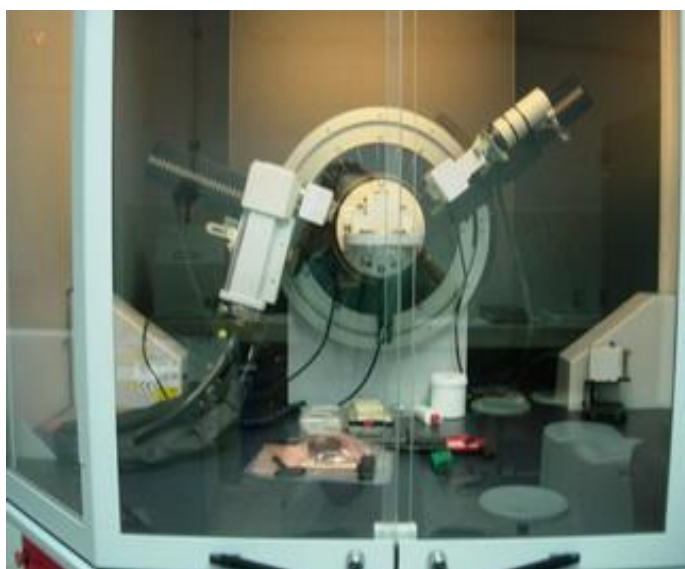
$W_1$  = น้ำหนักไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่ได้จากการไฮโดรไลซ์

### 3.4.2 การวิเคราะห์ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส

#### 3.4.2.1 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมีดังนี้

1. นำแผ่น sample holder มายึดติดกับ glass plate ด้านใดด้านหนึ่งด้วยเทปใส
2. บดผงตัวอย่างให้มีความละเอียดมากที่สุด แล้วโรยผงตัวอย่างนั้นลงในช่อง sample holder
3. ใช้ glass plate กดตัวอย่างที่อยู่ใน holder เบบๆ พอประมาณ
4. ปาดเอาส่วนของตัวอย่างที่เกินออกจาก holder
5. นำฝาหลังปิดเข้ากับ holder
6. แกะเทปใสที่ยึดกับ glass plate ออกจาก sample holder ที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำแต่เฉพาะแผ่น sample holder ไปเสียบเข้าแกนยึดตัวอย่างที่เครื่อง XRD โดยระวังมิให้นิ้วสัมผัสโดนบริเวณที่มีผงตัวอย่าง
7. ทำการวัดที่ค่ามุม  $2\theta$  ตั้งแต่  $10-50^\circ$

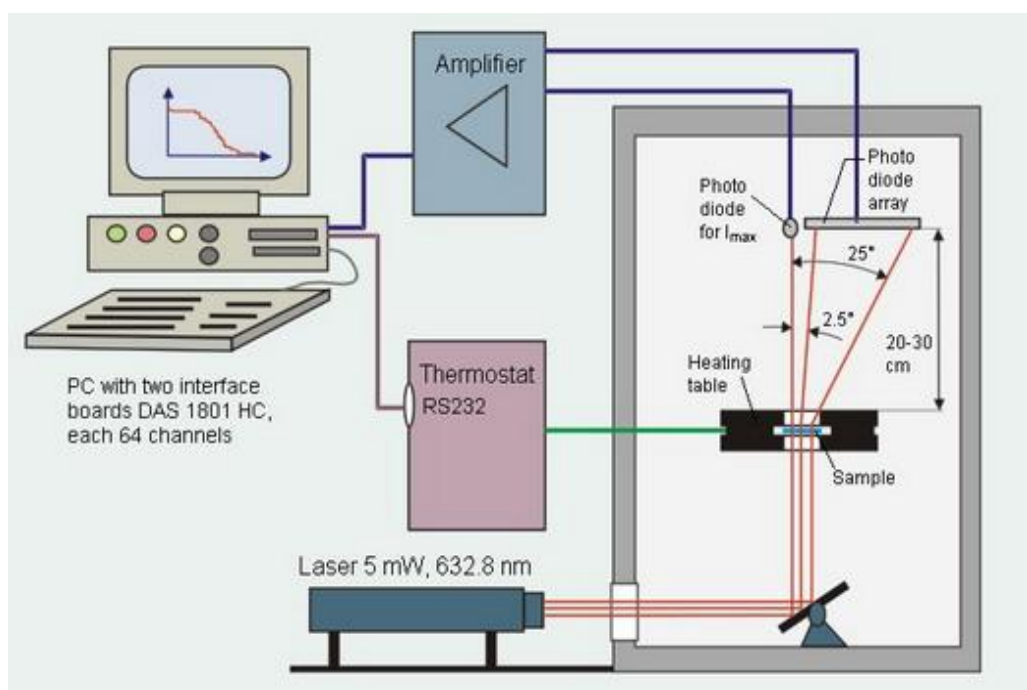


ภาพที่ 3.1 เครื่อง XRD ของ Bruker รุ่น D8



### 3.4.2.2 การวัดขนาดอนุภาค

นำเซลล์โกลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้มากระจายตัวในน้ำ แล้วนำมาวัดขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Laser Light Scattering โดยส่วนประกอบของเครื่อง แสดงไว้ในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ส่วนประกอบของเครื่อง Laser Light Scattering ของ Malvern รุ่น Mastersizer S

### 3.4.3 การเตรียมพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต

นำพอลิโพรพิลีน และไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส มาผสมในอัตราส่วนร้อยละ 100/5, 100/10 และ 100/15 โดยน้ำหนัก ทั้งที่ใส่และไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ทำการเขย่าให้เข้ากัน นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้อุณหภูมิในการผสมของโซนต่างๆ ดังนี้ 175, 175, 165, 165 และ 160 องศาเซลเซียส ทำการอัดรีดผ่านหัวตายรูปวงกลม โดยใช้ความเร็วรอบสกรู 30 รอบต่อนาที แล้วทำการตัดเม็ด (pelletized) เพื่อใช้ขึ้นรูปขึ้นทดสอบต่อไป

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมที่ใช้เตรียมพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต

พอลิโพรพิลีน (%wt)	ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (phr)	พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (phr)
100	0	0
100	5	0
100	5	5
100	10	0
100	10	5
100	15	0
100	15	5

\*phr = part per hundred resin



ภาพที่ 3.3 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

### 3.4.4 การเตรียมพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิต

นำพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมาผสมในอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.3 ทำการเขย่าให้เข้ากัน นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้อุณหภูมิในการผสมของโซนต่างๆ ดังนี้ 175, 175, 165, 160 และ 120 องศาเซลเซียส ทำการอัดรีดผ่านหัวตายรูปวงกลม โดยใช้ความเร็วรอบสกรู 30 รอบต่อนาที แล้วทำการตัดเม็ด (pelletized) เพื่อใช้ขึ้นรูปชิ้นทดสอบต่อไป

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมที่ใช้เตรียมพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิต

พอลิโพรพิลีน (%wt)	พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (%wt)	ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส (phr)	พอลิโพรพิลีนกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (phr)
90	10	0	5
90	10	5	5
90	10	10	5
90	10	15	5
80	20	0	5
80	20	5	5
80	20	10	5
80	20	15	5
70	30	0	5
70	30	5	5
70	30	10	5
70	30	15	5

\*phr = part per hundred resin

### 3.5 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.3 และ 3.4.4 ไปขึ้นรูปเป็นขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบ (ภาพที่ 3.4) โดยใช้ภาวะของการขึ้นรูป ดังนี้

อุณหภูมิ	175 องศาเซลเซียส
เปิดไล่อากาศ	3 ครั้ง
เวลา Pre-heat	10 นาที 40 วินาที
เวลาอัดก่อนเปิดไล่อากาศ	5 วินาที
เวลาอัดหลังเปิดไล่อากาศ	9 นาที
เวลาในการหล่อเย็น	7 นาที



ภาพที่ 3.4 เครื่องอัดแบบ

### 3.6 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของคอมพอสิต

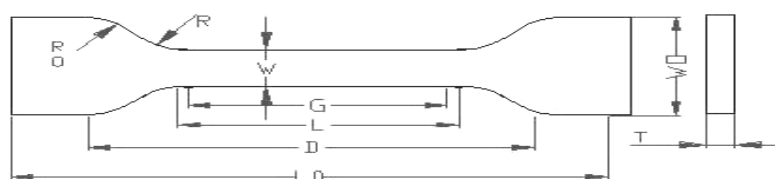
#### 3.6.1 การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงด้วยชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ ดังแสดงในภาพที่ 3.5 และมีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D638 ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD LR 100K) ดังภาพที่ 3.6 โดยใช้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50	เปอร์เซ็นต์
น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	1	กิโลนิวตัน
ความเร็วในการทดสอบ	50	มิลลิเมตร/นาที

ตารางที่ 3.4 ขนาดชิ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638-03 (type IV)

มิติ (มิลลิเมตร)		ความคลาดเคลื่อน
W-Width of narrow section	3.18	±0.5
L-Length of narrow section	9.53	±0.5
W0-Width over-all, min	...	+6.4
W0-Width over-all, min	9.53	+3.18
L0-Length over-all, min	63.5	no max
G-Gage length	7.62	±0.25
G-Gage length	...	±0.13
D-Distance between grips	25.4	±5
R-radius of fillet	12.7	±1
R0-Outer of radius(Type IV)	...	±1



ภาพที่ 3.5 ชิ้นทดสอบสมบัติความทนแรงดึง



ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (LLOYD รุ่น LR 100K)

### 3.6.2 ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D6110 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod) ยี่ห้อ Dynisco รุ่น SIMATIC-OP7 (ภาพที่ 3.7) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด 63 x 13 x 3 มิลลิเมตร ที่มีรอยบาก (notch) ภายใต้ภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ	25	องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	50	เปอร์เซ็นต์
น้ำหนักของค้อนเหวี่ยง	1.357	กิโลกรัม
ค่าพลังงานการกระแทกสูงสุด	100	กิโลกรัม-เซนติเมตร



ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแบบ Izod (Dynisco SIMATIC-OP7)

### 3.6.3 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน

#### 3.6.3.1 ทดสอบด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของ Perkin-Elmer รุ่น DSC 7 (ภาพที่ 3.8) โดยตัดชิ้นทดสอบเป็นแผ่นวงกลมที่มีน้ำหนักประมาณ 5 มิลลิกรัม บรรจุใส่ใน DSC Pan ซึ่งน้ำหนักแน่นอนแล้วปิดฝา จากนั้นจึงทำการทดสอบโดยตั้งภาวะการทดสอบดังนี้

1. เพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที
2. ให้อุณหภูมิคงที่ที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
3. ลดความร้อนจากอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จนถึง 80 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการลดอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที
4. ให้อุณหภูมิคงที่ที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที
5. เพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที

ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เพื่อตรวจสอบหาอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature,  $T_c$ ) โดยวิเคราะห์จากพีคการเกิดผลึก และดีกรีของความเป็นผลึก (degrees of crystallinity,  $X_c$ ) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ 3.2

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\Delta H_f$  = เอนทัลปีของพอลิโพรพิลีนตัวอย่าง  
 $\Delta H_f^0$  = เอนทัลปีของพอลิโพรพิลีนที่มีการเกิดผลึก 100%

โดยในที่นี้ให้  $\Delta H_f^0$  มีค่าเท่ากับ 207.1 จูลต่อกรัม

ในกรณีที่มีปริมาณพอลิโพรพิลีนร้อยละ 80 จะมีเอนทัลปีของพอลิโพรพิลีน

$$\Delta H_f^0 = 207.1 - \frac{207.1 \times 20}{100} = 167.2 \text{ จูลต่อกรัม}$$





ภาพที่ 3.8 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Perkin-Elmer, DSC 7)

### 3.6.3.2 ทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851° (ภาพที่ 3.9) โดยนำชิ้นทดสอบหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุในครุชีเบ็ดอะลูมินา โดยใช้ช่วงอุณหภูมิการวิเคราะห์จาก 50 ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที และวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลผ่านเท่ากับ 20 มิลลิลิตร/นาที



ภาพที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Mettler Toledo, TGA/SDTA 851°)

### 3.6.4 ตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส และคอมพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ บริเวณรอยแตกหักของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Jeol รุ่น JSM 5800 LV (ภาพที่ 3.10) เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่เตรียมได้ และการกระจายตัวของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสในพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยนำชิ้นทดสอบไปแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นจึงทำให้เกิดรอยแตก แล้วนำส่วนที่หักมายึดติดบนแท่นวางชิ้นงาน ทำการเคลือบผิวด้วยทอง เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าให้แก่ชิ้นตัวอย่าง และเพื่อป้องกันการเกิดประจุอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของตัวอย่าง แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ศักย์ไฟฟ้า 15 kV



ภาพที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Jeol, JSM 5800 LV)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมได้จากการไฮโดรไลซ์เศษใยฝ้ายด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.5 นอร์มอล ภายหลังจากการบดด้วยเครื่องบดละเอียด มีลักษณะเป็นผงแป้งละเอียดสีขาวอมเหลือง ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมได้

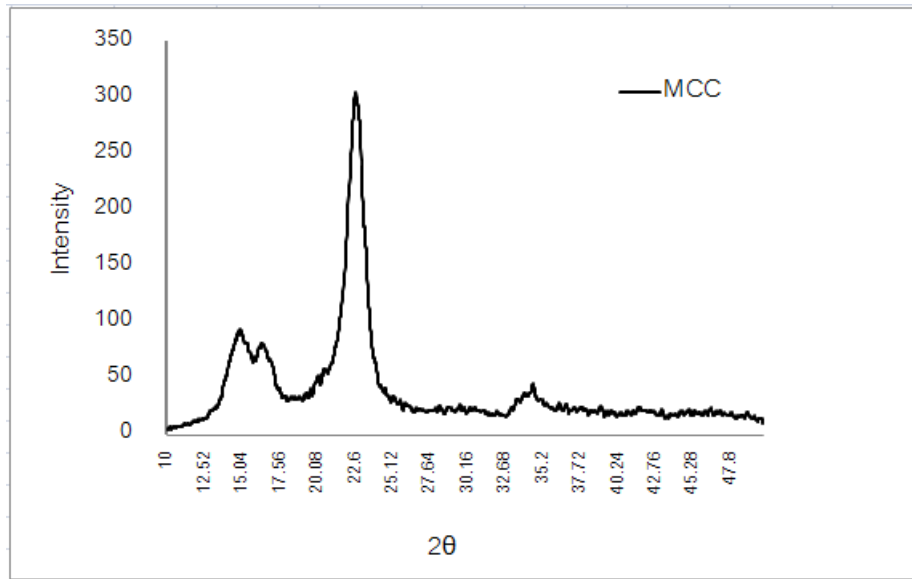
#### 4.2 ร้อยละผลได้ของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

ร้อยละผลได้เฉลี่ยของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมจากเศษใยฝ้ายโดยการไฮโดรไลซ์ เท่ากับ 87.9

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

##### 4.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

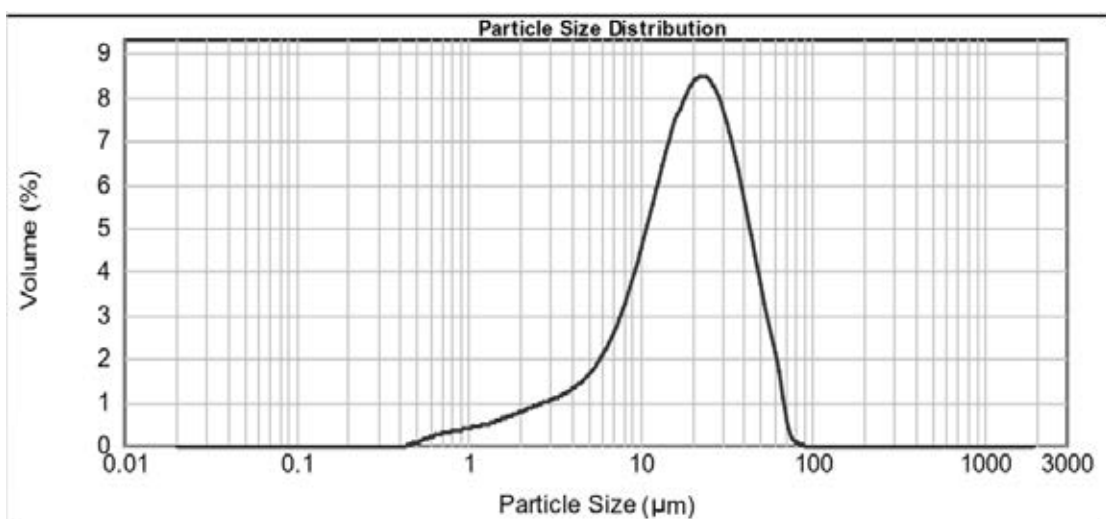
ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมได้ถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าปรากฏพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $22.0^\circ$  ใน XRD ดิฟแฟร็กโทแกรม แสดงว่าผลึกของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสนี้มีโครงสร้างเป็นแบบเซลลูโลส I [38] ดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมจากการไฮโดรไลซ์เศษใยฝ้าย

#### 4.3.2 การวัดขนาดอนุภาค

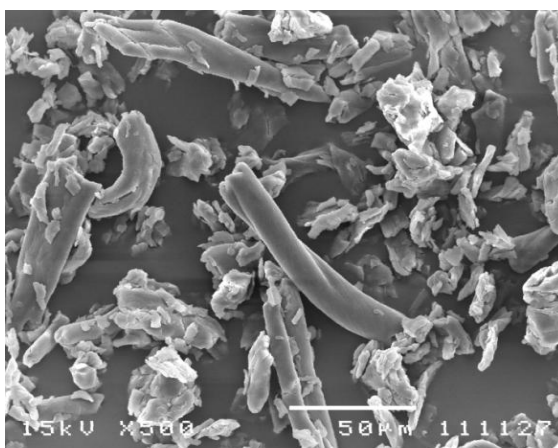
การกระจายขนาดอนุภาคของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมได้ถูกตรวจวัดด้วยเครื่อง Laser Light Scattering แสดงไว้ในภาพที่ 4.3 จากการวิเคราะห์พบว่าไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมีขนาดอนุภาคด้านยาวเฉลี่ยประมาณ 22  $\mu\text{m}$



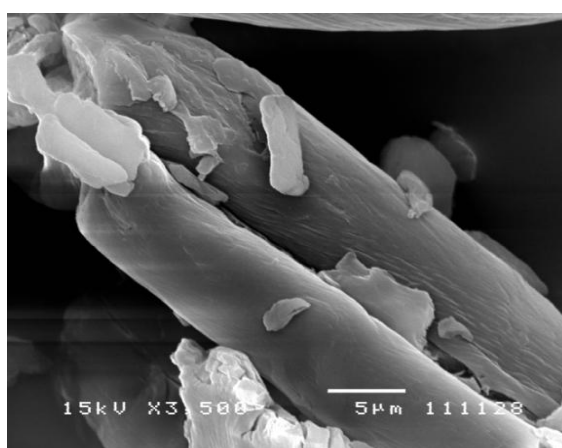
ภาพที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมได้

### 4.3.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ภาพที่ 4.4 (ก) และ (ข) แสดงสัณฐานวิทยาของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมได้จากการไฮโดรไลซ์จากเศษใยฝ้ายที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 500 และ 3500 เท่า ตามลำดับ พบว่าอนุภาคของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่เตรียมได้มีรูปร่างเป็นแท่ง (rod-like) และมีการกระจายขนาดค่อนข้างกว้าง เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งภายหลังการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด พบว่ากรดได้เข้าไปทำลายส่วนที่เป็นอสัณฐานออกไป โดยเหลือส่วนที่เป็นผลึกที่มีขนาดระดับไมโครเมตรจึงเรียกว่า “ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส” ซึ่งเศษเล็กๆ อาจเกิดจากสิ่งเจือปนธรรมชาติที่ติดมากับใยฝ้ายดิบก่อนนำมาใช้ในการไฮโดรไลซ์



(ก)

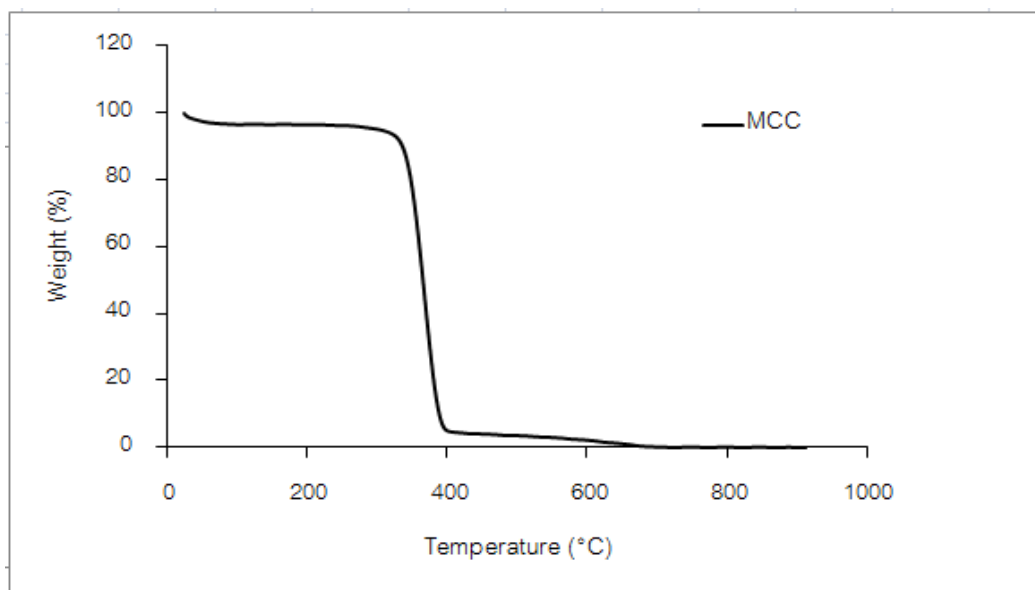


(ข)

ภาพที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 3500 เท่า

#### 4.3.4 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ภาพที่ 4.5 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่เตรียมได้ พบว่าไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่เตรียมได้ มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว ( $T_{\text{onset}}$ ) ที่ 324 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวที่ 399 องศาเซลเซียส

