สมบัติฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดเสริมแรงด้วยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสจากซังข้าวโพด

นางสาวประภัสสร ดีแจ่ม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID) FILM REINFORCED WITH MICROFIBRILLATED CELLULOSE FROM CORN COBS

Miss Prapatsorn Deejam

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดเสริมแรงด้วยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสจากซังข้าวโพด
โดย	นางสาวประภัสสร ดีแจ่ม
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรีรัตน์ จารุจินดา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรีรัตน์ จารุจินดา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ตั้งพสุธาดล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.นันทยา ยานุเมศ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประภัสสร ดีแจ่ม : สมบัติฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดเสริมแรงด้วยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสจากซังข้าวโพด (PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID) FILM REINFORCED WITH MICROFIBRILLATED CELLULOSE FROM CORN COBS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สิรีรัตน์ จารุจินดา, 112 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดด้วยสารเสริมแรงเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสจากซังข้าวโพดซึ่งเป็นวัตถุดิบที่เหลือใช้ทางเกษตรที่พบมากในประเทศไทย โดยนำเซลลูโลสที่สกัดได้จากซังข้าวโพดมาผสมกับสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย และปั่นกวนผสมด้วยเครื่องปั่นกวนผสมความเร็วสูง โดยปรับเปลี่ยนเวลาในการปั่นกวนผสม (10, 20, 30, 40 และ 50 นาที) แล้วนำสารแขวนลอยที่ได้มาแช่แข็งที่อุณหภูมิ -13 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาปั่นกวนช้าๆจนถึงอุณหภูมิห้อง ได้สารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส จากนั้นนำสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาเชื่อมขวางทางกายภาพหรือเชื่อมขวางทางเคมีโดยใช้อิพิคลอโรไฮดรินเป็นสารเชื่อมขวาง ก่อนนำไปผสมกับสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดในอัตราส่วนต่างๆ (99:1, 97:3, 95:5) และขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตโดยเทคนิคการหล่อแบบด้วยตัวทำละลาย เมื่อนำฟิล์มพอลิแล็กติกคอมพอสิตที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าความทนแรงดึงและความยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้นและดีที่สุดเมื่อเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ใช้เวลาการปั่นกวนผสม 20 นาที ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกเวลาในการปั่นกวนผสม 20 นาทีเพื่อเตรียมเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผ่านและไม่ผ่านการเชื่อมขวางและศึกษาผลของสารเสริมแรงที่แตกต่างกันดังกล่าวต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด พบว่าฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เชื่อมขวางทางเคมีมีความทนแรงดึงและความยืด ณ จุดขาดสูงสุด นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ 99 ต่อ 1 ในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตทุกสูตร มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด อย่างไรก็ตามการเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดทุกสูตรไม่สามารถช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนเนื่องจากการเข้ากันไม่ดีระหว่างเฟส

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2558 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

5672009523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE
KEYWORDS:

PRAPATSORN DEEJAM: PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID) FILM REINFORCED WITH MICROFIBRILLATED CELLULOSE FROM CORN COBS. ADVISOR: ASST. PROF.SIREERAT CHARUCHINDA, Ph.D., 112 pp.

This research aims to prepare and improve properties of poly(lactic acid) (PLA) film by using microfibrillated cellulose (MFC) from corn cob, which is an abundant agricultural waste in Thailand, as a reinforcing filler. Extracted cellulose from corn cob was mixed with sodium hydroxide/urea mixed solution and followed by homogenizing with high-speed homogenizer in various times (10, 20, 30, 40 and 50 minutes). The MFC suspension was then frozen at -13°C for 24 h and thawed and stirred at room temperature to obtain MFC solution. Then the MFC solution and polyvinyl alcohol (PVA) solution were physical crosslinked (freeze/thaw cycle) or chemical crosslinked (epichlorohydrin as a crosslinking agent). MFC/PVA solution was mixed with PLA solution in various ratios (99:1, 97:3, 95:5) and was immediately subjected to cast film on glass plate. The tensile strength and elongation at the break of PLA composite film reinforced with MFC/PVA increased when the homogenized time is 20 minutes. Therefore, the homogenized time at 20 minutes was selected to prepare MFC/PVA with and without crosslinking and to study the effects of different types of MFC/PVA on the mechanical properties of PLA composite film reinforced with MFC/PVA. The results showed that the PLA composite film reinforced with chemical crosslinked MFC/PVA exhibited the highest tensile strength and elongation at the break. Moreover, the weight ratio of PLA and reinforcing filler was 99:1 improved the mechanical properties of PLA film. However, MFC reinforcing filler cannot improve the thermal properties of PLA film due to poor interfacial adhesion between phase.

Field of Study:	Petrochemistry and Polymer Science	Student's Signature	.....
		Advisor's Signature	.....
Academic Year:	2015		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางวิชาการ จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่างๆ เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ยังได้รับความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัตถุดิบ และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคคลผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง ดังรายนามต่อไปนี้

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรีรัตน์ จารุจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และแนะแนวทางในการดำเนินงาน รวมถึงการแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดข้อผิดพลาดในการทำวิจัยได้อย่างถูกต้อง จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

2. ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. วราวุฒิ ตั้งพสุธาดล และ รองศาสตราจารย์. ดร.นันทยา ยานุเมศ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลามาให้คำปรึกษาและแนะนำ ตลอดจนตรวจสอบความถูกต้องในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. เจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา รุ่นพี่ เพื่อน และน้องๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์และสหสาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้การสนับสนุนใน การทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฐ
สารบัญรูปภาพ ..... ฑ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์ 3
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 3
2.1.1 ความหมายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 4
2.2.2 พอลิแล็กติกแอซิด 4
2.2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด 5
2.2.2.2 ข้อดีของพอลิแล็กติกแอซิด 7
2.2.2.3 ข้อเสียของพอลิแล็กติกแอซิด 7
2.2.2.4 การใช้งานของพอลิแล็กติกแอซิด 8
2.3 พอลิไวนิลแอลกฮอล์ 8
2.3.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกฮอล์ 8
2.3.2 ลักษณะสมบัติของพอลิไวนิลแอลกฮอล์ 9
2.3.3 การใช้งานของพอลิไวนิลแอลกฮอล์ 10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.4 คอมพอสิต 10
2.5 เส้นใยเสริมแรง 10
2.5.1 เส้นใยธรรมชาติ 10
2.5.1.2 เซลลูโลส 11
2.5.1.2 ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส 13
2.6 การเชื่อมขวาง 13
2.6.1 การเชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพ (physical crosslinking) 13
2.6.2 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีทางเคมี (chemical crosslinking) 14
2.7 การวิจัยที่เกี่ยวข้อง 15
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 17
3.1 ขอบเขตการทดลอง 17
3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 17
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 18
3.4 ขั้นตอนการทดลอง 19
3.4.1 การเตรียมสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสจากซังข้าวโพด 19
3.4.2 การเตรียมการเชื่อมขวางระหว่างไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสและพอลิไวนิลแอลกฮอล์ 21
3.4.2.1 การเชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพ 21
3.4.2.2 การเชื่อมขวางด้วยวิธีทางเคมี 22
3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติของไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสและไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางและไม่ผ่านการเชื่อมขวาง 22
3.4.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางด้วยเทคนิค FT-IR 22

หน้า

3.4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสและไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)..... 23

3.4.4 การเตรียมฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกฮอล์..... 23

3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต..... 27

3.4.5.1 การวิเคราะห์ความโปร่งแสงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต..... 27

3.4.5.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ด้วยเทคนิค TGA..... 28

3.4.5.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ด้วยเทคนิค DSC..... 29

3.4.5.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา..... 29

3.4.5.4.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)..... 29

3.4.5.4.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)..... 30

3.4.5.5 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต..... 30

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 32

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลลูโลส..... 32

4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลลูโลส..... 32

หน้า

4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี โครงสร้างผลึก การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี 33

4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี 33

4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูลสที่เชื่อมชวางทางเคมี 35

4.2.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง 36

4.2.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี 37

4.2.5 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี 38

4.3 ลักษณะความโปร่งแสงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต 39

4.3.1 ความขุ่นของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต 42

4.4 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต 43

4.4.1. ผลของเวลาที่ใช้ในการปั่นกวนความเร็วสูงสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส 43

4.4.1.1 ความทนแรงดึง 43

4.4.1.2 การยืดสูงสุด ณ จุดขาด 45

4.4.1.3 มอดุลัสของยัง 47

4.4.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต 49

หน้า

4.4.2.1 ความทนแรงดึง 49
4.4.2.2 การยืดสูงสุด ณ จุดขาด 51
4.4.2.3 มอดุลัสของยัง 53
4.4.3 ผลจากการเชื่อมขวางเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสด้วยวิธีทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสทางเคมีในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต 55
4.4.3.1 ความทนแรงดึง 55
4.4.3.2 การยืดสูงสุด ณ จุดขาด 56
4.4.3.3 มอดุลัสของยัง 57
4.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต 58
4.6 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต 62
4.6.1 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (degradation temperature, T_d) 62
4.6.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (cold crystallization temperature, T_{cc}) 65
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 67
5.1 สรุปผลการทดลอง 67
5.1.1 การเตรียมสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส 67
5.1.2 เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี 67
5.1.3 ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี 68
5.2 ข้อเสนอแนะ 68

หน้า

รายการอ้างอิง 70

ภาคผนวก ก 77

ภาคผนวก ข 94

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 112

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3. 1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทดลอง 18

ตารางที่ 3. 2 สูตรการเตรียมฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ/พอลิไวนิลแอลกฮอล์ 24

ตารางที่ 3. 3 สูตรการเตรียมฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี/พอลิไวนิลแอลกฮอล์ 25

ตารางที่ 3. 4 สูตรการเตรียมฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ/พอลิไวนิลแอลกฮอล์ 26

ตารางที่ 4. 1 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี 38

ตารางที่ 4. 2 ค่าความขุ่นของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต 43

ตารางที่ 4. 3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต 63

ตารางที่ 4. 4 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกคอมพอสิต 66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2. 1 การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ 4
รูปที่ 2. 2 โครงสร้างของพอลิแล็กติกแอซิด 5
รูปที่ 2. 3 วัฏจักรของพอลิแล็กติกแอซิด 5
รูปที่ 2. 4 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิแล็กติกแอซิดและกรดแล็กไทด์ 6
รูปที่ 2. 5 โครงสร้างไอโซเมอร์ของแล็กไทด์ชนิดต่างๆ 6
รูปที่ 2. 6 โครงสร้างไอโซเมอร์ของกรดแล็กติกแบบดีและแบบแอล 7
รูปที่ 2. 7 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกฮอล์ 8
รูปที่ 2. 8 กระบวนการสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกฮอล์ 9
รูปที่ 2. 9 จำแนกประเภทของเส้นใยพืช 11
รูปที่ 2. 10 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (2 มิติ) 12
รูปที่ 2. 11 ลักษณะสัณฐานของเซลลูโลสแบบต่างๆ 12
รูปที่ 2. 12 โครงสร้างร่างแหสามมิติของพอลิไวนิลแอลกฮอล์ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางทางกายภาพ ... 14
รูปที่ 3. 1 เครื่องบดหยาบ 19
รูปที่ 3. 2 เครื่องบดละเอียด 20
รูปที่ 3. 3 เครื่องปั่นกวนผสมความเร็วสูง 21
รูปที่ 3. 4 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี 22
รูปที่ 3. 5 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ 23
รูปที่ 3. 6 เครื่องวัดสี 28
รูปที่ 3. 7 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน 28
รูปที่ 3. 8 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ 29

หน้า

รูปที่ 3. 9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 30

รูปที่ 3. 10 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ของ LLOYD รุ่น LF plus 31

รูปที่ 4. 1 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของซังข้าวโพดและเซลลูโลสจากซังข้าวโพด 32

รูปที่ 4. 2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส 34

รูปที่ 4. 3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ และเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี 34

รูปที่ 4. 4 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูลสที่เชื่อมชวางทางเคมีและเซลลูโลสจากซังข้าวโพด 35

รูปที่ 4. 5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสในเวลาการปั่นกวน ความเร็วสูงที่ (ก) 10 นาที (ข) 20 นาที (ค) 30 นาที (ง) 40 นาที และ (จ) 50 นาที 36

รูปที่ 4. 6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) เซลลูโลสจากซังข้าวโพด (ข) เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตด เซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ (ค) เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี..... 37

รูปที่ 4. 7 TGA เทอร์โมแกรมของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตด เซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี 39

รูปที่ 4. 8 ลักษณะความโปร่งแสงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอม พอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ 42

รูปที่ 4. 9 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่ง เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลา การปั่นกวนความเร็วสูง 44

รูปที่ 4. 10 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลา การปั่นกวนความเร็วสูง 44

รูปที่ 4. 11 การยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิด คอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ เมื่อ เปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง 45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

รูปที่ 4. 12 การยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง 46

รูปที่ 4. 13 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง 47

รูปที่ 4. 14 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง 48

รูปที่ 4. 15 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส 49

รูปที่ 4. 16 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส 50

รูปที่ 4. 17 การยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส 51

รูปที่ 4. 18 การยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส 52

รูปที่ 4. 19 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส 53

รูปที่ 4. 20 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส 54

หน้า

รูปที่ 4. 21 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ, เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง 56

รูปที่ 4. 22 การยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ, เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง 57

รูปที่ 4. 23 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ, เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง 58

รูปที่ 4. 24 ลักษณะสัณฐานวิทยาภาพตัดขวางของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต 60

รูปที่ 4. 25 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต 61

รูปที่ 4. 26 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต 64

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้พลาสติกอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดปัญหาขยะพลาสติก ซึ่งการกำจัดทำได้ยาก ใช้เวลาการย่อยสลายนานหลายสิบปี ดังนั้นแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เป็นไปได้ในปัจจุบัน คือ การลดการใช้ (reduce) การนำกลับมาใช้ใหม่ (reuse) การรีไซเคิล (recycle) และอีกแนวทางคือการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastic) [1]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรมนั้นมีหลากหลายชนิดและพอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid),(PLA)) เป็นหนึ่งในพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถจำหน่ายและนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้ ข้อดีของพอลิแล็กติกแอซิดมีหลายประการ เช่น ใส มีสมบัติขวางกั้น เข้ากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้ดีและไม่เป็นพิษ เป็นต้น จึงเหมาะสมที่จะนำพอลิแล็กติกแอซิดมาใช้งานในด้านผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ แต่พอลิแล็กติกแอซิดมีข้อเสียในด้านความเปราะและไม่ทนความร้อน ผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์จากพอลิแล็กติกแอซิดจึงมีข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชนิดอื่น ซึ่งสามารถปรับปรุงข้อเสียดังกล่าวได้ด้วยการเติมสารเสริมแรง (reinforcing filler) และเนื่องจากในปัจจุบันคอมพอสิตทางชีวภาพ (biocomposite) ได้รับความสนใจอย่างยิ่ง การเลือกใช้เส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสเป็นสารเสริมแรงจึงมีความเหมาะสมมาก โดยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-60 นาโนเมตร ยาว 2-3 ไมโครเมตร อัตราส่วนความยาวต่อพื้นที่หน้าตัด (L/d) สูง มีทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และ อสัณฐาน (amorphous) มีโครงสร้างเป็นร่างแหตาข่าย (web-like structure) การเตรียมเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสสามารถเตรียมได้จากเส้นใยเซลลูโลสด้วยกระบวนเชิงกล (mechanical fibrillation) ซึ่งเป็นวิธีเตรียมที่ง่าย

เส้นใยเซลลูโลสซึ่งเป็นแหล่งของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส ส่วนใหญ่ได้มาจากพืช สำหรับซังข้าวโพดที่เป็นวัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีปริมาณมาก หาง่าย พบว่ามีปริมาณเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 35 ดังนั้นหากนำวัตถุดิบเหลือใช้ดังกล่าวมาแปรรูปให้เกิดประโยชน์สูงสุดจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบอย่างมาก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดด้วยสารเสริมแรงเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสจากซังข้าวโพดและเพิ่มความ

แข็งแรงให้กับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสด้วยการเชื่อมขวางทั้งวิธีการทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงเพิ่มขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เตรียมเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสจากซังข้าวโพดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย
2. เตรียมฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสแล้วขึ้นรูปฟิล์มด้วยเทคนิคการหล่อแบบด้วยตัวทำละลาย
3. ทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่มีความแข็งแรงและทนความร้อนเพิ่มขึ้น

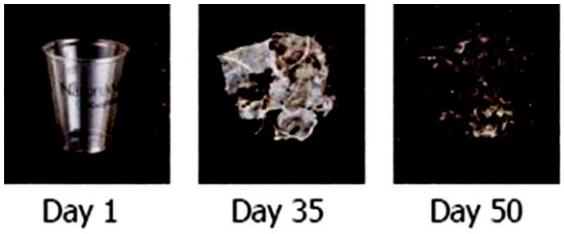
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
วารสารปริทรรศน์

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

เนื่องจากจำนวนประชากรของโลกที่เพิ่มขึ้นและกิจกรรมต่างๆในชีวิตประจำวันของมนุษย์ล้วนแต่ต้องอาศัยพลาสติก ซึ่งปริมาณการใช้พลาสติกก็มากขึ้นทุกวันและด้วยสมบัติที่สำคัญของพลาสติก คือ สมบัติที่ทนทาน ทำให้ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายพลาสติกเป็นร้อยปี จึงเป็นการสร้างปัญหาทำให้เกิดขยะพลาสติกซึ่งส่งผลกระทบรุนแรงต่อสิ่งแวดล้อมในโลกเพราะการเผาทำลายพลาสติกเหล่านั้นก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม นักวิทยาศาสตร์จึงต้องหาทางแก้ไขปัญหานั้นและพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (degradable plastic) ก็เป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต กระบวนการกำจัด ซึ่งการค้นพบพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ ทำให้มนุษย์สามารถหาวัสดุทดแทนการใช้พลาสติกจากแหล่งปิโตรเคมีแบบดั้งเดิม (commodity plastics) ได้เพราะมีสมบัติในการใช้งานได้ใกล้เคียงกัน

หลักการของการย่อยสลายพลาสติก คือ การทำลายพันธะเคมีของพลาสติกซึ่งมีอยู่หลายวิธี ทั้งการเติมสารเพิ่มความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี (UV) เมื่อโดนแสงอาทิตย์ก็จะเกิดการแตกของพันธะเคมีกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะ นอกจากนี้ยังมีการย่อยสลายแบบอื่นๆ อีก เช่น การย่อยสลายทางกล (mechanical degradation) โดยให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation) และปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic degradation) แต่การย่อยสลายที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนามากขึ้นในปัจจุบัน คือ การย่อยสลายทางชีวภาพ หรือ biodegradation นั่นเอง แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2. 1 การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ [2]

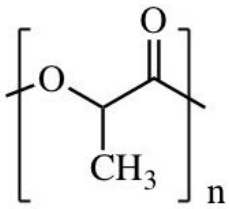
2.1.1 ความหมายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ความหมายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือ พลาสติกที่มีการย่อยสลายด้วยเอนไซม์จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่มีอยู่ในธรรมชาติ กระบวนการหลักๆของการย่อยสลายทางชีวภาพมีสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการย่อยสายพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งการย่อยสลายครั้งแรกนี้จะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบและแบบเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดบริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอก็จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปย่อยสลายครั้งที่สองภายในเซลล์และผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นตอนสุดท้ายนี้ก็คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (mineralization) ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass) ปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีอยู่หลายชนิดแต่ชนิดที่ได้รับความสนใจและกำลังพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรมก็คือ พอลิแล็กติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (PBS) [3]

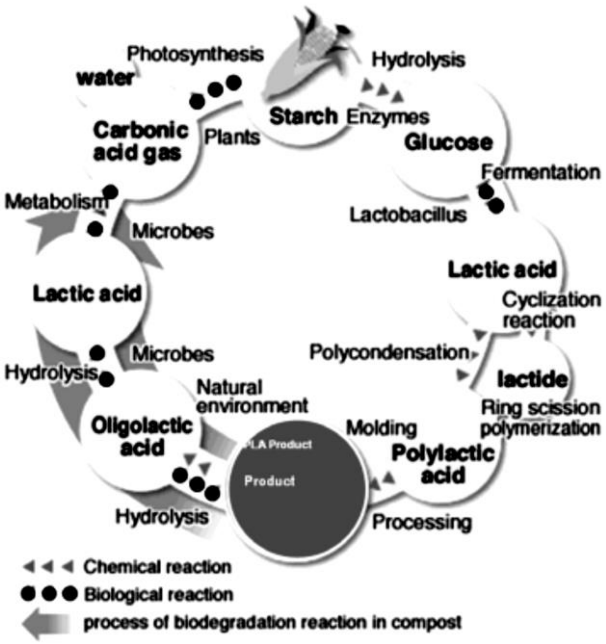
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.2 พอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ตรง (aliphatic polyester) [4, 5] แสดงในรูปที่ 2.2 สังเคราะห์ได้จากกรดแล็กติก (lactic acid) ซึ่งกรดแล็กติกสามารถผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลังหรืออ้อย สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงวัฏจักรดังรูป 2.3 [4]



รูปที่ 2. 2 โครงสร้างของพอลิแล็กติกแอซิด [6]

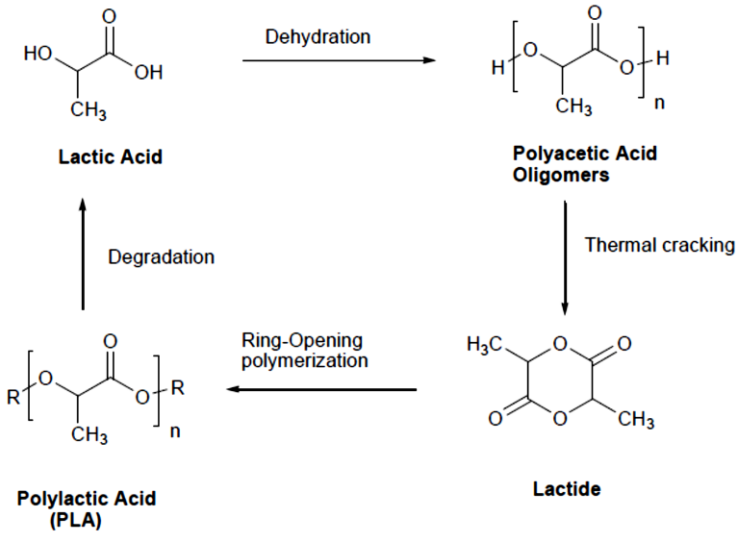


Chulalongkorn University

รูปที่ 2. 3 วัฏจักรของพอลิแล็กติกแอซิด [4]

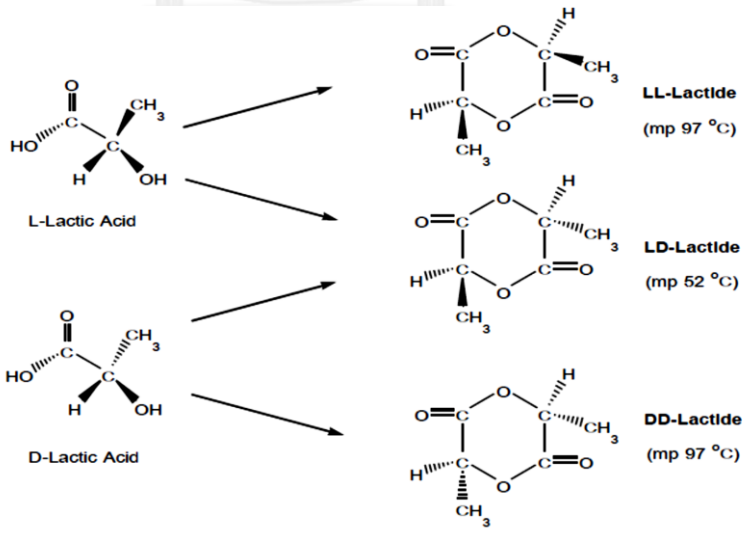
2.2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด

เริ่มจากการเตรียมกรดแล็กติกจากกระบวนการหมัก (fermentation) น้ำตาลจากผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นของพอลิแล็กติกแอซิด จากนั้นนำกรดแล็กติกมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2. 4 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิแล็กติกแอซิดและกรดแล็กไทด์ [7]

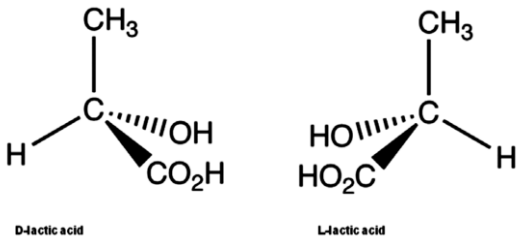
เช่น การสังเคราะห์จากปฏิกิริยา azeotropic dehydration condensation ซึ่งจะทำให้ได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากกว่า 100,000 หรือปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรงของกรดแล็กติก (ได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 1,000 – 5,000 บางครั้งเรียกว่าพรีพอลิเมอร์) และถ้านำพรีพอลิเมอร์ไปผ่านปฏิกิริยาแตกตัวย้อนกลับ (depolymerization) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแล็กไทด์ ซึ่งมีโครงสร้างไอโซเมอร์หลายแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2. 5 โครงสร้างไอโซเมอร์ของแล็กไทด์ชนิดต่างๆ [8]

ซึ่งสารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง (ring opening polymerization) ได้เป็นพอลิแล็กติกแอซิดอีกครั้งซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100,000 เช่นเดียวกัน [8]

เนื่องจากกรดแล็กติกมีไอโซเมอร์ 2 แบบ คือ แบบดี (D) และแอล (L) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นอิแนนชิโอเมอร์ (enantiomer)



รูปที่ 2. 6 โครงสร้างไอโซเมอร์ของกรดแล็กติกแบบดี (ซ้าย) และแบบแอล (ขวา) [4]

สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่อาจประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ชนิดแอลไอโซเมอร์เกือบทั้งหมด (พอลิแอลแล็กติกแอซิด (PLLA)) หรือประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ที่เป็นของผสมราซิมิก (พอลิดีแอลแล็กติกแอซิด (PDLLA)) ในปัจจุบันการผลิตดีไอโซเมอร์ของกรดแล็กติกที่บริสุทธิ์นั้นทำได้ยาก การผลิตพอลิเมอร์ที่สายโซ่หลักประกอบไปด้วยมอนอเมอร์ชนิด ดี หรือพอลิดีแล็กติกแอซิด (PDLA) ในเชิงพาณิชย์จึงยังไม่มี [4]

ดังนั้นพอลิแล็กติกแอซิดจึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาใช้ทดแทนพอลิเมอร์ที่มาจากแหล่งปิโตรเลียมเนื่องจากสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปต่างๆได้เหมือนกันและในระดับอุตสาหกรรมพอลิแล็กติกแอซิดถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ทางการแพทย์และบรรจุภัณฑ์ [9]

2.2.2.2 ข้อดีของพอลิแล็กติกแอซิด

เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีในธรรมชาติ จึงสามารถย่อยสลายได้เอง เมื่อนำไปฝังกลบในดิน สามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (biocompatibility) มีความใสและมีสมบัติขวางกั้น (barrier properties) ที่ดี และสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ (processability) ด้วยกระบวนการที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดแบบ (injection molding) การอัดแบบ (compression molding) การอัดรีดฟิล์ม (film extrusion) การเป่าแบบ (blow molding) เป็นต้น [6, 10]

2.2.2.3 ข้อเสียของพอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิดมีลักษณะแข็งและค่อนข้างเปราะ ทำให้มีข้อจำกัดในการนำ PLA ไปใช้ในงานบางด้าน เช่น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการยืดตัว เป็นต้นและความสามารถในการทนความร้อนไม่ดี ซึ่งอาจทำให้เกิดการเสียสภาพในระหว่างกระบวนการผลิตขึ้นรูปผ่านกลไกไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และกลไกแบบตัดสายโซ่ (chain scission) นอกจากนี้ พอลิแล็กติกแอซิดเมื่ออยู่ในรูป

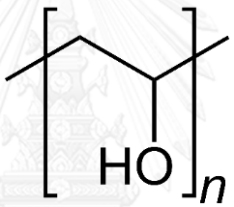
พอลิเมอร์หลอม (melt strength) จะมีค่าความแข็งแรงต่ำ ทำให้มีปัญหาในการขึ้นรูปโดยกระบวนการบางอย่าง เช่น กระบวนการอัดรีดและเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม (extrusion blown film process) [8]

2.2.2.4 การใช้งานของพอลิแล็กติกแอซิด

ในด้านการใช้งาน ส่วนใหญ่นิยมนำพอลิแล็กติกแอซิดมาใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์เส้นใยและสิ่งทอหรือพลาสติกทางวิศวกรรม [11]

