

การใช้เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมจากเศษผ้าฝ้ายเป็นสารตัวเติมในฟิล์มพีวีซี



นางสาวศิริวรรณ สุขุทัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ISBN 974-14-1824-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

USE OF MICROCRYSTALLINE CELLULOSE PREPARED FROM WASTE COTTON FABRIC
AS FILLER IN PVC FILM

Miss Siriwan Su-uthai



สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

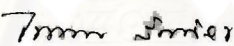
ISBN 974-14-1824-8

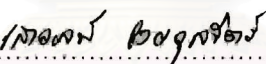
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้เซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมจากเศษผ้าฝ้าย เป็นสารตัวเติมในฟิล์มพีวีซี
โดย	นางสาวศิริวรรณ สุอุทัย
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตรี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา


คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตรี)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(จ.ร.จ. จารุจินดา)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

..... กรรมการ

..... กรรมการ

รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ ไพทยะราช)

ศิริวรรณ สุขทัย : การใช้เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมจากเศษผ้าฝ้ายเป็นสารตัวเติม
ในฟิล์มพีวีซี. (USE OF MICROCRYSTALLINE CELLULOSE PREPARED FROM WASTE
COTTON FABRIC AS FILLER IN PVC FILM) อ. ที่ปรึกษา : รศ. เสาวรณี ช่วยจุลจิตร,
อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา, 131 หน้า. ISBN 974-14-1824-8

ในงานวิจัยนี้ เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคถูกเตรียมได้จากการไฮโดรไลซ์เศษผ้าฝ้ายด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.5 นอร์มัล ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี ขนาดอนุภาค สัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อน จากนั้นนำเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้มาผสมกับพีวีซีคอมพาวด์ในปริมาณ 0 5 10 15 20 25 และ 30 ส่วนโดยน้ำหนักต่อพีวีซีเรซิน 100 ส่วน ด้วยวิธีดัดเรียบให้เป็นฟิล์ม แล้วนำไปตรวจสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา การดูดซึมน้ำ และความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าอนุภาคของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้มีรูปร่างเป็นเส้นใย และมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 40 ไมโครเมตร จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพีวีซี พบว่า ความต้านแรงดึงและยังสัมมอดูลัสของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ความต้านแรงฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเพิ่มขึ้น แต่กลับลดลงเมื่อผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเข้าไปในปริมาณมากกว่า 20 ส่วน และจาก TGA เทอร์โมแกรม แสดงให้เห็นว่าการเติมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมีผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพีวีซีน้อยมาก ในขณะที่การดูดซึมน้ำและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคทำหน้าที่เป็นตัวเติมเสริมแรงสำหรับฟิล์มพีวีซี และยังมีบทบาทสำคัญในการเร่งการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มพีวีซี ซึ่งเมื่อพิจารณาจากความยากง่ายในการขึ้นรูป สมบัติเชิงกล และการย่อยสลายทางชีวภาพแล้ว พบว่า ไม่ควรใช้ปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมากกว่า 20 ส่วน

ภาควิชาวัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต *ศิริวรรณ สุขทัย*
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *เสาวรณี ช่วยจุลจิตร*
ปีการศึกษา 2549.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม *ศิริรัตน์ จารุจินดา*

4772501723 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEY WORD: PVC FILM / MICROCRYSTALLINE CELLULOSE / FILLER / WASTE COTTON FABRIC

SIRIWAN SU-UTHAI : USE OF MICROCRYSTALLINE CELLULOSE PREPARED FROM
WASTE COTTON FABRIC AS FILLER IN PVC FILM : THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
SAOWAROJ CHUAYJULJIT, THESIS COADVISOR : ASSIST. PROF. SIREERAT
CHARUCHINDA, Ph.D. 131 pp. ISBN 974-17-3876-5.

In this research, microcrystalline cellulose (MCC) was prepared by hydrolyzing waste cotton fabric with 2.5 N HCl at 100 °C for 30 min. The chemical structure, particle size, morphology and thermal property of the MCC were investigated. The obtained MCC was blended with PVC compound at the amount of 0, 5, 10, 15, 20, 25, and 30 parts per hundred of PVC resin (phr). The mixtures were processed by calendaring method into a film form. The effects of MCC on the mechanical properties, thermal behaviors, morphology, water absorption and biodegradability of the blend films were investigated.

The fibrous-shaped particle of MCC was found to possess average particle size of about 40 μm . It was found that the tensile strength and Young's modulus of PVC films increased with the increasing amount of MCC. The tear strength also increased with the increasing amount of MCC. However, it decreased as the amount of MCC was higher than 20 phr. In addition, TGA thermogram showed that the thermal behavior of PVC film was insignificantly affected by the addition of MCC. Water absorption and biodegradability of PVC film were enhanced as the amount of MCC was increased. These results indicated that MCC behaves as reinforcing filler in PVC film and also plays an important role in accelerating the biodegradation of PVC film. By considering the ease of processing, the mechanical properties and the biodegradability, the amount of MCC in PVC film should not exceed 20 phr.

Department Materials Science Student's signature *Siriwan Su-uthai*
Field of Study Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's signature *Sj. Chai*
Academic year 2006..... Co-advisor's signature *Sireerat Charuchinda*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้น เป็นเพราะได้รับคำแนะนำด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่สำหรับทำงานวิจัย อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือ และแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามต่อไปนี้

1. รศ.เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ. ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำและแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ และการทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. รศ.ไพพรรณ สันติสุข ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และ รศ.อรอุษา สรวารี และ รศ. ดร. ประณัฐ โปธิยะราช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
3. บริษัทไทยนามพลาสติก จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์พีวีซีคอมพาวด์และชิ้นรูปชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ
4. บริษัท K World Textile จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ผ้าฝ้ายและส่วนอุตสาหกรรมสิ่งทอ กระทรวงอุตสาหกรรมที่ให้ความอนุเคราะห์เส้นใยรามี่
5. อ. ดร.ดุจฤทัย พงษ์เก่า และ อ. ดร.พรนภา สุจริตรวกุล ที่ให้ความอนุเคราะห์และให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ชิ้นทดสอบด้วยเครื่อง XRD
6. ศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการวิเคราะห์และทดสอบ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่สาว ที่ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าผ่านพ้นอุปสรรคต่างๆ และขอขอบคุณเพื่อนและพี่ ภาควัสดุศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกายกำลังใจ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่เคยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า จนสามารถสร้างสรรควิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทัศน์	4
2.1 การสลายตัวด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ	4
2.2 การย่อยสลายทางชีวภาพ	5
2.3 ผลึกเซลลูโลสระดับจุลภาค.....	10
2.4 การเตรียมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค	15
2.4.1 การไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์	15
2.4.2 การไฮโดรไลซ์ด้วยสารเคมี	16
2.5 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์หรือพีวีซี	17
2.6 การผสมผลึกเซลลูโลสระดับจุลภาคในพลาสติก.....	29
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30

บทที่	หน้า
3 วิธีการทดลอง.....	32
3.1 วัสดุและสารเคมี	32
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	32
3.3 เครื่องมือขึ้นรูปฟิล์มพีวีซี.....	32
3.4 เครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	33
3.5 ขอบเขตการทดลอง.....	33
3.5.1 การเตรียมผลึกเซลลูโลสระดับจุลภาค.....	34
3.5.1.1 การเตรียมผลึกเซลลูโลสระดับจุลภาคจากเศษผ้าฝ้ายและเส้นใยไหม.....	34
3.5.2 การวิเคราะห์ผลึกเซลลูโลสระดับจุลภาค.....	35
3.5.2.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (IR).....	35
3.5.2.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD).....	36
3.5.2.3 การวัดขนาดอนุภาคของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	37
3.5.3 การขึ้นรูปฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	38
3.5.4 การทดสอบสมบัติของฟิล์มพีวีซีที่ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	39
3.5.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม.....	40
3.5.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน.....	41
3.5.4.3 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ.....	43
3.5.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM	44
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	45
ลักษณะของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	45
4.2 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ที่ได้จากการไฮโดรไลซ์เศษผ้าฝ้าย	45
การวิเคราะห์เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค	46
4.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR.....	46
4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD.....	47
4.3.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM.....	48

4.3.4 การวัดขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค Laser Light Scattering.....	49
4.3.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC	50
4.3.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	51
4.4 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	52
4.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM.....	53
4.6 การทดสอบสมบัติด้านความต้านแรงดึง.....	55
4.6.1 ความต้านแรงดึง (Tensile strength).....	55
4.6.2 ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus).....	56
4.6.3 ความต้านแรงฉีกขาด (Tear strength).....	58
4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	59
4.8 สมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค...64	
4.8.1 การดูดความชื้น	62
4.8.2 การหาน้ำหนักที่หายไปภายหลังการฝังดิน.....	65
4.8.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM	65
4.8.4 การทดสอบด้านความต้านแรงดึง.....	73
4.8.4.1 ความต้านแรงดึง (Tensile strength)	73
4.8.4.2 ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus)	76
4.8.4.3 ความต้านแรงฉีกขาด (Tear strength)	79
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	82
5.1 สรุปผลการทดลอง	82
5.2 ข้อเสนอแนะ	83
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก.....	88
ภาคผนวก ข.....	92
ภาคผนวก ค.....	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	132

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความทนทานต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ของพลาสติกประเภทต่างๆ.....	7
ตารางที่ 2.2 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนชิ้นพลาสติกประเภทต่างๆ.....	8
ตารางที่ 2.3 ค่าความถี่จาก IR spectra ของ crystalline polysaccharide.....	14
ตารางที่ 2.4 ลักษณะเด่นของพีวีซีชนิดแข็งและชนิดยืดหยุ่น	28
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับ.....	53
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับ.....	61



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 กลไกการย่อยสลายแบ่งในพลาสติก.....	6
รูปที่ 2.2 การหายไปของเม็ดแบ่งในพลาสติก.....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	10
รูปที่ 2.4 แสดงการเรียงตัวของโครงสร้างเซลลูโลส.....	11
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของผลึกเซลลูโลส I.....	12
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของผลึกเซลลูโลส II.....	13
รูปที่ 2.7 แสดงผลของ XRD ของเซลลูโลสแบบผลึก I และ II และเซลลูโลสอสัณฐาน.....	15
รูปที่ 2.8 การแตกหักตรงบริเวณที่เป็นอสัณฐาน.....	16
รูปที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิในการไฮโดรไลซ์เซลลูโลสต่อ degree of polymerization.....	17
รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของพีวีซี.....	18
รูปที่ 2.11 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พีวีซี.....	18
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบพีวีซีกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ในการเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม.....	28
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะเครื่อง (two-roll mill).....	29
รูปที่ 3.1 เครื่อง FT-IR.....	35
รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง XRD.....	36
รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของเครื่อง Laser Light Scattering.....	37
รูปที่ 3.4 เครื่อง universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR 100K plus.....	39
รูปที่ 3.5 ลักษณะและขนาดของขั้นตอนทดสอบความต้านการฉีกขาด.....	40
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของเครื่อง TGA รุ่น METTLER TOLEDO TGA/SDTA 851°.....	41
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของเครื่อง DSC รุ่น DSC 822°.....	42
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของเครื่อง SEM รุ่น JSM-6400.....	44

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.1 ลักษณะของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้.....	45
รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้จากเศษผ้าฝ้าย.....	46
รูปที่ 4.3 XRD ดิฟแฟร็กโทแกรมของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ที่เตรียมจากการไฮโดรไลซ์เศษผ้าฝ้ายและเส้นใยว่ามี.....	47
รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่า (ข) 500 เท่า และ (ค) 2,000 เท่า.....	48
รูปที่ 4.5 การกระจายขนาดอนุภาคของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง Laser Light Scattering.....	49
รูปที่ 4.6 DSC ดิฟแฟร็กโทแกรมของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค	50
รูปที่ 4.7 TGA เทอร์โมแกรมของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	51
รูปที่ 4.8 ลักษณะฟิล์มผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	52
รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	54
รูปที่ 4.10 ความต้านแรงดึงของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ตามแนว (ก) MD และ (ข) TD	56
รูปที่ 4.11 ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค..... ตามแนว (ก) MD และ (ข) TD.....	57
รูปที่ 4.12 ความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ตามแนว (ก) MD และ (ข) TD	58
รูปที่ 4.13 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	60
รูปที่ 4.14 การดูดความชื้นของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ปริมาณต่างๆ กัน.....	62
รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปภายหลังการฝังดิน.....	65
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพีวีซีก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ (จ) 8 สัปดาห์.....	66
รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสระดับจุลภาค (5 phr) ก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์) (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ (จ) 8 สัปดาห์.....	67

รูปประกอบ

รูปที่ 4.18	สัญญาณวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสระดับจุลภาค (10 phr) ก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์) (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ (จ) 8 สัปดาห์.....	68
รูปที่ 4.19	สัญญาณวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสระดับจุลภาค (15 phr) ก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์) (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ (จ) 8 สัปดาห์.....	69
รูปที่ 4.20	สัญญาณวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสระดับจุลภาค (20 phr) ก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์) (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ (จ) 8 สัปดาห์.....	70
รูปที่ 4.21	สัญญาณวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสระดับจุลภาค (25 phr) ก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์) (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ (จ) 8 สัปดาห์.....	71
รูปที่ 4.22	สัญญาณวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสระดับจุลภาค (30 phr) ก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์) (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ (จ) 8 สัปดาห์.....	72
รูปที่ 4.23	ความต้านแรงดึงของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ตามแนว (ก) MD และ (ข).....	73
รูปที่ 4.24	เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความต้านแรงดึงของฟิล์มพีวีซี ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	75
รูปที่ 4.25	ค่ายังสัมมอดูลัสของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ตามแนว (ก) MD และ (ข) TD	77
รูปที่ 4.26	เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่ายังสัมมอดูลัสของฟิล์มพีวีซี ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	78
รูปที่ 4.27	ค่าความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มพีวีซี ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	80
รูปที่ 4.28	เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มพีวีซี ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค.....	81

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ได้ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน ทั้งที่อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์สิ่งทอและพลาสติก โดยอัตราการใช้วัสดุพอลิเมอร์ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมทำให้การพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์เจริญก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง จนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเด่นเหนือวัสดุอื่นๆ หลายประการ เช่น น้ำหนักเบา ขึ้นรูปง่าย แข็งแรงทนทาน ทนกรด ทนด่าง เป็นฉนวนความร้อนและไฟฟ้า และทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ เป็นต้น อีกทั้งมีราคาถูก ทำให้มีสีสันได้ตามต้องการ และมีให้เลือกมากมายหลายชนิด จึงถูกนำไปใช้ทดแทนวัสดุอื่นๆ เช่น ไม้ ขนและหนังสัตว์ โลหะ และแก้ว ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลจากการเพิ่มการผลิตนี้ทำให้ปริมาณขยะของวัสดุพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จนกลายเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ถุกย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ และขณะนี้ยังไม่มีวิธีกำจัดขยะจากวัสดุพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพเพียงพอ โดยขยะเหล่านี้อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ขยะที่เกิดจากการใช้งานในอาคารบ้านเรือนหรือสำนักงาน และขยะที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งไม่สามารถถูกกำจัดได้ทันกับปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว จนกลายเป็นการสร้างปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อมที่นับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะกับประเทศไทยเท่านั้น ประเทศต่างๆ ทั่วโลกกำลังเผชิญกับปัญหานี้เช่นเดียวกัน โดยปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของโลกในปัจจุบันมาจาก 5 สาเหตุ คือ

- การเกิดสภาวะเรือนกระจก (green house effect)
- การทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน
- การลดลงของพื้นที่ป่าเขตร้อน
- การเกิดฝนกรด (acid rain)
- การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของขยะมูลฝอย

ดังนั้น การกำจัดและลดปริมาณของขยะวัสดุพอลิเมอร์อย่างมีประสิทธิภาพ และทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด ย่อมเป็นส่วนหนึ่งของการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งการกำจัดและลดปริมาณขยะวัสดุพอลิเมอร์เป็นปัญหาสำคัญที่หลายๆ ประเทศ รวมทั้งประเทศไทยให้ความสนใจ และพร้อมที่จะทำการวิจัยและพัฒนาให้ได้ผลดียิ่งขึ้น การกำจัดขยะเหล่านี้มีหลายวิธีซึ่งอาจแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพสังคม เช่น ความหนาแน่นของประชากร ความสนใจในเรื่องสิ่งแวดล้อมของประชาชน และการรับรู้เรื่องและเทคโนโลยี รวมทั้งสภาพเศรษฐกิจภายใน

ประเทศ ซึ่งการกำจัดและลดปริมาณเศษขยะวัสดุพอลิเมอร์ทั้งที่อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์พลาสติก และสิ่งทออย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ การนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการใช้งาน หรือเศษที่เหลือทิ้งในขั้นตอนการแปรรูปไปผ่านการรีไซเคิลด้วยเทคนิคต่างๆ ทั้งวิธีทางกายภาพหรือทางเคมีเพื่อที่จะนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่อีก ซึ่งนอกจากเป็นการช่วยลดปริมาณขยะแล้ว ยังเป็นการประหยัดทรัพยากรธรรมชาติอีกด้วย และนอกจากการรีไซเคิลแล้ว การเตรียมผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว และวิธีเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพอย่างตรงไปตรงมาที่สุด คือ การใช้วัสดุพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่สิ่งมีชีวิตสามารถย่อยสลายได้ เช่น การใช้เซลลูโลส (ผลิตภัณฑ์จากเซลลูโลส) แทนพอลิเอทิลีนในการทำบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้ การนำพอลิเมอร์จากธรรมชาติ (natural polymers) เช่น แป้ง (starch) เซลลูโลส และโปรตีน เป็นต้น มาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์สังเคราะห์ เพื่อให้สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งสารตัวเติมเหล่านี้เมื่อถูกจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติบริเวณจะเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับพอลิเมอร์สังเคราะห์ ทำให้จุลินทรีย์สามารถแทรกเข้าไปในเนื้อของผลิตภัณฑ์ได้ง่ายขึ้น โดยจุลินทรีย์จะหลั่งเอนไซม์ที่สามารถทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์แตกออก เป็นส่วนย่อยๆ ซึ่งเอนไซม์เป็นโปรตีนที่โมเลกุลมีขนาดใหญ่ และประกอบด้วยหมู่ที่ชอบน้ำ ได้แก่ หมู่ $-COOH$, $-OH$ และ $-NH_2$ และเมื่อพอลิเมอร์ถูกทำให้แตกเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลระดับ 500-800 ก็จะถูกบริโภคโดยจุลินทรีย์ เนื่องจากเป็นแหล่งคาร์บอนที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์

ปัจจุบันเศษผ้าฝ้ายที่เหลือจากการตัดเย็บเสื้อผ้าสำเร็จรูปจะมีตักค้างอยู่ภายในโรงงานเป็นจำนวนมาก ซึ่งการพัฒนาหรือหาแนวทางในการนำเศษผ้าฝ้ายเหล่านี้กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อีก นอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษผ้าฝ้าย ยังสามารถลดปริมาณขยะและช่วยประหยัดทรัพยากรธรรมชาติได้อีกหนทางหนึ่งด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำเศษผ้าฝ้ายซึ่งเป็นวัสดุพอลิเมอร์มาทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเพื่อเตรียมเป็นเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค แล้วนำไปใช้เป็นสารตัวเติมให้กับพลาสติกพีวีซี เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกพีวีซี ซึ่งพีวีซีเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีการผลิตและการใช้งานมากเป็นอันดับสองรองจากพอลิเอทิลีน โดยเป็นพลาสติกที่มีการนำไปใช้ประโยชน์กันมากในการพัฒนาประเทศ โดยสามารถพบเห็นการใช้งานของพีวีซีอยู่ทั่วไปในกิจกรรมรอบๆ ตัว ไม่ว่าจะเป็นในโรงงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์ไฟฟ้า ของใช้ในบ้าน บรรจุภัณฑ์ต่างๆ และผลิตภัณฑ์หนังเทียม เป็นต้น นอกจากนี้ ยังใช้ประโยชน์ทั้งในงานก่อสร้าง งานด้านกีฬา และงานด้านการเกษตรอีกด้วย ซึ่งในขณะนี้การผลิตฟิล์มพีวีซีมีบทบาทสำคัญต่อสังคมและการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก เพราะสามารถอำนวยความสะดวกทั้งในด้านการเกษตร การถนอม

อาหาร การห่อสินค้า และทำสิ่งของเครื่องใช้ต่างๆ หากแต่การรีไซเคิลพีวีซี ยังมีขอบเขตจำกัด อยู่มาก เนื่องจากพีวีซีจะปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งทำให้เกิด การระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจอย่างรุนแรง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจนำเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้จากเศษผ้าฝ้ายซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งในโรงงานตัดเย็บเสื้อผ้าสำเร็จรูปมาใช้พัฒนาฟิล์มพีวีซีให้สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เพื่อช่วยแก้ไขปัญหากำจัดและทำลายขยะของวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งหากงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จ ย่อมทำให้ฟิล์มพีวีซีที่เตรียมได้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 การสลายตัวด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ

การสลายตัวของวัสดุพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติอาจจำแนกได้ ดังนี้

1. การสลายตัวโดยสภาวะแวดล้อม (Environmental degradation) คือ การที่วัสดุพอลิเมอร์เกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ เป็นผลเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อม เช่น แสงอาทิตย์ ความร้อน น้ำ สภาพอากาศ และจุลินทรีย์ เป็นต้น

2. การสลายตัวด้วยแสง (Photo degradation) คือ การที่วัสดุพอลิเมอร์เกิดการสลายตัวอย่างช้าๆ เมื่อได้รับแสงอาทิตย์หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์ต้องได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงในช่วงระยะเวลาหนึ่งจึงจะเสื่อมสภาพ เช่นที่พบกับพลาสติกที่ใช้ทางการเกษตร โดยแผ่นหรือฟิล์มพลาสติกที่ใช้คลุมดินสำหรับการเพาะปลูกเมื่อผ่านพ้นฤดูการเพาะปลูกแล้ว พลาสติกนี้จะเปราะและแตกเป็นชิ้นเล็กๆ โดยเฉพาะการใช้พลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนส์ และพอลิโพรพิลีนที่สิ้นอายุขัยในการคลุมดิน และผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการย่อยสลายด้วยแสงนี้ไม่มีผลต่อวัฏจักรของคาร์บอนในดิน

3. การสลายตัวโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation degradation) คือ การที่วัสดุพอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนหรือโอโซนในอากาศ

4. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) คือ การที่วัสดุพอลิเมอร์เกิดการสลายตัวเนื่องจากการย่อยสลายธาตุคาร์บอนในโมเลกุลโดยจุลินทรีย์ (microorganism) เช่น แบคทีเรีย (bacteria) และเชื้อรา (fungi) เป็นต้น ซึ่งอาจทำได้โดยการเติมสารอินทรีย์ที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ลงในขั้นตอนการผลิตพลาสติก เพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายโดยการปล่อยน้ำย่อยหรือเอนไซม์ (enzyme) ออกมาย่อยสลายสารที่เป็นอาหาร ซึ่งต้องมีความชื้น อุณหภูมิ และอากาศที่เหมาะสม ซึ่งอาจใช้เวลาในการย่อยสลาย 2-3 ปี จากการทดลองย่อยสลายพลาสติกด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยการปนเชื้อจุลินทรีย์ (*Aspergillus niger*, *Penicillium funiculosum*, *Chaetium globosum*, *Gliocodium vireus*, *Aureobasidium pullulans*) บนชิ้นพลาสติกซึ่งวางอยู่บนก้อนวุ้นเลี้ยงเชื้อที่มีสารอื่นๆ ครบถ้วน ยกเว้นสารอาหารที่เป็นธาตุคาร์บอน แล้วทำการเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 28-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 21 วัน พบว่าเชื้อเจริญเติบโตได้ดีที่สุดบนชิ้น

พลาสติกประเภทพอลิเอสเตอร์ที่เตรียมจากอะดิฟาทิกเอสเตอร์ไดออกไซด์ และเจอร์นุได้บ้างบนพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน และพีวีซีที่ใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นพลาสติกไฮเซออร์

2.2 การย่อยสลายทางชีวภาพ [1-6]

พอลิเมอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส แป้ง และโปรตีน เป็นพอลิเมอร์ที่สิ่งมีชีวิตเช่นจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ แต่พอลิเมอร์สังเคราะห์ส่วนใหญ่ไม่ถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ เนื่องจากสารสังเคราะห์เหล่านี้เพิ่งเกิดขึ้นมาไม่นานมานี้ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ยังไม่ยาวนานพอที่สิ่งมีชีวิตจะเกิดวิวัฒนาการเพื่อให้ความสามารถในการย่อยสลายได้ ดังนั้น การเพิ่มความสามารถของการถูกย่อยสลายให้มากขึ้นที่นิยมกันใช้กันมาก ได้แก่

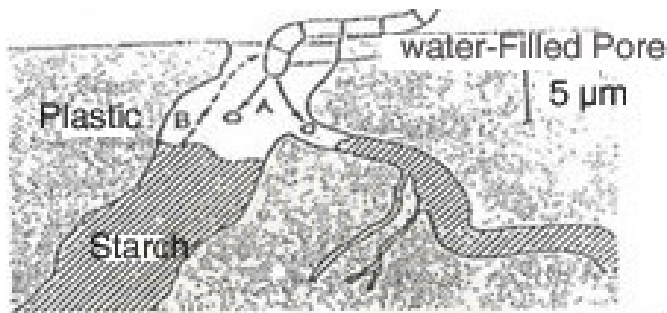
1. การใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) แทนพลาสติกสังเคราะห์ เนื่องจากสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การใช้เซลโลเฟน (cellophane) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากเซลลูโลสแทนพอลิเอทิลีนในการห่อสิ่งของ แต่เซลโลเฟนยังขาดสมบัติบางอย่าง เช่น สมบัติในการกันและเก็บความชื้น ความสามารถเชื่อมให้ติดกันด้วยความร้อน มีความแข็งแรงต่ำ และมีอายุการใช้งานสั้น

2. สังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ๆ ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งมีหลายชนิดเช่น acrolein-acrylic acid polymers, polyamidotriazoles, polyphosphazenes พอลิเมอร์เหล่านี้ได้มาจาก amino acid ester และ acrylonitrile copolymer ที่ถูกไฮโดรไลซ์แล้ว

3. การใช้พอลิเมอร์ผสม โดยนำพอลิเมอร์ธรรมชาติผสมกับพลาสติก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ ซึ่งพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมใช้ ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส และโปรตีน เป็นต้น โดยการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์สังเคราะห์เพื่อให้พลาสติกสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งเมื่อสารเหล่านี้ถูกจุลินทรีย์ที่มีในธรรมชาติบริโภคไปจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของพอลิเมอร์ ทำให้จุลินทรีย์สามารถแทรกซึมเข้าไปในพอลิเมอร์สังเคราะห์ได้ ซึ่งเป็นกรเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์สังเคราะห์นั่นเอง

การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่เป็นผลจากการที่วัสดุถูกทำลายโดยจุลินทรีย์ที่เรียกว่า microbial degradation โดยจุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์หลากหลายชนิดที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ การทำลายพอลิเมอร์ด้วยเอนไซม์จัดเป็นกระบวนการทางเคมี ซึ่งถูกเหนี่ยวนำด้วยจุลินทรีย์เพื่อให้ได้อาหาร เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับจุลินทรีย์ ซึ่งพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมนำมาผสมกับพลาสติก

คือ แปะ โดยแปะจะแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของพลาสติก ซึ่งกลไกการย่อยสลายตัวของพลาสติกในชั้นแรกจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์อะไมเลส (amylase) เข้าย่อยสลายแปะในพลาสติกผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ ทำให้แปะมีโมเลกุลเล็กลงจนสามารถเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2



(A คือ การแพร่ของอะไมเลสไปยังแปะ, B คือ การแพร่ของแปะที่ถูกย่อยไปยังจุลินทรีย์)

รูปที่ 2.1 กลไกการย่อยสลายแปะในพลาสติกโดยจุลินทรีย์ [2, 3]



รูปที่ 2.2 การหายไปของเม็ดแปะในพลาสติก [2, 3]

เมื่อเม็ดแปะหายไปจากเนื้อของพลาสติกทำให้พลาสติกนุ่มลงและมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ต่อจากนั้น โลหะและน้ำที่อยู่ในดินจะเกิดปฏิกิริยา Auto-oxidation ได้สารเปอร์ออกไซด์ซึ่งอัตราการย่อยสลาย ขึ้นกับสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน ความเป็นกรด-ด่าง และชนิดของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน รวมถึงความหนาของพลาสติกด้วย

จากการศึกษาพบว่าพลาสติกแต่ละชนิดมีความทนทานต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 แสดงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนชั้นพลาสติกประเภทต่างๆ

ตารางที่ 2.1 ความทนทานต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ของพลาสติกประเภทต่างๆ [5]

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

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนชิ้นพลาสติกประเภทต่างๆ [6]

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

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

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

ปัจจุบันได้มีการศึกษาถึงพอลิเมอร์ที่มีความไวต่อสภาวะแวดล้อมโดยจุลินทรีย์จะปลดปล่อยเอนไซม์ซึ่งสามารถทำให้พอลิเมอร์แตกออกเป็นส่วนตัวเล็กๆ ซึ่งเอนไซม์เป็นโปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ และมีหมู่ที่ชอบน้ำ ได้แก่ $-COOH$, $-OH$ และ $-NH_2$ เป็นองค์ประกอบ และเมื่อพอลิเมอร์ถูกทำให้แตกออกเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลระดับ 500 ถึง 800 ก็จะสามารถถูกกินโดยเชื้อจุลินทรีย์ การแตกตัวประเภทนี้เกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมดังต่อไปนี้

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

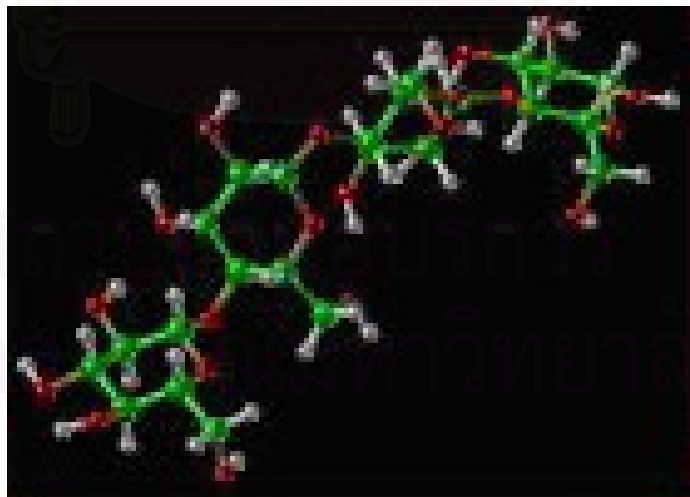
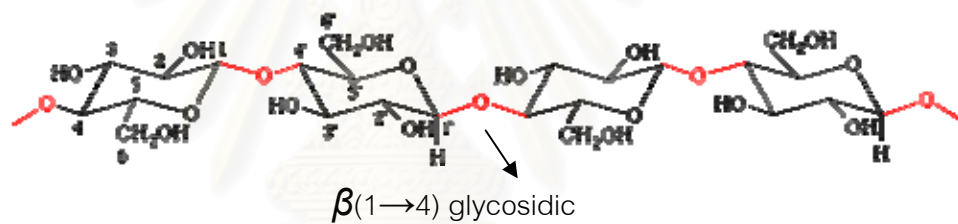
ปัจจุบันได้มีการพัฒนาอย่างกว้างขวางทางด้านเทคโนโลยีและการตลาดของพลาสติกที่สามารถ ทยอยสลายได้หมด ปัญหาก็คือวัสดุเหล่านี้มีราคาแพงมากเมื่อเทียบกับพลาสติกที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ทั่วไป แต่ยังคงนำไปใช้งานในหลายประเภท เช่น ผลิตภัณฑ์ที่จะไปทำให้เกิดเป็นขยะในทะเล หรือพลาสติกที่ใช้ในการเกษตร เช่น ถุงใส่ปุ๋ย หมุดรองตีกอล์ฟ บรรจุภัณฑ์อาหาร แผ่นฟิล์มทำผ้าอ้อม แคปซูลยา และเครื่องมือทางการแพทย์ที่ใช้แล้วทิ้ง เป็นต้น

ตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์แล้วสามารถย่อยสลายโดยธรรมชาติได้หมด