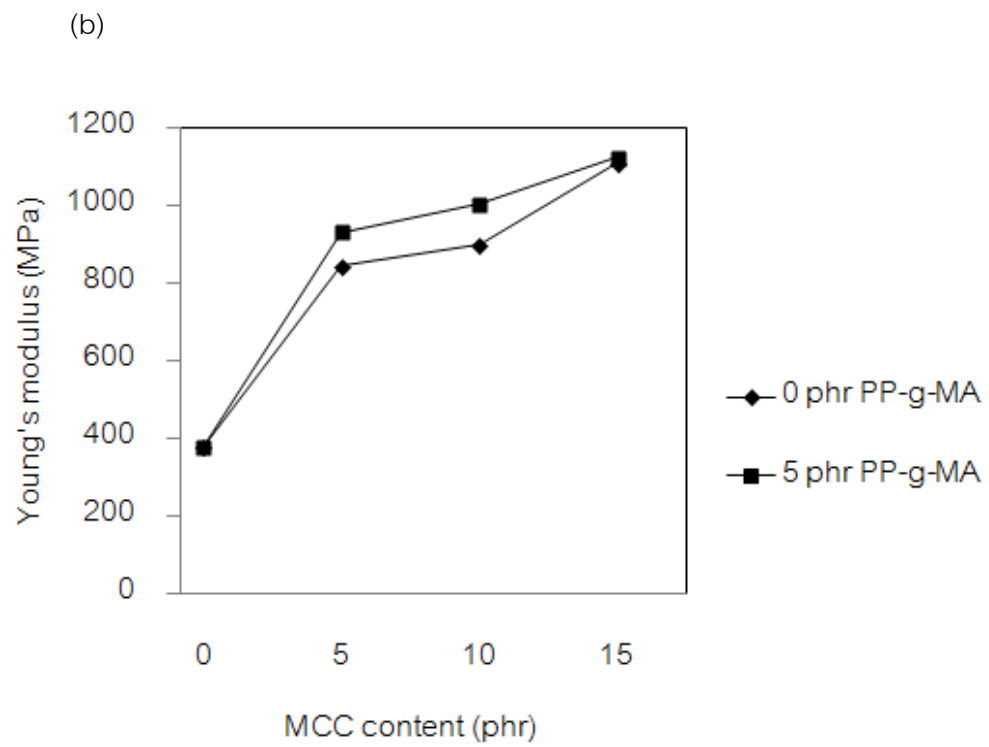
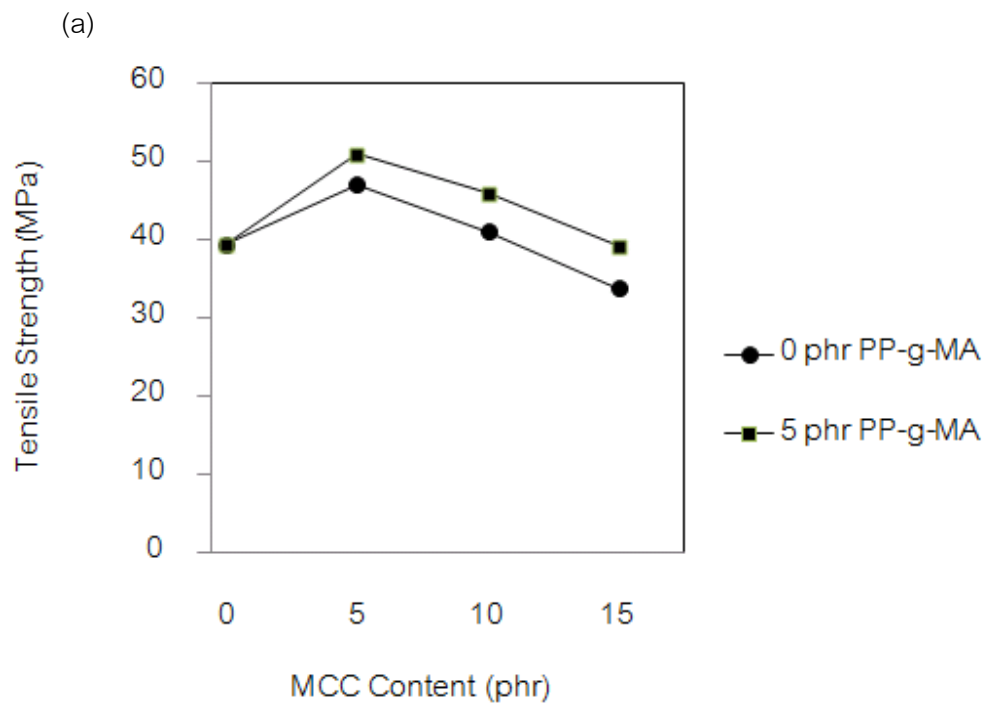


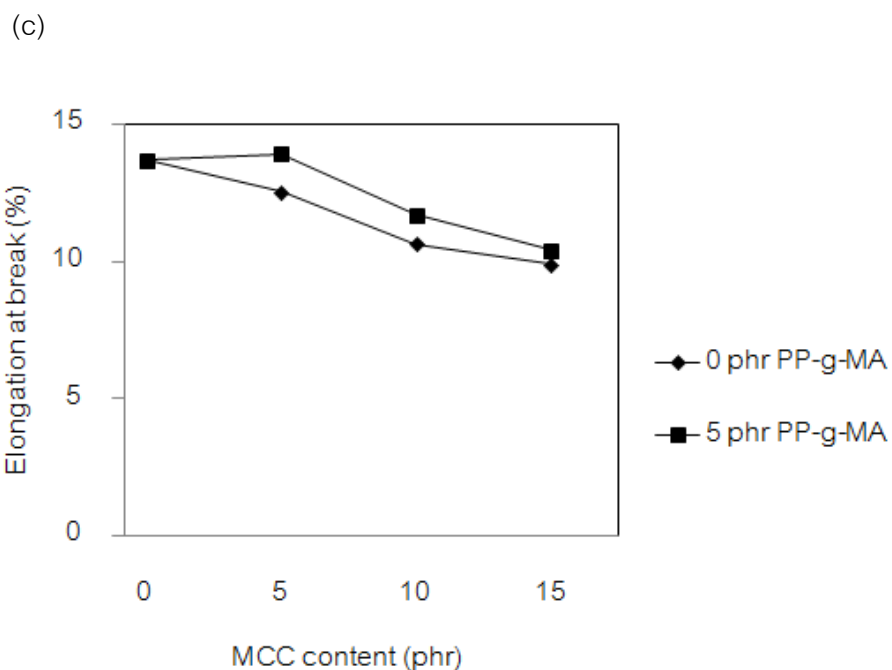
ภาพที่ 4.5 TGA เทอร์โมแกรมของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์พอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต

##### 4.4.1 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงดึง ยังสัมผัสดูลส์ และการยืดตัว ณ จุดขาด ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV ของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต ทั้งที่ไม่ได้และใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ แสดงไว้ในภาพที่ 4.6 และตารางที่ 4.1





ภาพที่ 4.6 ความทนแรงดึง (a) ยั่งส์มอดุลัส (b) และการยืดตัว ณ จุดขาด (c) ของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิตทั้งที่ไม่ใส่และใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

ตารางที่ 4.1 ความทนแรงดึง ยั่งส์มอดุลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต ทั้งที่ไม่ใส่และใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

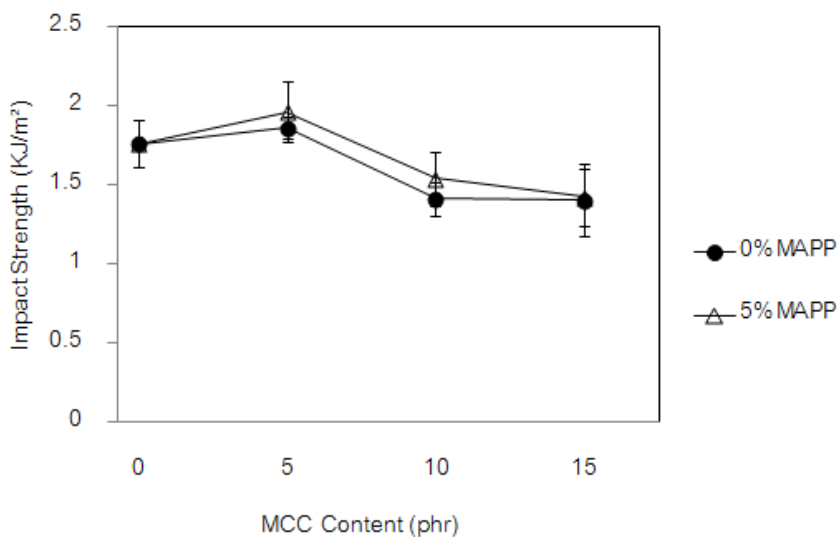
องค์ประกอบ (PP/MCC/PP-g-MA)	ความทนแรงดึง (MPa)	ยั่งส์มอดุลัส (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
100/0/0	39.4	377.20	13.68
100/5/0	47.01	844.58	12.51
100/5/5	50.95	931.19	13.91
100/10/0	41.07	897.45	10.64
100/10/5	45.96	1002.10	11.67
100/15/0	33.76	1107.81	9.88
100/15/5	39.17	1122.96	10.39



จากผลการทดสอบ พบว่า ความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิตทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีแนวโน้มไปในทำนองเดียวกันกล่าวคือ ความทนแรงดึงของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสปริมาณ 5 phr ทั้งนี้เนื่องจากไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีอนุภาคเป็นแท่ง จึงสามารถส่งผ่านความเค้นได้มากกว่าอนุภาคที่เป็นทรงกลม แต่เมื่อใส่ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 15 phr พบว่า ความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิตกลับมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีผลจากการกระจายตัวที่ไม่ดีของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ เนื่องจากไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ โดยเฉพาะคอมพอสิตที่ไม่ได้ใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ นอกจากนี้ พบว่า พอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิตที่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความทนแรงดึงสูงกว่าพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิตที่ไม่ใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอมพอสิตที่ใส่ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในปริมาณเท่าๆกัน ทั้งนี้เนื่องจากสารช่วยผสมทำให้ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสกระจายตัวได้ดีกว่าและเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิโพรพิลีนอีกด้วย จึงมีผลทำให้ความทนแรงดึงได้รับการปรับปรุงเมื่อใส่สารช่วยผสมเข้าไปในคอมพอสิต และเมื่อพิจารณาค่ายังสัมมอดูลัสของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต พบว่า ยังสัมมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคผลึกของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีความแข็งตึงมากกว่าพอลิโพรพิลีน ดังนั้น จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิโพรพิลีน ซึ่งส่งผลให้คอมพอสิตมีความแข็งตึงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และในทำนองเดียวกัน พบว่า คอมพอสิตที่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มียังสัมมอดูลัสสูงกว่าคอมพอสิตที่ไม่ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอมพอสิตที่ใส่ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในปริมาณเท่าๆ กัน เพราะการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิโพรพิลีนทำให้วัสดุคอมพอสิตเปลี่ยนแปลงรูปร่างยากขึ้น นอกจากนี้ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ยังมีพอลิโพรพิลีนเป็นองค์ประกอบหลัก จึงไม่ได้ช่วยลดความแข็งตึงของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ส่วนการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต พบว่า มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้จะเป็นไปตามที่คาดไว้ เพราะการใส่อนุภาคที่แข็งตึงเข้าไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ย่อมมีผลทำให้การยืดตัวลดลง เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งการใส่สารช่วยผสมมีผลต่อการยืดตัว ณ จุดขาดอย่างไม่มีนัยสำคัญ

#### 4.4.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ผลการทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก (notch-Izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D6110 ของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต ทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ แสดงไว้ในภาพที่ 4.7 และตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.7 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต ทั้งที่ไม่ใส่และใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

ตารางที่ 4.2 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต ทั้งที่ไม่ใส่และใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

MCC content (phr)	Impact strength (KJ/m <sup>2</sup> )	
	MAPP 0 phr	MAPP 5 phr
0	1.76	1.86
5	1.86	1.96
10	1.41	1.54
15	1.40	1.42

จากภาพที่ 4.7 และตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า การใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสปริมาณ 5 phr มีผลทำให้พอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิตมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคผลึกที่เป็นแท่งของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสสามารถส่งผ่านความเค้น (stress transfer) ที่เกิดจากแรงกระแทกได้ดี และการที่ชิ้นงานมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสมีการกระจายตัวได้ดีในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ ซึ่งยืนยันได้จากภาพสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิตในภาพที่ 4.8 และการใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 15 phr มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสเริ่มจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้กระจายตัวไม่สม่ำเสมอในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ การส่งผ่านความเค้นเนื่องจากแรงกระแทกลดลง นอกจากนี้ การใส่สารช่วยผสมสามารถปรับปรุงความทนแรงกระแทกให้เพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีอันตรกิริยาระหว่างไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสและพอลิโพรพิลีนจะช่วยให้การส่งผ่านความเค้นเนื่องจากแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

#### 4.4.3 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 ถึง 800 องศาเซลเซียส เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิตแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งนำเสนออุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 1 ( $T_{\text{onset MCC}}$ ) อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 2 ( $T_{\text{onset PP}}$ ) อุณหภูมิการสลายตัว 50% ( $T_{50\%}$ ) อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ( $T_{\text{endset}}$ ) และปริมาณชาร์ % (char) ที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.3 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิตทั้งที่ไม่ใส่และใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

องค์ประกอบ (PP/MCC/PP-g-MA)	$T_{\text{onset MCC}}$ (°C)	$T_{\text{onset PP}}$ (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	$T_{\text{endset}}$ (°C)	Char (%)
MCC	320	-	342	399	0.00
PP	-	447	461	480	0.00
100/5/0	368	449	469	483	0.01
100/5/5	370	448	472	483	0.01
100/10/0	365	448	468	484	0.01
100/10/5	368	450	471	485	0.00
100/15/0	360	449	468	485	0.01
100/15/5	365	450	471	486	0.00

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการสลายตัวของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิโพรพิลีนเกิดขึ้นเพียง 1 ขั้นตอน คือ เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 320 และ 447 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 399 และ 480 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่พอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิตแสดงอุณหภูมิการสลายตัว 2 ขั้นตอน โดยขั้นที่ 1 เป็นการสลายตัวของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสตามด้วยการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนซึ่งพบว่าการใส่ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตมีผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็น 370 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนนั้นปกป้องไม่-

โครคริสตัลไลน์เซลลูโลส มีผลทำให้ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสในคอมพอสิตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสลดลง เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส

นอกจากนี้ อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนในคอมพอสิต มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนในพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตอย่างไม่มีนัยสำคัญ สำหรับพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิตที่ใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอมพอสิตที่ใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสในปริมาณเท่าๆ กัน (โดยพิจารณาจาก  $T_{onset}$ ,  $T_{50\%}$  และ  $T_{endset}$  ที่เพิ่มขึ้น) จาก %char พบว่าการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตเกิดจากการสลายตัวในปริมาณน้อยมาก

#### 4.4.4 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) ของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต ในช่วงอุณหภูมิ ระหว่าง 50-280 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) และดีกรีของความเป็นผลึก ( $X_c$ )

**ตารางที่ 4.4** สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิตทั้งที่ไม่ใส่และใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC)

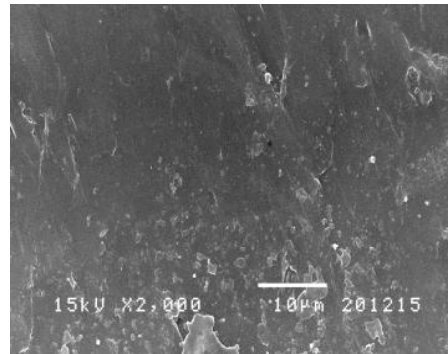
องค์ประกอบ (PP/MCC/PP-g-MA)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	อุณหภูมิการเกิดผลึก (°C)	ดีกรีความเป็นผลึก (%)
100/0/0	161	109	58.8
100/5/0	162	119	31.2
100/5/5	161	118	34.4
100/10/0	161	120	36.0
100/10/5	162	119	37.9
100/15/0	162	121	39.1
100/15/5	163	120	39.4

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ในพอลิโพรพิลีนไม่มีผลต่อให้อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต ส่วนอุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสเข้าไป ซึ่งอาจเป็นเพราะไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสมีทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตจะเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกเข้าไป ในกรณีที่เติมสารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ จะทำให้ปริมาณผลึกสูงขึ้น เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เติม ซึ่งเห็นว่าพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์นั้นช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของคอมพอสิต

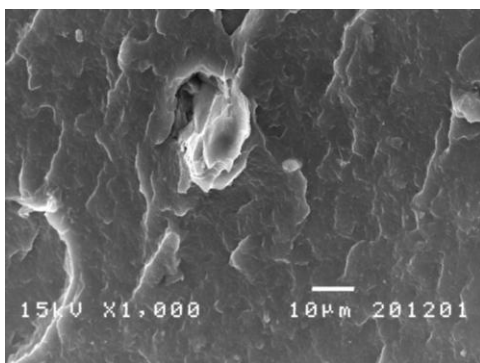
#### 4.4.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ภาพที่ 4.8 แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต ทั้งที่ไม่ใส่และใส่สารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบซึ่งตรวจสอบได้จากรอยแตกหักของชิ้นงานภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000

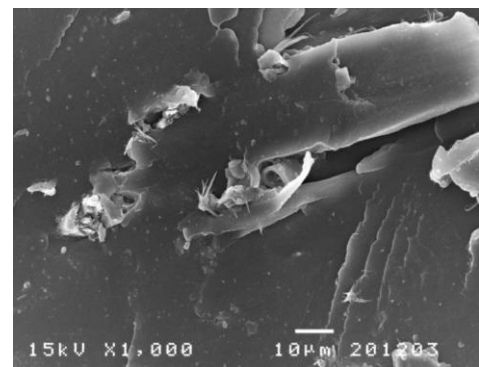
ภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์มีพื้นที่ผิวรอยแตกหักที่ค่อนข้างเรียบ ซึ่งเป็นลักษณะผิวของวัสดุที่เปราะ เนื่องจากทำการหักชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว ดังนั้นพอลิโพรพิลีน ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วค่อนข้างสูง (ประมาณ 0 องศาเซลเซียส) จึงเปราะภายใต้ไนโตรเจนเหลว ในขณะที่ พอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิตที่ไม่ได้ใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีรูพรุนที่เกิดจากการหลุดออกของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสกระจายอยู่ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ ซึ่งมีขนาดและปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของพอลิโพรพิลีนและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส โดยสังเกตจากช่องว่างระหว่างอนุภาคไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิโพรพิลีนอย่างไรก็ตาม เมื่อใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr เป็นสารช่วยผสมในพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต พบว่าขนาดและปริมาณของรูพรุนลดลง ซึ่งแสดงถึงการมีอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาค ดังนั้นจึงทำการเลือกคอมพอสิตที่มีอัตราส่วนของพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เท่ากับ 5 phr ไปเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสต่อไป



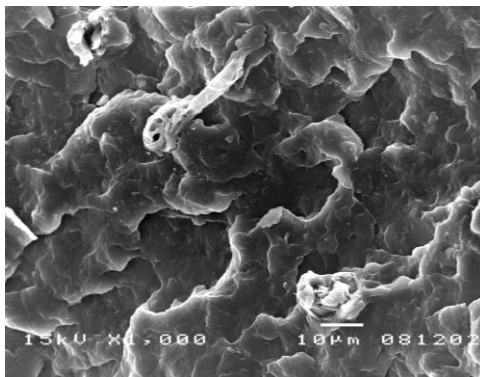
100/0/0 PP/MCC/PP-g-MA



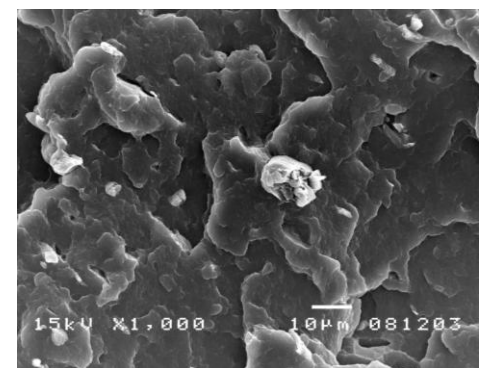
100/5/0 PP/MCC/PP-g-MA



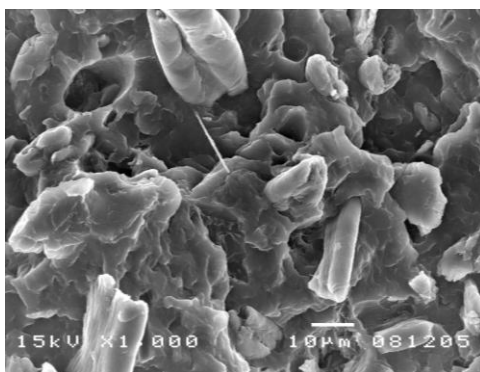
100/5/5 PP/MCC/PP-g-MA



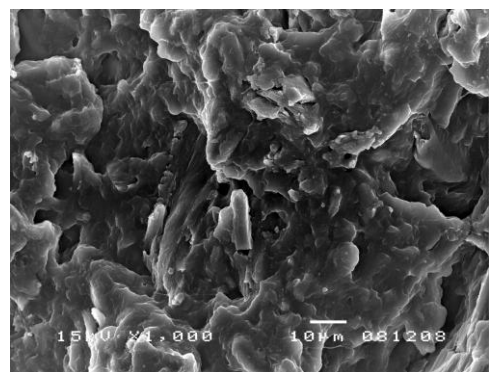
100/10/0 PP/MCC/PP-g-MA



100/10/5 PP/MCC/PP-g-MA



100/15/0 PP/MCC/PP-g-MA



100/15/5 PP/MCC/PP-g-MA

ภาพที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต



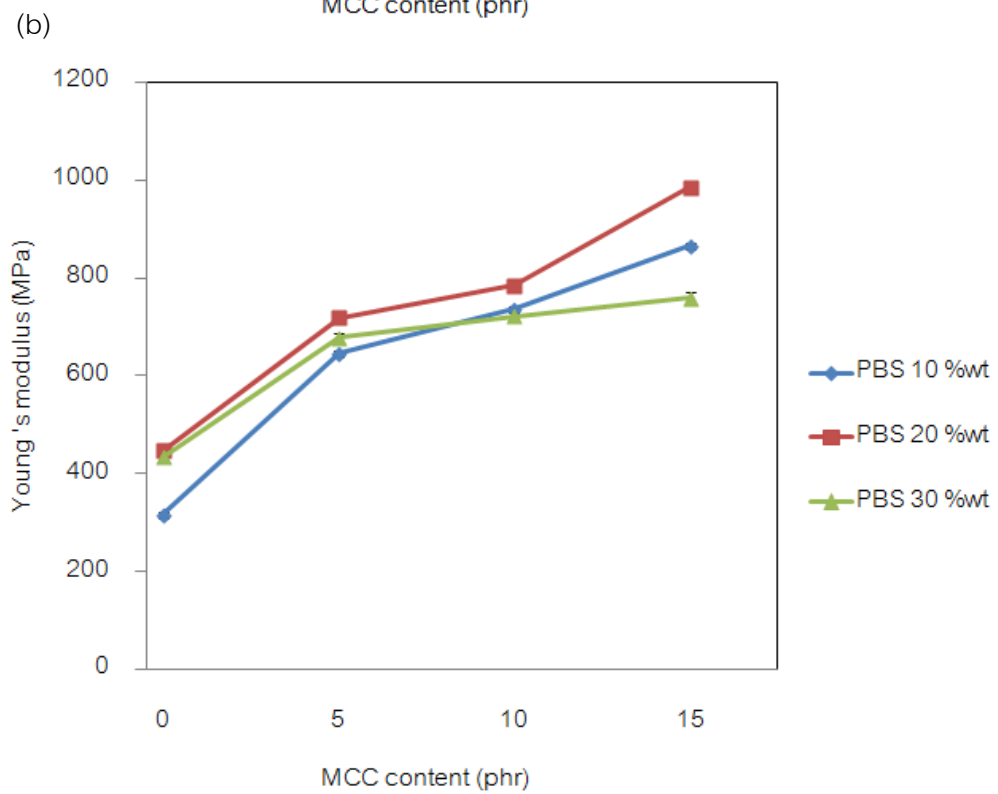
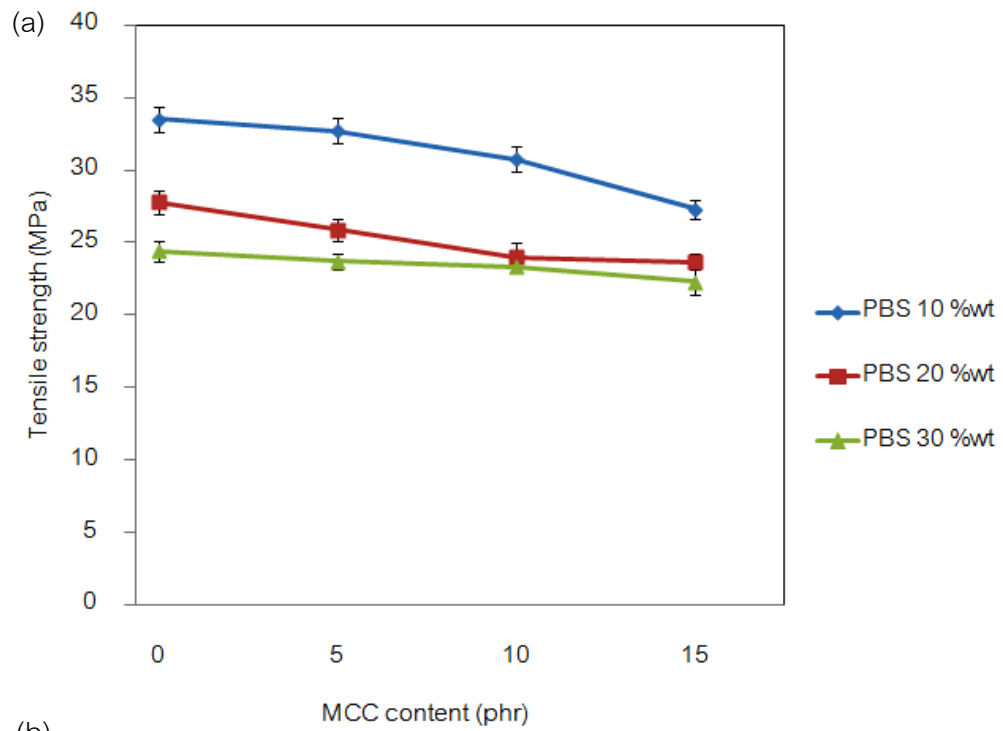
#### 4.5 การวิเคราะห์พอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส คอมพอสิต