2.3 พอลิไวนิลแอลกฮอล์

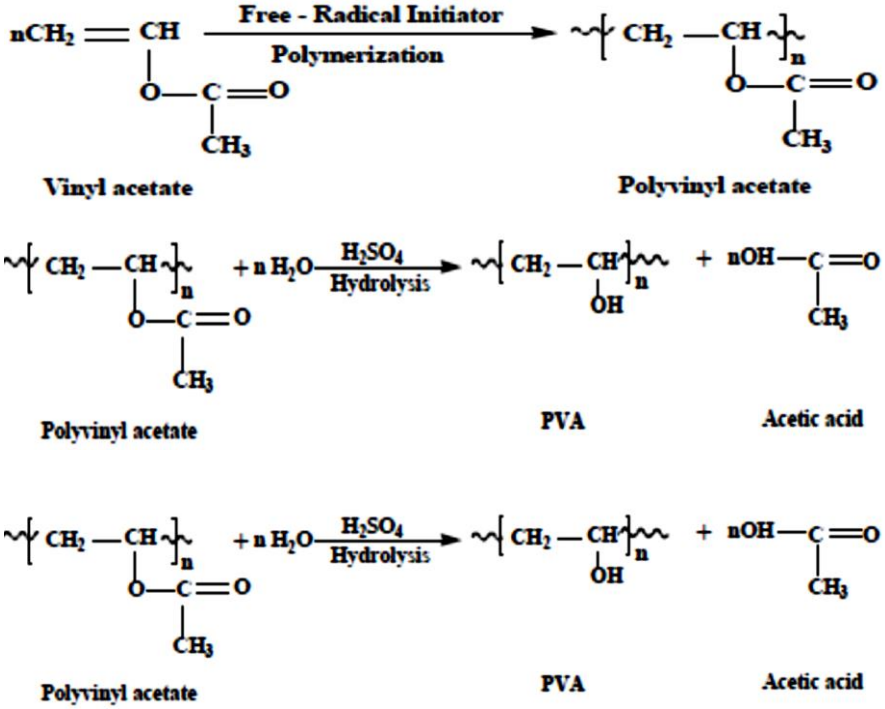
พอลิไวนิลแอลกฮอล์ (poly(vinyl alcohol), PVA) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและละลายน้ำได้ [12] เนื่องจากโครงสร้างของ PVA ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2. 7 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกฮอล์ [13]

2.3.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกฮอล์

เนื่องจากไวนิลแอลกฮอล์มอนอเมอร์ไม่เสถียร สามารถเกิด tautomerize ไปเป็นอะเซตัลดีไฮด์ได้ง่าย ดังนั้นพอลิไวนิลแอลกฮอล์จึงสังเคราะห์ได้จากไวนิลแอซีเตตมอนอเมอร์ต่อกันเป็นพอลิไวนิลแอซีเตต (poly(vinyl acetate), PVAc) ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและพอลิไวนิลแอซีเตตจะถูกนำมาผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้เป็นพอลิไวนิลแอลกฮอล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2. 8 กระบวนการสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกฮอล์ [14]

และจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะทำให้ได้โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิไวนิลแอลกฮอล์และพอลิไวนิลแอซีเตตซึ่งสมบัติต่างๆของพอลิแอลกฮอล์ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและอันดับการแทนที่จากหมู่แอซีเตตเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (degree of hydrolysis) ดังนั้นในทางการค้าจึงมีเกรดพอลิไวนิลแอลกฮอล์ทั้งหมดสามเกรด [14] คือ fully hydrolyzed มีปริมาณหมู่แอซีเตต 1-2 เปอร์เซ็นต์โมล Intermediate hydrolyzed มีปริมาณหมู่แอซีเตต 3-7 เปอร์เซ็นต์โมลและ partially hydrolyzed มีปริมาณหมู่แอซีเตต 10-15 เปอร์เซ็นต์โมล

2.3.2 ลักษณะสมบัติของพอลิไวนิลแอลกฮอล์

พอลิไวนิลแอลกฮอล์เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เป็นมิตรกับ ละลายน้ำได้ ทนต่อน้ำมัน กรีส และตัวทำละลายชนิดต่างๆ (resistance to oil, grease and solvents) ค่าความเป็นกรด – เบส ประมาณ 5 – 6.5 นอกจากนี้พอลิไวนิลแอลกฮอล์มีสมบัติช่วยในการเกิดฟิล์มที่ดี (film forming properties) และสมบัติในการช่วยก่ออิมัลชัน (emulsifying properties) [15]

2.3.3 การใช้งานของพอลิไวนิลแอลกฮอล์

พอลิไวนิลแอลกฮอล์นิยมนำมาใช้งานเป็นสารเพิ่มความข้น (thickening agent) และอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) อีกทั้งสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยใช้แทนฝ้าย โดยผ้าที่ทำด้วยเส้นใยพอลิไวนิลแอลกฮอล์จะสวยใส่สบาย ซักง่ายและสามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้สามารถเตรียมเป็นไฮโดรเจลเพื่อใช้ในงานด้านยาและการแพทย์ได้ [16]

2.4 คอมพอสิต

คอมพอสิต (composite) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภทขึ้นไปโดยที่องค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันและจะต้องไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีวัสดุชนิดหนึ่งเป็นเมทริกซ์ (matrix) และวัสดุอีกชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดกระจาย (disperse) อยู่ในเมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งองค์ประกอบของคอมพอสิต มีดังนี้ [10, 17] ส่วนที่หนึ่ง คือ เมทริกซ์ เป็นองค์ประกอบหลักที่มีความต่อเนื่อง เช่น พอลิเมอร์และโลหะ เป็นต้นและอีกส่วน คือ สารเสริมแรง (reinforcement phase) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้คอมพอสิตมีความแข็งแรง มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง โดยลักษณะสารเสริมแรงสามารถแบ่งออกเป็น ประเภทที่หนึ่ง คือ สารเสริมแรงมีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous composites) ซึ่งแบ่งย่อยได้เป็น เส้นใยสั้นแบบสุ่ม (random/short fiber) และ เส้นใยยาว/เส้นใยต่อเนื่อง (continuous/long fiber) ประเภทที่สอง คือ สารเสริมแรงมีลักษณะเป็นอนุภาค (particulate composites) ประเภทที่สาม คือ สารเสริมแรงมีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ (flake composites) ประเภทที่สี่ คือ สารเสริมแรงเป็นสารตัวเติม (filled composites) และประเภทที่ห้า คือ สารเสริมแรงมีลักษณะเป็นชั้นหรือชนิดซ้อนแผ่น (laminar or layered composites)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5 เส้นใยเสริมแรง

เส้นใยเสริมแรง (reinforcing fibers) เป็นฟิลเลอร์ (fillers) ประเภทหนึ่งซึ่งมีหน้าที่ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล ช่วยเพิ่มความแข็งแรง (strength) และความแข็งตึง (stiffness) ให้กับพอลิเมอร์ [18]

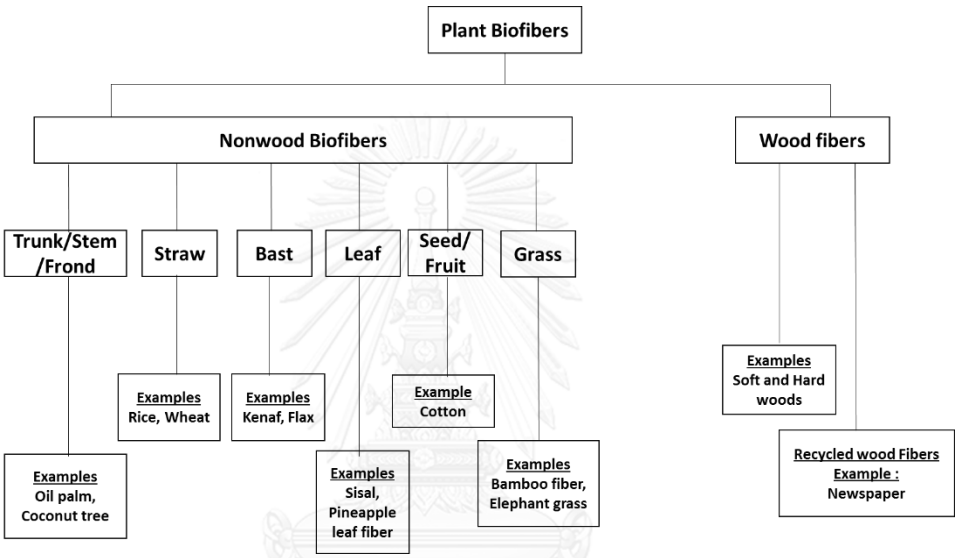
2.5.1 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติ (natural fibers) ถูกนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ โดยเฉพาะใช้เสริมแรงในพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อให้ได้วัสดุผสมชีวภาพ (biocomposites) ที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับวัสดุที่มาจากพอลิเมอร์จากแหล่งปิโตรเลียมซึ่งย่อยสลายได้ยากและไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบเส้นใยสังเคราะห์ เช่น ราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรงค่อนข้างสูง และที่สำคัญคือ เส้นใยธรรมชาติสามารถย่อยสลายในธรรมชาติได้ (biodegradability) ซึ่งเส้นใยธรรมชาติที่นำมาใช้ประโยชน์โดยทั่วไปสามารถ

แบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ เส้นใยที่ได้จากแร่ธรรมชาติ เส้นใยที่ได้จากสัตว์และเส้นใยที่ได้จากพืช แต่เส้นใยที่ได้จากแร่ธรรมชาติมีข้อเสีย คือ เมื่อเสื่อมสภาพ จะทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบทางเดินของผู้ใช้ เช่น แร่ใยหิน ส่วนข้อเสียของเส้นใยที่ได้จากสัตว์ เช่น เส้นใยไหม เส้นใยแมงมุม มักมีราคาสูงและผลิตได้ยาก ดังนั้นเส้นใยทั้งสองกลุ่มจึงไม่ได้รับความนิยมเท่ากับเส้นใยที่ได้จากพืช [19]

2.5.1.1 เส้นใยที่ได้จากพืช

เส้นใยจากพืชสามารถพบได้จากส่วนต่างๆของพืชซึ่งจำแนกได้ดังรูปที่ 2.9

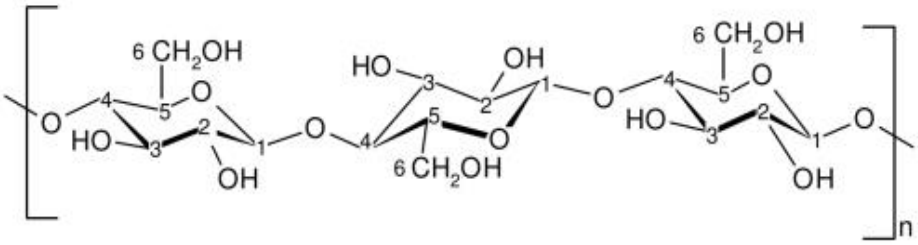


รูปที่ 2. 9 จำแนกประเภทของเส้นใยพืช [20]

โดยเส้นใยจากพืชประกอบด้วยโครงสร้างทางเคมี 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือ เซลลูโลส (cellulose) ส่วนที่สอง คือ เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ส่วนที่สาม คือ ลิกนิน (lignin) และส่วนที่นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด คือ เซลลูโลส

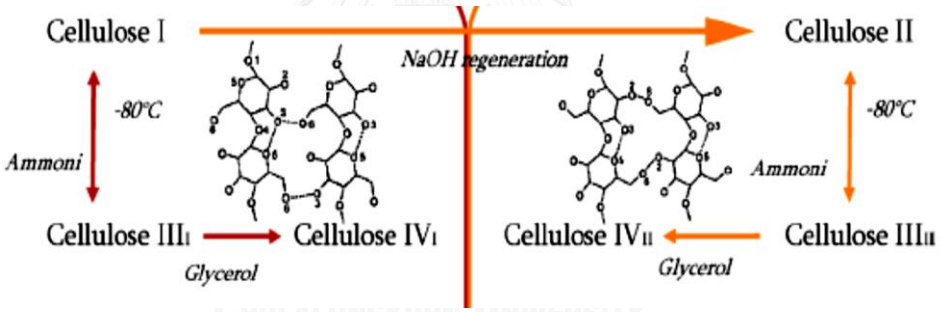
2.5.1.2 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่พบมากที่สุดในโลก โดยพบเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในพืชทั่วๆไป เซลลูโลสเป็นโฮโมพอลิเมอร์ของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose) ที่ต่อกันแบบ 1,4-β-linkage แสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งทำให้เซลลูโลสมีสมบัติแตกต่างจากแป้ง โครงสร้างของเซลลูโลสเป็นสายโซ่ตรงโดยที่สายโซ่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวแบบ fully extended chains ซึ่งจะมีแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจน มีผลทำให้เกิดโครงสร้างผลึกขึ้น ดังนั้นเซลลูโลสจึงไม่ละลายน้ำและเป็นวัสดุในอุดมคติสำหรับสารเสริมแรง [21]



รูปที่ 2. 10 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (2 มิติ) [22]

เซลลูโสมีลักษณะสัณฐานที่แตกต่างกันอยู่ 4 แบบ คือ เซลลูโลส I, II, III และ IV แสดงในรูปที่ 2.11 โดยเซลลูโลส I (cellulose I) เป็นสัณฐานที่พบจากพืชทั่วไปในธรรมชาติ ซึ่งจะแบ่งโครงสร้างเป็น I_α และ I_β อีกด้วย เซลลูโลส II (cellulose II) เป็นเซลลูโลสที่เตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือตัวทำละลายพิเศษ เช่น N-methylmorpholine-N-oxide เป็นต้น ส่วนเซลลูโลส III (cellulose III) ได้จากการเซลลูโลส I, II ที่ผ่านสารละลายแอมโมเนียมและเซลลูโลส IV (cellulose IV) ได้รับจากการดัดแปลงเซลลูโลส III [20, 23]



รูปที่ 2. 11 ลักษณะสัณฐานของเซลลูโลสแบบต่างๆ [23]

การเตรียมเส้นใยเซลลูโลสด้วยกระบวนการต่างกันจะทำให้ได้เส้นใยเซลลูโลสที่มีขนาดและลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น นาโนคริสตัลเซลลูโลส (cellulose nanocrystals) หรือ CNC ซึ่งได้รับจากการเตรียมจากกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดแก่ ภายใต้สภาวะที่ถูกควบคุม ดังนั้นโครงสร้างของนาโนคริสตัลเซลลูโลสจะมีเพียงส่วนที่เป็นผลึก เป็นต้น [23] ด้านงานวิจัยมีการนำนาโนคริสตัลเซลลูโลส ไปใช้ประโยชน์ในด้านสารเสริมแรง เช่น ในปี 2015 Arias และคณะ [24] ซึ่งในงานนี้เป็นการเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดนาโนคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยนาโนคริสตัลเซลลูโลส โดยแบ่งการเตรียมเป็นสองขั้นตอน ขั้นแรกเตรียมการห่อหุ้ม (encapsulation) นาโนคริสตัลเซลลูโลสโดยใช้พอลิเอทิลีนออกไซด์ (polyethylene, PEO) เป็นพอลิเมอร์นำพา (polymer carrier) ส่วนขั้นที่สองเป็นการผสมระหว่าง PEO/CNC กับพอลิแล็กติกแอซิดด้วยวิธีการผสมแบบ

หลอมเหลว (melt mixer) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้พอลิเมอร์นำพาช่วยทำให้การกระจายตัวของนาโนคริสตัลเซลลูโลสในเฟสพอลิแล็กติกแอซิดดีขึ้น ดังนั้นนาโนคริสตัลเซลลูโลสจึงช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดได้ดียิ่งขึ้น

2.5.1.2 ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส (microfibrillated cellulose, MFC) หรือเรียกว่า เซลลูโลสไมโครไฟบริล (cellulose microfibril), ไมโครไฟบริลลาเซลลูโลส (microfibrillar cellulose) และอาจเรียกรวมถึงนาโนไฟบริลเลเตดเซลลูโลส (nanofibrillated cellulose, NFC)

ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสเป็นเส้นใยที่มีขนาด 20-60 นาโนเมตร ยาว 2-3 ไมโครเมตร ประกอบด้วยไมโครไฟบริลจำนวน 10 – 50 ไมโครไฟบริล ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสมีทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และอสัณฐาน (amorphous) มีโครงสร้างเป็นร่างแหตาข่าย (web-like structure) อัตราส่วนความยาวต่อพื้นที่หน้าตัด (L/d) สูง ดังนั้นการเตรียมไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสจึงไม่สามารถเตรียมโดยกระบวนการการไฮโดรไลซิสด้วยกรด แต่เตรียมด้วยกระบวนการเชิงกล เช่น เตรียมด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์หรือเครื่องไมโครฟูอิดไดเซอร์ (Homogenizer and microfluidizer)

ด้านการใช้งาน ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสนิยมนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ ซึ่งมีตัวอย่างงานวิจัย เช่น ในปี 2009 Nakagaito และคณะ [9] เตรียมแผ่น MFC/PLA คอมพอสิตด้วยเทคนิคการกดอัด (compression molding) :โดยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสจะกระจายตัวอย่างสุ่มในเฟสพอลิแล็กติกแอซิด ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตกระดาษ ซึ่งจากผลการทดลองการเตรียมแผ่น MFC/PLA คอมพอสิตด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสสูงสุดที่ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ความทนแรงดึง มอดุลัสของยังและความยืดณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เป็นต้น

2.6 การเชื่อมขวาง

การเชื่อมขวาง (crosslink) สามารถเตรียมได้ทั้งวิธีการทางกายภาพและทางเคมี ดังต่อไปนี้ [25]

2.6.1 การเชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพ (physical crosslinking)

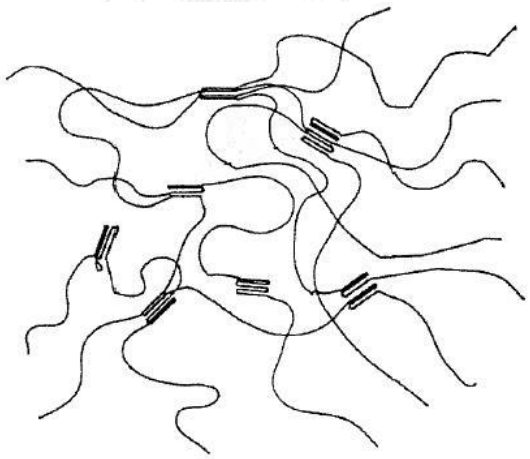
ซึ่งมีวิธีการต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. สังเคราะห์ด้วยไอออนิก (ionic interaction) วิธีนี้ใช้เชื่อมขวางไฮโดรเจลภายใต้สภาวะปกติ โดยใช้ไอออนของโลหะทำให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรง

2. การสร้างสเตริโอคอมเพล็กซ์ (stereocomplex formation) โดยไฮโดรเจลจะเชื่อมขวางด้วยตัวเองซึ่งเกิดขึ้นในโอลิโกเมอร์ของกรดแล็กติกกับไครัลลิตี (chirality) ตำแหน่งตรงข้ามกัน

3. การเกิดอันตรกิริยาของส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interactions) ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์บวมตัวและดูดซึมน้ำ จึงมีสภาพเป็นไฮโดรเจล โดยส่วนใหญ่พบในพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharides) เช่น ไคโตซาน (chitosan),เด็กซ์แทรน (dextran) เป็นต้น

4. สังเคราะห์โดยการตกผลึก (crystallization) ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการทำให้เยือกแข็งและทำให้ละลายที่อุณหภูมิห้องซ้ำๆ (freezing-thawing process) โดยในช่วงการทำให้ละลายที่อุณหภูมิช่วงแรกจะทำให้เกิดผลึกเพิ่มขึ้นและผลึกจะลดลงเมื่อทำซ้ำ เนื่องจากเกิดการทำลายโครงสร้างผลึก สายโซ่โมเลกุลอยู่ห่างกัน พอลิเมอร์เกิดการเชื่อมขวางในสายโซ่โมเลกุลเดียวกันหรือเชื่อมขวางกับสายโซ่พอลิเมอร์อื่นที่เติมเข้าไป จึงเกิดความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง (highly elastic gel) ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ freez/thaw ได้แก่ จำนวนครั้งการ freez/thaw ความเข้มข้นของสารละลายและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยกระบวนการ freez/thaw นิยมใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งแสดงโครงสร้างไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2. 12 โครงสร้างร่างแหสามมิติของพอลิไวนิลแอลกฮอล์ไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางทางกายภาพ **[25, 26]**

2.6.2 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีทางเคมี (chemical crosslinking)

1. ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่ (chain-growth polymerization) โดยเกิดปฏิกิริยาผ่านอนุมูลอิสระ (free radical), ประจุบวก (cation), ประจุลบ (anion) ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่

2. ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเติมและปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (addition and condensation polymerization) ซึ่งเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเชื่อมขวางและมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน โดยมอนอเมอร์สามารถเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจลจากการทำปฏิกิริยากับสารเชื่อมขวางที่หมู่ฟังก์ชัน เช่น การสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์ (glutaraldehyde) หรืออิพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) สารเชื่อมขวาง

3. ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันผ่านรังสีแกมม่าและลำแสงอิเล็กตรอน (gamma and electron beam polymerization) เกิดปฏิกิริยาโดยอาศัยการฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง (high energy electromagnetic irradiation) ซึ่งทำหน้าที่คล้ายเป็นสารเชื่อมขวางและเมื่อทำการฉายรังสีบนสารละลายมอนอเมอร์ มอนอเมอร์จะเกิดการพอลิเมอร์ไรซ์เปลี่ยนเป็นไฮโดรเจล

2.7 การวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shogren และคณะ [27] ศึกษาการเตรียมและการหาลักษณะสมบัติของเซลลูโลสเจลที่อยู่ในรูปของ ไมโครไฟบริเลเตดเซลลูโลสจากซังข้าวโพด โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการกำจัดส่วนที่เป็นเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน จากนั้นใช้โซเดียมไฮเปอร์คลอไรด์เพื่อฟอกขาวเซลลูโลส นาเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการทั้งสองที่อยู่ในรูปสารละลายแขวนลอยไปปั่นด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ความดันสูง โดยเพิ่มจานวนรอบการปั่นตั้งแต่ 1-8 รอบ จากการทดลองพบว่าน้าหนักเซลลูโลสที่สกัดได้เท่ากับ 55 กรัม หรือ ร้อยละ 27 ของน้าหนักซังข้าวโพดบดทั้งหมด ร้อยละของผลผลิตทางทฤษฎีเท่ากับ 77 (ปริมาณเซลลูโลสในซังข้าวโพดเท่ากับ ร้อยละ 35) จานวนรอบที่ผ่านเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ความดันสูงที่ทาให้ได้ MFC ที่ดีที่สุด คือ จานวน 2 รอบ

Plackett และคณะ [28] ศึกษาการเพิ่มรอบการปั่นกวนผสม (homogenization) ด้วยเครื่องปั่นกวนผสมความดันสูง (high-pressure homogenization) ที่มีผลต่อฟิล์มไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส ซึ่งเตรียมจากเนื้อไม้ที่ถูกดัดแปลง (carboxymethylated sulfite-softwood-dissolving pulp) แล้วนำมาปั่นกวนผสมด้วยเครื่องปั่นกวนผสมความดันสูงที่จำนวนรอบตั้งแต่ 0-3 รอบ จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนรอบการปั่นกวนผสมขนาดของเส้นใยและกลุ่มของเส้นใยมีขนาดลดลงซึ่งทำให้ความใสของฟิล์มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความทนแรงดึง มอดุลัสของยังและความยืด ณ จุดขาด ก็เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มรอบการปั่นกวนผสมด้วยเช่นกัน

Chang และคณะ [29] ศึกษาการเตรียมเซลลูโลส/PVA ไฮโดรเจลด้วยสารละลาย NaOH/urea ซึ่งทาการเชื่อมขวางทางเคมีโดยใช้อีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin, ECH) เป็นสารเชื่อมขวาง และเชื่อมขวางทางกายภาพโดยการแช่แข็งและทาให้สารละลายมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างช้าๆ พบว่าการใช้สารเชื่อมขวางทำให้โครงสร้างภายในโมเลกุลของเซลลูโลสถูกทำลาย เซลลูโลสบวมตัว

(swell) และละลายน้าได้ดีขึ้น ส่วนการเชื่อมขวางทางกายภาพพบว่าเซลลูโลสและ PVA เกิดปฏิสัมพันธ์ ส่งผลให้มีความแข็งแรงสูง

Chang และคณะ [12] เตรียมไฮโดรเจลจากเซลลูโลสด้วยสารละลาย NaOH/urea ใช้ ECH เป็นสารเชื่อมขวางโดยใช้วิธีให้ความร้อนและแช่แข็งในการเตรียมไฮโดรเจล จากการทดลองพบว่าไฮโดรเจลที่เตรียมโดยวิธีให้ความร้อนมีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ในขณะที่ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยวิธีการแช่แข็งมีโครงสร้างภายในที่เป็นร่างแห เมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูโลสพบว่าไฮโดรเจลมีความโปร่งแสง และ equilibrium swelling ratio ลดลง แต่ค่า reswelling water uptake และ storage modulus เพิ่มสูงขึ้น

Abdulkhani และคณะ [30] ศึกษาการเตรียมและลักษณะของเส้นใยนาโนเซลลูโลส (cellulose nanofiber, CNF) เป็นสารเสริมแรงในฟิล์ม PLA ขึ้นรูปโดยเทคนิดการหล่อแบบด้วยตัวทำละลาย จากการทดลองพบว่าปริมาณ CNF ที่ร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก มีการกระจายตัวได้ดี สามารถช่วยเสริมแรงในฟิล์ม PLA แต่เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5 โดยน้าหนัก พบว่า CNFเกาะตัวกันเป็นกลุ่มส่งผลให้สมบัติเชิงกลของฟิล์ม PLA ลดลง

Haafiz และคณะ [31] เตรียม PLA ที่เสริมแรงด้วยไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (microcrystalline cellulose, MCC) จากปาล์มน้ำมัน ซึ่งขึ้นรูปโดยเทคนิคการหล่อแบบด้วยตัวทำละลาย ผลจากการวิเคราะห์กราฟFT-IR พบว่า MCC ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับโครงสร้างของ PLA แต่เกิดปฏิกิริยาทางกายภาพระหว่าง PLA กับ MCC เท่านั้นและการเพิ่มสารเสริมแรง MCC ทำให้ค่าเสถียรทางความร้อนดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่เติม MCC ใน PLA ด้านสมบัติเชิงกล เมื่อเพิ่มปริมาณ MCC ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นด้วย แต่ค่าการทนแรงดึงและค่าการดึงยืด ณ จุดขาด ลดลง เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่สม่าเสมอของ MCC ใน PLA

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ขอบเขตการทดลอง

การดำเนินการงานวิจัยแบ่งขอบเขตการทดลองเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย

ส่วนที่ 1 การเตรียมเซลลูโลสจากซังข้าวโพดโดยกระบวนการแอลคาไลน์ทรีทและการฟอกขาว ยืนยันเซลลูโลสที่เตรียมได้ด้วยการวิเคราะห์ผลึก การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยา การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน จากนั้นนำเซลลูโลสที่เตรียมได้มาเตรียมสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสด้วยตัวทำละลายของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย ผ่านกระบวนการเชิงกลด้วยเครื่องปั่นกวนผสมความเร็วสูงโดยศึกษาเวลาที่ใช้ในการปั่นกวน แล้วตรวจสอบด้วยลักษณะสัณฐานวิทยา

ส่วนที่ 2 การเชื่อมขวางโดยวิธีทางกายภาพและทางเคมีระหว่างสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสกับพอลิไวนิลแอลกฮอล์ ศึกษาผลของการเชื่อมขวางด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างสาร

ส่วนที่ 3 การผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับสารละลายไมโครไฟบริลเลเดตเซลลูโลสด้วยอัตราส่วน 99:1 97:3 และ 95:5 ที่ผ่านการเชื่อมขวางและขึ้นรูปโดยเทคนิคการหล่อแบบด้วยตัวทำละลาย นำฟิล์มที่ขึ้นรูปได้ตรวจสอบสมบัติเชิงกล ลักษณะสัณฐานวิทยาและการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เม็ดพอลิแล็กทิกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เกรด 4043D สำหรับงานฟิล์ม จากบริษัท NatureWorks LLC ดังแสดงสมบัติในตารางที่ 3.1

2. ซังข้าวโพดแห้ง (corn cobs)

3. พอลิไวนิลแอลกฮอล์ (poly(vinyl alcohol), PVA) จากบริษัท Ajax Finechem เกรดคุณภาพเชิงวิแคราะห์

4. อีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) จากบริษัท Sigma-Aldrich (USA) เกรดคุณภาพเชิงวิแคราะห์

5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) จากบริษัท RCl Labscan Limited เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์

6. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogenperoxide) จากบริษัท Chem-Supply เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์

7. คลอโรฟอร์ม (chloroform) จากบริษัท RCl Labscan Limited เกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รายชื่อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3. 1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทดลอง

ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	รุ่น/บริษัทผู้ผลิต
1. เครื่องปั่นกวนผสมความเร็วสูง (high speed homogenizer)	T 18 basic/ ULTRA-TURRAX®/ Malaysia
2. เตาให้ความร้อนที่สามารถปั่นผสมสาร (hot plate stirrer)	MS300HS/ Favorit®/ South Korea
3. ตู้อบ (hot air oven)	UNB 400/ Memmert/ United State of America
4. เครื่องปั่นเหวี่ยงสารละลาย (centrifuge machine)	Model 2420/ Kubota/ Japan
5. เครื่องบดหยาบ	Momunda/ Thailand
6. เครื่องบดละเอียด	Fritsch/ Germany
7.เครื่องวัดสี (reflectance spectrophotometer)	CE7000/ Macbeth/ United State of America
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)	JSM 5410 LV/ JEOL.,Ltd/ Japan
9. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA)	TGA/ SDTA851e/ Mattler Toledo/ Switzerland

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3. 1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทดลอง (ต่อ)

ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	รุ่น/บริษัทผู้ผลิต
10. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimetry, DSC)	DSC 1/ Mattler Toledo/ Switzerland
11. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์เฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrophotometer, FT-IR)	Nicolet 6700/ Thermo Fisher Scientific Inc./ United State of America
12. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine)	LF plus/ LLOYD Instrument/ United State of America

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสจากซังข้าวโพด

1. บดซังข้าวโพดที่ตากแห้งด้วยเครื่องบดแบบหยาบและเครื่องบดแบบละเอียด แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ซังข้าวโพดจะมีขนาดประมาณ 60-70 เมช