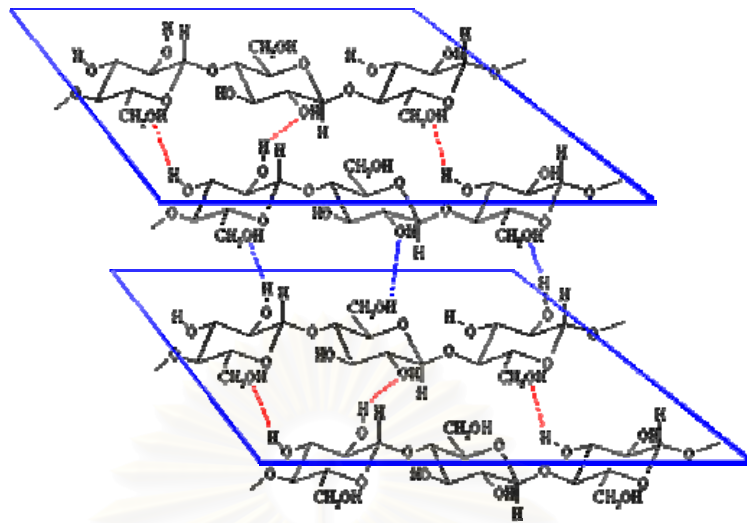
1. Warner Lambert's Noven เป็น starch-based polymer
2. Cargill ผลิต polylactic acid จากข้าวโพด
3. Ecochem ซึ่งเป็นบริษัทร่วมทุนระหว่าง Dupont กับ Con Agra พัฒนา polylactic based homo และ copolymer
4. Polyhydroxybutyl valerate aliphatic polyester โดยบริษัท ICI ประเทศอังกฤษ ใช้ชื่อทางการค้าว่า Biopol
5.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

2.3 ผลึกเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค (microcrystalline cellulose) [7-15]

เซลลูโลส เป็น คาร์โบไฮเดรตชนิดพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ที่เกิดจากมอนอเมอร์ ชื่อ แอนไฮโดรกลูโคไพราโนส (anhydroglucopyranose) ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของ D-glucose ในรูป β -D-glucopyranose มาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic linkage) ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 กับคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ในโมเลกุลถัดไป ซึ่งการจัดเรียงตัวของหน่วยย่อย D-glucose จะอยู่ในลักษณะ chair form ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แต่ละโมเลกุลของเซลลูโลสยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ที่ C ตำแหน่งที่ 3 กับ O ที่อยู่ในวงแหวนของโมเลกุลถัดไป และระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลที่ C ตำแหน่งที่ 6 กับ O ที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของ D-glucose ในอีกโมเลกุลหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จากการจัดเรียงตัวเช่นนี้ ทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสเรียงตัวขนานกันอย่างมีระเบียบ เรียกว่า บริเวณที่เป็นผลึก (crystalline region) ส่วนบริเวณที่มีการจัดเรียงโมเลกุลไม่เป็นระเบียบ เรียกว่า บริเวณที่เป็นอสัณฐาน (amorphous region)

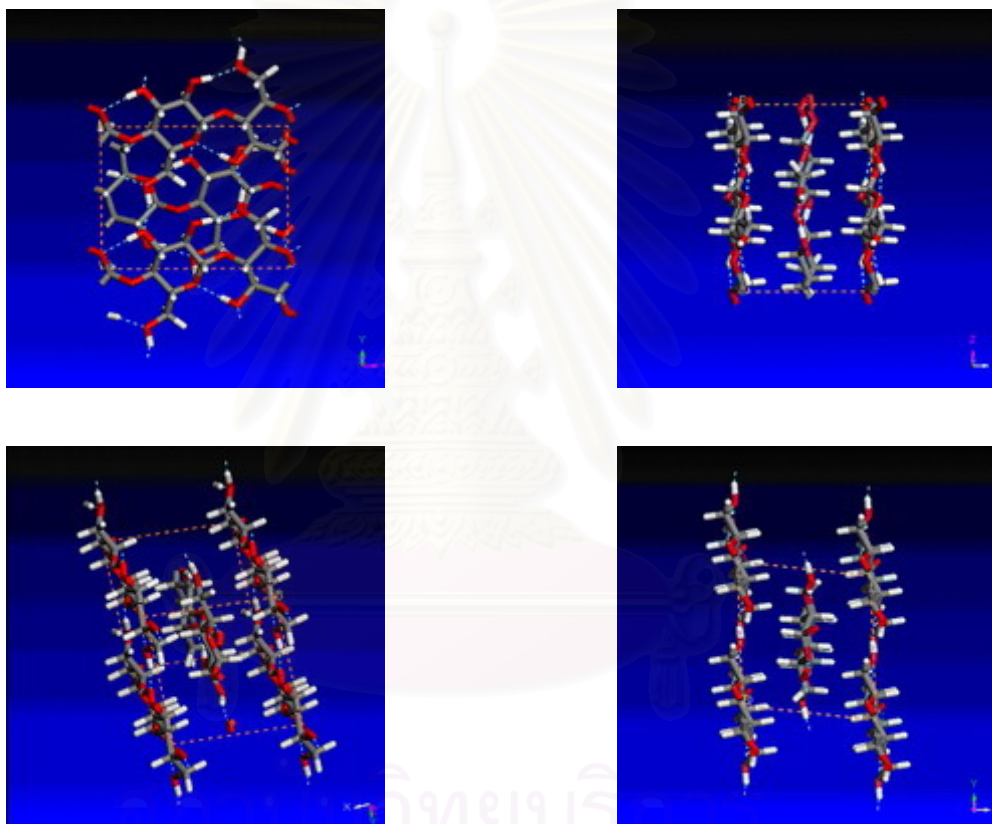
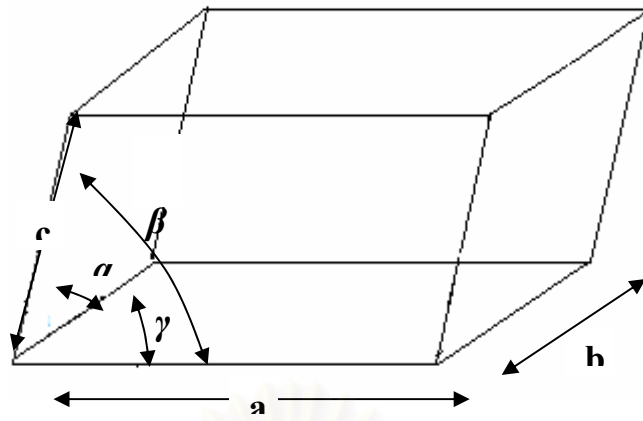


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส [11]

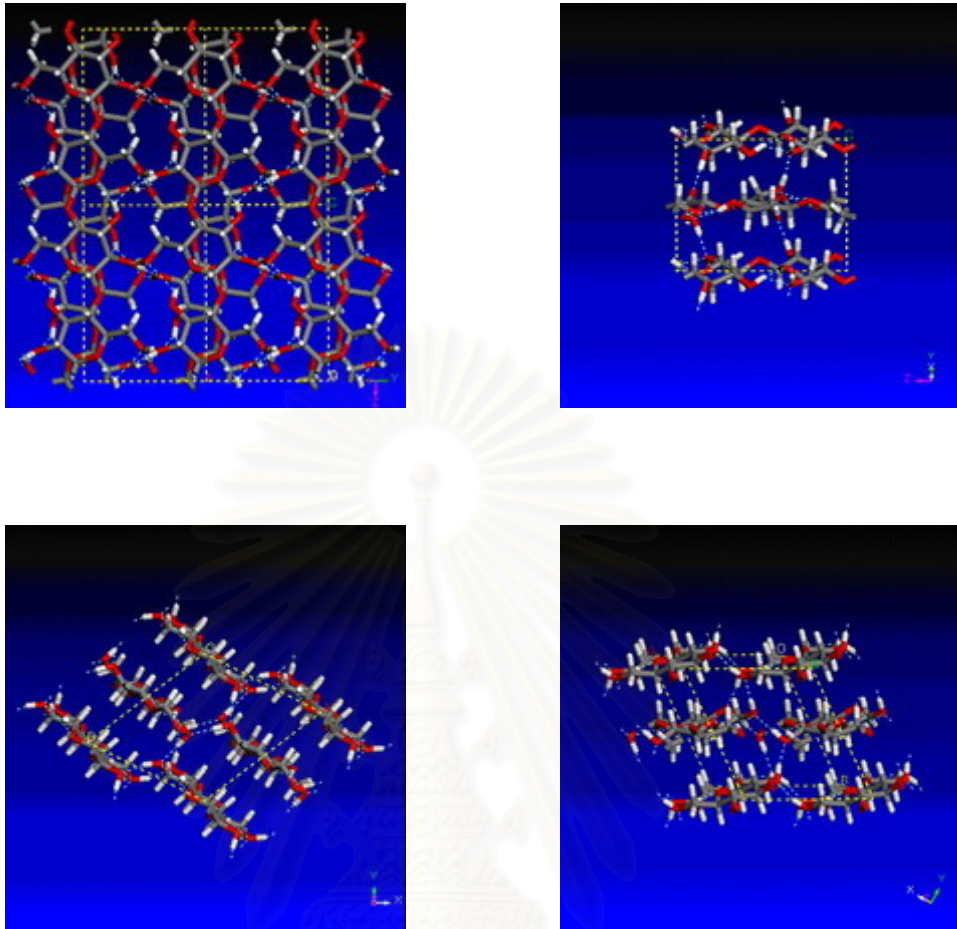


รูปที่ 2.4 แสดงการเรียงโมเลกุลของเซลลูโลส [11]

โครงสร้างผลึกของเซลลูโลส โดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ ผลึกเซลลูโลส I และผลึกเซลลูโลส II ซึ่งเซลลูโลส I มี 2 แบบ คือ เซลลูโลส I_α โดยมีค่า $a = 8.27 \text{ \AA}$, $b = 10.38 \text{ \AA}$, $c = 7.85 \text{ \AA}$, $\beta = 96.3^\circ$ และเซลลูโลส I_β โดยมีค่า $a = 8.02 \text{ \AA}$, $b = 10.42 \text{ \AA}$, $c = 7.44 \text{ \AA}$, $\beta = 98.33^\circ$ ซึ่งโครงสร้างของเซลลูโลส I_α มีความเสถียรน้อยกว่าเซลลูโลส I_β จึงทำให้พบเซลลูโลส I_β ในธรรมชาติมากกว่า เช่น ฝ้าย และرامي โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.5 และผลึกเซลลูโลส II ได้จากการตัดแปรรเซลลูโลส I คือ เซลลูโลสที่ได้จากการคืนสภาพ (regenerated cellulose) เช่น ไลโอเซลล์ (lyocell) หรือวิสโคส (viscose) โดยมีค่า $a = 8.02 \text{ \AA}$, $b = 10.42 \text{ \AA}$, $c = 7.44 \text{ \AA}$, $\beta = 98.33^\circ$, $\gamma = 116.8^\circ$ ซึ่งโครงสร้างของเซลลูโลส I มีระดับโครงสร้างสูงกว่าโครงสร้างของเซลลูโลส II แต่ผลึกของเซลลูโลส II มีความแข็งแรงมากกว่าผลึกของเซลลูโลส I โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.6 [11-13]



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของผลึกเซลลูโลส I_β [12,13]



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของผลึกเซลลูโลส II [13]

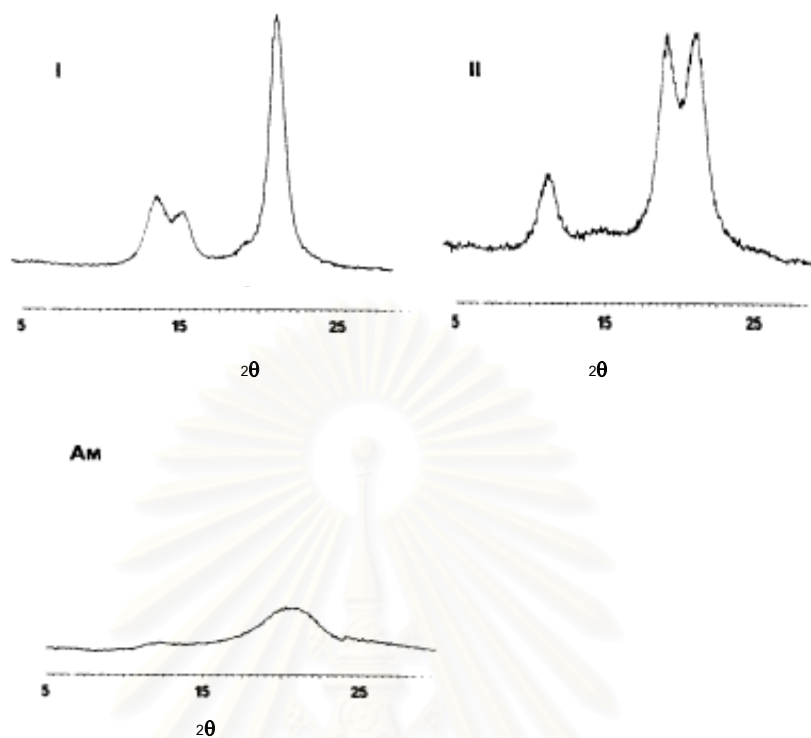
เนื่องจากลักษณะการเชื่อมต่อพันธะของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันระหว่างผลึกเซลลูโลส I และผลึกเซลลูโลส II ทำให้เกิดการดูดซับลำแสงคลื่นอินฟราเรด (IR) ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และทำให้เกิดการหักเหของแสงที่แตกต่างกัน เมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงรูปที่ 2.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 ค่าความถี่จาก IR spectra ของ crystalline polysaccharide [15]

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 XRD ดิฟแฟร็กโตแกรมของผลึกเซลลูโลส I และ II และเซลลูโลสอสัณฐาน [16]

2.4 การเตรียมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค [2, 7,10]

การเตรียมผลึกเซลลูโลสระดับจุลภาคเป็นการย่อยสลายส่วนที่เป็นอสัณฐานของเซลลูโลสออกจากเส้นใยเซลลูโลสให้เหลือแต่ส่วนที่เป็นผลึกในระดับจุลภาค ซึ่งการเตรียมโดยทั่วไปนิยมใช้ 2 วิธี คือ

2.4.1. การไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ (Enzymatic hydrolyze)

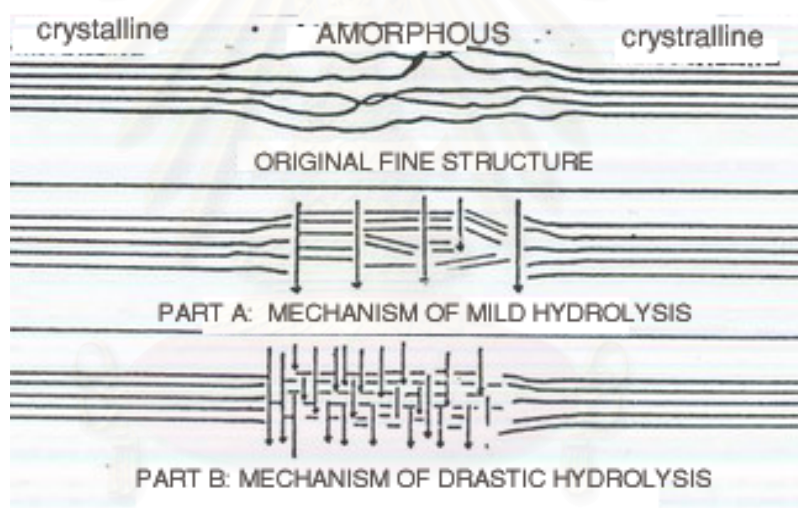
เป็นการย่อยสลายสารประกอบเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ซึ่งส่วนใหญ่ได้จากเชื้อราและแบคทีเรีย เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดที่สภาวะไม่รุนแรง (อุณหภูมิห้อง และความดันปกติ) จึงต้องใช้เวลาในการย่อยสลายเป็นเวลาหลายชั่วโมงถึงหลายวันจึงจะได้ผลึกเซลลูโลสระดับจุลภาค แต่การใช้เอนไซม์มีข้อดี คือ เอนไซม์มีความเจาะจงในการทำปฏิกิริยา โดยไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่ไม่ใช่เซลลูโลส จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ แต่การใช้เอนไซม์ต้องใช้ต้นทุนสูงจึงไม่ค่อยนิยมใช้

2.4.2 การไฮโดรไลซ์ด้วยสารเคมี (Chemical hydrolyze) [3, 10]

เป็นการย่อยสลายสารประกอบเซลลูโลสด้วยกรด โดยการนำกรดไปไฮโดรไลซ์เซลลูโลสให้สั้นลง เป็นวิธีที่นิยมใช้มากกว่า เนื่องจากทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เซลลูโลสระดับจุลภาคได้อย่างรวดเร็ว โดยกรดมีราคาไม่แพงและหาได้ง่าย เหมาะสมในทางอุตสาหกรรมมากกว่าการไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ ซึ่งการไฮโดรไลซ์ด้วยกรด มีกลไกดังนี้

1. เกิดการแตกสลายในสายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลส (Cellulose depolymerization) โดยมีการแตกหักของพันธะที่อ่อนแอของหมู่ที่ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายภายในโครงสร้างของเซลลูโลส

2. เกิดการแตกหักของพันธะ β 1,4-glycosidic บนสายโซ่เซลลูโลสในบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (amorphous region) ทำให้เกิดเป็นสายสั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



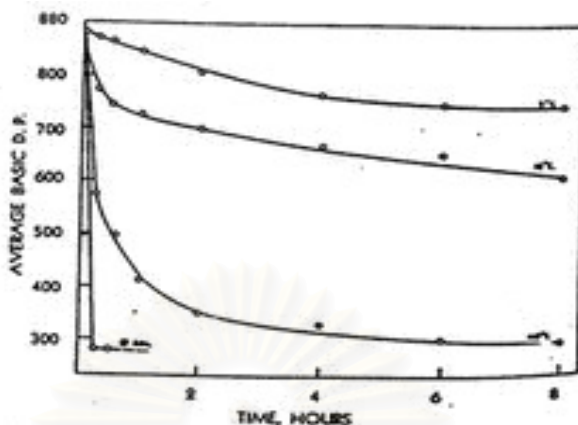
รูปที่ 2.8 การแตกหักตรงบริเวณที่เป็นอสัณฐาน [3, 10]

3. เกิดการแตกหักของพันธะ β -1,4 glycosidic บนสายโซ่เซลลูโลสในบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (crystalline region) ซึ่งเกิดเมื่อขั้นที่ 2 เกิดเสร็จสมบูรณ์แล้ว

ปัจจัยที่มีผลต่อการไฮโดรไลซ์เซลลูโลสด้วยกรด ได้แก่

1. **ชนิดของกรด** : การไฮโดรไลซ์ด้วยกรดที่แรงจะทำให้พันธะ β -1,4 glycosidic บนสายโซ่เซลลูโลสแตกออกเป็นสายที่สั้นมากๆ และใช้เวลาในการไฮโดรไลซ์น้อยกว่าการใช้กรดอ่อน

2. อุณหภูมิ : การใช้อุณหภูมิสูงทำให้การไฮโดรไลซ์เกิดง่ายขึ้น ได้สายโซ่เซลลูโลสที่สั้นมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.9

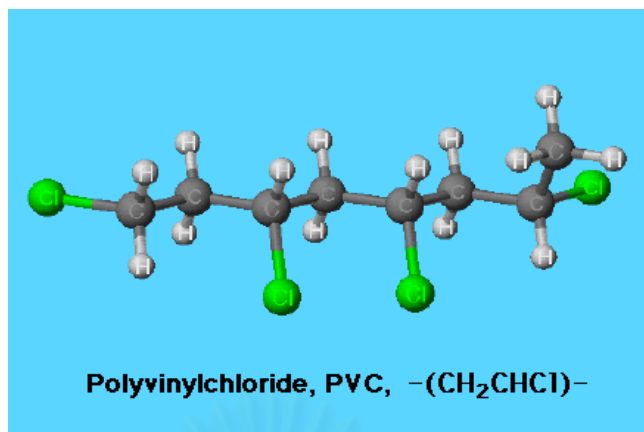


รูปที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิในการไฮโดรไลซ์เซลลูโลสต่อ Degree of polymerization [10]

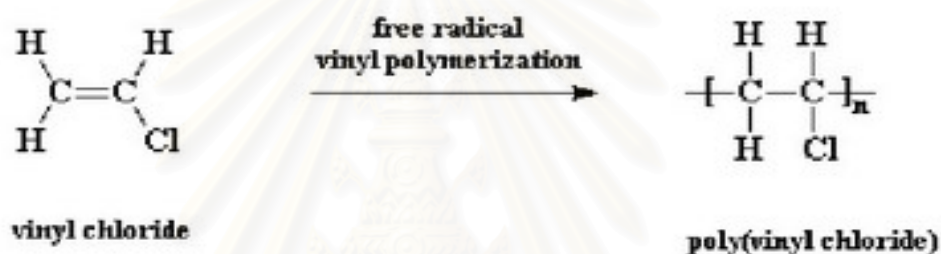
2.5 พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี [Poly(vinyl chloride) or PVC] [17-26]

พีวีซีเป็นพลาสติกที่มีการผลิตเป็นอันดับสองรองจากพอลิเอทิลีน เนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งในด้านงานก่อสร้าง อุปกรณ์ไฟฟ้า ของใช้ในบ้าน งานบรรจุภัณฑ์ งานทำหนังเทียม และงานด้านเกษตรกรรม เป็นต้น นอกจากนี้ อุตสาหกรรมการผลิตฟิล์มพีวีซียังมีบทบาทสำคัญต่อสภาพสังคมและการดำรงชีวิตในปัจจุบัน เพราะสามารถอำนวยความสะดวกทั้งด้านการเกษตร การถนอมอาหาร การห่อสินค้า และทำเป็นสิ่งของเครื่องใช้อื่นๆ อีกมากมาย

พีวีซีเป็นเทอร์โมพลาสติกอสถฐานที่มีความเป็นผลึก 5-10% ซึ่งสามารถผลิตให้มีความเป็นผลึก 35-40% ได้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ($< -25^{\circ}\text{C}$) ซึ่งพีวีซีโดยทั่วไปมีการจับตัวแบบ head-to-tail ดังแสดง ในรูปที่ 2.10 และมีโครงสร้างเป็นอะแทกติก (atactic) แต่ถ้าพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำๆ ความเป็นผลึกจะเพิ่มขึ้น โดยมีโครงสร้างเป็นซินดิโอแทกติก (syndiotactic) มากขึ้น แต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทำเป็นแบบไอโซแทกติก (isotactic) ซึ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของพีวีซี



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พีวีซี

พีวีซีเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแก๊สธรรมชาติและเกลือ โดยแก๊สเอทิลีนทำปฏิกิริยากับคลอรีนที่ได้จากเกลือโซเดียมคลอไรด์ ได้เป็นเอทิลีนไดคลอไรด์ (ethylene dichloride, EDC) แล้วเปลี่ยนต่อไปเป็นไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ (vinyl chloride monomer, VCM) และเมื่อนำ VCM ไปผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะได้ผงพีวีซีที่บริสุทธิ์

พีวีซีที่ยังไม่ได้ใส่สารเติมแต่งใดๆ มีสมบัติดังนี้

- แข็ง เปราะ แตกง่าย เป็นพลาสติกขั้นพื้นฐาน
- ไม่มีสี และใส
- มีความหนาแน่นประมาณ 1.4 g/cm^3
- มี $T_g = 87$ องศาเซลเซียส และ $T_m = 212$ องศาเซลเซียส
- เมื่อติดไฟจะสามารถดับได้ด้วยตัวเอง
- สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนและแสงแดด จึงต้องใส่สารเพิ่มเสถียรภาพ

กระบวนการผลิตพีวีซีเรซินโดยทั่วไป มี 4 แบบ ดังนี้

1. การผลิตแบบแขวนลอย (Suspension polymerization) พีวีซีส่วนใหญ่ถูกผลิตด้วยกระบวนการนี้ และพีวีซีที่ได้มีขนาดเหมาะกับการใช้งานทั่วไป (general purpose) ในระบบของกระบวนการพอลิเมอไรเซชันประกอบด้วย

- น้ำ
- มอนอเมอร์ (VCM) ที่ไม่ละลายน้ำ (water-insoluble monomer)
- สารเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ที่ละลายในมอนอเมอร์ (oil-soluble initiator)
- สารช่วยกระจายตัว (dispersing agent) พร้อมการกวนอย่างรวดเร็ว จะทำให้มอนอเมอร์กระจายเป็นหยดเล็กๆ และป้องกันการรวมตัวของมอนอเมอร์

ปฏิกิริยาเกิดในระบบที่ VCM แขวนลอยอยู่ในน้ำที่เป็นตัวกลาง ลักษณะคล้ายน้ำมันที่ถูกกวนอยู่ในน้ำ โดยน้ำเป็นตัวกลางระบายความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา และปฏิกิริยาจะเกิดภายในหยดมอนอเมอร์ที่อุณหภูมิ 50-90 องศาเซลเซียส จนกลายเป็นอนุภาคของพอลิเมอร์ โดยแต่ละหยดเป็นอิสระต่อกันตลอดปฏิกิริยา และเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็น slurry ที่มีอนุภาคของพีวีซีแขวนลอยในน้ำ และจะตกตะกอนแยกตัวลงอย่างรวดเร็วถ้าไม่มีกวน น้ำถูกกำจัดโดยการกรอง สารช่วยกระจายตัวถูกล้างออกโดยใช้น้ำล้างที่ผิวหน้า พีวีซีที่ได้มีอนุภาคขนาดใหญ่ (40-150 μm) ถ้าจับดูจะเป็นเม็ดที่ไม่ละเอียดมากนัก ใช้ในการขึ้นรูปโดยวิธีการรีดด้วยลูกกลิ้ง (calendering)

2. การผลิตแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) เหมาะกับงานเคลือบ เช่น การทำหนังเทียม ในระบบของกระบวนการพอลิเมอไรเซชันประกอบด้วย

- น้ำ
- มอนอเมอร์ (VCM)
- สารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายน้ำ (water-soluble initiator)
- อิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) เป็นสารลดแรงตึงผิว ซึ่งโครงสร้างมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic)

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชันจะใช้สารอิมัลซิฟายเออร์ทำให้เกิดสารชั้นๆ ภายในถึงปฏิกิริยา เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ลาเท็กซ์ที่ประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ ของพีวีซีกระจายในน้ำ เรียกว่า Primary particle ซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กมาก (ประมาณ 0.2-1.5 μm) เมื่อเทียบกับแบบ

แขวนลอย ถ้านำไปอบแห้งจะได้ผงที่มีลักษณะคล้ายแป้งเด็กเนื้อละเอียด เมื่อผสมกับพลาสติกไฮเซออร์จะได้ paste ลักษณะคล้ายแป้งเปียกข้นๆ ข้อเสีย คือ ความบริสุทธิ์ค่อนข้างต่ำ ค่าใช้จ่ายสูง

3. การผลิตแบบ microsuspension polymerization เป็นเทคนิคกึ่ง emulsion และ suspension ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้มีดังนี้

- ตัวกลางในการแพร่กระจาย : น้ำ
- มอนอเมอร์ : VCM
- อิมัลซิฟายเออร์
- สารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายในมอนอเมอร์

วัตถุดิบทั้งหมดจะถูกผสมในหม้อนึ่งอัดไอ (autoclave) ที่เตรียมไว้สำหรับการผสม ซึ่งใช้แรง กัดเพื่อที่จะได้หยด VCM ที่มีขนาดเล็กมากๆ ในน้ำ (ขนาด 0.05-1.5 μm) ซึ่งภายในหยดมอนอเมอร์ จะมีสารเริ่มปฏิกิริยาละลายอยู่ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ลาเท็กซ์ซึ่งมีการกระจายขนาดของ primary particle ที่สม่ำเสมอขนาดประมาณ 0.05 -1.5 μm

4. การผลิตแบบบัลค์ (Bulk polymerization) ตอนเริ่มต้นจะมีเพียงมอนอเมอร์และสารเริ่มปฏิกิริยาเท่านั้น เป็นวิธีแบบง่ายๆ ผลผลิตที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง และไม่มีสารอื่นเจือปน หากแต่มีข้อเสีย คือ ควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ยาก ซึ่งเมื่อเกิดพอลิเมอร์มากขึ้นทำให้มีความหนืดสูง เป็นผลทำให้ความสามารถในการระบายความร้อนลดลง นอกจากนี้ยังควบคุมขนาดของพีวีซีได้ยาก และการกำจัด VCM ที่เหลือตกค้างทำได้ยาก

พีวีซีที่ได้เป็นผงสีขาว ยังไม่เหมาะกับการใช้งาน จำเป็นต้องปรับปรุงให้มีความทนความร้อน เพราะเมื่อได้รับความร้อนระดับ 150-200 องศาเซลเซียส ในระหว่างการขึ้นรูปจะแตกสลายได้ง่าย และเปลี่ยนจากสีขาวเป็นเหลือง ส้ม น้ำตาล และดำ ซึ่งสามารถแก้ไขด้วยการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพความร้อน (heat stabilizer) เพื่อให้พีวีซีคงสภาพ เมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานานๆ ในระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้ ยังมีการใช้สารเติมแต่งอื่นๆ เพื่อปรับสมบัติของพีวีซีให้ได้ตามต้องการ

การผสมพีวีซีกับสารเติมแต่งอื่นๆ เรียกว่า “compounding” และเม็ดพีวีซีที่ได้เรียกว่า “PVC compound” ซึ่งประกอบด้วย

- พีวีซีเรซิน
- สารเพิ่มเสถียรภาพหรือสเตบิไลเซอร์
- พลาสติไซเซอร์
- สารหล่อลื่น
- ผงสี หรือสีสำเร็จรูป
- อื่นๆ เช่น สารหน่วงไฟ และสารเพิ่มความต้านแรงกระแทก เป็นต้น

พีวีซีเรซิน (PVC resin)

เป็นผงละเอียดสีขาวคล้ายผงซักฟอก การแบ่งเกรดพีวีซีเรซิน จะแบ่งตามความหนืดเมื่อละลายในตัวทำละลาย ซึ่งโดยมากใช้ cyclohexanone แล้ววัดความหนืด โดยมีมาตรฐานกำหนดค่าแทนความหนืด เรียกว่า “K value” ซึ่งเป็นตัวเลขไม่มีหน่วย แต่มีตารางเปรียบเทียบ K-value กับค่าความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity) ค่า K เป็นค่าที่ชี้ให้เห็นถึงน้ำหนักโมเลกุลและคำนวณได้จากสูตรซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity) ดังนี้ [19]

$$(\text{Log } \eta_{\text{rel}})/C = 75K^2/(1 + 1.5 KC) + K$$

โดย η_{rel} = ความหนืดสัมพัทธ์
C = ความเข้มข้นของสารละลาย

ถ้าพีวีซีเรซินมีค่า K สูง แสดงว่ามีน้ำหนักโมเลกุลสูง ถ้าค่า K ต่ำ จะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งค่า K ยังแสดงถึงคุณสมบัติที่จะใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วย กล่าวคือ ถ้ามีค่า K สูง ต้องใช้คุณสมบัติสูงในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และค่า K ยังบอกถึงความนิ่มแข็ง และความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์อีกด้วย ถ้ามีค่า K สูง ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงสูงและมีความนิ่มน้อย ถ้ามีค่า K ต่ำ จะมีความแข็งแรงต่ำ และมีความนิ่มมาก ซึ่งการแบ่งพีวีซีเรซินตามค่า K จะเป็นดังนี้

พีวีซีเรซินที่มีค่า K ต่ำ	คือ ต่ำกว่า 60
พีวีซีเรซินที่มีค่า K ปานกลาง	คือ 60-70
พีวีซีเรซินที่มีค่า K สูง	คือ ตั้งแต่ 70 ขึ้นไป

ในการขึ้นรูปพีวีซีเรซินนั้น ค่า K มีความสำคัญ เพราะถ้าผลิตภัณฑ์เป็นพีวีซีชนิดแข็ง (rigid PVC) จะเลือกใช้พีวีซีที่มีค่า K 59-60 เพราะต้องการค่า K สูงพอที่จะให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มี

ความแข็งแรง แต่ถ้าค่า K สูงมากกว่านี้จะขึ้นรูปไม่ได้ เพราะพีวีซีชนิดแข็งจะไม่มีสารใส่พลาสติกไซเซอร์ลงไป หรือถ้าใส่ก็จะน้อยมาก ซึ่งทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปสูง และทำให้มีแรงเค้นเกิดขึ้นมาก จะทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัว (decompose) เสียก่อน ส่วนพีวีซีชนิดยืดหยุ่น (flexible PVC) มีการใช้พีวีซีเรซินที่มีค่า K ต่างกันไปอีก ทั้งนี้ขึ้นกับว่าต้องการนำพีวีซีเรซินไปทำผลิตภัณฑ์ประเภทไหน ถ้าต้องการนำไปทำชั้นฟองน้ำ จะใช้พีวีซีเรซินที่มีค่า K ต่ำ คือ ประมาณ 60 เพราะชั้นฟองน้ำไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก แต่ต้องการความนิ่มมาก และต้องการให้พีวีซีเรซินหลอมตัวพอดี ซึ่งพีวีซีเรซินที่มีค่า K อยู่ระหว่าง 55-70 จะนิยมใช้งานกันมาก เนื่องจากมีความแข็งแรงพอเหมาะและสามารถขึ้นรูปได้ง่าย

สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) [21]