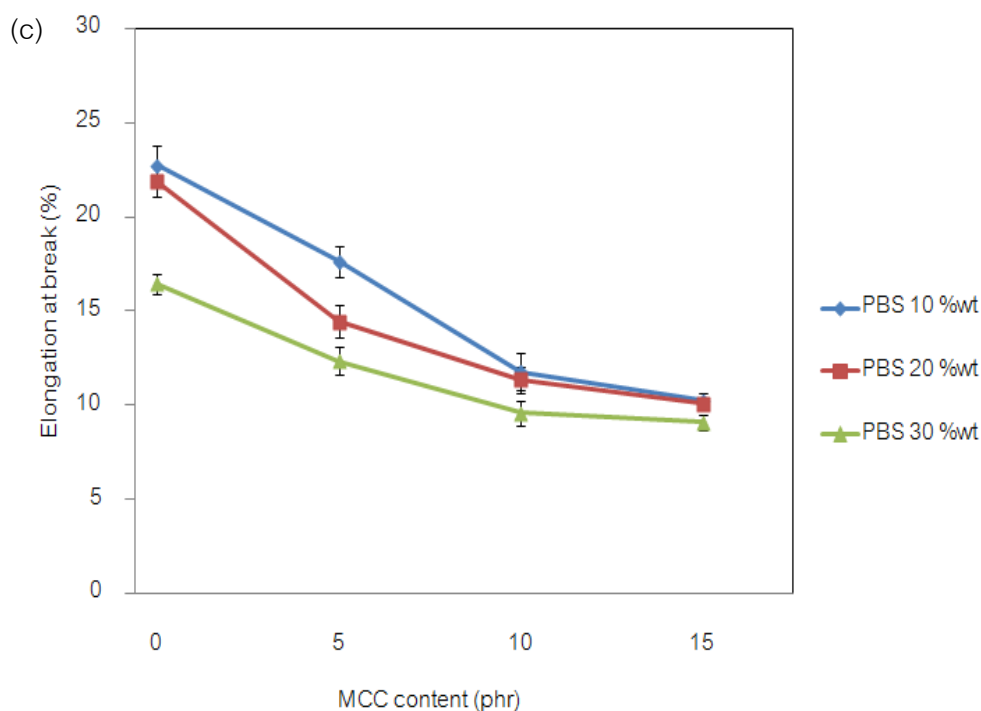
##### 4.5.1 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

ผลการทดสอบหาค่าความทนแรงดึง ยั่งส์มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิต ตามมาตรฐาน ASTM D 638 Type IV ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

**ตารางที่ 4.5** ความทนแรงดึง ยั่งส์มอดุลัส และการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิว-  
ทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิต

องค์ประกอบ (PP/PBS/MCC/ PP-g-MA)	ความทนแรงดึง (MPa)	ยั่งส์มอดุลัส (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
90/10/0/5	33.50	315.13	22.73
90/10/5/5	32.70	645.52	17.65
90/10/10/5	30.76	735.76	11.78
90/10/15/5	27.30	866.23	10.24
80/20/0/5	27.79	446.44	21.89
80/20/5/5	25.88	719.01	14.45
80/20/10/5	23.99	785.34	11.35
80/20/15/5	23.68	985.45	10.08
70/30/0/5	24.43	433.11	16.44
70/30/5/5	23.70	678.21	12.35
70/30/10/5	23.35	721.66	9.59
70/30/15/5	22.29	758.63	9.08





**ภาพที่ 4.9** ความทนแรงดึง (a) ยั่งสัมมอดูลัส (b) และการยืดตัว ณ จุดขาด (c) ของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต

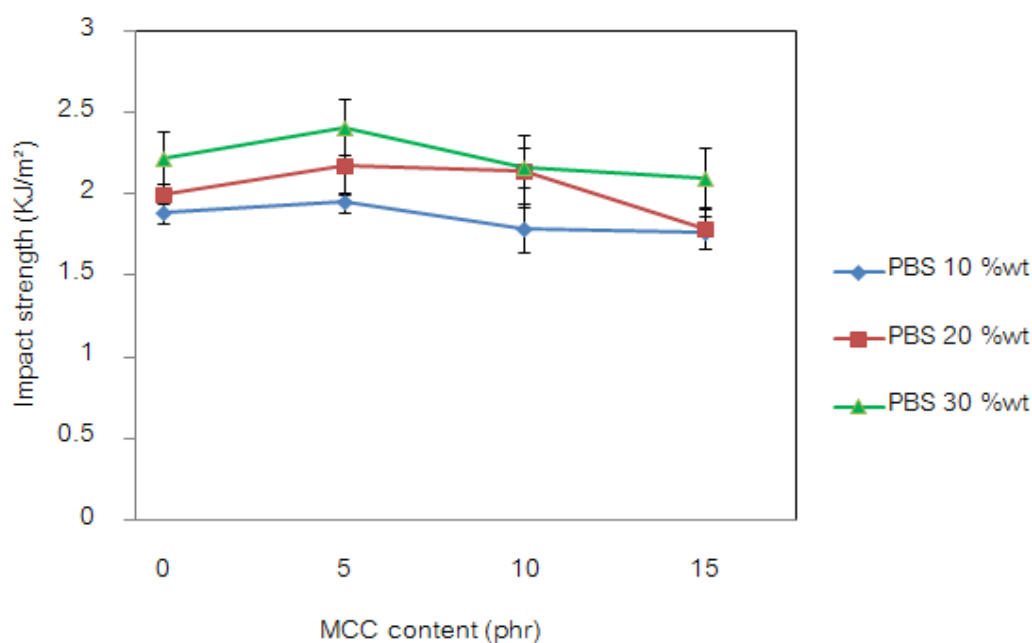
จากผลการทดสอบ พบว่า พอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต มีค่าความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเติมอนุภาคที่มีความแข็งตึง และมีรูปร่างเป็นแท่ง เมื่อเข้าไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์จึงเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ดังที่ได้กล่าวมา และเมื่อพิจารณาคอมพอสิตที่เติมสารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮโดรด์มีค่าที่ยั่งสัมมอดูลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจากปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ อันเนื่องมาจากผลึกของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีความแข็งตึงมากกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งตึงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้การเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสลงไปคอมพอสิตยังทำให้ค่าที่ยั่งสัมมอดูลัสสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ใส่ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสอีกด้วย

ในกรณีเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงในพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต พบว่า ค่าความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเมื่อเทียบระหว่างคอมพอสิตที่ใส่ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในปริมาณเท่าๆกัน อันเนื่องมาจาก

อนุภาคทรงกลมของโดเมนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มีความสามารถในการส่งผ่านความเค้นได้น้อยลง ทั้งยังทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสมากขึ้นอีกด้วย จากเหตุผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปไม่ได้ช่วยให้ชิ้นงานมีสมบัติความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มความแข็งตึง และเสถียรภาพเชิงมิติเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่มีความแข็งตึงและมีมอดุลัสสูง และย่อมมีผลทำให้การยืดตัวของชิ้นงานลดลงอีกด้วย ในขณะที่ค่ายังส์มอดุลัสจะมีค่าสูงสุด เมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

#### 4.5.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ผลการทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก (notch-Izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D6110 ของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต แสดงไว้ในภาพที่ 4.10 และตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.10 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต

ตารางที่ 4.6 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีน  
เซลลูโลสคอมพอสิต

MCC content (phr)	Impact strength (KJ/m <sup>2</sup> )			
	PBS 0%wt	PBS 10 %wt	PBS 20%wt	PBS 30%wt
0	1.86	1.89	2.00	2.22
5	1.96	1.95	2.18	2.41
10	1.54	1.79	2.14	2.16
15	1.42	1.76	1.79	2.10

ภาพที่ 4.10 แสดงสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต พบว่าเมื่อเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ใส่ในทุกๆอัตราส่วน อาจเป็นผลมาจากการเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปนั้นมีลักษณะคล้ายยาง จึงช่วยเพิ่มการดูดกลืนพลังงานของแรงกระแทกของชิ้นงานได้ดี และหากมีการเพิ่มปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะทำให้ค่าความทนแรงกระแทกมากขึ้น อันเนื่องมาจากความคล้ายยางของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตนั่นเอง และเมื่อใส่ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสลงไปชิ้นงานที่ปริมาณ 5 phr จะทำให้วัสดุคอมพอสิตได้รับการปรับปรุงความทนแรงกระแทกสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคผลึกที่มีรูปเป็นแท่งของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสจะสามารถส่งผ่านความเค้น (stress transfer) ที่เกิดจากการได้รับแรงกระแทกได้ดี อีกทั้งยังเกิดจากการกระจายตัวของดีเซลของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งยืนยันได้จากภาพสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิตในภาพที่ 4.11 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มเป็น 10 และ 15 phr กลับทำให้ความทนแรงกระแทกลดลงอาจเนื่องจากความสามารถในการเข้าร่วมตัวของเนื้อพอลิเมอร์และไมโครคริสตัลลีน-เซลลูโลสลดลง ทั้งนี้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแบบอัดอาจทำให้การกระจายตัวของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง เกิดการเกาะกลุ่มกันของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส นอกจากนี้อาจเกิดจากการใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งตึงสูง จึงทำให้พอลิเมอร์คอมพอสิตทนแรงกระแทกได้น้อยลง

#### 4.5.3 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA) ของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิต ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 - 800 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ ซึ่งนำเสนออุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 1 ( $T_{onset1}$ ) อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 2 ( $T_{onset2}$ ) อุณหภูมิการสลายตัว 50% ( $T_{50\%}$ ) อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ( $T_{endset}$ ) และปริมาณชาร์ (%char) ที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

องค์ประกอบ (PP/PBS/MCC/ PP-g-MA)	$T_{onset1}$ (°C)	$T_{onset 2}$ (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	$T_{endset}$ (°C)	Char (%)
90/10/0/5	379	448	467	483	0.01
90/10/5/5	365	448	465	484	0.00
90/10/10/5	349	448	466	483	0.65
90/10/15/5	345	449	465	485	0.89
80/20/0/5	383	449	466	484	0.05
80/20/5/5	372	452	465	485	0.05
80/20/10/5	353	452	464	485	0.94
80/20/15/5	350	454	456	486	1.10
70/30/0/5	383	450	456	486	0.84
70/30/5/5	374	450	464	485	0.04
70/30/10/5	367	451	460	485	1.32
70/30/15/5	360	449	441	483	1.63

จากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมพอสิตที่เตรียมได้จะปรากฏการสลายตัว 2 ขั้นตอน โดยในขั้นที่ 1 ปรากฏอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 1 เป็นการสลายตัวของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อปริมาณไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

เนื่องจากไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสเกิดการเกาะกลุ่มกัน และอุณหภูมิการสลายตัวของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสมีค่าต่ำจึงทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของคอมพอลิเมอร์มีค่าต่ำลงตามไปด้วย นอกจากนี้ อุณหภูมิการสลายตัวที่ 2 เกิดจากการสลายตัวของพอลิโพรพิลีน ซึ่งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสมีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนในคอมพอลิเมอร์อย่างไม่มีนัยสำคัญ หากเปรียบเทียบระหว่างคอมพอลิเมอร์ที่ใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสในปริมาณเท่าๆกัน พบว่าเมื่อปริมาณพอลิโพรพิลีนซีกซีเนตเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการสลายตัวที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิโพรพิลีนซีกซีเนตนั้นปกป้องไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส มีผลให้คอมพอลิเมอร์เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น

#### 4.5.4 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) พอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50-280 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) และ ดัชนีของความเป็นผลึก ( $X_c$ )

**ตารางที่ 4.8** สมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC)

องค์ประกอบ (PP/PBS/MCC/ PP-g-MA)	อุณหภูมิ หลอมเหลว ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิการเกิดผลึก ( $^{\circ}\text{C}$ )	ดัชนีความเป็นผลึก (%)
90/10/0/5	162	111	41.8
90/10/5/5	160	117	40.1
90/10/10/5	161	116	36.2
90/10/15/5	161	116	35.6
80/20/0/5	162	112	39.2
80/20/5/5	161	116	36.9
80/20/10/5	161	116	36.8
80/20/15/5	161	115	28.6
70/30/0/5	161	113	32.6
70/30/5/5	160	115	25.1
70/30/10/5	161	116	22.7
70/30/15/5	161	117	21.2

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ในพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต พบว่าไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสไม่มีผลต่อให้อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึกของวัสดุคอมพอสิต แต่การเพิ่มขึ้นของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก นั้นทำให้ดัชนีการเกิดผลึกของวัสดุคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลง

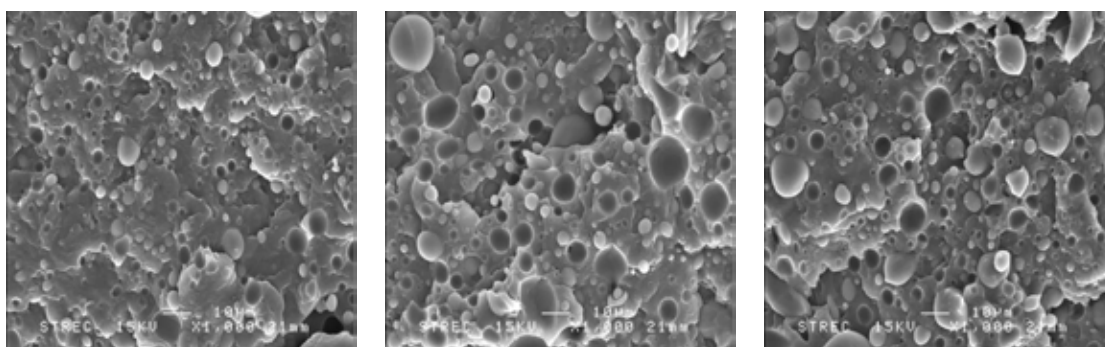


ซึ่งอาจจะเป็นเพราะความมีลักษณะคล้ายยางของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิโพรพิลีนกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์นั้นเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิโพรพิลีน จึงทำให้ความสามารถในการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนลดลง แม้จะเพิ่มปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสก็ตาม

#### 4.5.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

ภาพที่ 4.11 แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ ซึ่งตรวจสอบได้จากรอยแตกหักของชิ้นงาน ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000

ภาพที่ 4.11 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกหักของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต แสดงถึงการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของโดเมนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน และมีรูพรุนที่เกิดจากการหลุดออกของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งมีขนาดและปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น เป็น 10, 20 และ 30 phr ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าเกิดรูพรุนซึ่งเกิดจากการหลุดออกของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส นั่นคือมีแรงยึดเกาะระหว่างวัฏภาคระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์น้อยลง เมื่อเพิ่มปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส จึงส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานลดลง อีกทั้งยังพบลักษณะโดเมนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มีขนาดและปริมาณมากขึ้นตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และยังพบเห็นรูพรุนลักษณะกลม ซึ่งเกิดจากการหลุดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แสดงถึงการเกาะตัวกันอย่างหลวมๆระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองคือพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิโพรพิลีน ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลง และอาจเป็นผลมาจากการใส่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในคอมพอสิตจะเข้าไปขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลง ดังที่ได้กล่าวมา



90/10/0/5

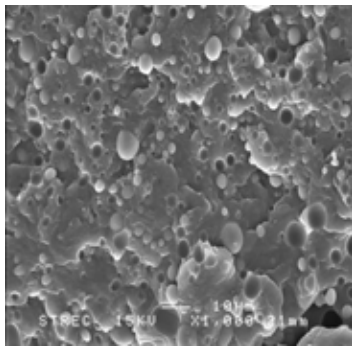
PP/PBS/MCC/PP-g-MA

80/20/0/5

PP/PBS/MCC/PP-g-MA

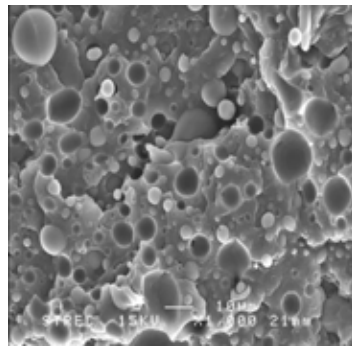
70/30/0/5

PP/PBS/MCC/PP-g-MA



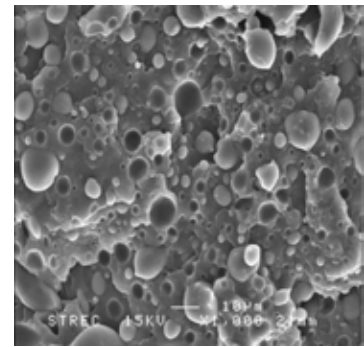
90/10/5/5

PP/PBS/MCC/PP-g-MA



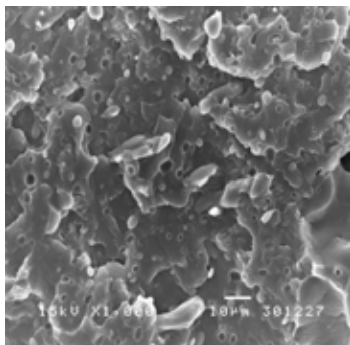
80/20/5/5

PP/PBS/MCC/PP-g-MA



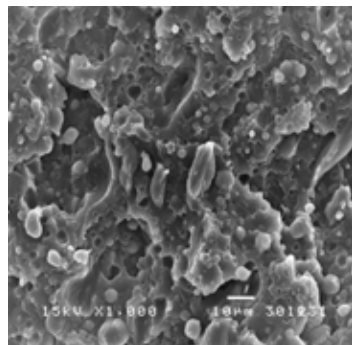
70/30/5/5

PP/PBS/MCC/PP-g-MA



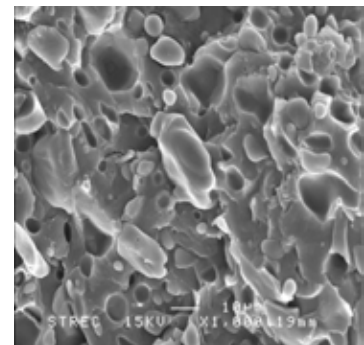
90/10/10/5

PP/PBS/MCC/PP-g-MA



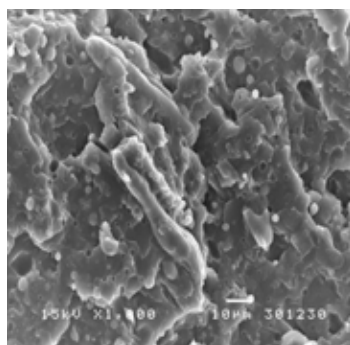
80/20/10/5

PP/PBS/MCC/PP-g-MA



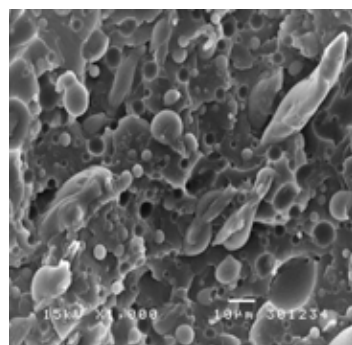
70/30/10/5

PP/PBS/MCC/PP-g-MA



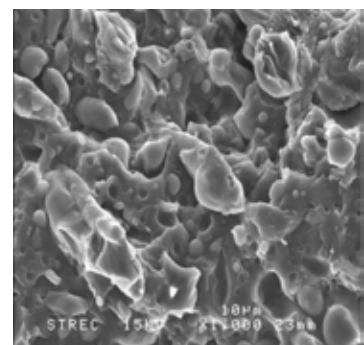
90/10/15/5

PP/PBS/MCC/PP-g-MA



80/20/15/5

PP/PBS/MCC/PP-g-MA



70/30/15/5

PP/PBS/MCC/PP-g-MA

ภาพที่ 4.11 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของรอยแตกหักพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิตที่กำลังขยาย 1000 เท่า

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่เตรียมได้จากการไฮโดรไลซ์เศษใยฝ้ายด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีลักษณะเป็นแป้งละเอียดสีขาวอมเหลือง มีเปอร์เซ็นต์ผลได้เฉลี่ยประมาณ 87.9% มีขนาดอนุภาคด้านยาวโดยเฉลี่ย 22  $\mu\text{m}$  และมี  $T_d$  ประมาณ 399 องศาเซลเซียส