รูปที่ 3. 1 เครื่องบดหยาบ

รูปที่ 3. 2 เครื่องบดละเอียด

2. นำซังข้าวโพดที่บดละเอียดดังกล่าว 20 กรัม ผสมเข้ากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส ปั่นกวนนาน 2 ชั่วโมง ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการแอลคาไลน์ทรีตเมนต์และทำซ้ำอีก 1 ครั้ง จากนั้นฟอกขาวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส ปั่นกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำซ้ำอีก 1 ครั้ง เช่นเดียวกัน ทิ้งสารละลายให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง กรองด้วยกระดาษกรอง ล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่ง pH เท่ากับ 7 และนำเข้าตู้อบ อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วันจากนั้นเก็บเซลลูโลสที่สกัดได้ไว้ในเดซิเคเตอร์

3. นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 กรัมผสมกับยูเรีย 15 กรัมในน้ำ 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย

4. เติมเซลลูโลสที่สกัดได้จากข้อ (2) 5 กรัมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย 100 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนผสมความเร็วสูง แสดงในรูปที่ 3.3 ด้วยความเร็วรอบ 10000 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการปั่นแตกต่างกัน คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ได้สารแขวนลอยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

รูปที่ 3. 3 เครื่องปั่นกวนผสมความเร็วสูง [32]

5. นำสารแขวนลอยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสจากข้อที่ (4) แช่แข็งที่อุณหภูมิ -13 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาปั่นกวนช้าๆจนสารละลายมีอุณหภูมิห้อง จะได้สารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

3.4.2 การเตรียมการเชื่อมขวางระหว่างไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสและพอลิไวนิลแอลกฮอล์

1. นำพอลิไวนิลแอลกฮอล์ 3 กรัมละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ปั่นกวนจนพอลิไวนิลแอลกฮอล์ละลายเป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

2. นำสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกฮอล์จากข้อที่ 1) ในอัตราส่วน 70:30 ตามลำดับ ปั่นกวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันนาน 2 ชั่วโมงและเก็บสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกฮอล์ในตู้เย็นเพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป

3.4.2.1 การเชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพ

1. นำสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกฮอล์ที่เตรียมไว้ 100 มิลลิลิตร มาปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -13 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำสารละลายแช่แข็งจากข้อที่ (1) ออกมาปั่นกวนช้าๆจนสารละลายมีอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและทำข้อที่ 1-2) ซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง จะได้สารละลายไมโครไฟบริลเลเตดที่ผ่านการเชื่อมขวางโดยวิธีทางกายภาพ

3.4.2.2 การเชื่อมขวางด้วยวิธีทางเคมี

นำสารละลายไมโครไฟบริลเลเดตเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกฮอล์ที่เตรียมไว้ 100 มิลลิลิตร ผสมกับอิพิคลอโรไฮดรินซึ่งเป็นสารเชื่อมขวางทางเคมีปริมาตร 9 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้สารละลายไมโครไฟบริลเลเดตที่ผ่านการเชื่อมขวางโดยวิธีทางเคมี

3.4.3 การวิเคราะห์สมบัติของไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสและไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางและไม่ผ่านการเชื่อมขวาง

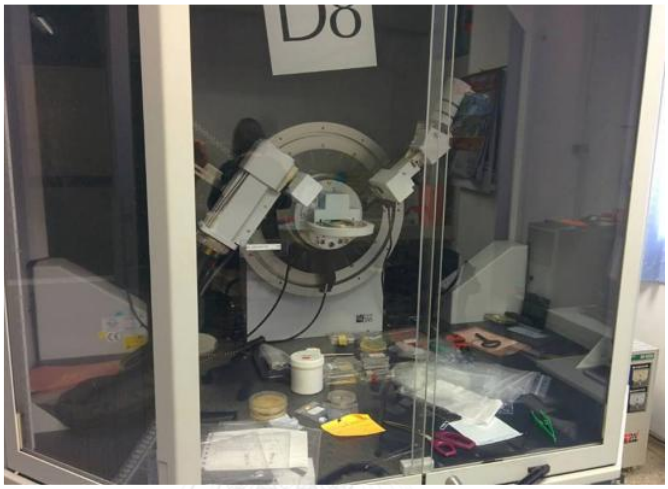
3.4.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางด้วยเทคนิค FT-IR

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR แสดงในรูปที่ 3.4 โดยใช้การทดสอบในโหมด ATR ซึ่งใช้ความถี่ในช่วงคลื่น 4000 – 500 cm^{-1} ซึ่งสามารถเตรียมตัวอย่างไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสเชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมี โดยกรองสารละลายไมโครไฟบริลเลเดตเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมี 50 มิลลิลิตรด้วยกระดาษกรองเบอร์ 41 และเครื่องดูดสุญญากาศ จะได้เจลไมโครไฟบริลเลเดตเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมี จากนั้นอบเจลไมโครไฟบริลเลเดตเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมี เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดน้ำและตัวทำละลาย ได้ผงไมโครไฟบริลเลเดตเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีสำหรับทดสอบ

รูปที่ 3. 4 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

3.4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสและไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction, XRD) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อทำการวิเคราะห์ผลึกเซลลูโลสและผงไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีจากข้อที่ 3.4.3.1) โดยตรวจวัดตั้งแต่ตำแหน่ง 3 ถึง 40 2theta



รูปที่ 3. 5 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [33]

3.4.4 การเตรียมฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกฮอล์

1. สาระลายแต่ละสูตรจากตารางที่ 3.2-3.4) ถูกปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นกวนผสมความเร็วสูง ความเร็วรอบ 3600 รอบต่อนาที นาน 5 นาที

2. นำสารละลายผสมจากข้อที่ 2) มา sonicate นาน 10 นาที เพื่อไล่ฟองอากาศและให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทลงจานเพาะเชื้อแก้วขนาด 10 เซนติเมตร ทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมงและนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ฟิล์มตามต้องการ

ตารางที่ 3. 2 สูตรการเตรียมฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ/พอลิไวนิลแอลกฮอล์

ชื่อสูตร	PLA (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	MFC/PVA (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เวลาที่ใช้ในการโฮโมจิไนเซอร์ (นาที)	จำนวนครั้งการแช่แข็ง (freeze) และละลาย (thaw)
neat PLA	100	-	-	-
99:1PLA/MFC/PVA-10P	99	1	10	5
97:3PLA/MFC/PVA-10P	97	3		
95:5PLA/MFC/PVA-10P	95	5		
99:1PLA/MFC/PVA-20P	99	1	20	
97:3PLA/MFC/PVA-20P	97	3		
95:5PLA/MFC/PVA-20P	95	5		
99:1PLA/MFC/PVA-30P	99	1	30	
97:3PLA/MFC/PVA-30P	97	3		
95:5PLA/MFC/PVA-30P	95	5		
99:1PLA/MFC/PVA-40P	99	1	40	
97:3PLA/MFC/PVA-40P	97	3		
95:5PLA/MFC/PVA-40P	95	5		
99:1PLA/MFC/PVA-50P	99	1	50	
97:3PLA/MFC/PVA-50P	97	3		
95:5PLA/MFC/PVA-50P	95	5		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3. 3 สูตรการเตรียมฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี/พอลิไวนิลแอลกฮอล์

ชื่อสูตร	PLA (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	MFC/PVA (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เวลาที่ใช้ในการโฮโมจิไนเซอร์ (นาที)	อิพิคลอโรไฮดริน (มิลลิลิตร)
neat PLA	100	-	-	-
99:1PLA/MFC/PVA-10C	99	1	10	9
97:3PLA/MFC/PVA-10C	97	3		
95:5PLA/MFC/PVA-10C	95	5		
99:1PLA/MFC/PVA-20C	99	1	20	
97:3PLA/MFC/PVA-20C	97	3		
95:5PLA/MFC/PVA-20C	95	5		
99:1PLA/MFC/PVA-30C	99	1	30	
97:3PLA/MFC/PVA-30C	97	3		
95:5PLA/MFC/PVA-30C	95	5		
99:1PLA/MFC/PVA-40C	99	1	40	
97:3PLA/MFC/PVA-40C	97	3		
95:5PLA/MFC/PVA-40C	95	5		
99:1PLA/MFC/PVA-50C	99	1	50	
97:3PLA/MFC/PVA-50C	97	3		
95:5PLA/MFC/PVA-50C	95	5		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3. 4 สูตรการเตรียมฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ/พอลิไวนิลแอลกฮอล์

ชื่อสูตร	PLA (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	MFC/PVA (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เวลาที่ใช้ในการโฮโมจิไนเซอร์ (นาที)
neat PLA	100	-	-
99:1PLA/MFC/PVA	99	1	20
97:3PLA/MFC/PVA	97	3	
95:5PLA/MFC/PVA	95	5	

หมายเหตุ สัญลักษณ์ของสูตรฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวาง/พอลิไวนิลแอลกฮอล์
ตัวอย่างเช่น

สูตร 99:1PLA/MFC/PVA-20P หมายถึง สูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดที่ร้อยละ 99 โดยน้ำหนักกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสซึ่งเชื่อมขวางทางกายภาพร้อยละ 1 โดยน้ำหนักและใช้เวลาการปั่นกวนความเร็วสูง 20 นาที

สูตร 99:1PLA/MFC/PVA-20C หมายถึง สูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดที่ร้อยละ 99 โดยน้ำหนักกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสซึ่งเชื่อมขวางทางเคมีร้อยละ 1 โดยน้ำหนักและใช้เวลาการปั่นกวนความเร็วสูง 20 นาที

สูตร 99:1PLA/MFC/PVA หมายถึง สูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดที่ร้อยละ 99 โดยน้ำหนักกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสซึ่งไม่เชื่อมขวางร้อยละ 1 โดยน้ำหนักและใช้เวลาการปั่นกวนความเร็วสูง 20 นาที

โดยศึกษาปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ผลของอัตราส่วนและชนิดของสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางที่ส่งผลต่อสมบัติของคอมพอสิต โดยเตรียมจากสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดกับสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางทางกายภาพ (P) และทางเคมี (C) ในอัตราส่วน 100:0, 99:1, 97:3, และ 95:5

2. ผลของอัตราส่วนของสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกฮอล์ โดยเตรียมจากสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดกับสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกฮอล์ในอัตราส่วน 99:1, 97:3, และ 95:5

3.4.5 การวิเคราะห์สมบัติฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

3.4.5.1 การวิเคราะห์ความโปร่งแสงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

การวิเคราะห์ความโปร่งแสง (transparency) ของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต จะวิเคราะห์ด้วยการสังเกตลักษณะทางกายภาพและวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสี (spectrophotometer) ของ Macbeth color-eye 700 (X-Rite) แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยใช้ transmission mode ในการวัดดังนี้ (specular include,SPI) รวมแสง UV (UV include) illuminant D 65 และ 10° standard observer โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาวัดสีทั้งหมด 3 ตำแหน่ง โดยกำหนดให้ ค่า H เท่ากับ 0 แสดงถึงความใส ค่า H เท่ากับ 100 แสดงถึงความขุ่น ซึ่งจะวิเคราะห์ค่าความขุ่น (haze) ของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์เป็นค่ามาตรฐานเปรียบเทียบกับค่าความขุ่นของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางและไม่ผ่านการเชื่อมขวาง/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

รูปที่ 3. 6 เครื่องวัดสี

3.4.5.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ด้วยเทคนิค TGA

การวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยเครื่อง TGA ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ภายใต้การทดสอบแบบไดนามิกส์ซึ่งอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลตรต่อนาที เริ่มวิเคราะห์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียสถึง 500 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นการศึกษาหาอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature, T_d) ของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์, ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางและไม่ผ่านการเชื่อมขวาง/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

รูปที่ 3. 7 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน [34]

3.4.5.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ด้วยเทคนิค DSC

การวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอม (melting temperature, T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ แสดงในรูปที่ 3.8 ของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์, ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดซึ่งเสริมแรงด้วยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางและไม่ผ่านการเชื่อมขวาง ซึ่งทำการวิเคราะห์สมบัติในช่วงอุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียสจนถึง 200 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและการทดสอบแบบไดนามิกส์และไอโซเมอร์มอล [30] โดยน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบประมาณ 1-3 มิลลิกรัม

รูปที่ 3. 8 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์

3.4.5.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

3.4.5.4.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส และเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาผิวภายนอกของเซลลูโลสและไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลสและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งเตรียมตัวอย่างโดยอบเซลลูโลสและไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีที่อุณหภูมิ

60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างนำตัวอย่างที่ได้ไปเคลือบด้วยทองผ่านเครื่อง sputter-coater ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 15 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 1000 เท่า

รูปที่ 3. 9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [35]

3.4.5.4.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวางและเชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยเตรียมตัวอย่างชิ้นงานจากการตัดฟิล์มฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวางและเชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีที่ผ่านการทดสอบด้านการทนแรงดึงเพื่อทำการตรวจสอบภาคตัดขวางของฟิล์มและอบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างชิ้นงานที่ได้ไปเคลือบด้วยทองผ่านเครื่อง sputter-coater ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 15 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 1000 เท่า

3.4.5.5 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึง (tensile properties) ของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์, ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง, ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมี ตามมาตราฐาน ASTM D882 standard test method for tensile properties of plastics ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยเตรียมตัวอย่าง

ชิ้นงานขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร หนา 1-2 เซนติเมตรและระยะระหว่างตัวจับชิ้นงาน (gauge length) 2.5 เซนติเมตร การทดสอบใช้ load cell ขนาด 50 นิวตัน ด้วยอัตราเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อทำการวิเคราะห์ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) และค่าการยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break)

รูปที่ 3. 10 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

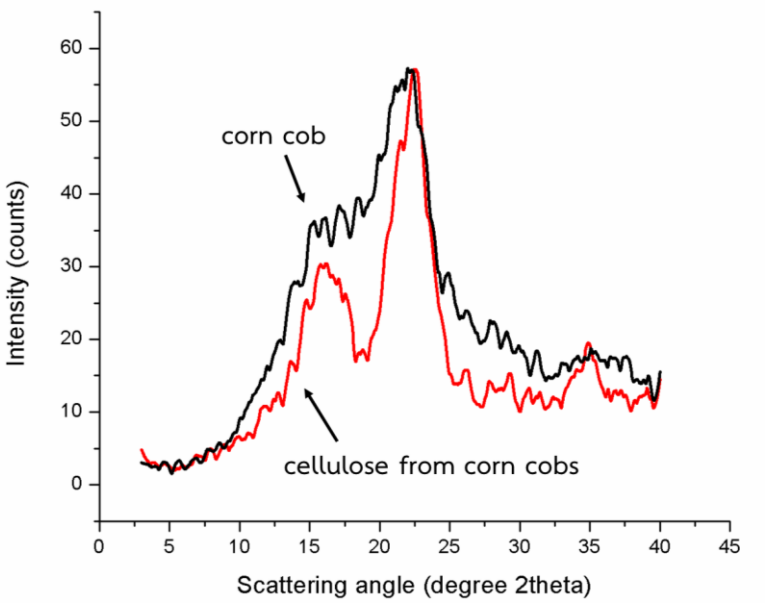
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลลูโลส

4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลลูโลส

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสที่ได้จากซังข้าวโพดซึ่งเตรียมโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และฟอกขาวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์คลอไรด์ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสและซังข้าวโพดมีลักษณะพีกคล้ายคลึงกัน โดยทั้งเซลลูโลสและซังข้าวโพดจะปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 16 และ 22 2theta ซึ่งเป็นตำแหน่งเฉพาะแสดงโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส แต่ลักษณะพีกของซังข้าวโพดจะกว้างกว่าเซลลูโลสเนื่องจากมีส่วนที่ไม่มีผลึก ได้แก่ เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน [27]



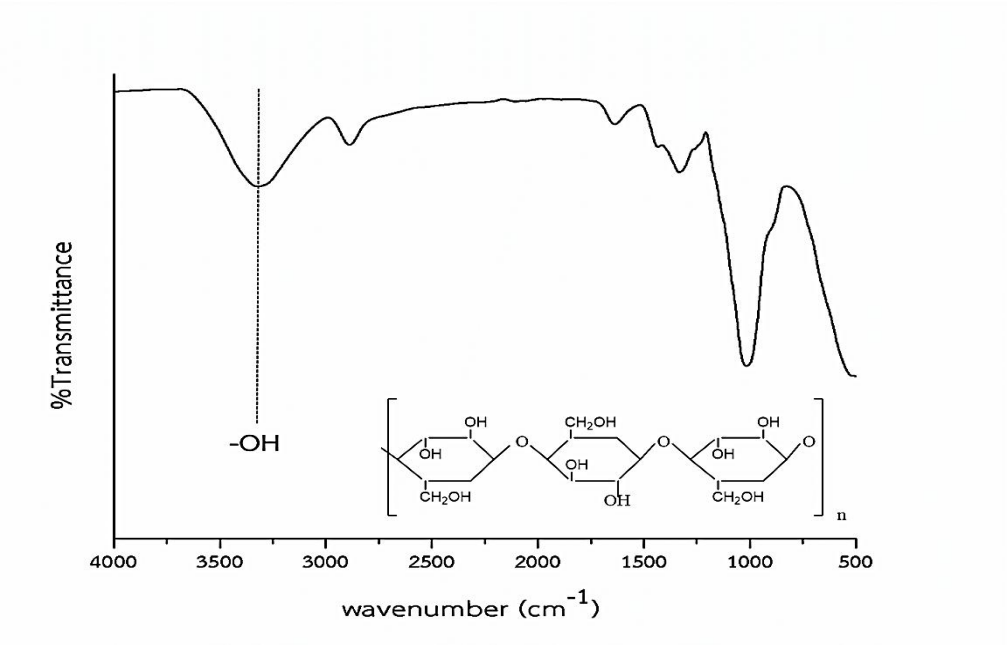
รูปที่ 4. 1 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของซังข้าวโพดและเซลลูโลสจากซังข้าวโพด

4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี โครงสร้างผลึก การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาและอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี

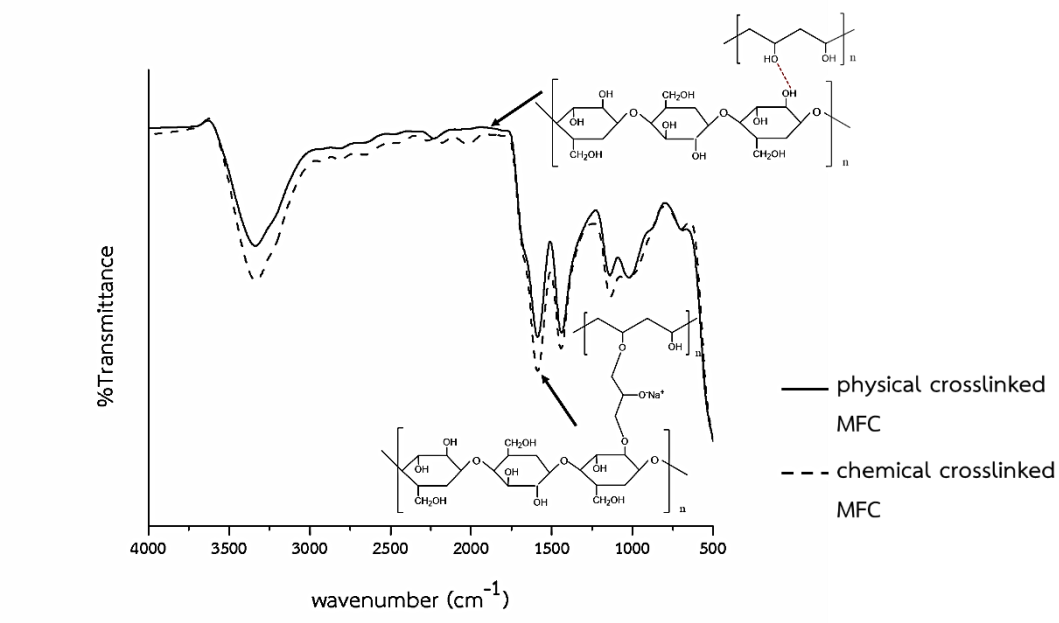
4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี แสดงผลดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 โดยอินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพหรือทางเคมีและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง ปรากฏพีกที่เลขคลื่น 3420 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชัน –OH stretching vibration ของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสและพอลิไวนิลแอลกฮอล์ แต่อินฟราเรดสเปกตรัมสเปกตรัมของไมโครไฟบริลเลแตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ ความเข้มของพีกจะสูงกว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของไมโครไฟบริลเลแตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เพราะการเชื่อมขวางทางเคมีทำให้หมู่ฟังก์ชัน –OH ลดลงมากกว่าการเชื่อมขวางทางกายภาพ [29] และพีกที่เลขคลื่น 1420 cm^{-1} ในรูป 4.2 และ 4.3 เป็นหมู่ฟังก์ชัน symmetric CH_2 bending vibration แสดงส่วนที่เป็นผลึกในเซลลูโลส [36] นอกจากนี้ พีกที่เลขคลื่น 1000 cm^{-1} ซึ่งปรากฏเฉพาะของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสในรูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งของ C-OH ที่เป็นหมู่ข้างเคียง จึงเป็นการยืนยันว่าการเชื่อมขวางทำให้หมู่ไฮดรอกซิลลดลง [37]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



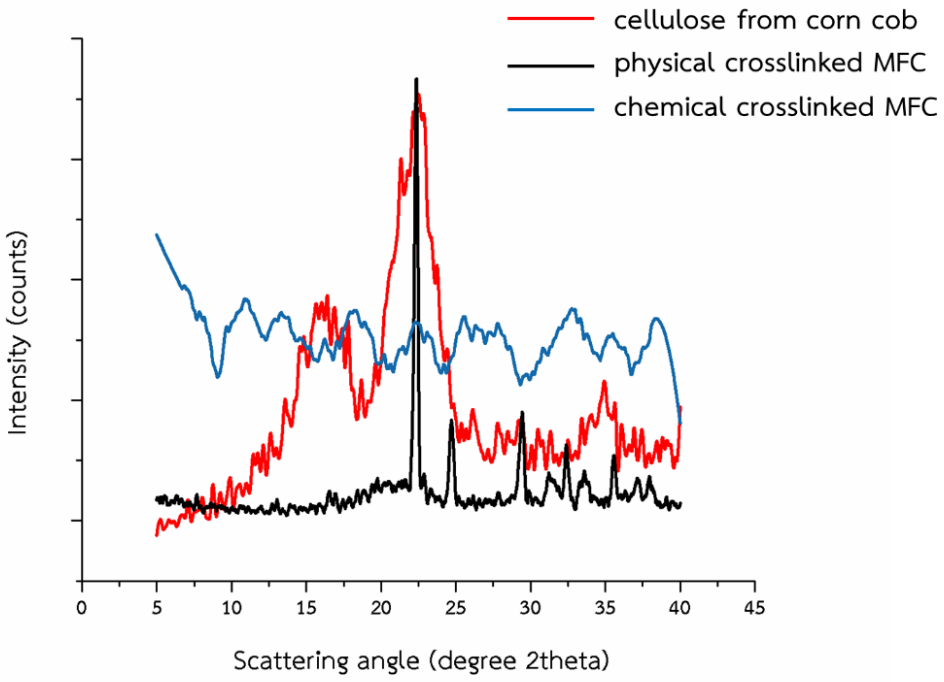
รูปที่ 4. 2 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส



รูปที่ 4. 3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี

4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูลสที่เชื่อมชวางทางเคมี

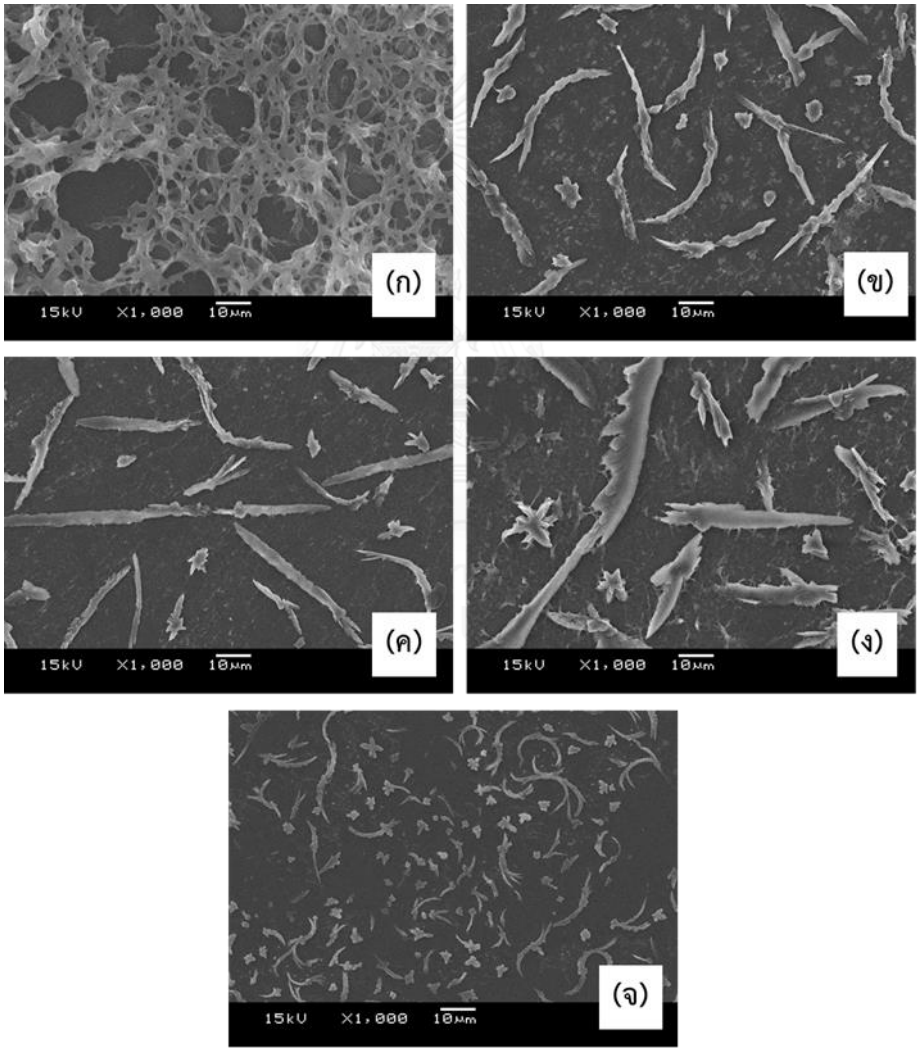
จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ในรูปที่ 4.4 แสดงเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูลสที่เชื่อมชวางทางเคมี พบว่าความเป็นผลึก (crystalline) ของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับความเป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลส (ร้อยละ 57.6) เนื่องจากการเชื่อมขวางทำให้ผลึกในเส้นใยเซลลูโลสถูกทำลายกลายเป็นอสัณฐาน (amorphous) นอกจากนี้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส ส่งผลทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสถูกทำลายด้วยเช่นกัน จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลให้ความเป็นผลึกในเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางลดลง [38]



รูปที่ 4. 4 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูลสที่เชื่อมชวางทางเคมีและเซลลูโลสจากซังข้าวโพด

4.2.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง

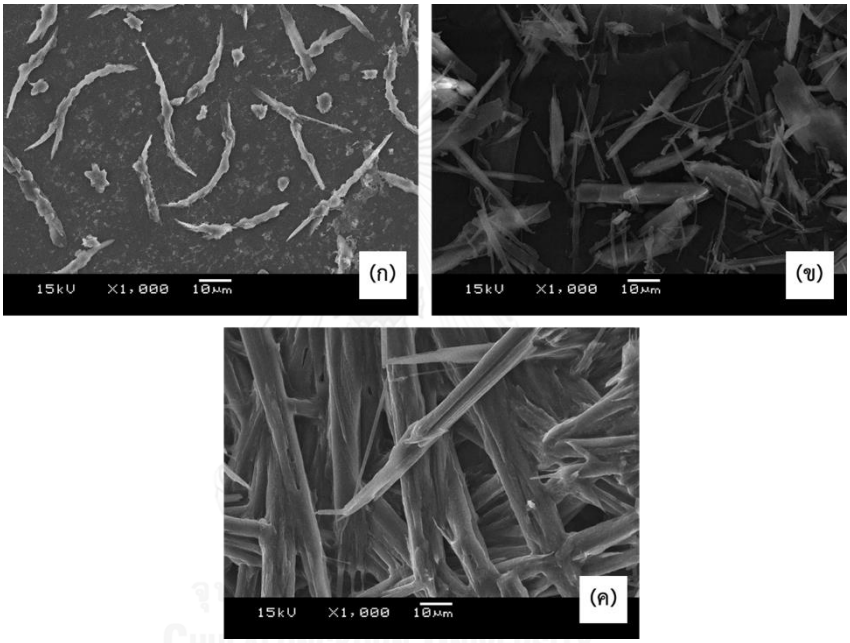
ผลของการเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูงต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส ดังรูปที่ 4.5 (ก) – (จ) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยรูปที่ (ก) เป็นการปั่นกวนความเร็วสูงที่เวลา 10 นาทีแสดงให้เห็นเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสมีลักษณะเป็นโครงสร้างร่างตาข่าย แต่เมื่อเพิ่มเวลาการปั่นกวนความเร็วสูงที่ 20 นาที (รูปที่ (ข)) เส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยเดี่ยว ยาว และพบว่าเส้นใยจะมีขนาดสั้นลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง (30, 40 และ 50 นาที) [28]



รูปที่ 4. 5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสในเวลาการปั่นกวนความเร็วสูงที่ (ก) 10 นาที (ข) 20 นาที (ค) 30 นาที (ง) 40 นาที และ (จ) 50 นาที