เป็นสารเติมแต่งซึ่งผสมกับพีวีซีเรซิน เพื่อปรับปรุงให้สามารถทนความร้อน (heat stabilizer) และแสง (light stabilizer) โดยเฉพาะความร้อนในระหว่างการผลิต และรังสีอัลตราไวโอเล็ตในแสงอาทิตย์ ซึ่งมีพลังงาน (71-95 kJ/mol) เพียงพอที่จะทำให้พันธะ C-C, C-Cl, C-H แตกออก ซึ่งพีวีซีจะสลายตัวโดยสูญเสียอะตอมของคลอรีนไปเป็น HCl (แก๊สของกรดเกลือ) และถ้าสูญเสียมากๆ จะค่อยๆ เป็นสีเหลือง → น้ำตาล → ดำ การป้องกันทำได้โดยเติมสารเพิ่มเสถียรภาพพวกเกลือของโลหะหนัก (heavy metal) หรือสบู่ของโลหะหนัก (heavy metal soap) เป็นตัวจับ HCl ที่หลุดออกจากโมเลกุล ทำให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งมีให้เลือกหลายชนิดตามราคา และความปลอดภัยในการใช้ ได้แก่ สารประกอบตะกั่ว ดีบุก และกลุ่มแคลเซียม แบเรียม แคลเซียม เช่น Ca-stearate, Zn-stearate, tribasic lead sulphate ปริมาณการใช้สารเพิ่มเสถียรภาพในสูตรจะประมาณ 1-5%

พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizer) [21, 22]

เป็นสารช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพีวีซี และทำให้ T_g ลดต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง โดยเข้าไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพีวีซี ทำให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น พลาสติกไซเซออร์ต้องมีจุดเดือดสูงเพื่อไม่ให้ระเหยได้ง่าย และต้องเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ พลาสติกไซเซออร์แท้หรือพลาสติกไซเซออร์ปฐมภูมิ (true plasticizer or primary plasticizer) และ พลาสติกไซเซออร์เสริมหรือพลาสติกไซเซออร์ทุติยภูมิ (secondary plasticizer)

พลาสติกไซเซออร์ปฐมภูมิ (true plasticizer or primary plasticizer) สามารถแบ่งเป็นหลายประเภท ดังนี้ :

1. ฟทาเลตเอสเทอร์ (Phthalate ester) นิยมใช้กันมาก (มากกว่า 50%) ในพีวีซีได้แก่

- ได-2-เอทิลเฮกซิลฟทาเลต [Di(2-ethylhexyl) phthalate, DEHP หรือ Dioctyl phthalate, DOP] เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดกับพีวีซี เนื่องจากมีอัตราการระเหยปานกลาง, มีเสถียรภาพทางความร้อนและความทนน้ำดี และช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความอ่อนตัว ณ อุณหภูมิต่ำได้ดี แต่มีผลอ่อนๆ ต่อการทำให้เกิดโรคมะเร็ง

- ไดไอโซนิลฟทาเลต (Di-isononyl phthalate, DINP) เมื่อเปรียบเทียบกับ DOP สารชนิดนี้มีการรวมตัวกับพีวีซีได้ต่ำกว่า และทำให้ผลิตภัณฑ์มีความอ่อนตัว ณ อุณหภูมิต่ำกว่า แต่การระเหยน้อยกว่าและความหนาแน่นต่ำกว่า จึงทำให้ DINP ที่ผลิตส่วนใหญ่สามารถนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร

- บิวทิลเบนซิลฟทาเลต (Butyl benzyl phthalate, BBP) เมื่อเปรียบเทียบกับ DOP สารชนิดนี้มีการรวมตัวกับพีวีซีได้ดีมาก มีอัตราการระเหยต่ำกว่า DBP และประสิทธิภาพต่ำกว่า DOP

- ไดบิวทิลฟทาเลต (Dibutyl phthalate, DBP) การรวมตัวกับพีวีซีและอนุพันธ์ของเซลลูโลส แต่การระเหยค่อนข้างง่าย จึงมีข้อจำกัดในการนำไปใช้

- ไดไอโซดีซิลฟทาเลต (Di-isodecyl phthalate, DIDP) เมื่อเปรียบเทียบกับ DOP สารชนิดนี้มีการรวมตัวกับพีวีซีได้ต่ำกว่า แต่การระเหยน้อยกว่า

2. พลาสติกไซเซออร์ชนิดในผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature type plasticizer) คือ จะให้ความยืดหยุ่นแม้ที่อุณหภูมิต่ำได้แก่ พวกอะลิฟติกไดคาร์บอซิลิก แอซิลิกเอสเทอร์ เช่น อะดิเพต (adipates)

3. พลาสติไซเซอร์ชนิดพิเศษ Special plasticizer ได้แก่

3.1 ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate ester) เช่น ไตรครีซิลฟอสเฟต tricresyl phosphate (มีพิษและราคาแพง)

3.2 พอลิเมอร์พลาสติไซเซอร์ (Polymeric plasticizer) ซึ่งให้สมบัติ inextractable (ถูกสกัดออกไม่ได้)

พลาสติไซเซอร์เสริมหรือพลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (secondary plasticizer) หรือ เอกซ์เทนเดอร์ (extenders) เป็นสารที่ช่วยลดต้นทุนการผลิต ได้แก่

- อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbon)
- คลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated Hydrocarbons)
- อีพอกซีพลาสติไซเซอร์ (Epoxy plasticizer)

สารหล่อลื่น (Lubricant) [20, 23]

เป็นสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปในพีวีซีเรซิน เพื่อป้องกันไม่ให้พีวีซีติดกับผนังของเครื่องจักร ในขณะที่ผ่านกระบวนการผลิต ช่วยลดความเสียดทาน (friction) ช่วยให้ไหลง่ายขึ้น มีความสำคัญมากกับงานอัดรีด (extrusion) นอกจากนี้ยังหล่อลื่นระหว่างเนื้อพีวีซีกับพีวีซีด้วยตัวเอง เพื่อควบคุมอัตราการหลอมตัว และควบคุมการไหลของพีวีซีในเครื่องจักร สารเพิ่มเสถียรภาพบางชนิดทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นใน PVC compound ได้ด้วย

สารหล่อลื่นแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

- สารหล่อลื่นภายใน (internal lubricant) ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุล
- สารหล่อลื่นภายนอก (external lubricant) ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลและเครื่องจักรที่พีวีซีไหลผ่าน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารตัวเติมหรือฟิลเลอร์ (Filler) [22, 24]

เป็นสารเติมแต่งที่เป็นของแข็งที่ใช้ใส่ในพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนการผลิตหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ ซึ่งฟิลเลอร์ที่ใช้เพื่อเพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนการผลิตเป็นหลักเรียกว่า เอกซ์เทนเดอร์ (extender) หรือ inert filler ส่วนฟิลเลอร์ซึ่งใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลหรือสมบัติอื่นๆ เช่น การนำไฟฟ้า, การนำความร้อน เรียกว่า ฟังก์ชันแนลฟิลเลอร์ (functional fillers) หรือ active filler และฟิลเลอร์เสริมแรง เรียกว่า (reinforcing filler or reinforcement)

ฟิลเลอร์ที่ใช้ในพอลิไวนิลคลอไรด์

- แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) มีความหนาแน่นประมาณ 2.7 g/cm^3 ซึ่งอาจมีชนิดที่เคลือบด้วย stearic acid ไขมันผิว (เรียกว่า activated whiting) การเติม calcium carbonate มากเกินไปเพื่อลดต้นทุนการผลิต จะทำให้คุณภาพของท่อพีวีซีต่ำลง โดยเฉพาะสมบัติทางกายภาพจะเสียไป

- เคาลิน (Kaolin) เป็น aluminium silicate (มีความหนาแน่นประมาณ 2.2 g/cm^3) ส่วนใหญ่ใช้กับพีวีซีที่ทำฉนวนหุ้มสายไฟ

- ซิลิกา (silica) มีความหนาแน่น $2.2\text{-}2.3 \text{ g/cm}^3$.มีสมบัติช่วยในการเสริมแรง, เพิ่มความเสถียรภาพทางรูปร่างอุณหภูมิสูง, ช่วยลดการหดตัวและเกิดรอยแตก, ช่วยเพิ่มสมบัติทางความร้อน

- ทัลค์ (talc) มีความหนาแน่น $2.5\text{-}2.8 \text{ g/cm}^3$ เป็น magnesium silicate มีสมบัติช่วยในการเสริมแรง , มีสมบัติผลกัน้ำ (repellency) และ ลื่น (good slip property) , ช่วยเพิ่มความเฉื่อยต่อเคมีภัณฑ์, ความร้อนและความชื้น

- ไยหิน (asbestos) มีความหนาแน่น $2.2\text{-}2.3 \text{ g/cm}^3$ เป็น Ca/Mg silicate มีสมบัติช่วยในการเสริมแรง ,เพิ่มความเสถียรภาพทางรูปร่างอุณหภูมิสูง

- วอลลาสโทไนต์ (Wollastonite, CaSiO_3) มีความหนาแน่น 2.9 g/cm^3 มีสมบัติช่วยในการเสริมแรง ,เพิ่มความเสถียรภาพทางรูปร่างอุณหภูมิสูง และมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

- คาร์บอนแบล็ก (Carbon black) มีความหนาแน่น $2.04\text{-}2.25 \text{ g/cm}^3$ มีสมบัติช่วยในการเสริมแรง, ช่วยเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้า และมีความสามารถในการดูดกลืนแสงยูวีได้

- อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium Hydroxide) มีความหนาแน่น 2.4 g/cm^3 ช่วยเพิ่มสมบัติทนไฟ

- ผงไม้ ช่วยลดต้นทุนการผลิต ลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์และเพิ่มความตึงผิว

ผงสีหรือสีสำเร็จรูป (pigment or dye) [20]

ผสมในพีวีซีเพื่อให้มีสี เนื่องจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์ท่อพีวีซีแข็งของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดสีตามประเภทของการใช้งาน เช่น สีฟ้า สีเหลือง และสีเทา เป็นต้น นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์พีวีซีอื่นๆ ก็ผสมผงสีเพื่อให้มีสีตามต้องการ ซึ่งจะแบ่งเป็น ผงสีอินทรีย์ (Organic pigment) และผงสีอนินทรีย์ (Inorganic pigment) เช่น TiO_2 ให้สีขาวและช่วยให้ทึบแสง ช่วยให้ใช้งานกลางแจ้งได้

การผสมผง PVC กับสารเติมแต่งต่างๆ มีด้วยกัน 3 แบบ ดังนี้

1. **Compound** มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกระบอกหรือลูกบาศก์เล็กๆ ที่ได้จากการผสมผงพีวีซีและสารเติมแต่งต่างๆ แล้วป้อนเข้าเครื่องอัดรีด และตัดเป็นชิ้นเล็กๆ
2. **Premix** เป็นของผสมที่มีลักษณะเป็นผงขึ้น เกิดจากการผสมเรซินและสารเติมแต่งโดยใช้ mixer กวนด้วยความเร็วสูง
3. **Paste** หรือ **plastisol** มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด ผงพีวีซีที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นประเภท emulsion PVC ผสมกับพลาสติกไซเซออร์ และสารเติมแต่งอื่นๆ เพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน

นับตั้งแต่เริ่มค้นพบ VCM ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกพีวีซี และวิวัฒนาการของกระบวนการการผลิตพีวีซีจนปัจจุบัน พีวีซีได้ถูกนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย โดยสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ตามวิธีการขึ้นรูปได้ดังนี้ [24]

1. **ผลิตภัณฑ์จากการอัดรีด (Extrusion) :** การอัดรีดจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ยาวต่อเนื่องกัน โดยมีเกลียวทำการอัดหลอม และดันผ่านหัวได (die) รูปทรงต่างๆ ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด (extruder) ได้แก่ ท่อน้ำ ท่อประปา หลอด กรอบประตูและหน้าต่าง กรอบสำหรับตกแต่ง (edging profile) ฉนวนและเปลือกนอกหุ้มสายไฟฟ้า ฉนวนหุ้มสายโทรศัพท์ फिल्मยืด (stretch film) สำหรับห่ออาหาร เป็นต้น นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นยังสามารถนำไปขึ้นรูปต่อด้วยความร้อน แล้วอัดเข้าแม่แบบด้วยแรงกลสุญญากาศ หรือลมอัด ได้แก่ แผ่นลอนใสมุงหลังคา และแผ่นเสียง เป็นต้น
2. **ผลิตภัณฑ์จากการฉีดแบบ (Injection molding) :** พีวีซีจะถูกหลอมและดันผ่านหัวฉีดเข้าไปในแม่แบบ และถอดแบบออกเมื่อชิ้นงานแข็งตัว ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยวิธีนี้ ได้แก่ ข้อต่อท่อ (fitting) ชิ้นส่วนปั๊ม เครื่องใช้ในบ้านและสำนักงาน รองเท้า เป็นต้น

3. **ผลิตภัณฑ์จากการเป่าแบบ (Blow molding)** : พีวีซีจะถูกอัดรีดเป็นสายท่อ (parison) เข้าไปภายในแม่แบบกลวงสองฝาประกบกัน ซึ่งสายท่อจะพองโตเต็มช่องว่างของแม่แบบ ผลิตภัณฑ์จากการเป่าแบบ ได้แก่ ขวดพีวีซีสำหรับใส่น้ำมันพืช แชมพู น้ำดื่ม และของเหลวอื่นๆ

4. **ผลิตภัณฑ์จากการรีดแผ่นด้วยลูกกลิ้ง (Calendering)** : การอัดรีดแผ่นด้วยลูกกลิ้งร้อน 2 ตัว หรือมากกว่า เพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีความหนาตามต้องการ ผลิตภัณฑ์จากการอัดรีดแผ่นด้วยลูกกลิ้ง ได้แก่

- soft film/sheet ได้แก่ แผ่นพลาสติกทั้งแบบใส ชุ่น และแบบสี ใช้ในการบรรจุบ่อน้ำเพื่อการชลประทาน ผ้าปูโต๊ะ ห่อปกหนังสือ หรือนำไปตัดเย็บเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เสื้อกันฝน เสื้อผ้า ม่านห้องน้ำ ฯลฯ หรือนำไปอัดเป็นชั้น (laminating) เช่น เสื้อน้ำมัน เป็นต้น

- rigid film/sheet คือ แผ่นพลาสติกแบบแข็ง ส่วนใหญ่จะใส ใช้หุ้มแผ่นสินค้าให้สวยงาม หรือทำบรรจุภัณฑ์โดยใช้ความร้อนและแรงอัด หรือสูญญากาศ (thermoforming)

- artificial leather คือ การเคลือบผิวหน้าผ้าด้วยพีวีซี

5. **ผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปด้วยแรงเหวี่ยง (Rotational molding)** : ใช้เตรียมผลิตภัณฑ์ที่กลวง โดยจะหมุนแม่แบบใน 2 ทิศทาง อย่างสม่ำเสมอ จะได้ผลิตภัณฑ์ที่กลวง เช่น ตู๊กตา ลูกบอล ภาชนะต่างๆ ถังน้ำมัน และถังใส่น้ำแข็ง เป็นต้น

6. **ผลิตภัณฑ์จากการเคลือบผิว (Coating)** : เป็นการเคลือบพลาสติกให้ติดกับ substrate ด้วยการทา โดย substrate จะเคลื่อนที่อยู่ภายใต้เหล็กปาดซึ่งจะเกลี่ยทา paste PVC ให้เคลือบติดกับ substrate อย่างสม่ำเสมอ ซึ่ง substrate อาจเป็นผ้า โยสังเคราะห์ หรือกระดาษ เช่น ผนังเทียม ผ้าใบ วอลล์เปเปอร์ (wall paper) หรืออาจเคลือบผิวโลหะก็ได้ การเคลือบผิวอีกวิธีหนึ่งทำได้โดยการจุ่ม (dip coating) โดย substrate จะจุ่มลงไปในอ่างพีวีซีเหลว ผลิตภัณฑ์ลักษณะนี้ เช่น ถุงมือ และโลหะเคลือบ นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปพ่นเคลือบผิวโลหะ (spraying) ได้ดังที่ใช้ในการพ่นใต้ท้องรถกันสนิม

พีวีซีโดยทั่วไปมี 2 เกรด คือ พีวีซีชนิดแข็ง (rigid PVC) และพีวีซีชนิดยืดหยุ่น (flexible PVC) โดยพีวีซีชนิดแข็งจะถูกใช้ทำเป็นแผ่น ท่อ กรอบหน้าต่าง และชิ้นส่วนต่างๆ ส่วนพีวีซีชนิดยืดหยุ่นได้จากการใส่พลาสติกไซเซอร์เข้าไปในพีวีซี หรือที่เรียกว่า พลาสติกไซด์พีวีซี (plasticized PVC) ใช้ทำฉนวนหุ้มสายไฟ ผนังเทียมหุ้มเบาะเก้าอี้ ทำกระเป๋า กระเบื้องยางปูพื้น ฟิล์ม กระดาษปิดผนัง และสายยาง เป็นต้น ตารางที่ 2.4 แสดงลักษณะเด่นของพีวีซีชนิดแข็งและชนิดยืดหยุ่น

ตารางที่ 2.4 ลักษณะเด่นของพีวีซีชนิดแข็งและชนิดยืดหยุ่น [26]

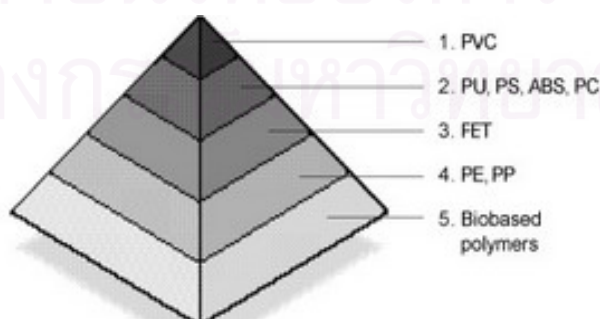
พีวีซีชนิดแข็ง	พีวีซีชนิดยืดหยุ่น
1. ด้านทานการกัดกร่อน สารเคมี น้ำมัน และอากาศ	1. ทนทานต่อสภาวะดินฟ้าอากาศ
2. ผลิตง่าย	2. ป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน
3. น้ำหนักเบา (1/5 เท่า ของเหล็ก หรือ 1/10 เท่าของตะกั่ว)	3. นิ่มและหักงอได้
4. ชะลอการติดไฟและไม่ติดไฟด้วยตัวเอง	4. ทนทานต่อการฉีกขาด
5. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก	5. มีความยืดหยุ่นดีเยี่ยม
6. ทาสีง่ายและพิมพ์สีต่างๆ ได้มากมาย	6. มีความใสและเป็นมันวาว
7. สามารถเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีความใส กึ่งใส หรือทึบแสงได้ตามแต่การนำไปใช้งาน	

ในการเลือกใช้พีวีซีคุณภาพต่างๆ นั้น โดยทั่วไปแล้ว ผู้ใช้มักคำนึงถึงสมบัติพื้นฐาน เช่น ค่า K ความหนาแน่น และขนาดอนุภาค เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์และกระบวนการขึ้นรูป ทั้งนี้ยังมีสมบัติสำคัญอีกประการหนึ่ง ซึ่งผู้ผลิตที่เกี่ยวข้องกับอาหารและยาโดยตรงจะทราบดี นั่นคือ ปริมาณมอนอเมอร์ตกค้าง (residual VCM) ซึ่งผู้ผลิตพีวีซีต้องควบคุมให้มีปริมาณต่ำกว่า 1 ppm ก่อนส่งมอบให้แก่ผู้ทำการขึ้นรูป ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ทั้งในด้านความปลอดภัยและด้านสิ่งแวดล้อม

ในมาตรฐาน European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM) ซึ่งผู้ผลิตพีวีซีในกลุ่มยุโรปกำหนดมาตรฐานการควบคุมปริมาณมอนอเมอร์ตกค้างในผงพีวีซี คือ

- ไม่เกิน 5 ppm สำหรับพีวีซีที่ใช้ทั่วไป
- ไม่เกิน 1 ppm สำหรับพีวีซีที่เกี่ยวข้องกับอาหารและยา

เนื่องจากพีวีซีเป็นพอลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบของคลอรีนและสารเติมแต่งที่ปริมาณสูง จึงทำให้เป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบพีวีซีกับพอลิเมอร์อื่นๆ ในการเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

การรีไซเคิลผลิตภัณฑ์พีวีซีที่ยังมีขอบเขตจำกัดมาก เนื่องจากจะมีการปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์เมื่อได้รับความร้อนซึ่งทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจอย่างรุนแรง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำผลึกเซลลูโลสระดับจุลภาคที่เตรียมได้จากการไฮโดรไลซ์เศษผ้าฝ้ายที่ได้จากโรงงานตัดเย็บเสื้อผ้าสำเร็จรูปด้วยกรดไฮโดรคลอริกมาใช้เป็นสารตัวเติมแต่งในพลาสติกพีวีซี เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายพีวีซีด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

2.6 การผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคในพลาสติก [5]

การผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคในพลาสติกที่นิยมใช้กันมี 2 วิธี คือ

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

2.6.2 การผสมทางกายภาพ (Physical blending) เช่น การผสมด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill)

เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง เป็นเครื่องผสมระบบเปิด ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก วางในแนวนอน สามารถปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งได้ตามต้องการ บริเวณหัวท้ายของลูกกลิ้งมีแผ่นยึด (guide) ช่วยควบคุมปริมาณพลาสติกในขณะผสม และช่วยกันไม่ให้พลาสติกเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ปลายลูกกลิ้ง ซึ่งลูกกลิ้งที่ขับเคลื่อนพลาสติกทำจากเหล็กหล่อที่มีผิวหน้าเรียบ อีกทั้งต้องมีระบบหล่อเย็นโดยจะผ่านน้ำเข้าไปในกลิ้งเพื่อป้องกันไม่ให้พลาสติกไหม้ และในการทำงานนั้นลูกกลิ้งทั้งสองจะหมุนเข้าหากัน โดยขนาดและความเร็วของลูกกลิ้งจะมีผลต่อการกระจายตัวของผลึกเซลลูโลสระดับจุลภาคในพลาสติก ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของพลาสติก

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเศษผ้าฝ้ายมาทำการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเพื่อเตรียมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ได้แก่ งานวิจัยของ Battista และคณะ [2] ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการไฮโดรไลซิสและการเกิดผลึกของเซลลูโลส โดยเน้นการหาผลของเวลาที่ใช้ในการทดลองต่อน้ำหนักที่สูญหายไปและระดับของการเกิดผลึกของเซลลูโลส โดยใช้ภาวะการทดลองทั้งแบบที่ไม่รุนแรง (กรดไฮโดรคลอริก 5.0 N ที่อุณหภูมิ 5, 18 และ 40 องศาเซลเซียส) และภาวะที่รุนแรง (กรดไฮโดรคลอริก 2.5 และ 5.0 N ที่จุดเดือด) กับชิ้นทดลองที่ได้จากฝ้ายบริสุทธิ์ ฝ้ายที่ผ่านการฟอกสี เยื่อไม้ และเรยอน ซึ่งเขาพบว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.5 N ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เป็นภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพส่วนใหญ่เป็นการใช้แป้งหรือแป้งดัดแปรเป็นสารตัวเติมในพลาสติก ได้แก่ งานวิจัยของ Sung และคณะ [3] ซึ่งได้ทดลองเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมแป้งข้าวโพดประมาณ 5% โดยน้ำหนัก โดยฟิล์มที่เตรียมได้มี 2 แบบ คือ แบบที่ใส่และไม่ใส่สารเติมแต่งประเภท prooxidant ซึ่งการใช้แป้งเพื่อเร่งการย่อยสลายทางชีวภาพทำโดยใช้สารละลาย *Bacillus* sp. α -amylase ขณะที่การย่อยสลายพอลิเอทิลีนด้วยปฏิกิริยา ออกซิเดชันถูกเร่งด้วยการบ่มฟิล์มพอลิเอทิลีน/แป้งในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ผลของการย่อยสลายแสดงในรูปของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี โดยการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึง การยืดตัว และตรวจสอบด้วยเทคนิค GPC, IR และ SEM ซึ่งจากการทดลอง พบว่า ฟิล์มที่ไม่ใส่สาร prooxidant มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อได้รับความร้อน ส่วนฟิล์มที่ใส่สาร prooxidant จะสูญเสียสมบัติทางกายภาพหลังจากให้ความร้อนเป็นเวลา 20 วัน ส่วนการตรวจสอบการสลายตัวทางชีวภาพ พบว่า แป้งถูกย่อยสลายไป 10 ถึง 50% โดยน้ำหนักของปริมาณแป้งเริ่มต้น ซึ่งแป้งที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วย α -amylase มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิเอทิลีน โดยจุดประสงค์ของการพัฒนา PE-starch blend ก็เพื่อเพิ่มการย่อยสลายของพอลิเอทิลีนเมื่อถูกทิ้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งการย่อยสลายแป้งในระยะแรกจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของฟิล์ม เพื่อให้ไซโมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการขาดออกด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตามด้วยการย่อยด้วยเชื้อจุลินทรีย์อีกครั้ง และจากงานวิจัยนี้และงานวิจัยของผู้อื่น พบว่า ประมาณ 10% โดยน้ำหนักของแป้งที่อยู่ในฟิล์มสูญหายไปด้วยการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งส่วนใหญ่แป้งที่ใส่เข้าไปในฟิล์มจะมากที่สุดประมาณ 10% และการใส่แป้งมากถึง 25% ไม่มีผลทำให้แป้งถูกย่อยสลายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การใส่สาร prooxidant มีความจำเป็นเพราะจะกระตุ้นให้ PE เกิดการย่อยสลาย จึงอาจกล่าวได้ว่าทั้ง prooxidant และแป้งช่วยเสริมให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้น

Mothe และคณะ [4] ได้ทดลองเตรียมพอลิเมอร์ผสมจากเอทิลีนไวนิลอะซีเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) ที่เหลือทิ้งในโรงงานทำรองเท้ากับพอลิแซกคาไรต์ด้วยวิธีผสมแบบหลอมเหลว (melt blending) บนลูกกลิ้งซึ่งหมุนด้วยความเร็ว 20 รอบ/นาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA, DTG และ DSC ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ทั้งก่อนและหลังจากฟิล์มถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ แล้วรายงานผลในด้านเสถียรภาพทางความร้อน และความสามารถในการถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าฟิล์ม EVA ที่เติมพอลิแซกคาไรต์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์อย่างเห็นได้ชัด

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเป็นสารเติมแต่งในพลาสติก ได้แก่ งานวิจัยของ มุกิตา พงษ์มาลา และคณะ [6] ซึ่งได้ทดลองเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยใช้เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมจากการไฮโดรไลซ์กระดาษที่ผ่านการถ่ายเอกซาร์แล้ว ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.5 N ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เป็นสารตัวเติมในฟิล์ม LDPE ปริมาณ 10-50 phr พบว่า เมื่อปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่ได้มีความต้านแรงดึงและการยืดตัวลดลง ในขณะที่การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงมีแนวโน้มที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม

Helbert และคณะ [7] ได้ทดลองใช้เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่มีขนาดอนุภาคประมาณ $5 \times 150-300$ nm ที่เตรียมได้จากฟางข้าวสาลีเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกเมทริกซ์ โดยการใช้เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค 0-30% โดยน้ำหนัก สารแขวนลอยของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคในน้ำถูกผสมกับลาเท็กซ์ของ poly(styrene-co-butyl acrylate) แล้วทำให้แห้งด้วยการแช่แข็งในแม่แบบ จากการทดลองพบว่า เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเหล่านี้มีผลต่อการเสริมแรงที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (T_g) ของเมทริกซ์เป็นอย่างมาก และยังช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้อีกด้วย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมี

1. เศษผ้าฝ้ายดิบ จากบริษัท K World Textile จำกัด
2. เส้นใยรามี่ จากส่วนอุตสาหกรรมสิ่งทอ กระทรวงอุตสาหกรรม
3. พีวีซีคอมพาวด์ จากบริษัทไทยนามพลาสติก จำกัด
 - พีวีซีเรซิน
 - ไดไอโซไนลฟทาเลต (Di-isononylphthalate, DINP) เป็นพลาสติกไฮเซอรัปรูมภูมิ
 - พลาสติกไฮเซอรัปติยภูมิ
 - เกลือโลหะ Ca/Zn เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน
 - สารหล่อลื่น
4. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.25 N (AR Grade จากบริษัท J.T. Baker)
5. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5
6. น้ำกลั่น

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาค

1. อุปกรณ์เครื่องแก้ว
2. เทอร์โมมิเตอร์
3. แท่นให้ความร้อน (hot plate)
4. กระดาษลิตมัส
5. เดซิเคเตอร์
6. ตู้อบ
7. เครื่องบดละเอียด ของ Fritsch รุ่น 14.702

3.3 เครื่องมือขึ้นรูปฟิล์มพีวีซี

1. เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-rolls mill, ของ Lab Tech รุ่น LRM 110)

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) ของ Bruker รุ่น D8
2. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) ของ Nicolet รุ่น Impact 400D
3. เครื่อง Universal Testing Machine ของ LLOYD รุ่น LR 100K plus
4. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ของ METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851°
5. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) ของ METTLER TOLEDO รุ่น DSC822°
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400
7. เครื่องเลเซอร์ไลท์สแกทเทอริง (Laser Light Scattering) ของ Malvern รุ่น Master-sizer S

3.5 ขอบเขตการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ

- การเตรียมเซลล์โอสแบบผลึกระดับจุลภาคจากเศษผ้าฝ้าย
- การวิเคราะห์เซลล์โอสแบบผลึกระดับจุลภาค
- การขึ้นรูปฟิล์มพีวีซีผสมเซลล์โอสแบบผลึกระดับจุลภาค
- การทดสอบสมบัติของฟิล์มพีวีซีผสมเซลล์โอสแบบผลึกระดับจุลภาค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.1 การเตรียมเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาค

3.5.1.1 การเตรียมเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาคจากเศษผ้าฝ้าย

1. นำเศษผ้าฝ้ายดิบที่ได้ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ประมาณ 1×2 เซนติเมตร
2. ชั่งเศษผ้าฝ้ายดิบที่ตัดแล้ว และนำมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.5 นอร์แมล ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
3. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
4. กรองเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
5. นำเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่ผ่านการอบแล้วไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด
6. นำเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่ผ่านการบดแล้วไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาร้อยละของเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่ไฮโดรไลซ์ได้ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

3.5.1.2 การเตรียมเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาคจากเส้นใยรามี

1. นำเส้นใยรามี นำมาไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.5 นอร์แมล ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
2. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
3. กรองเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
4. นำเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่ผ่านการอบแล้วไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด
5. นำเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่ผ่านการบดแล้วไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาร้อยละของเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่ไฮโดรไลซ์ได้ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

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

เมื่อ

$$W_0 = \text{น้ำหนักเศษผ้าฝ้ายดิบหรือเส้นใยรามีที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์}$$

$$W_1 = \text{น้ำหนักเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่ได้จากการไฮโดรไลซ์}$$

3.5.2 การวิเคราะห์เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค

3.5.2.1 วิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (IR)

นำเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้ไปอัดเม็ดกับผงโปแตสเซียมโบรไมด์ (KBr) แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยทั่วไปอินฟราเรดสเปกตรัมทั้งของเซลลูโลส และเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคจะปรากฏแถบการดูดกลืนในช่วงความถี่ $3600\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ และช่วง $1600\text{--}850\text{ cm}^{-1}$ ดังนั้นในการวิเคราะห์สามารถทำได้โดยดูแถบการดูดกลืนในช่วงความถี่ดังกล่าว (แสดงว่าเป็นเซลลูโลส I หรือ II) โดยเปรียบเทียบกับความถี่ในตารางที่ 2.3



รูปที่ 3.1 เครื่อง FT-IR ของ Nicolet รุ่น Impact 400D

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

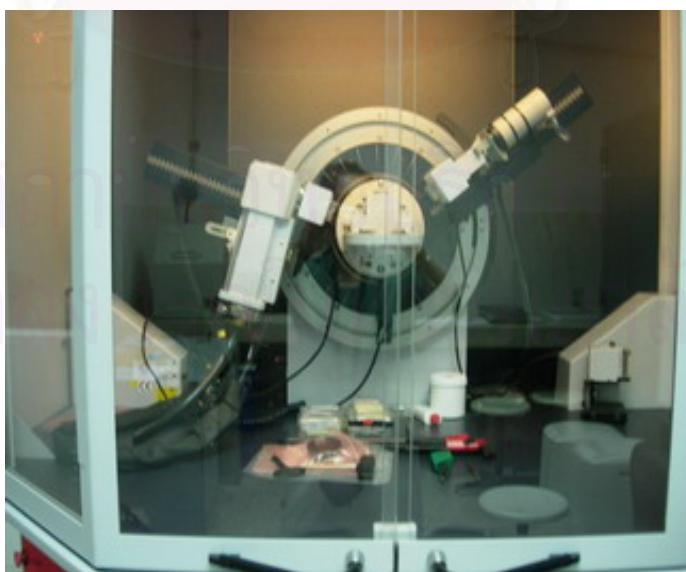
3.2.2 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมีดังนี้