5.1.2 การเติมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสในพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต ส่งผลให้คอมพอสิต มีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสปริมาณ 5 phr และลดลงเมื่อปริมาณไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสเพิ่มเป็น 10 และ 15 phr ส่วนยังสัมผัสค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาดลดลง นอกจากนี้ การใส่สารช่วยผสมสามารถปรับปรุงความทนแรงดึงให้เพิ่มขึ้น

5.1.3 การเติมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสในพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต ส่งผลให้คอมพอสิต มีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสปริมาณ 5 phr และลดลงเมื่อปริมาณไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสเพิ่มเป็น 10 และ 15 phr นอกจากนี้ การใส่สารช่วยผสมสามารถปรับปรุงความทนแรงกระแทกให้เพิ่มขึ้น

5.1.4 จากผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าการใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสในพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต มีผลทำให้ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสมีการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้นกว่าเดิม

5.1.5 จากผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าการใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสเพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อให้อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต ส่วนอุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อใส่ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสเข้าไปพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส ในกรณีที่เติมสารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิก-แอนไฮไดรด์ จะทำให้ปริมาณความเป็นผลึกสูงขึ้น

5.1.6 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต แสดงถึงรูพรุนที่เกิดจากการหลุดออกของไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส

กระจายอยู่ในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ ซึ่งมีขนาดและปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อใส่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 5 phr เป็นสารช่วยผสมในคอมพอสิต พบว่าขนาดและปริมาณของรูพรุนลดลง

5.1.7 ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต พบว่า มีความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง เมื่อใส่ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่ายังสัมมูลจะมีความสูงที่สุดเมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

5.1.8 ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต พบว่าคอมพอสิตมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสปริมาณ 5 phr และลดลงเมื่อปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มเป็น 10 และ 15 phr ในขณะที่คอมพอสิตมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เพิ่มขึ้น

5.1.9 จากผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าการใส่ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิตพบว่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของคอมพอสิตมีค่าต่ำลง เมื่อปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น และหากปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้น จะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวที่ 1 ของคอมพอสิต มีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.10 จากผลการตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสนั้นไม่มีผลต่อให้อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต แต่การเพิ่มขึ้นของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก จะทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของวัสดุคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลง

5.1.11 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสคอมพอสิต พบลักษณะโดเมนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีขนาดและปริมาณมากขึ้นตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และยังพบเห็นรูพรุนลักษณะกลม ซึ่งเกิดจากการหลุดของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

จะผลการทดลองพบว่าการใช้ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่ปริมาณ 5 phr จะทำให้คอม-  
พอลิทีมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น อย่างไรก็ตามไม่ควรผสมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสในปริมาณที่มาก  
เกินไป เพราะจะทำให้การขึ้นรูปยากขึ้น อีกทั้งความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และไมโครคริสตัล-  
ลีนเซลลูโลสลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาการเตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสจากวัสดุเหลือใช้อื่นๆ เช่น  
เปลือกผลไม้ เป็นต้น

5.2.2 ควรศึกษาถึงการนำไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสไปผสมกับพลาสติกเชิงพาณิชย์  
ชนิดอื่น เช่น พอลิเอทิลีน และพอลิสไตรีน เป็นต้น เพื่อนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้  
ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

5.2.3 ควรศึกษาการขึ้นรูปขึ้นทดสอบในรูปแบบอื่น เช่น การฉีดขึ้นรูป เพื่อนำไป  
ประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

## รายการอ้างอิง

- [1] A. Kiziltas, D.J. Gardner, Y. Han, H.S. Yang. Dynamic Mechanical Behavior and Thermal Properties of Microcrystalline Cellulose (MCC)-Filled Nylon 6 Composites. Thermochimica Acta 519 (2011) : 38-43.
- [2] มุทิตา พงษ์มาลา และกฤษณา รุจิพงษ์ภัทร์. การเตรียมพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพโดยใช้เซลล์ไลสโอสวิสเกอร์ที่ได้จากกระดาษใช้แล้ว. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [3] S.Chuayjuljit, S.Su-Uthai, C.Tunwattanaseree, S.Charuchinda. Preparation of Microcrystalline Cellulose from Waste Cotton Fabric for Biodegradability Enhancement of Natural Rubber Sheets. Reinforced Plastics And Composites 28 (2009) : 1245-1254.
- [4] T. Uesaka, K. Nakane, S. Maeda, T. Ogihara, Ogata. Structure and Physical Properties of Poly(butylene succinate)/Cellulose Acetate Blends. N.Polymer. 41 (2000) : 8449.
- [5] T. Ohkita, S. H.J Lee. Crystallization Behavior of Poly(butylene succinate)/Corn Starch Biodegradable Composite. Appl Polym Sci 97 (2005) : 107.
- [6] A. Sen, M. Bhattacharya, K.A. Stelson, Voller. Creep in Injection Molded Starch/Synthetic Polymer Blends. V. R.Mater Sci Eng 338 (2002) : 60.
- [7] H. Yang, H. Kim, H. Park, B. Lee, T. Hawng. Effect of Compatibilizing Agents on Rice-Husk Flour Reinforced Polypropylene Composites. Compos Struct 77 (2007) : 45-55.
- [8] S.M. Luz, A.R. Gonclaves, Jr AP. Del'Arco. Mechanical Behavior and Microstructural Analysis of Sugarcane Bagasse Fibers Reinforced Polypropylene Composites. Composites: Part A 38 (2007) : 1455-61.

- [9] ปรีชา พหลเทพ. พอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 12. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย  
รามคำแหง, 2547.
- [10] ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. สงขลา : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์,  
2527.
- [11] นิทัศน์ จิระอรุณ. วัสดุพอลิเมอร์. เชียงใหม่ : หน่วยพิมพ์เอกสารและตำรา ภาควิชาเคมี  
อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.
- [12] เจชา จรัสตระกูล. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน/พอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิค  
การผสมแบบรีเอกทีฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [13] Missouri University of Science and Technology. The Notes for Polymer and Coatings.  
Science-Chapter Three [Online]. 1995. Available from : [http://web.mst.edu/~wlf/  
chem381/ chap32.html](http://web.mst.edu/~wlf/chem381/chap32.html) [2011, July 27]
- [14] Chester, E. and Claff, Jr. A Translator's Guide to Organic Chemical Nomenclature  
Part XII [Online]. 2011. Available from : [http://translationjournal.net/journal//05  
org.htm](http://translationjournal.net/journal//05org.htm) [2011, March 9]
- [15] Wikipedia. Maleic anhydride [Online]. 2011 Available from : [http://en.wikipedia.org/  
wiki/= Maleic\\_anhydride](http://en.wikipedia.org/wiki/=Maleic_anhydride) [2011, February 6]
- [16] Institute of Applied Synthetic Chemistry Vienna University of Technology. Reactive  
Extrusion [Online]. 2011. Available from : [http://otech7.tuwien.ac.at/reaktiv\\_sk\\_e.html](http://otech7.tuwien.ac.at/reaktiv_sk_e.html)  
[2011, July 27]
- [17] ศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Green  
product). [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR12.pdf>  
[15 สิงหาคม 2554]
- [18] T.H. Nam, O. Shinji, N.H. Tung and K. Satoshi. Effect of alkali treatment on interfacial  
and mechanical properties of coir fiber reinforced poly(butylene succinate)  
biodegradable composites. Composites Part A 42 (2011) : 1648-1656.

- [19] L. Lifang, Y. Jianyong, C. Londi and Q. Weiwei. Mechanical properties of poly(butylenes succinate)(PBS) biocomposites reinforced with surface modified jute fiber. *Composites* 40 (2009) : 669-674.
- [20] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. เทคโนโลยีพอลิเมอร์. [ออนไลน์]. 2554 แหล่งที่มา: [http://www.mtec.or.th/index.php?option=com\\_content&task=view&id=169&Itemid=178](http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=169&Itemid=178) [7 มีนาคม 2554]
- [21] พิไลลักษณ์ พิทยอภิพล และภคณมน หงวนไธสง. การเตรียมคอมพอสิตของพอลิโพรพิลีน/ทัลก์/แมกนีเซียมออกไซด์ฟิลเฟด.โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [22] R.T. Vanderbilt Company. Mineral Fillers for Rubber and Plastics [Online]. 2011 Available from : <http://www.rtvanderbilt.com/FillersIntroWeb.pdf> [2011, March]
- [23] อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [24] Robinson,S. (Business Development Manager-Minerals). High Performance Fillers [Online]. 2006 Available from : <http://www.rtvanderbilt.com/> [2011, March 6]
- [25] Aminabhavi, T.M., and R.H., Balundai. A Review On Biodegradable Plastics. *Polym. plast. Technol. Eng* 29 (1990) : 235-262.
- [27] Wei, Sung., and Zivko, L., Nikolov. Accelerated Degradation Studies of Starch- Filled Polyethylene Films. *Ind. Eng. Chem. Res* 31 (1992) : 2332-2339.
- [28] Chella, G., Moth, Maria., and Ines, B., Thvares. Study of recycling and biodegradability of ethylene-co-vinyl acetate reject by thermal analysis. *Polym.-plast.Degradation and Stability* 57 (1997) : 183-186.
- [29] นรศิษฐ์ จันทร์กุล. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวดัดแปรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.วิทยานิพนธ์ปริญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [30] อุบลทิพย์ ราวีทิพย์. อิพอกซีเรซินดัดแปรด้วยพีวีซีพลาสติกซอล. วิทยานิพนธ์ปริญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.



- [31] ชุติพร จุงสาย. การศึกษาเอโนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อรา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
- [32] K.Batenburg, L.M.J., and Kroon. The crystal and molecular structure of cellulose I and II. Glycoconjugate Journal 14 (1997) : 667-690.
- [33] O.A. Battista. Hydrolysis and Crystallization, Industrial and Engineering Crystallization. Industrial and Engineering Chemistry 42 (1950) : 502 – 507.
- [34] จินตนา สิริพิทยานานนท์. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก. ใน เอกสารประกอบการเรียนการสอน, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2537.
- [35] cellulose II&I. [Online ]. 2006. Available from : <http://www.google.com>. acceley atomistic modling of the complex interactions cellulose I&II polymorphs [2010,June 14]
- [36] cellulose II&I. [Online ]. 2006. Available from : <http://www.google.com> cellulose II&I [2010,June 10]
- [37] Carrillo, F., Colom, X., Sunol, J.J., and Saurina, J. Structure FT- IR analysis thermal characterisation of lyocell and viscose-type fiber. Thermal character European Polymer Journal 40 (1999) : 2229-2234.
- [38] Weimer, P.J., French, A.D. and Calamari, T. A. Differential Fermentation of Cellulose Allomorphs by Ruminant Cellulolytic Bacteria. American Society for Microbiology 14 (1997) : 667-690.
- [39] Charles Sturt University. Engineering Studies. Manufacturing with Polymers [Online]. 2011 Available from : [http://hsc.csu.edu.au/engineering\\_studies/transport/3059/manuf\\_polymer.html](http://hsc.csu.edu.au/engineering_studies/transport/3059/manuf_polymer.html) [2011, March 8]
- [40] มัณฑนา โอภาประภาสิต. กระบวนการผลิตพอลิเมอร์. ใน เอกสารประกอบการเรียนการสอน รายวิชา 2311326, กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [41] E. Ten, J. Turtle, D. Bahr, L. Jiang, M. Wolcott. Thermal and Mechanical Properties of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)/Cellulose Nanowhiskers Composites. Polymer. 51 (2010) : 2652-2660.

- [42] D.M. Panaitescu, D. Donescu, C. Bercu, D.M. Vuluga, M. Lorga, M. Ghiurea. Polymer Composites With Cellulose Microfibrils. Polymer Engineering and Science 10 (2007) : 1228-1234.
- [43] T. Gcwabaza, S.S. Ray, W.W. Focke and A. Maity. Morphology and properties of nanostructured materials based on polypropylene/poly(butylene succinate) blend and organoclay. European Polymer Journal 45 (2009) : 353-367.
- [44] P. Chaiwutthinun, S. Chuayjuljit and T. Leejarkpai. Use of microcrystalline cellulose prepared from cotton fabric waste to prepare poly(butylene succinate) composites. Advanced Materials Research (2011) : 356-360, 430-434.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## ลักษณะไมโครคริสตัลลินที่เตรียมได้

ก.1 ผลจากการไฮโดรไลซ์จากเศษใยฝ้าย

ตารางที่ ก.1.1

วัตถุดิบ	น้ำหนักไมโครคริสตัลลิน เซลลูโลสที่ได้	เปอร์เซ็นต์ไมโครคริสตัลลิน เซลลูโลสที่ไฮโดรไลซ์ได้
เศษใยฝ้าย	41.89	87.9



ภาพ ก-1 ลักษณะเศษใยฝ้ายและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสจากเศษใยฝ้าย

ก.1 ผลการตรวจวัดขนาดอนุภาคไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสด้วยเทคนิค Laser light scattering

<b>Particle Name:</b> Cellulose	<b>Accessory Name:</b> Hydro 2000SM (A)	<b>Analysis model:</b> General purpose	<b>Sensitivity:</b> Normal
<b>Particle RI:</b> 1.618	<b>Absorption:</b> 0.1	<b>Size range:</b> 0.020 to 2000.000 um	<b>Obscuration:</b> 19.42 %
<b>Dispersant Name:</b> Water	<b>Dispersant RI:</b> 1.330	<b>Weighted Residual:</b> 1.653 %	<b>Result Emulation:</b> Off
<b>Concentration:</b> 0.0251 %Vol	<b>Span :</b> 2.288	<b>Uniformity:</b> 0.702	<b>Result units:</b> Volume
<b>Specific Surface Area:</b> 0.669 m <sup>2</sup> /g	<b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b> 8.964 um	<b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b> 22.540 um	
<b>d(0.1):</b> 4.701 um	<b>d(0.5):</b> 18.262 um	<b>d(0.9):</b> 46.488 um	

Size (?m)	Volume In %
0.010	0.00
0.011	0.00
0.013	0.00
0.015	0.00
0.017	0.00
0.020	0.00
0.023	0.00
0.026	0.00
0.030	0.00
0.035	0.00
0.040	0.00
0.046	0.00
0.052	0.00
0.060	0.00
0.069	0.00
0.079	0.00
0.091	0.00
0.105	0.00

Size (?m)	Volume In %
0.105	0.00
0.120	0.00
0.138	0.00
0.158	0.00
0.182	0.00
0.209	0.00
0.240	0.00
0.275	0.00
0.316	0.00
0.363	0.00
0.417	0.00
0.479	0.10
0.550	0.18
0.631	0.26
0.724	0.31
0.832	0.36
0.955	0.40
1.096	

Size (?m)	Volume In %
1.096	0.44
1.259	0.49
1.445	0.54
1.660	0.61
1.905	0.67
2.188	0.74
2.512	0.83
2.884	0.93
3.311	1.08
3.802	1.27
4.365	1.53
5.012	1.86
5.754	2.29
6.607	2.79
7.586	3.39
8.710	4.03
10.000	4.71
11.482	

Size (?m)	Volume In %
11.482	5.37
13.183	5.97
15.136	6.44
17.378	6.75
19.953	6.85
22.909	6.71
26.303	6.36
30.200	5.81
34.674	5.11
39.811	4.33
45.709	3.51
52.481	2.72
60.256	1.99
69.183	1.35
79.433	0.79
91.201	0.11
104.713	0.00
120.226	

Size (?m)	Volume In %
120.226	0.00
138.038	0.00
158.489	0.00
181.970	0.00
208.930	0.00
239.883	0.00
275.423	0.00
316.228	0.00
363.078	0.00
416.869	0.00
478.630	0.00
549.541	0.00
630.957	0.00
724.436	0.00
831.764	0.00
954.993	0.00
1096.478	0.00
1258.925	0.00

Size (?m)	Volume In %
1258.925	0.00
1445.440	0.00
1659.587	0.00
1905.461	0.00
2187.762	0.00
2511.886	0.00
2884.032	0.00
3311.311	0.00
3801.894	0.00
4365.158	0.00
5011.872	0.00
5754.399	0.00
6606.934	0.00
7585.776	0.00
8709.636	0.00
10000.000	

**ภาคผนวก ข**  
**ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง**

ข.1 แสดงสมบัติความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต

ข.1.1 สมบัติความทนแรงดึง (Tensile Strength)

**ตาราง ข-1** แสดงสมบัติความทนแรงดึง (Tensile Strength)

(PP/MCC/PP-g- MA)	Tensile strength (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	38.0	40.2	39.8	40.4	38.6	39.4	0.76
100/5/0	47.2	46.8	46.9	47.5	46.02	47.02	0.32
100/5/5	51.6	50.1	50.6	49.1	49.0	50.95	1.06
100/10/0	41.0	40.3	40.9	41.5	41.8	41.07	0.58
100/10/5	45.4	46.7	45.7	45.9	46.0	45.96	0.48
100/15/0	32.8	33.6	33.8	34.2	33.7	33.76	0.51
100/15/5	40.9	38.5	38.3	37.7	40.5	39.17	1.42

ข.1.2 ค่ายังส์มอดุลัส (Young 's modulus)

ตาราง ข-2 แสดงค่ายังส์มอดุลัส (Young 's modulus)

(PP/MCC/PP-g- MA)	Young 's modulus (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	371.41	398.11	367.32	384.21	373.86	377.2	12.46
100/5/0	833.11	349.41	853.05	841.93	859.32	844.67	4.76
100/5/5	924.11	943.32	937.49	929.50	932.67	931.19	6.34
100/10/0	887.15	902.07	884.48	892.56	884.65	897.45	7.94
100/10/5	996.2	977.78	884.48	892.56	887.65	1002.10	7.40
100/15/0	1109.11	1117.57	1102.98	1101.49	1108.14	1107.81	6.43
100/15/5	1109.87	1117.45	1117.45	1134.91	1125.10	1122.96	9.43



ข.1.3 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

ตาราง ข-3 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

(PP/MCC/PP-g- MA)	Elongation at break (%)					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	13.61	12.97	13.98	14.23	13.42	13.68	0.49
100/5/0	11.38	12.68	11.67	11.71	12.74	12.51	0.63
100/5/5	13.33	12.91	13.48	12.67	13.81	13.91	0.46
100/10/0	11.32	11.81	10.07	10.14	10.31	10.64	0.78
100/10/5	11.22	11.61	11.53	12.53	13.01	11.67	0.75
100/15/0	8.34	9.10	10.14	9.53	10.10	9.88	0.77
100/15/5	10.84	11.54	11.67	10.09	9.77	10.39	0.85

ข.2 แสดงสมบัติความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีน  
เซลลูโลสคอมพอสิต

ข.2.1 สมบัติความทนแรงดึง (Tensile Strength)

ตาราง ข-4 แสดงสมบัติความทนแรงดึง (Tensile Strength)

(PP/PBS/MCC/ PP-g-MA)	Tensile strength (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
90/10/0/5	33.12	32.86	33.1	34.77	33.39	33.50	0.84
90/10/5/5	31.78	32.86	32.56	33.19	34.09	32.70	0.89
90/10/10/5	29.12	3263	30.43	31.62	30.32	30.76	0.89
90/10/15/5	26.45	26.98	27.91	27.76	26.73	27.30	0.69
80/20/0/5	27.41	28.35	28.47	27.22	26.96	27.79	0.70
80/20/5/5	24.55	26.75	26.01	25.77	25.52	25.88	0.80
80/20/10/5	22.81	22.84	23.67	24.93	23.36	23.99	1.03
80/20/15/5	23.06	23.90	23.34	24.31	24.19	23.68	0.54
70/30/0/5	24.99	23.41	23.39	24.02	24.64	24.43	0.71
70/30/5/5	22.76	23.51	23.00	23.67	23.84	23.70	0.54
70/30/10/5	23.44	22.67	22.93	23.93	23.56	23.35	0.40
70/30/15/5	22.23	22.20	22.43	23.45	21.26	22.29	0.87

๗.2.2 ค่ายังส์มอดุลัส (Young 's modulus)

ตาราง ๗-5 แสดงค่ายังส์มอดุลัส (Young 's modulus)

(PP/PBS/MCC/ PP-g-MA)	Young 's modulus (MPa)					X	SD
	1	2	3	4	5		
90/10/0/5	317.45	310.61	327.56	324.78	321.52	315.3	7.40
90/10/5/5	641.74	654.89	640.23	644.21	654.41	645.52	6.90
90/10/10/5	731.23	735.56	747.52	740.58	732.06	735.76	7.00
90/10/15/5	871.17	868.05	855.18	870.10	867.50	866.23	6.44
80/20/0/5	440.07	445.70	449.09	451.76	445.26	446.44	5.28
80/20/5/5	737.98	713.44	709.98	719.91	702.55	719.01	13.20
80/20/10/5	773.21	776.33	767.17	789.45	793.15	785.34	11.00
80/20/15/5	988.05	992.33	978.56	989.66	988.45	985.45	5.29
70/30/0/5	437.76	431.66	434.72	443.31	436.78	433.13	4.06
70/30/5/5	671.36	682.43	665.48	683.98	676.34	678.21	7.57
70/30/10/5	731.87	732.21	715.49	722.42	726.19	721.66	5.82
70/30/15/5	764.86	745.93	767.08	752.87	757.87	758.63	13.20

ข.2.3 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

ตาราง ข-6 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

(PP/PBS/MCC/ PP-g-MA)	Elongation at break (%)					X	SD
	1	2	3	4	5		
90/10/0/5	21.82	23.57	23.96	22.11	22.51	22.73	1.09
90/10/5/5	16.31	17.85	18.58	17.67	17.63	17.65	0.82
90/10/10/5	110.5	11.58	12.99	12.94	11.07	11.78	0.96
90/10/15/5	9.77	10.14	10.65	10.82	10.24	10.24	0.42
80/20/0/5	21.94	20.51	20.19	21.47	22.04	21.89	0.84
80/20/5/5	12.94	13.83	14.22	13.98	15.26	14.45	0.83
80/20/10/5	11.94	10.51	10.19	11.47	11.04	11.35	0.70
80/20/15/5	9.77	10.41	10.56	10.28	10.43	10.08	0.30
70/30/0/5	16.24	16.89	16.9	17.67	16.37	16.44	0.56
70/30/5/5	11.83	12.86	11.46	11.17	12.47	12.35	0.74
70/30/10/5	8.43	9.10	10.11	9.56	10.2	9.59	0.65
70/30/15/5	9.02	9.56	9.20	8.34	9.10	9.08	0.44

## ภาคผนวก ค

## ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ค.1 แสดงสมบัติความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน/ไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลสคอมพอสิต

ตาราง ค-1 ค่าความทนแรงกระแทก

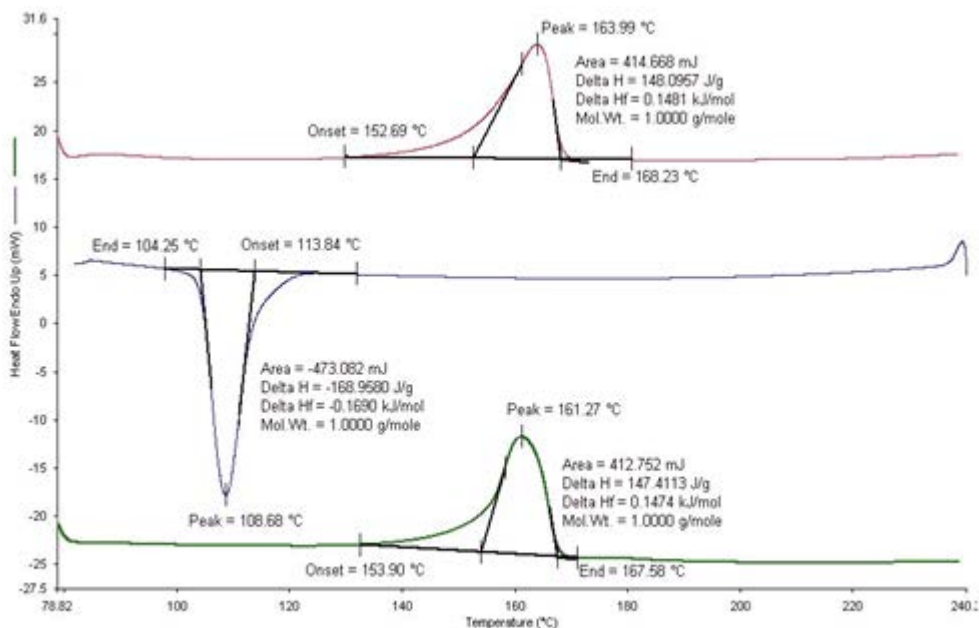
(PP/MCC/PP-g-MA)	Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )					X	SD
	1	2	3	4	5		
100/0/0	1.77	1.58	1.66	1.76	1.84	1.76	0.15
100/5/0	1.76	1.78	1.96	1.67	1.84	1.86	0.07
100/5/5	1.81	1.85	1.98	1.98	2.22	1.96	0.19
100/10/0	1.26	1.37	1.36	1.47	1.56	1.41	0.11
100/10/5	1.44	1.58	1.63	1.52	1.54	1.54	0.17
100/15/0	1.43	1.34	1.50	1.34	1.45	1.40	0.23
100/15/5	1.42	1.46	1.43	1.36	1.48	1.42	0.18

ค.2 แสดงสมบัติความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ไมโครคริสตัลลีน  
เซลลูโลสคอมพอสิต

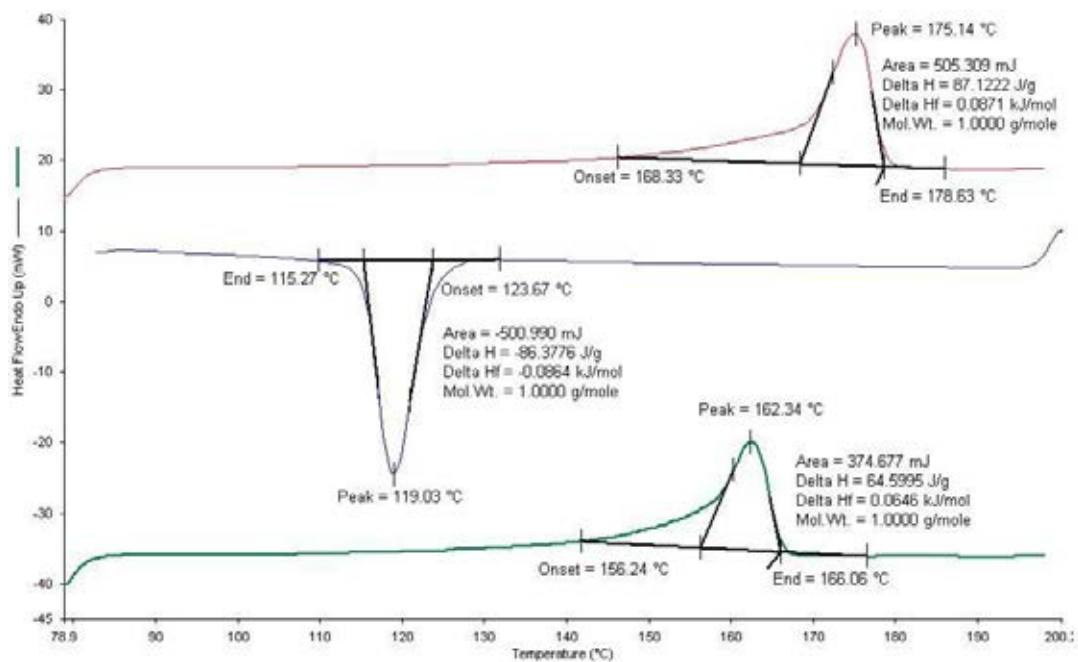
ตาราง ค-2 ค่าความทนแรงกระแทก

(PP/PBS/MCC/ PP-g-MA)	Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )					X	SD
	1	2	3	4	5		
90/10/0/5	2.01	1.82	1.88	1.85	1.89	1.89	0.07
90/10/5/5	1.91	1.90	2.05	1.95	1.97	1.95	0.06
90/10/10/5	1.90	1.83	1.56	1.94	1.72	1.79	0.15
90/10/15/5	1.88	1.79	1.68	1.81	1.62	1.76	0.10
80/20/0/5	2.07	1.91	2.01	2.00	2.04	2.00	0.06
80/20/5/5	2.15	2.14	2.49	2.03	2.07	2.18	0.18
80/20/10/5	1.98	2.49	2.20	2.09	1.97	2.14	0.22
80/20/15/5	1.59	1.85	1.77	1.90	1.84	1.79	0.12
70/30/0/5	2.23	2.32	2.22	2.38	1.97	2.22	0.16
70/30/5/5	2.30	2.29	2.32	2.42	2.70	2.40	0.17
70/30/10/5	2.04	2.06	2.35	2.15	2.30	2.16	0.12
70/30/15/5	2.34	1.90	2.12	2.00	2.07	2.10	0.18

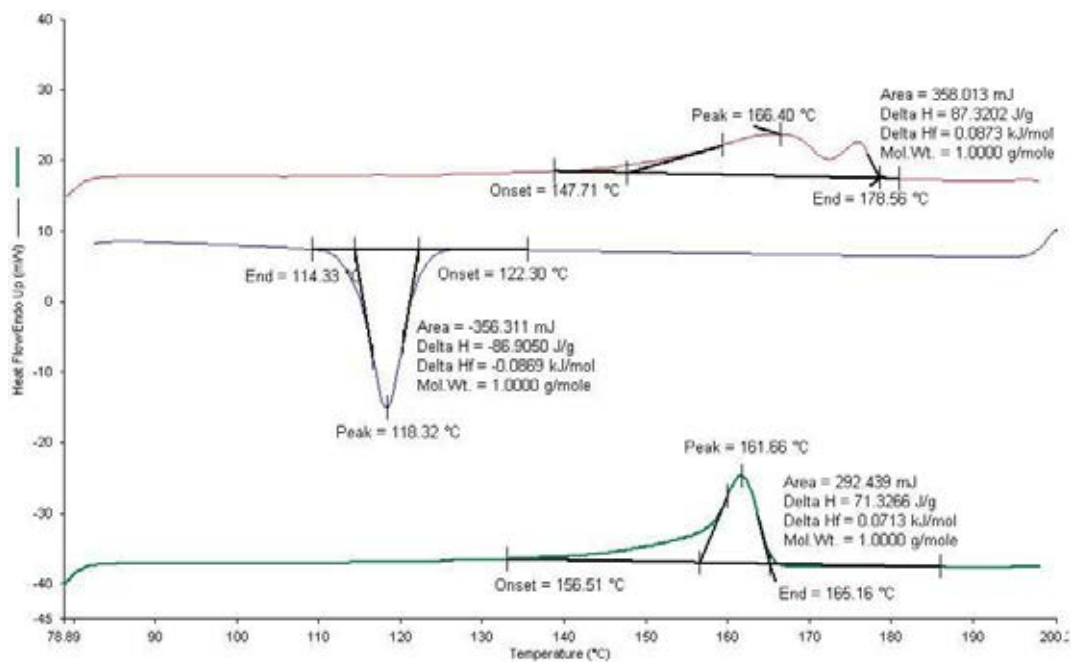
ภาคผนวก ง  
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



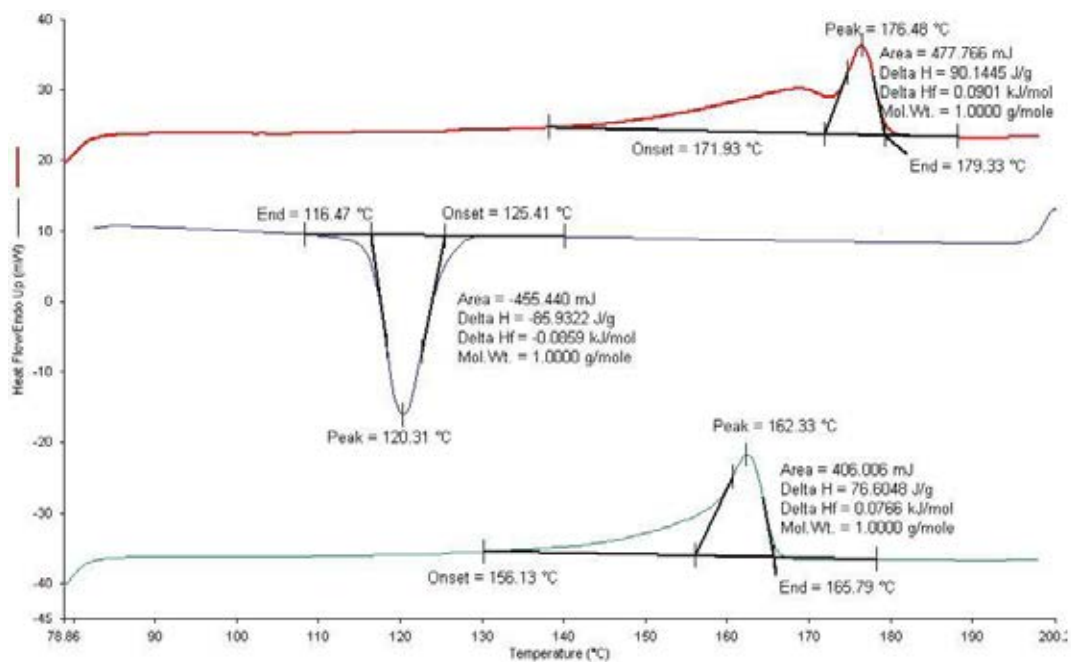
ภาพ ง-1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/0/0



ภาพ ง-2 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/5/0

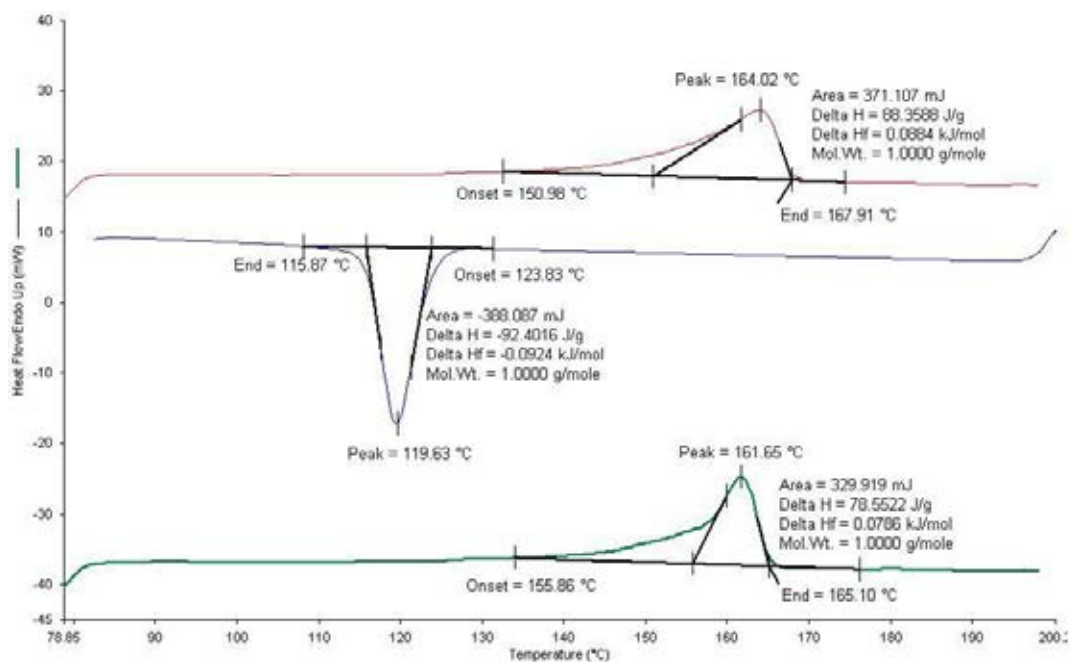


ภาพ ง-3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/5/5

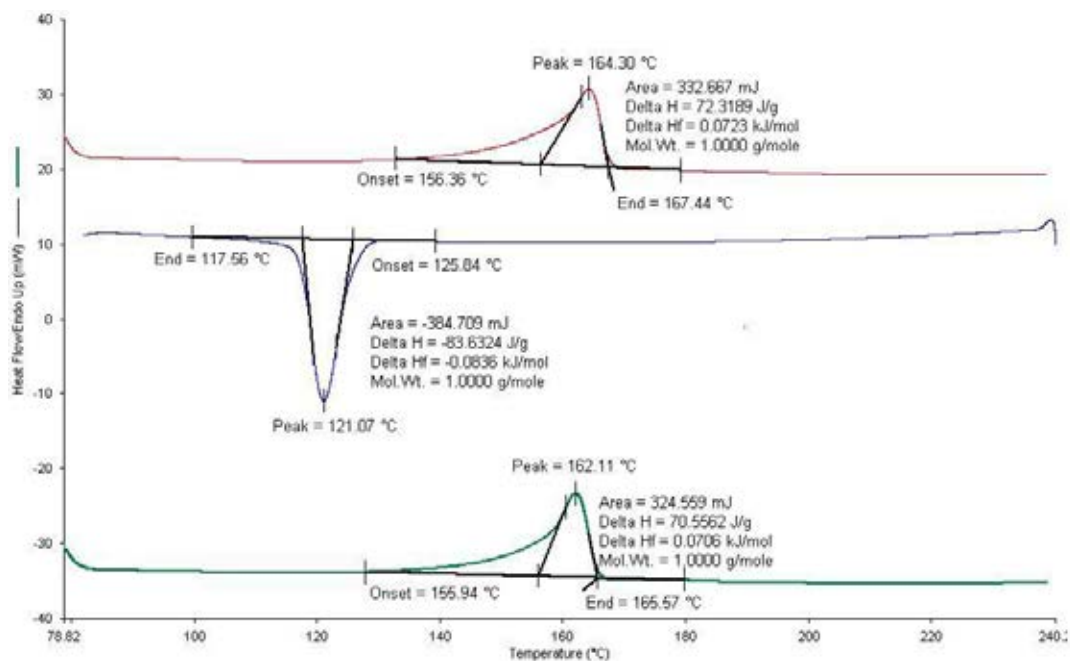


ภาพ ง-4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/10/0

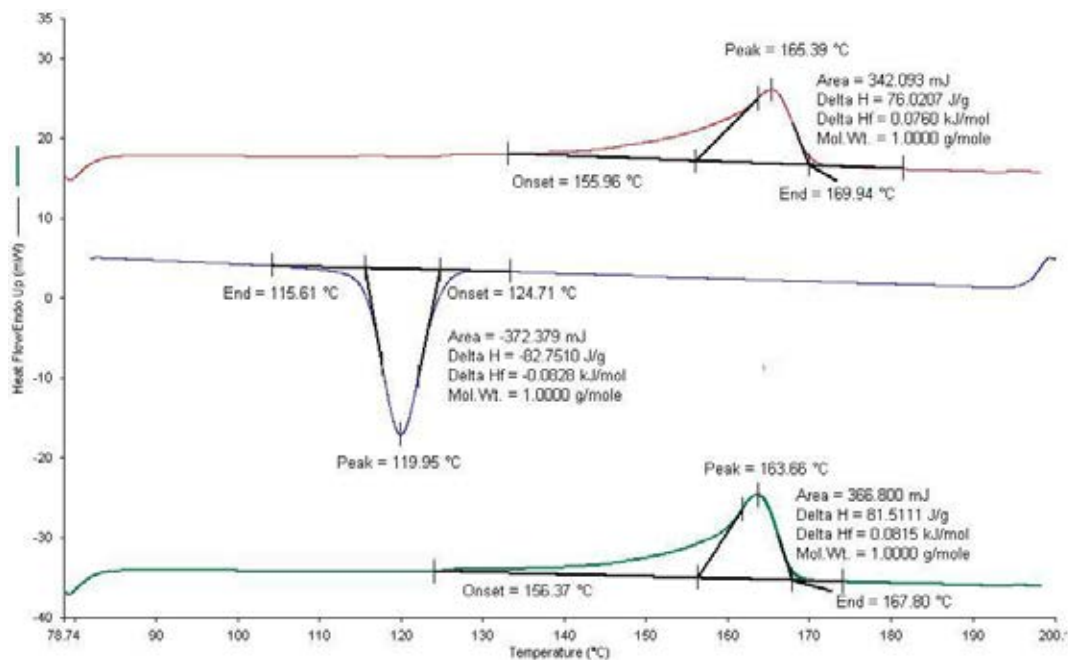




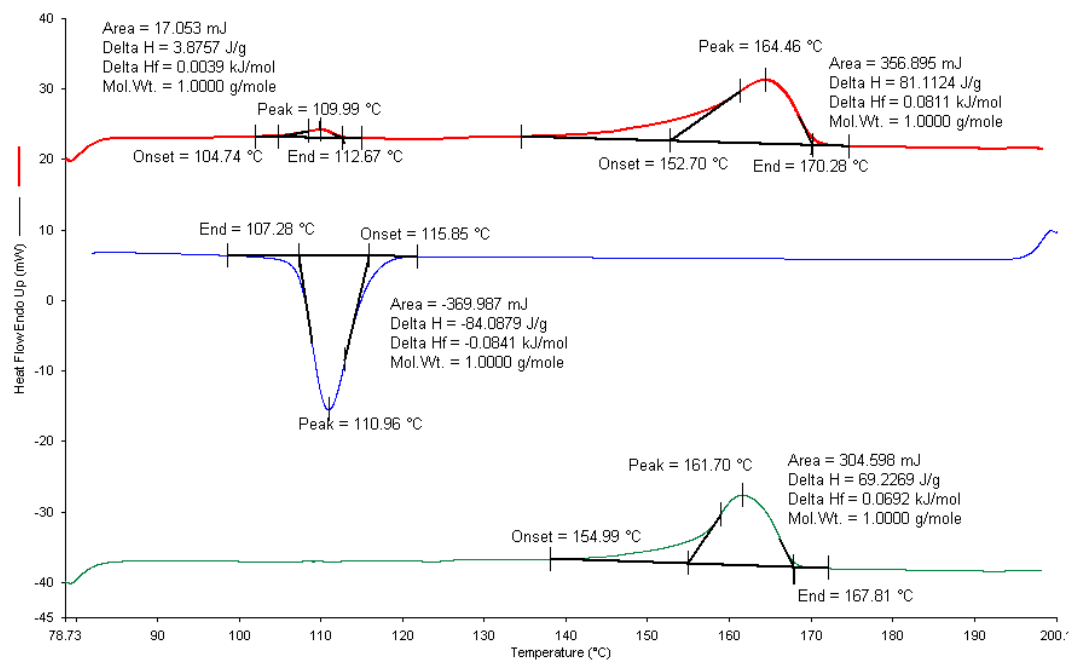
ภาพ ง-5 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/10/5



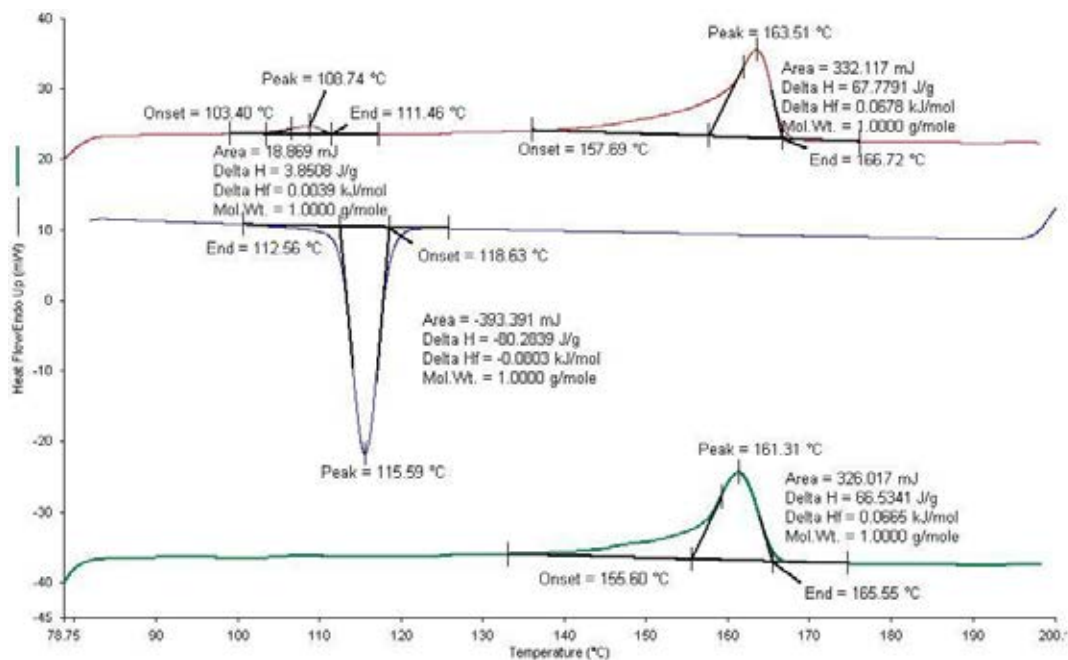
ภาพ ง-6 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/15/0



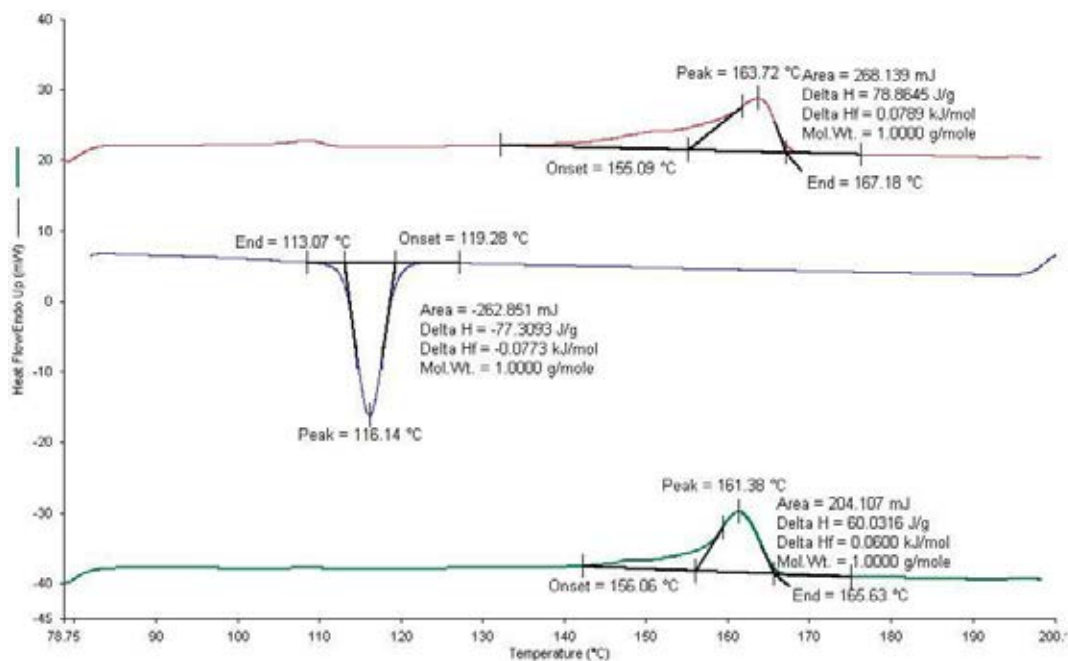
ภาพ ง-7 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/15/5