4.2.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี

ผลการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1000 เท่าของเส้นใยเซลลูโลส แสดงในรูป 4.6 (ก) พบลักษณะเส้นใยเป็นเส้นใยเดี่ยวและเมื่อเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสผ่านการเชื่อมขวาง ในรูป (ข) เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ พบลักษณะเส้นใยเกาะเป็นกลุ่ม ส่วนในรูป (ค) เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี พบลักษณะเส้นใยเกิดโครงสร้างร่างแหเชื่อมต่อกัน



รูปที่ 4. 6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) เซลลูโลสจากซังข้าวโพด (ข) เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ (ค) เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี

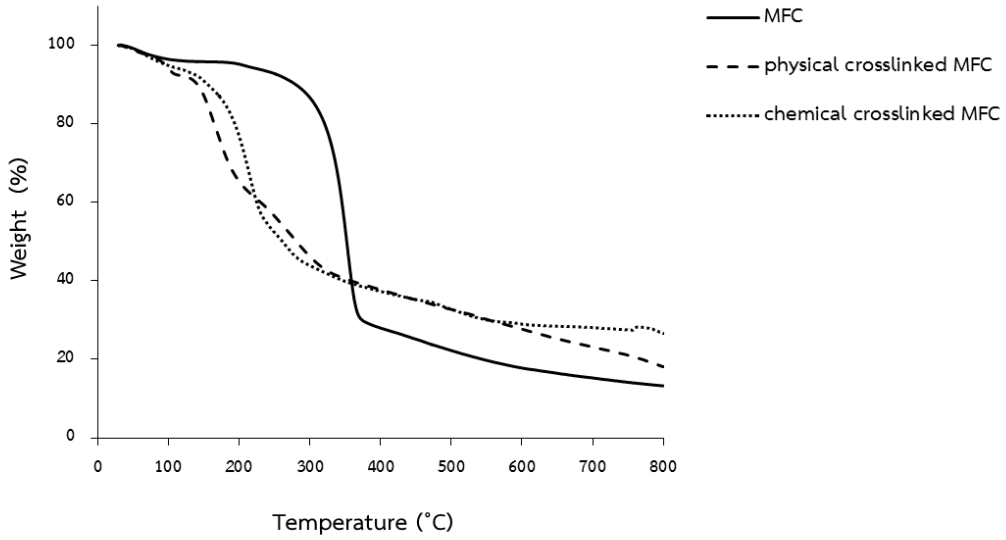
4.2.5 อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี

การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature, T_d) ของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริก โดยแสดงผลดังตารางที่ 4.1 การสลายตัวของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสเริ่มที่อุณหภูมิ 326.2 องศาเซลเซียสสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี (143.7 และ 185.1 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) แสดงว่าเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสมีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวาง เนื่องจากการเชื่อมขวางทำให้ความเป็นผลึกในเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสลดลง จึงส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนลดลง

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพต่ำกว่าเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพทำให้เกิดเพียงพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จึงสลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน

ตารางที่ 4. 1 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี

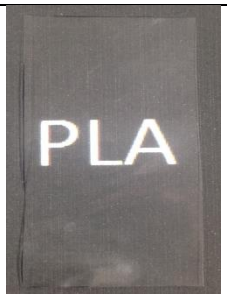
Sample	$T_{d\ (on\ set)}$ (°C)	Inflection point (°C)	$T_{d\ (end\ set)}$ (°C)
เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส	326.2	352.7	367.1
เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ	143.7	163.0	234.1
เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี	185.1	213.8	245.7

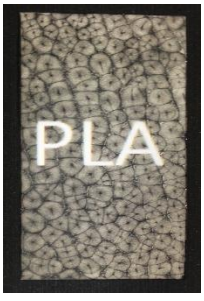


รูปที่ 4. 7 TGA เทอร์โมแกรมของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี

4.3 ลักษณะความโปร่งแสงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

ลักษณะความโปร่งแสง (film transparency) ของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต โดยศึกษาจากลักษณะทางกายภาพ แสดงดังรูปที่ 4.8 ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์มีลักษณะใสมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวาง ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวางมากขึ้น ความโปร่งแสงของฟิล์มลดลงอย่างมาก เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มของไมโครไฟบริลเลแตดเซลลูโลสทำให้การกระจายตัวในพอลิแล็กติกแอซิดไม่ดี [31, 39]

ตัวอย่าง/อัตราส่วน	100:0
neat PLA	

ตัวอย่าง/อัตราส่วน	99:1	97:3	95:5
PLA/MFC/PVA			
PLA/MFC/PVA-10P			
PLA/MFC/PVA-20P			
PLA/MFC/PVA-30P			
PLA/MFC/PVA-40P			

ตัวอย่าง/อัตราส่วน	99:1	97:3	95:5
PLA/MFC/PVA-50P			
PLA/MFC/PVA-10C			
PLA/MFC/PVA-20C			
PLA/MFC/PVA-30C			
PLA/MFC/PVA-40C			

ตัวอย่าง/อัตราส่วน	99:1	97:3	95:5
PLA/MFC/PVA-50C			

รูปที่ 4. 8 ลักษณะความโปร่งแสงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ

4.3.1 ความขุ่นของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

เมื่อศึกษาความโปร่งแสงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตจากการวัดค่าความขุ่น (haze) ด้วยเครื่องวัดสี แสดงผลดังตารางที่ 4.2 พบว่าการเติมเส้นใยไมโครไฟ บริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวางในพอลิแล็กติกแอซิด ค่าความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และการเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่ร้อยละ 3 และ 5 ทำให้ค่าความขุ่นเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับการเติมเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสร้อยละ 1 ในทุกสูตรนอกจากนี้ เวลาในการปั่นกวนความเร็วสูงของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสส่งผลต่อค่าความขุ่นของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมสิต โดยที่เวลาการปั่นกวนความเร็วสูง 10 นาทีในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ ให้ค่าความขุ่นสูงที่สุด เนื่องจากเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เวลาปั่นกวนความเร็วสูง 10 นาทีมีลักษณะโครงสร้างร่างแหตาข่ายสอดคล้องกับลักษณะวิทยาที่ตรวจพบ

ตารางที่ 4. 2 ค่าความขุ่นของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

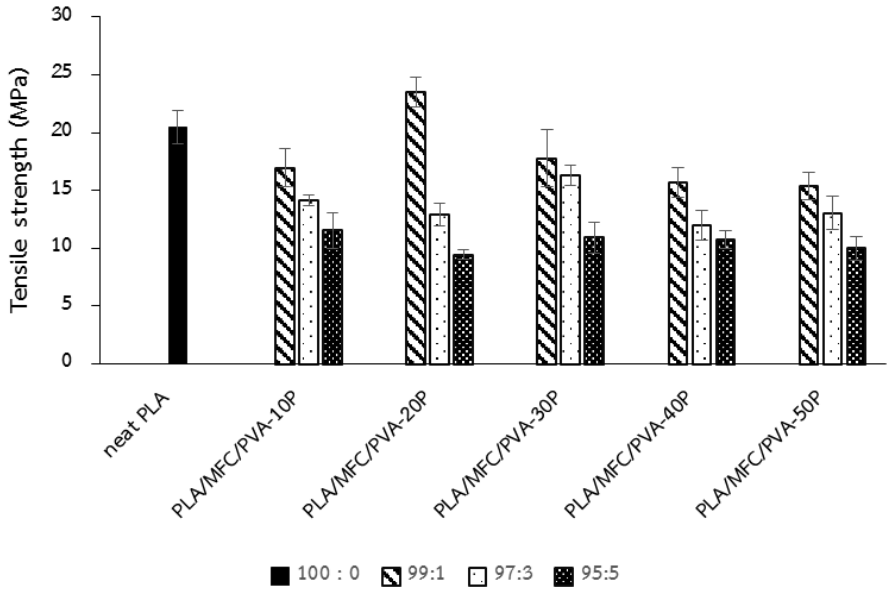
Sample	Haze			
	100:0	99:1	97:3	95:5
neat PLA	24.5	-	-	-
PLA/MFC/PVA-10P	-	95.1	100.3	101.1
PLA/MFC/PVA-20P	-	69.6	78.9	95.4
PLA/MFC/PVA-30P	-	77.0	82.1	94.8
PLA/MFC/PVA-40P	-	71.9	79.2	89.5
PLA/MFC/PVA-50P	-	79.7	99.4	98.4
PLA/MFC/PVA-10C	-	81.4	85.9	95.1
PLA/MFC/PVA-20C	-	74.9	88.2	88.8
PLA/MFC/PVA-30C	-	84.2	87.1	91.6
PLA/MFC/PVA-40C	-	88.3	90.4	96.8
PLA/MFC/PVA-50C	-	88.9	95.0	98.2
PLA/MFC/PVA	-	48.99	54.99	68.93

4.4 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

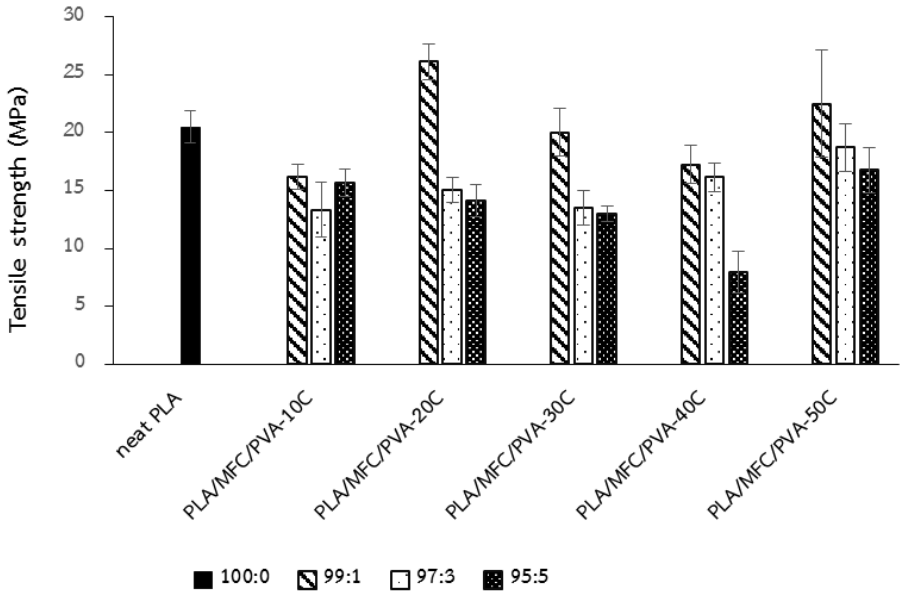
4.4.1. ผลของเวลาที่ใช้ในการปั่นกวนความเร็วสูงสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

4.4.1.1 ความทนแรงดึง

ผลของความทนแรงดึง (tensile strength) ของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพหรือทางเคมี/พอลิไวนิลแอลกฮอล์คอมพอลิต โดยเปลี่ยนแปลงเวลาปั่นกวนความเร็วสูงสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เวลา 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.9 – 4.10



รูปที่ 4. 9 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง

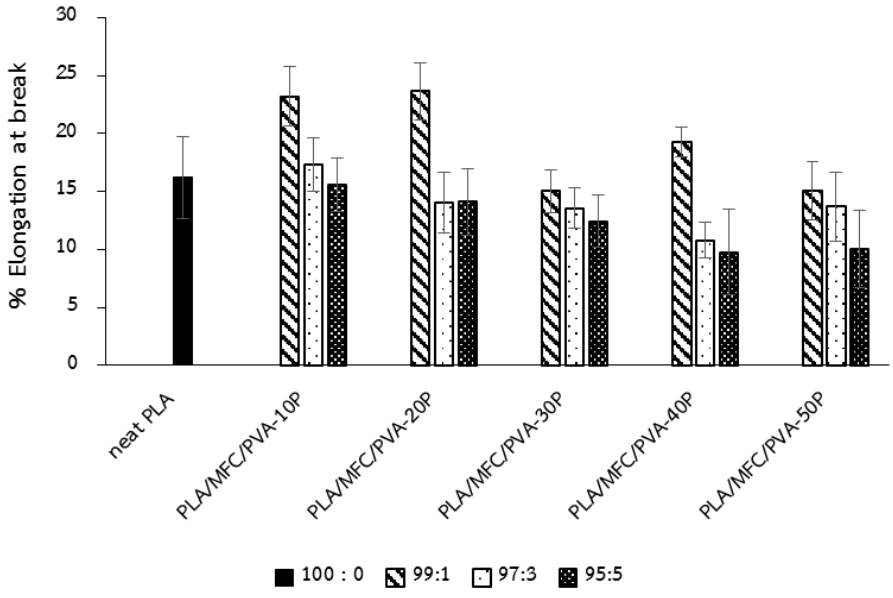


รูปที่ 4. 10 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง

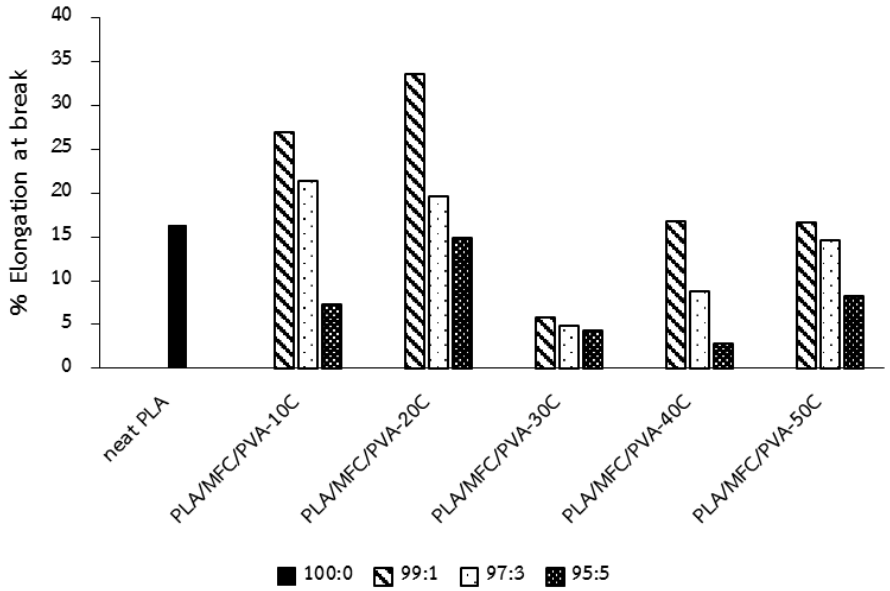
พบว่าฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 20.5 เมกะปาสคาล ส่วนพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิไวนิลแอลกฮอล์/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพหรือทางเคมีมีค่าความทนแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 23.5 และ 26.1 เมกะปาสคาล โดยเวลาการปั่นกวนความเร็วสูงที่ให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดทั้งสองวิธีการเชื่อมขวางคือเวลา 20 นาที แสดงให้เห็นว่าเวลาการปั่นกวนความเร็วสูงที่ 20 นาที ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดตถูกทำลายเปลี่ยนจากโครงสร้างคล้ายร่างแหตาข่ายเป็นเส้นใยเดี่ยว สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์มคอมพอสิตพอลิแล็กติกแอซิดได้และเมื่อเพิ่มเวลาในการปั่นกวนความเร็วสูงเป็น 30, 40 และ 50 นาที ค่าความทนแรงดึงลดลง เพราะเมื่อเพิ่มเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง เนื่องจากเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสถูกทำให้มีขนาดสั้นลง ดังที่พบในลักษณะสัณฐานวิทยาที่ได้กล่าวมา พันธะไฮโดรเจนจึงถูกทำลายมากขึ้น ความแข็งแรงจึงลดลงตามการเพิ่มเวลาในการปั่นกวนความเร็วสูง [31]

4.4.1.2 การยืดสูงสุด ณ จุดขาด

ผลการเปลี่ยนแปลงเวลาปั่นกวนความเร็วสูงสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดที่เสริมแรงในพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพหรือทางเคมี/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์คอมพอลิตต่อการยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 – 4.12



รูปที่ 4. 11 การยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง

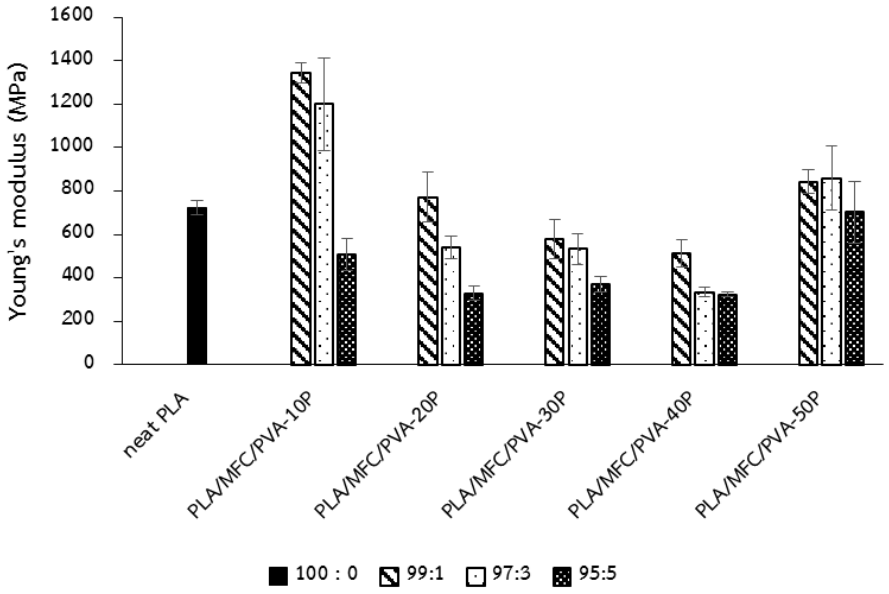


รูปที่ 4. 12 การยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง

ค่าการยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของฟิล์มคอมพอลิตพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพหรือทางเคมี/พอลิไวนิลแอลกฮอล์ สูงสุดที่เวลาการปั่นกวนความเร็วสูง 20 นาที คือ ร้อยละ 23.6 และ 33.5 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ (ร้อยละ 16.2) โดยเป็นผลมาจากความแข็งแรงของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสและเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอลิต เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่มีความแข็งแรงสามารถจึงสามารถช่วยรับแรงได้ดี ดังนั้นฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดจึงยืดได้มากขึ้น

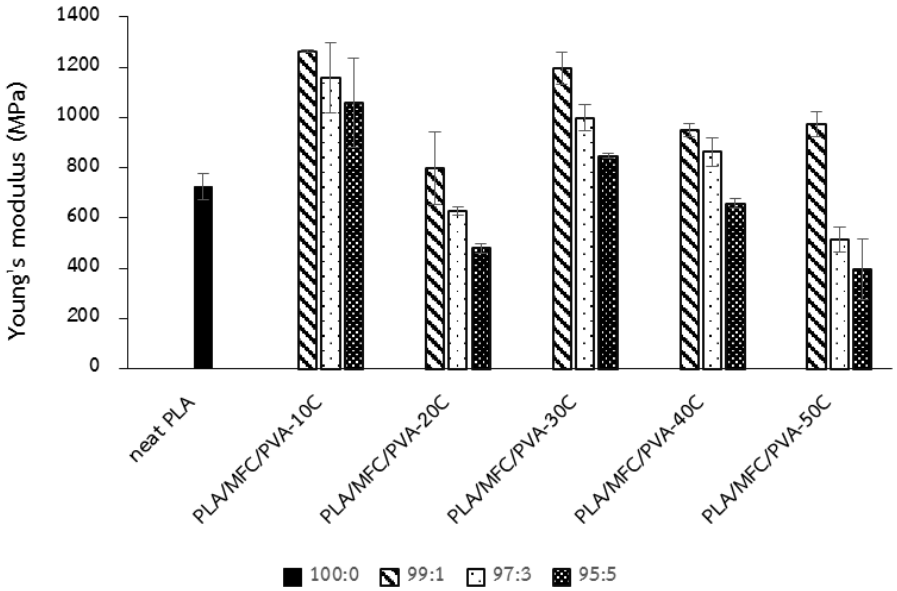
4.4.1.3 มอดุลัสของยัง

มอดุลัสของยัง (Young's modulus) เป็นค่าที่บอกความสามารถในการคงรูปและระดับความแข็งตึง (stiffness) ของวัสดุ ถ้ามอดุลัสมีค่ามากแสดงว่าวัสดุมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวและจากรูปที่ 4.13 – 4.14



รูปที่ 4. 13 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



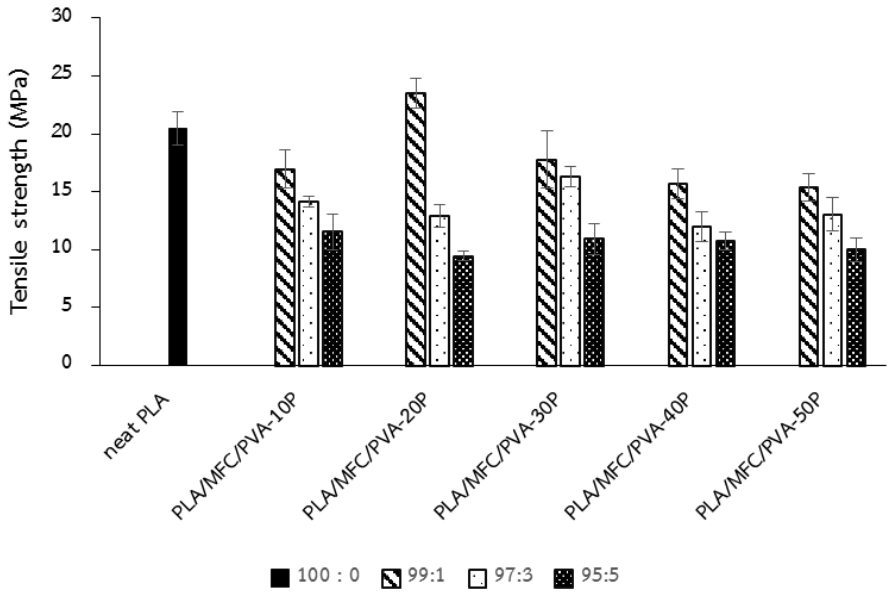
รูปที่ 4. 14 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง

ผลการเปลี่ยนแปลงเวลาปั่นกวนความเร็วสูงสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสต่อฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต พบว่าที่เวลา 10 นาทีให้ค่ามอดุลัสของยังสูงสุด เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยเป็นโครงสร้างร่างแหตาข่าย สามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปได้ เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก เป็นผลให้ค่ามอดุลัสของยังมีค่าสูงที่สุดและเมื่อเพิ่มเวลาเป็น 30, 40, 50 นาที เส้นใยถูกทำให้มีขนาดสั้นลงจากการปั่นกวนความเร็วสูง ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูป เมื่อรับแรงกระทำจึงลดลง ดังนั้นค่ามอดุลัสของยังลดลง เมื่อเพิ่มเวลาการปั่นกวนความเร็วสูง [31]

4.4.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

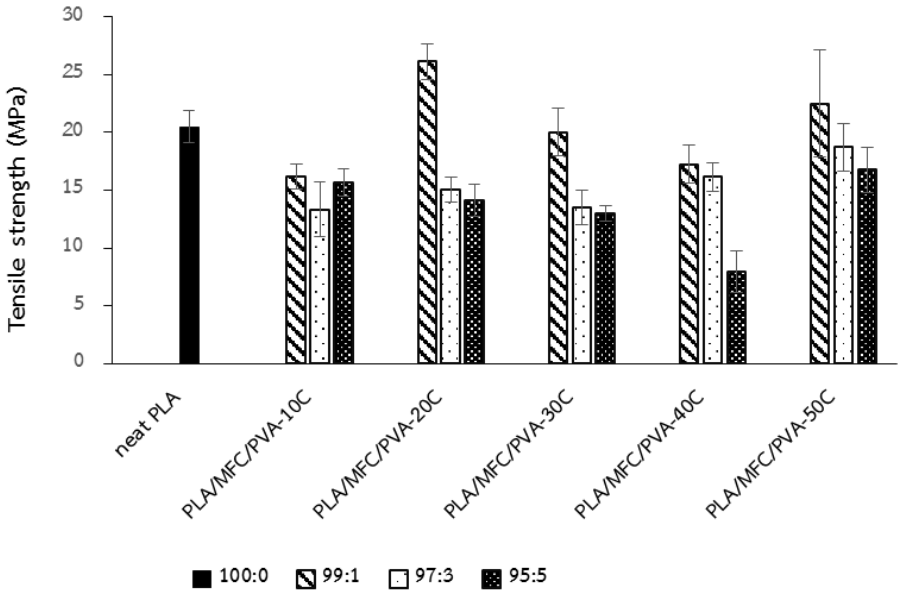
4.4.2.1 ความทนแรงดึง

เมื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพหรือทางเคมีในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตโดยมีอัตราส่วน คือ 99:1, 97:3 และ 95:5 จากกราฟรูปที่ 4.15 – 4.16



Chulalongkorn University

รูปที่ 4. 15 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

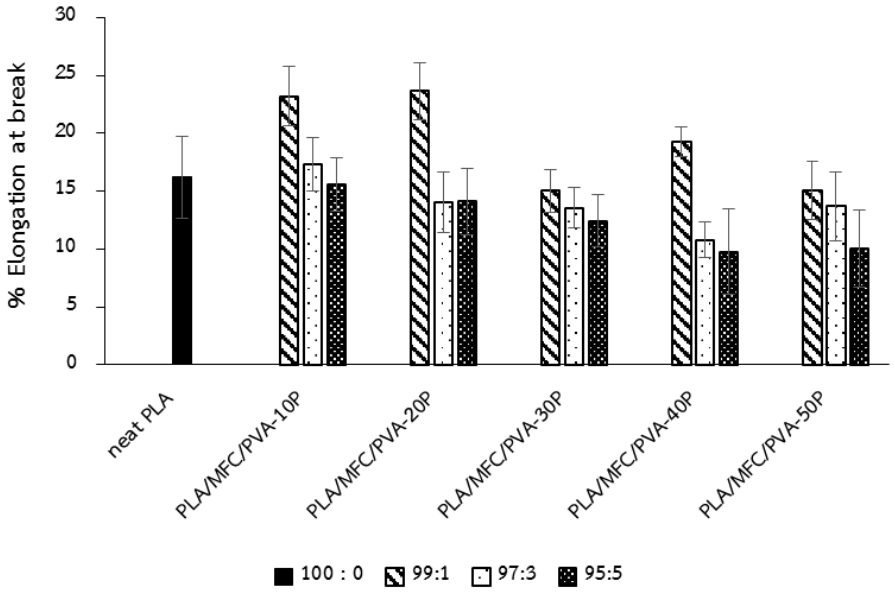


รูปที่ 4. 16 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

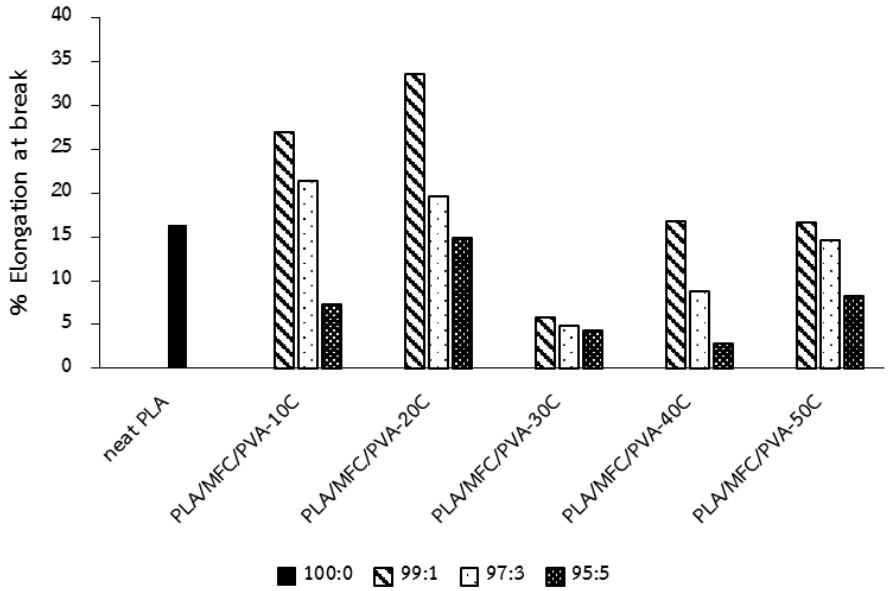
อัตราส่วนที่ 99:1 ในทุกสูตรของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตมีค่าความทนแรงดึงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่ 97:3 และ 95:5 เนื่องจากในอัตราส่วนที่ 99:1 เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิแล็กติกแอซิด โดยเป็นผลมาจากเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) กับพอลิแล็กติกแอซิดและปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่มีปริมาณน้อยทำให้การแยกระหว่างเฟสน้อย จึงสามารถช่วยเสริมแรงได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวาง (ร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก) เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางเกิดการเกาะกลุ่ม (agglomerate) กันเองมากกว่าการกระจายตัวในพอลิแล็กติกแอซิด ค่าความทนแรงดึงจึงลดลง

4.4.2.2 การยืดสูงสุด ณ จุดขาด

ผลของอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพหรือทางเคมีในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตต่อการยืดสูงสุด ณ จุดขาด แสดงดังกราฟรูปที่ 4.17 – 4.18