1. นำแผ่นยึดตัวอย่าง (sample holder) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 มาประกอบให้เรียบร้อย
2. นำผงตัวอย่างที่บดละเอียดแล้วมาโรยลงบนแผ่นยึดตัวอย่าง แล้วกดเบาๆ
3. ปาดผงตัวอย่างส่วนเกินออกจากแผ่นยึดตัวอย่าง
4. นำฝาหลังปิดเข้ากับแผ่นยึดตัวอย่าง
5. แล้วนำแผ่นยึดตัวอย่างที่ประกอบเรียบร้อยแล้วเสียบกับแกนยึดตัวอย่างของเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยระวังมิให้นิวส์สัมผัสบริเวณที่มีผงตัวอย่าง
6. ทำการวัดที่ค่ามุม 2θ ตั้งแต่ $10-50^\circ$



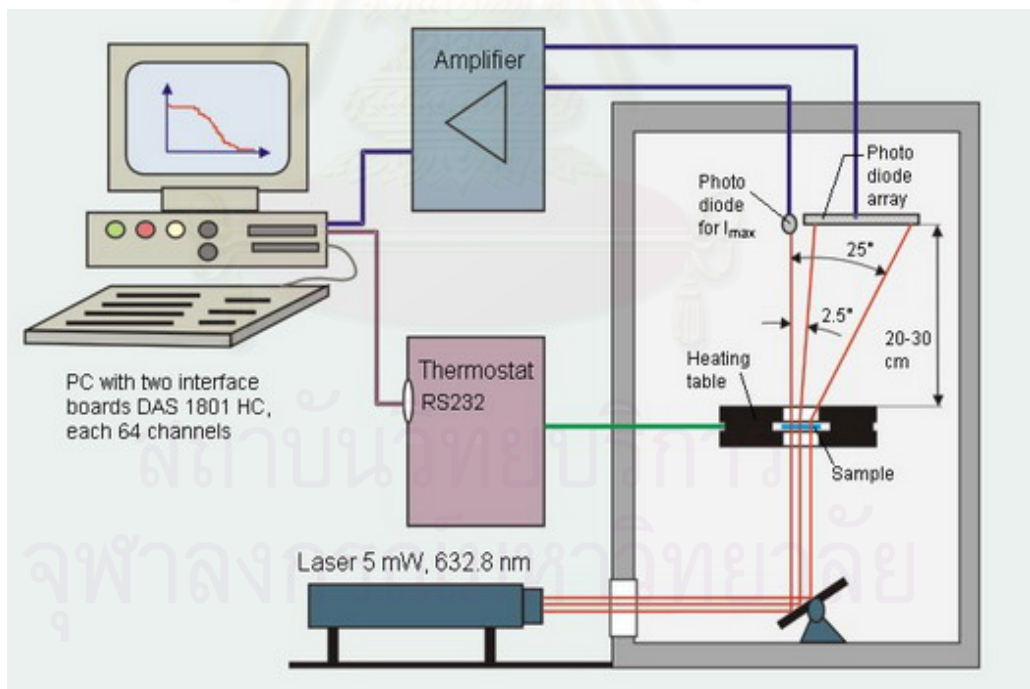
รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบและลักษณะของแผ่นที่ยึดตัวอย่าง (sample holder)



รูปที่ 3.2 เครื่อง XRD ของ Bruker รุ่น D8

3.5.2.3 การวัดขนาดอนุภาคของเซลล์โอสแบบผลึกระดับจุลภาค

นำเซลล์โอสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้มาละลายน้ำแล้วนำมาวัดขนาดของอนุภาคด้วยเครื่อง Laser Light Scattering โดยส่วนประกอบของเครื่อง แสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของเครื่อง Laser Light Scattering ของ Malvern รุ่น Mastersizer S

3.5.3 การขึ้นรูปฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค

1. เตรียมพีวีซีคอมพาวด์จากส่วนผสมต่างๆ ด้วยปริมาณดังนี้

ผงพีวีซีเรซิน	100	กรัม
DINP (พลาสติกไซเซอ์ปฐุมภูมิ)	38	กรัม
พลาสติกไซเซอ์ทุติยภูมิ	2	กรัม
สารเพิ่มความเสถียรทางความร้อน (heat stabilizer)	2	กรัม
สารหล่อลื่น (lubricant)	0.2	กรัม

2. นำพีวีซีคอมพาวด์ที่เตรียมได้ไปผสมกับเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคในปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 phr
3. นำของผสมที่เตรียมแล้วไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มให้มีความหนา 0.3-0.35 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส
4. นำฟิล์มที่ได้ไปตัดเป็นชิ้นทดสอบตามรูปร่างและขนาดที่ต้องการเพื่อใช้ทดสอบสมบัติต่างๆ ของ ฟิล์มในขั้นตอนต่อไป

3.5.4 การทดสอบสมบัติของฟิล์มพีวีซีที่ผสมเซลลูโลสแบบผลิกระดับจุลภาค

3.5.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบความแข็งแรงของฟิล์มที่เตรียมได้ โดยทดสอบความต้านแรงดึง (tensile strength), ความต้านแรงฉีกขาด (tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D882 และ ASTM D624 ตามลำดับ ด้วยเครื่อง universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR 100K plus ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

การทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile strength)

ขั้นตอนการทดสอบความต้านแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D882 มีดังนี้

1. ตัดชิ้นทดสอบจากแผ่นฟิล์มให้มีขนาด 5 x 100 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยตัดทั้งตามแนวเครื่องจักร (machine direction, MD) และตามแนวขวาง (transverse direction, TD)
2. วัดความหนาของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ 5 แห่ง
3. เลือกตัวจับ (grip) ที่ใช้ยึดชิ้นทดสอบ โดยคำนึงถึงลักษณะและความหนาของชิ้นทดสอบ
4. น้ำหนักเซลล์ (load cell) ที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 100 นิวตัน โดยกำหนดระยะระหว่างหัวจับ (gauge length) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร และความเร็วในการดึงเท่ากับ 10 มิลลิเมตร/นาที
5. ยึดปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบไว้กับตัวจับและทำการดึงจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาด

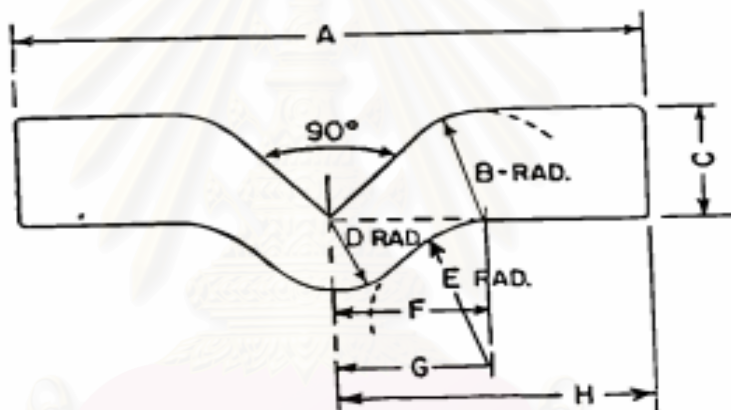


รูปที่ 3.4 เครื่อง universal testing machine ของ LLOYD รุ่น LR 100K plus

การทดสอบความต้านแรงฉีกขาด (Tear strength)

ขั้นตอนการทดสอบความต้านแรงฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D624 มีดังนี้

1. ตัดชิ้นทดสอบจากแผ่นฟิล์มด้วยหัวตัดชนิด C ที่มีรูปร่างลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยตัดทั้งตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักร
2. วัดความหนาของชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ 5 แห่ง
3. เลือกตัวจับ (grip) ที่ใช้ยึดชิ้นทดสอบโดยคำนึงถึงลักษณะและความหนาของชิ้นทดสอบ
4. นำหนักเซลล์ที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 100 นิวตัน โดยกำหนดระยะระหว่างหัวจับเท่ากับ 25 มิลลิเมตร และความเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตร/นาที
5. ยึดปลายทั้งสองของชิ้นทดสอบไว้กับตัวจับและทำการดึงจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาด



Dimension	Millimetres		Inches	
	value	Tolerance	Value	Tolerance
A	102	± 0.50	4.0	± 0.02
B	19	± 0.05	0.75	± 0.002
C	19	± 0.05	0.75	± 0.002
D	12.7	± 0.05	0.5	± 0.002
E	25	± 0.05	1.0	± 0.002
F	27	± 0.05	1.061	± 0.002
G	28	± 0.05	1.118	± 0.002
H	51	± 0.25	2.0	± 0.01

รูปที่ 3.5 ลักษณะและขนาดของชิ้นทดสอบความต้านแรงฉีกขาด

3.5.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

ในงานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค TGA และ DSC โดยมีรายละเอียด ดังนี้

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เป็นการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน และอุณหภูมิการสลายตัวของผงเซลล์ูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค และฟิล์มพีวีซีที่ผสมและไม่ผสมเซลล์ูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ด้วยเครื่อง TGA ของ METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851^e ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยนำตัวอย่างทดสอบหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุใน ถาดอะลูมิเนียม (aluminium pan) อุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในช่วง 30 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียส/นาที และทำการทดสอบ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

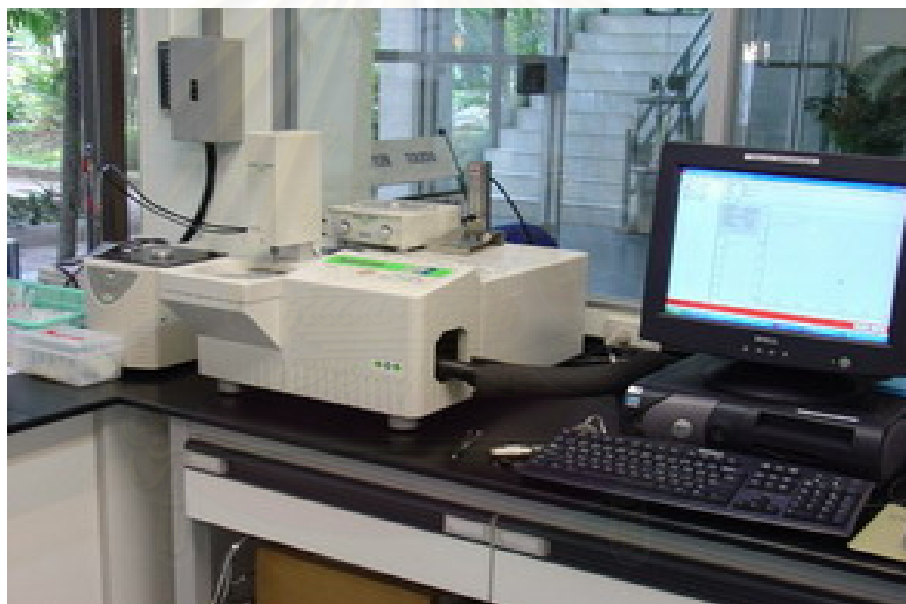


9

รูปที่ 3.6 เครื่อง TGA ของ METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851^e

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาหาอุณหภูมิกลาส-แทรนซิชัน (T_g) ของฟิล์มพีวีซีทั้งที่ผสมและไม่ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของผลึกเซลลูโลสระดับจุลภาค ด้วยเครื่อง DSC ของ METTLER TOLEDO รุ่น DSC 822^o ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยนำตัวอย่างทดสอบหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุใน ถาดอะลูมิเนียม อุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์หาอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันอยู่ในช่วง 140 ถึง 125 องศาเซลเซียส โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที และทำการทดสอบ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ส่วนอุณหภูมิที่ใช้วิเคราะห์หาอุณหภูมิหลอมเหลวของเซลลูโลสแบบ ผลึกระดับจุลภาคอยู่ในช่วง 30 ถึง 260 องศาเซลเซียส โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที และทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



รูปที่ 3.7 เครื่อง DSC ของ METTLER TOLEDO รุ่น DSC 822^o

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.4.3 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

ในงานวิจัยได้ทำการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยวิธีการฝังดินและทดสอบความสามารถในการดูดความชื้นของขึ้นทดสอบ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ทดสอบโดยวิธีการฝังดิน

นำฟิล์มพีวีซีที่ผสมและไม่ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมาซึ่งเพื่อนำหนักที่แน่นอน แล้วฝังลงในดินลึกประมาณ 5 เซนติเมตร ในกระบะที่บรรจุดินอยู่เต็ม (กระบะต้องมีรูสำหรับระบายน้ำส่วนเกิน) แล้วรดน้ำบนดินให้ชุ่ม จากนั้นนำกระบะดินไปตั้งไว้กลางแจ้ง ทิ้งไว้ตามเวลาที่กำหนด (ทั้งหมด 8 สัปดาห์) เมื่อครบระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 สัปดาห์ให้นำขึ้นทดสอบออกจากดินอย่างระมัดระวัง ล้างดินออกเบาๆ ด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำขึ้นทดสอบไปอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักขึ้นทดสอบคงที่ แล้วทำการชั่งเพื่อหาปริมาณร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนไป ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{ร้อยละของน้ำหนักที่ลดลง} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักขึ้นทดสอบเริ่มต้น

W_2 = น้ำหนักขึ้นทดสอบเมื่อระยะเวลาผ่านไปตามกำหนด

นอกจากนี้ ยังนำขึ้นทดสอบที่ฝังดินเป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 สัปดาห์ ไปทดสอบสมบัติความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาดด้วยวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว เพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติก่อนการฝังดิน

ทดสอบการดูดความชื้น

การทดสอบความสามารถในการดูดซึ่มความชื้น เป็นการหาน้ำหนักของขึ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้นในภาวะที่ควบคุมความชื้น โดยนำขึ้นทดสอบที่เป็นแผ่นฟิล์มพีวีซีที่ผสมและไม่ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำขึ้นทดสอบไปชั่งเพื่อนำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำขึ้นทดสอบไปวางบนตะแกรงในตู้ควบคุมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อหาปริมาณร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากสมการ ดังนี้

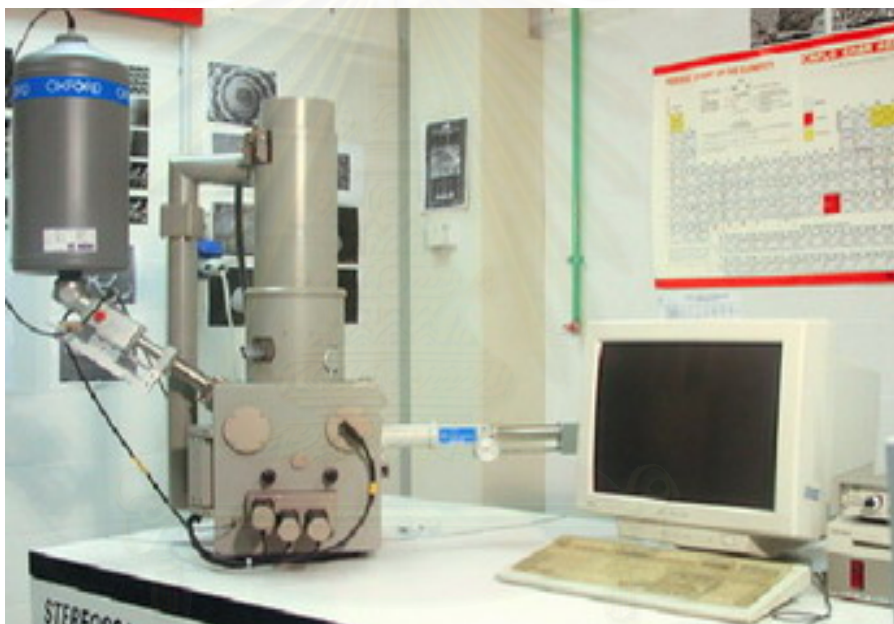
$$\text{ร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น} = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100$$

เมื่อ M_1 = น้ำหนักขึ้นทดสอบเริ่มต้น

M_2 = น้ำหนักขึ้นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไปตามกำหนด

3.5.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

การตรวจสอบด้านสัณฐานวิทยาของเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาค และฟิล์มพีวีซีที่ผสมและไม่ผสมเซลล์โลสแบบผลึกระดับจุลภาค ทั้งก่อนและหลังฝังดินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Jeol รุ่น JSM-6400 ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เพื่อตรวจสอบพื้นผิวและภาคตัดขวางของชั้นทดสอบ โดยตัดฟิล์มขนาด 1 x 4 เซนติเมตร ไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวแล้วหักฟิล์มนำส่วนที่หักไปตรวจสอบในภาพตัดขวาง ส่วนภาพพื้นผิวโดยฟิล์มขนาด 1 x 1 เซนติเมตรติดกับแผ่น SEM เพื่อตรวจดูการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์ม โดยนำชั้นทดสอบเตรียมไว้ข้างต้นไปเคลือบผิวด้วยทองคำ ก่อนทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ศักย์ไฟฟ้า 15 kV และพื้นผิว



รูปที่ 3.8 เครื่อง SEM ของ JEOL รุ่น JSM-6400

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค

เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้จากการไฮโดรไลซ์เศษผ้าฝ้ายดิบด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองอมน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้

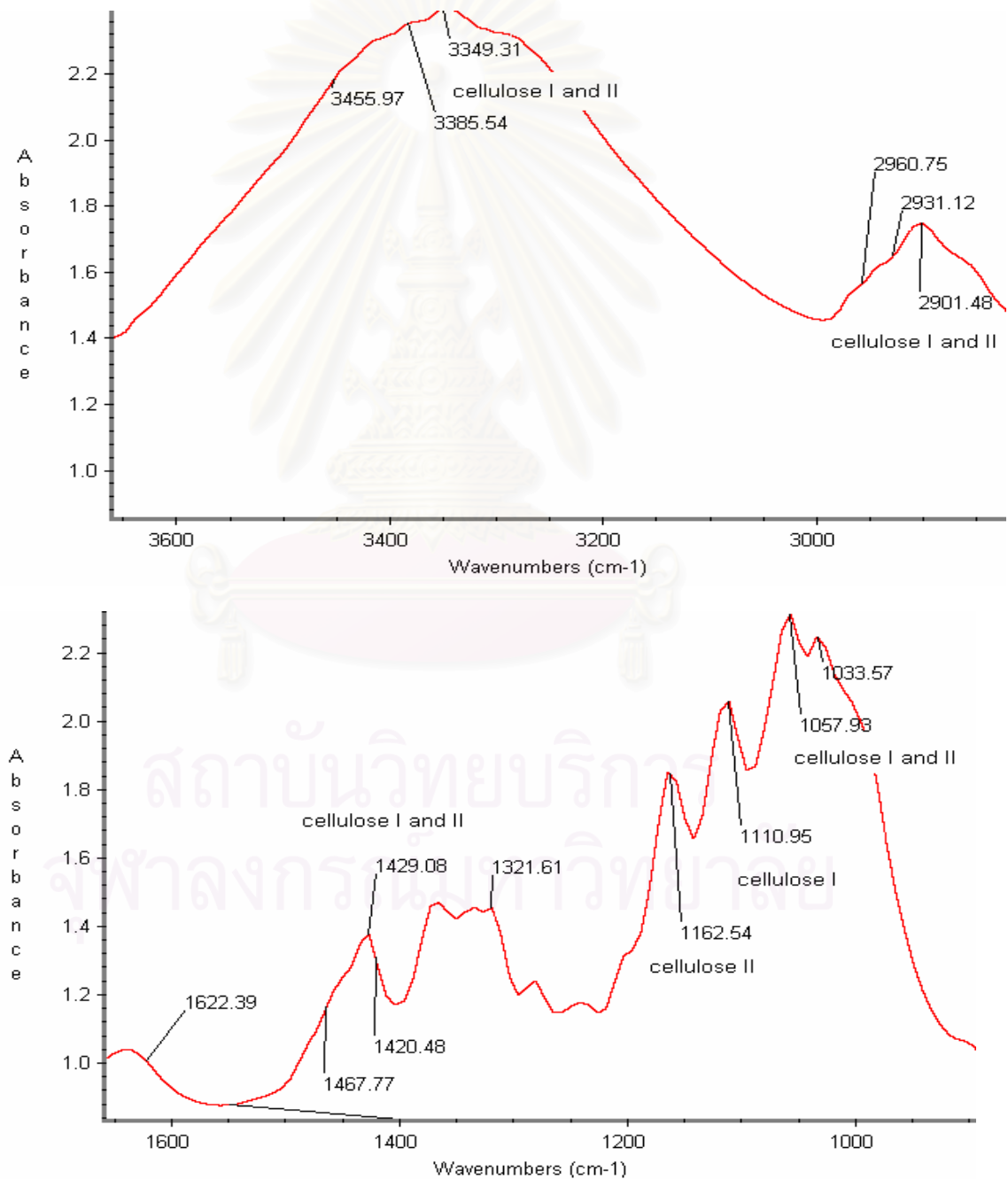
4.2 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่ได้จากการไฮโดรไลซ์เศษผ้าฝ้ายดิบ

เปอร์เซ็นต์ผลได้โดยเฉลี่ยของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้จากเศษผ้าฝ้ายดิบโดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก เท่ากับ 90.3

4.3 การวิเคราะห์เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค

4.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR

เมื่อนำเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้มาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค FT-IR และเปรียบเทียบสเปกตรัมของผลึกพอลิแซ็กคาไรด์ที่แสดงประเภทของโครงสร้างผลึกเซลลูโลส และ แสดงในรูปที่ 2.4 พบว่าเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้ แสดงพีกที่อาจเป็นทั้งโครงสร้างผลึกประเภทเซลลูโลส ซึ่งพบในเซลลูโลสที่มีอยู่ในธรรมชาติ และ เซลลูโลส II ซึ่งเป็นโครงสร้างของผลึกที่ได้จากการตัดแปรรเซลลูโลส

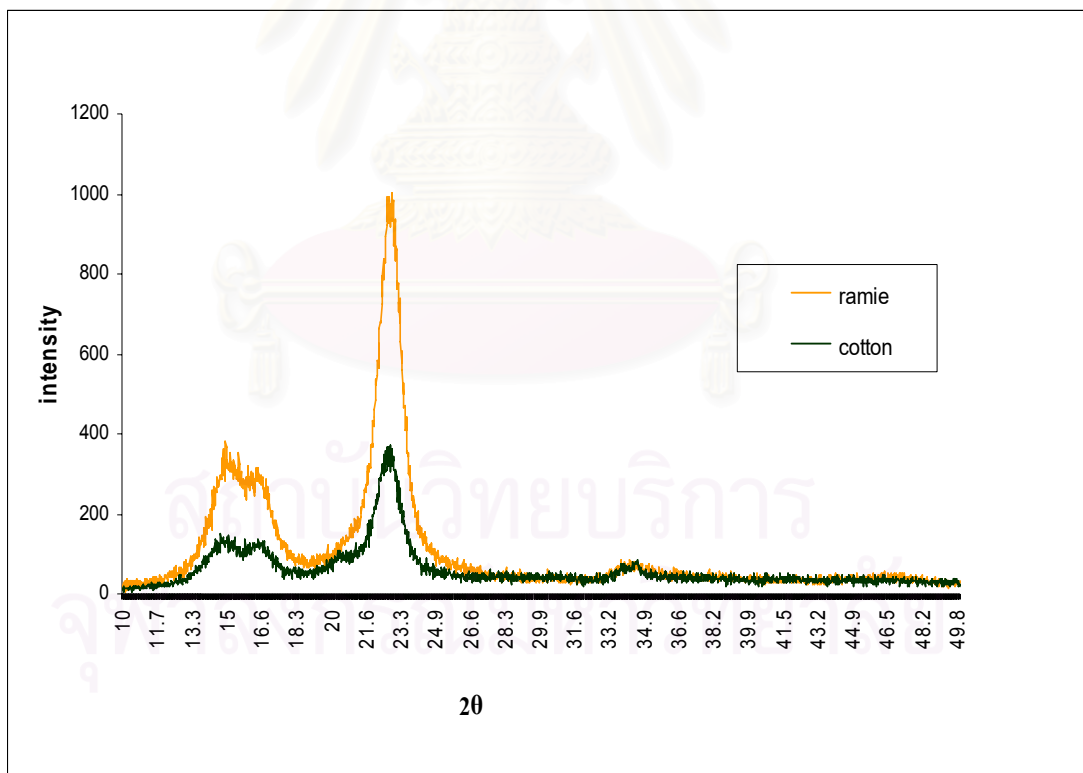


รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้จากเศษผ้าฝ้าย

4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

เนื่องจากเทคนิค FT-IR ที่นำมาใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกเซลลูโลสสำหรับงานวิจัยนี้ได้ผลการวิเคราะห์แบบของผลึกเซลลูโลสที่อาจเป็นทั้งแบบเซลลูโลส I และ II ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันประเภทของโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสที่เตรียมได้ให้ชัดเจนขึ้นซึ่งเราสามารถจะใช้เทคนิค XRD ในการตรวจวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างผลึกเซลลูโลส I และ II และในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเซลลูโลสด้วยเทคนิค XRD ได้นำผลึกเซลลูโลสระดับจุลภาคที่ไฮโดรไลซ์จากเส้นใยรามี่มาใช้เปรียบเทียบกับผลึกเซลลูโลสระดับจุลภาคที่ไฮโดรไลซ์จากเศษผ้าฝ้าย เนื่องจากเส้นใยรามี่เป็นเส้นใยเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกสูง

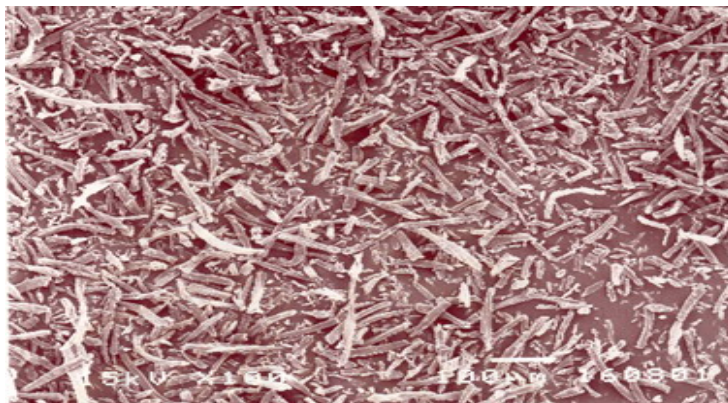
รูปที่ 4.3 แสดง XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้จากการไฮโดรไลซ์เศษผ้าฝ้ายและเส้นใยรามี่ พบว่าทั้งเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้จากเส้นใยรามี่และเศษผ้าฝ้ายปรากฏพีกเพียงพีกเดียวที่มุม 2θ เท่ากับ 22 แสดงว่าผลึกทั้งสองชนิดมีโครงสร้างที่เป็นผลึกแบบเซลลูโลส I [15] แต่ผลึกที่เตรียมจากเศษผ้าฝ้ายมีระดับความเป็นผลึกต่ำกว่าที่เตรียมจากเส้นใยรามี่



รูปที่ 4.3 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมจากการไฮโดรไลซ์เศษผ้าฝ้ายและเส้นใยรามี่

4.3.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

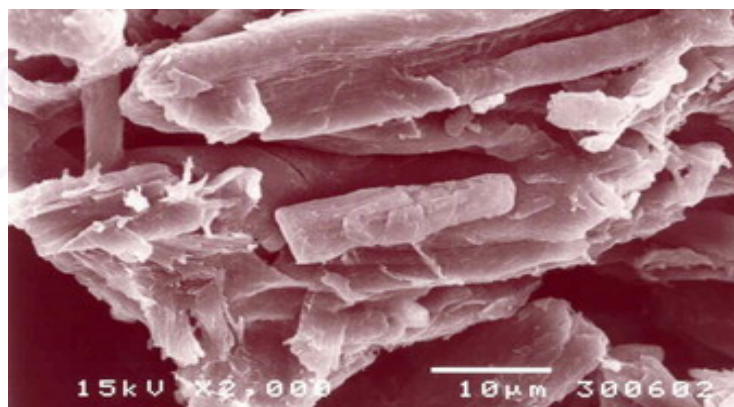
รูปที่ 4.4 (ก) – (ค) แสดงสัณฐานวิทยาของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคจากผ้าฝ้าย ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100, 500 และ 2000 เท่า ตามลำดับ พบว่า เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้มีอนุภาคที่มีรูปร่างเป็นเส้นใยแต่จะมีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันกระจายอยู่ทั่วไป



(ก)



(ข)

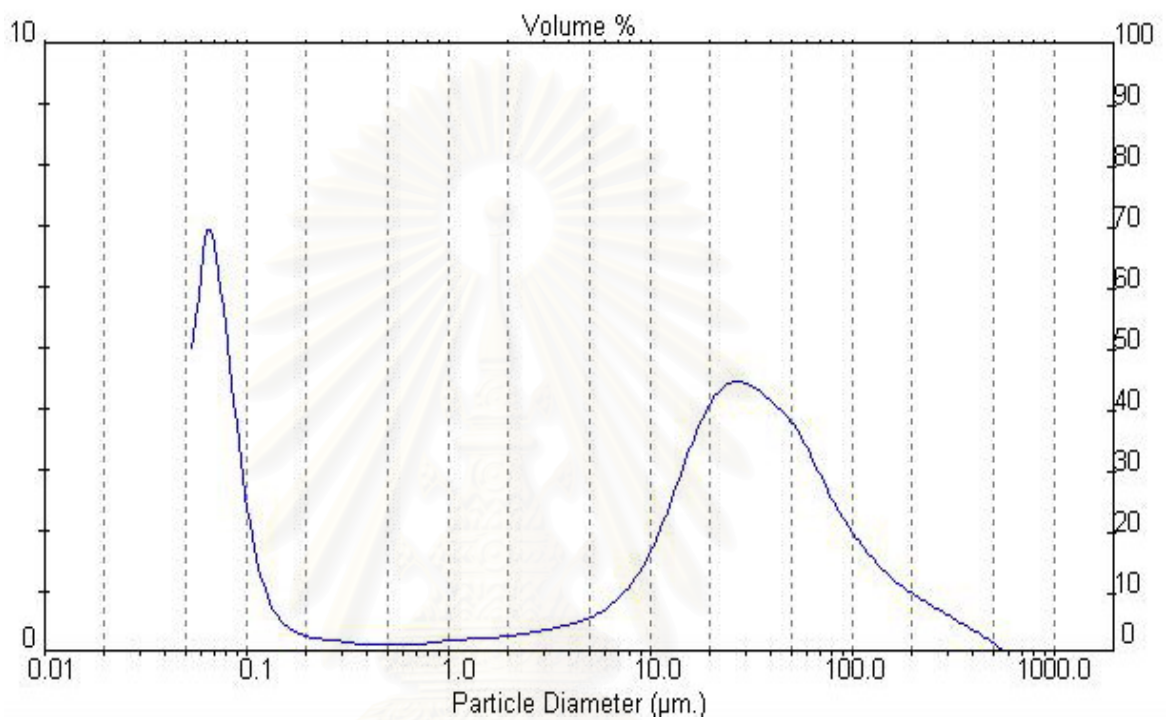


(ค)

รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่า (ข) 500 เท่า และ (ค) 2,000 เท่า

4.3.4 การวัดขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค Laser Light Scattering

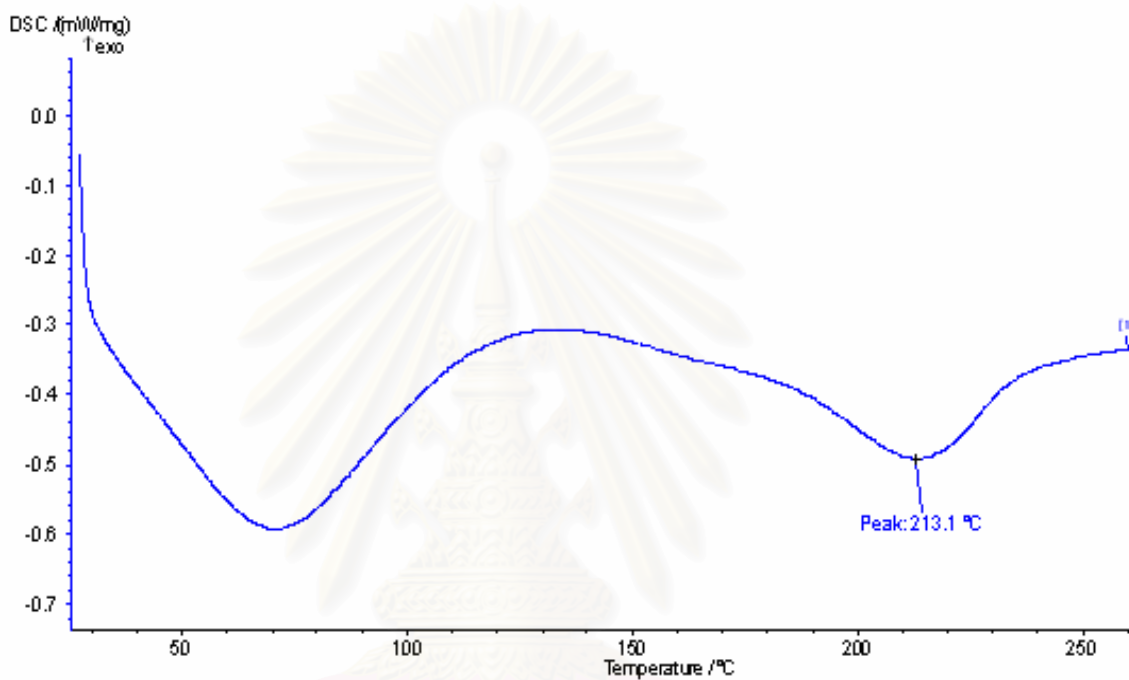
รูปที่ 4.4 แสดงขนาดอนุภาคของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง Laser Light Scattering ซึ่งพบว่าเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคด้านยาวเฉลี่ยประมาณ 40 μm และมีค่า aspect ratio ประมาณ 8