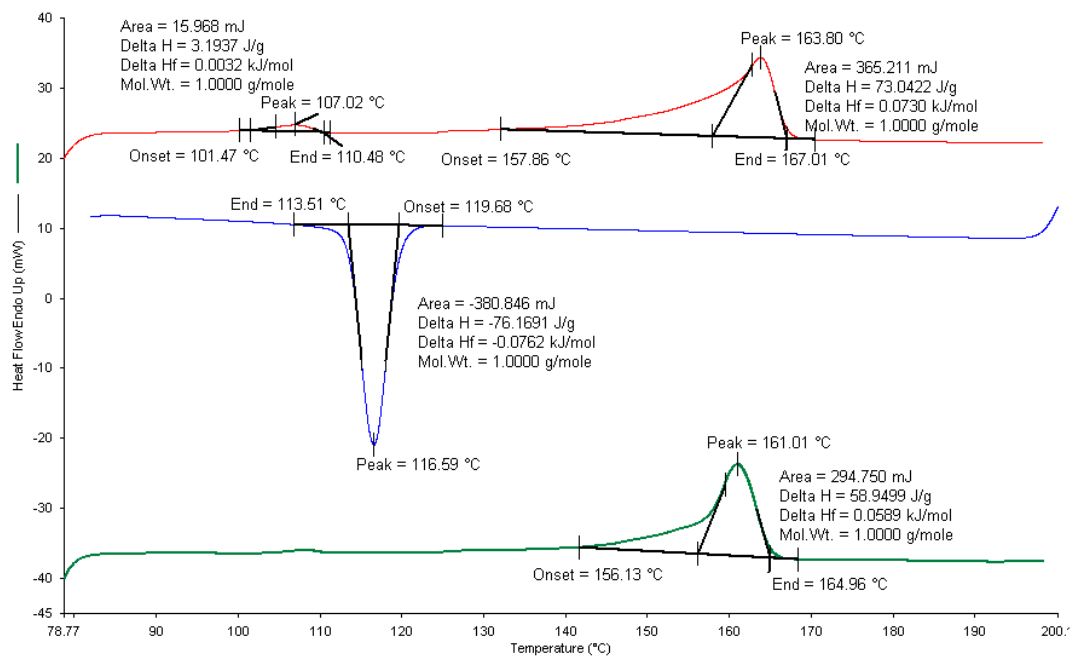
ภาพ ง-8 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 90/10/0/5



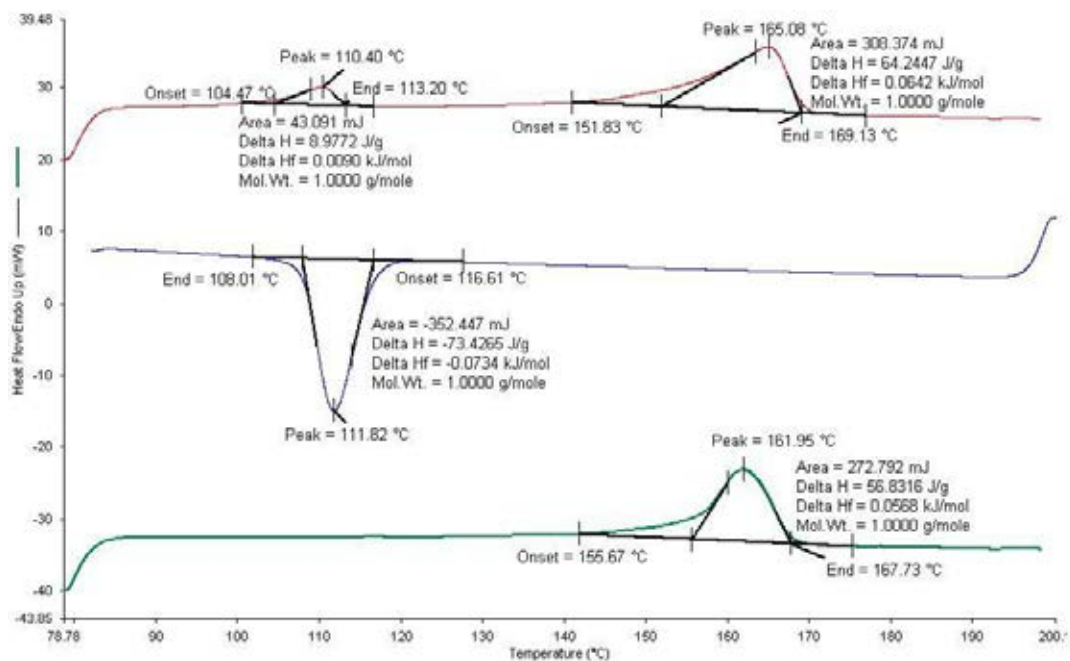
ภาพ ง-9 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 90/10/5/5



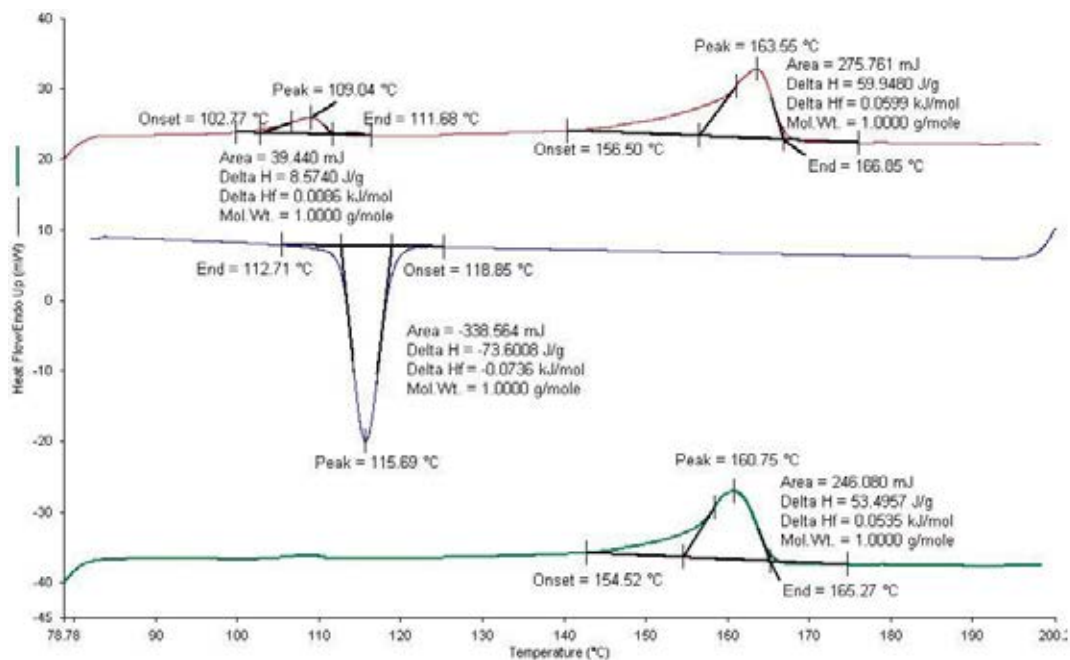
ภาพ ง-10 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 90/10/10/5



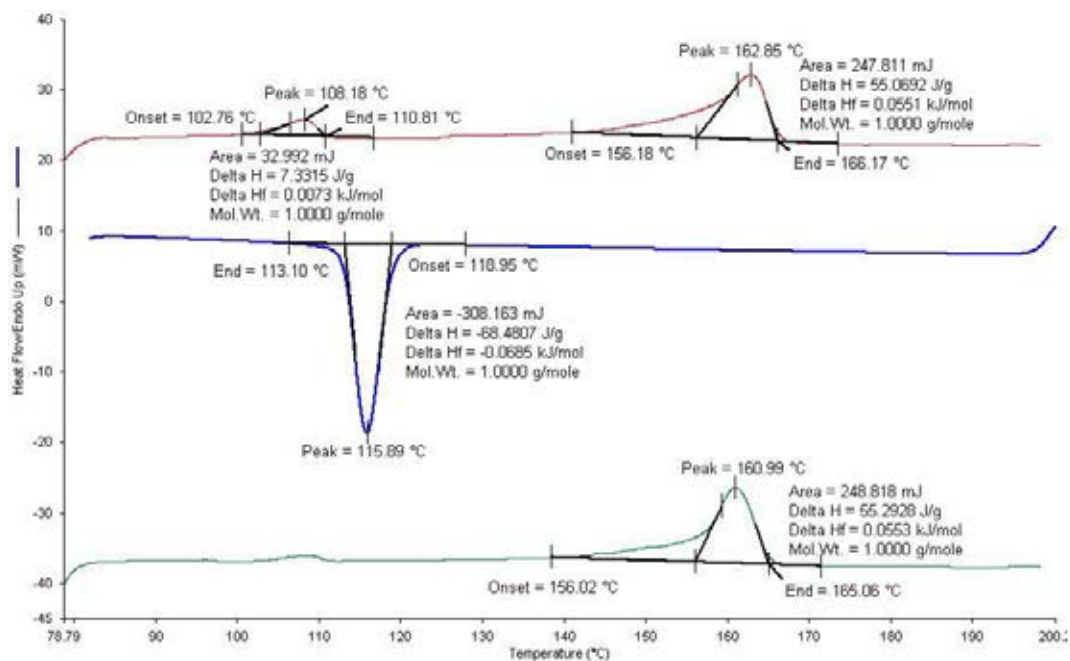
ภาพ ง-11 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 90/10/15/5



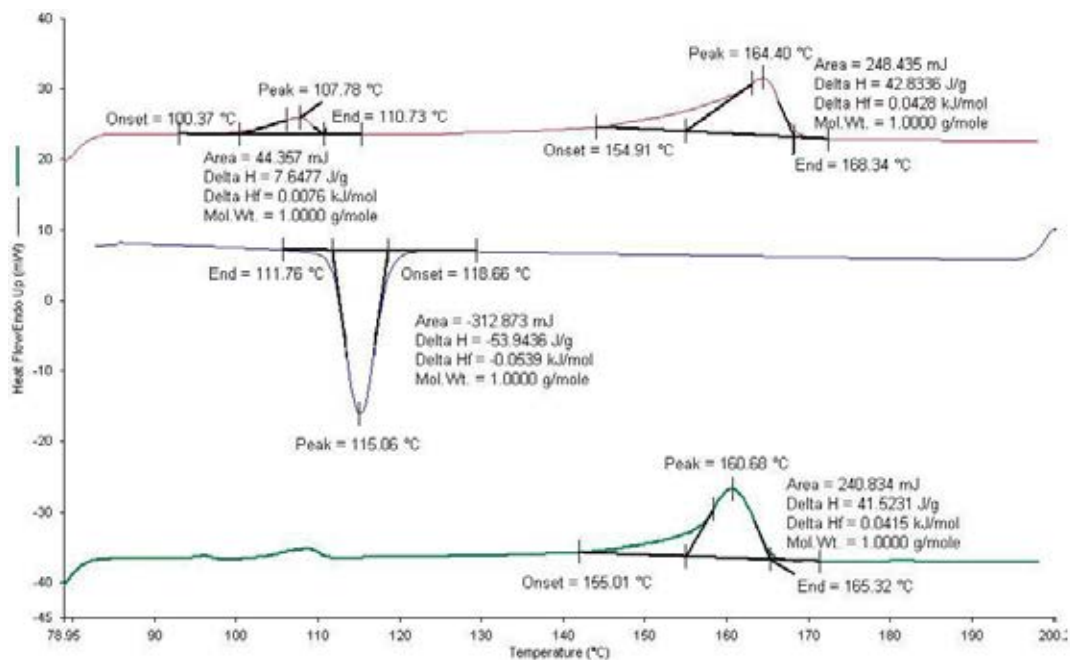
ภาพ ง-12 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/0/5



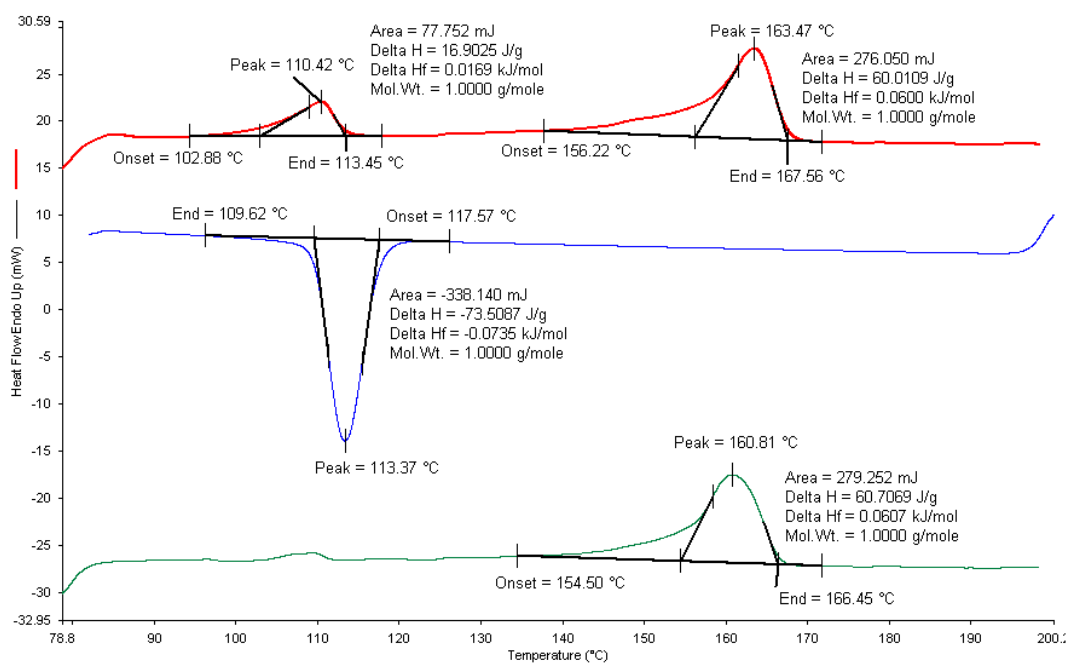
ภาพ ง-13 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/5/5



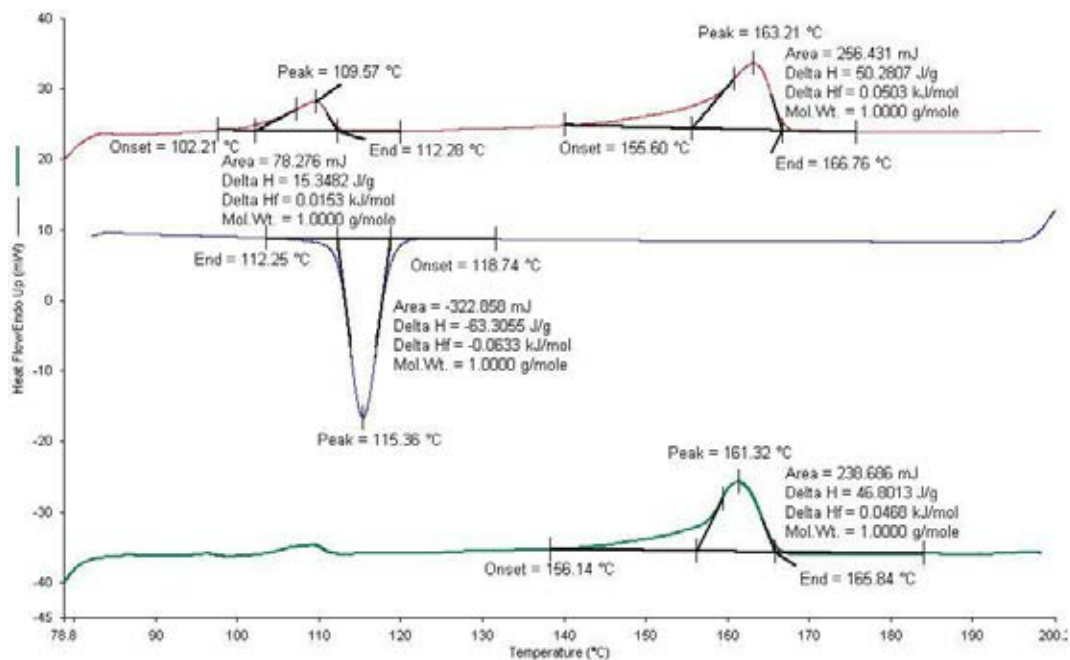
ภาพ ง-14 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/10/5



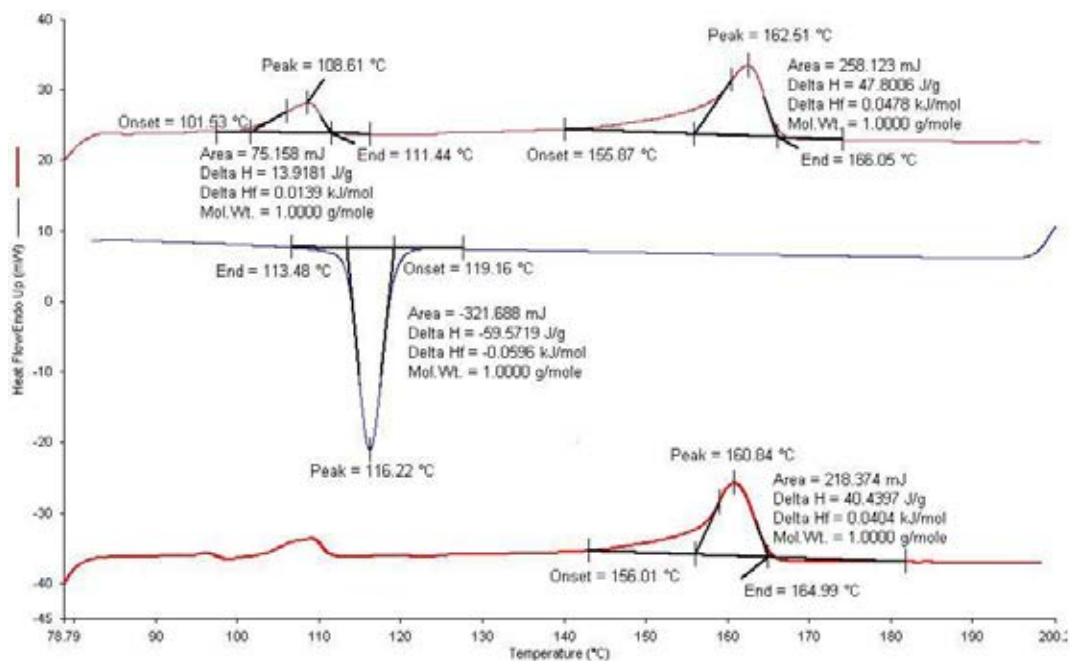
ภาพ ง-15 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/15/5