รูปที่ 4. 17 การยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

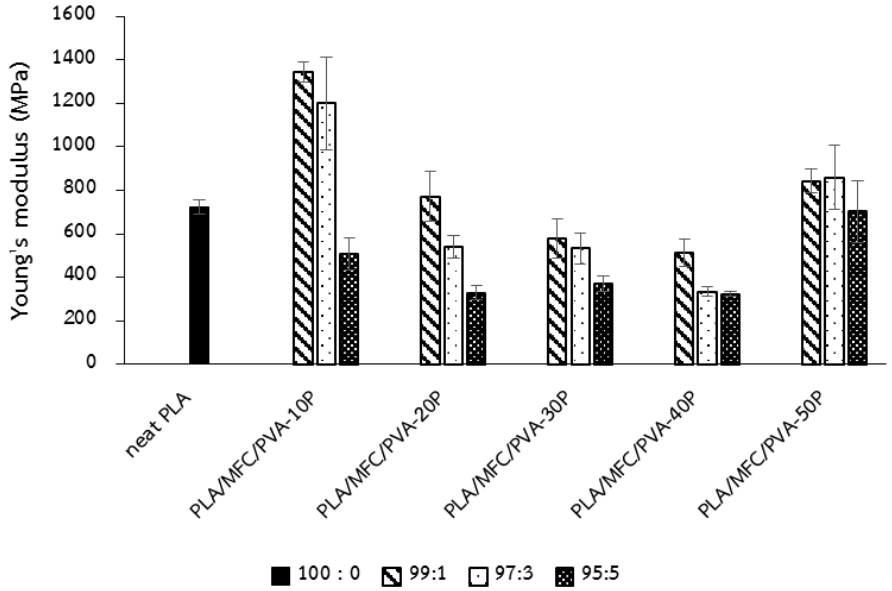


รูปที่ 4. 18 การยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

พบว่าค่าการยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่อัตราส่วน 99:1 ในทุกสูตรของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วน 97:3 และ 95:5 เป็นผลจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสซึ่งมีความเป็นผลึกสูงจึงทำให้ฟิล์มแข็งเปราะ (brittle) นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสทำให้เกิดการเข้ากันได้ไม่ดี (incompatibility) ระหว่างเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสกับพอลิแล็กติกแอซิด ส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการยืดตัวลดลง [30]

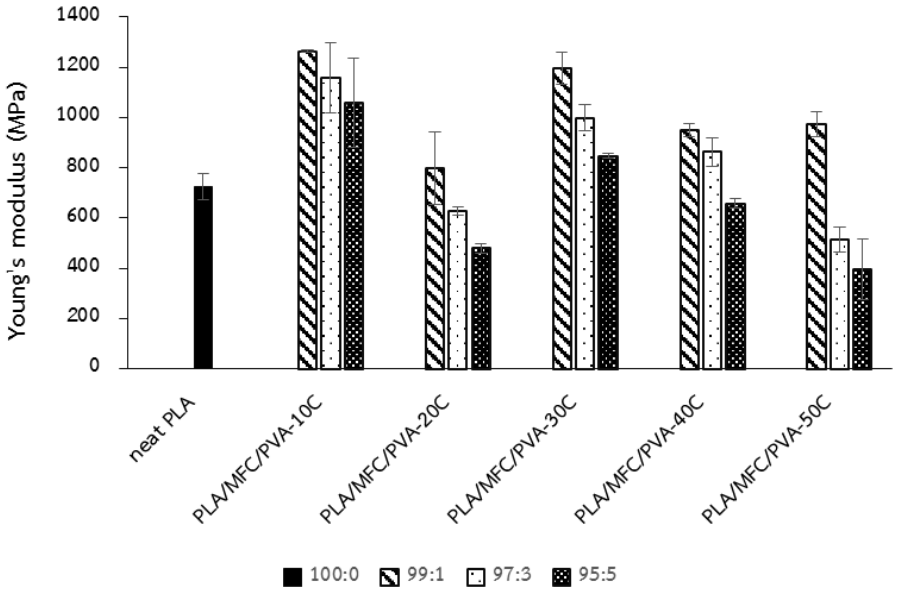
4.4.2.3 มอดุลัสของยัง

สำหรับค่ามอดุลัสของยัง จากกราฟรูปที่ 4.19 – 4.20



รูปที่ 4. 19 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4. 20 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

แสดงให้เห็นว่าค่ามอดุลัสของยังมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เนื่องจากปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นทำให้การกระจายตัวของระหว่างเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสกับพอลิแล็กติกแอซิดไม่ดี ดังนั้น เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตจึงเกิดการแตกหักได้ง่ายขึ้น

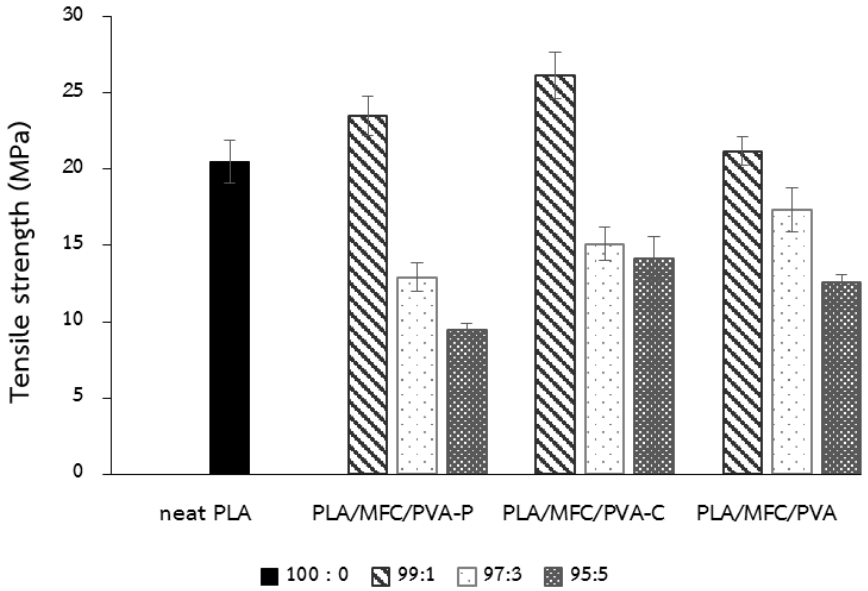
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกเวลาการปั่นกวนที่ 20 นาที ในการศึกษาผลของวิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพ การเชื่อมขวางทางเคมีและการไม่เชื่อมขวางไมโครไฟบริลเลแตดเซลลูโลสต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและลักษณะสัณฐานวิทยา

4.4.3 ผลจากการเชื่อมขวางเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสด้วยวิธีทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสทางเคมีในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

4.4.3.1 ความทนแรงดึง

เมื่อศึกษาผลจากวิธีการเชื่อมขวางเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสซึ่งใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ซึ่งเลือกเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการปั่นกวนความเร็วสูงที่เวลา 20 นาที โดยแสดงดังกราฟรูปที่ 4.21 พบว่าฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีมีค่าความทนแรงดึงสูงสุด (26.1 MPa) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพ เนื่องจากการเชื่อมขวางทางเคมีทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลในเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสถูกทำลาย ความเป็นผลึกลดลง [29] การเกาะกลุ่มของเส้นใยน้อยกว่าเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพจึงสามารถกระจายตัวและเข้ากันได้ดีกับเฟสพอลิแล็กติกแอซิด ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำจากภายนอก เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีสามารถช่วยรับแรงที่กระทำได้ดี ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลความทนแรงดึงระหว่างการเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางกับไม่ผ่านการเชื่อมขวาง จากกราฟรูปที่ 4.21 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางสูงกว่าฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมขวางทำให้เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสมีความแข็งแรงมากขึ้น



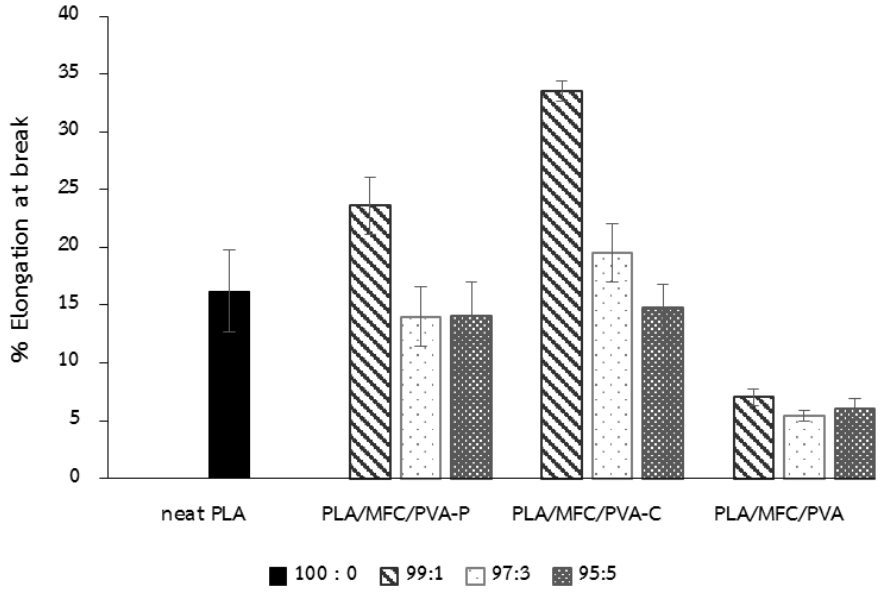
รูปที่ 4. 21 ความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ, เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง

4.4.3.2 การยืดสูงสุด ณ จุดขาด

เมื่อเปรียบเทียบค่าการยืดสูงสุด ณ จุดขาด ระหว่างเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดที่เชื่อมขวางทางกายภาพกับทางเคมีซึ่งใช้เป็นสารเสริมแรงในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด ดังกราฟรูปที่ 4.22 พบว่าค่าการยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยไมโครไฟบริลเลเตดซึ่งผ่านการเชื่อมขวางทางเคมีสูงกว่าฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดซึ่งผ่านการเชื่อมขวางทางกายภาพและฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ เนื่องจากการเชื่อมขวางทางกายภาพทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในสายโซ่โมเลกุลของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสและระหว่างสายโซ่โมเลกุลของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสกับพอลิไวนิลแอลกฮอล์ส่งผลให้ปริมาตรช่องว่าง (free volume) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลลดลง [29] ดังนั้นเมื่อนำมาเสริมแรงในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ฟิล์มจึงแข็งเปราะ ความสามารถในการยืดหยุ่นลดลง ค่าการยืดสูงสุด ณ จุดขาดจึงน้อยกว่า

สำหรับผลการยืดสูงสุด ณ จุดขาดเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางกับฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง จากกราฟรูปที่ 4.21 ค่าการยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเล

เตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางสูงกว่าฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง แสดงว่าการเชื่อมขวางทำให้สารเสริมแรงกับพอลิแล็กติกแอซิดเข้ากันได้ดีมากกว่าเนื่องจากการเชื่อมขวางช่วยลดความแตกต่างระหว่างขั้วของเฟสทั้งสองได้มากกว่าการไม่เชื่อมขวางสารเสริมแรง นอกจากนี้ยังทำให้ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตมีความยืดหยุ่นอีกด้วย



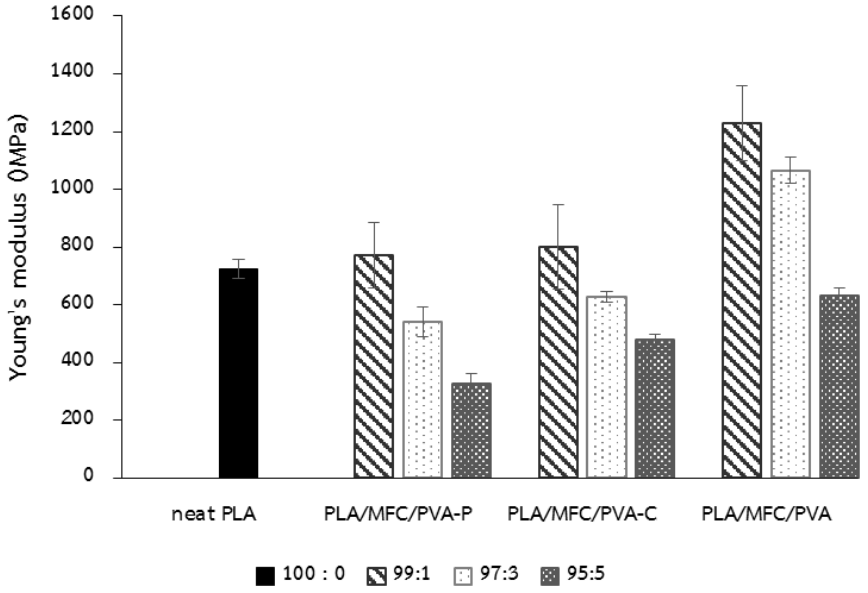
รูปที่ 4. 22 การยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ, เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง

4.4.3.3 มอดุลัสของยัง

ผลของวิธีการเชื่อมขวางต่อค่ามอดุลัสของยัง แสดงดังกราฟรูปที่ 4.23 ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพหรือทางเคมีมีค่ามอดุลัสของยังไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ผลของมอดุลัสของยังก็ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นเพราะการเชื่อมขวางทั้งสองวิธีไม่ได้ทำให้เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างระหว่างฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางกับฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง ดังกราฟรูปที่ 4.22 ค่ามอดุลัสของ

ยังของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวางมีค่าต่ำกว่าฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง เนื่องจากเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางมีความเป็นผลึกสูงกว่าเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ผ่านการเชื่อมขวาง ดังนั้นความสามารถในการต้านทานรูปสูง ค่ามอดุลัสของยังจึงสูงกว่า



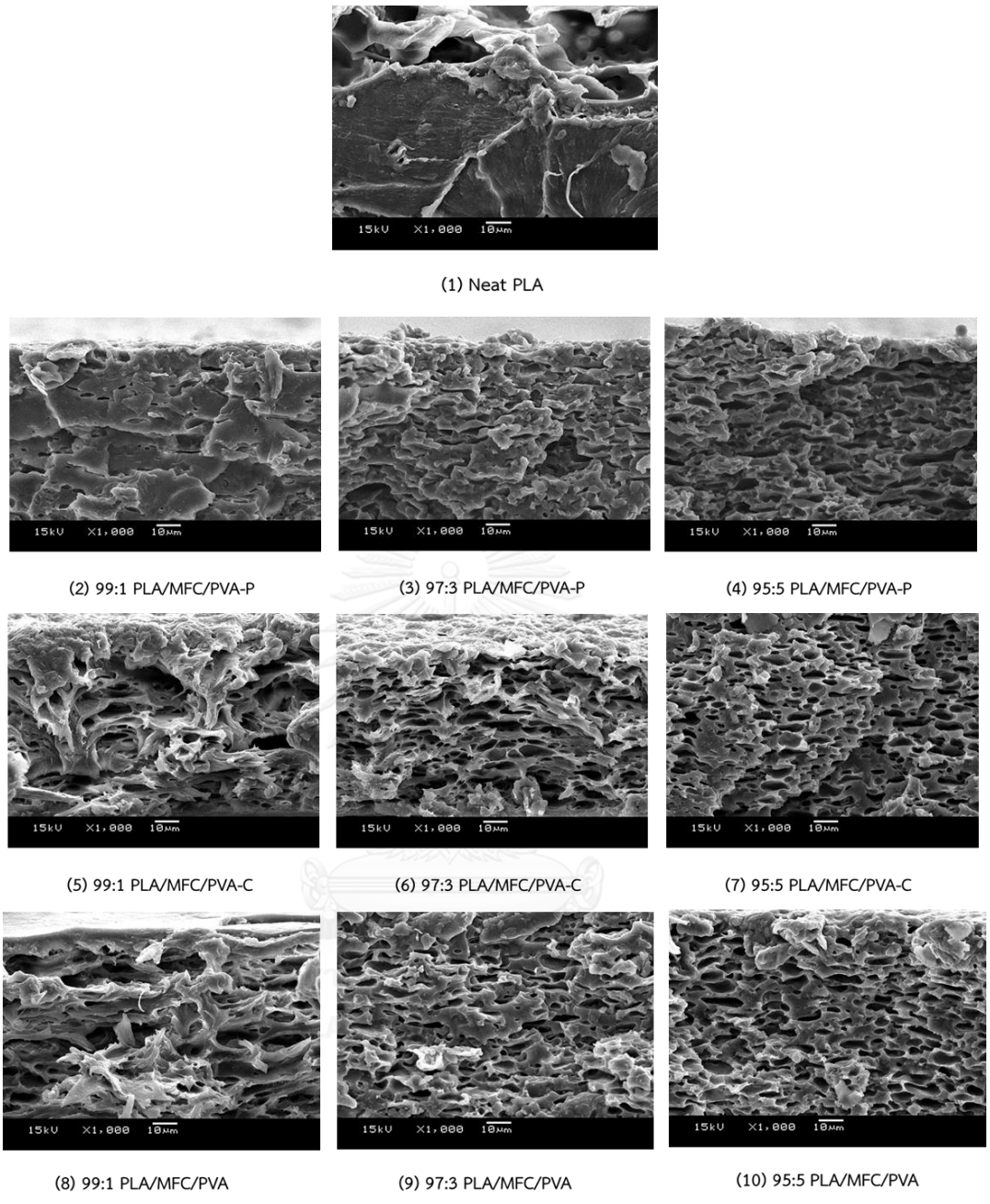
รูปที่ 4. 23 มอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ, เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง

4.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

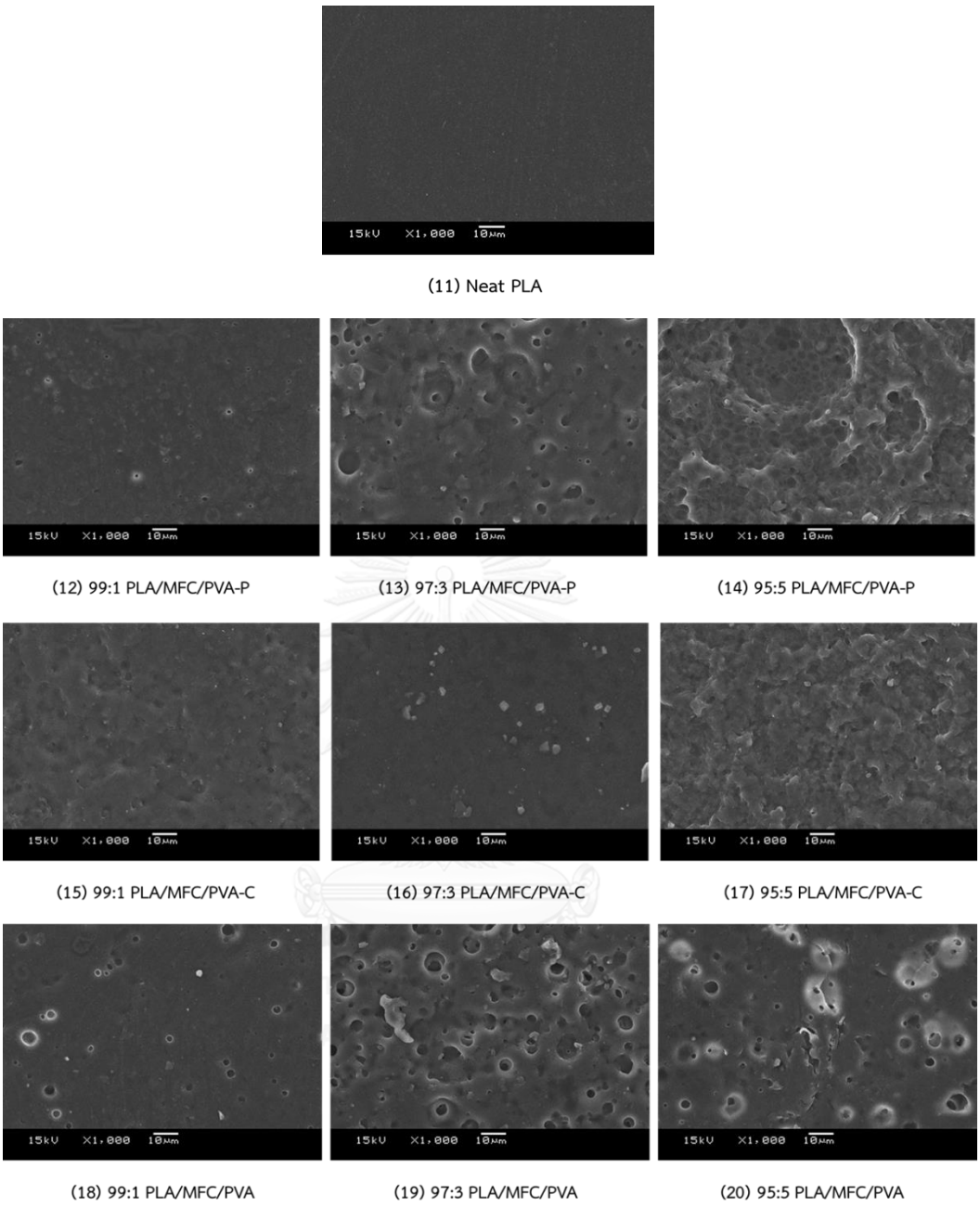
จากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า ดังรูปที่ 4.23 (1-10) เป็นสัณฐานวิทยาภาพตัดขวาง (cross section) ของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ผ่านการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าพื้นผิวตัดขวางของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นเส้นใยยืดยาวออกมาจากพื้นผิว โดยเป็นการเสียรูปของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหนียว (ductile) และเมื่อเติมเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีในเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดที่ปริมาณร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก จากภาพตัดขวางรูปที่ 2 และ 5 แสดงให้เห็นว่าปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมี เกิดช่องว่าง (void) และหลุม

(hole) จากการหลุดของเส้นใยน้อย เนื่องจากการกระจายตัว (dispersion) ของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีซึ่งมีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้กับเฟสของพอลิแล็กติกแอซิดและการยึดเกาะ (adhesion) ระหว่างเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ค่อนข้างดี ซึ่งสอดคล้องกับสัณฐานวิทยาภาพพื้นผิว (surface) ดังรูปที่ 4.24 (11-20) โดยพบว่าพื้นผิวของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์มีลักษณะเรียบ (รูปที่ 11) เมื่อเติมเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พื้นผิวของฟิล์มมีความขุรขระเล็กน้อย แต่ยังสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้อย่างดี (compatibility) เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถทำหน้าเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้อย่างดีและเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีเป็นร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก จากภาพตัดขวาง (รูปที่ 3, 4, 6, 7) ปริมาณช่องว่างและหลุมมากขึ้น เกิดจากเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีเกิดการเกาะกลุ่มรวมตัวกันมากขึ้นและความสามารถของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในการช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสลดลง ดังนั้นการกระจายตัวของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสในเฟสพอลิแล็กติกแอซิดจึงไม่ดีและจากสัณฐานวิทยาภาพพื้นผิว (รูปที่ 13, 14, 16, 17) พบว่าพื้นผิวฟิล์มเกิดความ ขุรขระ ไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันอย่างชัดเจน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสารเสริมแรงมากขึ้นความไม่เข้ากันระหว่างสารเสริมแรงกับพอลิแล็กติกแอซิดมากขึ้นด้วย เนื่องจากความเป็นขั้วที่ยังต่างกันมากของทั้งสองเฟสซึ่งเกิดจากความสามารถของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในการช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสลดลง [30, 39]

เมื่อพิจารณาการเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง จากสัณฐานวิทยาภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง (รูปที่ 18, 19, 20) ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแสดงความไม่เข้ากันระหว่างเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสกับพอลิแล็กติกแอซิดอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวาง (รูปที่ 12-17) แสดงว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับการเชื่อมขวางช่วยลดความแตกต่างระหว่างขั้วของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสได้ได้



รูปที่ 4. 24 ลักษณะสัณฐานวิทยาภาพตัดขวางของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต



รูปที่ 4. 25 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

4.6 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

4.6.1 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (degradation temperature, T_d)

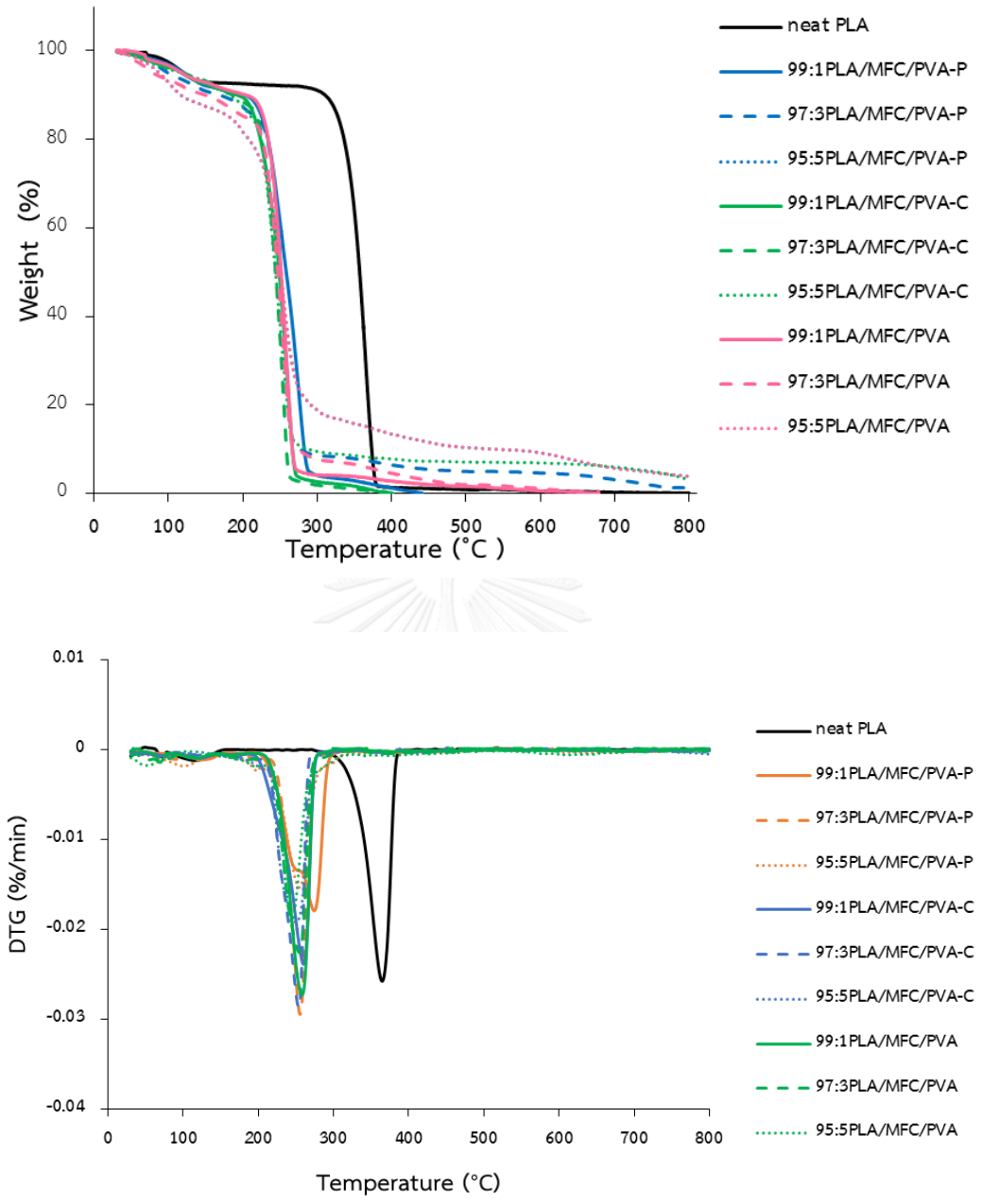
ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน เมื่อศึกษาการเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีในฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด แสดงผลดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.26 พบว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสทำให้ฟิล์มพอลิแล็กติกมีอุณหภูมิการสลายตัวลดลงในทุกสูตรและเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสในทุกสูตร อุณหภูมิการสลายตัวลดลงเช่นเดียวกัน โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากค่าอุณหภูมิที่สารเกิดการเสื่อมสลาย (inflection point) ดังนั้นการเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีไม่สามารถช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนให้กับพอลิแล็กติกแอซิดซึ่งอาจเกิดจากการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแล็กติกแอซิดระหว่างกระบวนการขึ้นรูป [40] นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เกิดจากเชื่อมขวางทำให้ความเป็นผลึกลดลงและการกระจายตัวที่ไม่ดีของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสในพอลิแล็กติกแอซิดก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การเติมเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสไม่สามารถช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนได้ทำให้เกิดการสลายตัวเร็วขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีที่กล่าวในข้อ 4.2.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4. 3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

Sample	$T_{d\ (on\ set)}$ (°C)	Inflection point (°C)	$T_{d\ (on\ set)}$ (°C)
Neat PLA	343.0	364.1	375.1
99:1PLA/MFC/PVA-P	235.7	274.0	284.7
97:3PLA/MFC/PVA-P	239.0	254.4	263.7
95:5PLA/MFC/PVA-P	231.0	253.8	270.0
99:1PLA/MFC/PVA-C	223.7	260.0	278.4
97:3PLA/MFC/PVA-C	224.3	252.6	265.5
95:5PLA/MFC/PVA-C	224.2	249.6	264.3
99:1PLA/MFC/PVA	238.4	257.7	267.6
97:3PLA/MFC/PVA	233.3	253.5	264.1
95:5PLA/MFC/PVA	228.6	243.6	259.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4. 26 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

4.6.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature, T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (cold crystallization temperature, T_{cc})

การศึกษาผลของปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึกด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอรีเมทรี ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิการเกิดผลึกลดลงทุกสูตร เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตเริ่มเกิดผลึกเร็วกว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ แสดงว่าเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นสารช่วยก่อผลึก (nucleating agent) ช่วยเร่งการเกิดผลึกในพอลิแล็กติกแอซิด [41] และค่าอุณหภูมิหลอมเหลวก็ลดลงเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนระหว่างเฟสไม่ดี เพราะเกิดการเข้ากันได้ไม่ดีระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและสารเสริมแรง [42] ส่วนค่าองศาความเป็นผลึก (degree of crystallinity) เพิ่มขึ้นในทุกสูตร เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส ซึ่งเกิดจากเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสช่วยเร่งการเกิดการตกผลึกในพอลิแล็กติกแอซิด [41]