รูปที่ 4.5 การกระจายขนาดอนุภาคของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค
ที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง Laser Light Scattering

4.3.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

รูปที่ 4.5 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้ ซึ่งพบว่าเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้มีอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) เท่ากับ 213 องศาเซลเซียส

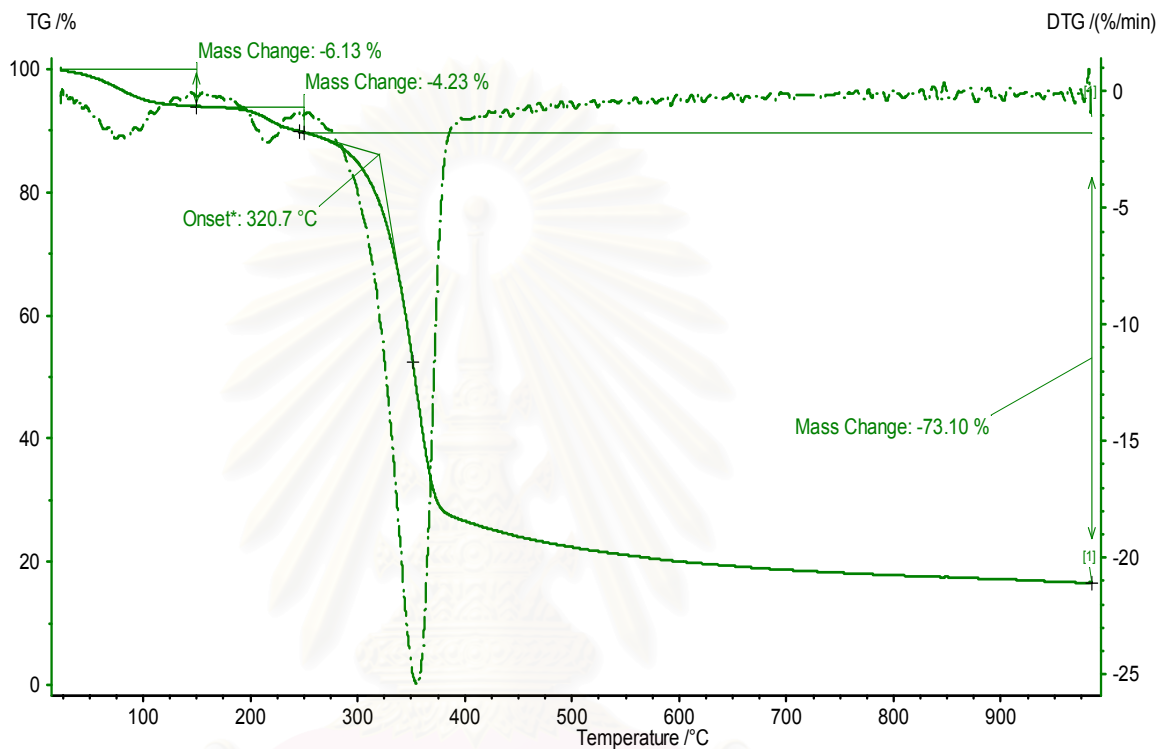


รูปที่ 4.6 DSC เทอร์โมแกรมของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

รูปที่ 4.6 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ซึ่งพบว่าเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (T_0) ที่ 320.7 องศาเซลเซียส



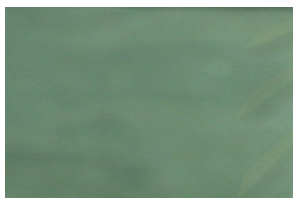
รูปที่ 4.7 TGA เทอร์โมแกรมของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

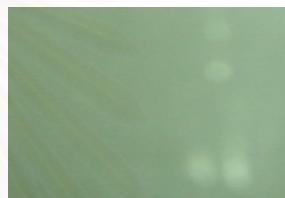
4.4 ลักษณะของทางกายภาพของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค

เมื่อนำเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมาผสมกับพีวีซีคอมพาวด์ด้วยอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกิ้ง (two roll mill) ได้ฟิล์มที่มีลักษณะทางกายภาพมีความหนาประมาณ 0.34 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.1 พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีสีเหลืองที่เข้มขึ้น และมีความอ่อนตัวลดลงเมื่อปริมาณของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพีวีซียังมีความหยาบกระด้างเพิ่มขึ้นอีกด้วย และเมื่อพิจารณาความยากง่ายในการขึ้นรูป พบว่าเมื่ออัตราส่วนของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเกิน 15 phr แล้วจะทำให้ขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ยากขึ้นโดยฟิล์มจะขาดง่ายในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป

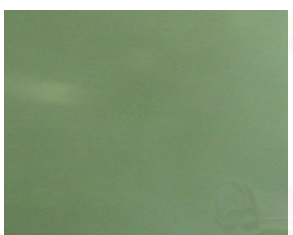
0 phr



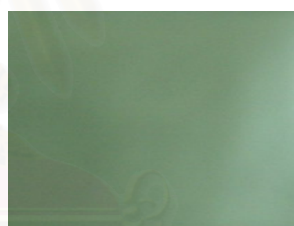
5 phr



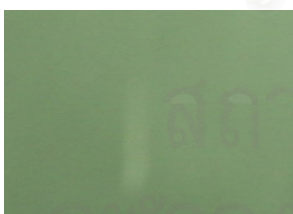
10 phr



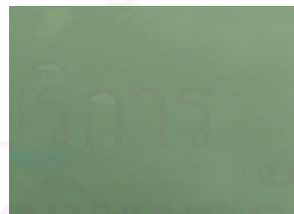
15 phr



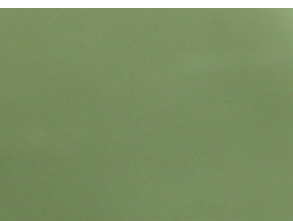
20 phr



25 phr



30 phr



รูปที่ 4.8 ลักษณะฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสระดับจุลภาค

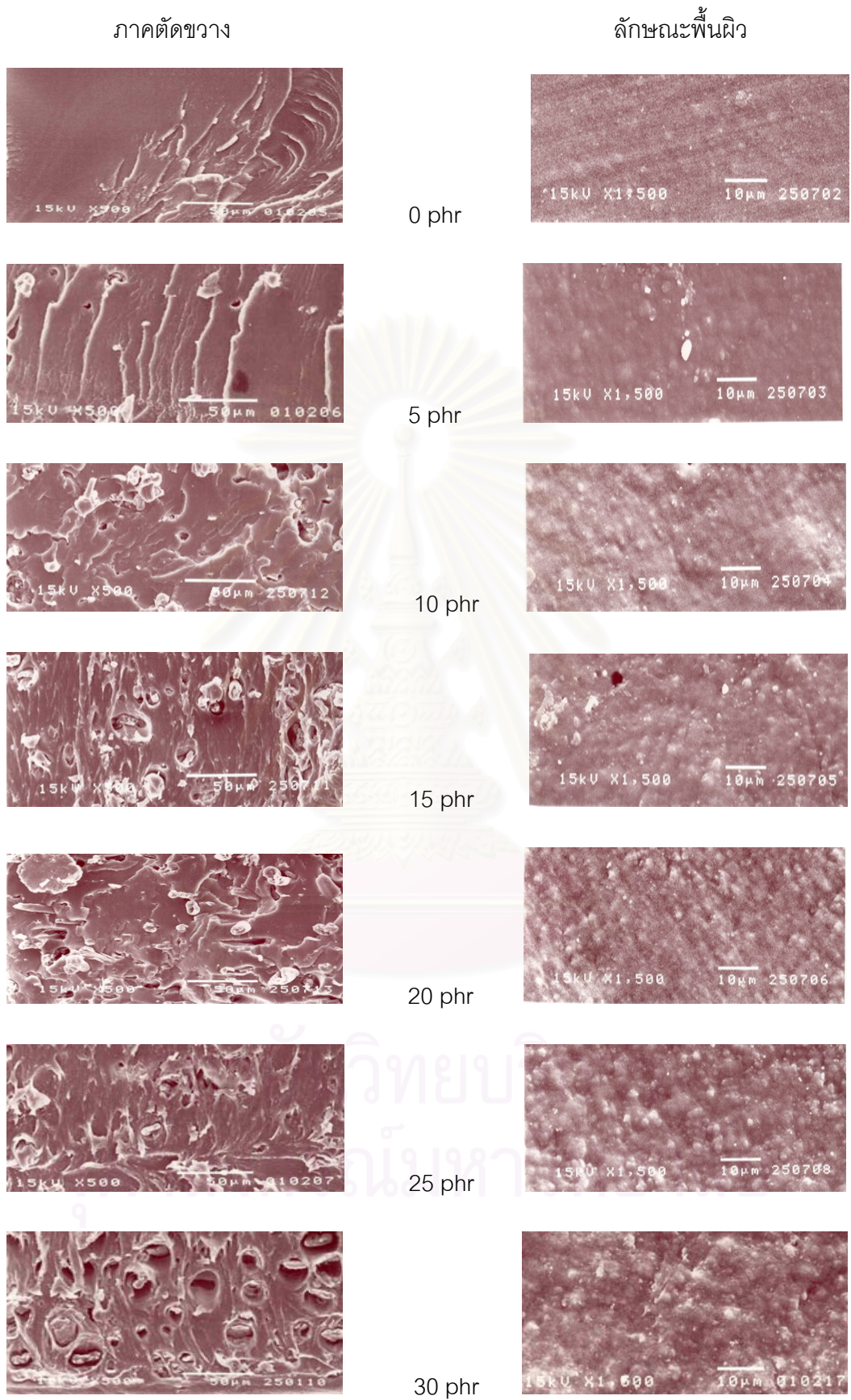
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค

อัตราส่วนของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค (phr)	ลักษณะทางกายภาพ
0	ใส พื้นผิวเรียบ ความอ่อนตัวดี
5	มีสีเหลืองขุ่น พื้นผิวหยาบเพิ่มขึ้น ความอ่อนตัวลดลง
10	มีเหลืองขุ่นเข้มขึ้น พื้นผิวหยาบเพิ่มขึ้น ความอ่อนตัวลดลง
15	มีเหลืองขุ่นเข้มขึ้น พื้นผิวหยาบเพิ่มขึ้น ความอ่อนตัวลดลง
20	มีเหลืองขุ่นเข้มขึ้น พื้นผิวหยาบเพิ่มขึ้น ความอ่อนตัวลดลง
25	มีเหลืองขุ่นเข้มขึ้น พื้นผิวหยาบเพิ่มขึ้น ความอ่อนตัวลดลง
30	มีเหลืองขุ่นเข้มขึ้น พื้นผิวหยาบเพิ่มขึ้น ความอ่อนตัวลดลง

4.5 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

รูปที่ 4.16 แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน พบว่าเมื่อปริมาณของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเพิ่มขึ้น ความสามารถในการเข้ากันระหว่างพีวีซีกับเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคจะลดลง

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

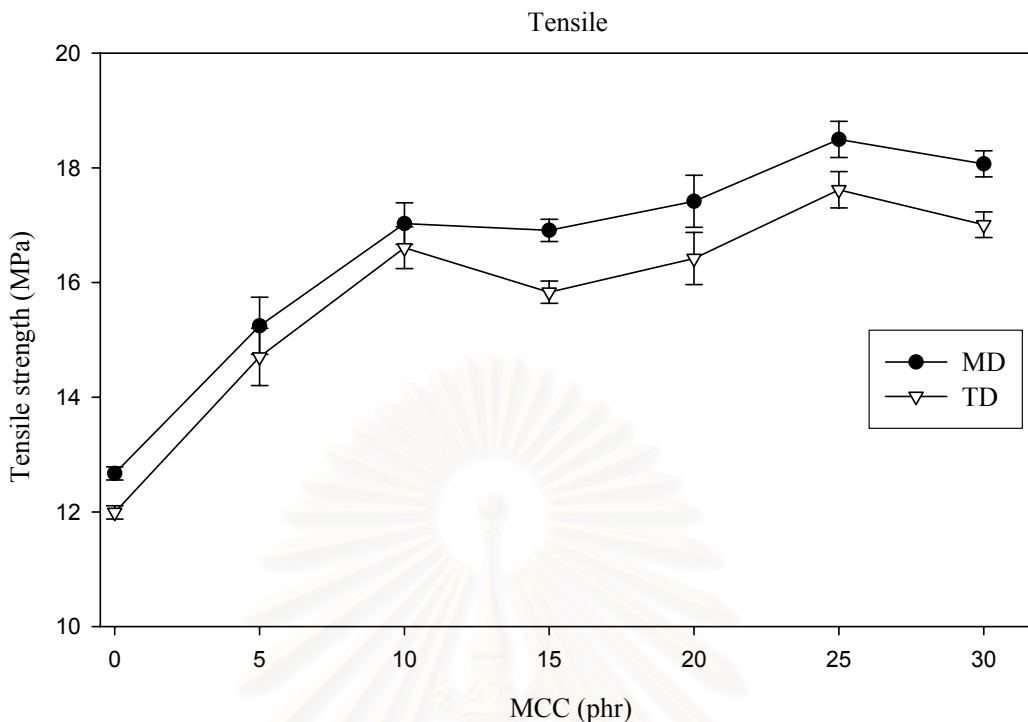


รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้

4.6 การทดสอบด้านความต้านแรงดึง

4.6.1 ความต้านแรงดึง (Tensile strength)

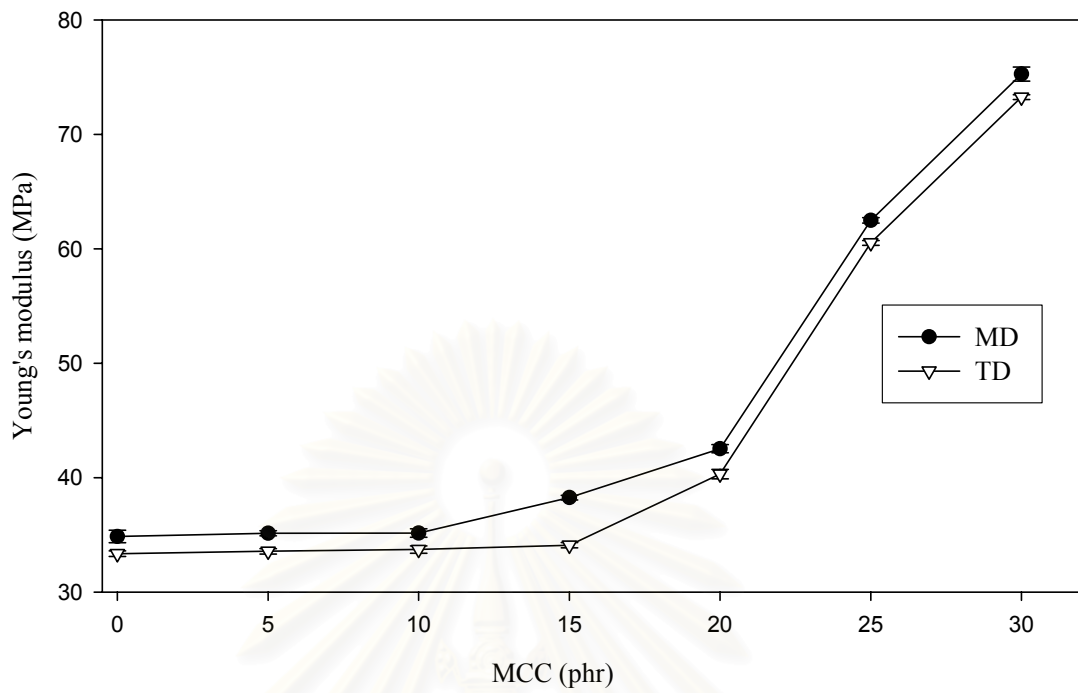
รูปที่ 4.10 แสดงค่าความต้านแรงดึงตามแนว MD และ TD ตามลำดับของชั้นทดสอบพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่อัตราส่วนต่างๆ กัน จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความต้านแรงดึงของชั้นทดสอบทุกอัตราส่วนผสมตามแนว MD มีค่าสูงกว่าตามแนว TD เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการรีดแผ่น (calendering) มีผลต่อการจัดเรียงโมเลกุลของพีวีซีและเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคไม่มากนัก ความต้านแรงดึงตามแนว MD และ TD ทุกอัตราส่วนผสมของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค มีค่าเพิ่มขึ้นไปในทิศทางแนวเดียวกันและเมื่อพิจารณาผลของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคต่อความต้านแรงดึงของฟิล์มพีวีซีพบว่า เมื่อใส่เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเข้าไปผสมกับพีวีซีคอมพาวด์ ค่าความต้านแรงดึงของของชั้นทดสอบมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคซึ่งมีรูปร่างเป็นเส้นใยได้ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเสริมแรงอยู่ในเนื้อพีวีซี จึงส่งผลให้ความต้านแรงดึงของฟิล์มพีวีซีเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเพิ่มมากกว่า 10 phr พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น หรือมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยมีความต้านแรงดึงสูงสุดเมื่อมีเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคผสมอยู่ในอัตราส่วน 25 phr จากนั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคผสมอยู่ในอัตราส่วน 30 phr หรือมากกว่า 25 phr ดังนั้นเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมีผลช่วยเพิ่มความต้านแรงดึงของฟิล์มพีวีซีได้และสูงสุดที่อัตราส่วน 25 phr



รูปที่ 4.10 ความต้านแรงดึงของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคตามแนว MD และ TD

4.6.2 ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus)

รูปที่ 4.11 แสดงค่ายั่งส์มอดุลัสตามแนว MD และ TD ของชั้นทดสอบพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่ายั่งส์มอดุลัสของชั้นทดสอบทุกอัตราส่วนผสมตามแนว MD มีค่าสูงกว่าตามแนว TD เพียงเล็กน้อยและเมื่อพิจารณาผลของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคต่อค่ายั่งส์มอดุลัสของฟิล์มพีวีซีพบว่า เมื่อใส่เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเข้าไปผสมกับพีวีซีคอมพาวด์ที่อัตราส่วนตามแนว MD และ TD ไม่มากกว่า 10-15 phr พบว่าค่ายั่งส์มอดุลัสไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคในอัตราส่วนมากกว่า 15 phr ในอัตราส่วนที่ 20 phr, 25 phr, 30 phr พบว่าค่ายั่งส์มอดุลัสจะเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่อัตราส่วน 25 และ 30 phr แสดงว่าฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมีความแข็งตึงมากขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคผสมมากกว่า 20 phr นั่นคือที่อัตราส่วนดังกล่าวจะทำให้พีวีซีแข็งหักงอยาก จึงไม่เหมาะจะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างโค้งงอ

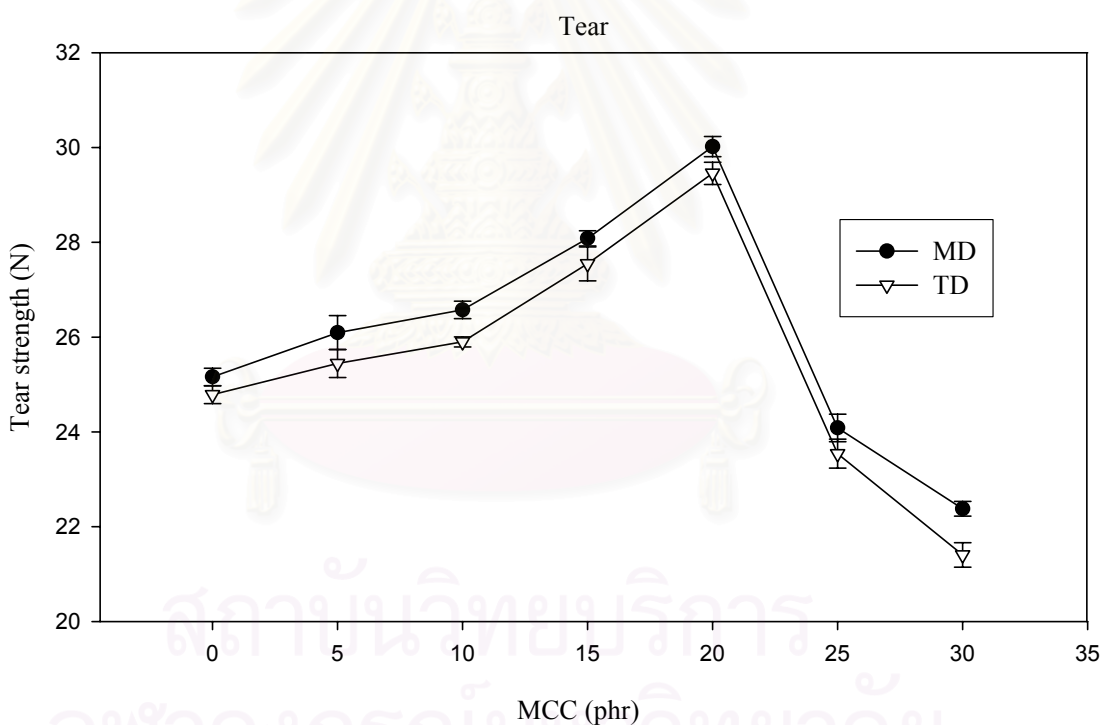


รูปที่ 4.11 ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลิตที่ระดับจุดภาค
ตามแนว MD และ TD

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6.3 ความต้านแรงฉีกขาด (Tear strength)

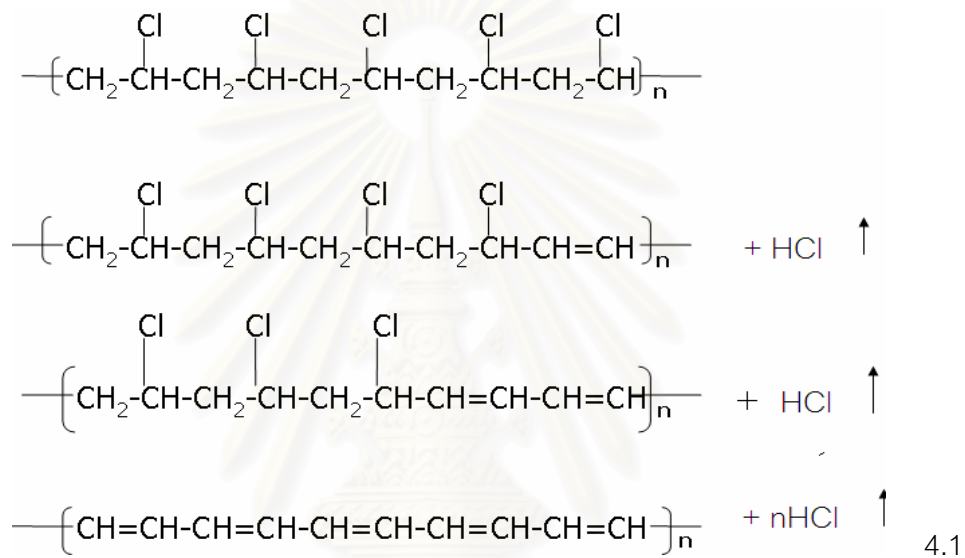
รูปที่ 4.12 แสดงค่าความต้านแรงฉีกขาดตามแนว MD และ TD ของชั้นทดสอบพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคทุกอัตราส่วนมีรูปแบบการสลายที่เหมือนกัน แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพีวีซีที่ทั้งไม่ผสมและผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคทุกอัตราส่วนให้ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความต้านแรงฉีกขาดของชั้นทดสอบทุกอัตราส่วนผสมตามแนว MD มีค่าสูงกว่าตามแนว TD เล็กน้อย และพิจารณาผลของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคต่อความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มพีวีซี พบว่าเมื่อใส่เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเข้าไปผสมกับพีวีซีคอมพาวด์ค่าไม่เกิน 25 phr ค่าความต้านแรงฉีกขาดจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคในอัตราส่วน 25 และ 30 phr พบว่าค่าความต้านแรงฉีกขาดจะลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่ทำหน้าที่เป็นฟิลเลอร์ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ชั้นทดสอบมีความแข็งเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ความเหนียวหรือความต้านแรงฉีกขาดลดลง



รูปที่ 4.12 ความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคตามแนว (ก) MD และ (ข) TD

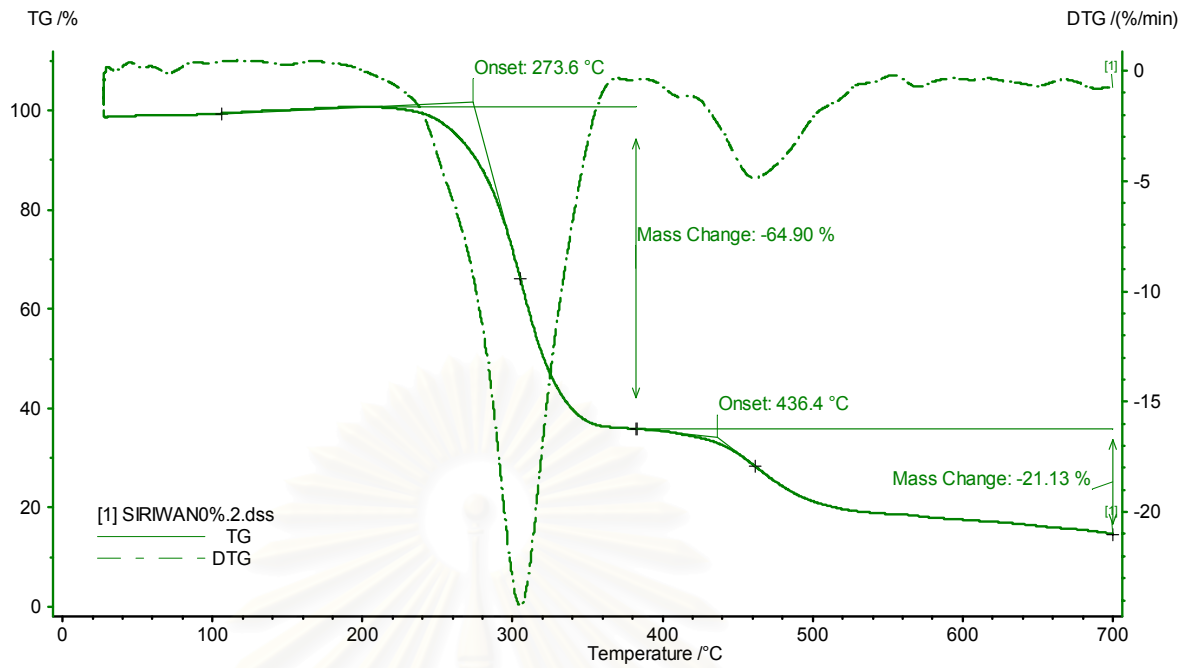
4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

รูปที่ 4.13 (ก) - (ข) และตารางที่ 4.2 แสดง TGA ของฟิล์มพีวีซีที่ไม่ได้ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค พบว่าเทอร์โมแกรมของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนประกอบด้วย 2 ช่วง โดยในช่วงแรกที่อยู่อุณหภูมิประมาณ 270 องศาเซลเซียส แสดงอุณหภูมิเมื่อได้รับความร้อนเกิดการสลายตัวให้แก๊สไฮโดรเจน เรียกว่า dehydrochlorination เกิดโครงสร้างแบบคอนจูเกตจำนวนมาก สำหรับช่วงที่สอง ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ไม่เลกุลของพีวีซีขาดออกเป็นส่วนๆและระเหยกกลายเป็นไอ [26] แสดงดังสมการ 4.1

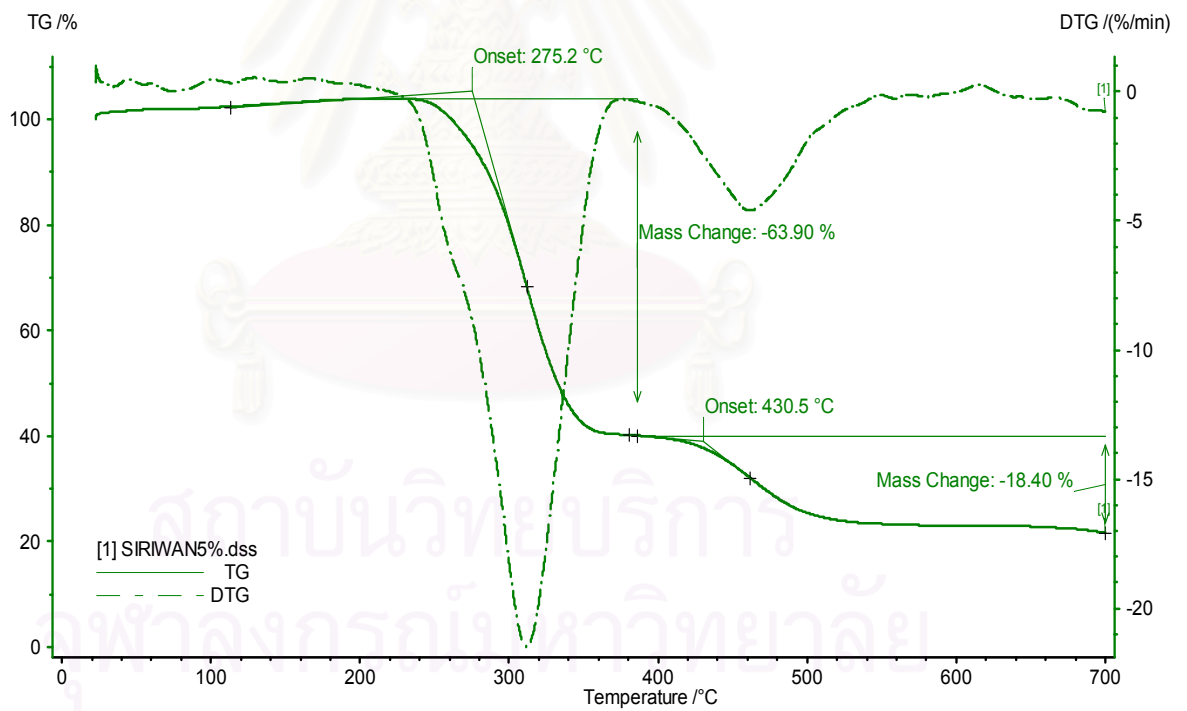


นอกจากนี้การที่อุณหภูมิการสลายตัวช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 ของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่ปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 phr มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มพีวีซีที่ไม่ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค สันนิษฐานว่าการผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่อัตราส่วนต่างๆ มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มน้อยมาก

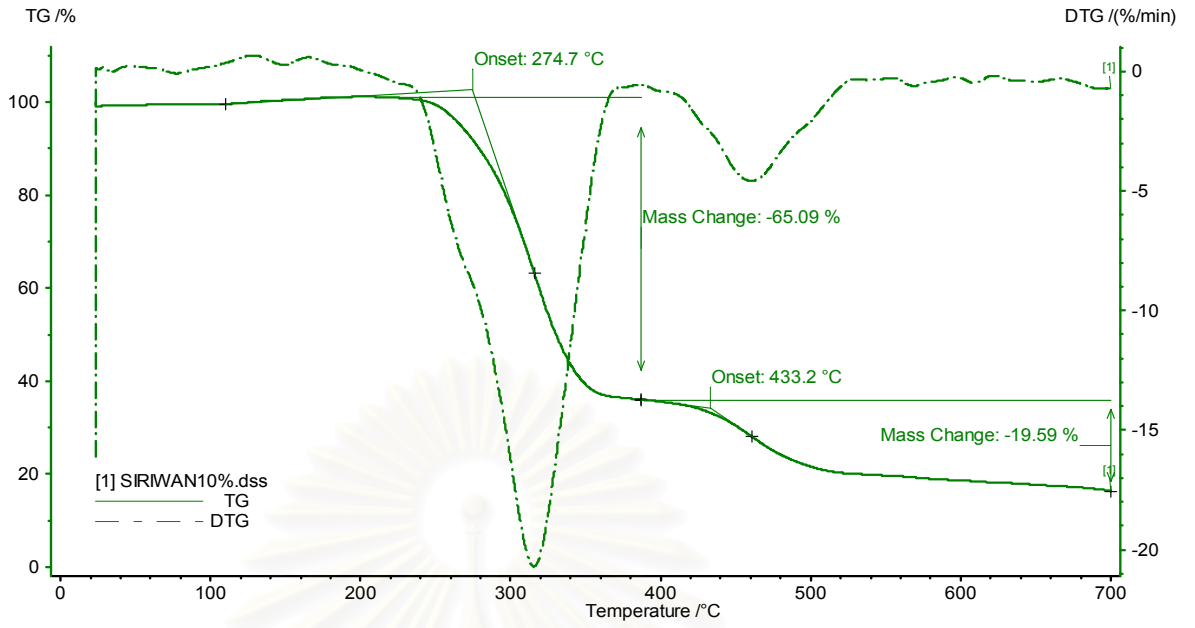
สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