ภาพ ง-16 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0/5

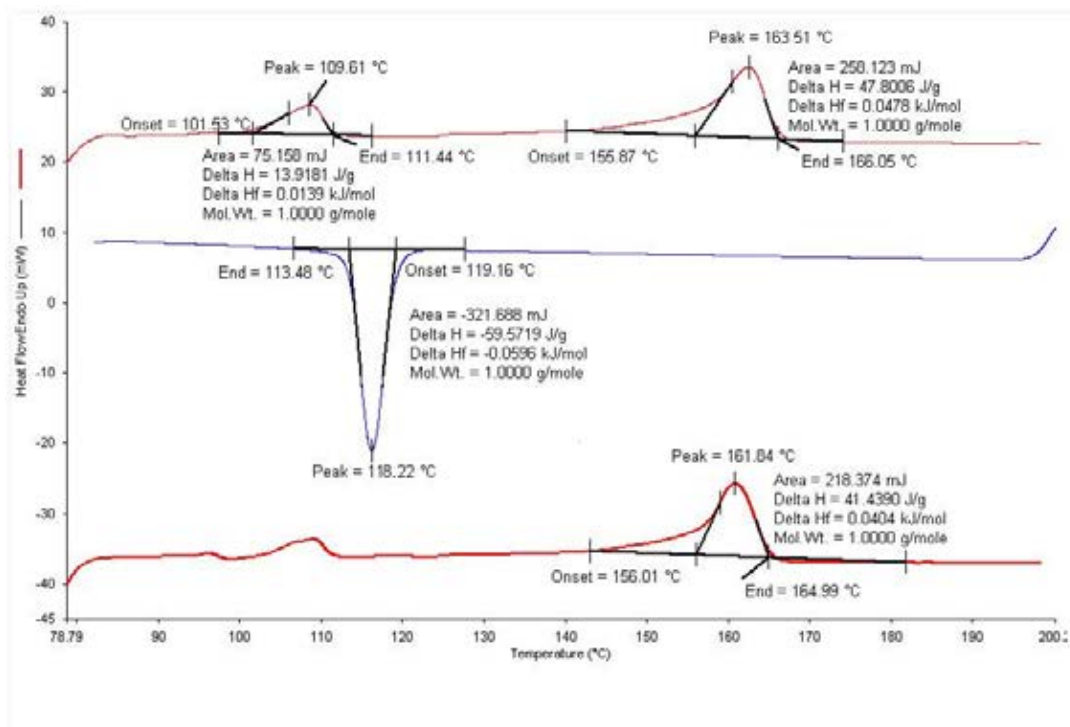


ภาพ ง-17 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/5/5



ภาพ ง-18 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10/5



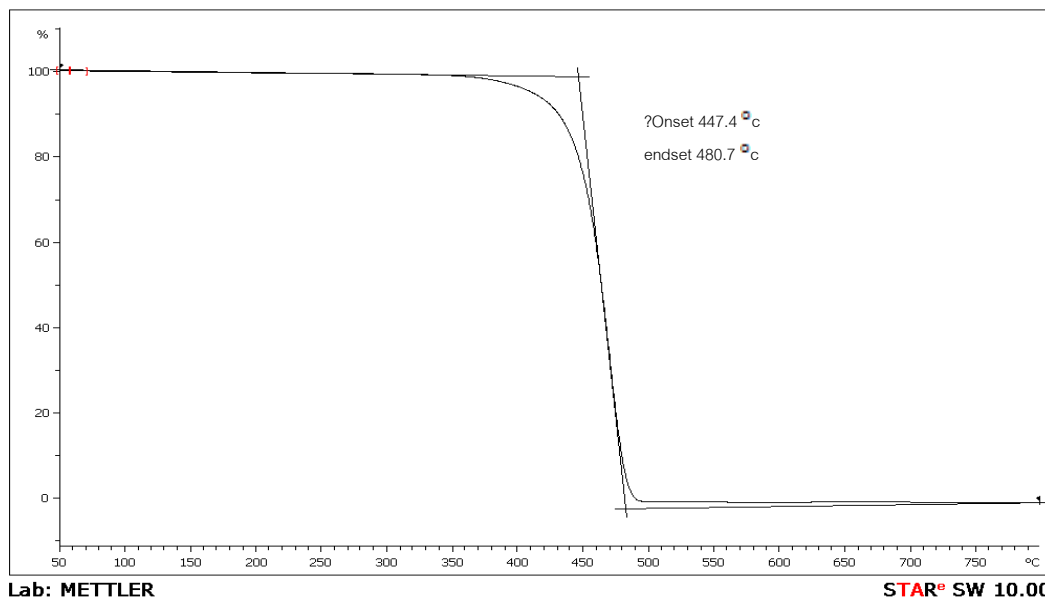


ภาพ ง-19 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/15/5

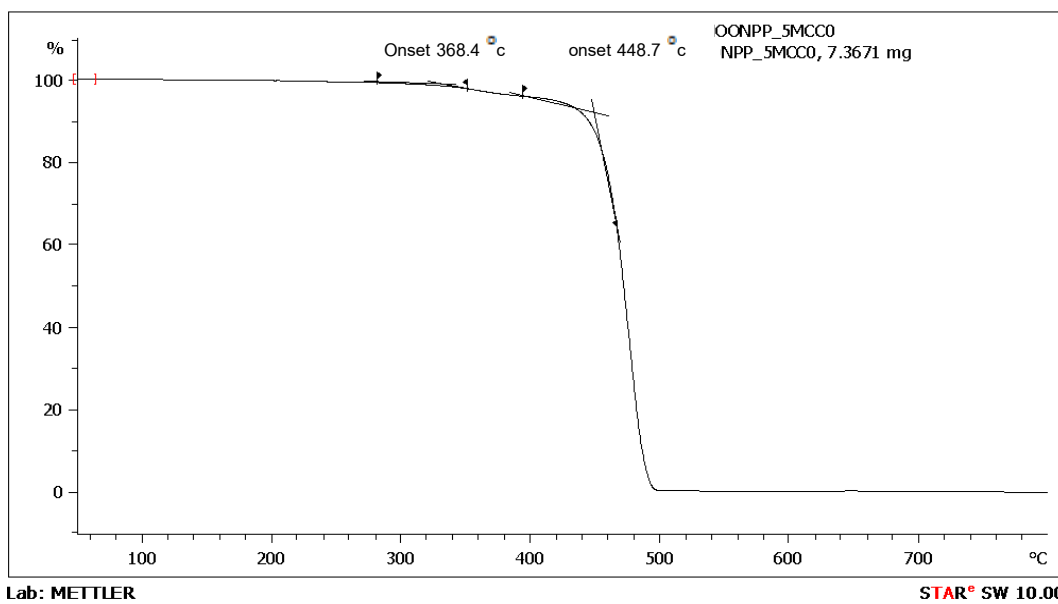


## ภาคผนวก จ

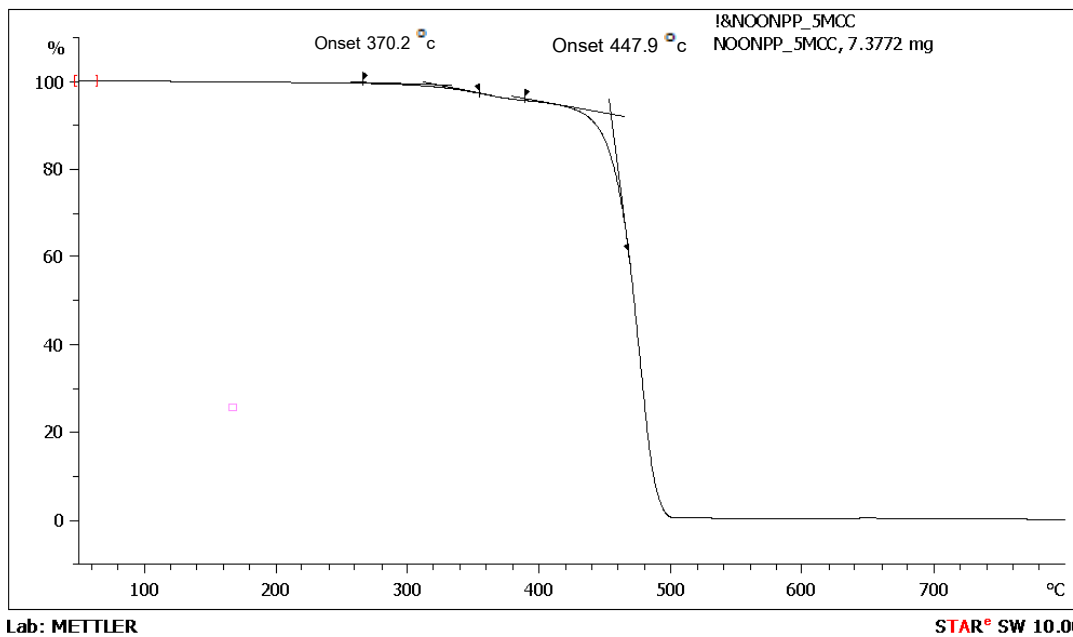
## ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



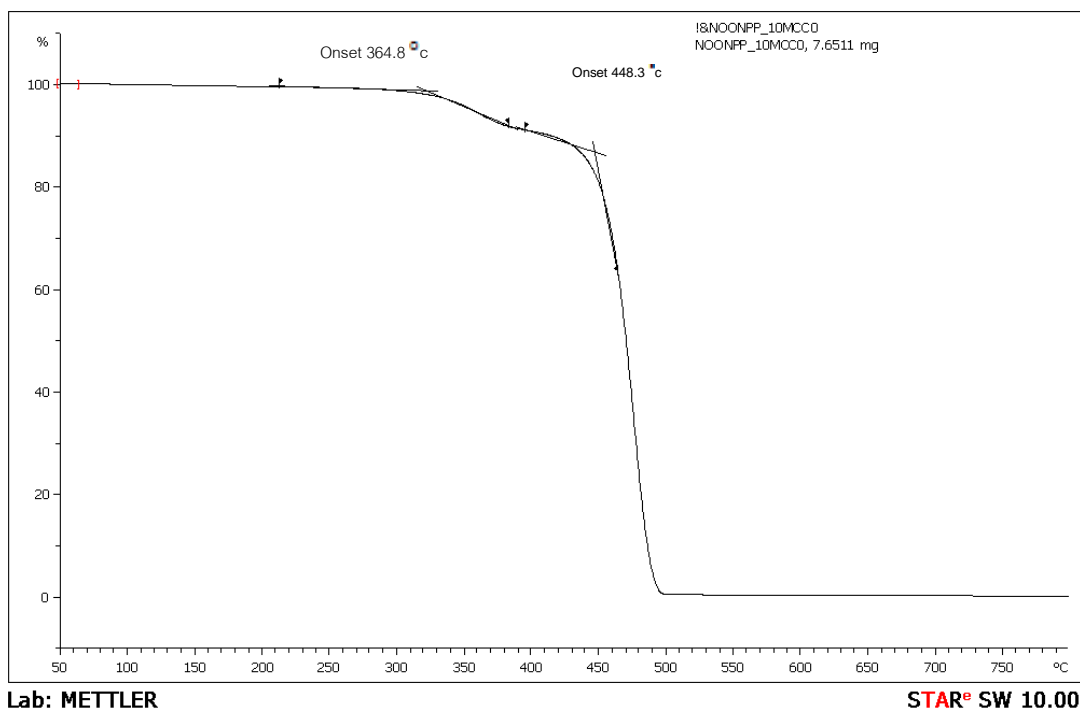
ภาพ จ-1 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/0/0



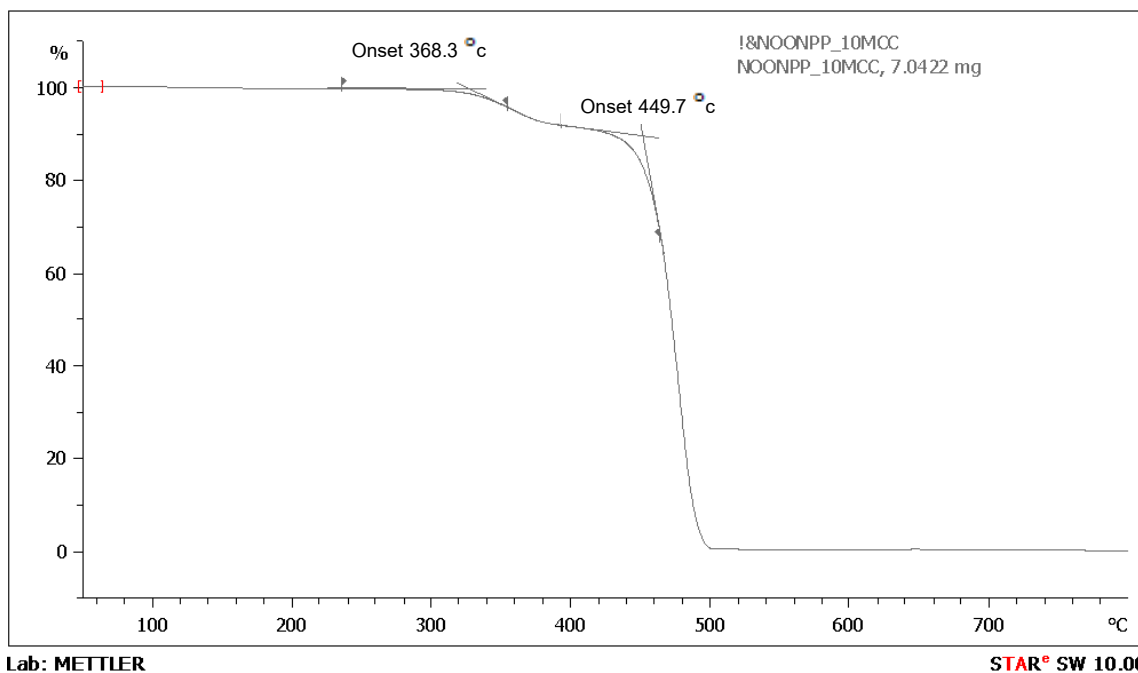
ภาพ จ-2 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/5/0



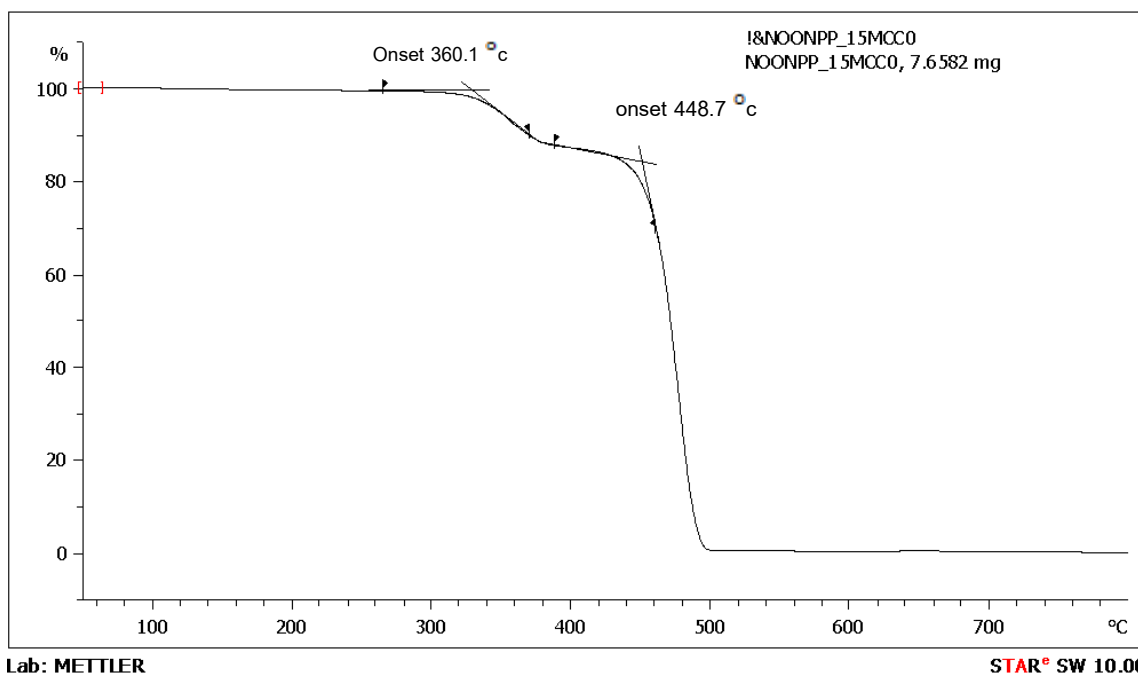
ภาพ ๑-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/5/5



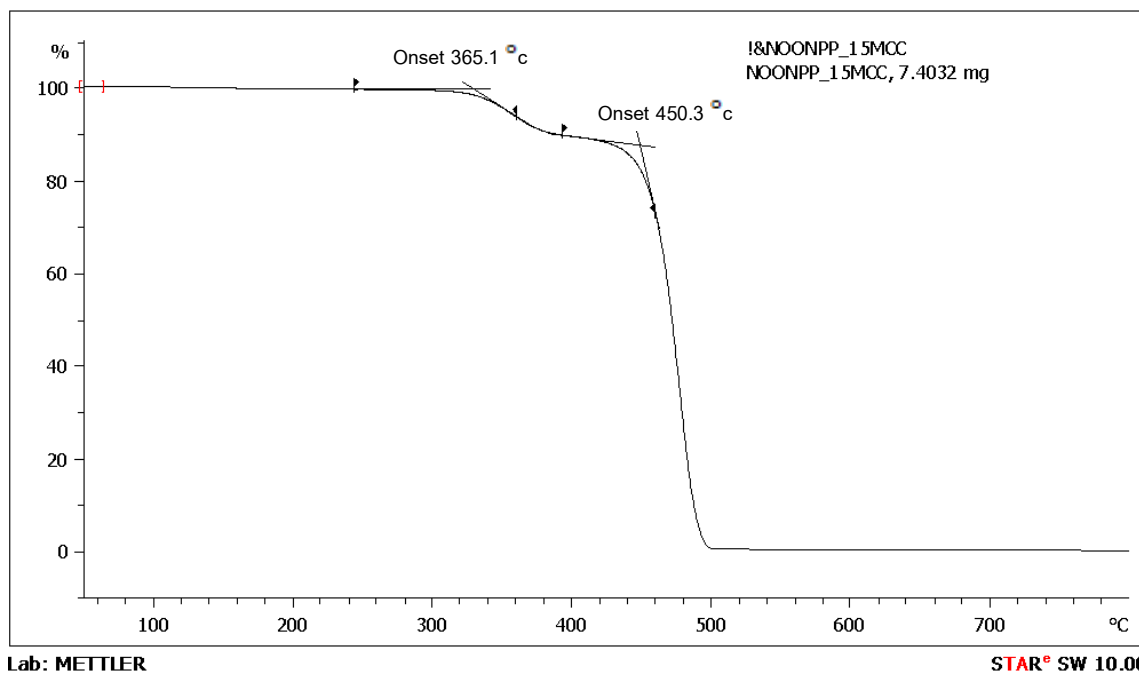
ภาพ ๑-4 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/10/0



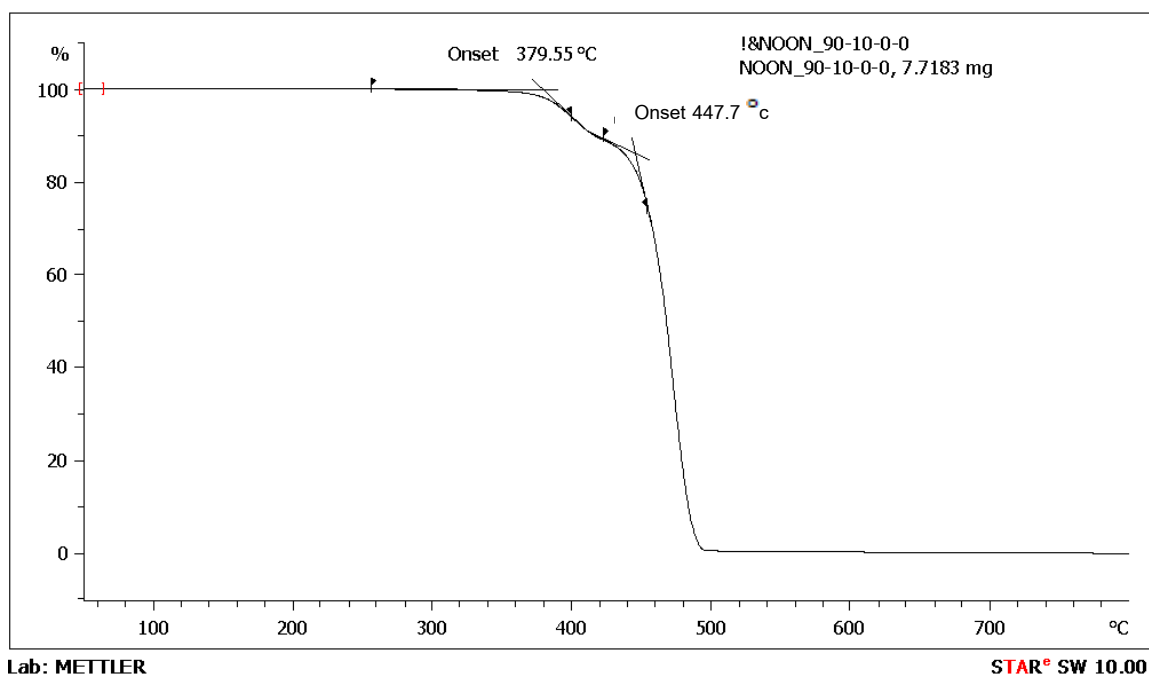
ภาพ จ-5 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพโรฟิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/10/5



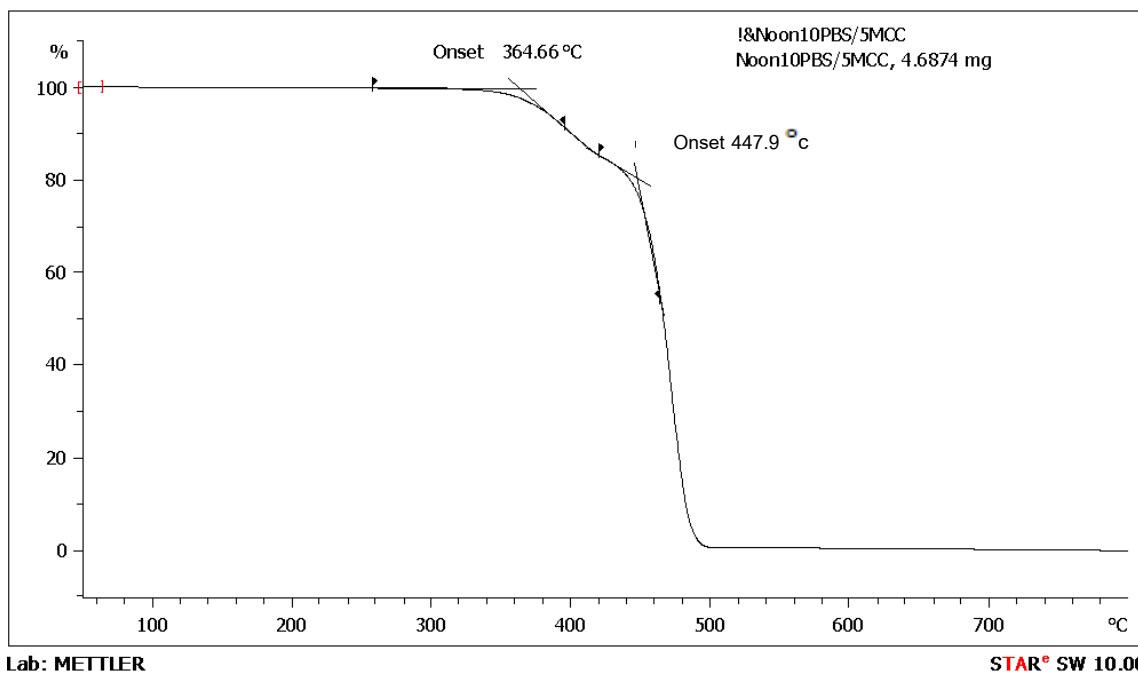
ภาพ จ-6 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิไพโรฟิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/15/0



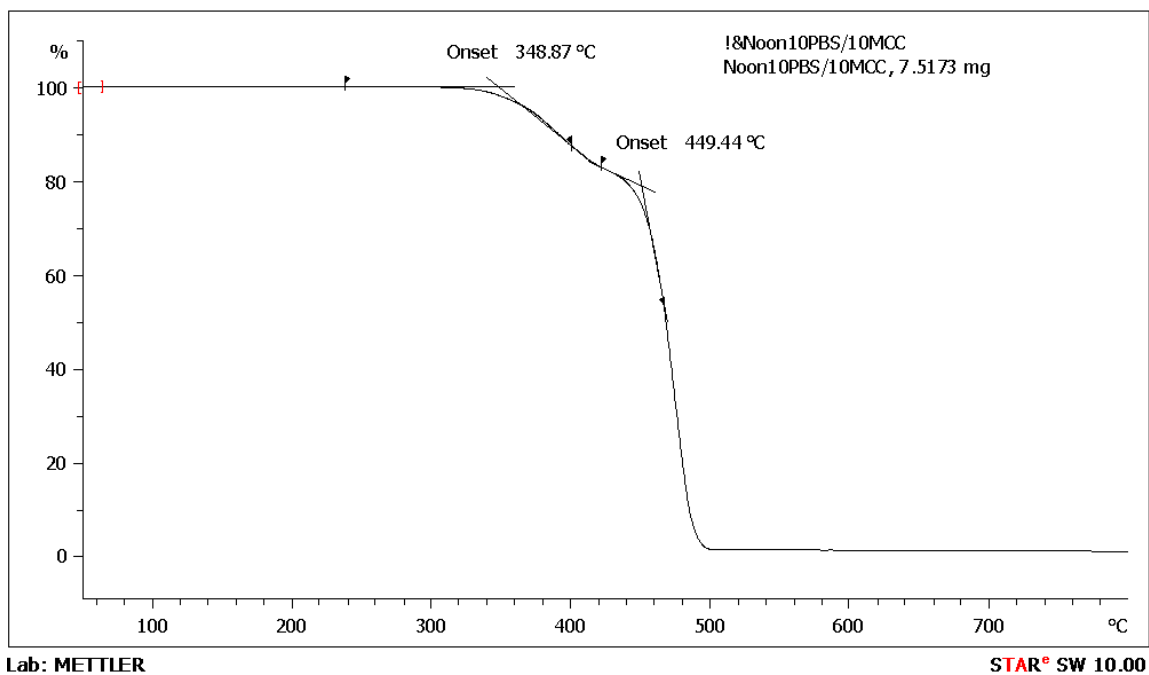
ภาพ จ-7 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 100/15/5