ผลของการเชื่อมขวางในเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึก แสดงดังตารางที่ 4.4 เช่นกัน พบว่าวิธีการเชื่อมขวางทางเคมีทำให้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิการเกิดผลึกลดลงมากกว่าวิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพ แสดงว่าวิธีการเชื่อมขวางทางเคมีช่วยเร่งการเกิดผลึกในพอลิแล็กติกแอซิดและเมื่อเปรียบเทียบผลของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันในพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวางสูงกว่าพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางและใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ดังนั้นการเชื่อมขวางเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสทำให้เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสมีโครงสร้างขนาดใหญ่ขึ้นทำให้พอลิแล็กติกแอซิดมีปริมาตรอิสระและสายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้อิสระมากขึ้น เหนี่ยวนำให้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่าย

ตารางที่ 4. 4 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกคอมพอสิต

Sample	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	X_C (%)
neat PLA	59.3	123.2	149.3	6.9	7.4
99:1PLA/MFC/PVA-P	58.2	119.7	146.9	23.3	25.1
97:3PLA/MFC/PVA-P	53.8	121.8	146.1	12.9	14.2
95:5PLA/MFC/PVA-P	54.0	114.5	146.8	17.7	19.9
99:1PLA/MFC/PVA-C	54.3	123.0	144.4	21.0	22.6
97:3PLA/MFC/PVA-C	51.9	116.3	139.6	21.2	23.3
95:5PLA/MFC/PVA-C	46.1	109.6	141.8	21.7	24.4
99:1PLA/MFC/PVA	58.2	117.8	146.6	18.3	19.7
97:3PLA/MFC/PVA	56.2	118.8	146.3	16.9	18.6
95:5PLA/MFC/PVA	55.8	120.3	145.8	23.3	26.2

*** ΔH°_m = 93.7 J/g (melt enthalpy for 100% crystallized PLA) [33]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดซึ่งใช้ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสจากซังข้าวโพดเป็นสารเสริมแรง โดยทำการศึกษาการเตรียมเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสและสมบัติของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีการเชื่อมขวางทางเคมีเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การเตรียมสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

สามารถเตรียมสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส โดยใช้สารละลายร้อยละ 5/15 โดยน้ำหนักโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย เป็นตัวทำละลายของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส ความเร็วรอบของการปั่นกวนความเร็วสูงเท่ากับ 10000 รอบต่อวินาทีและแช่แข็งสารละลายที่อุณหภูมิ -13 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง สำหรับการเตรียมสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

การเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูงของสารละลายไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสทำให้ลักษณะของเส้นใยไมโครไฟบริลเลแดตเซลลูโลสเปลี่ยนแปลงด้วย โดยเวลาการปั่นกวนความเร็วสูงที่ 20 นาที เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นเดี่ยว มีความยาวที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาการปั่นกวนที่ความเร็วสูงที่ 10, 30, 40 และ 50 นาที

5.1.2 เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี

เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพถูกเตรียมโดยใช้วิธี freeze/thaw กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมีถูกเตรียมโดยใช้อิพิคลอโรไฮดรินเป็นสารเชื่อมขวางกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเมื่อทำการเชื่อมขวางแล้ว เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสมีโครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดใหญ่ขึ้น เสถียรภาพทางความร้อนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง

5.1.3 ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส เส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี

จากการเปลี่ยนแปลงเวลาการปั่นกวนความเร็วสูงของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เวลา 20 นาที ส่งผลให้ความทนแรงดึง การยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและทางเคมีเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ดังนั้นเวลาการปั่นกวนความเร็วสูงที่ 20 นาทีจึงเหมาะสมที่สุดในการเตรียมเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส

การเติมเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้ความทนแรงดึง การยืด ณ จุดขาดและมอดุลัสของยังของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวาง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสทั้งที่เชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวาง (ร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก) ความทนแรงดึง การยืด ณ จุดขาดและมอดุลัลส ของยังลดลง ดังนั้นปริมาณเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลแก่ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดได้

วิธีการเชื่อมขวางเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสด้วยวิธีทางเคมีส่งผลให้ความทนแรงดึง การยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตสูงที่สุด เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพและเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่ไม่เชื่อมขวางในอัตราส่วนของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสเท่ากัน

การเสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสทั้งที่เชื่อมขวางและไม่เชื่อมขวางในทุกอัตราส่วน ไม่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดได้

ดังนั้นการเติมเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดได้เท่านั้นและการเชื่อมขวางเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสด้วยวิธีทางเคมีทำให้ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการหล่อแบบด้วยตัวทำละลายในการขึ้นรูปชิ้นงานฟิล์ม ดังนั้นควรใช้เทคนิคการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคอื่นๆ เพื่อให้สามารถนำฟิล์มไปใช้งานได้จริงในระดับอุตสาหกรรม

2. ศึกษาสารเสริมสภาพความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสกับพอลิแล็กติกแอซิดชนิดอื่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเข้ากัน การกระจายของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสในพอลิแล็กติกแอซิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

[1] พอลิเมอร์กับปัญหาสิ่งแวดล้อม 2011. Available from: http://xn--12cl6bpz6b9ayddw.com/polymer-environment/

[2] วิชาการดอทคอม. พลาสติกย่อยสลายได้ อดีต ปัจจุบัน อนาคต 2008. Available from: http://www.vcharkarn.com/varticle/38245

[3] สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. พลาสติกย่อยสลายได้...นวัตกรรมเพื่อโลก Available from: http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/39.pdf

[4] อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล. พอลิแลกติกแอซิด พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้ Available from: http://www.eng.ku.ac.th/e-journal_th/download.php?name=BGHaDcHMon24703.pdf&file_basename=99-110%20%CD%C1%C3%C3%D1%B5%B9%EC.pdf

[5] Lipsa, R., Tudorachi, N., and Vasile, C. Poly(vinyl alcohol)/Poly(lactic acid) blends biodegradable films doped with colloidal silver. Revue Roumaine de Chimie 53(5) (2008): 405-413.

[6] วชิระ ยมาภัย, ปรานี ชาวกล้า, นัฐกานต์ ไตรอุโฆษ, and วัชรพล วงษ์ธนเจริญ. พลาสติก PLA (Polylactic acid) 2012. Available from: https://enchemcom1po.wordpress.com/bioplastics%E0%B9%84%E0%B8%9A%E0%B9%82%E0%B8%AD%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%81/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%81-pla-polylactic-acid/

[7] รัฐพล รังกุพันธุ์. พอลิเมอร์แล็กติกแอซิด พอมิเมอร์ม้าขาวสำหรับสิ่งแวดล้อม 2005. Available from: http://www.material.chula.ac.th/RADIO48/November/radio11-2.htm

[8] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด 2009. Available from: http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/images/%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8%A2%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B8%AA%E0%B8%B4%E0%B8%97%E0%B8%98%E0%B8%B4%E0%B8%9A%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B

8%A3%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%A2%E0%B8%A7%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%9E%E0%B8%B1%E0%B8%92%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B8%9A%E0%B8%A3%E0%B8%A3%E0%B8%88%E0%B8%B8%E0%B8%A0%E0%B8%B1%E0%B8%93%E0%B8%91%E0%B9%8C%E0%B8%88%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%8A%E0%B8%B5%E0%B8%A7%E0%B8%A0%E0%B8%B2%E0%B8%9E%E0%B8%8A%E0%B8%99%E0%B8%B4%E0%B8%94%20PLA.pdf

[9] Nakagaito, A.N., Fujimura, A., Sakai, T., Hama, Y., and Yano, H. Production of microfibrillated cellulose (MFC)-reinforced polylactic acid (PLA) nanocomposites from sheets obtained by a papermaking-like process. Composites Science and Technology 69(7-8) (2009): 1293-1297.

[10] ชุติมา ว่องไววัฒนกุล. สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซักซิเนต/ผงไม้ที่แตกสลายทางชีวภาพได้. ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2014.

[11] Ren, J. Application in the Field of Commodity and Industry Product in Biodegradable Poly(Lactic Acid): Synthesis, Modification,Processing and Applications, pp. 208-210: Springer Dordrecht Heidelberg London New York.

[12] เวสเซิลเคมีคอล. พอลิไวนิลแอลกฮอล์/พีวีเอ (Polyvinyl alcohol/PVA) Available from: http://www.vessel-chemical.com/Default.aspx?pageid=25

[13] Polyvinyl Alcohol Structural Formula 2015. Available from: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fc/Polyvinyl_Alcohol_Structural_Formula_V1.svg/2000px-Polyvinyl_Alcohol_Structural_Formula_V1.svg.png

[14] Haweel, C.K. and Ammar, S.H. Preparation of Polyvinyl Alcohol from Local Raw Material. Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering 9(1) (2008): 15-21.

[15] Hanwaycompany. Polyvinyl alcohol 2015. Available from: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:b22Anhj-0NIJ:www.hanwaycompany.com/pvaen.htm+&cd=4&hl=th&ct=clnk&gl=th

[16] Uniontoy (Thailand). สัญลักษณ์ ตัวย่อ การเลือกใช้และคุณสมบัติเบื้องต้นของพลาสติกแต่ละประเภท 2011. Available from: http://www.uniontoy.com/index.php?page=&mo=3&art=41901364&pb=4

[17] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. วัสดุที่เรียกว่าคอมโพสิต (composites) 2013. Available from: https://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-10-29-04-40-02/169-%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%AA%E0%B8%94%E0%B8%B8%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%81%E0%B8%A7%E0%B9%88%E0%B8%B2-%E0%B8%84%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B9%82%E0%B8%9E%E0%B8%AA%E0%B8%B4%E0%B8%95-composites-%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%A7%E0%B8%B1%E0%B8%AA%E0%B8%94%E0%B8%B8%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%A0%E0%B8%97%E0%B9%83%E0%B8%94

[18] อรอุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2003.

[19] วันดี ธรรมจารี. วัสดุผสมชีวภาพ (biocomposites) 2013. Available from: http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn228B_p034-37.pdf

[20] Abdul Khalil, H.P.S., Bhat, A.H., and Ireana Yusra, A.F. Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. Carbohydrate Polymers 87(2) (2012): 963-979.

[21] ภัทราวุธ มนต์วิเศษ. เซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลส. เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer). กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2010.

[22] New cellulose derivatives Available from: http://www.helsinki.fi/polymeerikemia/research/cellulose1.html

[23] Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A., and Bras, J. Microfibrillated cellulose – Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. Carbohydrate Polymers 90(2) (2012): 735-764.

[24] Arias, A., Heuzey, M.-C., Huneault, M., Ausias, G., and Bendahou, A. Enhanced dispersion of cellulose nanocrystals in melt-processed polylactide-based nanocomposites. 22(1) (2015).

[25] Hassan, C.M. and Peppas, N.A. Structure and Applications of Poly(vinyl alcohol) Hydrogel Produced by Coventional Crosslinking or by Freezing/Thawing Methods. Advances in Polymer Science 153 (2000): 38-62.

[26] Maitra, J. and Shukla, V.K. Cross-linking in Hydrogels - A Review. American Journal of Polymer Science 4(2) (2014): 25-31.

[27] Shogren, R.L., Peterson, S.C., Evans, K.O., and Kenar, J.A. Preparation and characterization of cellulose gels from corn cobs. Carbohydrate Polymers 86(3) (2011): 1351-1357.

[28] Siró, I., Plackett, D., Hedenqvist, M., Ankerfors, M., and Lindström, T. Highly transparent films from carboxymethylated microfibrillated cellulose: The effect of multiple homogenization steps on key properties. Journal of Applied Polymer Science 119(5) (2011): 2652-2660.

[29] Chang, C., Lue, A., and Zhang, L. Effects of crosslinking methods on structure and properties of cellulose/PVA hydrogels. Macromolecular Chemistry and Physics 209(12) (2008): 1266-1273.

[30] Abdulkhani, A., Hosseinzadeh, J., Ashori, A., Dadashi, S., and Takzare, Z. Preparation and characterization of modified cellulose nanofibers reinforced polylactic acid nanocomposite. Polymer Testing 35 (2014): 73-79.

[31] Haafiz, M.K.M., Hassan, A., Zakaria, Z., Inuwa, I.M., Islam, M.S., and Jawaid, M. Properties of polylactic acid composites reinforced with oil palm biomass microcrystalline cellulose. Carbohydrate Polymers 98(1) (2013): 139-145.

[32] United Scientific. IKA Lab Dispersersing Devices Available from: http://www.unitedscientific.co.za/index.php/ika-laboratory-equipment/dispersing-devices

[33] สุภาวิณี เสรีลัดดานนท์. การเตรียมและสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กทิกแอซิด/พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเสริมแรงด้วยซิลิกา. ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2013.

[34] Mettler Toledo TGA/SDTA 851e. (UAM) Available from: http://www.madrimasd.org/programas/image/image_gallery?uuid=a951acc8-a20f-47cd-a948-6785d5f4eb24&groupId=58714&t=1328737402751

[35] JEOL USA, I. JEOL Scanning Electron Microscope Offers Versatile Through-the-Lens System for Ultrahigh Resolution 2010. Available from: http://www.jeolusa.com/Portals/2/Press/JSM-7001FTTLS-LV.jpg

[36] Ren, L.Z., Ren, P.G., Zhang, X.L., Sun, Z.F., and Zhang, Y. Preparation and mechanical properties of regenerated cellulose/poly(vinyl-alcohol) physical composite hydrogel. Composite Interfaces 21(9) (2014): 853-867.

[37] Garside, P. and Wyeth, P. Identification of cellulosic fibres by FTIR spectroscopy - Differentiation of flax and hemp by polarized ATR FTIR. Studies in Conservation 51(3) (2006): 205-211.

[38] Kaco, H., Zakaria, S., Razali, N.F., Chia, C.H., Zhang, L., and Jani, S.M. Properties of Cellulose Hydrogel from Kenaf Core Prepared via Pre-cooled Dissolving Method. Sains Malaysiana 43(8) (2014): 1221-1229.

[39] Jonoobi, M., Harun, J., Mathew, A.P., and Oksman, K. Mechanical properties of cellulose nanofiber (CNF) reinforced polylactic acid (PLA) prepared by twin screw extrusion. Composites Science and Technology 70(12) (2010): 1742-1747.

[40] Liu, X.X., Wang, T.X., Chow, L.C., Yang, M.S., and Mitchell, J.W. Effects of Inorganic Fillers on the Thermal and Mechanical Properties of Poly(lactic acid). International Journal of Polymer Science (2014): 8.

[41] Suryanegara, L., Nakagaito, A.N., and Yano, H. The effect of crystallization of PLA on the thermal and mechanical properties of microfibrillated cellulose-reinforced PLA composites. Composites Science and Technology 69(7-8) (2009): 1187-1192.

[42] Kim, K.-W., Lee, B.-H., Kim, H.-J., Sriroth, K., and Dorgan, J.R. Thermal and mechanical properties of cassava and pineapple flours-filled PLA bio-

composites. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 108(3) (2011): 1131-1139.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

สมบัติเชิงกล

ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด

ตารางที่ ก - 1 ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	20.1	711.3	12.31
2	21.7	723.7	18.9
3	20.5	739.8	19.5
4	21.5	786.8	14.2
ค่าเฉลี่ย	20.2	740.4	16.2
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.4	53.7	3.5

ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ตารางที่ ก - 2 99:1PLA/MFC/PVA-10P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	16.8	1376.1	12.8
2	17.5	1822.6	27.9
3	16.4	1089.5	26.8
4	17.0	1085.1	27.0
ค่าเฉลี่ย	17.0	1343.3	23.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.5	347.3	2.6

ตารางที่ ก - 3 97:3PLA/MFC/PVA-10P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	13.9	1382.0	17.0
2	14.5	1002.1	16.6
3	16.0	1390.4	15.9
4	12.0	1031.9	17.9
ค่าเฉลี่ย	14.1	1201.6	17.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.6	213.5	17.3

ตารางที่ ก - 4 95:5PLA/MFC/PVA-10P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	13.4	550.8	12.5
2	9.7	514.1	12.5
3	11.9	562.0	18.5
4	11.2	400.0	15.7
ค่าเฉลี่ย	11.5	506.7	17.3
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.5	74.0	6.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก - 5 99:1PLA/MFC/PVA-20P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	24.7	618.2	17.5
2	23.6	894.3	13.7
3	24.0	786.2	11.5
4	21.7	785.5	13.7
ค่าเฉลี่ย	23.5	771.0	14.1
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.3	114.0	2.5

ตารางที่ ก - 6 97:3PLA/MFC/PVA-20P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	13.5	558.2	14.3
2	13.1	501.6	13.9
3	14.1	573.2	14.1
4	13.3	625.3	14.9
ค่าเฉลี่ย	13.0	564.6	14.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.0	50.9	2.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก - 7 95:5PLA/MFC/PVA-20P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	9.0	349.9	15.7
2	10.0	303.3	19.8
3	9.5	363.5	11.7
4	9.4	298.7	15.7
ค่าเฉลี่ย	9.5	328.9	14.1
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	0.4	32.7	2.9

ตารางที่ ก - 8 99:1PLA/MFC/PVA-30P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	15.5	583.3	14.2
2	16.0	669.0	12.9
3	18.7	558.4	16.3
4	20.8	498.0	16.6
ค่าเฉลี่ย	17.8	577.2	15.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	2.5	71.0	1.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก - 9 97:3PLA/MFC/PVA-30P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	16.9	528.1	15.5
2	16.6	586.1	11.9
3	16.8	607.2	15.4
4	15.0	409.1	11.4
ค่าเฉลี่ย	16.3	532.6	13.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	0.9	88.9	2.2

ตารางที่ ก - 10 95:5PLA/MFC/PVA-30P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	12.0	388.8	11.8
2	9.9	358.6	11.5
3	12.2	403.9	11.3
4	9.6	328.7	15.1
ค่าเฉลี่ย	10.9	370.0	12.4
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.4	33.4	1.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก - 11 99:1PLA/MFC/PVA-40P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	17.3	440.2	19.2
2	15.1	488.2	20.4
3	14.3	595.2	22.1
4	16.1	527.0	21.5
ค่าเฉลี่ย	15.7	512.7	20.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.3	65.5	1.3

ตารางที่ ก - 12 97:3PLA/MFC/PVA-40P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	11.6	361.0	10.2
2	11.2	339.3	12.0
3	13.0	310.1	9.4
4	12.1	325.9	10.4
ค่าเฉลี่ย	12.0	334.8	10.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	0.8	21.6	1.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก - 13 95:5PLA/MFC/PVA-40P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	8.9	308.8	9.5
2	11.0	328.3	8.8
3	11.4	334.0	9.4
4	11.8	316.0	4.3
ค่าเฉลี่ย	10.8	321.8	9.3
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.3	11.4	3.7

ตารางที่ ก - 14 99:1PLA/MFC/PVA-50P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	16.3	809.3	15.5
2	16.4	792.3	12.7
3	14.3	1051.7	15.5
4	14.5	969.5	13.4
ค่าเฉลี่ย	15.4	860.2	15.1
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.1	149.1	2.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก - 15 97:3PLA/MFC/PVA-50P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	12.6	611.5	13.4
2	13.0	1227.7	9.1
3	14.9	1241.8	13.3
4	13.7	289.3	13.0
ค่าเฉลี่ย	13.0	842.6	13.7
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.4	513.3	3.0

ตารางที่ ก - 16 95:5PLA/MFC/PVA-50P

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	9.5	766.9	6.5
2	11.1	865.4	12.1
3	9.7	696.6	10.4
4	11.0	707.2	10.3
ค่าเฉลี่ย	10.0	703.1	10.1
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.0	141.9	3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ตารางที่ ก - 17 99:1PLA/MFC/PVA-10C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	15.8	1294.8	26.1
2	15.0	1123.2	26.9
3	17.6	1192.1	28.0
4	16.2	1443.7	25.5
ค่าเฉลี่ย	16.2	1263.4	27.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.1	139.3	2.4

ตารางที่ ก - 18 97:3PLA/MFC/PVA-10C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	14.6	1126.7	17.6
2	13.9	1324.1	21.9
3	10.5	1253.8	20.8
4	13.5	922.6	21.5
ค่าเฉลี่ย	13.3	1156.8	21.4
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	2.4	176.2	2.1

ตารางที่ ก - 19 95:5PLA/MFC/PVA-10C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	15.3	1066.0	4.7
2	15.8	1057.5	7.1
3	16.5	1060.3	6.9
4	15.1	1053.3	7.1
ค่าเฉลี่ย	15.9	1059.3	7.3
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.1	5.3	5.4

ตารางที่ ก - 20 99:1PLA/MFC/PVA-20C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	25.5	617.7	32.3
2	27.4	778.7	34.3
3	27.44	969.8	33.7
4	24.3	832.0	33.8
ค่าเฉลี่ย	26.1	799.6	33.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.5	145.6	0.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก - 21 97:3PLA/MFC/PVA-20C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	15.5	602.8	21.9
2	14.2	639.1	17.1
3	14.3	629.0	17.7
5	16.4	639.8	21.5
ค่าเฉลี่ย	15.1	627.7	19.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.1	17.3	2.5

ตารางที่ ก - 22 95:5PLA/MFC/PVA-20C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	15.2	489.4	17.0
2	15.4	489.4	16.0
3	12.5	487.9	13.1
4	13.5	449.5	13.1
ค่าเฉลี่ย	14.1	479.1	14.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.4	19.7	2.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก - 23 99:1PLA/MFC/PVA-30C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	19.3	1156.4	5.2
2	20.9	1215.8	6.0
3	22.4	1135.3	6.7
4	17.5	1277.3	5.1
ค่าเฉลี่ย	20.0	1196.2	5.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	2.1	63.9	0.8

ตารางที่ ก - 24 97:3PLA/MFC/PVA-30C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	15.3	835.9	6.0
2	14.2	857.6	4.7
3	12.5	856.6	4.3
4	12.1	842.0	4.2
ค่าเฉลี่ย	13.5	848.0	4.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.5	10.8	0.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก - 25 95:5PLA/MFC/PVA-30C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	13.8	835.9	4.8
2	13.0	857.6	3.3
3	12.8	856.6	4.0
4	12.2	842.0	5.4
ค่าเฉลี่ย	13.0	848.0	4.4
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.7	10.8	0.9

ตารางที่ ก - 26 99:1PLA/MFC/PVA-40C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	19.3	931.9	18.1
2	17.7	926.0	18.3
3	15.6	959.6	17.9
4	16.2	981.6	12.6
ค่าเฉลี่ย	17.2	949.8	16.7
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.7	25.8	2.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก - 27 97:3PLA/MFC/PVA-40C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	14.3	923.6	6.3
2	17.0	812.0	9.0
3	16.3	818.3	11.2
4	17.0	895.3	8.8
ค่าเฉลี่ย	16.1	862.3	8.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.3	55.7	2.0

ตารางที่ ก - 28 95:5PLA/MFC/PVA-40C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	8.4	641.8	2.8
2	7.7	686.7	1.8
3	10.0	644.2	4.9
4	5.7	660.2	1.5
ค่าเฉลี่ย	8.0	658.2	2.8
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.8	20.7	1.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก - 29 99:1PLA/MFC/PVA-50C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	20.2	828.8	13.1
2	21.5	974.8	16.9
3	24.1	967.5	15.4
4	24.1	1125.7	21.0
ค่าเฉลี่ย	22.5	974.2	16.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.9	121.3	3.3

ตารางที่ ก - 30 97:3PLA/MFC/PVA-50C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	24.0	550.8	14.8
2	19.6	464.7	13.4
3	18.7	564.9	15.7
4	12.8	479.9	14.6
ค่าเฉลี่ย	18.8	515.1	14.6
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	4.68	50.1	1.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก - 31 95:5PLA/MFC/PVA-50C

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	15.2	393.8	8.1
2	15.8	462.3	6.0
3	15.5	391.7	11.3
3	20.6	341.9	7.5
ค่าเฉลี่ย	16.8	397.5	8.2
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	2.5	49.5	2.2

ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด/ไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ตารางที่ ก - 32 99:1PLA/MFC/PVA-20

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	20.0	1267.2	7.7
2	21.9	1038.0	7.0
3	21.0	1303.4	7.4
4	21.9	1308.8	6.0
ค่าเฉลี่ย	21.2	1229.3	7.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	0.9	128.9	0.7

ตารางที่ ก - 33 97:3PLA/MFC/PVA-20

ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	16.6	1012.9	5.3
2	16.1	1048.9	4.9
3	17.2	1086.3	5.4
4	19.3	1115.4	6.0
ค่าเฉลี่ย	17.3	1065.9	5.4
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	1.4	44.6	0.5

ตารางที่ ก - 34 95:5PLA/MFC/PVA-20

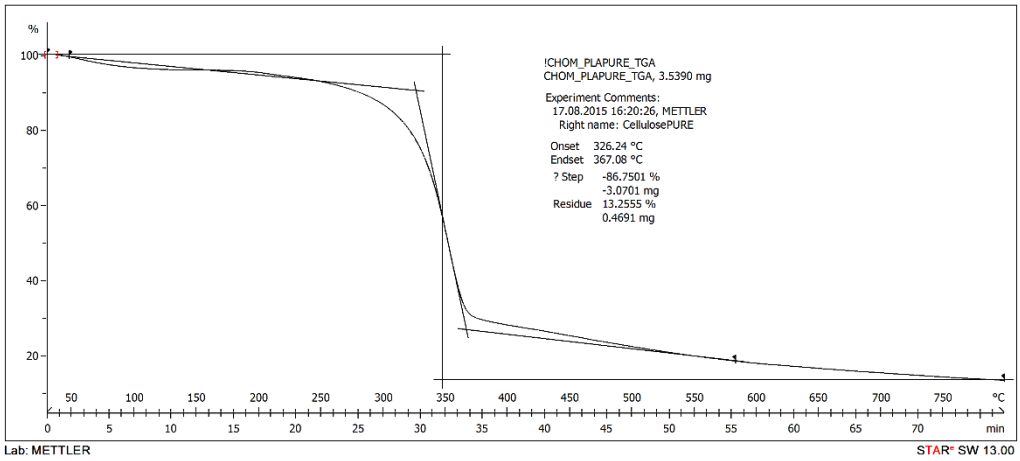
ลำดับ	ความทนแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความยืด ณ จุดขาด (%)
1	13.2	624.0	7.3
2	12.4	601.9	5.9
3	12.0	656.7	5.7
4	12.6	652.5	5.2
ค่าเฉลี่ย	12.6	633.8	6.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน	0.5	25.7	0.9

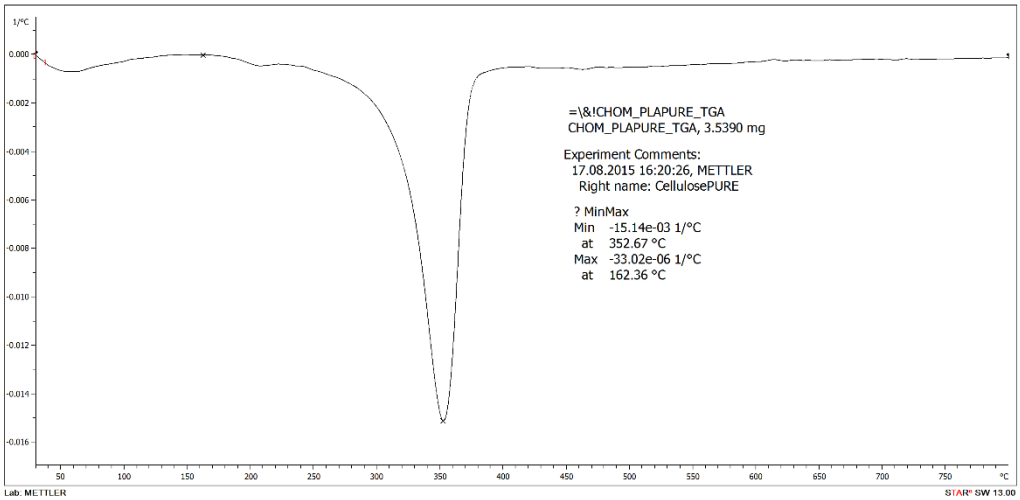
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข

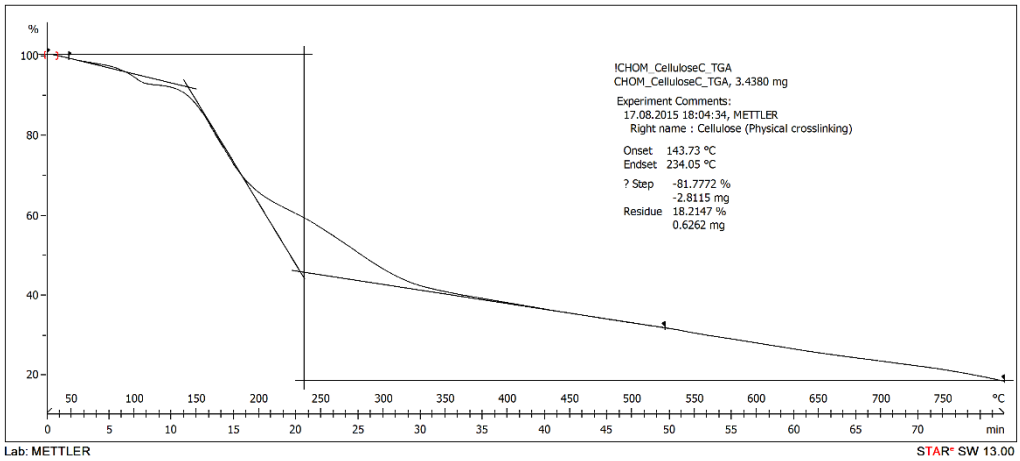
สมบัติทางความร้อน

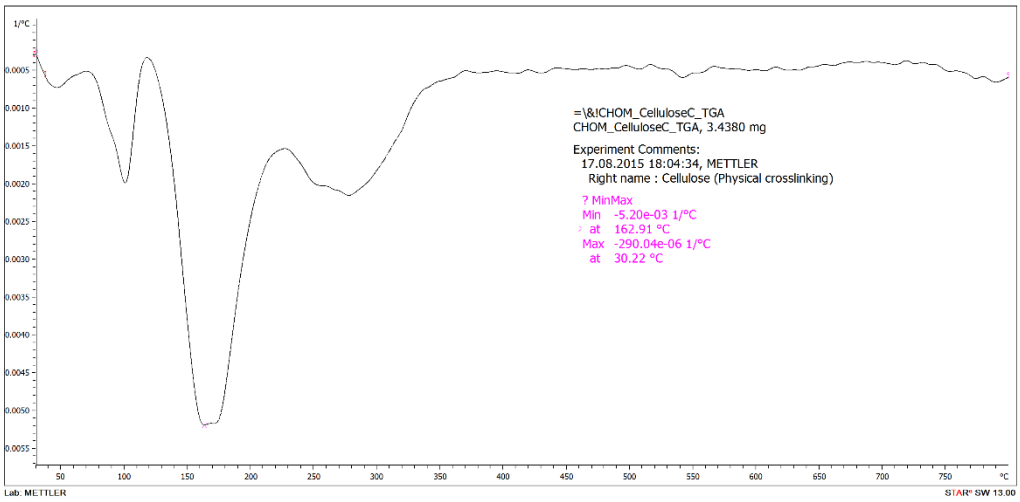
การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน



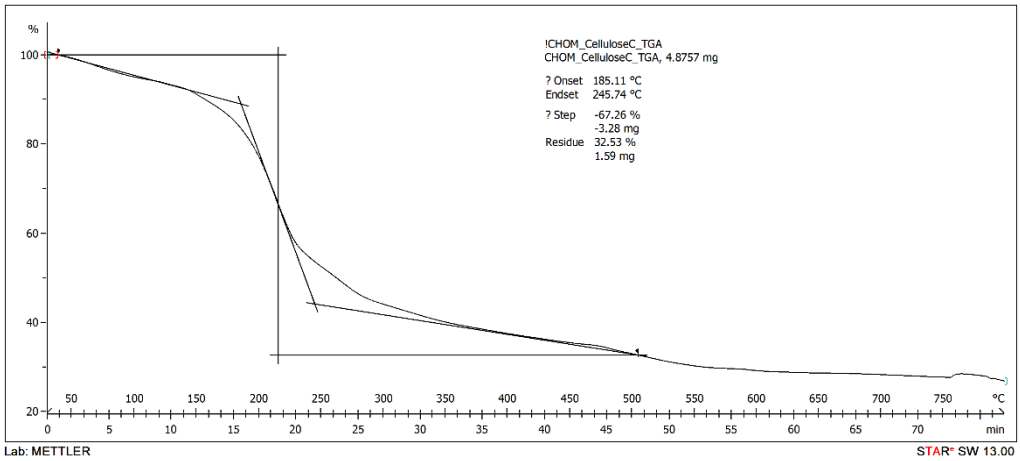


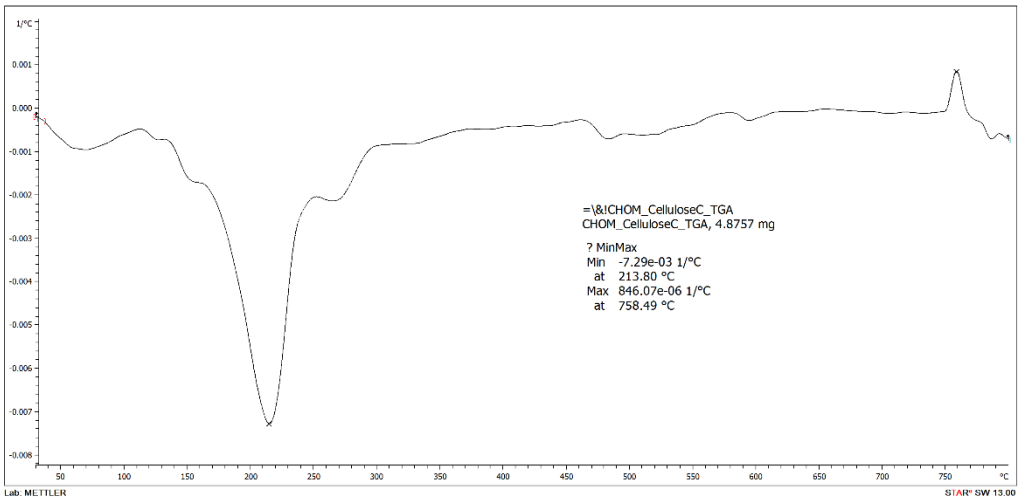
รูปที่ ข. 1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของเส้นใยเซลลูโลส



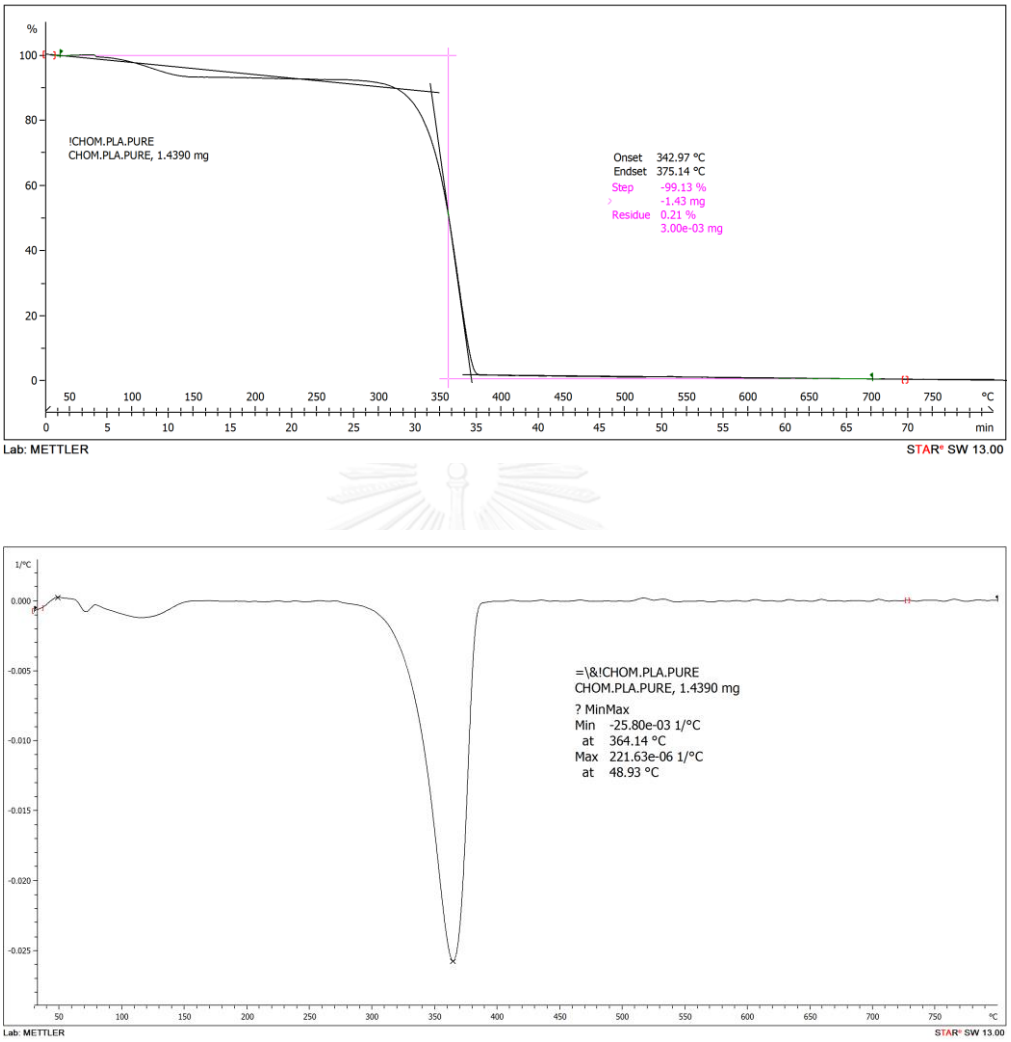


รูปที่ ข. 2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ



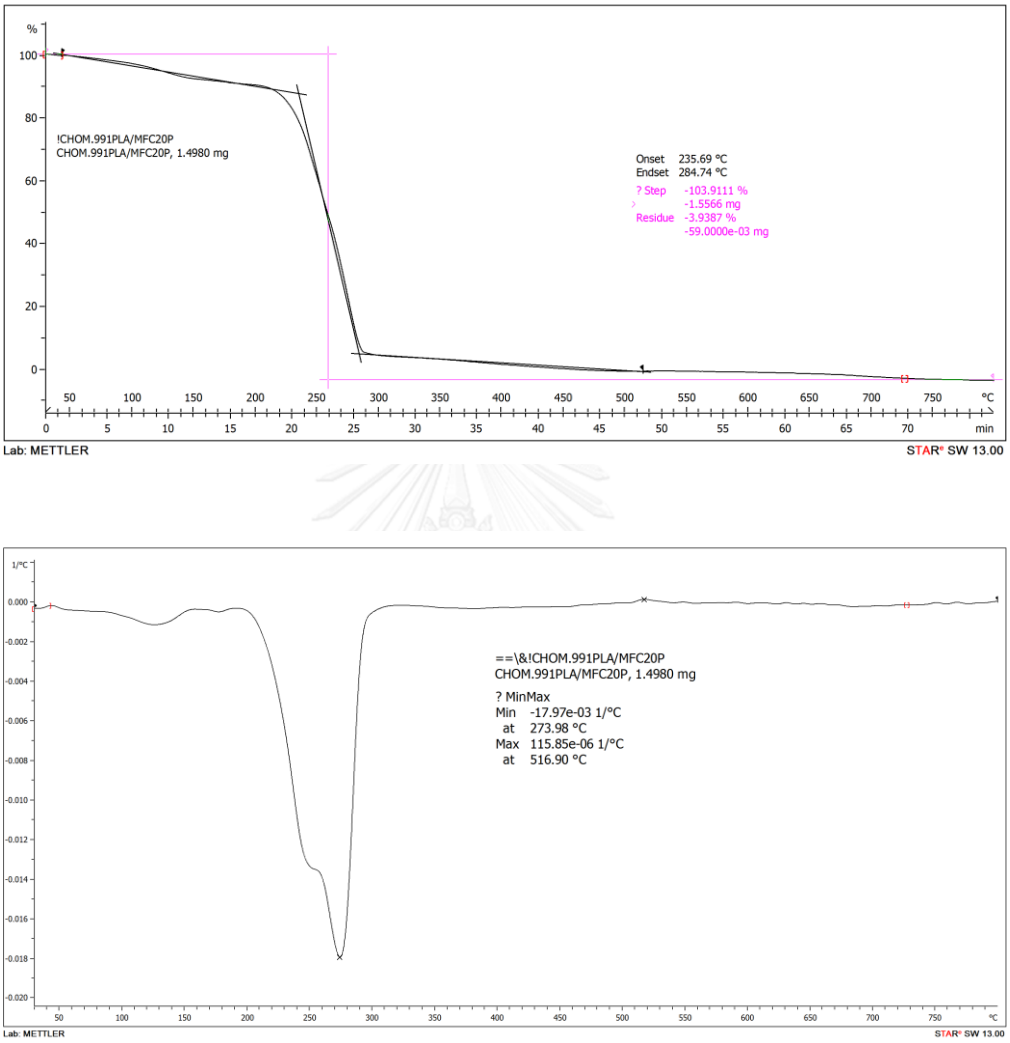


รูปที่ ข. 3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางทางเคมี

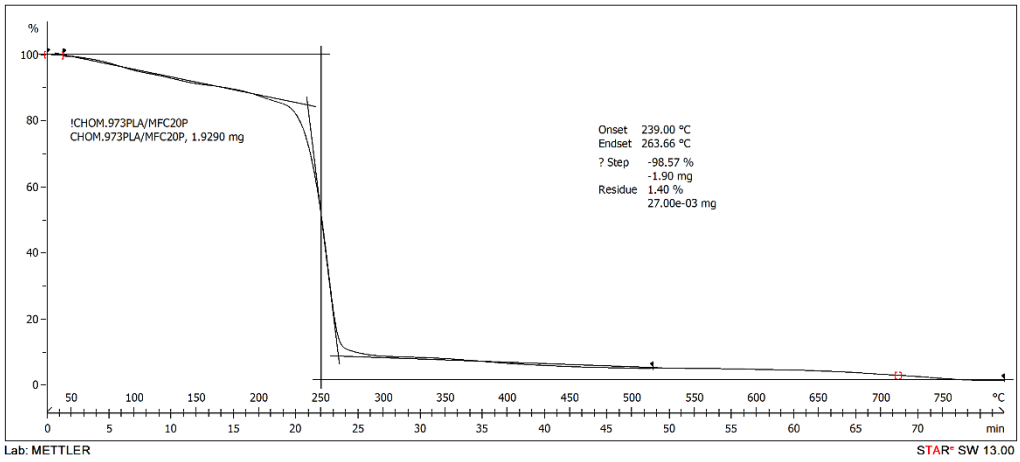


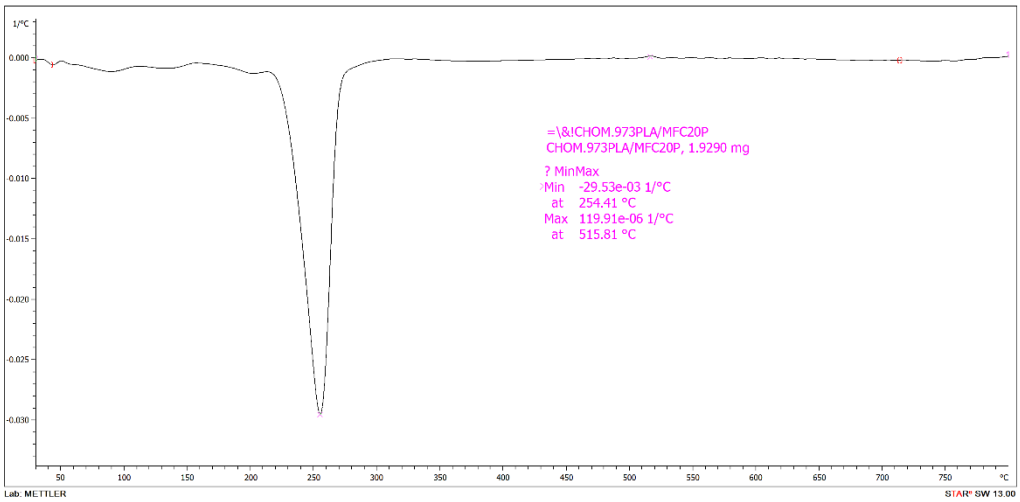
รูปที่ ข. 4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์

TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิแล็กติแอซิดคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางกายภาพ



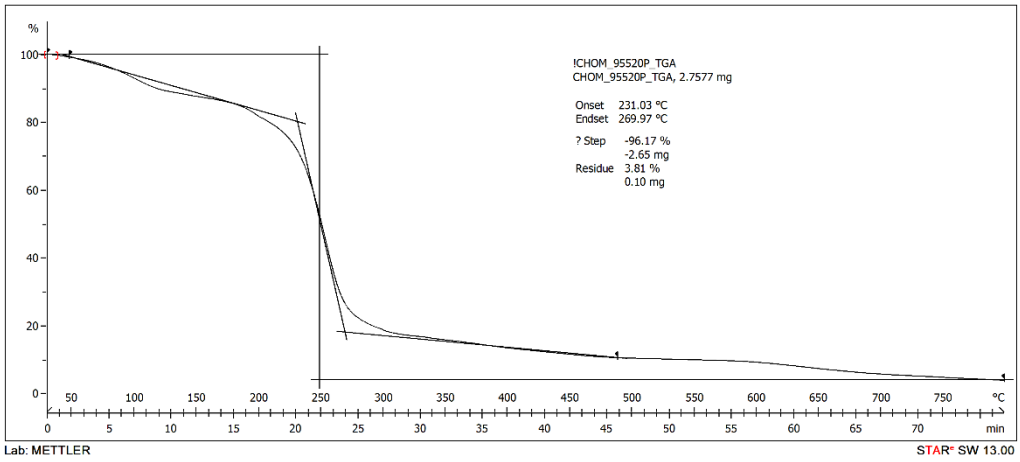
รูปที่ ข. 5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ 99:1 PLA/MFC/PVA-20P

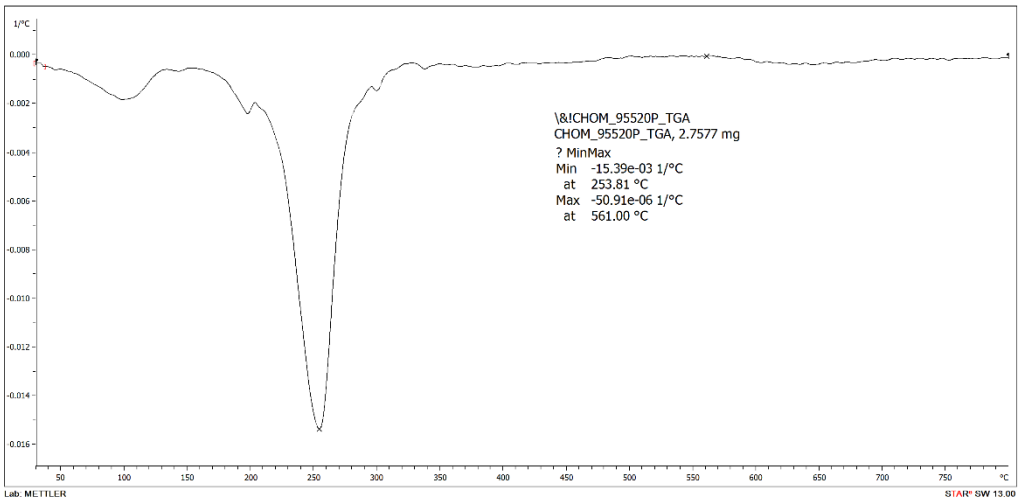




Chulalongkorn University

รูปที่ ข. 6 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ 97:3 PLA/MFC/PVA-20P

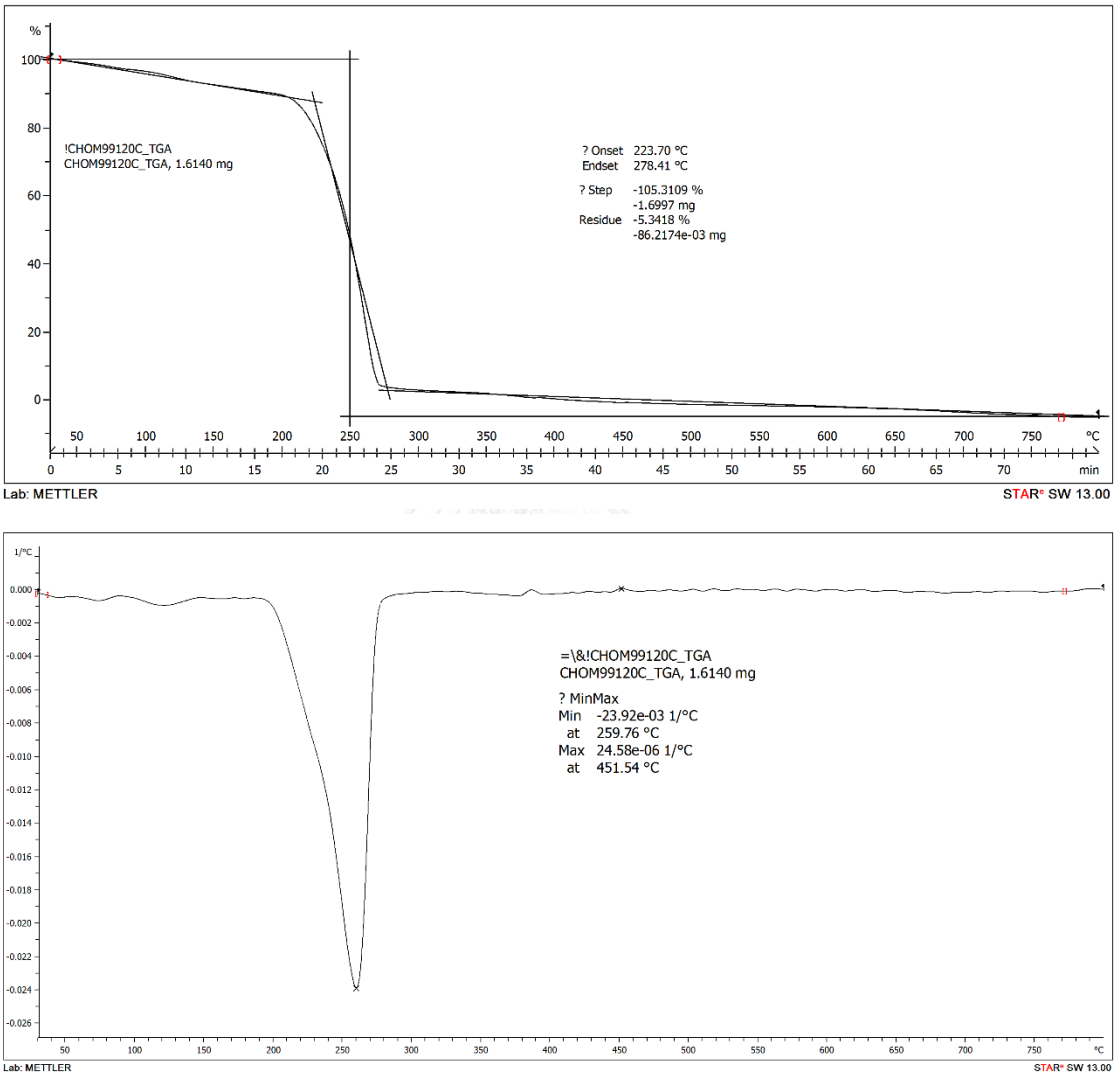




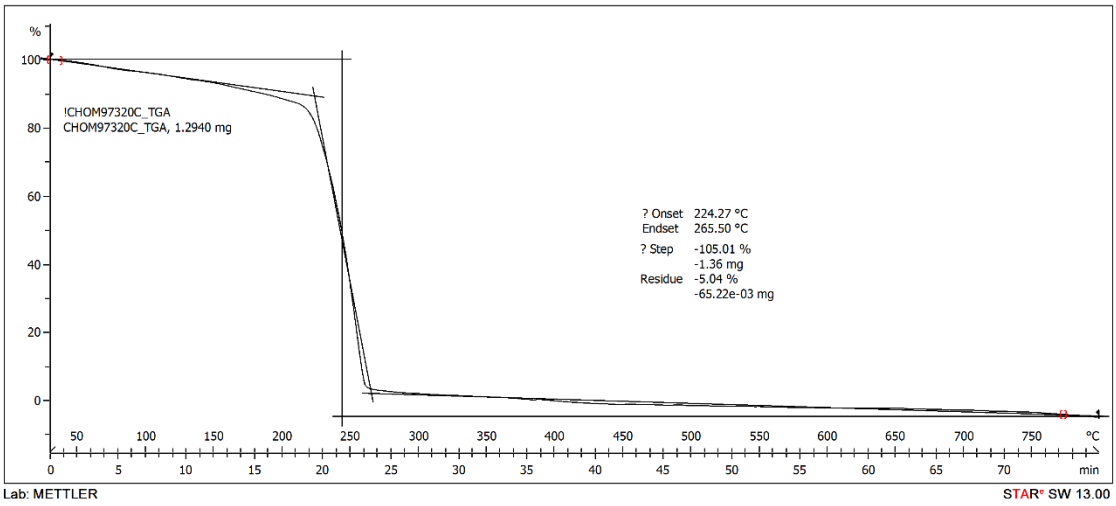
Chulalongkorn University

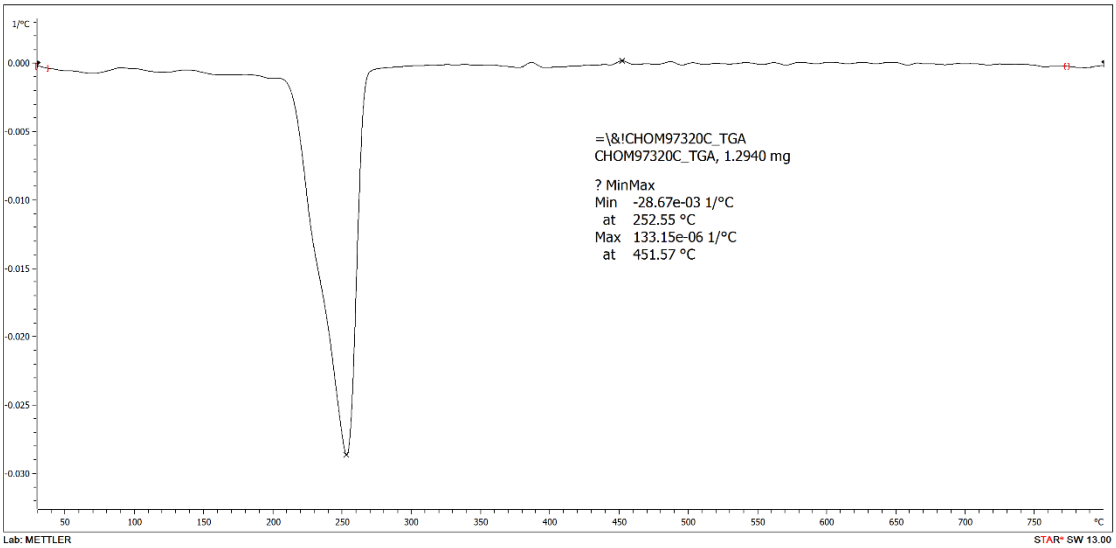
รูปที่ ข. 7 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ 95:5 PLA/MFC/PVA-20P

TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของฟิล์มพอลิแล็กติแอซิดคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไมโครไฟบริลเลเตดเซลลูโลสที่เชื่อมขวางทางเคมี

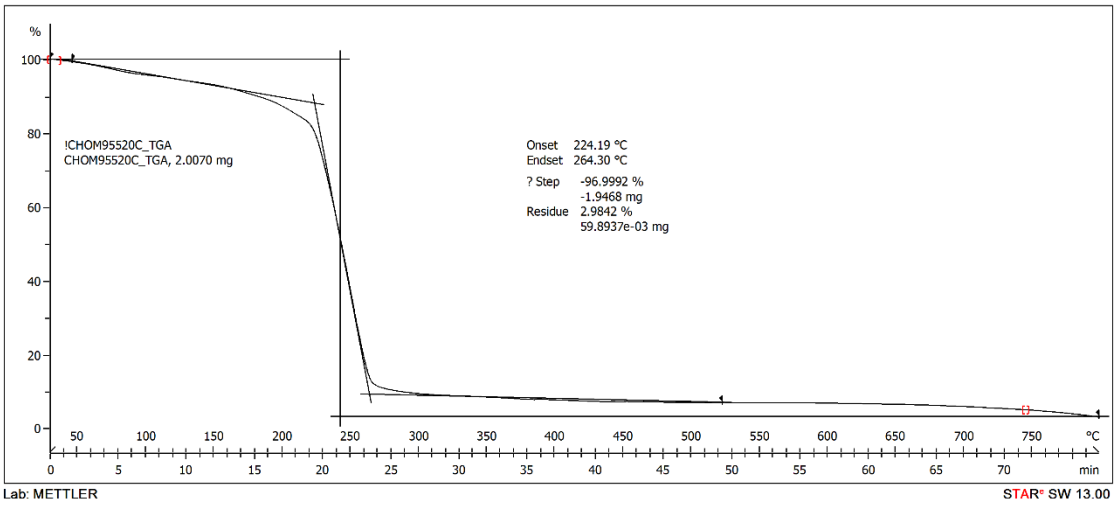


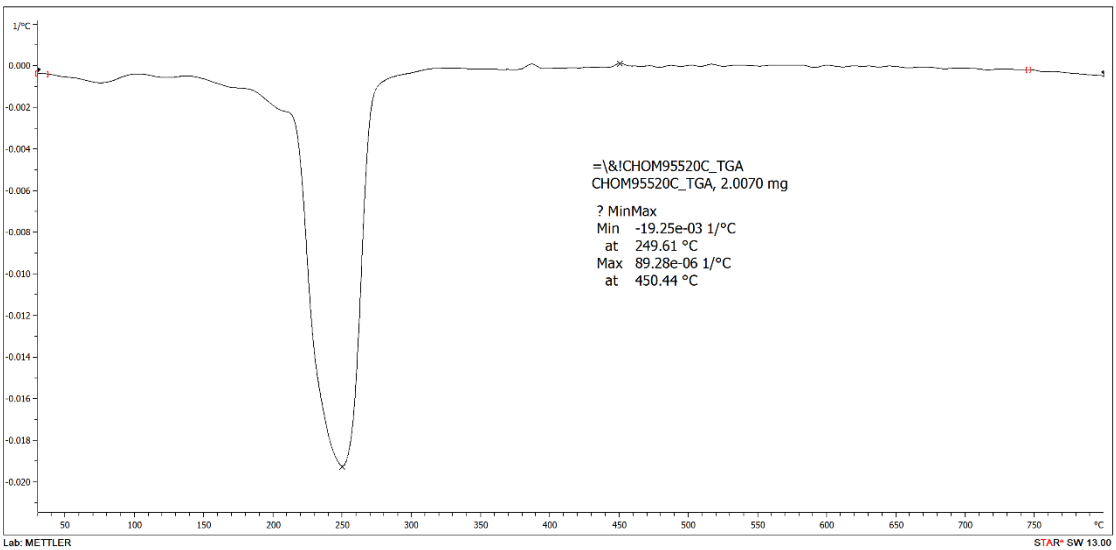
รูปที่ ข. 8 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ 99:1 PLA/MFC/PVA-20C



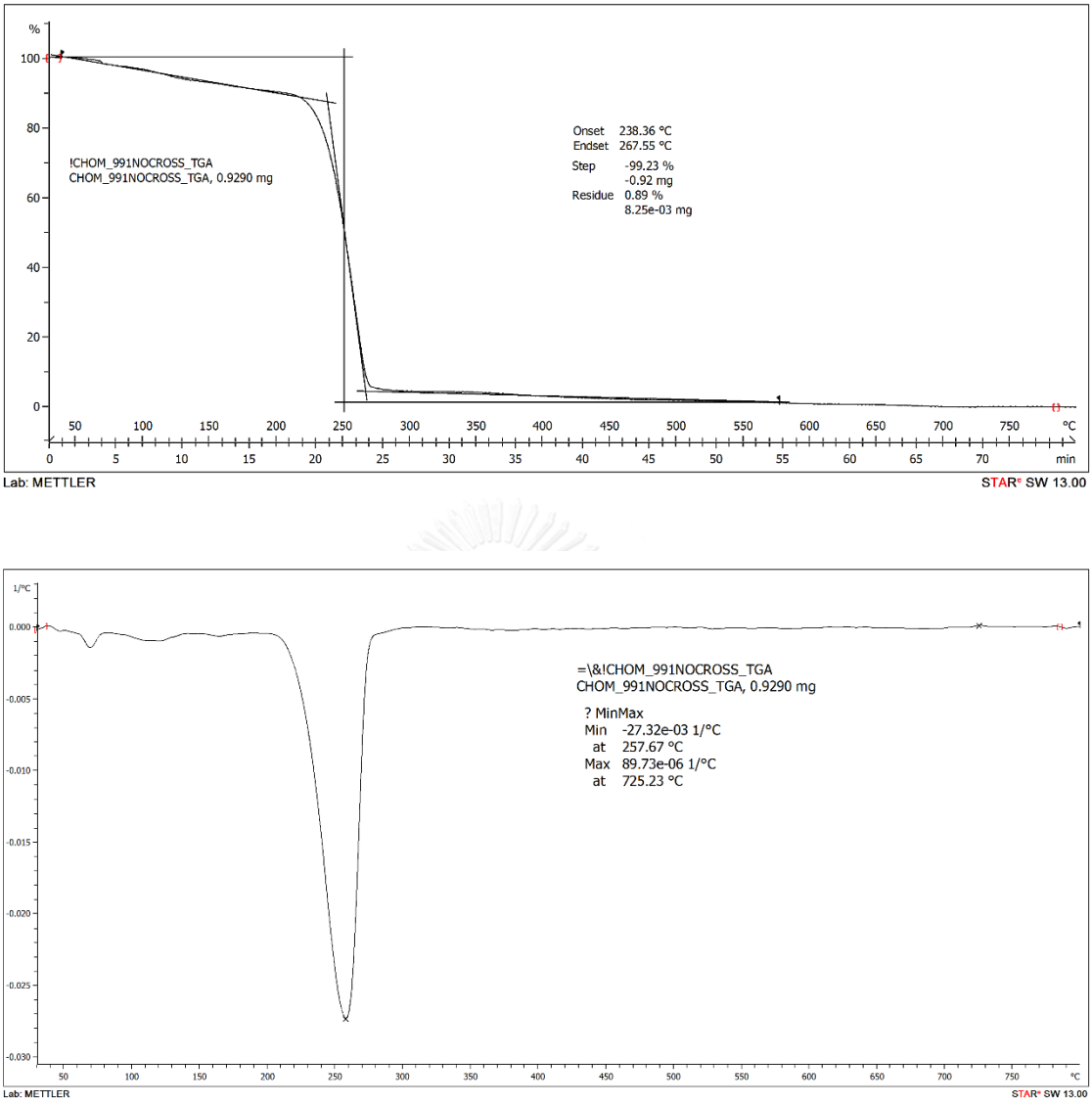


รูปที่ ข. 9 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ 97:3 PLA/MFC/PVA-20C

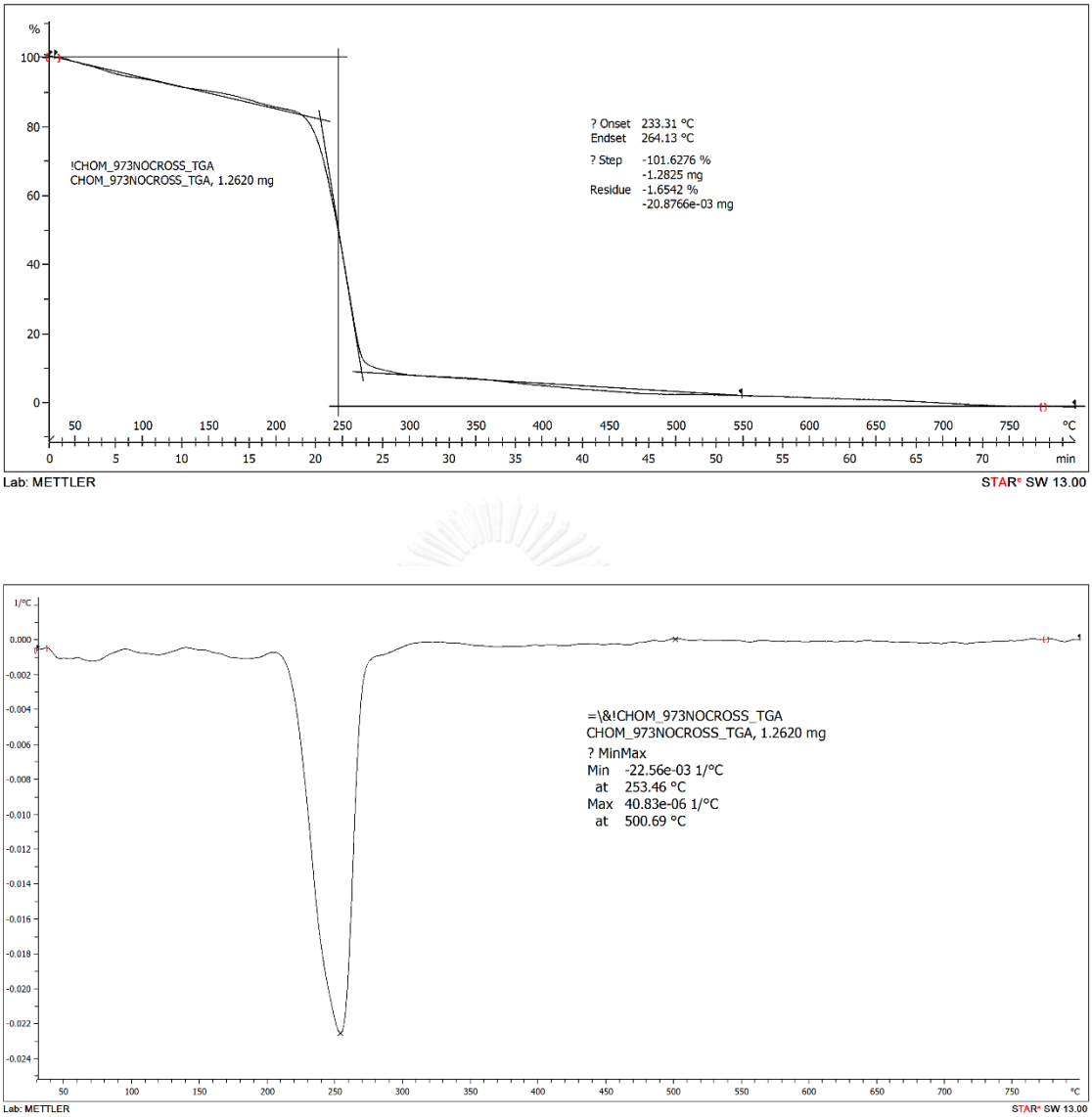




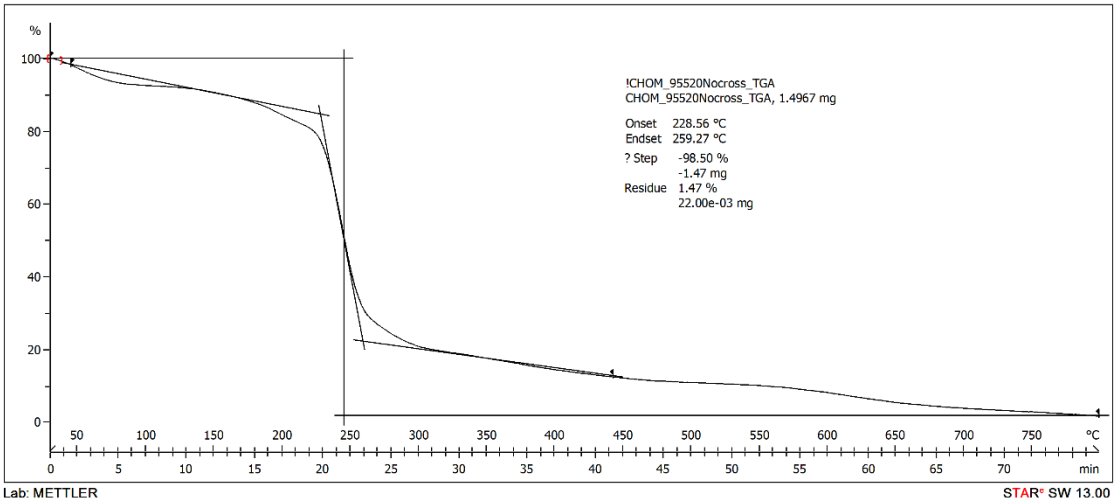
รูปที่ ข. 10 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ 95:5 PLA/MFC/PVA-20C

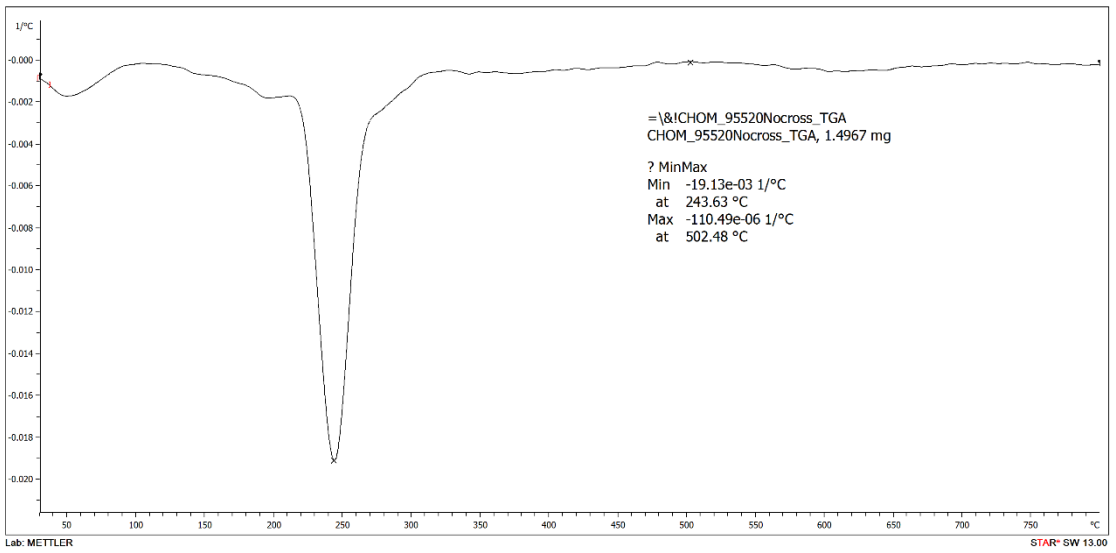


รูปที่ ข. 11 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ 99:1 PLA/MFC/PVA-20



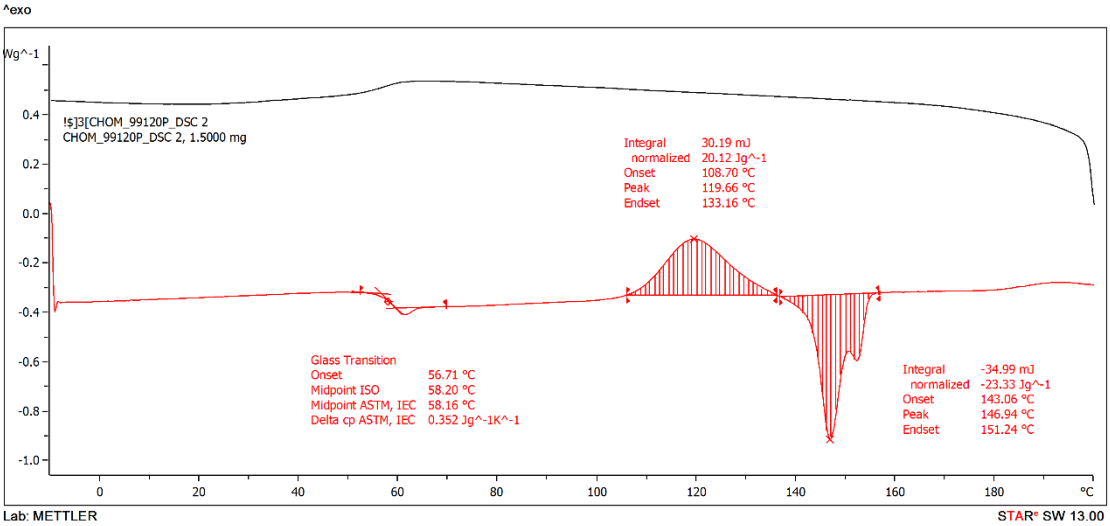
รูปที่ ข. 12 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ 97:3 PLA/MFC/PVA-20



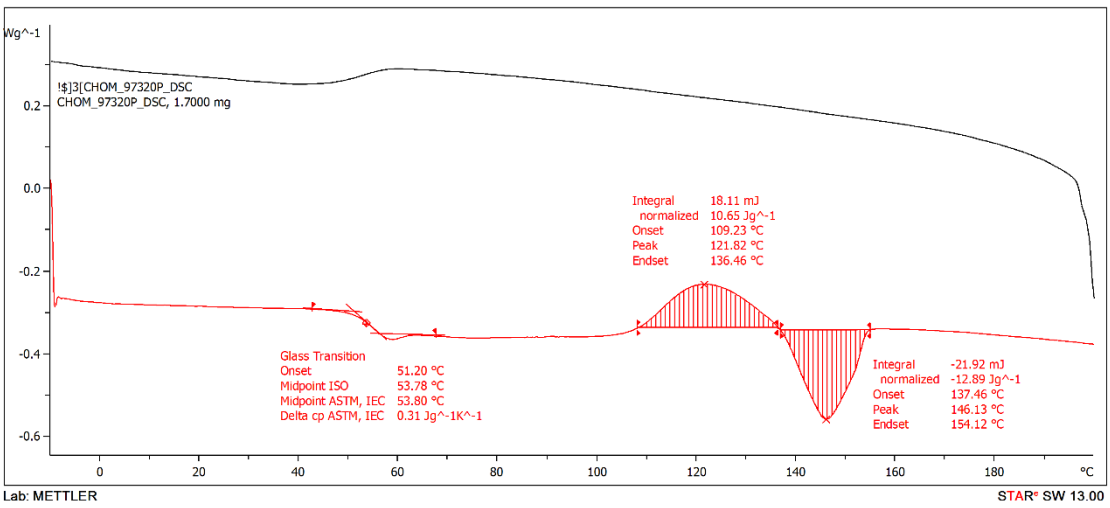


รูปที่ ข. 13 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ 95:5 PLA/MFC/PVA-20

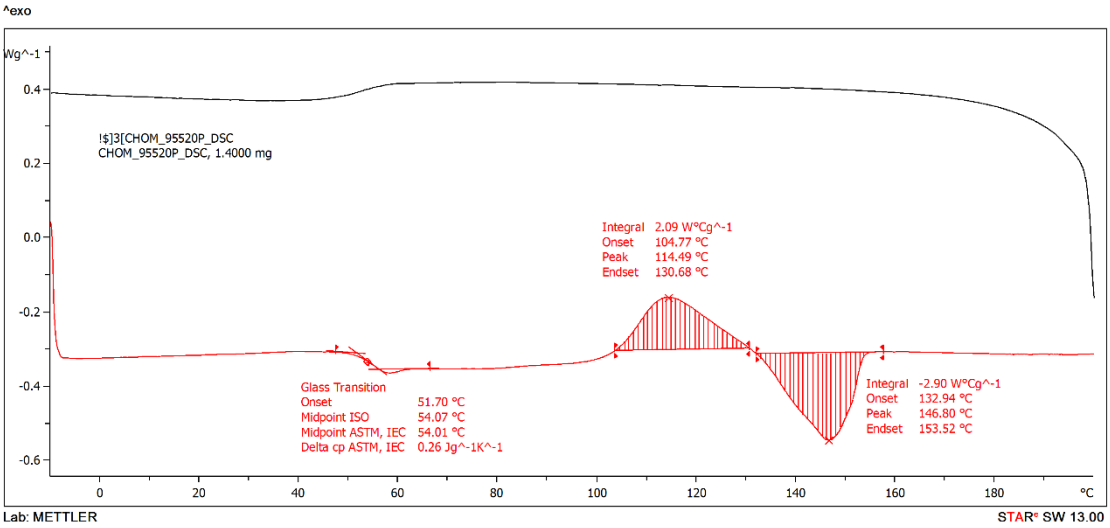
การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_{cc})



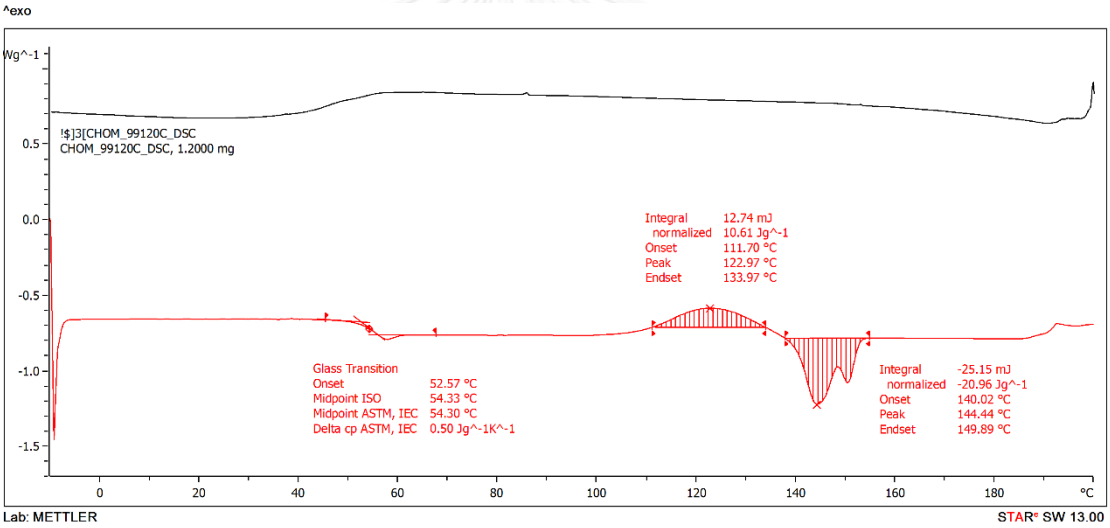
รูปที่ ข. 14 DSC เทอร์โมแกรมของ 99:1 PLA/MFC/PVA-20P



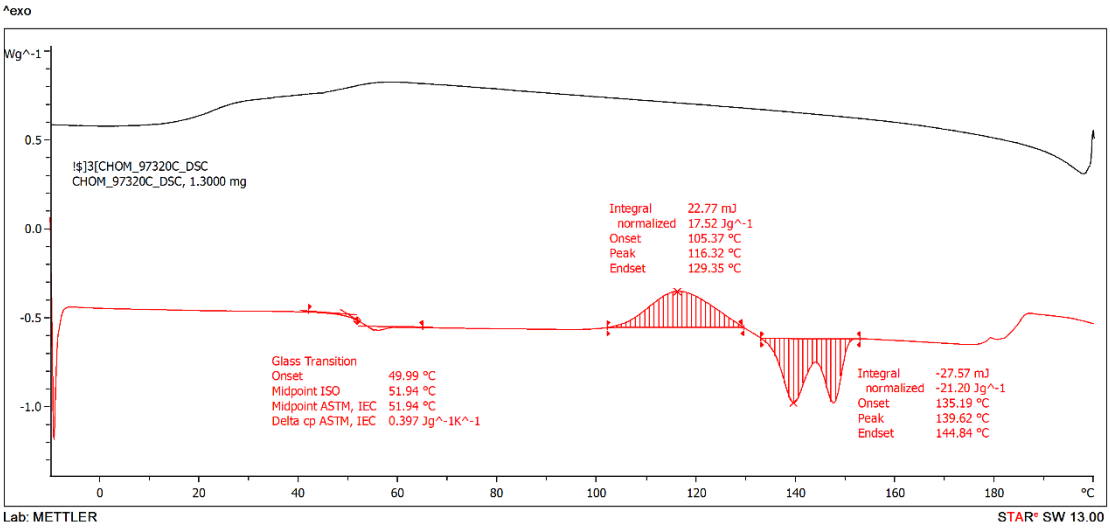
รูปที่ ข. 15 DSC เทอร์โมแกรมของ 97:3 PLA/MFC/PVA-20P



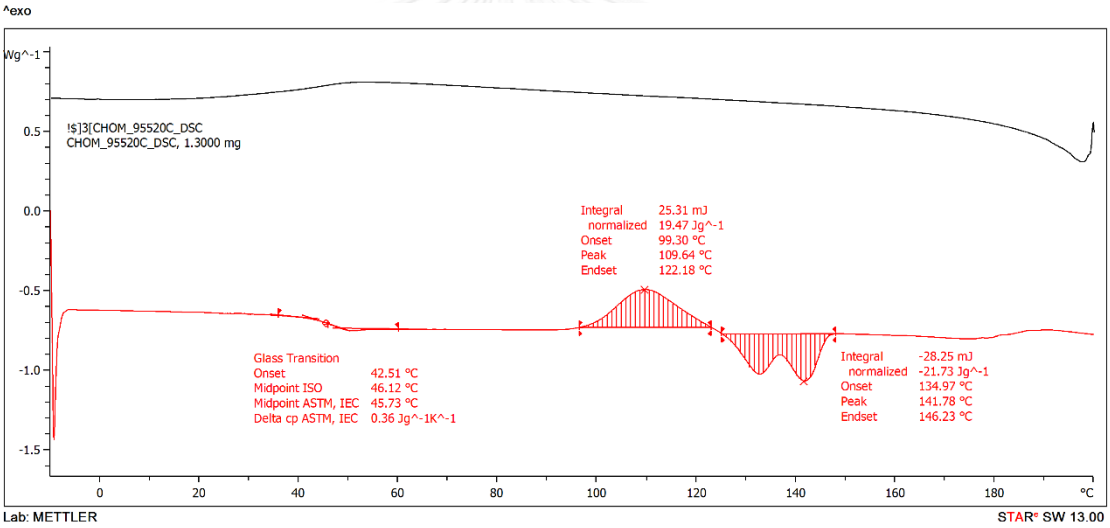
รูปที่ ข. 16 DSC เทอร์โมแกรมของ 95:5 PLA/MFC/PVA-20P



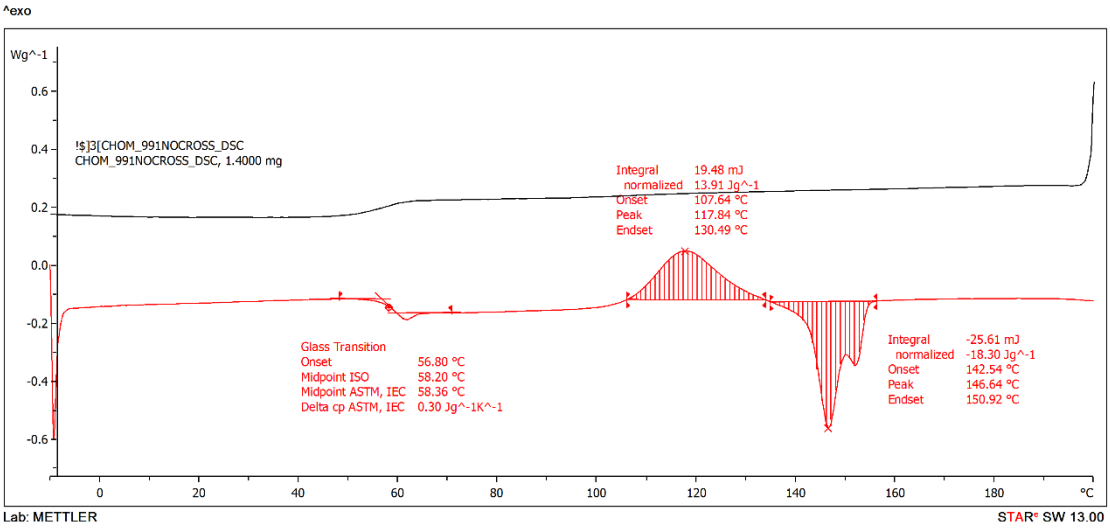
รูปที่ ข. 17 DSC เทอร์โมแกรมของ 99:1 PLA/MFC/PVA-20C



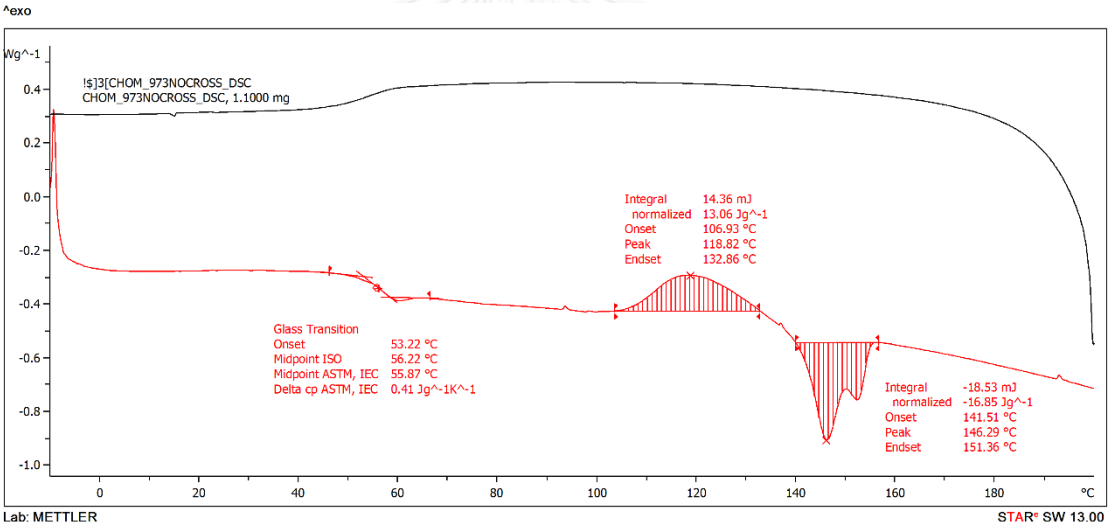
รูปที่ ข. 18 DSC เทอร์โมแกรมของ 97:3 PLA/MFC/PVA-20C



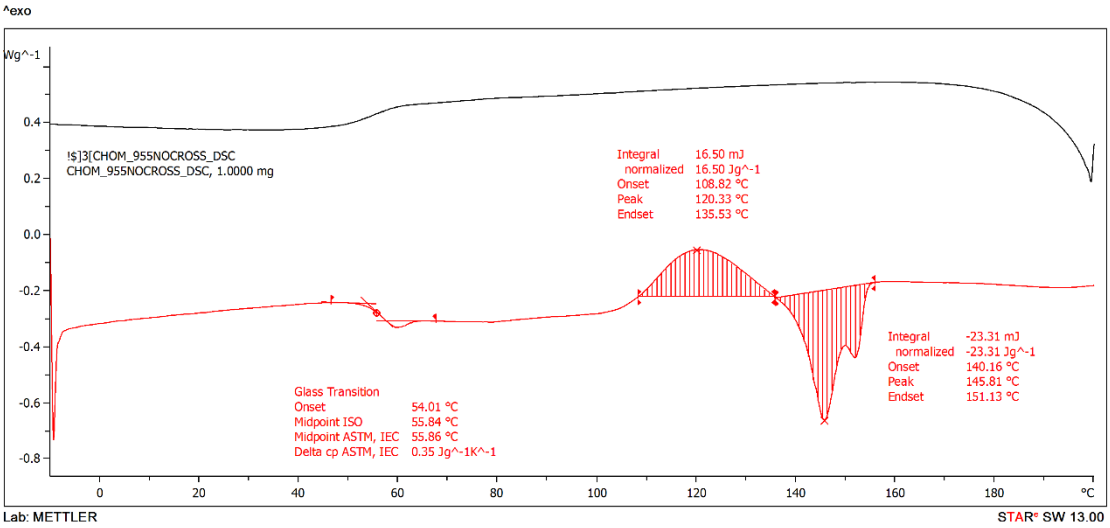
รูปที่ ข. 19 DSC เทอร์โมแกรมของ 95:5 PLA/MFC/PVA-20C



รูปที่ ข. 20 DSC เทอร์โมแกรมของ 99:1 PLA/MFC/PVA-20



รูปที่ ข. 21 DSC เทอร์โมแกรมของ 97:3 PLA/MFC/PVA-20



รูปที่ ข. 22 DSC เทอร์โมแกรมของ 95:5 PLA/MFC/PVA-20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวประภัสสร ดีแจ่ม เกิดเมื่อวันที่ 15 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม จากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2554 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นปีการศึกษา 2558

การเสนอผลงานวิจัย ดังนี้

Proceeding (International) P. Deejam and S. Charuchinda. Mechanical Properties of Poly(lactic acid) Sheet Reinforced with Microfibrillated Cellulose from Corn Cobs.The 2015 4th International Conference on Material Science and Engineering Technology (ICMSET 2015), 26-28 October 2015,Singapore, 2015.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University