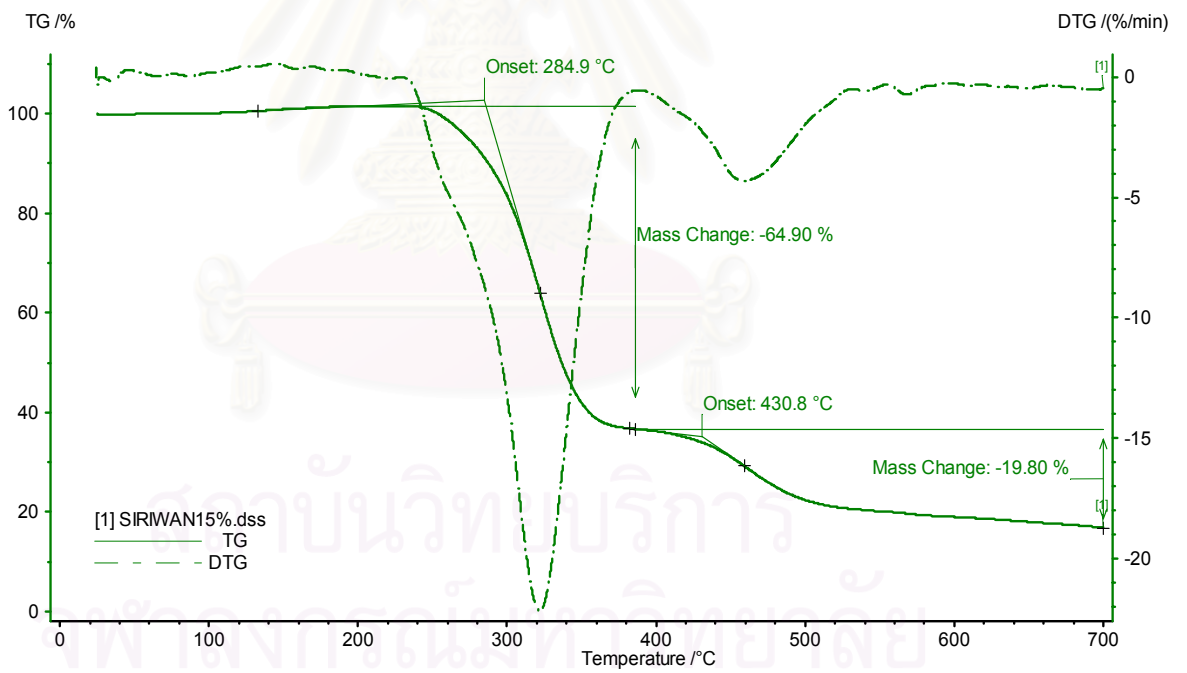
(n) 0 phr



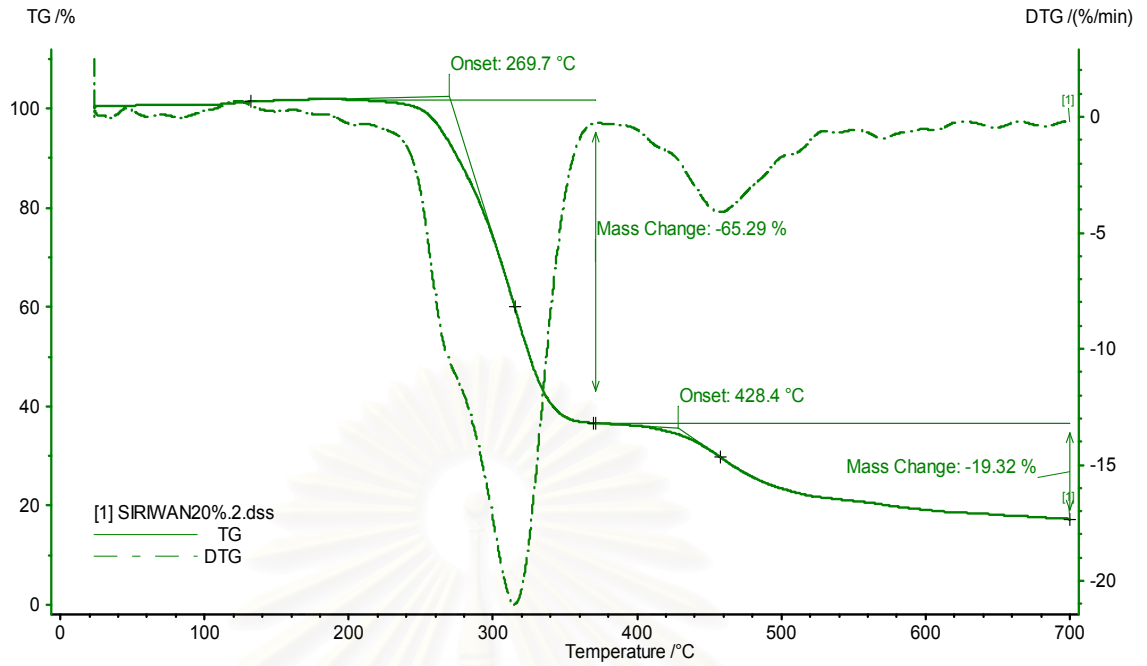
(๑) 5 phr



(a) 10 phr

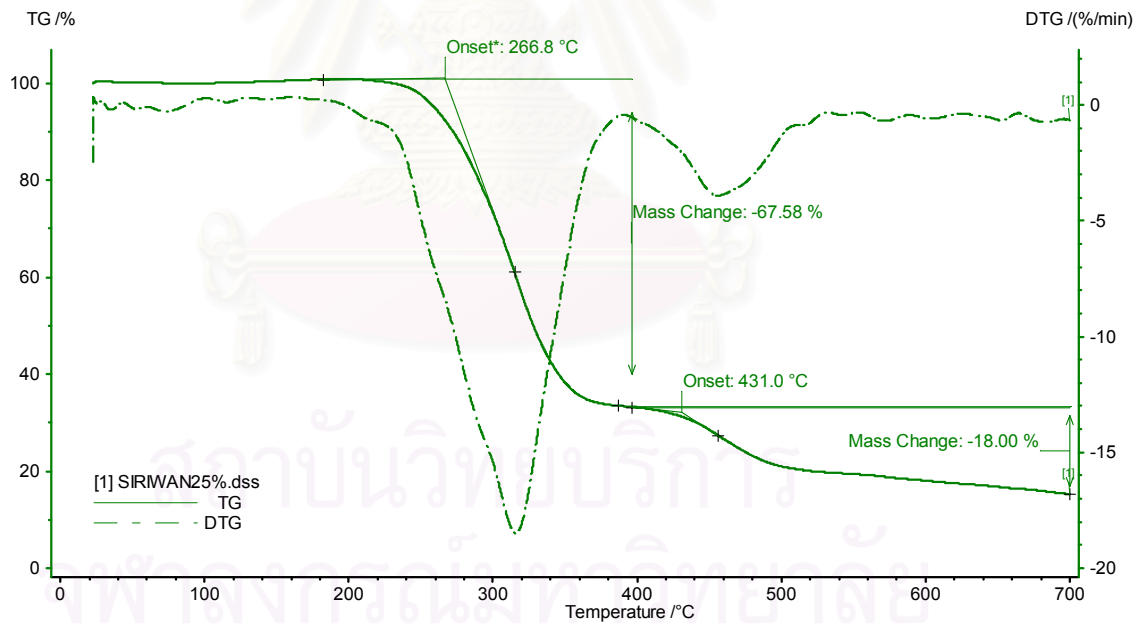


(b) 15 phr

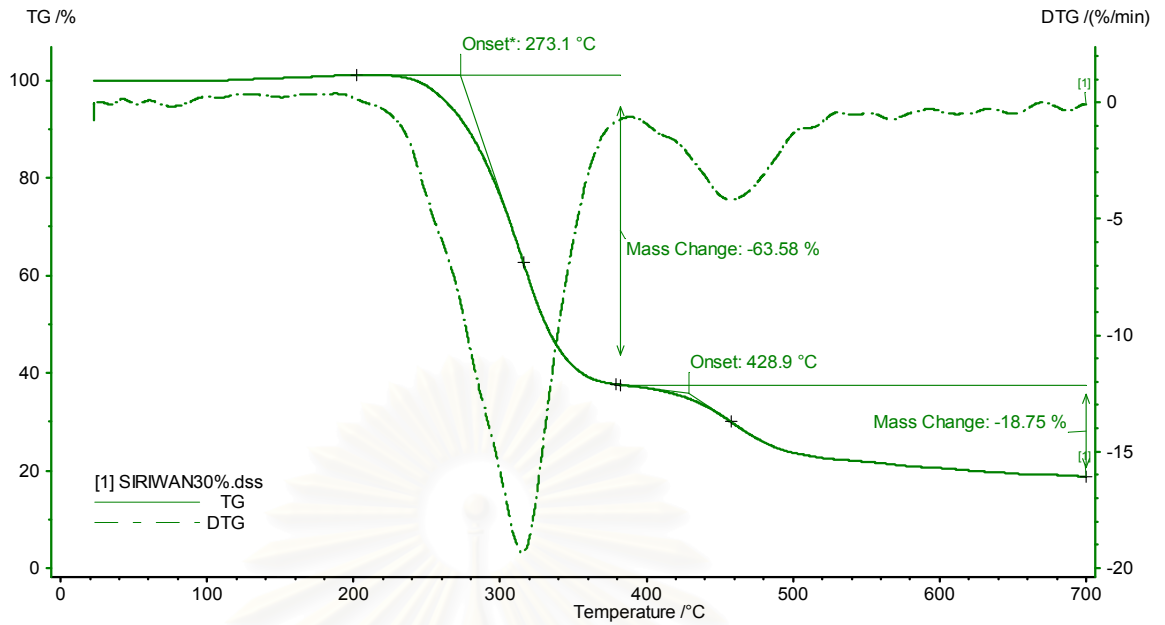


(๑)

20 phr



(๑) 25 phr



(ข) 30 phr

รูปที่ 4.13 TGA เทอร์โมแกรมของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค

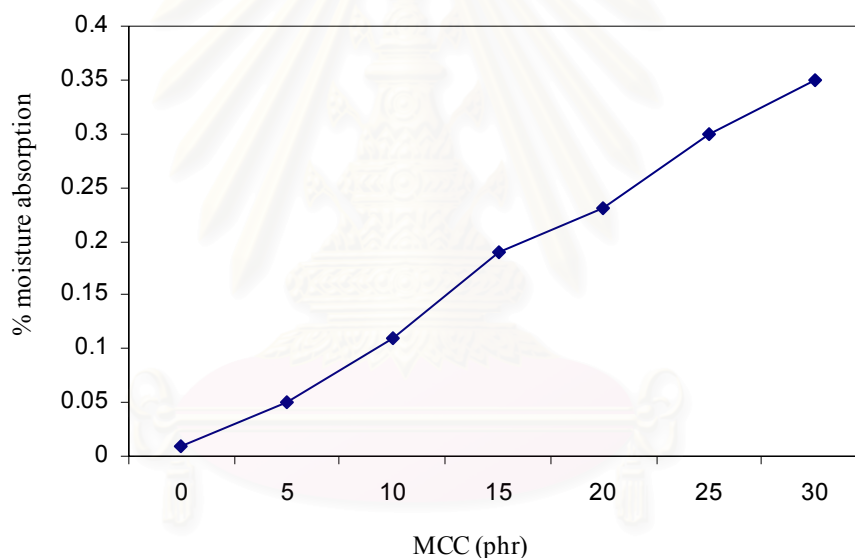
ตารางที่ 4.2 คุณนหภูมิการสลายตัวของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสระดับจุลภาค

อัตราส่วนของเซลลูโลสแบบผลึก ระดับจุลภาค (phr)	คุณนหภูมิการสลายตัว (องศาเซลเซียส)	
	T onset 1	T onset 2
0	273.6	436.4
5	275.2	430.5
10	274.7	433.2
15	284.9	430.8
20	269.7	428.4
25	265.8	431.0
30	271.3	428.9

4.8 สมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค

4.8.1 การดูดความชื้น

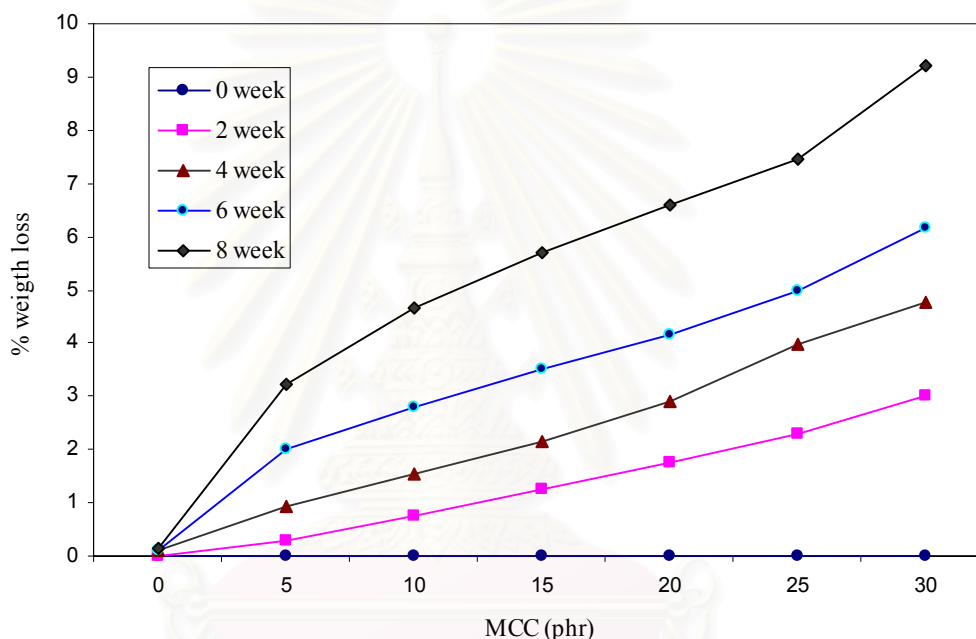
รูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ซึ่งพบว่าฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคสามารถดูดความชื้น เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นหมู่ที่ชอบน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก จึงสามารถดูดความชื้นได้ดี และมีการดูดความชื้นมากที่สุดเมื่อใส่เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคปริมาณ 30 phr ส่งผลให้การย่อยสลายพีวีซีด้วยกระบวนการทางชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยน้ำจะเป็นตัวกลางที่พาเอนไซม์ที่ถูกปลดปล่อยออกจากจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดินเข้าไปในฟิล์มพีวีซีที่ผสมแล้ว ทำการย่อยสลายเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคนั่นเอง



รูปที่ 4.14 การดูดความชื้นของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่อัตราส่วนต่างๆ

4.8.2 การหาน้ำหนักที่หายไปภายหลังการฝังดิน

รูปที่ 4.15 แสดงเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปของชั้นทดสอบพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคภายหลังการฝังดินเป็นระยะเวลาต่างๆ กัน ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชั้นทดสอบเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคในฟิล์มพีวีซีเพิ่มขึ้น และน้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ทั้งนี้อาจเนื่องจากเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคในเนื้อฟิล์มถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน ทำให้ฟิล์มมีความพรุนตัวและน้ำหนักลดลง



รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่อัตราส่วนต่างๆ ภายหลังการฝังดิน

4.8.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

รูปที่ 4.16 - 4.22 แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่อัตราส่วนต่างๆ (0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 phr) ทั้งก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 สัปดาห์ โดยทำการตรวจสอบภาคตัดขวางของชั้นทดสอบที่กำลังขยาย 500 เท่า และตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชั้นทดสอบที่กำลังขยาย 1500 เท่า

ภาคตัดขวาง

ลักษณะพื้นผิว

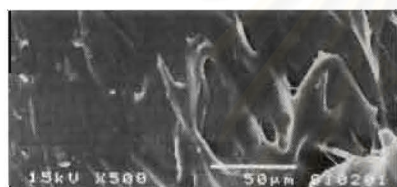
ที่ 0 สัปดาห์



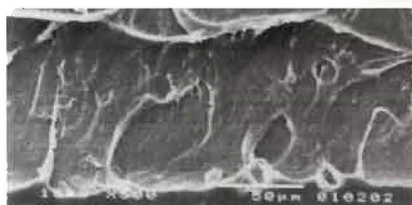
ที่ 2 สัปดาห์



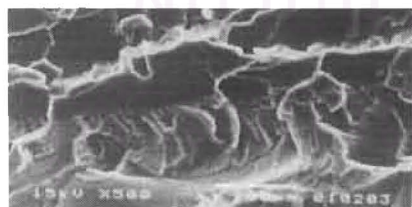
ที่ 4 สัปดาห์



ที่ 6 สัปดาห์



ที่ 8 สัปดาห์

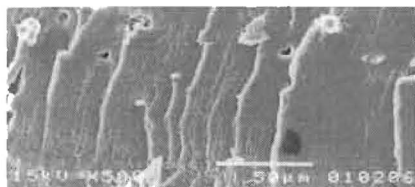


รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพีวีซีก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ และ (จ) 8 สัปดาห์

ภาคตัดขวาง

ลักษณะพื้นผิว

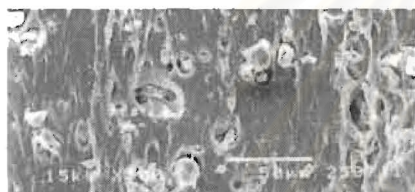
ที่ 2 สัปดาห์



ที่ 2 สัปดาห์



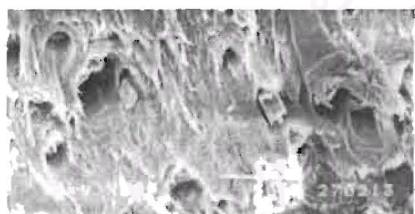
ที่ 4 สัปดาห์



ที่ 6 สัปดาห์



ที่ 8 สัปดาห์

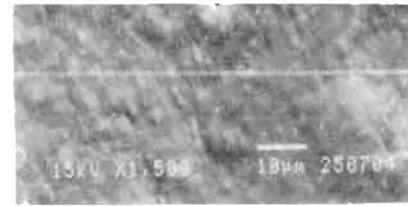
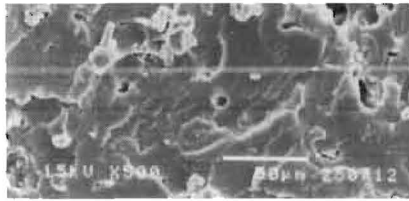


รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค 5 phr ก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ และ (จ) 8 สัปดาห์

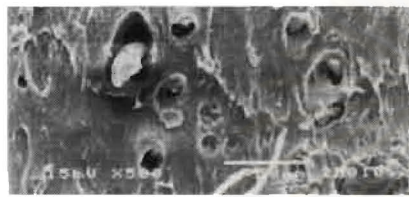
ภาคตัดขวาง

ลักษณะพื้นผิว

ที่ 0 สัปดาห์



ที่ 2 สัปดาห์



ที่ 4 สัปดาห์



ที่ 6 สัปดาห์



ที่ 8 สัปดาห์

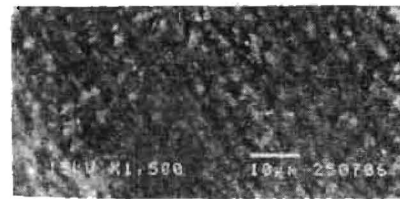


รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค 10 phr ก่อนและหลังฝังดิน เป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ และ (จ) 8 สัปดาห์

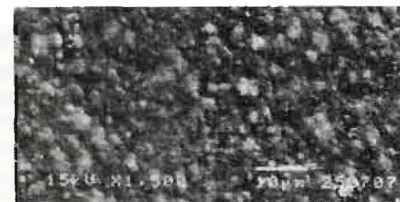
ภาคตัดขวาง

ลักษณะพื้นผิว

ที่ 0 สัปดาห์



ที่ 2 สัปดาห์



ที่ 4 สัปดาห์



ที่ 6 สัปดาห์



ที่ 8 สัปดาห์

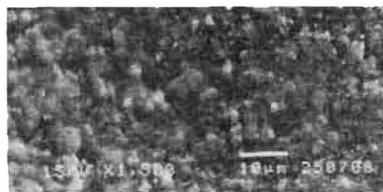


รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค 20 phr ก่อนและหลังฝังดิน เป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ และ (จ) 8 สัปดาห์

ภาคตัดขวาง

ลักษณะพื้นผิว

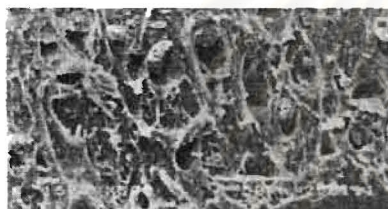
ที่ 0 สัปดาห์



ที่ 2 สัปดาห์



ที่ 4 สัปดาห์



ที่ 6 สัปดาห์



ที่ 8 สัปดาห์

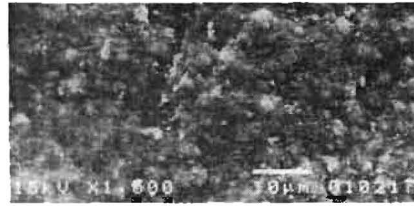


รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค 25 phr ก่อนและหลังฝังดิน เป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ และ (จ) 8 สัปดาห์

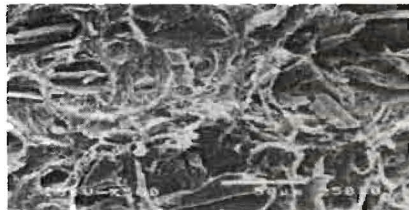
ภาคตัดขวาง

ลักษณะพื้นผิว

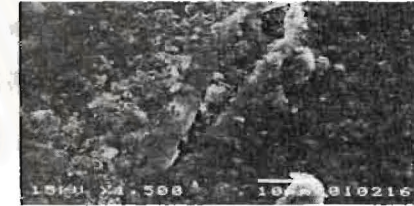
ที่ 0 สัปดาห์



ที่ 2 สัปดาห์



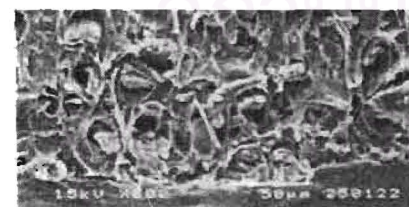
ที่ 4 สัปดาห์



ที่ 6 สัปดาห์



ที่ 8 สัปดาห์



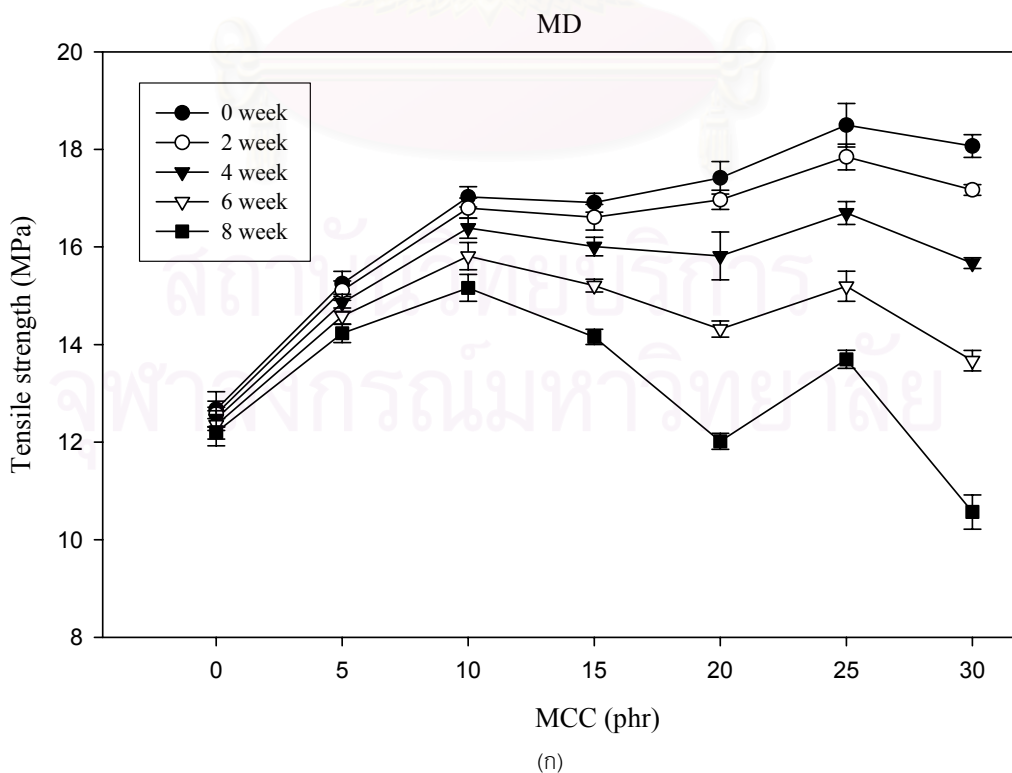
รูปที่ 4.22 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค 30 phr ก่อนและหลังฝังดิน เป็นเวลา (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์ (ง) 6 สัปดาห์ และ (จ) 8 สัปดาห์

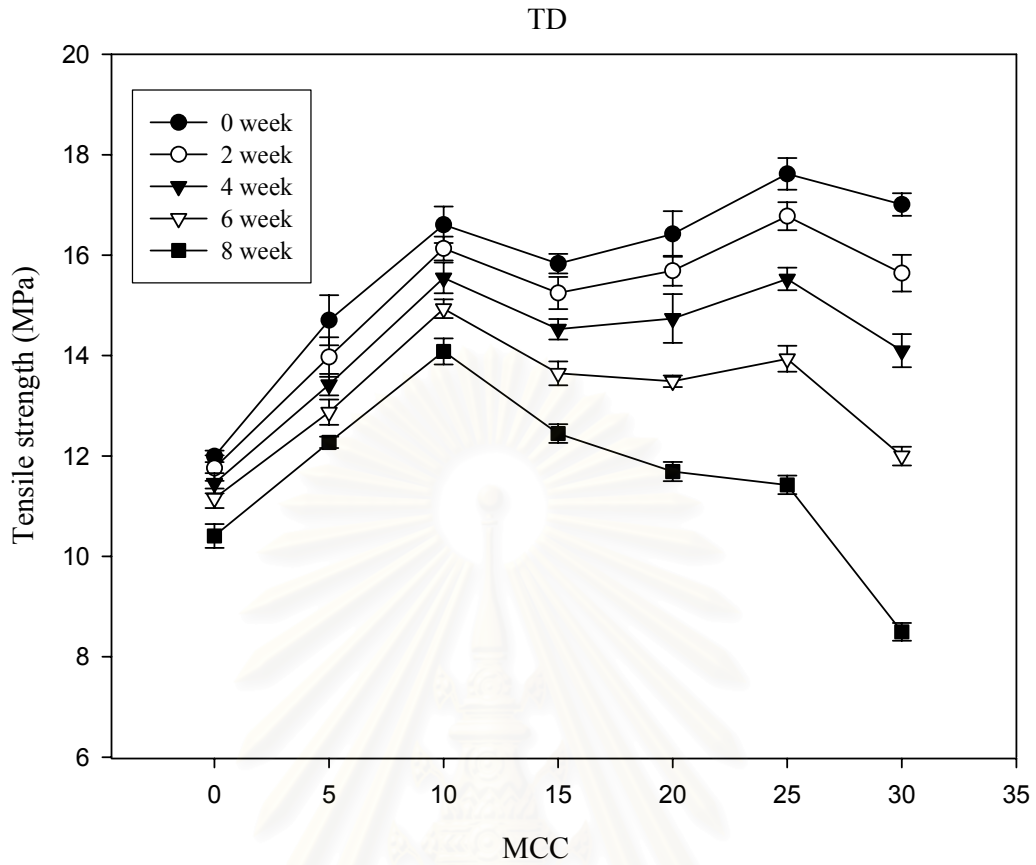
จากรูปที่ 4.16 -4.22 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนวิทยาของชั้นทดสอบภายหลังการฝังดินมี รุพรูณเกิดขึ้นในภาพถ่ายของชั้นทดสอบภาคตัดขวาง ซึ่งขนาดและปริมาณรุพรูณเพิ่มขึ้นตาม ปริมาณของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคและระยะเวลาของการฝังดิน นอกจากนี้ ภาพถ่ายของ ลักษณะพื้นผิวของชั้นทดสอบยังแสดงให้เห็นการบวมตัวของเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค รวมทั้งตำหนิและรอยแตกบนพื้นผิวชั้นทดสอบที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเซลลูโลสแบบผลึกระดับ จุลภาคและระยะเวลาของการฝังดินเช่นเดียวกัน

4.4.4 การทดสอบด้านความต้านแรงดึง

4.4.4.1 ความต้านแรงดึง (Tensile strength)

รูปที่ 4.23 แสดงค่าความต้านแรงดึงตามแนว MD และ TD ของชั้นทดสอบพีวีซีผสม เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความต้านแรง- ดึงของชั้นทดสอบทุกอัตราส่วนผสมตามแนว MD มีค่าสูงกว่าตามแนว TD เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจก การขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการรีดแผ่น (Calendering) มีผลต่อการจัดเรียงโมเลกุลของพีวีซีและ เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคไม่มากนัก อย่างไรก็ตามความต้านแรงดึงของชั้นทดสอบที่ผสม เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมีค่าสูงกว่าฟิล์มพีวีซีที่ไม่ได้ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค และมีค่าเพิ่มเมื่อปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อใส่ในปริมาณ 2 phr



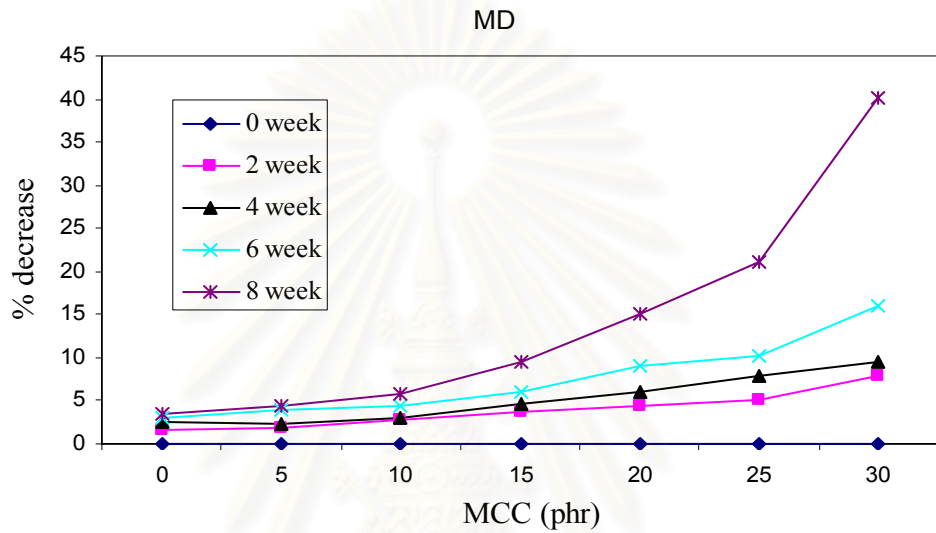


(ข)

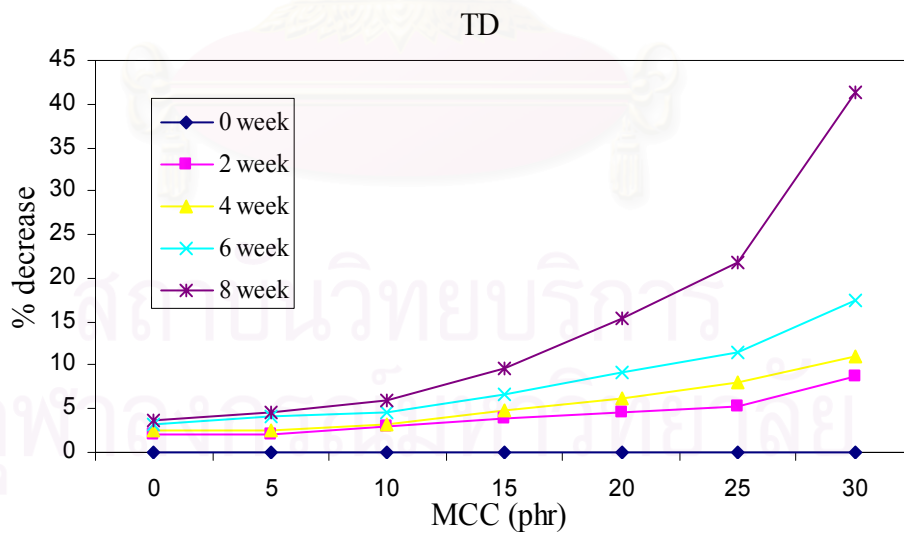
รูปที่ 4.23 ความต้านแรงดึงของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค
ตามแนว (ก) MD และ (ข) TD