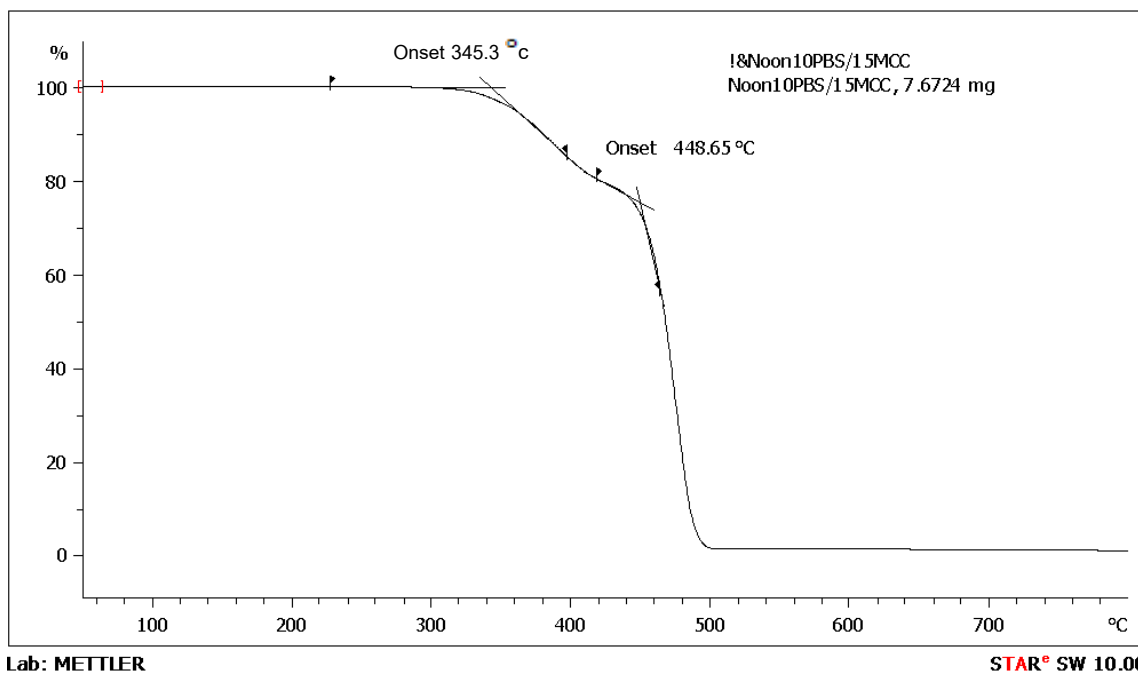
ภาพ จ-8 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 90/10/0/5



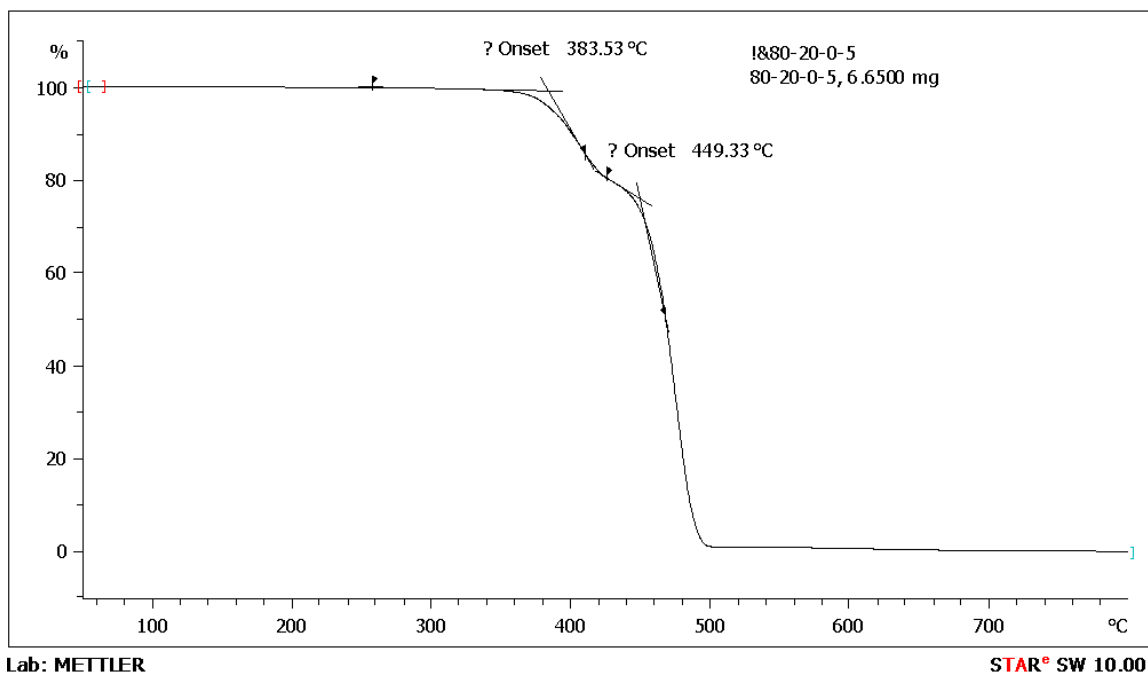
ภาพ จ-9 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 90/10/5/5



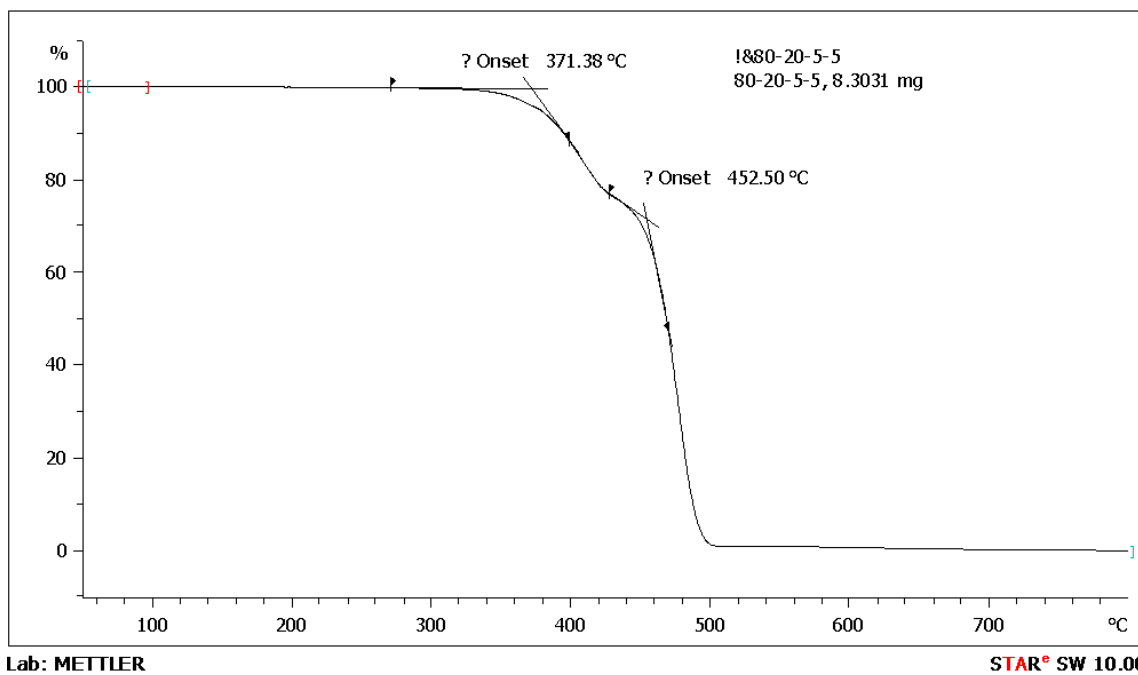
ภาพ จ-10 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 90/10/10/5



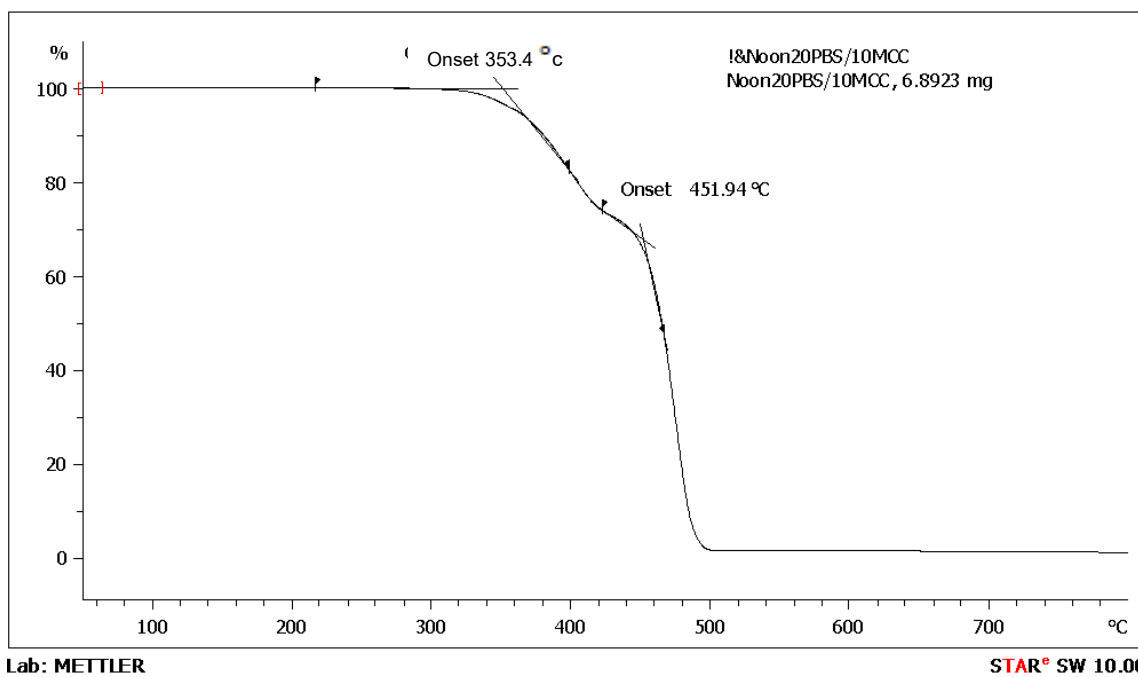
ภาพ จ-11 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 90/10/15/5



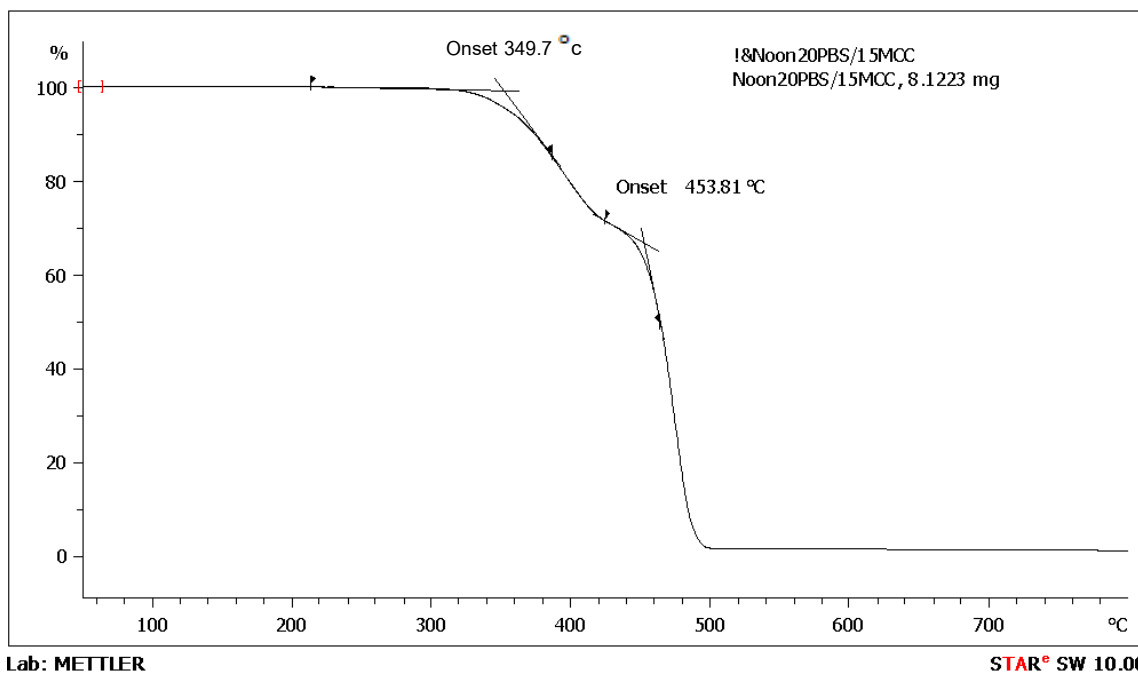
ภาพ จ-12 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/0/5



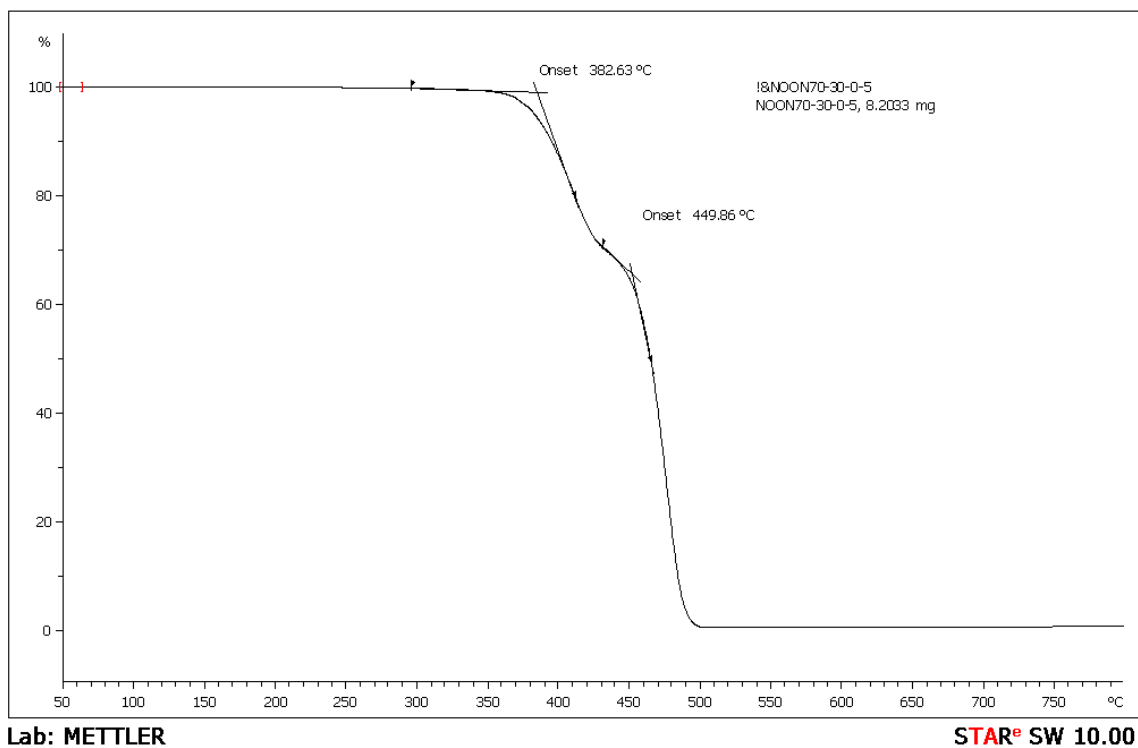
ภาพ จ-13 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/5/5



ภาพ จ-14 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/10/5

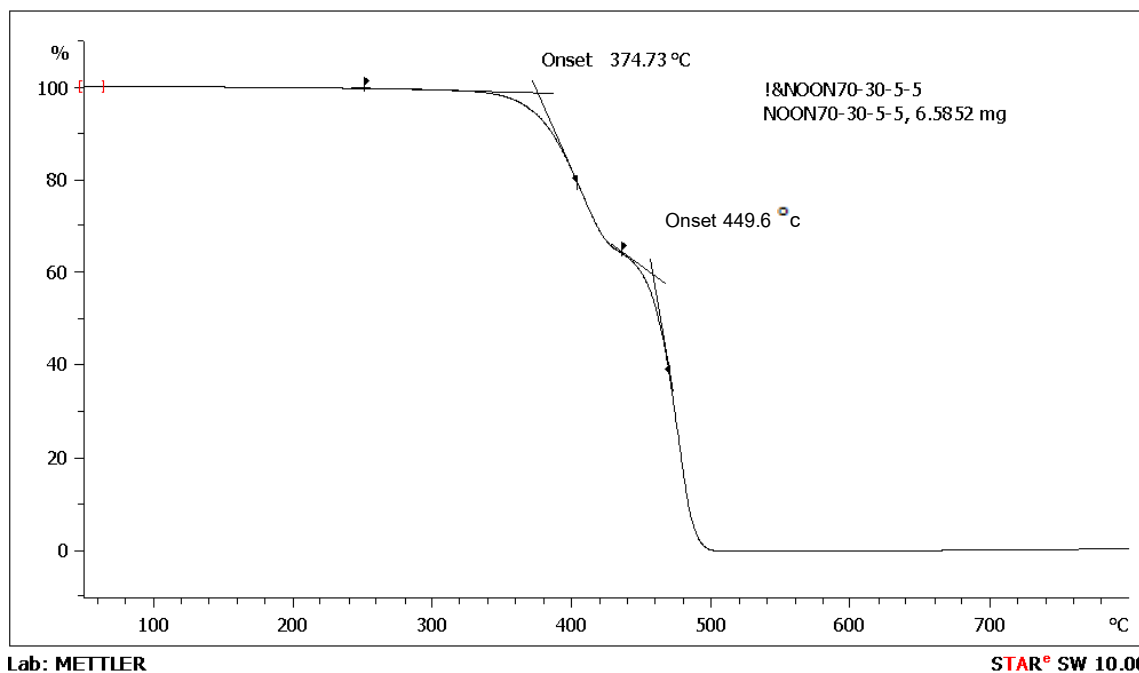


ภาพ จ-15 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 80/20/15/5

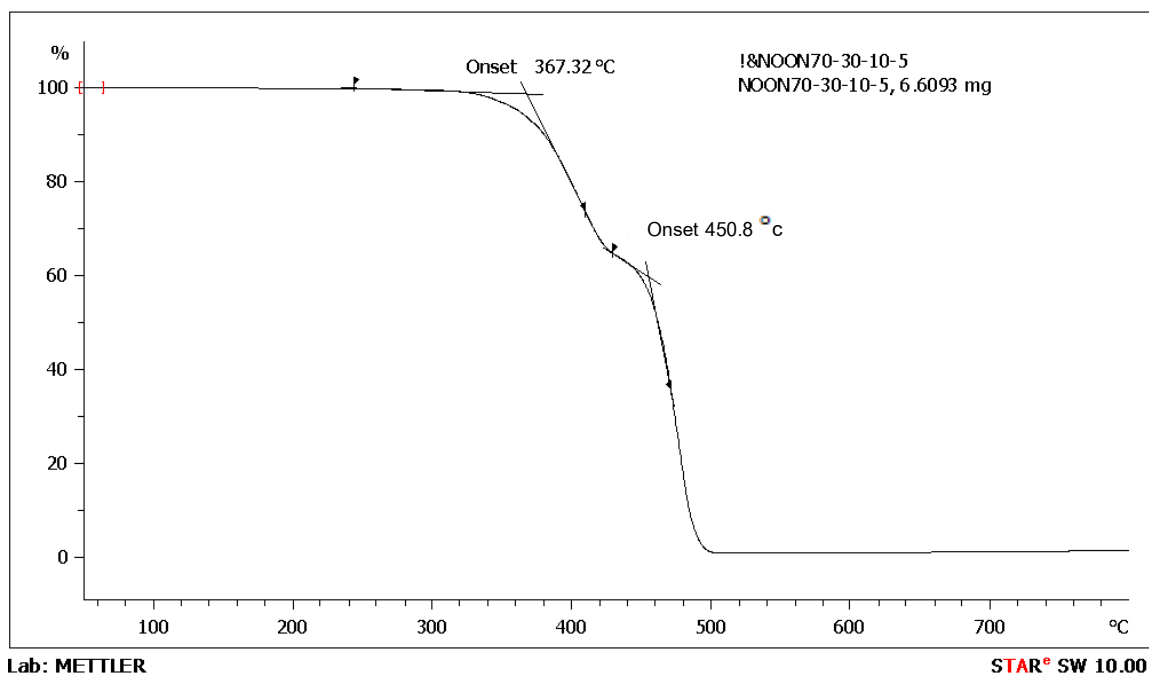


ภาพ จ-16 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/0/5

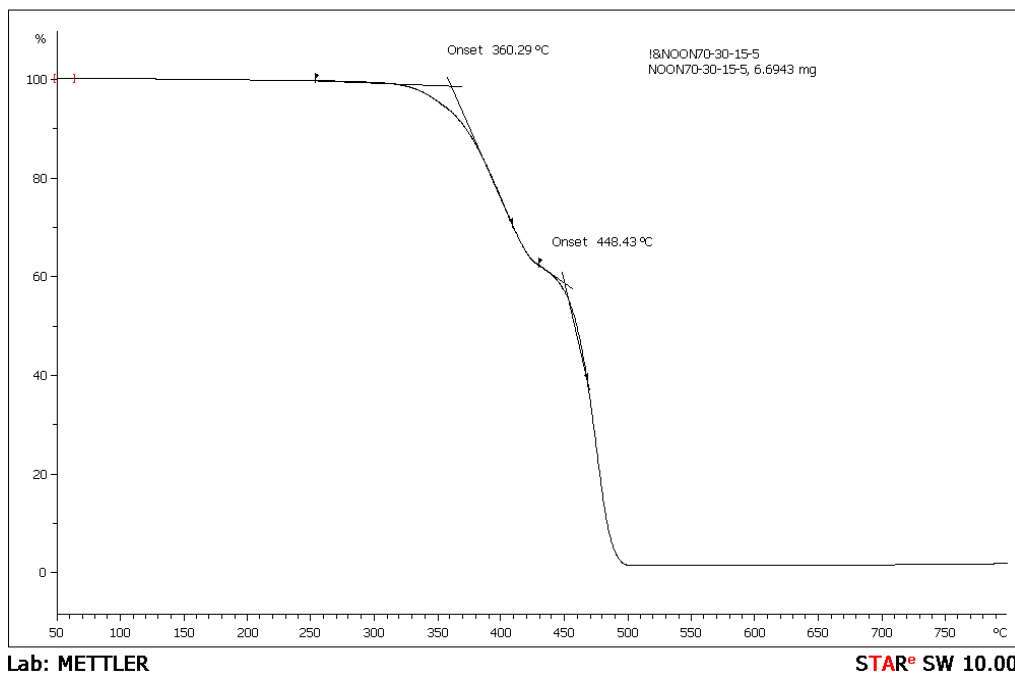




ภาพ จ-17 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/5/5



ภาพ จ-18 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10/5



ภาพ จ-19 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/15/5

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกอบแก้ว ปาลสุทธิ เกิดเมื่อวันที่ 13 ธันวาคม พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2554