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมจากเศษผ้าฝ้ายนี้สามารถใช้เป็นสารเสริมแรงให้กับพีวีซีได้ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อระยะเวลาการฝังดินเพิ่มขึ้นความต้านแรงดึงของขึ้นทอสอบมีแนวโน้มลดลง และลดลงมากที่สุดเมื่อผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคปริมาณ 30 phr สำหรับเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความต้านแรงดึงแสดงไว้ในรูปที่ 4.24 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขึ้นทอสอบมีแนวโน้มที่จะเกิดการย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป



(ก)

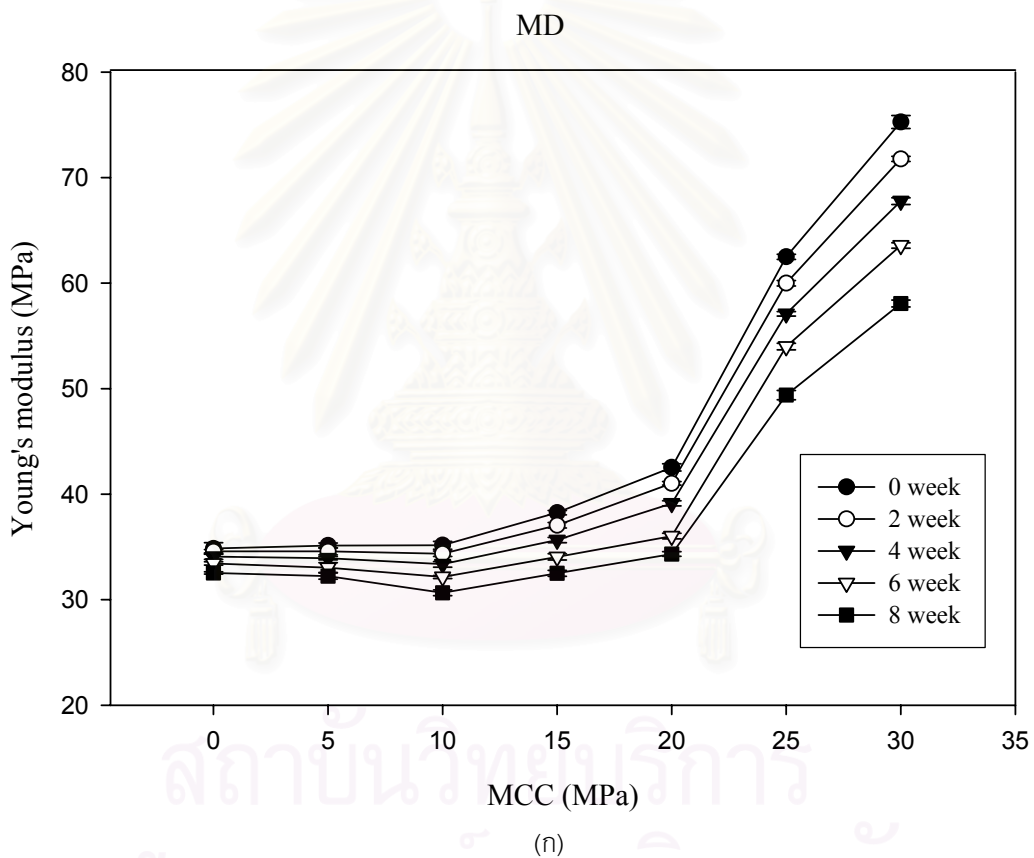


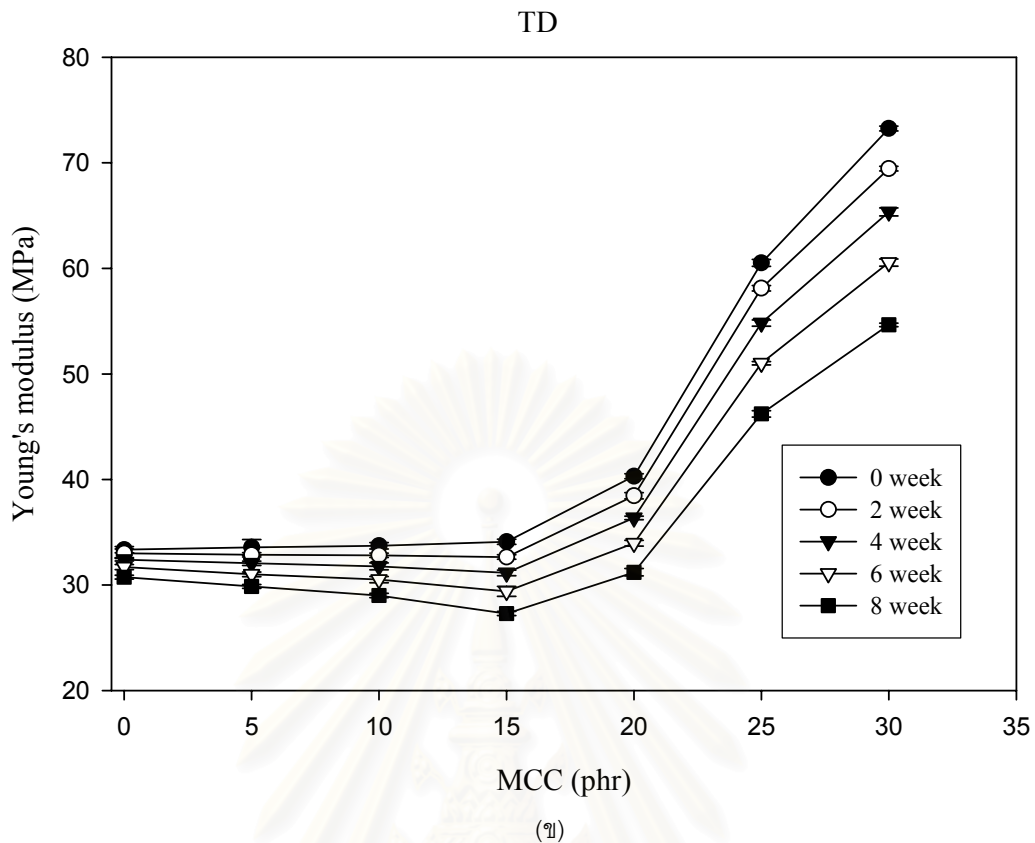
(ข)

รูปที่ 4.24 เปอร์เซนต์การลดลงของค่าความต้านแรงดึงของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ตามแนว (ก) MD และ (ข) TD

4.4.4.2 ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus)

รูปที่ 4.25 แสดงค่ายั่งส์มอดุลัสตามแนว MD และ TD ของชิ้นทดสอบพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคปริมาณต่างๆ กัน ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่ายั่งส์มอดุลัสของชิ้นทดสอบทุกอัตราส่วนผสมตามแนว MD มีค่าสูงกว่าตามแนว TD เล็กน้อย เช่นเดียวกับค่าความต้านแรงดึง นอกจากนี้ ค่ายั่งส์มอดุลัสของชิ้นทดสอบที่ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมีค่าสูงกว่าฟิล์มพีวีซีที่ไม่ได้ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใส่ในปริมาณ 25 phr และ 30 phr

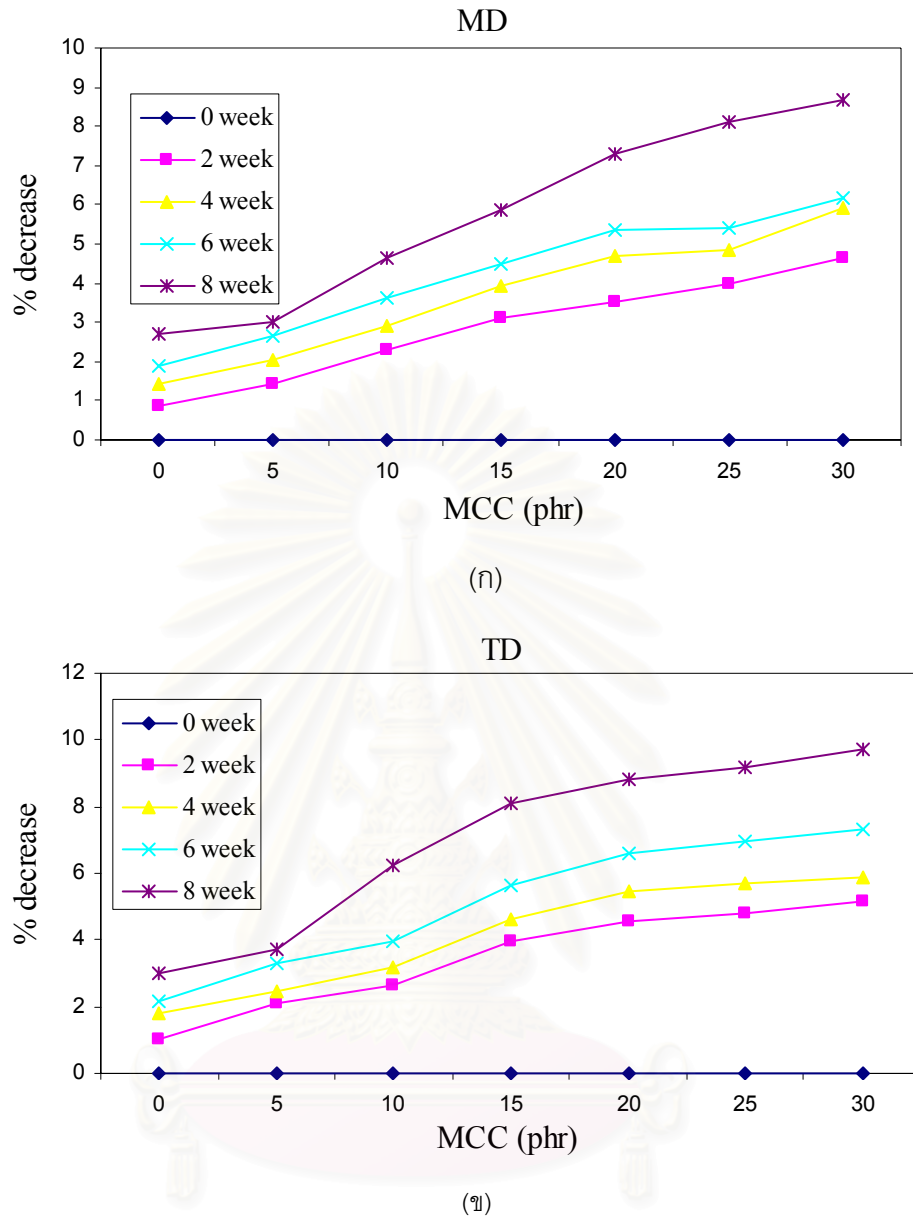




รูปที่ 4.25 ค่ายังส์มอดุลัสของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ตามแนว (ก) MD และ (ข) TD

แสดงให้เห็นว่าเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่ใส่เข้าไปในพีวีซีมีผลทำให้ขึ้นทดสอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นการยึดตัวของฟิล์ม จึงเกิดได้ยากทั้งนี้เพราะการใส่ฟิลเลอร์มีผลทำให้ค่ายังส์มอดุลัสสูงขึ้น [20] นอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อระยะเวลาการฝังดินเพิ่มขึ้น ค่ายังส์มอดุลัสของขึ้นทดสอบมีแนวโน้มลดลง และลดลงมากที่สุดเมื่อผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคปริมาณ 30 phr สำหรับเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่ายังส์มอดุลัสแสดงไว้ในรูปที่ 4.26 ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของการถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

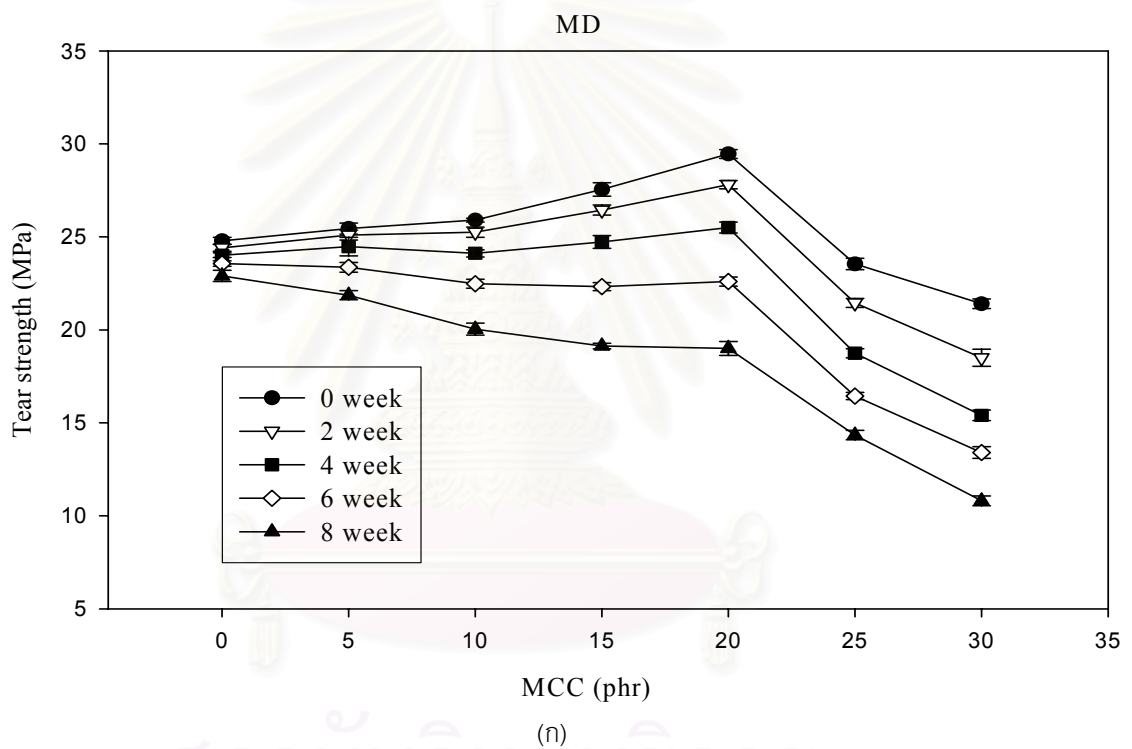


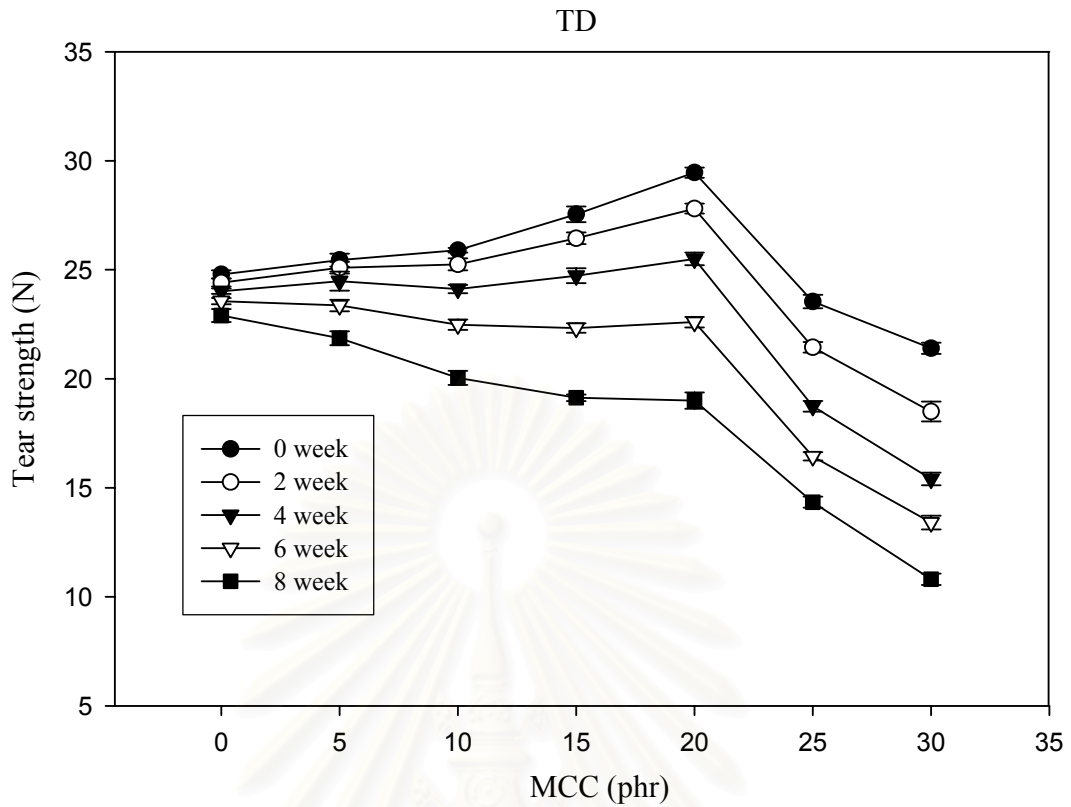
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบการลดลงของค่ายังสัมผัสดุลัสของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลส
แบบผลึกระดับจุลภาค ตามแนว (ก) MD และ (ข) TD

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.4.3 ความต้านแรงฉีกขาด (Tear strength)

รูปที่ 4.27 แสดงค่าความต้านแรงฉีกขาดตามแนว MD และ TD ของชั้นทดสอบพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคปริมาณต่างๆ กัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความต้านแรงฉีกขาดของชั้นทดสอบทุกอัตราส่วนผสมตามแนว MD มีค่าสูงกว่าตามแนว TD เล็กน้อย เช่นเดียวกับค่าความต้านแรงดึง นอกจากนี้ ความต้านแรงฉีกขาดของชั้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคเพิ่มขึ้นจนถึง 20 phr และลดลงเมื่อใส่ในปริมาณ 25 และ 30 phr ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณฟิลเลอร์ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ชั้นทดสอบมีความแข็งเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ความเหนียวหรือความต้านแรงฉีกขาดลดลง

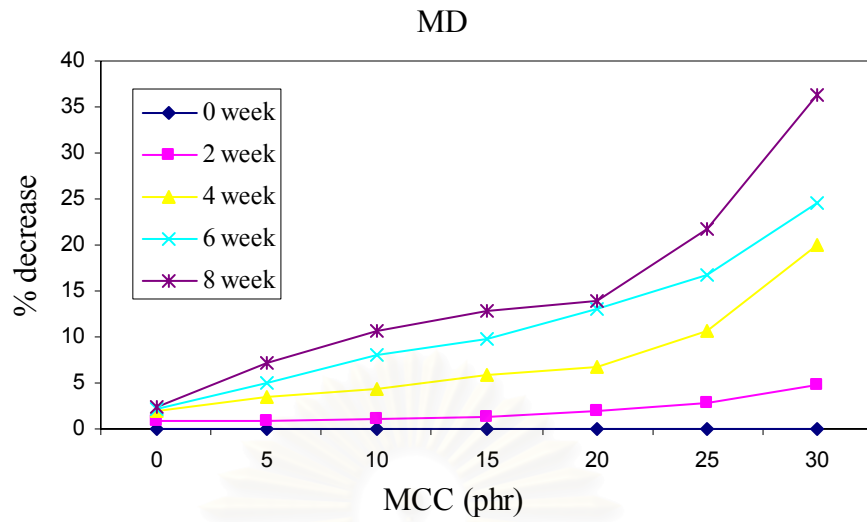




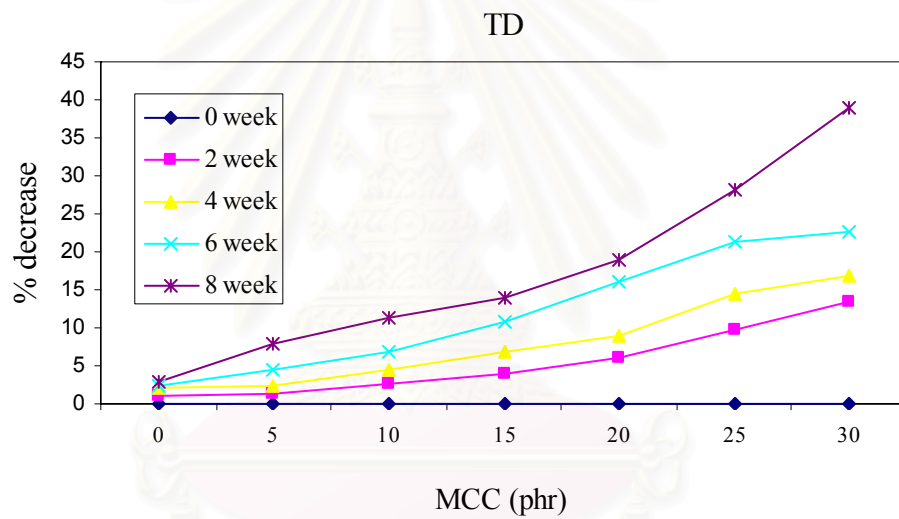
(ข)

รูปที่ 4.27 ความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ตามแนว (ก) MD และ (ข) TD

จากรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านแรงฉีกขาดของชั้นทดสอบพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการฝังดินเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคปริมาณ 30 phr สำหรับเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความต้านแรงฉีกขาดแสดงไว้ในรูปที่ 4.28 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าชั้นทดสอบมีแนวโน้มที่จะถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบการลดลงของค่าความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มพีวีซี

ผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค ตามแนว (ก) MD และ (ข) TD

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 เซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เตรียมได้จากการไฮโดรไลซ์เศษผ้าฝ้ายด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองอมน้ำตาล มีเปอร์เซ็นต์ผลได้ประมาณ 90% มีขนาดอนุภาคด้านยาวโดยเฉลี่ย $40 \mu\text{m}$ และ aspect ratio ประมาณ 8, T_m ประมาณ 213 องศาเซลเซียส และมี T_g ประมาณ 320 องศาเซลเซียส

5.1.2 การเติมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคในฟิล์มพีวีซี ส่งผลให้ฟิล์มมีความต้านแรงดึงและยังสัมมอดูลัสเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงที่สุดเมื่อใส่ในปริมาณเพิ่มขึ้น

5.1.3 ความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมีค่าเพิ่มขึ้น และกลับลดลงเมื่อปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมากกว่า 20 phr

5.1.4 การดูดความชื้นของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคที่เพิ่มขึ้น

5.1.5 ภายหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ สมบัติเชิงกลของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคมีค่าลดลง ในขณะที่การดูดความชื้นและน้ำหนักที่หายไปของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.6 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ของฟิล์มพีวีซีผสมเซลลูโลสแบบ-ผลึกระดับจุลภาคแสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายของฟิล์มด้วยกระบวนการทางชีวภาพซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติเชิงกล การดูดซึมน้ำ และน้ำหนักของฟิล์มที่หายไป

เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วพบว่า การผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคในฟิล์มพีวีซีมีผลทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันฟิล์มเหล่านี้สามารถถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามไม่ควรผสมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคในปริมาณที่มากเกินไป เพราะจะทำให้การขึ้นรูปยากขึ้น อีกทั้งความเข้ากันได้ระหว่างพีวีซีและเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาการเตรียมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคจากวัสดุเหลือใช้อื่นๆ เช่น ชี๊ เลื่อย เป็นต้น

5.2.2 ควรศึกษาถึงการนำเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคไปผสมกับพลาสติกชนิดอื่น เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีน เป็นต้น เพื่อนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

5.2.3 ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบในรูปแบบอื่น เช่น การฉีดขึ้นรูป เพื่อนำไปประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Aminabhavi, T.M., and R.H., Balundai. (1990) "A Review On Biodegradable Plastics" Polym.-plast. Technol. Eng, 29(3), 235-262.
2. มุทิตา พงษ์มาลา และ กฤษณา รุจิพงศ์ภัทร์. (2542) "การเตรียมพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพโดยใช้เซลล์โลสทิสเกอร์ที่ได้จากกระดาษที่ใช้แล้ว", ภาควิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. Wei, Sung., and Zivko, L., Nikolov, (1992) "Accelerated Degradation Studies of Starch- Filled Polyethylene Films", Ind. Eng. Chem. Res, 31, 2332-2339.
4. Chella, G., Moth, Maria., and Ines, B., Thvares. (1997) "Study of recycling and biodegradability of ethylene-co-vinyl acetate reject by thermal analysis" , Polym.-plast.Degradation and Stability, 57,183-186.
5. นรศิษฐ์ จันทร์กุล. (2547) "การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวเหนียวตัดแปรกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ", วิทยานิพนธ์ปริญามหาบัณฑิต, ภาควิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. อุบลทิพย์ ราวีทิพย์. (2546) "อิพอกซีเรซินตัดแปรด้วยพีวีซีพลาสติกซอล", วิทยานิพนธ์ปริญามหาบัณฑิต, ภาควิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
7. ชูลีพร จูงสาย. (2535) "การศึกษาเอนไซม์เซลลูเลสจากเชื้อรา", วิทยานิพนธ์ปริญามหาบัณฑิต, คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
8. Battista, O.A., Sc.D. (1975) Microcrystal Polymer Science, MeGRAW-HILL COMPANY.
9. Kroon-Batenburg, L.M.J., and Kroon, J. (1997) "The crystal and molecular structure of cellulose I and I" , Glycoconjugate Journal, 14, 667-690.
10. O.A. Battista. (1950) "Hydrolysis and Crystallization, Industrial and Engineering Crystallization" , Industrial and Engineering Chemistry , 42(3), 502 – 507.
11. structure cellulose. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก [http:// www. Google.com](http://www.Google.com) , 2006.
12. จินตนา สิริพิทยานานนท์, (2537) "การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก", เอกสารประกอบการสอน , มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

13. cellulose II&I. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก
[http://www. Google.com](http://www.Google.com). “Acceley. Atomistic modling of the complex interactions cellulose I&II polymorphs”, 14.06.2006.
14. cellulose II&I. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก
[http://www. Google.com](http://www.Google.com). cellulose II&I. 10.06.2006.
15. Carrillo, F., Colom, X., Sunol, J.J., and Saurina, J. (1999) “Structure FT- IR analysis thermal characterisation of lyocell and viscose-type fiber” Thermal character European Polymer Journal, 40, 2229-2234.
16. Weimer, P.J., French, A.D. and Calamari, T. A. (1997) “Differential Fermentation of Cellulose Allomorphs by Ruminant Cellulolytic Bacteria” American Society for Microbiology, 14, 667-690.
17. Kiyoshi Endo. (2002) “Synthesis and structure of poly(vinyl chloride)”, Prog. Polym. Sci, 27, 2021 - 2054.
18. เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร์. “Selected Topic in Polymer Science. Part I”, เอกสารประกอบการสอน, ภาควิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
19. Jesse Edenbaum. (1987) “Fundamentals of Polymers and Formulation”, 17-77.
20. วิฑูรย์ ศิริไพบูลย์. (2535) “ขวดโพลีไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี)”, วารสารพลาสติก, 9(1), พฤษภาคม-มิถุนายน, 15-18.
21. สุวารี ศุภโชคชัย. (2537) “พีวีซีขึ้นในงานพลาสติกไซล”, วารสารพลาสติก, 11(3), พฤศจิกายน, 15-18.
22. อรุษา สรวารี. (2546) “สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม1”, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
23. เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร์. “สมบัติของพอลิเมอร์”, เอกสารประกอบการสอน, ภาควิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
24. บรรเลง ศรีนิล. (2536) “สารเพิ่มเนื้อและสารเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติก”, วารสารพลาสติก, 10(3) พฤศจิกายน, 25-32.
25. วิฑูรย์ ศิริไพบูลย์. (2537) “PVC อนาคตที่ก้าวไกล”, วารสารพลาสติก, ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-สิงหาคม , 26-34.

26. วิฑูรย์ ศิริไพบุลย์. (2536) “พีวีซีขนาดท่อ”, วารสารพลาสติก. 10(1), กรกฎาคม-สิงหาคม, 45-52.
27. Laser Light Scattering. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.Google.com>. Laser Light Scattering, 2006.
28. Nekane, Ganzalez, Agurlzane, Mugica, and Fernandez-Berridi, M., Jose. (2006) “Application of high resolution thermogravimetry to the study of thermal stability of poly(vinyl chloride) resins”, Polymer Degradation and Stability, 91, 629-633.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ก.1 ผลการไฮโดรไลซ์จากเศษผ้าฝ้ายเส้นใยรวม

ตารางที่ ก.1.1

วัตถุดิบ	น้ำหนักเซลลูโลสแบบผลึก ที่ไฮโดรไลซ์ได้ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์เซลลูโลสแบบผลึก ระดับจุลภาคที่ไฮโดรไลซ์ได้
เศษผ้าฝ้ายดิบ	36.1175	90.2977
เส้นใยรวม	0.3241	32.41



รูปที่ ก.1.1 ลักษณะเศษผ้าฝ้ายและเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคจากเศษผ้าฝ้าย



รูปที่ ก.1.2 ลักษณะเส้นใยรวมและเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาคจากเศษเส้นใยรวม

ก.2 ผลการตรวจวัดขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค Laser Light scattering (ครั้งที่ 1)

Result Statistics							
Beam Length 2.40 mm		Obscuration 16.1%		Residual 0.306 %			
Distribution Type Volume		Concentration = 0.0098 %vol		Density = 1.000 g/cub.cm		Specific.S.A = 23.7576 sq. m/g	
Mean Diameter		D (v, 0,1) = 0.07 µm		D (v, 0,5) = 19.09 µm		D (v, 0,9) = 100.44 µm	
D [4, 3]= 39.69 µm		D (3,2) = 0.25 µm					
Size Low (µm)	ln%	Size High (µm)	Under%	Size Low (µm)	ln%	Size High (µm)	Under%
0.05	4.83	0.06	4.83	6.63	0.95	7.72	36.11
0.06	6.77	0.07	11.59	7.72	1.23	9.00	37.34
0.07	6.25	0.08	17.84	9.00	1.61	10.48	38.94
0.08	4.51	0.09	22.35	10.48	2.09	12.21	41.03
0.09	2.73	0.11	25.07	12.21	2.67	14.22	43.70
0.11	1.51	0.13	26.58	14.22	3.29	16.57	46.99
0.13	0.83	0.15	27.41	16.57	3.85	19.31	50.34
0.15	0.50	0.17	27.91	19.31	4.25	22.49	55.05
0.17	0.35	0.20	28.26	22.49	4.46	26.20	59.55
0.20	0.28	0.23	28.54	26.20	4.50	30.53	64.04
0.23	0.24	0.27	28.78	30.53	4.41	35.56	68.45
0.27	0.21	0.31	28.99	35.56	4.24	41.43	72.69
0.31	0.18	0.36	29.17	41.43	4.03	48.27	76.73
0.36	0.15	0.42	29.32	48.27	3.79	56.23	80.51
0.42	0.14	0.49	29.46	56.23	3.39	65.23	83.90
0.49	0.14	0.58	29.75	65.51	2.94	76.32	86.84
0.58	0.15	0.67	29.61	76.32	2.49	88.91	89.33
0.67	0.16	0.78	29.75	88.91	2.08	103.58	91.41
0.78	0.18	0.91	30.10	103.58	1.75	120.67	93.16
0.91	0.21	1.06	30.31	120.67	1.45	140.58	94.61
1.06	0.23	1.24	30.55	140.58	1.20	163.77	95.81
1.24	0.24	1.44	30.79	163.77	1.00	190.80	96.81
1.44	0.26	1.68	31.05	190.80	0.84	222.28	97.65
1.68	0.28	1.95	31.33	222.28	0.71	258.95	98.36
1.95	0.30	2.28	31.63	258.95	0.58	301.65	98.95
2.28	0.34	2.65	31.97	301.68	0.46	351.46	99.41
2.65	0.38	3.09	32.35	351.46	0.33	409.45	99.73
3.09	0.42	3.60	32.77	409.45	0.20	477.01	99.92
3.60	0.47	4.19	33.25	477.01	0.07	555.71	100.00
4.16	0.53	4.88	33.78	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.62	5.89	34.40	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.76	6.63	35.16	754.23	0.00	878.67	100.00

ครั้งที่ 2

Result Statistics							
Beam Length 2.40 mm		Obscuration 16.1%		Residual 0.304 %			
Distribution Type Volume		Concentration = 0.0098 %vol		Density = 1.000 g/cub.cm		Specific.S.A = 24.0104 sq. m/g	
Mean Diameter		D (v, 0,1) = 0.07 µm		D (v, 0,5) = 19.09 µm		D (v, 0,9) = 94.46 µm	
D [4, 3]= 37.62 µm		D (3,2) = 0.25 µm					
Size Low (µm)	ln%	Size High (µm)	Under%	Size Low (µm)	ln%	Size High (µm)	Under%
0.05	5.04	0.06	5.05	6.63	0.94	7.72	36.12
0.06	6.96	0.07	12.00	7.72	1.22	9.00	37.33
0.07	6.29	0.08	18.29	9.00	1.60	10.48	38.93
0.08	4.42	0.09	22.72	10.48	2.08	12.21	41.01
0.09	2.61	0.11	25.33	12.21	2.67	14.22	43.69
0.11	1.41	0.13	26.74	14.22	3.30	16.57	46.98
0.13	0.77	0.15	27.50	16.57	3.87	19.31	50.86
0.15	0.46	0.17	27.97	19.31	4.28	22.4	55.14
0.17	0.33	0.20	28.29	22.49	4.48	26.20	59.62
0.20	0.27	0.23	28.56	26.20	4.50	30.53	64.12
0.23	0.24	0.27	28.80	30.53	4.40	35.56	68.51
0.27	0.21	0.31	29.01	35.56	4.22	41.43	72.73
0.31	0.18	0.36	29.18	41.43	3.99	48.27	76.72
0.36	0.15	0.42	29.33	48.27	3.73	56.23	80.45
0.42	0.16	0.49	29.47	56.23	3.34	65.23	83.79
0.49	0.19	0.58	29.62	65.51	2.89	76.32	86.69
0.58	0.22	0.67	29.76	76.32	2.45	88.91	89.14
0.67	0.24	0.78	29.93	88.91	2.06	103.58	91.20
0.78	0.25	0.91	30.11	103.58	1.74	120.67	92.94
0.91	0.26	1.06	30.33	120.67	1.46	140.58	94.40
1.06	0.24	1.24	30.57	140.58	1.21	163.77	95.61
1.24	0.25	1.44	30.81	163.77	1.02	190.80	96.63
1.44	0.26	1.68	31.07	190.80	0.86	222.28	97.49
1.68	0.28	1.95	31.35	222.28	0.73	258.95	98.22
1.95	0.31	2.28	31.66	258.95	0.60	301.65	98.83
2.28	0.34	2.65	32.00	301.68	0.48	351.46	99.31
2.65	0.38	3.09	32.38	351.46	0.36	409.45	99.66
3.09	0.42	3.60	32.80	409.45	0.23	477.01	99.89
3.60	0.47	4.19	33.27	477.01	0.11	555.71	100.00
4.16	0.53	4.88	33.81	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.62	5.89	34.43	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.75	6.63	35.18	754.23	0.00	878.67	100.00

ครั้งที่ 3

Result Statistics							
Beam Length 2.40 mm		Obscuration 16.0%		Residual 0.286 %			
Distribution Type Volume		Concentration = 0.0098 %vol		Density = 1.000 g/cub.cm		Specific.S.A = 23.7576 m/g	
Mean Diameter		D (v, 0,1) = 0.07 µm		D (v, 0,5) = 19.09 µm		D (v, 0,9) = 100.44 µm	
D [4, 3]= 39.69 µm		D (3,2) = 0.25 µm					
Size Low (µm)	ln%	Size High (µm)	Under%	Size Low (µm)	ln%	Size High (µm)	Under%
0.05	4.95	0.06	4.95	6.63	0.93	7.72	35.81
0.06	6.85	0.07	11.81	7.72	1.21	9.00	37.01
0.07	6.23	0.08	18.03	9.00	1.58	10.48	38.59
0.08	4.41	0.09	22.44	10.48	2.05	12.21	40.64
0.09	2.62	0.11	25.06	12.21	2.62	14.22	43.26
0.11	1.42	0.13	26.48	14.22	3.24	16.57	46.50
0.13	0.78	0.15	27.26	16.57	3.80	19.31	50.30
0.15	0.47	0.17	27.73	19.31	4.20	22.49	54.50
0.17	0.33	0.20	28.05	22.49	4.41	26.20	58.91
0.20	0.27	0.23	28.32	26.20	4.44	30.53	63.36
0.23	0.24	0.27	28.56	30.53	4.35	35.56	67.71
0.27	0.21	0.31	28.77	35.56	4.19	41.43	71.89
0.31	0.17	0.36	28.94	41.43	3.97	48.27	75.87
0.36	0.15	0.42	29.09	48.27	3.73	56.23	79.59
0.42	0.14	0.49	29.23	56.23	3.34	65.23	82.93
0.49	0.14	0.58	29.37	65.51	2.90	76.32	85.83
0.58	0.14	0.67	29.51	76.32	2.47	88.91	88.30
0.67	0.16	0.78	29.67	88.91	2.10	103.58	90.40
0.78	0.18	0.91	29.86	103.58	1.79	120.67	92.18
0.91	0.21	1.06	30.07	120.67	1.52	140.58	93.70
1.06	0.23	1.24	30.30	140.58	1.29	163.77	94.99
1.24	0.24	1.44	30.55	163.77	1.10	190.80	96.09
1.44	0.25	1.68	30.08	190.80	0.95	222.28	97.04
1.68	0.28	1.95	31.08	222.28	0.82	258.95	97.87
1.95	0.30	2.28	31.38	258.95	0.69	301.65	98.56
2.28	0.33	2.65	31.71	301.68	0.56	351.46	99.11
2.65	0.38	3.09	32.09	351.46	0.43	409.45	99.54
3.09	0.42	3.60	32.51	409.45	0.30	477.01	99.84
3.60	0.47	4.19	32.98	477.01	0.16	555.71	100.00
4.16	0.53	4.88	33.51	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.62	5.89	34.12	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.75	6.63	34.87	754.23	0.00	878.67	100.00

ภาคผนวก ข

ข.1 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ผสมเซลลูโลสที่ผสมเซลลูโลสระดับจุดภาคที่ 0-30 เปอร์เซ็นต์ และที่สัปดาห์ต่างๆ

ข.1.1 สมบัติการทนแรงดึง (Tensile)

0 week

% MC	Tensile (MD)	Tensile (TD)
0%	12.644	11.994
	12.125	11.913
	13.106	12.126
	12.862	12.085
	12.616	11.845
Average	12.6706 ± 0.3631	11.9908 ± 0.1155
5%	15.425	15.117
	15.284	14.561
	15.548	15.061
	14.984	14.874
	14.987	13.897
Average	15.2456 ± 0.2551	14.702 ± 0.4996
10%	17.375	16.568
	16.958	16.703
	17.025	16.753
	16.945	16.012
	16.832	16.987
Average	17.027 ± 0.20653	16.6046 ± 0.3641

% MC	Tensile (MD)	Tensile (TD)
15%	16.987 17.115 16.997 16.612 16.832	15.661 15.896 16.017 15.589 15.987
Average	16.9086 ± 0.1939	15.83 ± 0.194
20%	17.335 17.085 17.897 17.598 17.166	16.184 16.081 16.987 16.012 16.837
Average	17.4162 ± 0.3328	16.419 ± 0.4548
25%	18.581 18.183 18.646 19.112 17.955	17.283 18.012 17.346 17.587 17.854
Average	18.4954 ± 0.4471	17.6164 ± 0.3154
30%	18.096 18.019 18.089 18.087 18.023	17.106 16.897 17.348 16.894 16.789
Average	18.0628 ± 0.03833	17.0068 ± 0.2227

2 week

% MC	Tensile (MD)	Tensile (TD)
0%	13.035 12.434 12.508 12.569 12.347	11.585 11.964 11.532 11.608 12.086
Average	12.5786 ± 0.26829	11.7556 ± 0.252722
5%	14.868. 14.977 15.085 15.235 15.364	13.656 13.672 13.619 14.192 14.396
Average	15.1058 ± 0.198072	13.9694 ± 0.0323
10%	16.756 16.823 17.114 16.457 17.034	15.987 16.094 16.462 16.262 15.851
Average	16.7968 ± 0.20653	16.1312 ± 0.2383

% MC	Tensile (MD)	Tensile (TD)
15%	16.585	15.498
	16.179	15.372
	16.656	14.878
	16.765	15.554
	16.858	14.924
Average	16.6086 ± 0.2617	15.2452 ± 0.32146
20%	17.034	15.458
	17.278	15.743
	16.883	16.012
	16.782	15.312
	16.854	15.911
Average	16.9662 ± 0.197	15.6872 ± 0.29664
25%	17.968	16.945
	17.549	16.627
	18.237	17.087
	17.752	16.833
	17.721	16.374
Average	17.8454 ± 0.26478	16.7732 ± 0.2794
30%	17.152	15.175
	17.059	15.551
	17.325	16.043
	17.074	15.976
	17.231	15.452
Average	17.1682 ± 0.1113	15.6394 ± 0.3656

4 week

% MC	Tensile (MD)	Tensile (TD)
0%	12.331 12.172 12.464 12.687 12.739	11.366 11.457 11.369 11.288 11.798
Average	12.4786 ± 0.2383	11.4556 ± 0.2
5%	14.922 14.846 15.089 14.612 14.808	13.315 13.356 13.508 13.739 13.179
Average	14.8554 ± 0.1736	13.4194 ± 0.21372
10%	16.556 16.535 16.389 16.299 16.189	15.082 15.387 15.775 15.678 15.804
Average	16.387 ± 0.20653	15.5452 ± 0.0.2938

% MC	Tensile (MD)	Tensile (TD)
15%	16.155	15.011
	16.188	14.491
	15.918	14.515
	15.723	14.244
	16.059	14.355
Average	16.0086 ± 0.191	14.5232 ± 0.2938
20%	15.611	14.589
	15.665	14.125
	16.349	15.086
	15.182	15.355
	16.274	14.528
Average	15.8162 ± 0.49	14.7366 ± 0.4857
25%	17.012	15.788
	16.521	15.587
	16.415	15.348
	16.744	15.655
	16.785	15.238
Average	16.6954 ± 0.023434	15.5232 ± 0.2256
30%	15.608	14.098
	15.754	14.248
	15.817	13.715
	15.604	13.867
	15.558	14.556
Average	15.6682 ± 0.1111	14.0968 ± 0.32875

6 week

% MC	Tensile (MD)	Tensile (TD)
0%	12.773	11.343
	12.455	11.198
	12.374	11.014
	12.138	10.898
	12.028	11.325
Average	12.3536 ± 0.29115	11.1556 ± 0.19494
5%	14.581	13.035
	14.371	12.541
	14.493	13.131
	14.635	12.973
	14.822	12.667
Average	14.58 ± 0.16795	12.8694 ± 0.2526
10%	15.791	14.932
	16.066	15.047
	15.544	15.147
	15.537	14.874
	16.122	14.656
Average	15.812 ± 0.27771	14.9312 ± 0.1864

% MC	Tensile (MD)	Tensile (TD)
15%	15.107 15.284 15.362 15.243 15.042	13.287 13.785 13.711 13.548 13.895
Average	15.2076 ± 0.13	13.6452 ± 0.2366
20%	14.482 14.346 14.074 14.241 14.438	13.634 13.561 13.422 13.345 13.471
Average	14.3162 ± 0.163958	13.4866 ± 0.11372
25%	14.839 15.358 15.204 14.962 15.614	13.987 14.072 14.253 13.776 13.587
Average	15.1954 ± 0.30953	13.935 ± 0.2593
30%	13.619 13.451 13.551 13.721 13.999	11.777 12.099 11.878 11.978 12.252
Average	13.6682 ± 0.2094	11.9968 ± 0.18597

8 week

% MC	Tensile (MD)	Tensile (TD)
0%	12.358	10.381
	12.352	10.204
	12.025	10.711
	12.478	10.431
	11.805	10.301
Average	12.2036 ± 0.27925	10.4056 ± 0.19111
5%	14.146	12.401
	14.269	12.113
	14.425	12.031
	14.354	12.348
	13.948	12.454
Average	14.2304 ± 0.18979	12.2694 ± 0.18632
10%	15.562	14.076
	14.935	13.988
	15.152	14.345
	15.277	13.869
	14.884	14.128
Average	15.162 ± 0.2748	14.0812 ± 0.17741

% MC	Tensile (MD)	Tensile (TD)
15%	14.371	12.147
	14.102	11.987
	14.257	12.891
	14.082	12.672
	13.976	12.529
Average	14.1576 ± 0.15588	12.4452 ± 0.37285
20%	11.764	11.787
	11.872	11.874
	12.083	11.248
	12.155	11.511
	12.207	12.013
Average	12.0162 ± 0.16395	11.6866 ± 0.11372
25%	13.912	11.851
	13.871	11.615
	13.598	11.121
	13.612	11.012
	13.487	11.517
Average	13.696 ± 0.185487	11.4232 ± 0.25933
30%	10.161	8.547
	11.056	8.787
	10.764	8.655
	10.346	8.127
	10.514	8.364
Average	10.5682 ± 0.35157	8.496 ± 0.25794

๗ 1.2 ผลความแข็งแรงยังมอดุลัส (Young's modulus)

0 week

% MC	Young's modulus (MD)	Young's modulus (TD)
0%	34.743	33.744
	34.528	33.307
	34.255	33.116
	35.383	33.047
	35.516	33.526
Average	34.885 ± 0.5455	33.348 ± 0.28922
5%	35.812	33.965
	34.964	34.121
	35.295	33.786
	34.286	33.656
	35.328	32.287
Average	35.137 ± 0.2340	33.563 ± 0.7476
10%	35.378	33.565
	35.657	33.303
	35.055	33.748
	34.753	33.872
	34.932	34.087
Average	35.155 ± 0.3616	33.715 ± 0.2984

% MC	Young's modulus (MD)	Young's modulus (TD)
15%	38.317	33.976
	38.185	33.796
	37.937	33.043
	38.366	34.394
	38.455	34.281
Average	38.252 ± 0.2013	34.098 ± 0.2402
20%	42.431	40.274
	42.172	40.496
	42.996	40.586
	42.763	39.997
	42.278	40.309
Average	42.528 ± 0.3438	40.309 ± 0.2366
25%	62.404	60.586
	62.212	60.183
	62.396	60.654
	62.557	60.212
	62.856	60.955
Average	62.485 ± 0.2407	60.518 ± 0.3240
30%	75.096	73.156
	75.389	72.897
	75.249	73.348
	75.268	73.395
	75.313	73.469
Average	75.263 ± 0.1078	73.253 ± 0.2302

2 Week

% MC	Young's modulus (MD)	Young's modulus (TD)
0%	34.568	33.385
	34.814	32.182
	34.672	32.796
	34.397	32.372
	34.474	32.255
Average	34.585 ± 0.1642	32.998 ± 0.4130
5%	34.899	33.216
	34.975	32.681
	34.767	32.482
	34.233	32.783
	34.324	33.163
Average	34.637 ± 0.3370	32.815 ± 0.2096
10%	34.046	32.941
	34.123	32.864
	34.465	32.647
	34.527	33.062
	34.614	32.561
Average	34.355 ± 0.2540	32.812 ± 0.2073

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

% MC	Young's modulus (MD)	Young's modulus (TD)
15%	37.366	32.753
	37.089	32.463
	37.173	32.952
	37.668	32.617
	37.964	32.455
Average	37.052 ± 0.2597	32.648 ± 0.2096
20%	41.027	38.358
	41.208	38.182
	41.123	38.858
	41.025	38.673
	40.757	38.224
Average	41.028 ± 0.1694	38.459 ± 0.2945
25%	59.875	57.934
	60.199	57.828
	60.274	58.083
	59.698	58.261
	59.879	58.484
Average	59.985 ± 0.2423	58.118 ± 0.2615
30%	72.082	69.263
	71.879	69.431
	71.585	69.313
	71.484	69.826
	71.785	69.432
Average	71.763 ± 0.2372	69.453 ± 0.2212

4 week

% MC	Young's modulus (MD)	Young's modulus (TD)
0%	34.091	32.371
	34.394	32.367
	34.193	32.366
	33.685	32.288
	34.062	32.598
Average	34.085 ± 0.2587	32.398 ± 0.11706
5%	33.922	32.128
	33.746	32.331
	34.056	31.907
	34.216	31.818
	34.835	32.141
Average	34.055 ± 0.1557	32.065 ± 0.2040
10%	33.776	31.282
	33.415	32.191
	33.299	32.094
	33.039	31.654
	33.189	31.604
Average	33.355 ± 0.2639	31.765 ± 0.32668

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

% MC	Young's modulus (MD)	Young's modulus (TD)
15%	33.369	31.389
	33.468	31.481
	33.842	30.884
	33.952	30.958
	33.629	31.028
Average	33.652 ± 0.2452	31.148 ± 0.2688
20%	39.301	36.151
	39.444	36.247
	39.132	36.356
	38.851	36.571
	38.912	36.461
Average	39.128 ± 0.2515	36.359 ± 0.1667
25%	57.212	55.088
	57.131	55.167
	57.265	54.748
	57.085	54.654
	56.732	54.433
Average	57.085 ± 0.2093	54.818 ± 0.3060
30%	67.566	65.592
	68.148	65.335
	68.057	64.765
	67.606	65.822
	67.448	65.251
Average	67.763 ± 0.3167	65.353 ± 0.3979

6 week

% MC	Young's modulus (MD)	Young's modulus (TD)
0%	33.443	31.542
	33.528	31.498
	33.343	31.671
	33.638	32.095
	33.223	31.684
Average	33.435 ± 0.1607	31.698 ± 0.2360
5%	33.321	31.035
	33.182	31.121
	33.041	30.981
	33.388	30.671
	32.253	31.267
Average	33.037 ± 0.4581	31.015 ± 0.2205
10%	31.991	30.932
	32.132	30.326
	32.043	30.667
	32.252	30.156
	32.357	30.494
Average	32.155 ± 0.1501	30.515 ± 0.3008

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

% MC	Young's modulus (MD)	Young's modulus (TD)
15%	34.307	30.187
	34.278	29.485
	33.647	29.231
	34.816	28.997
	34.212	29.095
Average	34.052 ± 0.3005	29.398 ± 0.4750
20%	36.039	33.834
	36.458	33.621
	35.784	33.917
	35.977	34.082
	35.882	34.341
Average	36.028 ± 0.2590	33.959 ± 0.2705
25%	53.832	50.947
	54.466	51.022
	54.099	50.814
	53.891	51.041
	53.637	51.266
Average	53.985 ± 0.3153	51.018 ± 0.1648
30%	64.019	60.628
	63.432	60.046
	63.502	60.438
	63.373	60.947
	63.489	60.706
Average	63.563 ± 0.2599	60.553 ± 0.3370

8 week

% MC	Young's modulus (MD)	Young's modulus (TD)
0%	32.558 32.662 32.477 32.393 32.585	30.681 30.493 30.741 30.984 30.841
Average	32.535 ± 0.1033	30.748 ± 0.18296
5%	31.946 32.169 32.248 31.554 32.258	29.501 29.713 30.741 30.984 30.841
Average	32.035 ± 0.2967	30.748 ± 0.1829
10%	30.762 30.935 30.343 30.401 30.884	29.053 28.848 28.757 28.179 29.238
Average	59.665 ± 0.2755	29.015 ± 0.2076

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

% MC	Young's modulus (MD)	Young's modulus (TD)
15%	32.381	27.197
	32.102	27.064
	32.252	27.348
	31.704	27.586
	31.821	27.295
Average	33.052 ± 0.2851	27.298 ± 0.1939
20%	33.553	31.557
	33.475	31.487
	33.381	31.315
	33.061	30.797
	33.215	30.889
Average	33.328 ± 0.2151	31.209 ± 0.3470
25%	49.072	46.351
	49.891	46.565
	49.663	45.945
	49.495	45.862
	48.804	46.367
Average	49.385 ± 0.4418	46.218 ± 0.3006
30%	58.261	54.577
	57.764	54.887
	57.956	54.755
	58.536	54.582
	57.808	54.464
Average	58.063 ± 0.3282	54.653 ± 0.1671

ข 1.3 สมบัติการทนแรงฉีกขาด

0 week

% MC	Tear (MD)	Tear (TD)
0%	25.385	24.745
	24.984	24.544
	25.238	24.924
	24.879	24.689
	25.316	25.014
Average	25.1184 ± 0.2185	24.7844 ± 0.1875
5%	26.096	25.587
	25.998	25.615
	26.173	25.312
	25.724	24.987
	26.224	25.715
Average	26.096 ± 0.3568	25.4432 ± 0.2955
10%	26.573	25.987
	26.212	26.012
	26.471	25.874
	26.654	25.745
	26.742	25.874
Average	26.5736 ± 0.18533	25.8984 ± 0.1066

% MC	Tear (MD)	Tear (TD)
15%	26.093	27.547
	26.279	27.041
	27.951	27.382
	28.198	27.941
	27.895	27.824
Average	28.0832 ± 0.16163	27.547 ± 0.3588
20%	29.874	29.741
	29.994	29.412
	30.291	29.354
	30.547	26.634
	30.784	29.147
Average	30.02 ± 0.2117	29.4576 ± 0.2349
25%	24.178	23.145
	23.872	23.987
	24.284	23.541
	23.698	23.414
	24.389	23.621
Average	24.0842 ± 0.28979	23.5416 ± 0.3075
30%	22.258	21.541
	22.185	21.471
	22.484	21.687
	22.397	21.012
	22.561	21.312
Average	22.377 ± 0.15507	21.4046 ± 0.2576

2 week

% MC	Tear (MD)	Tear (TD)
0%	25.38	24.547
	24.951	24.417
	24.965	24.214
	25.101	24.074
	24.701	24.314
Average	24.9602 ± 0.1589	24.3132 ± 0.1819
5%	25.874	24.987
	25.674	24.874
	25.917	24.745
	26.198	24.321
	26.279	24.547
Average	25.5824 ± 0.2476	24.6948 ± 0.26532
10%	26.078	25.741
	26.141	25.441
	26.578	25.354
	26.245	25.185
	26.351	25.021
Average	26.017 ± 0.1969	25.3484 ± 0.2723

% MC	Tear (MD)	Tear (TD)
15%	28.032	26.241
	27.541	26.541
	27.865	26.041
	27.784	26.741
	27.562	26.381
Average	27.6321 ± 0.2334	26.389 ± 0.2692
20%	29.184	28.124
	29.592	28.421
	29.845	28.147
	29.451	28.321
	29.987	28.687
Average	29.618 ± 0.3179	28.34 ± 0.2298
25%	23.845	22.412
	23.784	22.147
	23.621	22.213
	23.097	22.517
	23.517	22.741
Average	23.3842 ± 0.2960	22.406 ± 0.2392
30%	22.107	21.247
	21.741	20.412
	21.571	20.217
	21.647	21.114
	21.961	20.994
Average	21.8044 ± 0.2232	20.7966 ± 0.4545

4 week

% MC	Tear (MD)	Tear (TD)
0%	24.603	23.541
	24.214	23.871
	24.546	23.541
	24.158	23.215
	24.638	23.417
Average	24.4354 ± 0.22763	23.517 ± 0.12385
5%	24.987	24.546
	25.392	24.741
	24.485	24.147
	25.187	23.896
	25.241	24.063
Average	25.094 ± 0.1792	24.2786 ± 0.4996
10%	25.197	24.857
	25.323	23.874
	24.986	23.751
	24.897	24.145
	25.304	24.097
Average	25.1414 ± 0.1913	24.0158 ± 0.1949

% MC	Tear (MD)	Tear (TD)
15%	25.894	24.587
	25.549	24.025
	25.189	24.187
	25.699	24.879
	25.879	24.287
Average	25.642 ± 0.2901	24.393 ± 0.3401
20%	28.287	27.012
	28.459	26.841
	28.371	27.514
	28.561	27.412
	28.285	27.374
Average	28.3926 ± 0.1182	27.2306 ± 0.2886
25%	20.815	19.541
	20.898	19.321
	20.658	19.645
	21.104	19.124
	20.539	19.094
Average	20.8028 ± 0.2182	19.345 ± 0.23.92
30%	19.141	18.012
	18.507	18.372
	19.041	18.112
	19.207	17.802
	19.312	17.621
Average	19.0416 ± 0.3147	17.9838 ± 0.2883

6 Week

% MC	Tear (MD)	Tear (TD)
0%	23.699	23.012
	23.914	22.874
	24.074	22.994
	24.102	22.748
	23.758	22.688
Average	23.9094 ± 0.1812	22.8632 ± 0.1443
5%	24.589	23.547
	24.687	23.687
	24.749	23.354
	24.178	23.114
	24.798	23.098
Average	24.5062 ± 0.2665	23.36 ± 0.2603
10%	24.278	23.214
	24.547	23.478
	24.017	23.304
	24.124	22.997
	24.354	22.887
Average	24.0264 ± 0.20554	23.176 ± 0.23957

% MC	Tear (MD)	Tear (TD)
15%	24.878	23.471
	24.667	23.074
	24.278	23.641
	24.347	23.395
	25.097	23.504
Average	24.6534 ± 0.3472	23.417 ± 0.2114
20%	27.395	26.305
	27.587	26.045
	27.154	26.124
	27.689	26.241
	27.154	26.674
Average	27.3958 ± 0.24446	26.2778 ± 0.2433
25%	19.841	18.012
	19.657	18.457
	19.478	18.099
	19.308	18.241
	19.242	17.998
Average	19.5052 ± 0.2473	18.1614 ± 0.1914
30%	17.938	16.784
	17.541	16.541
	17.614	16.214
	18.278	16.874
	18.097	16.174
Average	17.8936 ± 0.3136	16.5174 ± 0.3196

8 week

% MC	Tear (MD)	Tear (TD)
0%	23.454	22.781
	23.543	22.642
	23.142	22.451
	23.612	22.636
	23.014	22.012
Average	23.3538 ± 0.26189	22.5044 ± 0.2991
5%	23.945	22.988
	23.714	22.741
	23.568	22.874
	23.898	22.514
	24.154	22.389
Average	22.8558 ± 0.22449	22.7012 ± 0.24806
10%	22.394	21.574
	22.456	21.816
	22.574	21.108
	22.781	21.224
	21.841	21.085
Average	22.4092 ± 0.35023	21.3614 ± 0.3206

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

% MC	Tear (MD)	Tear (TD)
15%	23.374	22.074
	23.189	21.874
	22.876	22.242
	22.704	21.901
	23.571	22.014
Average	23.1428 ± 0.3544	22.021 ± 0.1480
20%	26.147	25.014
	25.874	25.714
	25.751	25.217
	26.241	24.828
	26.317	24.812
Average	26.066 ± 0.2430	25.117 ± 0.3728
25%	18.784	17.651
	18.641	17.546
	18.374	17.091
	19.471	17.402
	19.254	17.104
Average	18.9048 ± 0.4495	17.3588 ± 0.2544
30%	16.245	15.019
	16.841	14.865
	15.897	14.626
	16.021	14.712
	16.314	15.279
Average	16.1778 ± 0.21292	14.9002 ± 0.2595

ภาคผนวก ค

ค.1. ผลการทดสอบสมบัติการย่อยสลาย

ค.1.1 ผลการทดสอบสมบัติการดูดซึ่มของฟิล์มพีวีซีเติมเซลลูโลสแบบผลึกระดับจุลภาค

%MC	%Moisture
0%	0.01
	0.0095
	0.008
	0.0105
	0.012
Average	0.01 ± 0.00145
5%	0.05
	0.0437
	0.66
	0.0342
	0.04
Average	0.04678 ± 0.01218
10%	0.09
	0.8
	0.064
	0.179
	0.1354
Average	0.10968 ± 0.046962

%MC	%Moisture
15%	0.31
	0.12
	0.21
	0.104
	0.207
Average	0.1902 ± 0.0827
20%	0.292
	0.152
	0.215
	0.39
	0.104
Average	0.2306 ± 0.1136
25%	0.31
	0.332
	0.445
	0.214
	0.201
Average	0.3004 ± 0.09917
30%	0.45
	0.54
	0.25
	0.31
	0.201
Average	0.3502 ± 0.14133

ค 1.2 สมบัติความสามารถในการย่อยสลาย

2 week

% MC	% weight loss (MD)	% weight loss (TD)
0%	0.0097	0.009
	0.008	0.075
	0.0126	0.011
	0.01	0.0148
	0.097	0.008
Average	0.01 ± 0.001654	0.01006 ± 0.0.0297
5%	0.333	0.362
	0.312	0.3631
	0.3141	0.283
	0.282	0.3175
	0.372	2.285
Average	0.32262 ± 0.033096	0.32212 ± 0.039368
10%	0.772	0.7545
	0.7476	0.765
	0.7085	0.757
	0.7909	0.7345
	0.691	0.699
Average	0.742 ± 0.04197	0.742 ± 0.02653

% MC	% weight loss (MD)	% weight loss (TD)
15%	1.2532 1.10114 1.0148 1.107 1.129	1.1405 1.021 1.2145 1.0435 1.2
Average	1.1236 ± 0.08519	1.1239 ± 0.0884
20%	1.741 1.7425 1.707 1.8034 1.7611	1.7735 1.674 1.85 1.9325 1.523
Average	1.751 ± 0.0352	1.7506 ± 0.15903
25%	3.14 2.998 2.8175 3.216 2.7995	3.186 2.9775 3.0875 2.85 2.871
Average	2.9942 ± 0.1868	2.994 ± 0.14295
30%	3.35 3.146 2.82 2.6991 3.076	3.38 3.274 3.03 2.6471 2.7589
Average	3.01822 ± 0.26	3.018 ± 0.3167

4 week

% MC	% weight loss (MD)	% weight loss (TD)
0%	0.1215	0.1251
	0.103	0.097
	0.906	0.086
	0.11	0.17
	0.121	0.0724
Average	0.1103 ± 0.0.1115	0.1101 ± 0.03868
5%	1.108	0.9015
	0.7225	0.672
	0.824	0.8615
	0.9165	1.02
	1.03	1.146
Average	0.9202 ± 0.15466	0.9202 ± 0.17772
10%	1.714	1.68
	1.54	1.856
	1.0145	1.4595
	1.7432	1.2672
	1.604	1.356
Average	1.5231 ± 0.29596	1.52374 ± 0.24129

% MC	% weight loss (MD)	% weight loss (TD)
15%	2.162	2.147
	2.0136	2.0744
	2.2113	2.1377
	2.125	2.155
	2.3	2.2784
Average	2.15857 ± 0.03842	2.1585 ± 0.0742
20%	2.2443	2.3427
	2.1125	2.0744
	2.348	2.1377
	2.25	2.155
	2.3	2.2784
Average	2.2907 ± 0.1224	2.9094 ± 0.0.1173
25%	4.0115	4.1247
	3.925	4.056
	4.14	3.774
	3.796	3.76
	3.9525	4.113
Average	3.965 ± 0.1256	3.96554 ± 0.18316
30%	4.747	4.677
	4.82	4.874
	4.6645	4.62
	4.9	5.02
	4.6345	4.576
Average	4.7532 ± 0.109554	4.7534 ± 0.0.18756

6 week

% MC	% weight loss (MD)	% weight loss (TD)
0%	0.236	0.191
	0.13	0.1985
	0.2	0.217
	0.208	0.185
	0.223	0.2058
Average	0.1994 ± 0.04119	0.19946 ± 0.01254
5%	2.755	2.965
	2.9353	2.88
	2.82	2.6537
	2.49	2.597
	2.9	2.8
Average	2.78006 ± 0.17666	2.77914 ± 0.15334
10%	3.3847	3.3856
	3.663	3.532
	3.51	3.5
	3.255	3.85
	3.7	3.245
Average	3.50254 ± 0.187	3.50252 ± 0.2245
15%	3.64	3.755
	3.5	3.635
	3.85	3.554
	3.693	3.82
	3.246	3.279
Average	3.52106 ± 0.2353	3.521 ± 0.19152

% MC	% weight loss (MD)	% weight loss (TD)
20%	3.927	4.37
	4.28	3.9734
	4.207	4.196
	4.068	4.068
	4.3	4.2
Average	4.1564 ± 0.15724	4.16148 ± 0.15022
25%	5.12	4.749
	4.769	4.847
	4.8165	4.95
	5.06	5.108
	5.2	5.31
Average	4.9931 ± 0.0.19026	4.9928 ± 0.02215
30%	6.185	6.405
	5.9925	6.1
	6.084	6.288
	6.26	6.1215
	6.355	5.961
Average	4.1753 ± 0.14257	4.1751 ± 0.17317

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8 week

% MC	% weight loss (MD)	% weight loss (TD)
0%	0.1478	0.1428
	0.155	0.147
	0.2	0.174
	0.12	0.117
	0.128	0.17
Average	0.15 ± 0.0312	0.15 ± 0.0223
5%	3.0455	3.0581
	3.2	3.15
	3.321	3.283
	3.36	3.084
	3.146	3.5
Average	3.21506 ± 0.12922	3.21502 ± 0.18155
10%	4.761	4.831
	4.8548	4.5115
	4.468	4.52
	4.87	4.73
	4.6	4.961
Average	4.71076 ± 0.173082	4.7107 ± 0.195922
15%	6.21	6.7827
	6.5	6.6
	6.841	6.5698
	6.9445	6.45
	6.453	6.562
Average	6.5897 ± 0.2999	6.5929 ± 0.1203
% MC	% weight loss	% weight loss

	(MD)	(TD)
20%	6.85 6.24 6.431 6.579 6.9	6.885 7.542 4.8 7.351 7.135
Average	6.6 ± 0.27888	6.6 ± 0.2723
25%	7.5168 7.357 7.754 7.23 7.4545	7.484 7.542 7.8 7.351 7.135
Average	7.46246 ± 0.19568	7.4624 ± 0.24514
30%	9.25 9.137 9.3 9.135 9.2425	9.263 9.324 9.215 9.1623 9.1
Average	9.2129 ± 0.073601	9.21286 ± 0.08683

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศิริวรรณ สุขุทัย เกิดเมื่อวันที่ 26 สิงหาคม พ.ศ. 2519 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ปีการศึกษา 2541 หลังจากนั้น จึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นของปีการศึกษา 2547 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นปีการศึกษา 2549 รวมระยะเวลาในการศึกษา 2 ปี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย