

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การผลิตอนุภาค Microcrystalline Cellulose จากเส้นใยฝ้าย
เพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ

**Production of Microcrystalline Cellulose Particles from Cotton Fibers
For Substitution of Import Product**

โดย

ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน

ประจำปีงบประมาณ 2546

ชื่อโครงการย่อย การผลิตอนุภาค Microcrystalline Cellulose จากเส้นใยฝ้ายเพื่อทดแทน
การนำเข้าจากต่างประเทศ
Production of Microcrystalline Cellulose Particles from Cotton Fibers
for Substitution of Import Product

คณะวิจัย

หัวหน้าโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์
ตำแหน่ง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รองหัวหน้าโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล
ตำแหน่ง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ร่วมวิจัย นายปรีชา แสงธีระปิติกุล

ผู้ช่วยวิจัย นายคมกริช สุทธิพรพานิชย์
นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

จุลผลึกเซลลูโลสเป็นสารที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เกษตรกรรม เครื่องสำอาง สี และอุตสาหกรรมอื่น ๆ การผลิตจุลผลึกเซลลูโลสสามารถเตรียมได้ภายใต้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบวิวิธพันธ์ด้วยกรด (heterogeneous acid hydrolysis) ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงนำเส้นใยฝ้ายซึ่งสามารถหาได้ง่ายภายในประเทศและมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสูงถึง 94.24 เปอร์เซ็นต์และมีองศาความเป็นผลึก 80.16 เปอร์เซ็นต์ มาเพิ่มมูลค่าโดยใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตจุลผลึกเซลลูโลส โดยผ่านกระบวนการย่อยสลายในสภาวะด่าง (alkaline degradation) และทำการศึกษามลของความสัมพันธ์ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา ที่มีต่อการย่อยสลายในสภาวะด่าง จะพบว่าที่สภาวะความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมงจะให้ค่าแอลฟาเซลลูโลสและค่าองศาความเป็นผลึก (degree of crystallinity) สูงที่สุดคือ 99.15 และ 85.96 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จึงเลือกสภาวะนี้สำหรับการสังเคราะห์จุลผลึกเซลลูโลส ภายใต้ปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิสแบบวิวิธพันธ์ด้วยกรด

การสังเคราะห์จุลผลึกเซลลูโลสโดยการไฮโดรไลซิสแบบวิวิธพันธ์ด้วยกรด จะศึกษามลของเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส พบว่าที่เวลา 35 นาที ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะให้จุลผลึกเซลลูโลสมีค่าองศาความเป็นผลึกและขนาดผลึกเท่ากับ 84.24 เปอร์เซ็นต์และ 3.23 Å ความหนาแน่น 1.7269 g/cm³ และพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.5097 m²/g ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าจุลผลึกเซลลูโลสมาตรฐานที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ (Avicel PH101) และจุลผลึกเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จะมีขนาด 25.34 μm ซึ่งจะเล็กกว่าจุลผลึกเซลลูโลสมาตรฐานถึง 2 เท่า

เลขหมู่

เลขทะเบียน 014599

วัน, เดือน, ปี 6 ก.ค. 58

Abstract

Microcrystalline Cellulose (MCC) were widely used in food, pharmaceutical, cosmetic, paint and other industries, was produced under the heterogeneous acid hydrolysis reaction. The cotton fibers which were easily found in Thailand and could be value-added by using as raw material to produce MCC via alkaline degradation will be used in this study. The effects of temperature, time and concentration of sodiumhydroxide solution that influenced in alkaline degradation were studied. Variation of α -cellulose and degree of crystallinity were essential factors for MCC. The α -cellulose and the degree of crystallinity obtained at 8% NaOH, 100°C for one hour showed maximum values which are 99.15 and 85.96% respectively. Therefore this condition was an optimum condition that used to produce MCC via heterogeneous acid hydrolysis reaction.

From MCC heterogeneous acid hydrolysis produced at 2.5M HCl, 100°C for 35 minutes, degree of crystallinity and crystal size are 84.24% and 3.23 Å respectively. In addition, density and specific area were presented 1.7269 g/cm³ and 0.5097 m²/g. The values of parameters were higher than imported standard material (Avicel PH101). Moreover size of produced MCC is 25.34 μm which was produced MCC was twice smaller than Avicel PH101.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน ของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนาคต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2545 และ 2546 ศูนย์วิจัยอาวุโส (ศ.ดร.วิวัฒน์ ตัมชะพานิชกุล) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

สำหรับการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง ซึ่งประกอบด้วยเครื่อง X-ray Diffraction, Scanning Electron Microscope, Ultracycrometer และ Powder Size Analyzer ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์กลางและสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และห้องปฏิบัติการเครื่องมือทดสอบทั่วไป ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติและศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือทดสอบต่าง ๆ ไว้ ณ ที่นี้ด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย	2
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตการวิจัย	2
การตรวจเอกสาร	3
ฝ่าย	3
เซลลูโลส	7
เฮมิเซลลูโลส	18
ลิกนิน	19
สารแทรก	20
จุลผลึกเซลลูโลส	21
การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของจุลผลึกเซลลูโลส	26
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตจุลผลึกเซลลูโลสและเซลลูโลสชนิดอื่น ๆ	29
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
เครื่องมือวิเคราะห์	32
วัตถุดิบและสารเคมี	32
วิธีการ	33
ผลและวิจารณ์	38
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	54
สรุปผลการวิจัย	54
ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยต่อ	55
เอกสารอ้างอิง	56

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก	หน้า
ภาคผนวก ก	59
ลักษณะกราฟของเส้นใยฝ้าย ภายหลังจากผ่านกระบวนการ ย่อยสลายในด่างที่สภาวะต่าง ๆ	60
ภาคผนวก ข	70
การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องค์ศาความเป็นผลึกและขนาดผลึก	
ภาคผนวก ค	75
การฟอกขาวของเส้นใยฝ้ายหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลาย ในสภาวะต่าง	
ภาคผนวก ง	78
การหาค่า True density ของจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้จากเส้น ใยฝ้าย	
ภาคผนวก จ	83
การคำนวณหาขนาดของจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้จากเส้นใย ฝ้าย	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย	5
2	สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของเส้นใยฝ้าย	7
3	สมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของเซลลูโลส	17
4	คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของจุลผลึกเซลลูโลส	22
5	องศาของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเส้นใยจากธรรมชาติและรีเจนเนอเรตไฟเบอร์	24
6	การนำจุลผลึกเซลลูโลสไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ	25
7	การออกแบบการทดลอง	34
8	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายจากบริษัทก้องเกียรติเทคโนโลยี จังหวัดสระบุรี	38
9	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายหลังจากทำการย่อยสลายในสภาวะเบสที่สภาวะต่าง ๆ กัน	40
10	ค่าแอลฟาเซลลูโลสและองศาความเป็นผลึกของเส้นใยฝ้ายหลังจากทำการย่อยสลายในสภาวะต่างที่ต่าง ๆ กัน	41
11	องศาความเป็นผลึกและขนาดผลึกของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) กับจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและใช้เวลาต่าง ๆ กัน	47
12	ค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) กับจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและใช้เวลาต่าง ๆ กัน	48
13	ผลวิเคราะห์ขนาดของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) กับจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและใช้เวลาต่าง ๆ กัน	50

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่

1	ค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)	79
2	ค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากนำเส้นใยฝ้ายไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	80
3	ค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากนำเส้นใยฝ้ายไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 25 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	80
4	ค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากนำเส้นใยฝ้ายไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	81
5	ค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากนำเส้นใยฝ้ายไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 35 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	81
6	ค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากนำเส้นใยฝ้ายหลังจากทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสกับกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 40 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	82
7	ค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากนำเส้นใยฝ้ายหลังจากทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	82
8	ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)	84
9	ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 20 นาที	85
10	ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 25 นาที	86
11	ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 30 นาที	87
12	ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 35 นาที	88
13	ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 40 นาที	89
14	ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 45 นาที	90

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ดอกฝ้ายและเส้นใยฝ้าย	3
2 ภาพตัดขวางของเส้นใยและพื้นผิวภายนอกของเส้นใย	4
3 การเรียงสลับทิศสวนทางกันของสายโซ่โมเลกุลของเส้นใยฝ้าย	5
4 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลส	8
5 การเรียงตัวของโซ่โมเลกุลที่เรียงตัวเป็นระเบียบและมีทิศทางขนานไปตามแกนของเส้นใย	9
6 การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลค้ำหรือเรียงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (low orientation หรือ amorphous)	9
7 เซลโลไบโอโอสยูนิต (A) ยูนิตเซลขนาดใหญ๋ (B) รูปแบบส่วนที่เป็นผลึก (C) ส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐานปะปนกันอยู่ในไมโครไฟบิล (D) ไฟบิล (E)	10
8 รูปร่างลักษณะของเส้นใยฝ้าย (A) และรูปร่างลักษณะของไม้จำพวกสน (B)	11
9 หน่วยเซลของเซลลูโลส I เสนอโดยโมเดลของ Meyer, Mark และ Mish	12
10 การเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสในรูปแบบต่าง ๆ	12
11 รูปแบบความเป็นผลึกของเซลลูโลสทั้ง 4 ชนิดจากเครื่อง XRD	13
12 สูตรโครงสร้าง Fischer ของน้ำตาล D-glucose	13
13 โครงสร้างหน่วยโมเลกุลซ้ำของเซลโลไบโอโอส	14
14 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส โดยแสดงการจัดเรียงตัวเป็นแบบเก้าอี้	14
15 พันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลส I หรือเนทีฟเซลลูโลส	14
16 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลของจุลผลึกเซลลูโลส	21
17 การแยกเส้นใยของเซลลูโลสออกจะได้เป็นจุลผลึกอิสระขนาดเล็ก	23
18 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยผลึก	26
19 หลักการการวิเคราะห์ขนาดของเทคนิค Laser Diffraction	28
20 แผนภาพขั้นตอนการผลิตจุลผลึกเซลลูโลส	37
21 XRD pattern ของเส้นใยฝ้าย	39
22 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยฝ้าย	39
23 XRD pattern ของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้โดยใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 20 นาที	44
25	XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้โดยใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 25 นาที	45
26	XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้โดยใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 30 นาที	45
27	XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้โดยใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 35 นาที	46
28	XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้โดยใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 40 นาที	46
29	XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้โดยใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 45 นาที	47
30	องศาความเป็นผลึกของจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้ที่เวลาต่างกัน	48
31	ปริมาณสัมพัทธ์ของความหนาแน่นกับเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส	49
32	ปริมาณสัมพัทธ์ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคกับเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส	50
33	ปริมาณสัมพัทธ์ของพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ยกับเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส	51
34	ภาพถ่าย SEM ของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่กำลังขยายเท่ากับ 300	52
35	ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยใช้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 35 นาที ที่กำลังขยายเท่ากับ 300	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
1 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	61
2 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง	61
3 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	62
4 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง	62
5 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	63
6 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง	63
7 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	64
8 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
9 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	65
10 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง	65
11 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	66
12 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 8 โมลาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง	66
13 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	67
14 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง	67
15 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	68
16 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
17 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง	69
18 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใย โดยใช้ค่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง	69
19 XRD pattern ของเส้นใยฝ้าย (pure cotton)	71
20 XRD pattern ของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)	73
21 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)	84
22 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 20 นาที	85
23 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 25 นาที	86
24 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 30 นาที	87
25 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 35 นาที	88
26 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 40 นาที	89
27 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 45 นาที	90

การผลิตอนุภาค Microcrystalline Cellulose จากเส้นใยฝ้าย เพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ

Production of Microcrystalline Cellulose Particles from Cotton Fibers For Substitution of Import Product

คำนำ

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งผลผลิตจากการเกษตรมีอยู่อย่างมากมายหลายชนิด ซึ่งผลผลิตที่สำคัญชนิดหนึ่งคือ ฝ้าย (cotton) จากอดีตจนถึงปัจจุบันการนำฝ้ายไปใช้ประโยชน์ สามารถนำไปใช้ได้้อย่างมากมายหลายอย่าง โดยในอดีตนิยมนำไปใช้ทำเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม ปัจจุบันเส้นใยฝ้ายนิยมนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

เส้นใยฝ้ายเป็นวัสดุซึ่งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก คือมีมากกว่า 94% การนำเส้นใยฝ้ายไปใช้ประโยชน์สามารถนำไปใช้อย่างกว้างขวาง ส่วนมากนิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเซลลูโลสสามารถแบ่งได้เป็นสองรูปแบบคือ รูปแบบที่เป็นผลึกและรูปแบบที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งรูปแบบที่มีมูลค่ามากและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุดคือ การฟอร์มในรูปแบบที่เป็นผลึก ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น นำไปใช้เป็นส่วนผสมในการดอกอัดเม็ดยา ซึ่งจะช่วยให้เม็ดยาที่ได้มีผิวเรียบ ไม่ต้องใช้น้ำเป็นส่วนผสม และยังมีส่วนช่วยในการควบคุมการปลดปล่อยฤทธิ์ยาอีกด้วย ใช้ทำคอลัมน์โครมาโตกราฟี (column chromatography) ใช้ทำเป็นสารเพิ่มความเสถียรภาพ (stabilizer) ในอุตสาหกรรมการผลิตสี เป็นต้น เนื่องจากองค์ประกอบของฝ้ายมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูงมาก จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเส้นใยฝ้ายมาผลิตเป็นจุลผลึกเซลลูโลส (Microcrystalline Cellulose) ภายใต้อกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ในสภาวะที่เหมาะสม จะได้จุลผลึกเซลลูโลส ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จะศึกษาการนำเส้นใยฝ้ายซึ่งเป็นวัสดุทางการเกษตรและมีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทยมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตจุลผลึกเซลลูโลสในห้องปฏิบัติการ ภายใต้อสภาวะตัวแปรที่ควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ความเข้มข้นของสารละลายไฮดรอกไซด์ และเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยสามารถวิเคราะห์หาองศาความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ที่เกิดขึ้น โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction Spectroscopy (XRD) ซึ่งจาก

การผลิตจุลผลิตภัณฑ์เซลล์จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเส้นใยฝ้ายและสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมทางเวชภัณฑ์ ปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ซึ่งประโยชน์เหล่านี้เองทำให้จุลผลิตภัณฑ์เซลล์เป็นที่ต้องการอย่างมากและมีมูลค่าสูง

วัตถุประสงค์และขอบเขตวิจัย

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษากรรมวิธีการสังเคราะห์จุลผลิตภัณฑ์เซลล์จากเส้นใยฝ้ายและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์จุลผลิตภัณฑ์เซลล์ โดยเปรียบเทียบกับจุลผลิตภัณฑ์เซลล์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม (Avicel PH101) และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตจุลผลิตภัณฑ์เซลล์
2. ศึกษาถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อการผลิตจุลผลิตภัณฑ์เซลล์ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาในการไฮโดรไลซิสโดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก
3. วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตจุลผลิตภัณฑ์เซลล์
4. เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของจุลผลิตภัณฑ์เซลล์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม (Avicel PH101) กับจุลผลิตภัณฑ์เซลล์ที่ผลิตขึ้นได้

การตรวจเอกสาร

ฝ้าย

ฝ้ายเป็นเส้นใยดั้งเดิมชนิดหนึ่งซึ่งเป็นที่รู้จักและใช้กันมาตั้งแต่สมัยโบราณจนกระทั่งถึงปัจจุบัน แม้จะมีเส้นใยชนิดใหม่ ๆ เกิดขึ้นตามมามากมาย แต่ฝ้ายก็ยังคงเป็นเส้นใยที่นิยมนำมาใช้กันมากที่สุด โดยจะใช้เส้นใยฝ้ายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (textile) โดยเราจะพบเห็นการใช้เส้นใยฝ้ายมาก ในรูปของเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม คำว่า Cotton มาจากคำภาษาอารบิกว่า Quoton หรือ Quton ซึ่งแปลว่าฝ้ายหรือผ้าที่ทอจากฝ้าย และคำว่า Muslin ซึ่งเป็นภาษาอารบิกเช่นเดียวกัน จะหมายถึงผ้าฝ้ายที่ทอในเมือง Mosel ในประเทศอินเดีย คำ 2 คำนี้จึงเป็นที่รู้จักกันดีในหมู่ของคนอินเดียตั้งแต่สมัยโบราณ (วีระศักดิ์, 2543)

ฝ้ายสามารถเจริญเติบโตได้ดีในแถบที่มีอากาศร้อนชื้น ดังนั้นจึงมีการเพาะปลูกฝ้ายเกือบทั่วทุกแห่งในโลก ยกเว้นประเทศที่มีอากาศหนาว เนื่องจากฝ้ายจะไม่เจริญเติบโตในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 21 องศาเซลเซียส ด้วยความที่ฝ้ายสามารถเจริญเติบโตได้ในหลายพื้นที่ของโลก ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมากทั้งพันธุ์ฝ้าย สภาพภูมิอากาศ อาหารในดิน ตลอดจนศัตรูพืช ดังนั้นฝ้ายจึงมีด้วยกันมากมายหลายชนิด โดยคุณภาพของเส้นใยจะขึ้นกับความยาว ความยาวของเส้นใย ความละเอียดตลอดจนความแข็งแรง โดยปกติเส้นใยที่ยาวมากยังมีความละเอียดสูงและความแข็งแรงก็จะมากตามไปด้วยดังภาพที่ 1 ดังนั้นการแบ่งชนิดของเส้นใยฝ้ายส่วนมากมักเรียกตามชื่อประเทศที่ปลูกหรือตามภูมิศาสตร์

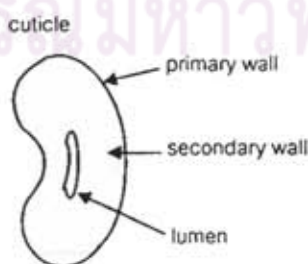


ภาพที่ 1 ดอกฝ้ายและเส้นใยฝ้าย

ประเทศไทยได้เริ่มส่งเสริมการปลูกฝ้ายอย่างจริงจังตั้งแต่ปี พ.ศ. 2453 โดยพันธุ์ฝ้ายที่ใช้ปลูกก็เป็นพันธุ์พื้นเมือง ต่อมาอุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทยได้มีการพัฒนาและเจริญขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นความต้องการฝ้ายก็ยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย รัฐบาลจึงได้มีการพัฒนาส่งเสริมการปลูกฝ้ายและปรับปรุงพันธุ์ฝ้ายให้ได้ผลผลิตมากขึ้นตามไปด้วย โดยแหล่งปลูกฝ้ายที่สำคัญของประเทศไทยคือ แถบจังหวัดภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือ และภาคกลาง โดยจังหวัดที่มีการปลูกฝ้ายมากได้แก่ จังหวัดนครสวรรค์ เลข ลพบุรี เพชรบูรณ์ ปราจีนบุรี สุโขทัย จันทบุรี สุพรรณบุรี นครราชสีมา กาญจนบุรี สระบุรี น่าน แพร่ กำแพงเพชร หนองคาย และราชบุรี (นวลแข, 2542)

1. โครงสร้างทางกายภาพ

เส้นใยของฝ้ายเป็นเส้นใยสั้นและมีลักษณะภายนอกที่หยาบเป็นหลอดแบน ข้วนกันเป็นเกลียว และจากกล้องจุลทรรศน์ภาพภาคตัดขวางมีลักษณะคล้ายเม็ดถั่วที่มีช่องกลางกลวงเป็นช่องส่งน้ำ (lumen) แสดงในภาพที่ 2 ภาพภาคตัดขวางของเส้นใยฝ้ายระยะแรกมีลักษณะเป็นรูปตัวยู (U) ผนังเซลล์ขณะที่ยังอ่อนอยู่จะบาง แต่เมื่อเส้นใยมีอายุมากขึ้นผนังก็เริ่มหนา มีลักษณะเป็นรูปถั่วมากขึ้น รุกกลางที่เป็นท่อส่งน้ำจะหดเล็กลง ผิววนนอกคล้ายมีฟิล์มมันเคลือบอยู่ ผนังชั้นแรก (primary wall) เป็นผนังชั้นที่เกิดขึ้นก่อนเป็นชั้นบาง ๆ ขณะที่ท่อส่งน้ำตรงกลางใหญ่คล้ายท่อ ต่อมาเมื่อเจริญเติบโตมากขึ้นผนังชั้นแรกจะมีความหนาเพิ่มขึ้นขยายจากผิวเข้าสู่ส่วนกลาง การเจริญเติบโตเป็นชั้น ๆ คล้ายวงปีในลำต้น ทำให้ท่อส่งน้ำส่วนกลางถูกบีบคั้นเล็กลง แต่ละชั้นของผนังที่ขยายเข้าไปมีความแตกต่างกันไป ขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ อาหารและน้ำ เปลือกที่หนาเพิ่มขึ้นนี้รวมเรียกกันเป็นผนังชั้นที่สอง (secondary wall) แต่ละชั้นที่เจริญเติบโตขึ้นนี้ประกอบไปด้วยเส้นใยละเอียดอันเกิดจากการค่อกันยาวของลูกโซ่โมเลกุลของเซลลูโลสจัดเรียงต่อกัน และลักษณะของการจัดเรียงกันนี้เองที่ทำให้บางครั้งมีทิศทางการเรียงที่สลับทิศสวนทางกัน แสดงดังภาพที่ 3 ทำให้เกิดเกลียวฝ้ายขึ้นตามความยาวของเส้น (วีระศักดิ์, 2543)



ภาพที่ 2 ภาพตัดขวางของเส้นใยและพื้นผิวภายนอกของเส้นใย
ที่มา: วีระศักดิ์ (2543)



ภาพที่ 3 การเรียงสลับทิศสวนทางกันของสายโซ่โมเลกุลของเส้นใยฝ้าย
ที่มา: วีระศักดิ์ (2543)

2. โครงสร้างทางเคมี

โครงสร้างเส้นใยของฝ้ายพบว่ามีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบที่สำคัญคือ มีมากถึงร้อยละ 94 โดยน้ำหนัก ส่วนประกอบอื่นๆ ที่ไม่ใช่เซลลูโลสในฝ้ายพบว่าจะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งจะประกอบไปด้วย ไข (waxes) สารจำพวกเพคติน (pectin) และสารประกอบไนโตรเจน โดยส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย

ส่วนประกอบ	ส่วนประกอบเป็นร้อยละของน้ำหนักแห้ง	
	ค่าจำเพาะ	ค่าเป็นช่วงขอบเขต
เซลลูโลส	94.0	88.0 - 96.0
โปรตีน (% N × 6.25) ^a	1.3	1.1 - 1.9
สารจำพวกเพคติน	1.2	0.7 - 1.2
เถ้า (ash)	1.2	0.7 - 1.6
ไข (waxes)	0.6	0.4 - 1.0
น้ำตาลทั้งหมด	0.3	-
เม็ดสี (pigment)	trace	-
อื่นๆ	1.4	-

หมายเหตุ ^aมาตรฐานในการประมาณค่าร้อยละของโปรตีนจากปริมาณของไนโตรเจน (% N)

ที่มา: สถาบันวิจัยพืชไร่ (2536)

3. สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพของฝ้ายที่สำคัญมีอยู่ด้วยกันหลายประการ เช่น ความยาว ความเหนียว ความละเอียดอ่อน ความแก่ เป็นต้น คุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ ล้วนมีผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ฝ้ายทั้งสิ้น (สถาบันวิจัยพืชไร่, 2536) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของเส้นใยคือ ความยาวของเส้นใย (fiber length) เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตและคุณภาพของเส้นด้าย การซื้อขายเส้นใยส่วนใหญ่จะใช้ความยาวเป็นหลัก โดยทั่วไป ฝ้ายที่มีความยาวมากกว่าจะมีความละเอียด (เส้นเล็ก) และแข็งแรงกว่าฝ้ายปุยสั้น โดยเส้นใยแต่ละเส้นมีความยาวอยู่ในช่วง 3–63 มิลลิเมตร (วีระศักดิ์, 2543)

4. สมบัติทางเคมี

สมบัติทางเคมีของเส้นใยฝ้ายประกอบไปด้วย ผลต่อด่าง ผลต่อกรด และผลต่อสารละลายอินทรีย์ต่าง ๆ โดยเส้นใยฝ้ายสามารถทนต่อด่างได้ดี แม้ด่างแก่ที่ใช้เป็นสารเคมีหลักในกระบวนการทำเมอร์เซอไรส์ก็ตาม ด่างแก่กลับทำให้ฝ้ายมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ส่วนผลต่อกรดนั้นสามารถ แบ่งตามประเภทของกรดได้เป็น กรดอินทรีย์ เช่น กรดน้ำส้มจะไม่เป็นอันตรายต่อฝ้าย แต่ถ้าเป็นกรดประเภทกรดกำมะถัน หรือกรดไฮโดรคลอริกจะละลายฝ้ายเป็นยางเหนียว และถ้าถูกกรดไนตริก จะทำปฏิกิริยาได้เป็นเซลลูโลสไนเตรทซึ่งมีคุณสมบัติกลายเป็นวัตถุระเบิด และผลต่อสารละลายอินทรีย์ ฝ้ายจะทนต่อสารละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่ได้เป็นอย่างดี แต่จะละลายในสารประกอบบางชนิดเช่น คิวปราโมเนียมไฮดรอกไซด์ และคิวปรีเอทิลีนไดอะมีน (cupriethylene diamine) ดังนั้นจึงได้มีการใช้สารเคมี 2 ชนิดนี้ในการวิเคราะห์เส้นใยฝ้ายแสดงดังตารางที่ 2

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของเส้นใยฝ้าย

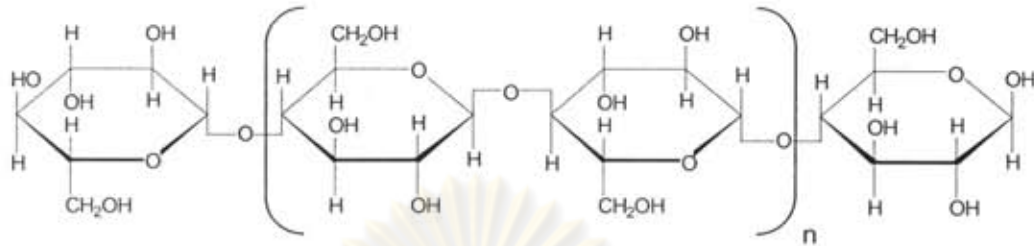
คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของเส้นใยฝ้าย	ค่าระดับ
ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของใยธรรมชาติ	16 – 20 ไมโครเมตร
ความเหนียว (แห้ง)	3.5 - 4.0 (กรัม/เดนิเยอร์)
ความเหนียว (เปียก)	4.5 - 5.0 (กรัม/เดนิเยอร์)
การดูดความชื้น	7-11 (%)
เปอร์เซ็นต์การยืคได้ มาตรฐานปกติ	3.7 (%)
เปอร์เซ็นต์การยืคได้ เมื่อเปียก	9.5 (%)
เปอร์เซ็นต์ความสามารถหดกลับที่เดิมได้หลังจากจับยืคออก	75 (%)
2.5 เปอร์เซ็นต์	
ความถ่วงจำเพาะ	1.50-1.55

ที่มา: นवलแซ (2542)

เซลลูโลส

เซลลูโลส เป็นองค์ประกอบหลักที่มีความสำคัญที่สุดในพืช โดยจะมีประมาณ 40-50% ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช เส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจัดเป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยธาตุหลัก คือ คาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% (วีระศักดิ์, 2543) ในธรรมชาติไม่เคยพบว่ามีเซลลูโลสบริสุทธิ์อยู่ เซลลูโลสที่พบในธรรมชาติจะต้องมีการปะปนไปด้วยสารประเภทลิกนิน เพคติน หรือซีลิ่งด้วยเสมอและมีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยขั้นพื้นฐานซึ่งเรียกว่า anhydro-D-glucose ($C_6H_{10}O_5$) ต่อกันเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว ดังภาพที่ 4 โดยในแต่ละหน่วยของกลูโคสจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน (เป็น primary group 1 หมู่ และ secondary group 2 หมู่) ซึ่งเหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาลทั่วไป แต่เนื่องจากโมเลกุลต่อกันยาวเป็นสายโซ่ที่ยาว ทำให้ไม่ละลายน้ำเหมือนกับที่เกิดกับน้ำตาล โครงสร้างทางเคมีนี้นับว่ามีบทบาทอย่างยิ่งต่อการกำหนดสมบัติของเส้นใย กล่าวคือ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จะเป็นตัวดึงดูดน้ำ ทำให้มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดี ลักษณะการเรียงตัวเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวทำให้มีความแข็งแรงสูงตามไปด้วย นอกจากนั้นแล้วในโครงสร้างบริเวณที่เป็นการต่อกันของธาตุ -C-O-C- จะเป็นบริเวณที่ถูกทำลายได้ด้วยผลจากการเกิดออกซิเดชัน หรือจาก

การถูกทำลายด้วยสภาพภูมิอากาศ ทำให้โมเลกุลยาวขาดลง กลายเป็นส่วน เล็ก ๆ คล้ายน้ำตาลและ สลายกลายเป็นอาหารของพืชและสัตว์ต่อไป



ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลส

ถึงแม้เส้นใยเซลลูโลสในธรรมชาติมีอยู่มากมายหลายชนิดก็ตาม แต่เนื่องจากทุกชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีในหน่วยย่อยที่เหมือนกันคือน้ำตาลกลูโคส ดังนั้นจึงทำให้สมบัติของเซลลูโลสเหมือนกัน

สมบัติต่าง ๆ ของเซลลูโลสในธรรมชาติ

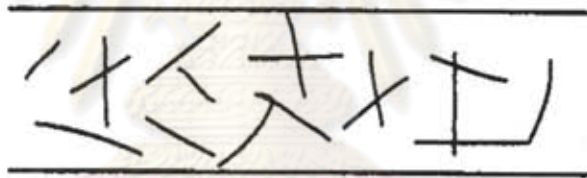
1. เซลลูโลสเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(1,4) glycosidic linkage
2. เซลลูโลสเกิดจากการประกอบกันด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดเดียว คือ กลูโคส
3. เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวล โมเลกุลสูง และมีองศาการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์สูง (degree of polymerization ; DP)
4. เซลลูโลสจะมีลักษณะเป็นเส้นด้ายยาวเรียกว่าไมโครไฟบริล (microfibril)
5. มีคุณสมบัติที่เหมือนกันทั้งในไม้เนื้ออ่อน (soft wood) และในไม้เนื้อแข็ง (hard wood)
6. เซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์เส้นตรงไม่มีกิ่งแขนง (side chain) เพราะฉะนั้น เซลลูโลสจึงไม่ละลายในน้ำ

เซลลูโลสที่พบในธรรมชาติจะเรียงตัวเป็นกลุ่มยาว เรียกว่าไมโครไฟบริล (microfibril) แต่ละสายของไมโครไฟบริลจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ในเส้นใยธรรมชาติจะมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลทั้งแบบที่เป็นระเบียบและแบบที่ไม่เป็นระเบียบ โดยบริเวณที่โมเลกุลของเซลลูโลสจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเรียกว่าบริเวณที่เป็นผลึก (crystalline) แสดงดังภาพที่ 5 คือ บริเวณที่โพลีเมอร์เรียงตัวชิดกัน สายโมเลกุลจะยึดตรงเรียงขนานทำให้มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลน้อย พันธะเคมีที่ยึดระหว่างโมเลกุลด้านข้างเกิดขึ้นได้มาก ส่วนในบริเวณที่โพลีเมอร์มีการจัดเรียง

ตัวไม่เป็นระเบียบเรียกว่าบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (amorphous region) แสดงดังภาพที่ 6 โพลีเมอร์จะเรียงตัวระเกะระกะ สายโพลีเมอร์อาจบิดตัวโค้งงอหรือพาดทับไปบนอีกโพลีเมอร์ ทำให้เกิดมีที่ว่างระหว่างโมเลกุลมากกว่าแบบที่เป็นระเบียบ พันธะเคมีที่ยึดจับด้านข้างของโมเลกุลก็จะมีน้อยกว่า บริเวณดังกล่าวจะทำให้เส้นใยมีการยืดตัวได้และส่วนที่เป็น อสัณฐานนี้ถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่า บริเวณที่เป็นผลึก (มณฑา, 2542)



ภาพที่ 5 การเรียงตัวของโซ่โมเลกุลที่เรียงตัวเป็นระเบียบและมีทิศทางขนานไปตามแกนของเส้นใย
ที่มา: นवलแซ (2542)



ภาพที่ 6 การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลต่ำหรือเรียงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (low orientation หรือ amorphous)

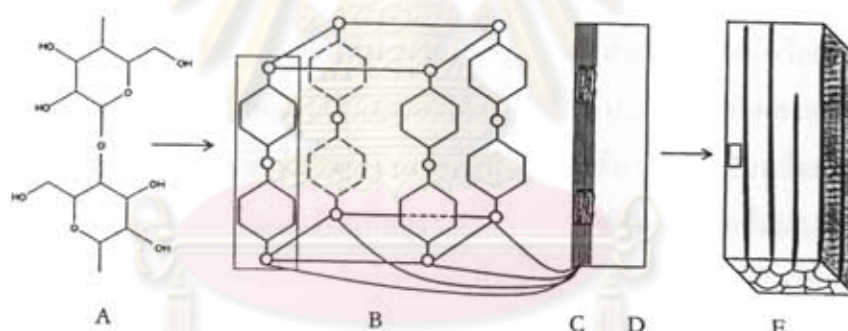
ที่มา: นवलแซ (2542)

คำว่าเซลลูโลสบริสุทธิ์ เป็นการเรียกเซลลูโลสชนิดแอลฟาเซลลูโลส (α -cellulose) คือเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ส่วนเซลลูโลสชนิด เบต้าเซลลูโลส (β -cellulose) และแกมมาเซลลูโลส (γ -cellulose) จะไม่ใช่เซลลูโลสที่บริสุทธิ์ โดย เบต้าเซลลูโลสนั้นเป็นส่วนของอัลฟาเซลลูโลสที่ถูกทำให้องศาการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ลดลง ซึ่ง เบต้าเซลลูโลสสามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% แต่ตกตะกอนในสภาพที่เป็นกรด ส่วนแกมมาเซลลูโลสสามารถละลายได้ในทุกสภาพความเป็นกรดและด่าง และถูกคิดว่าเป็นส่วนของเฮมิเซลลูโลส เช่น ไซแลน (xylans) แมนแนน (mannans) และ กาแลคแทน (galactans) เป็นต้น

โดยปกติจะพบคำว่าเซลลูโลสธรรมชาติหรือเนทีฟเซลลูโลส (native cellulose) คือเซลลูโลสที่ได้มาจากธรรมชาติยังไม่ได้มีการปรับปรุงคุณภาพใด ๆ ส่วนคำว่ารีเจนเนอเรทเซลลูโลส (regenerated cellulose) คือเซลลูโลสที่ตกตะกอนออกมาจากสารละลายซึ่งโดยทั่วไปเป็นสารละลายค่าง ส่วนคำว่าโฮโลเซลลูโลส (holocellulose) คือส่วนที่เป็นผนังเซลล์ของพืชที่ได้ถูกกำจัดส่วนที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต หรือลิกนินออก (holocellulose = cellulose + hemicellulose) และคำว่าเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) คือ ส่วนที่เป็นโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharine) ซึ่งถูกสกัดได้ง่ายด้วยสารละลายต่างเจือจาง ส่วนคำว่าเซลลูโลส I (cellulose I) และเซลลูโลส II (cellulose II) ถูกใช้เรียกเพื่อจำแนกคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส (Nissan, 1986)

1. โครงสร้างทางกายภาพ

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเซลลูโลสเกิดจากการรวมตัวกันของหน่วยซ้ำของเซลโลไบโอสยูนิต และเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic แสดงดังภาพที่ 8

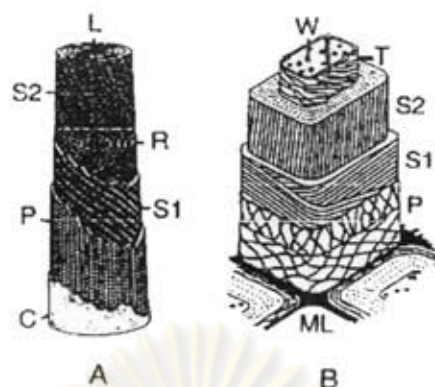


ภาพที่ 7 เซลโลไบโอสยูนิต (A) ยูนิตเซลขนาดใหญ่ (B) รูปแบบส่วนที่เป็นผลึก (C) ส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐานปะปนกันอยู่ในไมโครไฟบริล (D) ไฟบริล (E)

ที่มา: Luukkonen (2001)

1.1 โครงสร้างเส้นใยของเซลลูโลส (Klemm, 1998)

เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบประมาณ 90% ของเส้นใยฝ้าย แต่มีอยู่ประมาณ 45% ในผนังเซลล์ของไม้บางชนิด โครงสร้างทางโมเลกุลของเซลลูโลสในฝ้ายและไม้คล้ายกันมาก เส้นใยของฝ้ายเป็นอิสระต่อกันแต่เส้นใยของไม้มีโครงสร้างเป็น 3 มิติ แสดงดังภาพที่ 8



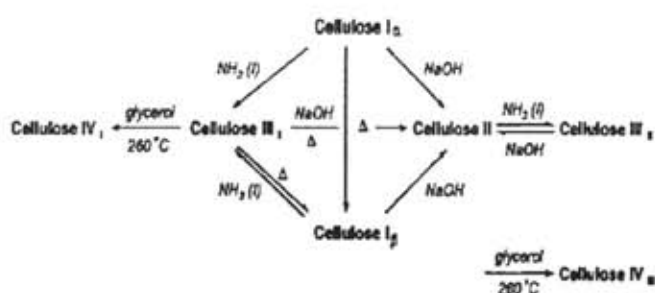
ภาพที่ 8 รูปร่างลักษณะของเส้นใยฝ้าย (A) และรูปร่างลักษณะของไม้จำพวกสน (B)
ที่มา: Klemm (1998)

1.2 โครงสร้างผลึก

จากที่ทราบมาแล้วว่าโมเลกุลขนาดใหญ่ภายในเส้นใยเซลลูโลสจะไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งโครงสร้างของเซลลูโลส โดยจะมีส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก และส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย โดยส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยจะเรียกว่าส่วนที่เป็นอสัณฐาน ส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะถูกเรียกว่าส่วนที่เป็นผลึก การทดลองในปัจจุบันได้แสดงให้เห็นว่า การแปลผลโดยใช้แบบจำลองที่มี 2 เฟส (two-phase model) ซึ่งมีสมมุติฐานว่ามีแค่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นอสัณฐานและส่วนที่เป็นผลึก โดยจะไม่คำนึงถึงปริมาณวัตถุที่อยู่ระหว่างบริเวณส่วนที่เป็นผลึกและบริเวณที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งจะมีปริมาณค่อนข้างน้อย โดยส่วนที่เป็นผลึกปกติจะสามารถวัดได้จากการวัดการกระจายตัวของรังสีเอ็กซ์เรย์ หรือสามารถหาค่าได้จากค่าสเปกตรัมจากนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (NMR)

1.3 รูปร่างของเซลลูโลสชนิดต่างๆ

เซลลูโลสในปัจจุบันสามารถแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกออกได้เป็น 4 รูปแบบ คือ เซลลูโลส I, II, III และ IV โดยเซลลูโลส II สามารถเตรียมได้โดยการตกตะกอนของเซลลูโลสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นประมาณ 17-20% โดยกระบวนการนี้จะเรียกว่ากระบวนการเมอร์เซอร์ไรเซชัน (mercerization process) โดยกระบวนการเมอร์เซอร์ไรเซชันจะเป็นกระบวนการที่ใช้เปลี่ยนรูปแบบของเซลลูโลส I กลายเป็นเซลลูโลส II โดยปกติทั่วไปกระบวนการนี้จะไม่ผันกลับแสดงดังภาพที่ 9



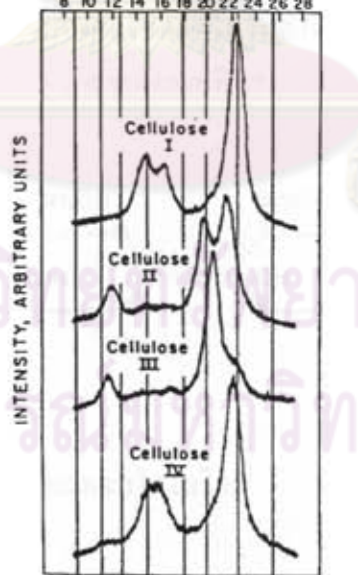
ภาพที่ 9 การเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสในรูปแบบต่าง ๆ

ที่มา: Klemm (1998)

องศาของความเป็นผลึกสามารถหาได้โดยใช้การกระจายของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) สำหรับเซลลูโลสในธรรมชาติจะมีองศาความเป็นผลึกประมาณ 70% สำหรับเมอร์เซอร์ไรส์เซลลูโลส (mercerized cellulose) จะมีค่าประมาณ 50% สำหรับรีเจนเนอเรทเซลลูโลส (regenerated cellulose) จะมีค่าประมาณ 40% ในส่วนที่เป็นออสัณฐานในโมเลกุลของเซลลูโลสจะถูกวัดออกมาในรูปของแบล็กกลาวด์ของการวัดการกระจายของรังสีเอ็กซ์ รูปแบบของความเป็นผลึกของเซลลูโลสทั้ง 4 ชนิด แสดงดังภาพที่ 10

DIFFRACTOMETER ANGLE, 2θ DEGREES

8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28



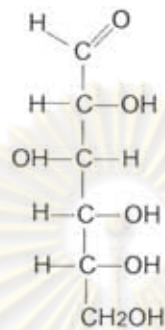
INTERPLANAR DISTANCE, ÅNGSTROM.

ภาพที่ 10 รูปแบบความเป็นผลึกของเซลลูโลสทั้ง 4 ชนิดจากเครื่อง XRD.

ที่มา: O'Connor (1972)

2. โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

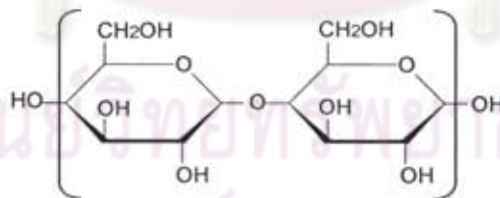
หน่วยพื้นฐานของเซลลูโลส คือ โมโนแซ็กคาไรด์ (mono-saccharine) D-glucose ที่มีสูตรทางเคมี $C_6H_{12}O_6$ สามารถแสดงสูตรโครงสร้างของ Fischer ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 สูตรโครงสร้างแบบ Fischer ของน้ำตาล D-Glucose

2.1 โมโนเมอร์ยูนิตของเซลลูโลส

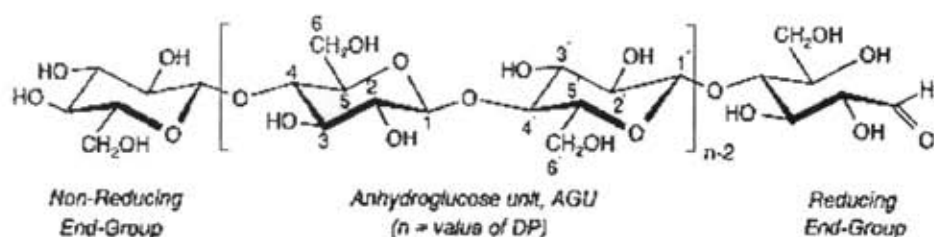
จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า โมเลกุลของเซลลูโลสจะเกิดจากหน่วยโมเลกุลซ้ำ (repeat unit) ยึดจับกันเป็นสายยาว หน่วยโมเลกุลที่ซ้ำกันคือ เซลโลไบโอส (cellobiose) จะเกิดจากเบต้ากลูโคส 2 โมเลกุลยึดเกาะกันด้วยพันธะ $-C-O-C-$ แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 โครงสร้างหน่วยโมเลกุลซ้ำของเซลโลไบโอส

ที่มา: Nissan (1986)

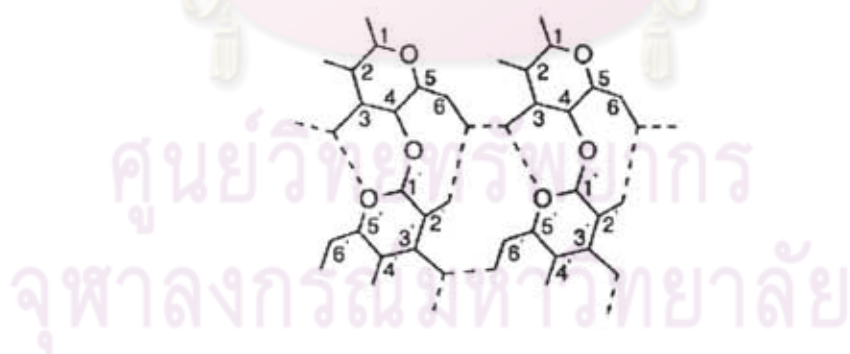
เซลลูโลสเป็น โพลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ไม่มีกิ่งก้านสาขา โดยเกิดจากการรวมกันของ D-glucopyranose โดยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic ดังนั้นจึงรวมเรียกว่า แอนไฮโดรกลูโคส ยูนิท (anhydroglucose unit ; AGU) แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลสโดยแสดงการจัดเรียงตัวเป็นแบบแกว้
ที่มา: Klemm (1998)

2.2 พันธะไฮโดรเจน

พันธะไฮโดรเจนภายในเซลลูโลสจะมีการจับพันธะกัน ได้สองรูปแบบ คือ การจับพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลและการจับพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล การมีพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลนั้นสามารถพิจารณาได้จาก สายโซ่เดี่ยว (single-chain) และความแข็งแรงของโมเลกุล จากผลของการใช้เครื่องมือวัดต่าง ๆ คือ XRD, NMR และ IR สามารถที่จะสรุปได้ว่าภายในโมเลกุลของเซลลูโลส I หรือเนทีฟเซลลูโลสจะมีพันธะไฮโดรเจนระหว่าง O-3-II และ O-5' (2.75 Å ซึ่งใกล้เคียงกับแอนไฮโดรกลูโคส) กับกลูโคสยูนิตที่อยู่ถัดไป ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 พันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลส I หรือเนทีฟเซลลูโลส
ที่มา: Klemm (1998)

3. คุณสมบัติการกระจายตัว (Nissan, 1986)

3.1 คุณสมบัติการดูดซับ (adsorption)

ในเส้นใยเซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีน้ำแทรกอยู่ในระหว่าง โมเลกุลตรงที่มีหมู่ (OH group) และมีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ ซึ่งทำให้เกิดความสามารถที่จะดูดซับน้ำเอาไว้ได้ การดูดซับน้ำในเซลลูโลสมีความสำคัญต่อกระบวนการการดูดซับ และเป็นกระบวนการทั่ว ๆ ของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ หรืออุตสาหกรรมเส้นใย การดูดซับน้ำโดยเซลลูโลสพบได้ในปริมาณที่แตกต่างกันที่ทำให้แน่นที่สุดคือน้ำที่สร้างขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ของเซลลูโลส น้ำในส่วนนี้ไม่ได้ถูกดูดซับ แต่ถูกนำไปใช้สร้างพันธะโควาเลนต์

3.2 การพองตัว (swelling)

การพองตัวของเซลลูโลส โดยน้ำและสารอื่น ๆ จะลดความเป็นผลึกและจะไปเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงได้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งเป็นแฟกเตอร์ที่มีความสำคัญมากในการเข้าไปทำปฏิกิริยาเคมีหรือการเสื่อมสภาพของเซลลูโลส

การพองตัวของเซลลูโลสสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือการพองตัวระหว่างผลึก (inter-crystalline swelling) และการพองตัวภายในผลึก (intra-crystalline swelling) โดยการพองตัวระหว่างผลึกจะมีสาเหตุมาจากการแทรกตัวของส่วนที่เป็นอสัณฐานระหว่างผลึก ส่วนการพองตัวภายในผลึกจะมีสาเหตุมาจากการแทรกตัวและการแตกกระจากของส่วนที่เป็นผลึกใน โมเลกุลของเซลลูโลส

ความสามารถของสารละลายในการทำให้เซลลูโลสพองตัวได้โดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นตามลำดับดังนี้ ตัวทำละลายอินทรีย์ < น้ำ < เกลือ < กรด < ด่าง โดยสารละลายอินทรีย์สามารถทำให้เซลลูโลสเกิดการพองตัวระหว่างผลึกได้แก่ เมทานอล เอทานอล aniline benzaldehyde และไนโตรเบนซีน อย่างไรก็ตามสารเหล่านี้สามารถทำให้เซลลูโลสเกิดการพองตัวได้น้อยกว่าน้ำ เนื่องจากมีความเข้มข้นของสาร ถ้าสารมีความเป็นขั้วสูงจะมีความสามารถในการทำให้เซลลูโลสพองตัวได้มากกว่า

สารที่สามารถทำให้เซลล์โลสเกิดการฟองตัวมีหลายชนิดได้แก่ สารอัลคาไล โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกลืออนินทรีย์ต่าง ๆ เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก กรดฟอสฟอริก และสารละลายเกลือของโลหะ ความสามารถในการทำให้เซลล์โลสเกิดการฟองตัวของสารจำพวกอัลคาไล มีความสัมพันธ์เป็นส่วนกลับของประจุบวก คือ $Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$

3.3 ความสามารถในการละลาย

เนื่องจากเซลล์โลสเป็นสารประกอบโพลีเมอร์ที่มีขั้ว อีกทั้งยังมีลักษณะ โครงสร้างภายใน เป็นผลึก จึงเป็นการยากที่จะหาตัวทำละลายที่เหมาะสมในการละลายสารประกอบเซลล์โลส

$$\Delta G_{diss} = \Delta H_{diss} - T\Delta S_{diss}$$

จากทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic) สำหรับปฏิกิริยาต่าง ๆ หรือความสามารถในการละลายจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพลังงานอิสระ (Gibb free energy, ΔG_{diss}) ของการละลายจะต้องมีค่าเป็นลบ แต่จากสมการ ΔH_{diss} มีค่าเป็นบวกและมีค่าที่สูงมากและ ΔS_{diss} มีค่าเป็นบวกและมีค่าต่ำ ดังนั้น ΔG_{diss} โดยทั่วไปจึงมีค่าออกมาเป็นบวกสำหรับน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ ดังนั้นเซลล์โลสจึงไม่สามารถละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์

3.4 การทำให้เสื่อมสภาพ

ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ด้วยกรด ขึ้นอยู่กับขอบเขตในส่วนผลึก หรือส่วนอสัณฐาน รวมทั้งความเข้มข้นของกรด ชนิดของกรด และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ความว่องไวของเซลล์โลสต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยมากแล้วจะประเมินจากความสามารถในการเข้าถึงได้ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น กรดแก่ เอนไซม์ชนิดพิเศษ หรือ จุลินทรีย์ (microorganism) การสัมผัสได้โดยตรงในทางกายภาพระหว่างสารเข้าทำปฏิกิริยาเหล่านี้กับเซลล์โลสเป็นสิ่งแรกที่ต้องการของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เนื่องจากเซลล์โลสเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำและมีโครงสร้างที่ซับซ้อน การสัมผัสกันของสารที่เข้าทำปฏิกิริยากับเซลล์โลสนั้นเกิดขึ้นได้เฉพาะการแพร่

4. สมบัติทางกายภาพ

ถึงแม้เซลลูโลสในธรรมชาติจะมีอยู่อย่างมากมายหลายชนิดในธรรมชาติ แต่เนื่องจากทุกชนิดจะมีองค์ประกอบทางเคมีในหน่วยย่อยที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงทำให้สมบัติของเซลลูโลสในธรรมชาติมีความคล้ายคลึงกัน โดยสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของเซลลูโลส

คุณสมบัติต่าง ๆ	ค่าระดับ
ความถ่วงจำเพาะ	
ในเฮปเทน	1.540
ในเบนซีน	1.570
ในน้ำ	1.604-1.609
รีเจนเนอรัทเซลลูโลส	1.522
ความหนาแน่นเมื่อวัดด้วย X-ray (g/ml)	
ส่วนของผลึก	1.590-1.630
ส่วนของอสัณฐาน	1.48-1.489
ความเป็นผลึกเฉลี่ย (%)	
เนทีฟเซลลูโลส	70
รีเจนเนอรัทเซลลูโลส	40
ค่าความร้อนจำเพาะ (J/g°C)	1.22
จุดไหม้ไฟ (°C)	>290
พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ (kJ/g)	17.43
ค่าคงที่ของฉนวนไฟฟ้า	
เยื่อกระดาษแบบแผ่น	2.2-2.6
ส่วนของผลึก	5.7
ค่าความเป็นฉนวน (kV/cm)	2x10 ⁴

ที่มา: Nissan (1986)

เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายเซลลูโลส โดยเซลลูโลสเกิดจากการประกอบกันด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดเดียว คือ กลูโคส แต่เฮมิเซลลูโลสจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส (mannose) ไซโลส (xylose) อะราบิโนส (arabinose) รวมทั้งกรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid) และกรดกาแลกทูโรนิก (galacturonic) คำว่าเฮมิเซลลูโลสเริ่มปรากฏในปี ค.ศ. 1891 เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ ของพืชโดยรวมอยู่กับสารชนิดอื่น เช่น ลิกนิน และเซลลูโลส โดยเฮมิเซลลูโลสจะพบมากในแอลบ ซังข้าวโพด เฮกโซแซน (hexosan)

องค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสในไม้เนื้อแข็ง (hardwoods) และไม้เนื้ออ่อน (softwoods) จะมีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อย โดยในไม้เนื้อแข็ง เช่น จำพวกสนจะพบเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นตัวหลักคือกลูคูโรโนไซแลน (O-acetyl-4-O-methylglucuronoxylan) หรือเรียกง่าย ๆ ว่าไซแลน (Berggren, 2003) และจะพบว่าไซแลนในไม้เนื้อแข็งสูงถึงประมาณ 15-30% ขึ้นอยู่กับชนิดของไม้เนื้อแข็งนั้น ๆ ส่วนเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นตัวหลักในไม้เนื้ออ่อน (softwoods) คือ O-acetyl-galactoglucuronoxylan และ arabino-(4-O-methylglucurono)xylan หรือเรียกว่า กลูโคแมนแนน และไซแลนตามลำดับ องค์ประกอบของกลูโคแมนแนนและไซแลนในไม้เนื้ออ่อนมีประมาณ 20% และ 10% ตามลำดับ (David, 2001) ตัวอย่างเฮมิเซลลูโลสในไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนแสดงดังตารางที่ 6 และ 7 ตามลำดับ เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกสกัดได้ง่ายในสารละลายต่าง และองศาของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (degree of polymerization) ของเฮมิเซลลูโลสจะไม่เกิน 200

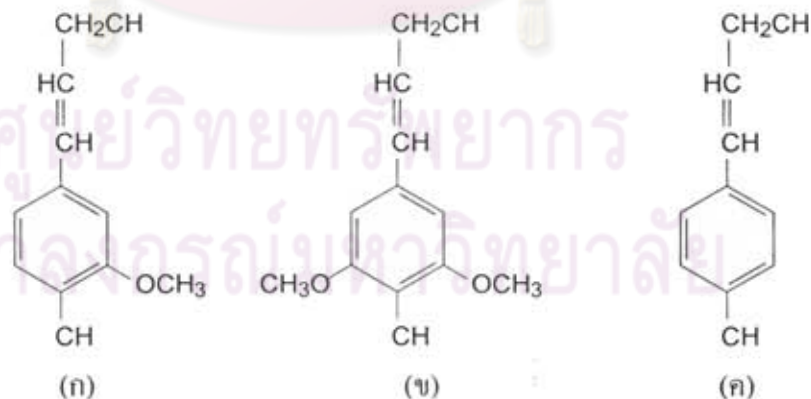
เฮมิเซลลูโลสมีคุณสมบัติทั่ว ๆ ไปดังนี้คือ

1. มีน้ำตาลโมโนแซ็กคาไรด์มากกว่า 1 ชนิด ประกอบอยู่
2. เฮมิเซลลูโลสในไม้เนื้อแข็ง (hardwood) และในไม้เนื้ออ่อน (softwood) จะต่างกันและจะมีมวลโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส
3. มีน้ำตาลที่เป็นกิ่งแขนงจึงสามารถละลายน้ำได้
4. ไม่มีคุณสมบัติความเป็นผลึกเป็น
5. มีความว่องไวในปฏิกิริยามากกว่าเซลลูโลส

ลิกนิน

ลิกนินเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญในองค์ประกอบของพืชที่พบในธรรมชาติ โดยในพืชแต่ละชนิดจะพบปริมาณของลิกนินแตกต่างกัน โดยลิกนินในพืชที่พบอยู่โดยทั่วไปจะมีปริมาณอยู่ในช่วง 10-30% ลิกนินเป็น โพลิเมอร์ที่เกิดจากการดีไฮโดรจีเนชันของฟีนิล โพรเพน (phenylpropanes) และมีโครงสร้างเป็นแบบ 3 มิติ (Berggren, 2003) โดยทั่วไปลิกนินจะไม่ละลายในน้ำ แต่จะสามารถละลายในกรดได้เล็กน้อย และจะสามารถละลายได้ดีในสภาวะที่เป็นด่าง อีกทั้งยังสามารถถูกออกซิไดซ์ได้ในบรรยากาศ เนื่องจากลิกนินไม่มีสมบัติทางการยึดหยุ่น จึงทำให้ต้นไม้หรือพืชที่มีปริมาณลิกนินมากจะมีความแข็งแรงมากตามไปด้วย ลิกนินในไม้เนื้ออ่อนประกอบด้วย guaiacyl units เกิดจากกระบวนการ โพลิเมอร์ไรเซชันของ tran-coniferyl alcohol ดังแสดงในภาพที่ 15 (ก) ลิกนินในไม้เนื้อแข็งประกอบด้วย guaiacyl และ syringyl units เกิดจากกระบวนการ โพลิเมอร์ไรเซชันของ trans-coniferyl และ trans-sinapyl alcohol ดังแสดงในรูปที่ (ข) ส่วนลิกนินในหญ้าประกอบด้วย P-hydroxyphenyl units เกิดจากกระบวนการ โพลิเมอร์ไรเซชัน ของ trans-P-coumaryl alcohol ดังแสดงในรูปที่ (ค) (David, 2001)

ลิกนินในพืชกระจายอยู่ตลอดผนังชั้นที่สองกับความเข้มข้นสูงสุดใน middle lamella เพราะความแตกต่างของปริมาตรของ middle lamella ถึงผนังชั้นที่สอง มีค่าประมาณ 70% ของลิกนินที่อยู่ในผนังชั้นที่สอง (Elmer, 1976)



ภาพที่ 15 สูตรโครงสร้างทางเคมีของลิกนินที่พบในธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด
ที่มา: David (2001)

ลิกนินเป็นส่วนที่ป้องกันเซลล์โลสไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์และจะทำหน้าที่ห่อหุ้มและเชื่อมต่อระหว่างเซลล์โลสและเฮมิเซลล์โลสให้ยึดติดกัน ทั้งลิกนินและสารแทรกในต้นไม้สามารถที่จะกำจัดหรือย่อยได้ในสัตว์ ลิกนิน มีส่วนร่วมในการฟอร์มรูปร่างกับเฮมิเซลล์โลสในบางกรณี

สารแทรก

สารแทรกในพืช ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์มากมายหลายชนิด ซึ่งสามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่เป็นกลางเช่น อะซีโตน อีเธอร์ เมทานอล เอทานอล เบนซีน และน้ำ องค์ประกอบของสารแทรกจะแตกต่างกันไปในพืชที่แตกต่างกัน (different wood species) หรือแม้แต่ในพืชชนิดเดียวกัน แต่คนละส่วนกันก็จะมีองค์ประกอบของสารแทรกที่แตกต่างกันไปโดยสารแทรกในไม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อย ๆ

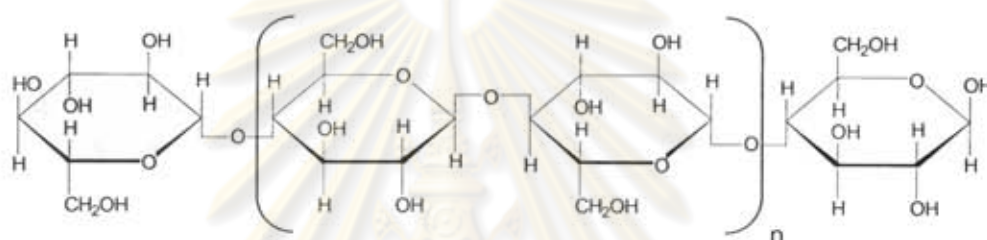
1. พวกสารประกอบอะลิฟาติก (aliphatic compounds) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไขมันและขี้ผึ้ง (waxes)
2. พวก Terpenes และ Terpenoids
3. พวกสารประกอบฟีโรนิก (phenolic compound)

สารแทรกในโครงสร้างของเส้นใยต่าง ๆ ได้แสดงถึงการลดลงของความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเส้นใยของเซลล์โลสในผนังของเส้นใยโดยการใช้กรดแก่ และเบสแก่ ดังนั้นก่อนการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะต้องทำการสกัดหรือแยกสารแทรกออกก่อน เพื่อให้สารเคมีสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุลผลึกเซลลูโลส

จุลผลึกเซลลูโลส (microcrystalline cellulose: MCC) เป็น โพลิเมอร์ทางธรรมชาติชนิดหนึ่ง ซึ่งมีชื่อทางเคมีคือ β -1,4 glucane มีสูตรทางเคมีคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ มีสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 16 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 36,000 เมื่อ n มีค่าประมาณ 220 มีสมบัติทางเคมีคือ จุลผลึกเซลลูโลสจะไม่สามารถละลายได้ในน้ำ ในกรดอ่อนและในตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) ต่าง ๆ แต่จะสามารถละลายได้เล็กน้อยใน โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีความเข้มข้นประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 8 เมื่อกระจายตัวในน้ำจะมีค่า pH ประมาณ 5.5 ถึง 7.0



ภาพที่ 16 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลของจุลผลึกเซลลูโลส

คำว่าไฮโดรเซลลูโลสถูกเรียกครั้งแรกในปี ค.ศ. 1875 จนกระทั่งได้มีการเริ่มนำคอลลอยท์ที่ผลิตจากจุลผลึกเซลลูโลสมาใช้ในปี ค.ศ. 1962 โดยจุลผลึกเซลลูโลสนี้สามารถผลิตได้จากกระบวนการเสื่อมสลาย (degradation) หรือการลดขนาดของอนุภาคเซลลูโลสลงโดยใช้กรด โดยในช่วงเริ่มแรกการนำจุลผลึกเซลลูโลสมาใช้ก็ยังไม่ค่อยประสบความสำเร็จนัก อย่างไรก็ตามต่อมาได้เริ่มมีการนำเอาเซลลูโลสจากธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในทางการค้าเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังมีการเริ่มนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางและแพร่หลายมากยิ่งขึ้น (Battisa, 1986)

จากนิยามของเซลลูโลสจะพบว่า โครงสร้างของเซลลูโลสจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นผลึกและจะถูกกั้นด้วยส่วนที่เป็นอสัณฐาน โดยในปี 1877 ได้มีผู้ทำการตรวจวัดพืชผักพบว่าทั้งภายในบริเวณส่วนที่เป็นผนังเซลล์ (cell walls) และในบริเวณส่วนที่เป็นเส้นใยประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน ต่อมาในปี ค.ศ. 1920 ได้มีผู้กล่าวถึงรูปร่างของผลึกสำหรับเซลลูโลสบริสุทธิ์ โครงสร้างของผลึกที่อยู่ในเซลลูโลส และได้มีการอธิบายในเวลาต่อมา โดยจะพิจารณาถึงองค์ประกอบของเซลลูโลส 5 โมเลกุลหรือเซลโลไบโอสเรียงตัวแบบขนานกัน ความยาวของผลึกในแกน b คือ 1.03 นาโนเมตร ซึ่งความยาวที่แน่นอนและตรงกันของหน่วยเซลโลไบโอ

โอสจะประกอบขึ้นจาก 2 กลุ่มของแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose) โดยความยาวของแกน α คือ 0.835 นาโนเมตร ระยะทางที่สั้นเพียงพอจะยอมให้กลุ่มของ $-OH$ ของสายโซ่ต่าง ๆ จับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ต่อมาในภายหลังจึงได้มีการศึกษาถึงความคล้ายคลึงของโครงสร้างเรื่อยมา และ โครงสร้างนี้ก็เป็นที่ยอมรับอยู่จนถึงทุกวันนี้สำหรับหน่วยเซลล์ของเนทีฟเซลลูโลส (Battisa, 1986)

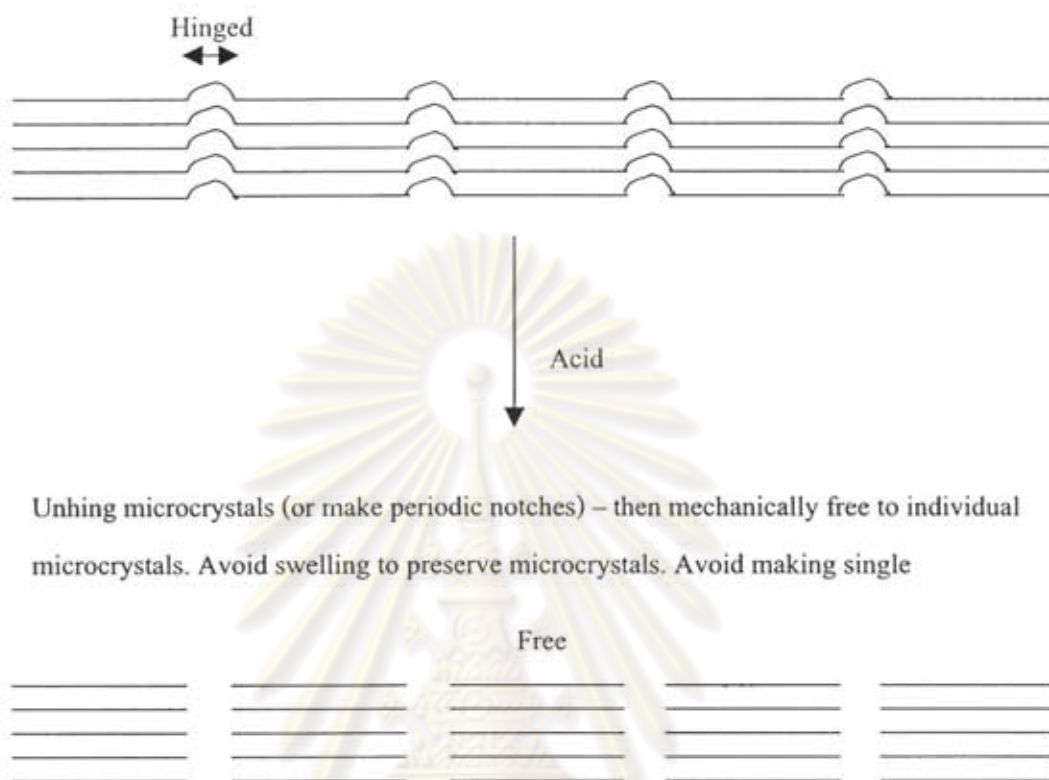
ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของจุลผลึกเซลลูโลส

คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์	ค่าระดับ
น้ำหนักโมเลกุล	30,000-50,000
ความชื้น, %	6.5
ตัวทำละลายอินทรีย์, %	< 0.05
เถ้า, %	< 0.05
แคลเซียม, ppm.	< 40
ครอโรไซด์, ppm.	< 50
เหล็ก, ppm.	< 10
ทองแดง, ppm.	< 4
การละลายได้ใน:	
น้ำ	ไม่ละลายแต่เกิดการกระจายตัว
สารละลายเบสเจือจาง	ละลายได้บางส่วนและเกิดการบวมพอง
สารละลายกรดเจือจาง	ไม่ละลายและทนทาน
สารละลายอินทรีย์	ไม่ละลายและไม่ทำปฏิกิริยา
น้ำมันต่าง ๆ	ไม่ละลายและไม่ทำปฏิกิริยา

ที่มา : Battisa (1975)

เซลลูโลสโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยมัดของเส้นใยของโพลีเมอร์ (ไฟบิลิว) เป็นจำนวนมากมารวมกันเป็นมัด ๆ เมื่อทำการย่อยเส้นใยโพลีเมอร์นี้โดยทำการทำลายส่วนที่เป็น hinged ที่ยึดระหว่างผลึกออก จะพบว่าจะได้ส่วนที่เป็นผลึกอิสระขนาดเล็ก ดังสามารถแสดงได้ในภาพที่ 17

Start with natural or synthetic fiber or film-forming



UnHING microcrystals (or make periodic notches) – then mechanically free to individual microcrystals. Avoid swelling to preserve microcrystals. Avoid making single

Free

ภาพที่ 17 การแยกเส้นใยของเซลลูโลสออกจะได้เป็นจุลผลึกอิสระขนาดเล็ก
ที่มา: Battisa (1975)

กระบวนการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรดเป็นปฏิกิริยาที่จะนำมาใช้ในการลดขนาดของเส้นใยลง โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสสามารถแบ่งออกได้เป็นได้เป็นปฏิกิริยาเอกพันธ์และวิวิธพันธ์ โดยปฏิกิริยาเอกพันธ์โครงสร้างทั้งหมดจะสามารถย่อยสลายได้ ส่วนปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ของเซลลูโลสจะได้จากการทำปฏิกิริยากับกรดที่มีความเข้มข้นต่ำ และเหลือกากของเซลลูโลสที่ไม่เสื่อมสภาพ

โครงสร้างผลึกของรีเจนเนอร์เรทเซลลูโลส เมอร์เซอร์ไรส์ และอัลคาไลเซลลูโลส จะมีรูปแบบของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันไป และจะแตกต่างจากเนทีฟเซลลูโลสในเรื่องของขนาดและมุมของระนาบภายในหน่วยเซลล์ โดยขนาดและรูปร่างของผลึกเซลลูโลสจะมีมากมายหลายขนาดซึ่งจะขึ้นกับวัตุธรรมชาติที่ใช้ในการผลิตแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 องค์ของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของเส้นใยจากธรรมชาติและรีเจนเนอเรตไฟเบอร์

เซลลูโลส	ช่วงค่าเฉลี่ยขององค์การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน
เส้นใยธรรมชาติ	
ปานและปานรามี่	350-300
ฝ้าย	250-200
เยื่อไม้ที่ไม่ฟอกสี	400-250
เยื่อที่ฟอกสี	280-200
เยื่อไม้ที่ฟอกสี	190-140
เซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการเมอร์เซอร์ไรท์	90-70
เซลลูโลสที่ผ่านการบด	100-80
รีเจนเนอเรตไฟเบอร์	
เส้นด้าย	50-30
ยางเส้น	30-15

ที่มา: Battisa (1986)

การนำจุลผลึกเซลลูโลสไปใช้งานในทางการค้าสามารถนำไปใช้ได้หลายรูปแบบ ต่อมาได้มีความพยายามที่จะทำการหลีกเลี่ยงการเสื่อมสภาพหรือการลดขนาดของเซลลูโลสจนเป็นอนุภาคผง ไม่มีเส้นใยหลงเหลือ ไม่เป็นเส้นใยและเจลของจุลผลึกเซลลูโลสก็ได้เป็นแนวทางใหม่สำหรับเซลลูโลส

จุลผลึกเซลลูโลสในทางการค้ามีอยู่มากมายหลายชนิดตามแต่สภาพการนำไปใช้งาน ตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมยาจะยอมให้ใช้ชนิดที่เตรียมเพื่อใช้ในการดกอัดเม็ดคยาและทานได้เท่านั้น ปริมาณการใช้สำหรับการดกอัดเม็ดคยามีมากกว่า 1,000 ตันต่อปีเลยทีเดียว ส่วนการนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ เช่น จะใช้ควบคุม heat shock หรือการเติบโตของ ice-crystal ในการแช่แข็งผลไม้จากคุณสมบัติที่ได้กล่าวไปข้างต้นนี้ เราสามารถนำจุลผลึกเซลลูโลส ไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้อีกมากมายดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การนำจุลผลึกเซลลูโลสไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ

Application	Role of Microcrystalline Cellulose
Reinforcing filler	Thermosetting resins, Thermosetting laminates
Tableting	Inert binder, Diluent, Disintegrant, Lubricant, Sugar-coating Additive
Suspensions	Suspending Agent, Stabilizer, Thickening Agent
Emulsions	Emulsifier, Stabilizer
Chromatography	TLC, Column chromatography and Ion exchange
Color vehicle	Dry and Pigment transport
Cellulose raw material	Controlled-particle-size cellulose derivatives
Derivatives	Controlled-particle-size MCC derivatives
Ceramics	Plasticity rapid prefired glaze hardening
Food	Nonnutritive filler reduces caloric value
Herbicide emulsion	Sole emulsifier, Stabilizer, Thixotropy, Aqueous Dispersibility
Latex emulsions	Emulsifier, Stabilizer, Thixotropy, Prevents "Strike through", Adhesion
Cosmetics	Retains volatile principles
Paints	Flow control, Brush control, Viscosity control
Wax-in-water emulsion	Sole emulsifier, Shear stability, Freeze-thaw stability, pH Stability, Aqueous-solvent Miscibility, Thixotropy
Water-base-paint formulation	Flow control, Brushing control, Viscosity control, Bubble leveling, Sagging control

ที่มา: Battisa (1975)

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของจุลผลึกเซลลูโลส

1.1 เครื่อง X-ray diffraction

ทฤษฎีของ X-ray diffraction คือ เมื่อลำรังสีเอ็กซ์ตกกระทบผิวหน้าของผลึกโดยทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอ็กซ์จะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า ในขณะที่อีกส่วนจะผ่านไปยังชั้นที่ 2 ของอะตอม ซึ่งบางส่วนก็จะเกิดการกระเจิง และส่วนที่เหลือก็จะผ่านเข้าไปยังชั้นที่ 3 ของอะตอมดังแสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยผลึก

ลำรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นแบบเดียวกัน ถ้าอะตอมอยู่กันอย่างเป็นระเบียบและมีระยะห่างเท่ากัน การเลี้ยวเบนนี้ก็จะมึลักษณะคล้ายกับการเลี้ยวเบนด้วยเกรตติงแบบสะท้อน (reflection) ซึ่งสำคัญในการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ขึ้นอยู่กัาสภาวะ 2 ประการ คือ

1. รังสีที่ตกกระทบ รังสีที่เลี้ยวเบน และเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน
2. ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

เมื่อปี ค.ศ. 1912 W.L. Bragg ได้ใช้ลำรังสีเอ็กซ์แคบ ๆ ให้กระทบผิวหน้าผลึกเป็นมุม θ เพื่อให้เกิดการเลี้ยวเบน และการกระเจิง เมื่อเกิดอันตรกิริยา (เกิดปฏิกิริยาขึ้นภายใน) กับอะตอมที่ O, P และ R

ถ้าคลื่นแสงเกิดอินเตอร์เฟอเรนซ์แบบเสริม (constructive interference) ที่มุม θ จะทำให้ได้สมการเป็น

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

โดย n = ตัวเลขจำนวนเต็ม
 d = ระยะระหว่างชั้นของผลึก
 λ = ความยาวคลื่น

สมการนี้เรียกว่า Bragg equation

รังสีเอ็กซ์จะเกิดการสะท้อนจากผลึกได้ ถ้ามุมตกเป็น $\sin \theta = n\lambda/2d$ ส่วนมุมอื่น ๆ จะเกิดการหักล้างกัน

1.2 กล้องขยายอิเล็กตรอนกำลังสูง (Scanning Electron Microscope: SEM)

กล้องขยายอิเล็กตรอนกำลังสูง (SEM) ได้ถูกนำมาใช้ในการขยายภาพของอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาไม่สามารถที่จะนำมาใช้ได้ ภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จะทำให้สามารถเห็น ได้ถึงลักษณะ โครงสร้างภายนอก เช่น ขนาดของอนุภาค รูปร่างของผลึก ขนาดของอะตอมที่เกาะเกี่ยวกันขึ้นเป็นผลึก และลักษณะของพื้นผิวของอนุภาคหรือผลึก

1.3 เครื่องวิเคราะห์หาความหนาแน่นจริง (Ultracyanometer)

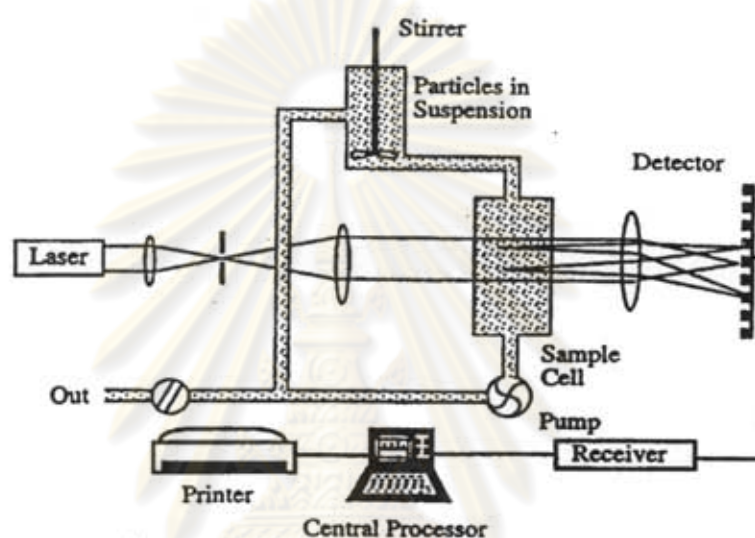
เครื่องวิเคราะห์หาความหนาแน่นจริง การวิเคราะห์หาค่า True Density ของอนุภาค โดยใช้เครื่อง Ultracyanometer จะอาศัยการนำก๊าซเข้าไปแทนช่องว่างต่าง ๆ ภายในอนุภาค เพื่อหาปริมาตรที่แท้จริงมาใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นจริง โดยก๊าซที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ใช้ก๊าซฮีเลียม (99.99%) และอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ 25 องศาเซลเซียส ก่อนใช้งานจะต้องทำการต้องทำการ calibrate เครื่องมือก่อนทุกครั้งและตัวอย่างที่จะนำมาวัดจะต้องตั้งที่ไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ความสัมพันธ์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\rho_{true} = W/V_p$$

โดย ρ_{true} = ความหนาแน่นจริง
 W = น้ำหนักของตัวอย่าง
 V_p = ปริมาตรของตัวอย่าง

1.4 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer)

เครื่องมือนี้จะใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคโดยอาศัยเทคนิค Laser Diffraction คือเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านลำแสงเลเซอร์ (laser beam) จะทำให้แสงเกิดการกระจาย (scatter) โดยที่มุมของการกระจายจะเป็นสัดส่วนกับขนาดของอนุภาค แสงที่ถูกทำให้กระจายทั้งหมดจะถูกเก็บรวบรวมโดยตัวรับสัญญาณ (detector) เพื่อนำมาประมวลผลการกระจายขนาดของอนุภาค ดังแสดงในภาพที่ 19 โดยทั่วไปขนาดอนุภาคเล็กสุดที่วัดได้โดยวิธี laser diffraction คือประมาณ $0.1 \mu\text{m}$



ภาพที่ 19 หลักการการวิเคราะห์ขนาดของเทคนิค Laser Diffraction
ที่มา: พิระพัฒน์ (2542).

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตจุลผลิตภัณฑ์เซลลูโลส และเซลลูโลสชนิดอื่น ๆ

Paralikar and Bhatawdekar (1988) ได้ศึกษาถึงกระบวนการผลิต จุลผลิตภัณฑ์เซลลูโลส โดยการนำเยื่อของขานอ้อยจาก mandya national paper มาทำการวิเคราะห์หาค่าแอลฟาเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า หลังจากนั้นทำการฟอกเยื่อให้เป็นสีขาวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หลังจากนั้นจึงทำการไฮโดรไลซิส ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 นอร์มอล เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยวิธีการทดลอง สามารถทำตามได้จาก Battisa, (1975) หลังจากไฮโดรไลซิสแล้ว จะทำการล้างจุลผลิตภัณฑ์เซลลูโลสที่ผลิตได้ด้วยน้ำสะอาดและจะทำการ treated กับสารละลาย 1% ของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ แล้วจึงทำให้แห้ง หลังจากนั้นนำ จุลผลิตภัณฑ์เซลลูโลส มาวิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึก จะพบมีค่าเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึกที่สูงมาก

Gomez *et al.* (1989) ได้ทำการศึกษาระบวนการผลิตจุลผลิตภัณฑ์เซลลูโลสจากเปลือกถั่ว (soybean husk) โดยจะนำเอาเปลือกถั่วซึ่งได้มาจากโรงงานอุตสาหกรรม COCAMAR ซึ่งเป็นโรงงานผลิตน้ำมันถั่ว และในกระบวนการจะได้เปลือกถั่วเป็นวัสดุเหลือใช้ออกมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการแยกเซลลูโลสออกจากเปลือกถั่วโดยวิธีการทำ Pre-extraction ก่อน โดยใช้ นอร์มอลเฮกเซน เอทานอล และน้ำ โดยทำการสกัดใน soxhlet เพื่อทำการแยกน้ำมันและไขมันออกจากเปลือกถั่วก่อน หลังจากนั้นจึงทำการ delignification กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสภายในเครื่องปฏิกรณ์อัดความดัน (autoclave) หลังจากนั้นจึงนำ จุลผลิตภัณฑ์เซลลูโลส มาวิเคราะห์เพื่อหาเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึกจุลผลิตภัณฑ์เซลลูโลสต่อไป

Nelson *et al.* (2000) ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยของยาโดยการนำผลิตภัณฑ์เซลลูโลสระดับจุลภาค มาใช้เป็นตัวควบคุมในการปลดปล่อยฤทธิ์ทางยา โดยได้นำผลงานวิจัยของ Gomez *et al.* (1989) มาทำการศึกษาคู่ โดยนำผลิตภัณฑ์เซลลูโลสระดับจุลภาค ที่ผลิตได้ตามวิธีของ Gomez นำมาใช้

จุลผลิตภัณฑ์เซลลูโลส จะสามารถผลิตได้จากวัสดุที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการนำวัสดุที่องค์ประกอบของเซลลูโลสมาใช้ในการผลิตจุลผลิตภัณฑ์เซลลูโลส โดย Gaonkar and Kulkarni (1987) ได้ทำการผลิตจุลผลิตภัณฑ์เซลลูโลส โดยนำผักคาวดุมมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต ต่อมา Gaonkar and Kulkarni (1989) ได้ทำการผลิตจุลผลิตภัณฑ์เซลลูโลส โดยนำเปลือกมะพร้าวมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต ต่อมา Abdullar (1991) ได้ทำการผลิตจุลผลิตภัณฑ์เซลลูโลสโดย

นำปอมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตจุลผลิตภัณฑ์และยังมีอีกหลายท่านที่นำพืชที่มีเซลลูโลสมาใช้ในการผลิตจุลผลิตภัณฑ์

Padmadisastra and Gonda (1989) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตจุลผลิตภัณฑ์จากชานอ้อย เนื่องจากชานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทรายตามฤดูกาล การเพาะปลูกในประเทศอินโดนีเซีย โดยจะนำชานอ้อยที่เกิดจากอุตสาหกรรมน้ำตาล มาทำการย่อยให้มีขนาดที่เล็กเท่า ๆ กัน หลังจากนั้นจะนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.4 % ภายในเครื่องปฏิกรณ์อัดความดัน (autoclave) หลังจากนั้นจึงนำไปทำการฟอกสีโดยใช้สารจำพวกสารไฮโปคลอไรต์ หลังจากฟอกสีแล้วจึงนำมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ หลังจากสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นจุลผลิตภัณฑ์ ทำให้แห้ง หลังจากนั้นจึงนำจุลผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ ไปทำการวัดค่าเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึกของจุลผลิตภัณฑ์ จะพบว่าจุลผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นได้ มีเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึกที่สูงมาก และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ จุลผลิตภัณฑ์ Avicel PH 102 พบว่ามีจุลผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ มีความคล้ายคลึงกันมากโดยสามารถวัดได้โดยใช้ X-ray power diffraction (degree of crystallinity 2.8 ± 0.2) และ Flow index (FI = 19.3 ± 0.2) และเมื่อนำจุลผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้กับจุลผลิตภัณฑ์ Avicel PH 102 นำไปใช้ในการดกอัดเม็ดยา จะพบว่าจุลผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจะต้องใช้ความดันในการดกอัดเม็ดยามากกว่าจุลผลิตภัณฑ์ Avicel PH 102 อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากในระหว่างขั้นตอนการทำให้แห้งไม่ได้ทำการ spray dried จึงทำให้จุลผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้อาจติดกันเป็นก้อนกลม

Battisa *et al.* (1975) ได้ทำการศึกษาการเตรียมจุลผลิตภัณฑ์จากเยื่อไม้ โดยจะทำการย่อยเยื่อไม้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.5 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 250 องศาฟาเรนไฮต์ ที่ความดัน 20 ปอนด์ เป็นเวลาประมาณ 20 นาที หลังจากสิ้นสุดกระบวนการไฮโดรไลซิสแล้ว จะทำการล้างด้วยน้ำจืดมีค่า pH 6.5 หลังจากนั้นจึงนำจุลผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ ไปทำปฏิกิริยากับด่างอ่อน คือสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เจือจาง หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วจะนำจุลผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ ไปทำให้แห้งโดยใช้วิธีการ spray-dried หลังจากสิ้นสุดกระบวนการพบว่าจะได้อนุภาคแข็งสีขาวที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งข้อควรระวังสำหรับจุลผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ คือจุลผลิตภัณฑ์จะติดกันเป็นก้อนกลม

Kumar *et al.* (2002) UICEL เป็นเซลล์โอสชนิดใหม่ที่สามารถนำไปใช้ในการดักจับเชื้อโรค ซึ่ง UICEL นี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากการ treat เซลล์โอสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 5 นอร์มอล หลังจากนั้นจะถูกนำไปตกตะกอนด้วยเอทานอล โครงสร้างผลึกของ UICEL จะมีความคล้ายคลึงกับจุลผลึกเซลล์โอสซึ่งมีชื่อทางการค้าคือ Avicel PH102 แต่ UICEL จะแตกต่างจาก Avicel PH102 ตรงที่ UICEL เป็นเซลล์โอส II ขณะที่ Avicel PH102 เป็นเซลล์โอส I และค่าสมบัติต่าง ๆ ทางกายภาพเช่น ค่าความหนืด และค่าองศาความเป็นผลึกจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และจากการทดสอบแล้วพบว่า UICEL สามารถนำไปใช้ในงานการดักจับเชื้อโรคได้ โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการออกแบบและพัฒนาในการที่จะให้เม็ดยาสามารถแตกตัวออกได้อย่างรวดเร็ว



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องปฏิกรณ์ทนแรงดันสูง (autoclave reactor)
2. ตู้อบ (hot air oven)
3. เตาเผา (furnace)
4. เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
5. เครื่องบดย่อยขนาด
6. โถดูดความชื้น (desiccator)
7. ถ้วยกรอง
8. ชุดกลั่น
9. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง

เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่อง X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD) (Philips รุ่น X'Pert)
2. เครื่อง Scanning Electron-Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS)
(Jeol รุ่น JSM-5600 LV)
3. เครื่อง Ultra-Pycnometer 1000 (Quantachrome)
4. เครื่อง Particle Size Analyzer (Mastersizer-S)

วัตถุดิบและสารเคมี

1. เส้นใยผ้าจากบริษัทก้องเกียรติเทก ไทซ์ จังหวัดสระบุรี นำมาตัดเพื่อทำการลดขนาด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2-5 มิลลิเมตร
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 98% ผลิตโดยบริษัท Merk
3. ไฮโดรคลอริกแอซิด (HCl) % ผลิตโดยบริษัท Merk
4. อะซิติกแอซิด (CH₃OH) % ผลิตโดยบริษัท Merk
5. โซเดียมครอไรต์ (NaClO₂) 80% ผลิตโดยบริษัท APS Ajax

6. จุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) ผลิตโดยบริษัท Fluka
7. น้ำกลั่น (distilled water)

วิธีการ

1. การเตรียมเส้นใยฝ้าย

นำเส้นใยฝ้ายที่ได้มาจาก บริษัทก้องเกียรติเทคโนโลยี จ.สระบุรี นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้ตู้อบลมร้อนและทิ้งไว้ให้เย็นในอากาศ หลังจากนั้นนำมาลดขนาดและกัณขขนาดของเส้นใยด้วยเครื่องบดย่อยขนาด จนมีขนาดความยาวของเส้นใยประมาณ 2-5 มิลลิเมตร จากนั้นนำเส้นใยที่ได้นำไปเก็บในภาชนะปิดเพื่อป้องกันความชื้น

ตัวอย่างของเส้นใยฝ้ายจะถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ เช่น ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เถ้า (ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน Tappi) วิเคราะห์รูปร่างภายนอกของอนุภาคด้วยเครื่อง SEM และนำตัวอย่างฝ้ายที่ทำการลดขนาดแล้วไปหาองศาความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD)

2. การออกแบบการทดลอง

เนื่องจากการผลิตจุลผลึกเซลลูโลสมีปัจจัยหรือตัวแปรที่เกี่ยวข้องอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตจุลผลึกเซลลูโลส ในกระบวนการย่อยสลายในสภาวะต่างๆจะพิจารณาตัวแปรในการทดลองอยู่ 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลา คอการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอลฟาเซลลูโลส และองศาความเป็นผลึกของเส้นใยฝ้าย โดยให้ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มี 3 ระดับคือ 6, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิมี 3 ระดับคือ 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส และเวลามี 2 ระดับคือ 1 และ 2 ชั่วโมง แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การออกแบบการทดลอง

ลำดับที่	ความเข้มข้น (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (h)
1	6	100	1
2	6	100	2
3	6	120	1
4	6	120	2
5	6	140	1
6	6	140	2
7	8	100	1
8	8	100	2
9	8	120	1
10	8	120	2
11	8	140	1
12	8	140	2
13	10	100	1
14	10	100	2
15	10	120	1
16	10	120	2
17	10	140	1
18	10	140	2

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. กระบวนการย่อยสลายในสภาวะด่าง (Alkaline Degradation)

3.1 นำเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการลดขนาดแล้วจำนวน 6 กรัม และผสมสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามหัวข้อที่ 2)

3.2 นำส่วนผสมทั้งหมดมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้แท่งแก้วกวนพร้อมให้ความร้อนด้วยเล็กน้อย เพราะเนื่องจากเส้นใยฝ้ายจะมีไขหุ้มอยู่ภายนอกจึงต้องให้ความร้อนไปด้วยขณะทำการผสมส่วนผสม

3.3 นำส่วนผสมทั้งหมดเข้าเครื่องปฏิกรณ์โดยตั้งอุณหภูมิต่าง ๆ กัน (แปรค่าของอุณหภูมิตามหัวข้อที่ 2) ที่ความดันบรรยากาศ เป็นระยะเวลาต่าง ๆ กัน (แปรค่าของเวลาตามหัวข้อที่ 2)

3.4 เมื่อครบกำหนดเวลา นำเส้นใยที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์มาทำการกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีสถานะเป็นกลาง

3.5 นำเส้นใยที่ได้ไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นและนำมาเก็บไว้ในโถสุญญากาศความชื้นจนกระทั่งเย็นตัวลง

3.6 ชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่หายไป

เส้นใยฝ้ายหลังจากผ่านการย่อยสลายในสภาวะด่างแล้ว จะถูกนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีและองศาความเป็นผลึกของเส้นใยว่ามีองค์ประกอบทางเคมีและค่าองศาความเป็นผลึกเปลี่ยนไปอย่างไร นอกจากนี้เส้นใยที่ผ่านการย่อยสลายในสภาวะด่างแล้ว จะทำการเลือกสภาวะที่เหมาะสมมาใช้ในการฟอกขาวเส้นใย และนำไปใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดต่อไปในข้อ 4 และ 5 ตามลำดับ

4. กระบวนการฟอกขาวของเส้นใยฝ้าย

เส้นใยฝ้ายหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายในสภาวะต่างแล้ว จะต้องนำมาฟอกขาวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยกระบวนการฟอกขาวของเส้นใยฝ้ายเป็นกระบวนการกำจัดปริมาณลิกนินที่ตกค้างอยู่ในเยื่อ โดยปริมาณของลิกนินในเยื่อจะสามารถดูดกลืนแสงได้จึงทำให้เกิดสี กระบวนการและสภาวะในการฟอกขาวเยื่อแสดงในภาคผนวก จ

5. กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด (Acid Hydrolysis)

5.1 นำเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการฟอกขาวแล้วมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอน

5.2 เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.5 โมลาร์ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร

5.3 นำเส้นใยฝ้ายในหัวข้อ 5.1 ผสมกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ หลังจากนั้นจึงนำไปใส่ในชุดกลั่นที่เตรียมไว้ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส (Battisa, 1975) และใช้เวลาในการทดลองเท่ากับ 20, 25, 30, 35, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ

5.4 เมื่อครบกำหนดเวลา นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีสภาพเป็นกลาง

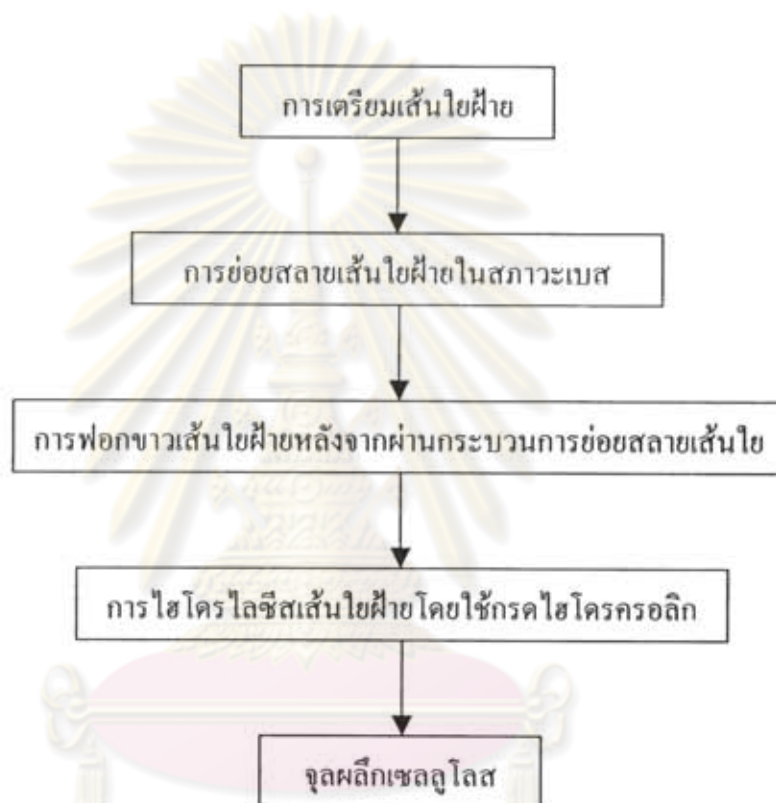
5.5 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้อบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทั่วให้เย็นตัวลงและนำมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้นจนกระทั่งเย็นตัวลง

5.6 ชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่หายไป

หลังจากที่ผลิตจุลผลึกเซลลูโลสจากเส้นใยฝ้ายตามสภาวะต่าง ๆ แล้ว จุลผลึกเซลลูโลสที่เตรียมได้จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติและลักษณะเฉพาะ โดยเปรียบเทียบกับจุลผลึกเซลลูโลสที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรม (Avicel PH101) โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง ได้แก่ เครื่องมือ Ultracycrometer เพื่อใช้ตรวจสอบค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลส เครื่องมือ Particle Size Analyzer เพื่อตรวจสอบการกระจายขนาดอนุภาคจุลผลึกเซลลูโลส เครื่องมือ X-ray diffraction

(XRD) เพื่อตรวจสอบองศาความเป็นผลึกและขนาดผลึกของจุลผลึกเซลลูโลส เครื่องมือ Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของจุลผลึกเซลลูโลสและลักษณะการกระจายตัวของขนาดของจุลผลึกเซลลูโลสตามลำดับ

วิธีการผลิตจุลผลึกเซลลูโลสที่ได้กล่าวในข้างต้น สามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังแสดงในแผนภาพที่ 20



ภาพที่ 20 แผนภาพขั้นตอนการผลิตจุลผลึกเซลลูโลส

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลและวิจารณ์

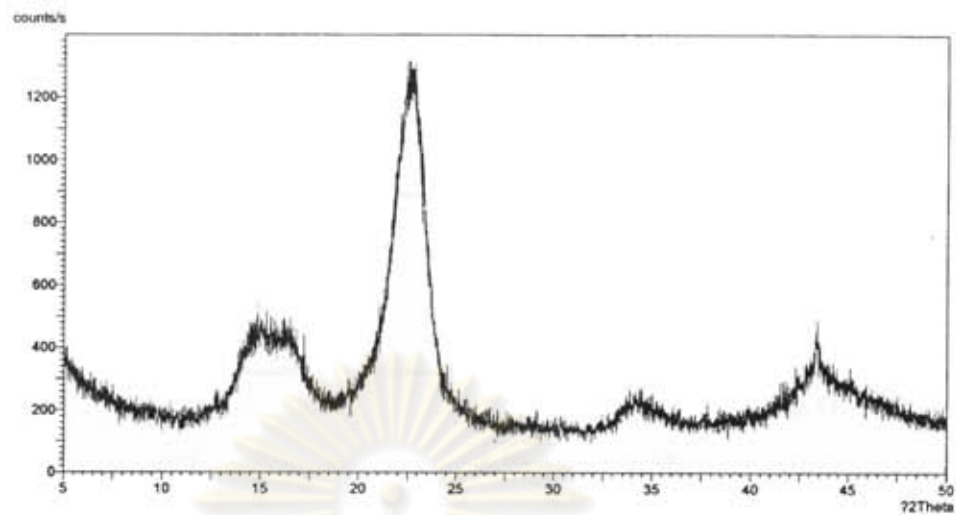
1. ผลวิเคราะห์ของเส้นใยฝ้าย

เส้นใยฝ้ายจากบริษัททอกรีตเทกไทซ์ จังหวัดสระบุรี ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว มีสีค่อนข้างขาวและมีสิ่งเจือปนเล็กน้อย โดยเป็นจำพวกเปลือกของเมล็ดฝ้าย เมื่อทำการลดขนาดของเส้นใยและนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายด้วยวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน TAPPI (ภาคผนวก ก) จะพบว่าเส้นใยฝ้ายจะมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักถึง 94.24 % โดยน้ำหนัก และมีเฮมิเซลลูโลสประมาณ 1.94 % โดยองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายจากบริษัททอกรีตเทกไทซ์ จังหวัดสระบุรี

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
เซลลูโลส	94.24
เฮมิเซลลูโลส	1.94
ลิกนินและสารแทรก	1.07
เถ้า	2.75

จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวอย่างเส้นใยฝ้ายที่ได้ทำการลดขนาดแล้วด้วยเครื่อง X-ray Diffraction Spectroscopy ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 21 พบว่าเส้นใยฝ้ายจะประกอบไปด้วยโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) เป็นส่วนใหญ่และมีโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกเพียงเล็กน้อย โดยสามารถสังเกตจากการที่มี peak เกิดขึ้นเพียงไม่กี่ peak เท่านั้น และความสูงของพีคก็มีค่าต่ำ และเมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าองศาความเป็นผลึกของเส้นใยฝ้าย พบว่าเส้นใยฝ้ายมีค่าองศาความเป็นผลึกเท่ากับ 80.16 เปอร์เซ็นต์ และจากการวิเคราะห์เส้นใยฝ้ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) จะพบว่าเส้นใยฝ้ายมีลักษณะเป็นเส้นใยที่ยาว มีการบิดเป็นเกลียวคล้ายริบบิ้นและมีโพรงอยู่ตรงกลางของเส้นใยแสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 21 XRD pattern ของเส้นใยกล้วย



ภาพที่ 22 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยกล้วย

2. ผลของการย่อยสลายเส้นใยกล้วยในสภาวะต่าง

การทดลองนี้จะศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลาที่มีต่อการย่อยสลายเส้นใยกล้วยในสภาวะเบส โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณลักษณะเฉพาะด้วยเครื่อง XRD แสดงดังตารางที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

ตารางที่ 9 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายหลังจากทำการย่อยสลายในสภาวะต่างๆที่
สภาวะต่าง ๆ กัน

ความเข้มข้น (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (h)	แอลฟา เซลลูโลส (%)	เฮมิ เซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)	เถ้า (%)
6	100	1	98.82	0.95	0.11	0.12
6	100	2	98.30	0.98	0.39	0.33
6	120	1	98.82	0.81	0.20	0.17
6	120	2	98.58	0.81	0.41	0.20
6	140	1	98.56	0.85	0.14	0.45
6	140	2	99.10	0.67	0.06	0.17
8	100	1	99.15	0.06	0.34	0.45
8	100	2	99.10	0.30	0.25	0.35
8	120	1	98.81	0.74	0.24	0.21
8	120	2	98.64	0.60	0.27	0.49
8	140	1	99.07	0.46	0.22	0.25
8	140	2	99.10	0.30	0.27	0.33
10	100	1	98.70	0.98	0.13	0.19
10	100	2	98.93	0.51	0.26	0.30
10	120	1	98.51	0.46	0.35	0.68
10	120	2	99.14	0.34	0.21	0.31
10	140	1	98.61	0.30	0.48	0.61
10	140	2	97.42	0.19	1.14	1.25

หมายเหตุ ค่าแอลฟาเซลลูโลส+เฮมิเซลลูโลส+ลิกนิน+เถ้า มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 10 ค่าแอลฟาเซลลูโลสและองศาความเป็นผลึกของเส้นใยฝ้ายหลังจากทำการย่อย สลาย ในสภาวะต่างที่สภาวะต่าง ๆ กัน

ความเข้มข้น (%)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (h)	น้ำหนัก (g)	แอลฟาเซลลูโลส (%)	องศาความเป็นผลึก (%)
6	100	1	94.1176	98.82	82.89
6	100	2	93.7935	98.30	81.58
6	120	1	93.8268	98.82	84.33
6	120	2	92.6053	98.58	82.28
6	140	1	92.7881	98.56	83.46
6	140	2	92.1419	99.10	83.68
8	100	1	93.4573	99.15	85.96
8	100	2	91.9968	99.10	83.34
8	120	1	92.7393	98.81	85.07
8	120	2	92.3745	98.64	83.12
8	140	1	92.7955	99.07	84.73
8	140	2	91.3555	99.10	82.98
10	100	1	92.1419	98.70	84.74
10	100	2	91.6091	98.93	83.58
10	120	1	91.9968	98.51	82.82
10	120	2	91.3735	99.14	81.85
10	140	1	91.3592	98.61	82.89
10	140	2	89.6014	97.42	81.32

จากตารางที่ 10 จะพบว่าที่ทุก ๆ สภาวะที่ใช้ในการทดลอง จะมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์แอลฟาเซลลูโลสและเปอร์เซ็นต์องศาความเป็นผลึกของเส้นใยฝ้ายมีค่าสูงมากขึ้นภายหลังทำปฏิกิริยาการย่อยสลายเส้นใยฝ้ายในสภาวะต่าง และจะพบว่ามีค่ามากกว่า 94.24 เปอร์เซ็นต์และ 80.16 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

2.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อกระบวนการย่อยสลายเส้นใยในสภาวะต่าง

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อกระบวนการย่อยสลายเส้นใยฝ้ายในสภาวะต่าง พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำ ๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น จะมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์แอลฟาเซลลูโลสและองค์ความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น โดยอุณหภูมิจะมีส่วนเข้าไปเพิ่มการย่อยสลาย โพลีเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ และถ้าความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าสูงขึ้น จะพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์แอลฟาเซลลูโลสและเปอร์เซ็นต์องค์ความเป็นผลึกมีค่าต่ำลง เกิดเนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าที่สูงขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเข้าไปจะทำให้เกิดการย่อยสลายที่มากเกินไปและจะ ไปย่อยสลาย โพลีเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลที่สูงขึ้น (เซลลูโลส) จึงมีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์แอลฟาเซลลูโลสมีค่าต่ำลงและทำให้เปอร์เซ็นต์องค์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มที่ต่ำลงด้วย และจะพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 8% จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์แอลฟาเซลลูโลสและเปอร์เซ็นต์องค์ความเป็นผลึกที่สูงที่สุด

2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการย่อยสลายเส้นใยในสภาวะต่าง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการย่อยสลายในสภาวะต่าง จะพบว่าที่อุณหภูมิต่ำ ๆ เมื่อความเข้มข้นของของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น จะทำให้เปอร์เซ็นต์องค์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มที่ลดลง และสำหรับทุก ๆ อุณหภูมิเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์แอลฟาเซลลูโลสและเปอร์เซ็นต์องค์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง และจะพบว่าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์แอลฟาและเปอร์เซ็นต์องค์ความเป็นผลึกที่สูงที่สุด

2.3 ผลของเวลาที่มีต่อกระบวนการย่อยสลายเส้นใยฝ้ายในสภาวะต่าง

จากการศึกษาผลของเวลาที่มีต่อกระบวนการย่อยสลายในสภาวะต่าง จะพบว่าที่เวลาในการทดลอง 1 ชั่วโมงสำหรับทุก ๆ ค่าอุณหภูมิ จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์แอลฟาเซลลูโลสและเปอร์เซ็นต์องค์ความเป็นผลึกที่สูงกว่า 2 ชั่วโมงเสมอ และที่อุณหภูมิ 1 ชั่วโมงสำหรับทุก ๆ ความเข้มข้นจะมี

ค่าเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึกที่สูงกว่า 2 ชั่วโมงเสมอ เกิดเนื่องมาจากระยะเวลา 2 ชั่วโมงจะเกิดการย่อยสลายมากเกินไป จึงมีผลทำให้ค่าต่าง ๆ มีแนวโน้มที่ลดลง

เนื่องจากผลการวิเคราะห์พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ 8 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมกับกระบวนการย่อยสลายในสภาวะเบสมากที่สุด โดยจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์แอลฟาเซลลูโลสและเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึกที่สูงที่สุดคือ 99.15 เปอร์เซ็นต์ และ 85.96 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้สภาวะนี้สำหรับศึกษาผลของกระบวนการไฮโดรไลซิสต่อไป

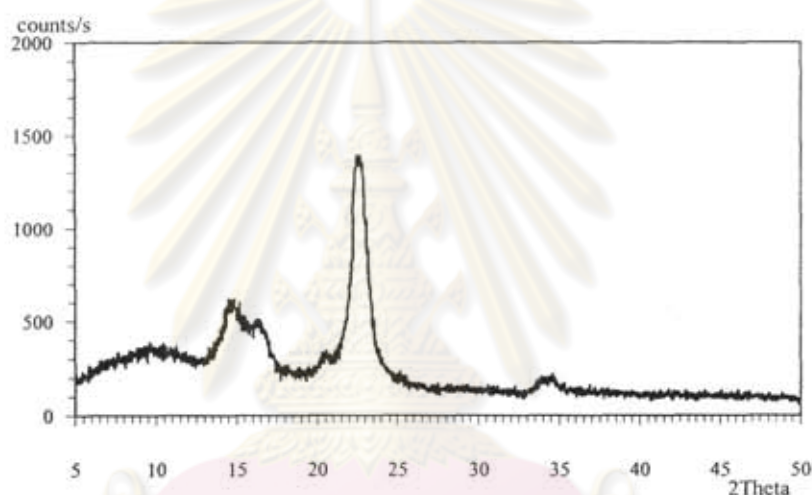
3. ผลของกระบวนการไฮโดรไลซิสเส้นใยฝ้ายด้วยกรด

จากการศึกษาผลของกระบวนการไฮโดรไลซิสเส้นใยฝ้ายด้วยกรด โดยทำการผลิตที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20, 25, 30, 35, 40 และ 45 นาที จากนั้นนำจุลผลึกเซลลูโลสที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะ โดยเปรียบเทียบกับจุลผลึกเซลลูโลสที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรม (Avicel PH101) โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง ได้แก่ เครื่องมือ Ultracycrometer เพื่อตรวจสอบค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลส เครื่องมือ Particle Size Analyzer เพื่อตรวจสอบขนาดและการกระจายของขนาดอนุภาคจุลผลึกเซลลูโลส เครื่องมือ X-ray Diffraction (XRD) เพื่อตรวจสอบค่าองค์ประกอบความเป็นผลึกของจุลผลึกเซลลูโลส เครื่องมือ Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของจุลผลึกเซลลูโลสและลักษณะการกระจายตัวของขนาดของจุลผลึกเซลลูโลสตามลำดับ

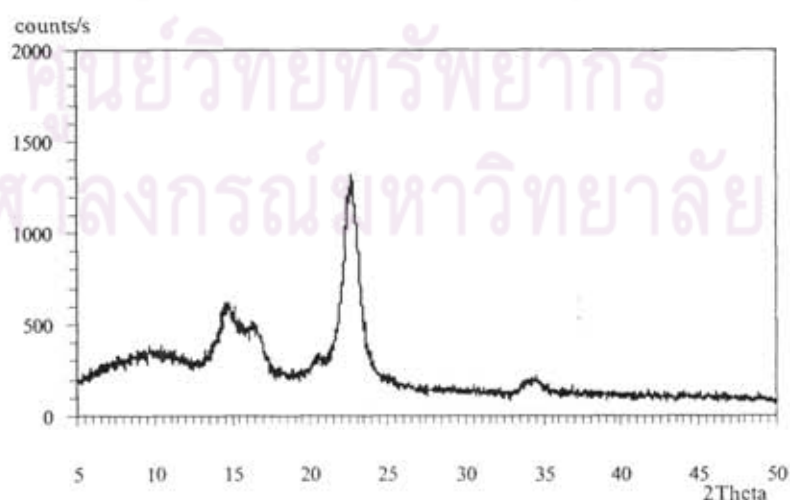
จากการศึกษาผลของเวลาในการไฮโดรไลซิสกับน้ำหนักของเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการฟอกขาวแล้วพบว่า ที่เวลาไฮโดรไลซิส 20, 25, 30, 35, 40 และ 45 นาทีจะได้น้ำหนักของจุลผลึกเซลลูโลสเท่ากับ 86.10, 85.52, 85.09, 84.64, 84.46 และ 84.18 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และจะพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการไฮโดรไลซิสจะทำให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลงตามไปด้วย เมื่อคิดเทียบจากน้ำหนักฝ้าย 100 เปอร์เซ็นต์จะพบว่าจะสามารถสังเคราะห์จุลผลึกได้เท่ากับ 92.13, 91.50, 91.05, 90.57, 90.37 และ 90.07 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

3.1 ผลวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง XRD

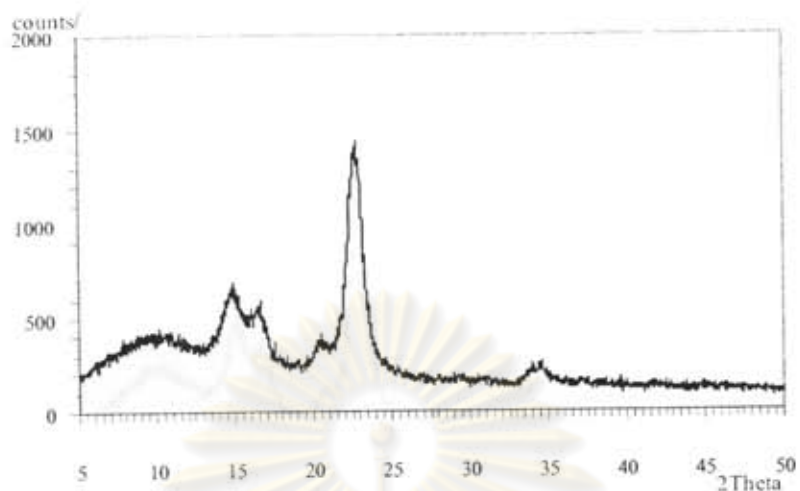
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบความเป็นผลึกและขนาดผลึกของจุลผลึกเซลลูโลสที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม (Avicel PH101) และจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้ด้วยเครื่อง XRD แสดงในภาพที่ 24-29 และสามารถเขียนกราฟสรุปลักษณะความเป็นผลึกของจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้ที่เวลาต่าง ๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 30 พบว่าเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสนาน 35 นาที จะทำให้จุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้มีเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึกสูงสุดคือ 83.45 เปอร์เซ็นต์ และมีขนาดผลึก 3.27 Å เมื่อเปรียบเทียบกับจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) จะพบว่ามีความเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึกที่สูงกว่าและมีขนาดผลึกที่ต่ำกว่าจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) แสดงดังตารางที่ 11



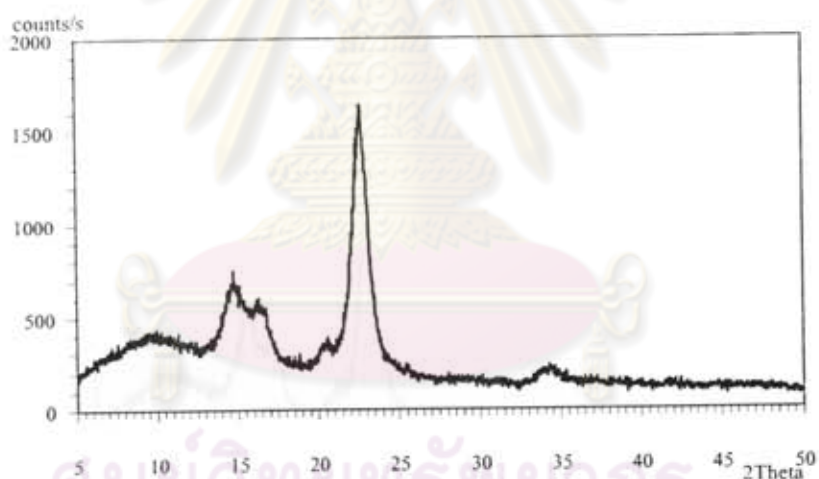
ภาพที่ 23 XRD pattern ของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)



ภาพที่ 24 XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 20 นาที

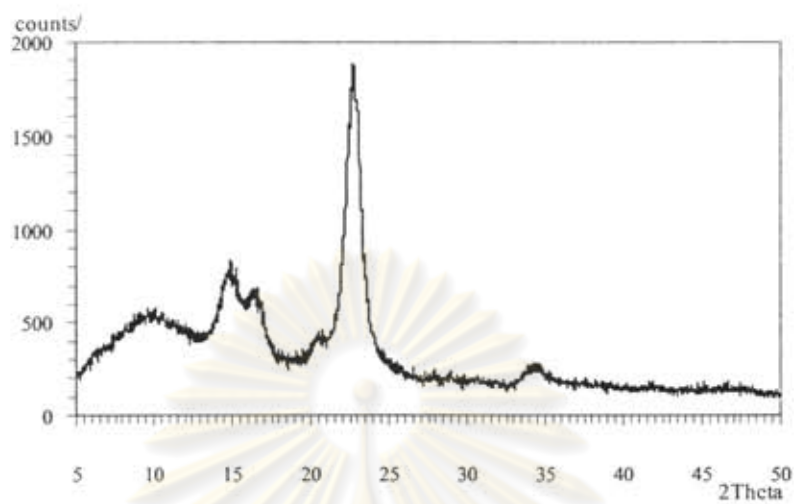


ภาพที่ 25 XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 25 นาที

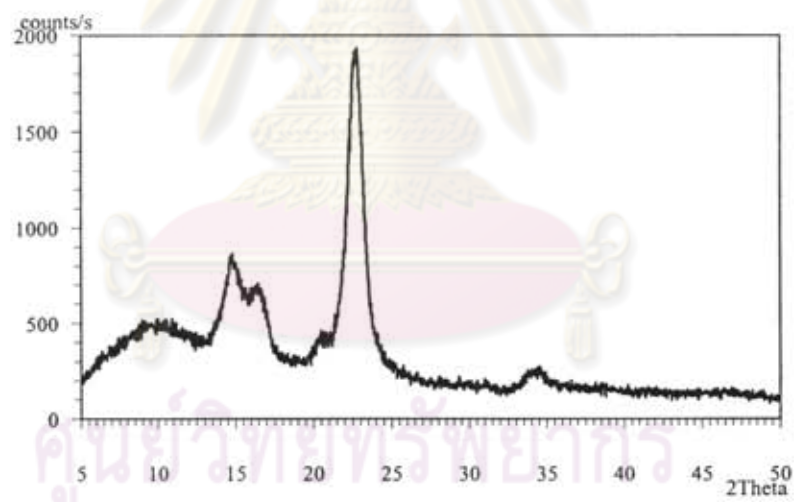


ภาพที่ 26 XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 30 นาที

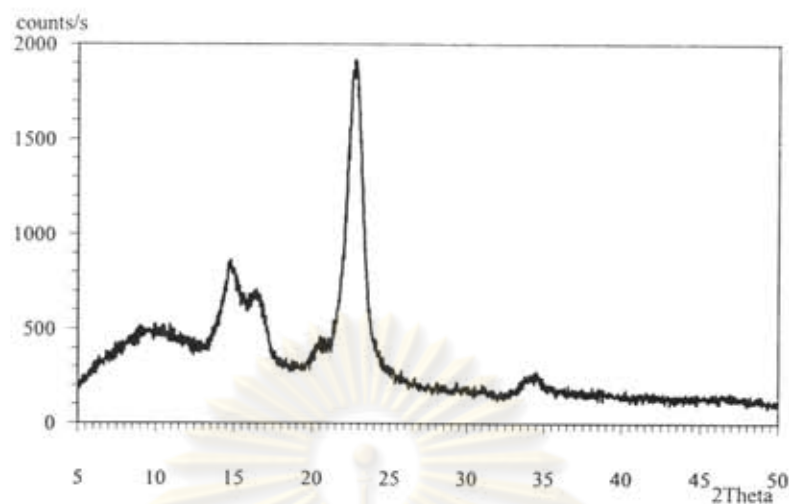
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 27 XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 35 นาที



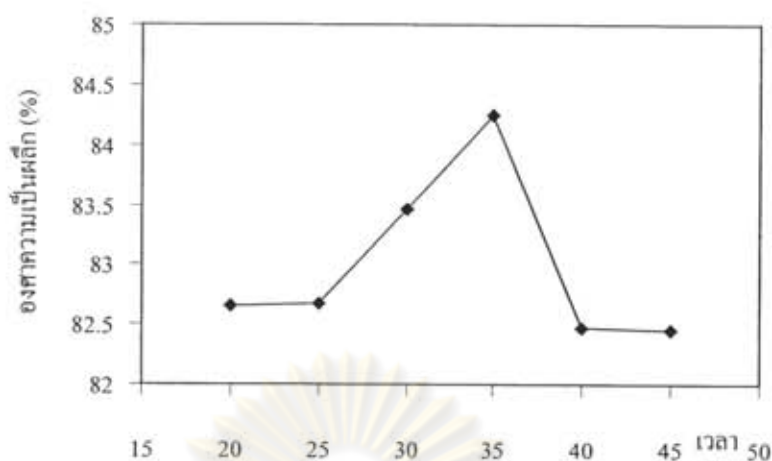
ภาพที่ 28 XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 40 นาที



ภาพที่ 29 XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 45 นาที

ตารางที่ 11 องศาความเป็นผลึกและขนาดผลึกของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) กับจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและใช้เวลาด่าง ๆ กัน

ชนิด	องศาความเป็นผลึก (%)	ขนาดผลึก (Å)
จุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)	82.66	3.37
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 20 นาที	82.66	2.97
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 25 นาที	82.67	3.09
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 30 นาที	83.45	3.16
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 35 นาที	84.24	3.23
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 40 นาที	82.47	3.27
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 45 นาที	82.46	3.27



ภาพที่ 30 องศาความเป็นผลึกของจุลผลึกเซลลูโลสผลิตได้ที่เวลาต่าง ๆ

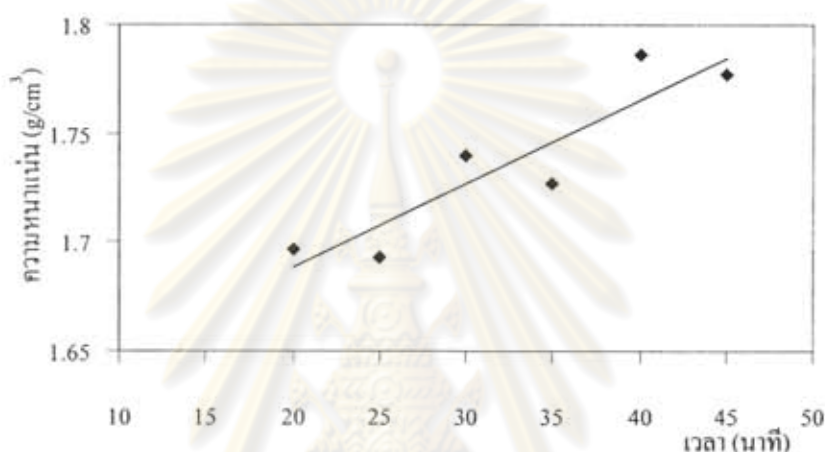
3.2 ผลวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง Ultracycrometer

ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นด้วยเครื่อง Ultracycrometer โดยจะทำการศึกษาหาค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) เปรียบเทียบกับจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาต่าง ๆ กันคือ 20, 25, 30, 35, 40 และ 45 นาที (ภาคผนวก ก) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) กับจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและใช้เวลาต่าง ๆ กัน

ชนิด	ความหนาแน่น (g/cm ³)
จุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)	1.6837
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 20 นาที	1.6962
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 25 นาที	1.6927
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 30 นาที	1.7393
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 35 นาที	1.7269
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 40 นาที	1.7859
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 45 นาที	1.7767

จากตารางที่ 16 จะพบว่าจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.6837 g/cm^3 และค่าความหนาแน่นจุลผลึกเซลลูโลสที่ได้จากการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 20 และ 25 นาทีจะมีค่าความหนาแน่นที่น้อยใกล้เคียงกัน คือ 1.6962 และ 1.6927 g/cm^3 ตามลำดับ ส่วนค่าความหนาแน่นจุลผลึกเซลลูโลสที่ได้จากการไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 40 นาทีจะมีค่ามากที่สุดคือ 1.7859 g/cm^3 แผนภาพสรุประยะเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสเปรียบเทียบกับความหนาแน่นที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ปริมาณสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส

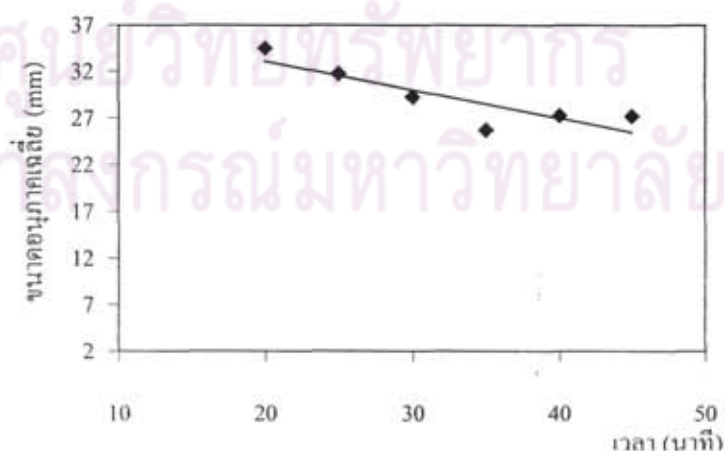
3.3 ผลวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง Powder Size Analyzer

ผลการวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer โดยจะทำการศึกษาขนาดและพื้นที่ผิวของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) เปรียบเทียบกับจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาต่าง ๆ กันคือ 20, 25, 30, 35, 40 และ 45 นาที (ภาคผนวก จ) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลวิเคราะห์ขนาดของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) กับจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและใช้เวลาด่าง ๆ กัน

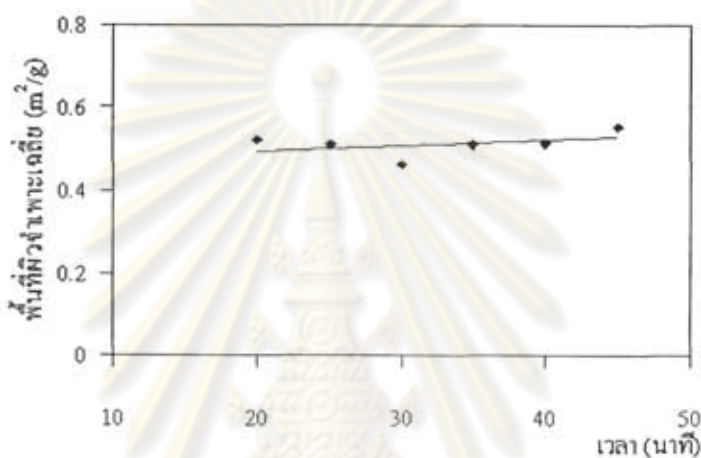
ชนิด	ขนาดเฉลี่ย (μm)	พื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ย (m^2/g)
จุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)	68.27	0.3897
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 20 นาที	34.11	0.5201
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 25 นาที	31.36	0.5097
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 30 นาที	28.90	0.4627
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 35 นาที	25.34	0.5097
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 40 นาที	26.97	0.5124
ไฮโดรไลซิสเป็นเวลา 45 นาที	26.89	0.5551

จากตารางที่ 17 จะพบว่าจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) จะมีขนาด 68.27 ไมโครเมตร และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ $0.3897 \text{ m}^2/\text{g}$ และจะพบว่าเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสนาน 35 นาที จะทำให้ขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสจากเส้นใยฝ้ายมีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 25.34 ไมโครเมตร และจะเห็นว่าระยะเวลาการไฮโดรไลซิสตั้งแต่ 35 นาทีเป็นต้นไปจะให้ค่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสแสดงดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 ปริมาณสัมพันธ์ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคกับเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส

จากภาพที่ 32 จะพบว่าถ้าเพิ่มเวลาในการไฮโดรไลซิสให้มากขึ้นจะมีผลทำให้ขนาดของอนุภาคจุลผลึกเซลลูโลสจากเส้นใยฝ้ายมีขนาดที่เล็กลง และจากตารางที่ 13 จะพบว่าเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสนาน 45 นาที จะทำให้อนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสจากเส้นใยฝ้ายมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ $0.5551 \text{ m}^2/\text{g}$ จากภาพที่ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคจุลผลึกเซลลูโลสกับเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส จะพบว่าที่เวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสเส้นใยจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะค่อนข้างต่ำ

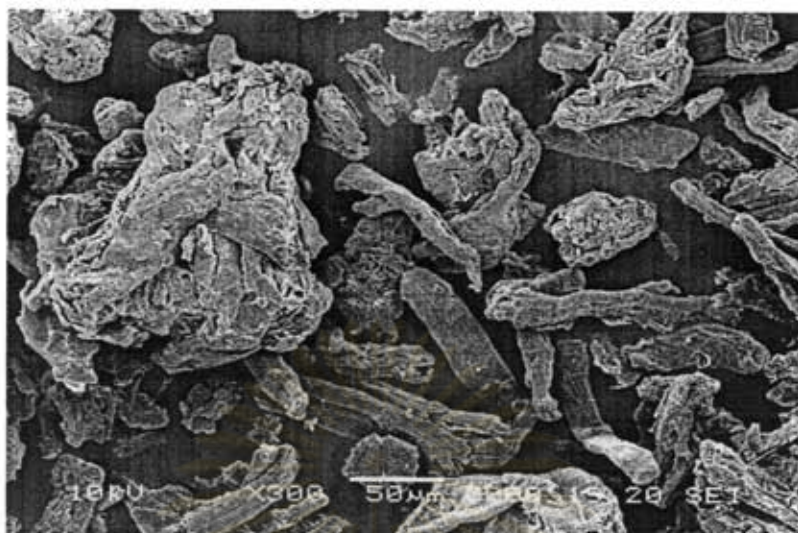


ภาพที่ 33 ปริมาณสัมพันธ์ของพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ยกับเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิส

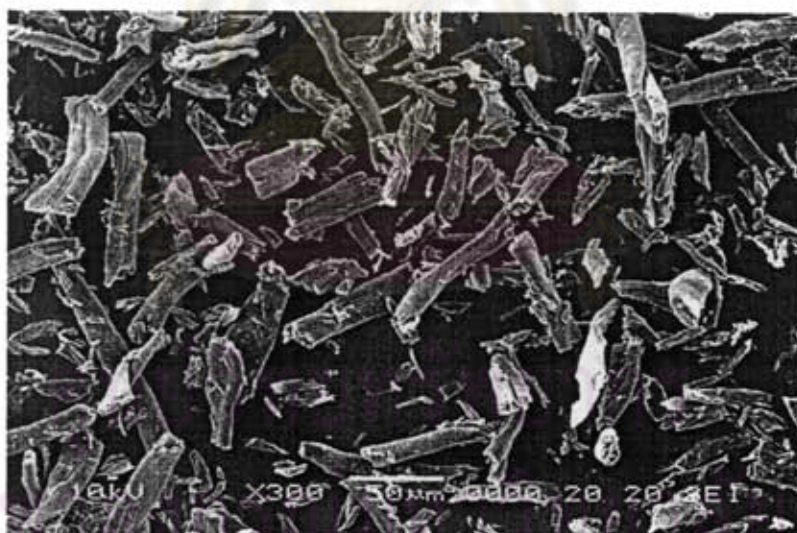
3.4 ผลวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง SEM

เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคด้วยเครื่อง SEM โดยเลือกทำการวิเคราะห์เฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กและให้ค่าองค์ความเป็นผลึกสูงสุด ซึ่งได้แก่ จุลผลึกเซลลูโลสที่ผ่านการไฮโดรไลซิสที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 35 นาที เปรียบเทียบกับจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 34 และ 35

จากภาพที่ 34 แสดงภาพถ่ายจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม พบว่าอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนและมีลักษณะเป็นรูปแท่ง มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 70-80 ไมโครเมตร



ภาพที่ 34 ภาพถ่าย SEM ของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ที่กำลังขยายเท่ากับ 300



ภาพที่ 35 ภาพถ่าย SEM ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยใช้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 35 นาที ที่กำลังขยายเท่ากับ 300

จากภาพที่ 35 แสดงภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ผ่านการไฮโดรไลซิสที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 35 นาที อนุภาคส่วนใหญ่มีรูปร่างลักษณะเป็นแท่งและมีขนาดแตกต่างกัน โดยขนาดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 30 ไมโครเมตร โดยจากภาพที่ 34 และ 35 จะมีความแตกต่างกันพอสมควร เนื่องมาจากวัตถุดิบเริ่มต้นที่นำมาใช้ผลิตจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีความแตกต่างกัน คือจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Avicel PH101) ที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมนั้น วัตถุดิบเริ่มต้นมาจากการใช้เชื้อกระดาษ ซึ่งลักษณะอนุภาคของเส้นใยจะมีลักษณะเป็นแท่งกลมตัน ส่วนจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ผลิตได้จากเส้นใยฝ้ายนี้จะมีลักษณะเป็นแท่งยาวและมีการบิดเป็นเกลียวและเป็นโพรงตรงกลางอันเนื่องมาจากลักษณะจำเพาะของฝ้าย โดยสามารถเปรียบเทียบได้กับลักษณะของเส้นใยฝ้ายในภาพที่ 22



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตจุลผลึกเซลลูโลสจากเส้นใยฝ้ายด้วยกระบวนการย่อยสลายในสภาวะต่างและการไฮโดรไลซิสด้วยกรดโดยใช้ฝ้ายเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิต จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตจุลผลึกเซลลูโลส พบว่าเส้นใยฝ้ายประกอบด้วยเซลลูโลส 94.24% เฮมิเซลลูโลส 1.94% เถ้า 2.75% ลิกนินและสารแทรก 1.07 % และจากการศึกษาองค์ประกอบความเป็นผลึกของเส้นใยฝ้าย พบว่าเส้นใยฝ้ายมีองค์ประกอบความเป็นผลึก 80.16%

จากการศึกษาการผลิตจุลผลึกเซลลูโลสจากเส้นใยฝ้าย โดยใช้กระบวนการย่อยสลายในสภาวะต่าง โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการย่อยสลายเส้นใยฝ้ายในสภาวะต่าง คือ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์แอลฟาเซลลูโลสและเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึก พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีผลต่อกระบวนการย่อยสลายในสภาวะต่างมากที่สุด โดยที่ความเข้มข้น 6% ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการผลิตจะมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์แอลฟาเซลลูโลสและเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและที่ความเข้มข้น 10% ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาจะมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์แอลฟาเซลลูโลสและเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบความเป็นผลึกมีแนวโน้มที่ลดต่ำลง และจะพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง จะให้เปอร์เซ็นต์เซลลูโลสและองค์ประกอบความเป็นผลึกมากที่สุดคือ 99.15% และ 85.96% ตามลำดับ จึงเลือกสภาวะนี้มาใช้ในการศึกษาการไฮโดรไลซิสเส้นใยฝ้ายด้วยกรด

จากการศึกษาผลของเวลาในการไฮโดรไลซิสเส้นใยฝ้าย โดยการกำหนดค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อระยะเวลาในการไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 20 นาทีไป 45 นาที ค่าความหนาแน่น องค์ประกอบความเป็นผลึกและพื้นที่ผิวจำเพาะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นแต่จะพบว่าขนาดของอนุภาคมีแนวโน้มที่ลด โดยสภาวะที่ดีที่สุดที่ในการไฮโดรไลซิสโดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.5 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 35 นาที และจะพบว่าที่สภาวะนี้จะสามารถผลิตจุลผลึกเซลลูโลสได้ 90.57

เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับน้ำหนักฝ้ายเริ่มต้น และจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) พบว่าจะมีองศาความเป็นผลึก 82.66% ขนาดผลึก 3.37 Å ความหนาแน่น 1.6837 g/cm³ ขนาด 68.27 μm และพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.3897 m²/g และเมื่อนำจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพพบว่าจะมีองศาความเป็นผลึก 84.24% ขนาดผลึก 3.23 Å ความหนาแน่น 1.7369 g/cm³ ขนาด 25.34 μm และพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.5097 m²/g จะพบว่าจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้นี้จะมีขนาดผลึกที่ใกล้เคียงกัน และมีองศาความเป็นผลึก ความหนาแน่น และพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) และจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้จะมีขนาดเล็กกว่าจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) ประมาณ 2 เท่า

ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยต่อ

1. ควรทำการศึกษาหาองศาของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) ของจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้เพื่อเปรียบเทียบกับจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) เนื่องจากองศาการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมีผลต่อขนาดของอนุภาคและน้ำหนักโมเลกุลของจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้
2. ควรทำการขยายขนาดของการทดลองเพื่อศึกษาผลของการทำ spray dry ว่ามีผลต่อขนาดของอนุภาคจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้อย่างไร
3. ศึกษาการนำไปใช้ในงานจริง เช่น ผลการนำไปตากแดดเป็นต้น
4. ศึกษาวัสดุในธรรมชาติชนิดอื่น ๆ เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตจุลผลึกเซลลูโลส เช่น ผักตบชวา ชานอ้อย เป็นต้น
5. พัฒนาระบบการผลิตจุลผลึกเซลลูโลสให้เป็นระบบแบบต่อเนื่อง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

- นวลแข ปาลีวนิช. 2542. ความรู้เรื่องผ้าและเส้นใย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- พีระพัฒน์ กฤตานุสรณ์. 2542. การพัฒนาเทคนิคประหยัดเวลาในการวิเคราะห์และเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยเทคนิคการตกตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- มณฑา จันทร์เกตุเลิศ. 2542. วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น. สมาคมคหเศรษฐศาสตร์แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ. 330 น.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2543. วิทยาศาสตร์เส้นใย. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 323 น.
- สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2536. เอกสารวิชาการเรื่องฝ้าย. 168 น.
- Abdullah, A.B.M., 1991. Production of Jute Microcrystalline Cellulose. *J. Bangladesh Acad. Sci.* 15 (2): 85-87.
- Battisa, O.A. 1975. **Microcrystal Polymer Science**. McGraw - Hill Book Company, New York, 208 p.
- Battisa, O.A. 1986. Cellulose, Microcrystalline. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering** vol 3(1986): 86-90
- Berggren, R. 2003. **Cellulose Degradation in Plup Fiber Studied as Change in Molar Mass Distributions**. Ph.D. Thesis, Stockhome University.

- Cullity, B.D. and S.R. Stock. 2001. Elements of X-Ray Diffraction. Prentice-Hall, Inc., New Jersey. 167-171.
- Douglas C. M.. 2001. **Design and Analysis of Experiments** 5th ed, John Wiley & Sons, Inc., New York. 218-235
- David, N., S. Hon and N. Shiraishi. 2000. **Wood and Cellulosic Chemistry**. Marcel Dekker, Inc., New York. 914 p.
- Elmer, L. and Jr. Gaden. 1976. **Enzymatic Conversion of Cellulosic Materials: Technology and Applications**. John Wiley & Sons, Inc., New York. 295-299 .
- Gaonkar, S.M., P.R. Kulkarni. 1987. Improved Method for the Preparation of Microcrystalline Cellulose from Water Hyacinth. **Text. Dyer Printer** 20Z26X, 19-22.
- Gaonkar, S.M., P.R. Kulkarni. 1989. Microcrystalline Cellulose from Coconut Shells. **Acia Polym.** 40: 292-294
- Gomez P.E.A, H.A.A. Winkler, A.A. Verzignassi and A.L.V. Alves. 1989. Deslignificacao fisico-quimica de sabugo de milho, Proc. Of the 1st Brazilian Symp. On the **Chem. Of Lignin and other Wood Components** vol. 2, pp. 321-331
- Klemm, D., Philipp, Bertram, T. Heinze, U. Heinze and W. Wagenknecht. 1998. **Comprehensive Cellulose Chemistry.**, Wiley-VCH.
- Kolpak, F. J. and Blackwell, J. 1976. Determination of the Structure of Cellulose II. **Macromolecule** 9, 273-278

- Kumar, V., M. Reus-Mrdina. and D. Yang. 2002. Prepare, Characterization, and Tableting Properties of a New Cellulose-Based Pharmaceutical Aid. **J. Pharm. Sci.** 235: 129-140
- Luukkonen, P. 2001. **Rheological Properties and the State of Water of Microcrystalline Cellulose and Silicified Microcrystalline Cellulose Wet Masses.** public criticism in Auditorium I at Viikki Infocentre (Viikinkaari 11A) on June 16th, 2001.,58 p.
- Nelson, P.E.A. Gomez. and H.A.A.. Winkler.200. Microcrystalline Cellulose from Soybean Husk: Effects of Solvent Treatments on its Properties as Acetylsalicylic Acid Carrier ; **Int. J. Pharm.** 206: 85-96.
- Nissan, A.H., G. K. Hunger. And West . 1986. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering** vol 3(1986) : 131-226 .
- O'Connor, Robert T. 1972. **Intrumental Analysis of Cotton Cellulose and Modified Cotton Cellulose.** Marcel Dekker, Inc., New York. 490 p.
- Padmadisastra, Y.and I. Gonda.1989. Preliminary Studies of the Development of a Direct Compression Cellulose Excipient from Bagasse. **J. Pharm. Sci.** 78 (6): 508–514.
- Paralikar, K.M. and S.P. Bhatawdekar. 1988. Microcrystalline Cellulose from Bagasse Pulp. **Biol. Wastes.** 24: 75–77.
- Tappi Test Methods. 1996-1997. Tappi Press.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

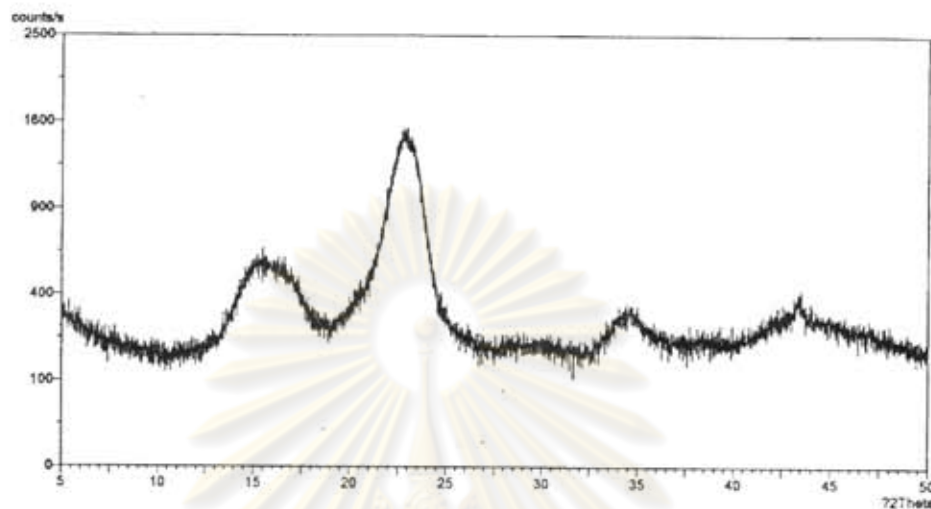


ภาคผนวก ก

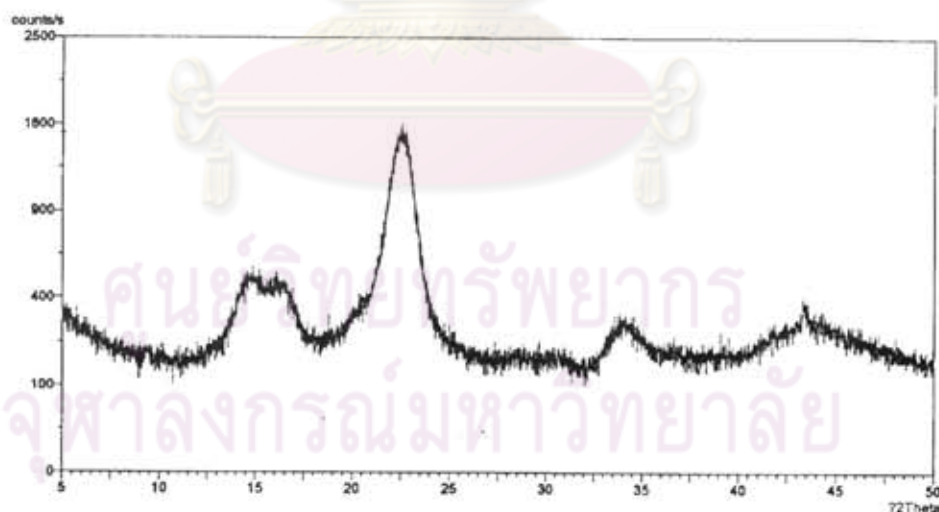
ลักษณะกราฟของเส้นใยฝ้าย ภายหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลาย โดยใช้ด่างที่สภาวะต่าง ๆ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

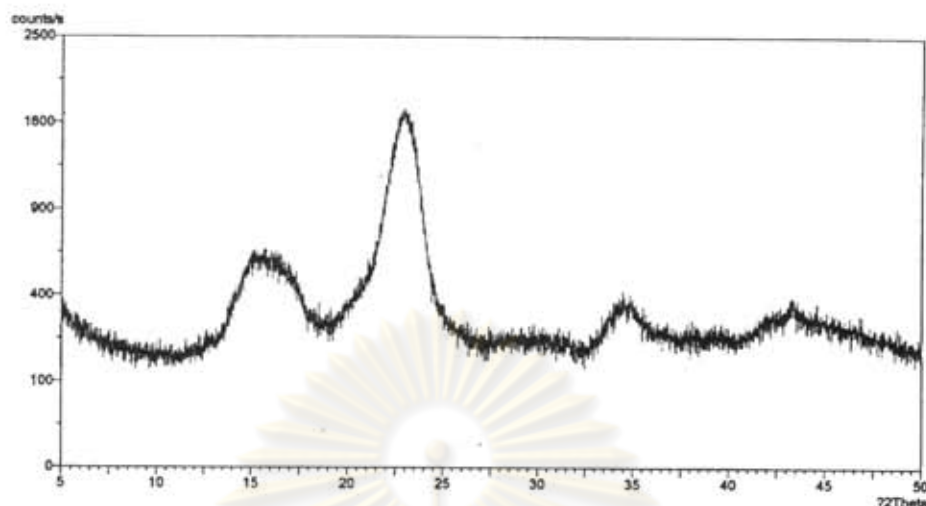
ลักษณะกราฟของเส้นใยฝ้ายหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยใช้ด่างที่สภาวะต่าง ๆ แสดงดังภาพผนวกที่ 1-18



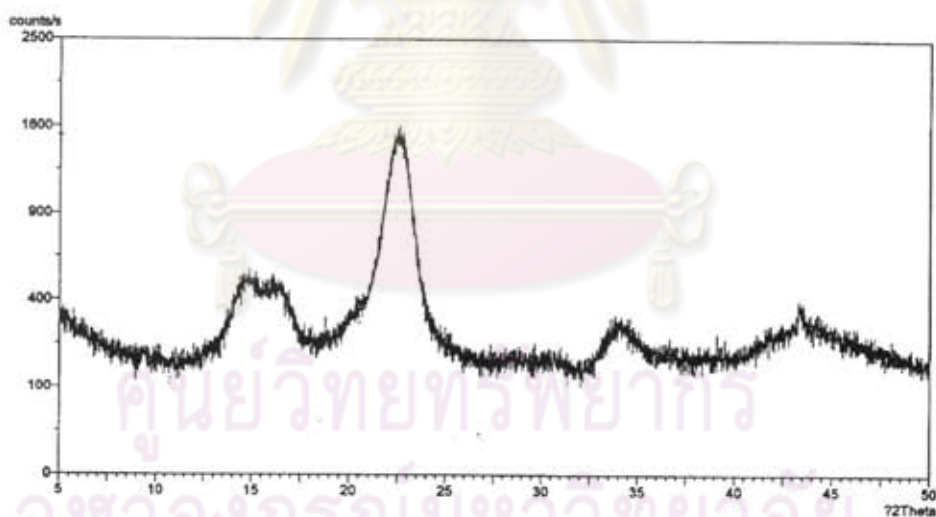
ภาพผนวกที่ 1 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่างที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง



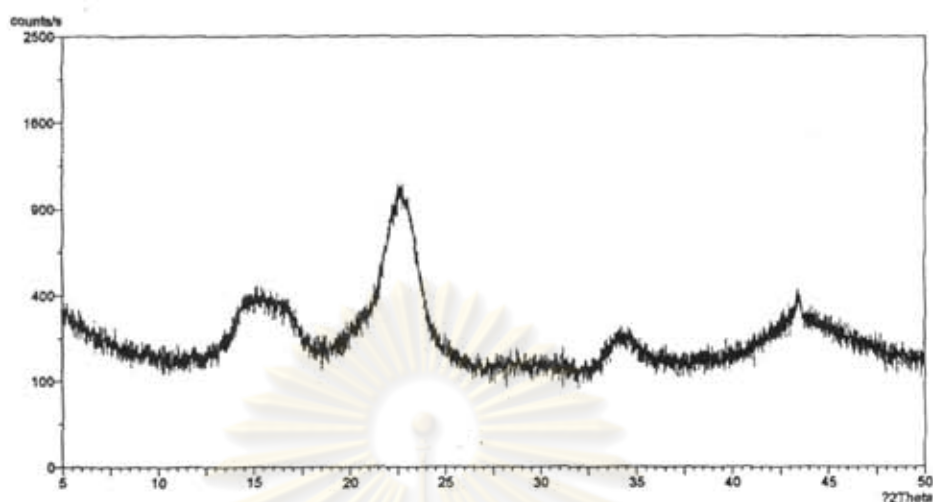
ภาพผนวกที่ 2 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่างที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง



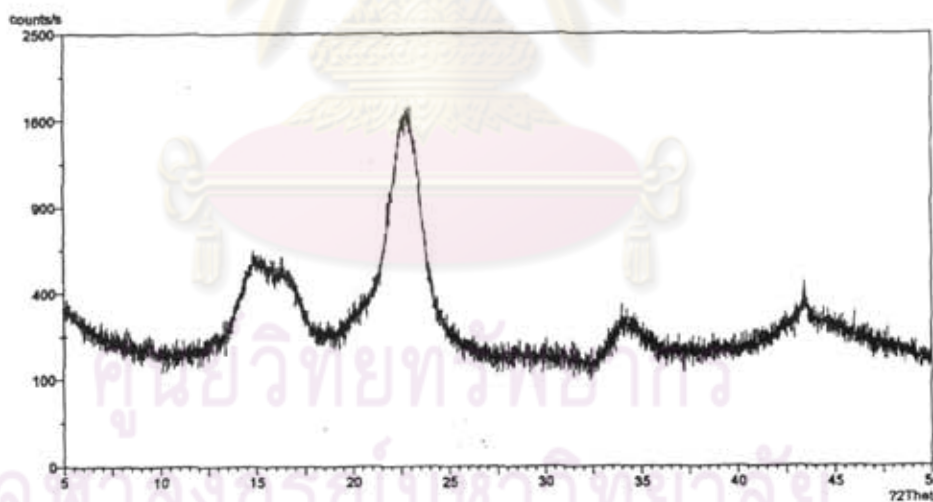
ภาพผนวกที่ 3 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง



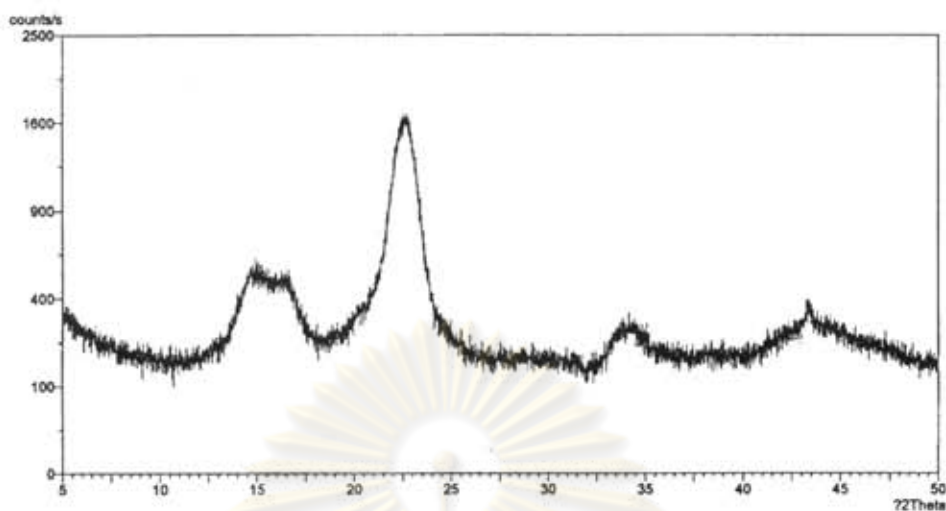
ภาพผนวกที่ 4 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง



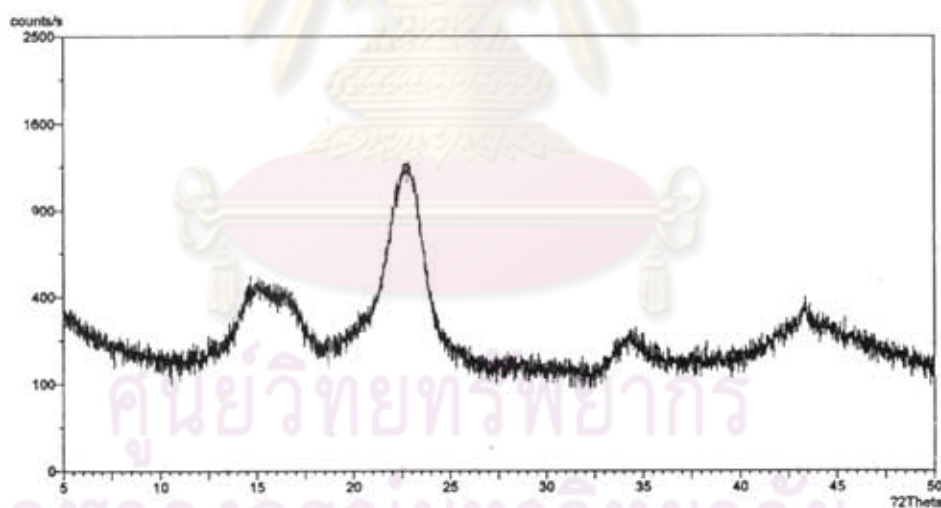
ภาพผนวกที่ 5 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง



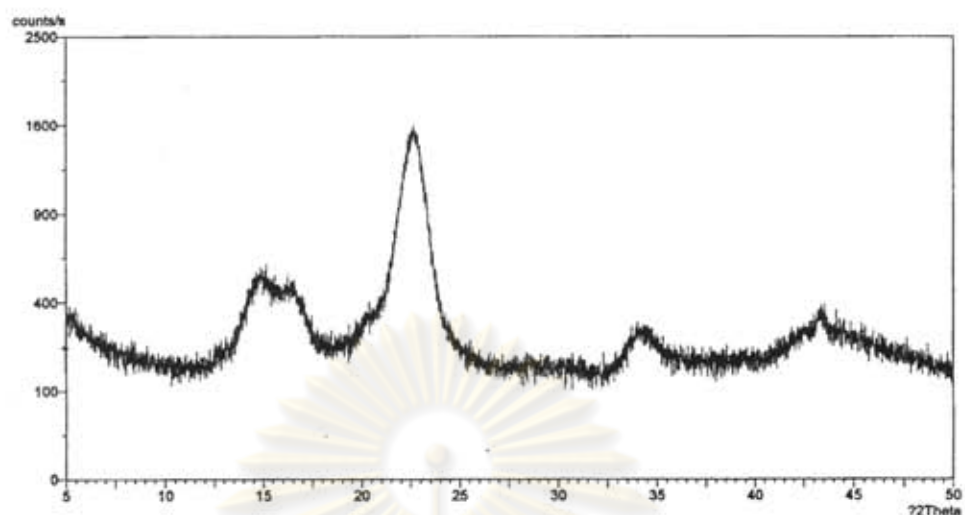
ภาพผนวกที่ 6 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง



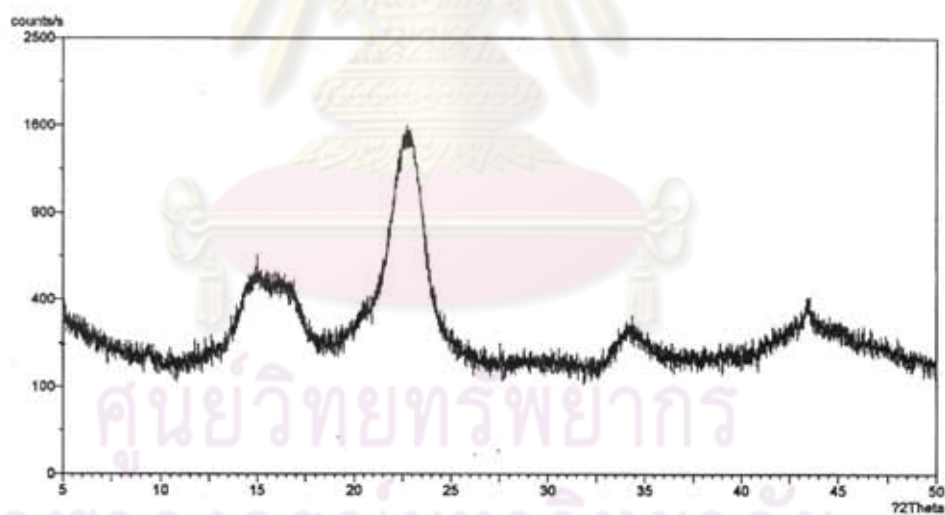
ภาพผนวกที่ 7 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง



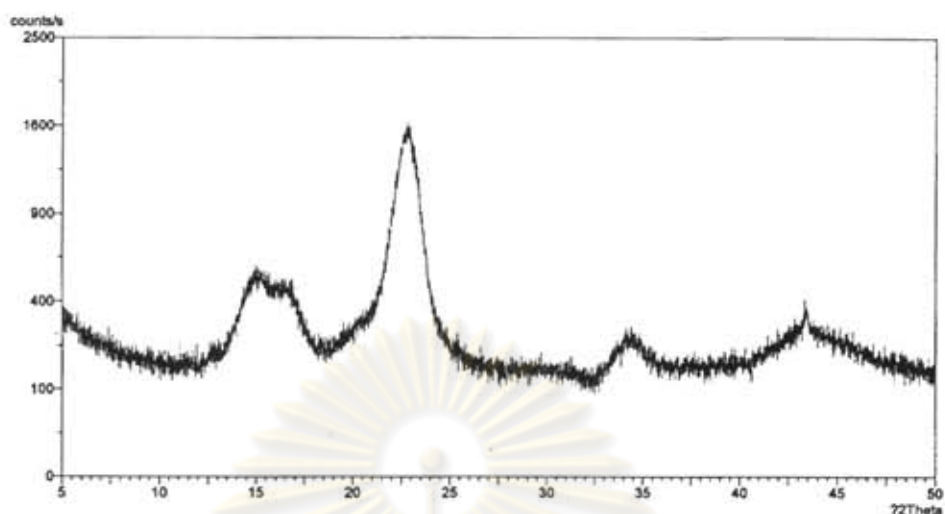
ภาพผนวกที่ 8 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง



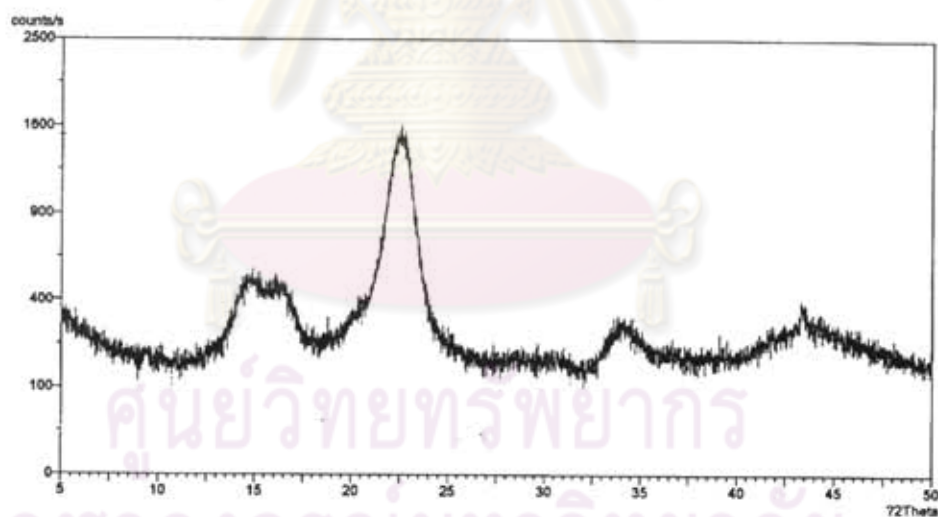
ภาพผนวกที่ 9 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง



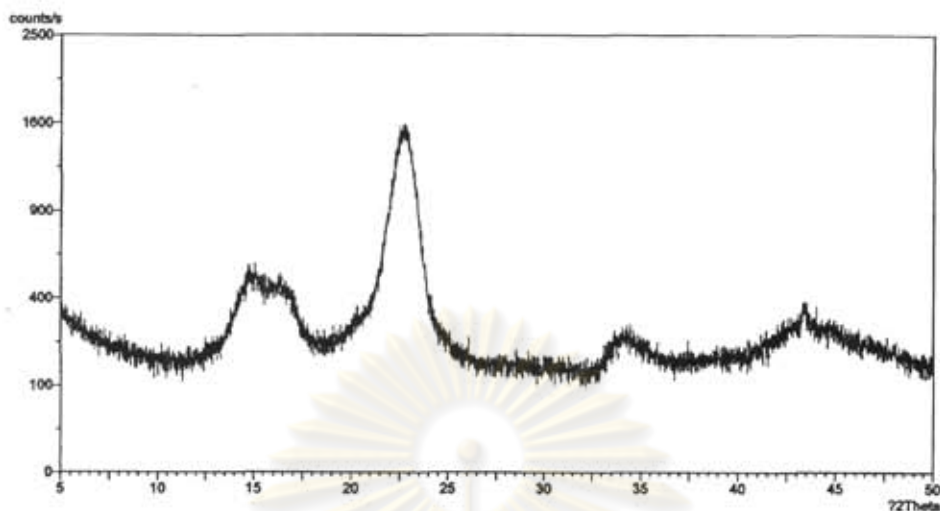
ภาพผนวกที่ 10 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง



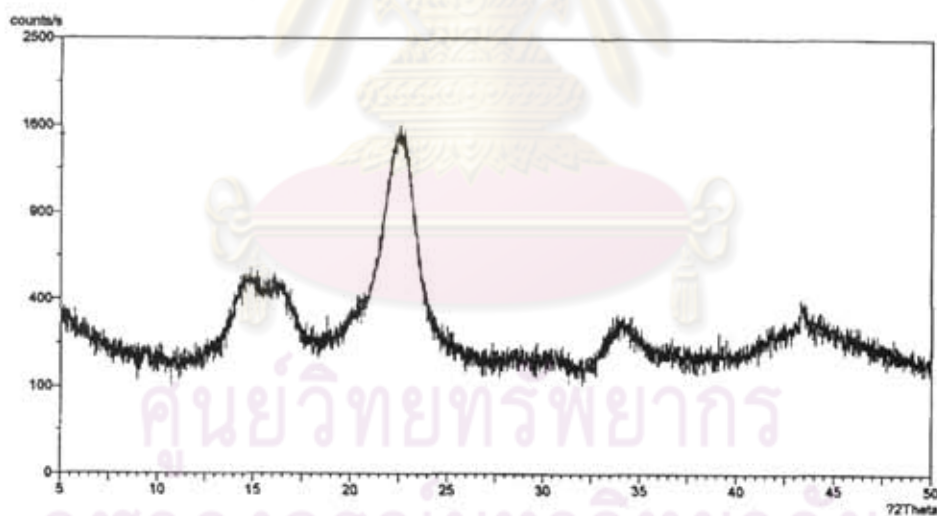
ภาพผนวกที่ 11 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง



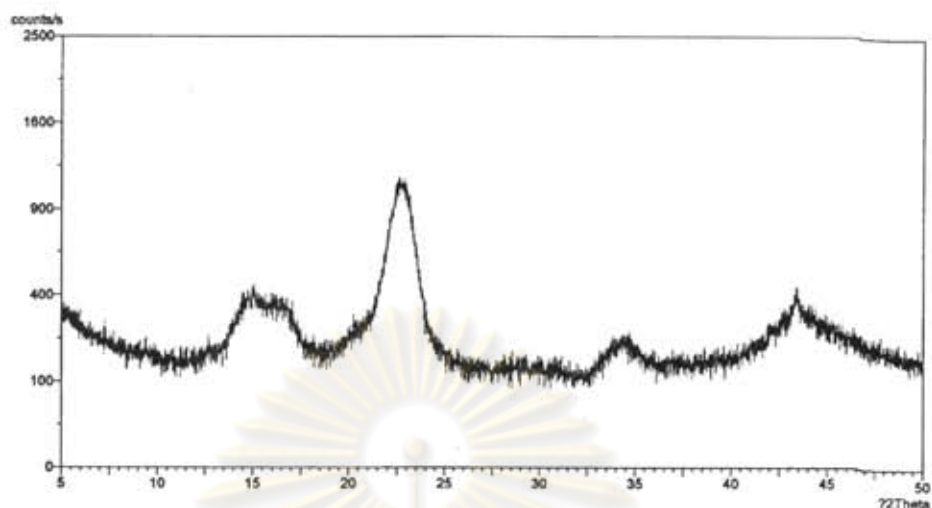
ภาพผนวกที่ 12 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง



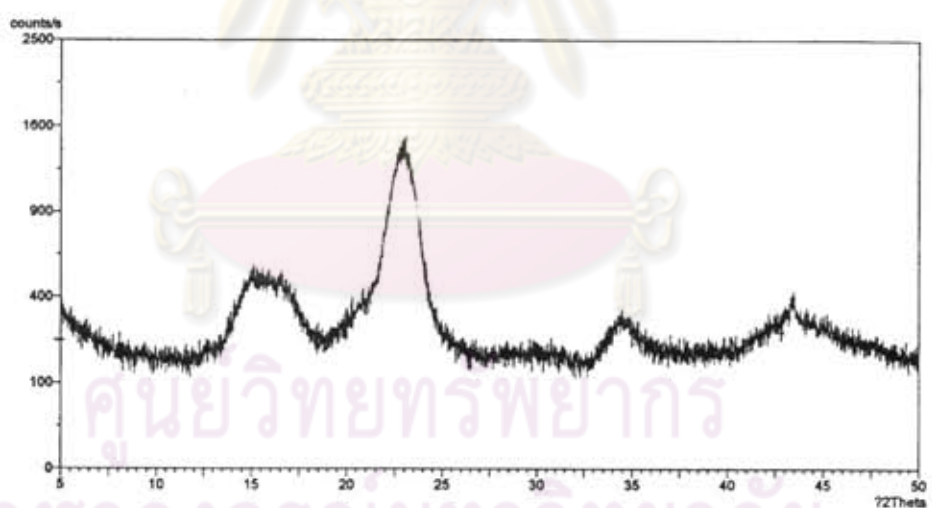
ภาพผนวกที่ 13 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง



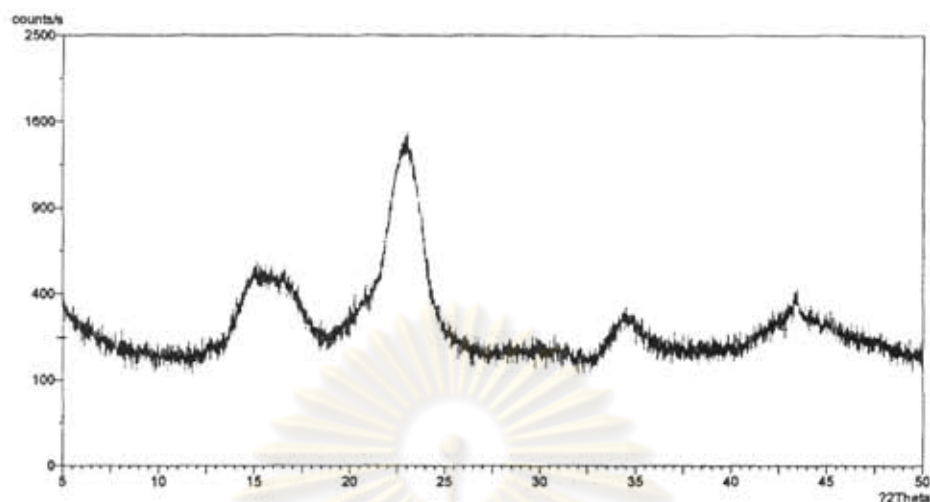
ภาพผนวกที่ 14 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง



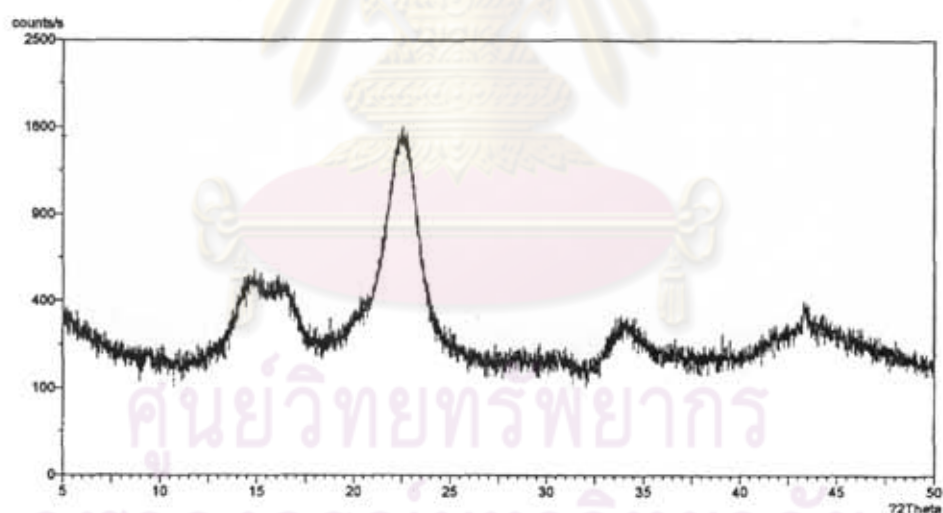
ภาพผนวกที่ 15 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ค่า
ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อุณหภูมิ 120
องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ 16 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ค่า
ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อุณหภูมิ 120
องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ 17 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ 18 XRD pattern ของเส้นใยหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายเส้นใยโดยใช้ด่าง ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง



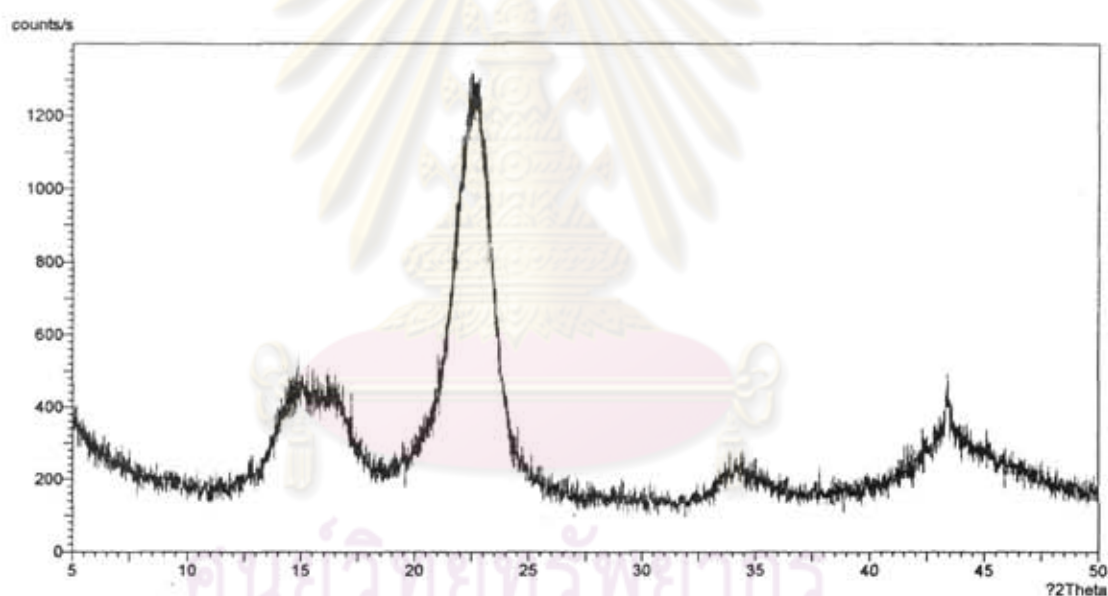
ภาควิชา ก ข

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องศาความเป็นผลึกและขนาดผลึก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบเป็นผลึก

หลังจากการผลิตจุลผลึกเซลลูโลสจากเส้นใยฝ้ายได้แล้วนั้น สิ่งที่จะสามารถนำมาเป็น หลักเกณฑ์ในการบ่งบอกคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้ด้วยกันหลายวิธี และการวิเคราะห์โดยใช้หลัก การทางองค์ประกอบเป็นผลึกก็เป็นอีกหนึ่งหลักการที่นิยมนำมาใช้ในการวัดและเปรียบเทียบ โดย หลักการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบเป็นผลึกของจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้ จะ สามารถทำได้โดยการนำ XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต ได้ (ความสูงของ peak) ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 22.6 ไปคิดเทียบหาความสูงของ XRD pattern ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19.0 ซึ่งที่ตำแหน่ง 19.0 ให้คิดว่าเป็นตำแหน่งแบคกราวนด์ของส่วนที่เป็นอสัณฐาน โดยกราฟ XRD pattern ของจุล ผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) สามารถแสดงได้ในภาพผนวกที่ 19



ภาพผนวกที่ 19 แสดง XRD pattern ของเส้นใยฝ้าย (pure cotton)

1.1 วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบเป็นผลึก

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบเป็นผลึกสามารถหาโดยใช้วิธีคิดของ Nelson and O' Connor (1964.) โดยอ่านค่าความเข้มของ peak (angle peak height) ที่ต้องการจะวิเคราะห์

ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19.0 และ 22.6 หลังจากนั้นจึงนำค่าที่อ่านได้มาทำการเปรียบเทียบเพื่อคำนวณหาองศาความเป็นผลึก โดยสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$\% \text{ องศาความเป็นผลึก} = (I_{002} - I_{am}) / I_{002} \times 100 \quad \dots\dots\dots(1ข)$$

เมื่อ I_{002} คือ ความสูงของ peak ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 22.6

I_{am} คือ ความสูงของ peak ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19.0 (amorphous background)

1.2 ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์องศาความเป็นผลึก

จากตัวอย่างจุดผลึกเซลลูโลสที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม (Avicel PH101) สามารถอ่านค่าความเข้มของ peak ของตัวอย่างจุดผลึกเซลลูโลสที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม (Avicel PH101) ดังในภาพผนวกที่ 1 ได้ดังนี้

ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19.0

ความเข้มของ peak ของจุดผลึกเซลลูโลสมีค่าเท่ากับ 246

ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 22.6

ความเข้มของ peak ของจุดผลึกเซลลูโลสมีค่าเท่ากับ 1,240

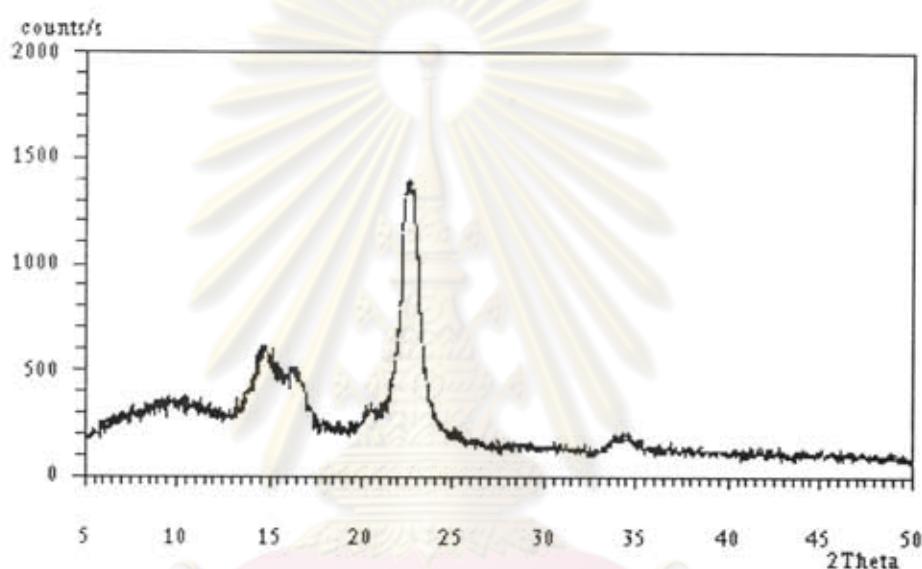
$$\begin{aligned} \% \text{ องศาความเป็นผลึก} &= (1,240-246)/1,240 \times 100 \\ &= 80.16 \end{aligned}$$

เปอร์เซ็นต์องศาความเป็นผลึกของเส้นใยฝ้าย จะมีค่าประมาณ 85.17 เปอร์เซ็นต์

จากสูตรการหาเปอร์เซ็นต์องศาความเป็นผลึกที่ได้แสดงในข้างต้น สามารถนำมาใช้หาเปอร์เซ็นต์องศาความเป็นผลึกของเส้นใยฝ้ายและเปอร์เซ็นต์องศาความเป็นผลึกของจุดผลึกเซลลูโลสได้ในทำนองเดียวกัน และจากการหาองศาความเป็นผลึกจะสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาคุณสมบัติอื่น ๆ ต่อไป

2. การคำนวณหาขนาดผลึก

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้หลักการหาองศาความเป็นผลึกโดยใช้ XRD pattern แล้วยังสามารถนำมาใช้ในการหาขนาดผลึกของจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้ โดยการนำ XRD pattern ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มาหาค่าที่ต้องการและแทนลงในสูตร โดยกราฟ XRD pattern ของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) สามารถแสดงได้ในภาพผนวกที่ 20



ภาพผนวกที่ 20 XRD pattern ของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)

2.1. วิธีการคำนวณหาขนาดผลึก

การคำนวณหาขนาดผลึกสามารถหาโดยใช้การคำนวณของ Scherrer's Equation โดยนำค่าที่อ่านได้มาทำการเปรียบเทียบเพื่อคำนวณหาองศาความเป็นผลึก (Cullity, 2001) โดยสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$D = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta_B} \quad \dots\dots\dots(2ข)$$

เมื่อ D คือ ขนาดผลึก (nm.)

λ คือ ความยาวคลื่น (Å)

B คือ ความกว้างของ peak ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงของ peak

θ_B คือ ตำแหน่งองศาที่เกิด peak ($^{\circ}$)

2.2 ตัวอย่างวิธีการคำนวณ

ในการทดลองจะเลือกใช้เป้า Cu มาใช้ในการทดสอบดังนั้นจะได้ความยาวคลื่น 1.5418 Å และตำแหน่งองศาที่เกิด peak ความเป็นผลึกคือที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 22.6° ฉะนั้น θ จึงมีค่าเท่ากับ 11.3° จากตัวอย่าง XRD pattern ของจุลผลึกเซลลูโลสที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม (Avicel PH101) สามารถนำมาคำนวณหาขนาดผลึกโดยใช้สมการที่กล่าวในข้างต้นได้ดังนี้

ที่ตำแหน่ง ความกว้างของ peak ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงของ peak ความเข้มของ peak ของจุลผลึกเซลลูโลสมีค่าเท่ากับ 246

$$\begin{aligned} \text{ขนาดผลึก} &= (0.9 \times 1.5418) / (1.35 \cos 11.3) \\ &= 0.3369 \text{ nm.} \\ &= 3.37 \text{ \AA} \end{aligned}$$

ขนาดผลึกของจุลผลึกเซลลูโลสที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม (Avicel PH101) จะมีขนาดประมาณ 3.37 Å

จากสูตรการหาขนาดผลึกที่ได้แสดงในข้างต้น สามารถนำมาใช้หาขนาดผลึกของจุลผลึกเซลลูโลสที่ผลิตจากเส้นใยฝ้ายได้ในทำนองเดียวกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

การฟอกขาวของเส้นใยฝ้ายหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยใช้สภาวะเบส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การฟอกขาวของเส้นใยฝ้ายหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายในสภาวะเบส

การดูดกลืนแสงของเยื่อตามปกติจะเกิดกับองค์ประกอบของลิกนินที่ตกค้างอยู่ในเยื่อ โดยปริมาณของลิกนินที่ตกค้างอยู่ภายในเยื่อจะสามารถถูกกำจัดออกจากเยื่อหรือทำให้ลดน้อยลงได้โดยกระบวนการฟอกขาวเยื่อ (bleaching) โดยการฟอกเยื่อยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองวิธีคือการฟอกเยื่อโดยการกำจัดลิกนิน (lignin-removing หรือ delignifying) และการฟอกเยื่อโดยการรักษาลิกนิน (lignin-preserving) การทดลองนี้จะใช้การฟอกเยื่อโดยการกำจัดลิกนิน เนื่องจากการฟอกเยื่อโดยการกำจัดลิกนินจะทำให้เยื่อมีความขาวสว่างสูงและจะได้เยื่อที่มีความขาวสว่างอย่างถาวร โดยวิธีการนี้เหมาะสมกับเยื่อเคมีที่มีการฟอกเยื่อหลาย ๆ ครั้ง โดยสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อจะเป็นสารพวกโซเดียมเปอร์ออกไซด์และ โซเดียมคลอไรด์ เป็นต้น

1. อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

- 1.1 โซเดียมไฮโดรอกไซด์ ผลิตโดยบริษัท APS Ajax มีความบริสุทธิ์ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 1.2 อะซิดิกแอซิด ผลิตโดยบริษัท Merk มีความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 1.3 อ่างที่ควบคุมอุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส

2. ขั้นตอนการเตรียม

- 2.1 นำเส้นใยฝ้ายที่ได้หลังจากการทำปฏิกิริยากับเบสแล้วหนักประมาณ 5 กรัม บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 2.2 เติมน้ำกลั่นลงในขวดรูปชมพู่ จำนวน 320 มิลลิลิตร และเติมกรดอะซิดิกเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตรกับโซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 3 กรัมลงไปด้วยตามลำดับ แล้วใช้ขวดรูปชมพู่ขนาดเล็กกว่าเอาทางหัวลงปิดปากขวดรูปชมพู่ที่ใส่ผงตัวอย่างนั้น หลังจากนั้นจึงนำไปตั้งในอ่างที่ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 70-80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในตู้ดูดควันพิษและมีการเขย่าเป็นระยะจะได้ก๊าซคลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) เกิดขึ้นและมีการทำปฏิกิริยากับลิกนินในเส้นใยตัวอย่าง

2.3 เมื่อครบ 1 ชั่วโมง จะต้องเติมกรดอะซิติกเข้มข้นปริมาตร 1 มิลลิลิตรกับ โซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 3 กรัมตามลำดับ ลงในขวดรูปกรวย และเขย่าขวดเป็นระยะ โดยทำเช่นนี้นาน 1 ชั่วโมง

2.4 เมื่อครบกำหนดเวลา นำขวดรูปชมภูไปแช่ในอ่างน้ำแข็งเพื่อให้ก๊าซพิษที่เกิดขึ้น ลดการฟุ้งกระจายลงเป็นระยะเวลาครึ่งชั่วโมง

2.5 แยกเส้นใยฝ้ายที่ทำการฟอกสีแล้วออกจากสารละลาย หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนหมดกลิ่น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

การหาค่า True Density ของจุดผลึกเซลลูโลสที่ผลิตได้จากเส้นใยฝ้าย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่า True Density ของจุลผลึกเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้จากเส้นใยฝ้าย

จากการทดลองการผลิตจุลผลึกเซลลูโลสจากเส้นใยฝ้าย โดยการนำเส้นใยฝ้ายไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 20-45 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าจะสามารถผลิตจุลผลึกเซลลูโลสที่มีขนาดอนุภาคต่าง ๆ กัน ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์หาค่า True Density ของอนุภาค โดยใช้เครื่อง Ultrapycnometer 1000 (Quantachrome) โดยสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ใช้ก๊าซฮีเลียม (99.99%) อุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ในช่วงระหว่าง 24.8-27.8 องศาเซลเซียสเพื่อนำไปใช้เป็นองค์ประกอบในการตัดสินใจและเพื่อใช้ในการวิเคราะห์อื่น ๆ ต่อไป

ตารางผนวกที่ 1 ค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)

จำนวนครั้งในการทดลอง	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	1.6644
2	1.6730
3	1.6893
4	1.6979
5	1.6938
เฉลี่ย	1.6837

จากการทดลองจะพบว่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.6837 g/cm³ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0143 แสดงดังตารางผนวกที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผนวกที่ 2 ค่าความหนาแน่นของจุดผลึกเซลลูโลสหลังจากนำเส้นใยฝ้ายไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จำนวนครั้งในการทดลอง	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	1.6915
2	1.6802
3	1.7015
4	1.7028
5	1.7051
เฉลี่ย	1.6962

จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของจุดผลึกเซลลูโลส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.6962 g/cm³ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0104 แสดงดังตารางผนวกที่ 2

ตารางผนวกที่ 3 ค่าความหนาแน่นของจุดผลึกเซลลูโลสหลังจากนำเส้นใยฝ้ายหลังจากทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 25 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จำนวนครั้งในการทดลอง	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	1.6831
2	1.6897
3	1.6919
4	1.6963
5	1.7025
เฉลี่ย	1.6927

จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของจุดผลึกเซลลูโลส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.6925 g/cm³ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0073 แสดงดังตารางผนวกที่ 3

ตารางผนวกที่ 4 ค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากนำเส้นใยฝ้ายหลังจากทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5N เป็นระยะเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จำนวนครั้งในการทดลอง	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	1.7392
2	1.7465
3	1.7217
4	1.7224
5	1.7669
เฉลี่ย	1.7393

จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.7393 g/cm³ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0188 แสดงดังตารางผนวกที่ 4

ตารางผนวกที่ 5 ค่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากนำเส้นใยฝ้ายหลังจากทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 35 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จำนวนครั้งในการทดลอง	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	1.7297
2	1.7108
3	1.7078
4	1.7420
5	1.7442
เฉลี่ย	1.7269

จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของจุลผลึกเซลลูโลส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.7269 g/cm³ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0170 แสดงดังตารางผนวกที่ 5

ตารางผนวกที่ 6 ค่าความหนาแน่นของจุดผลึกเซลลูโลสหลังจากนำเส้นใยฝ้ายหลังจากทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 40 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จำนวนครั้งในการทดลอง	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	1.7684
2	1.7820
3	1.7989
4	1.7956
5	1.7846
เฉลี่ย	1.7859

จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของจุดผลึกเซลลูโลส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.7859 g/cm³ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0121 แสดงดังตารางผนวกที่ 6

ตารางผนวกที่ 7 ค่าความหนาแน่นของจุดผลึกเซลลูโลสหลังจากนำเส้นใยฝ้ายหลังจากทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จำนวนครั้งในการทดลอง	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	1.7514
2	1.7711
3	1.7870
4	1.7941
5	1.7801
เฉลี่ย	1.7767

จากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของจุดผลึกเซลลูโลส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.7767 g/cm³ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0165 แสดงดังตารางผนวกที่ 7

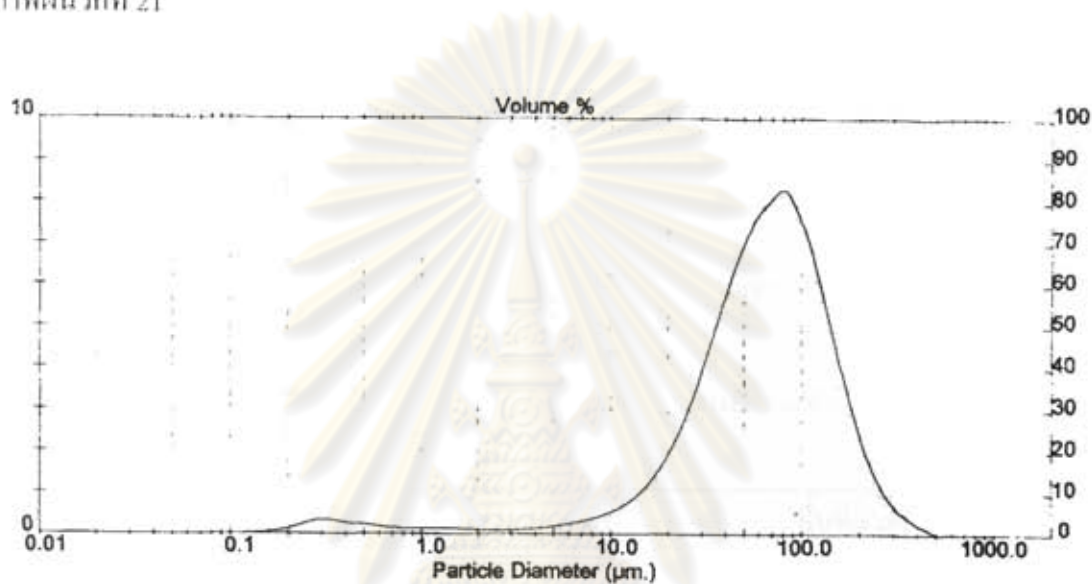


ภาคผนวก จ

การคำนวณหาขนาดของจุดผลึกเซลล์ โลสที่ผลิตได้จากเส้นใยฝ้าย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุลผลึกเซลลูโลสจากเส้นใยฝ้ายที่ผลิตได้ สามารถนำมาหาค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยใช้เครื่อง Particle size Analyzer (Malvern S long bed V.2.11) และใช้น้ำเป็นตัวกลาง จากการวิเคราะห์เมื่อกำหนดค่า true density ที่ได้จากภาคผนวก ง จะสามารถหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ในขณะที่วิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคได้อีกด้วย เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) จะพบว่ารูปแบบการกระจายขนาดอนุภาค (size distribution) สามารถแสดงได้ในภาพผนวกที่ 21

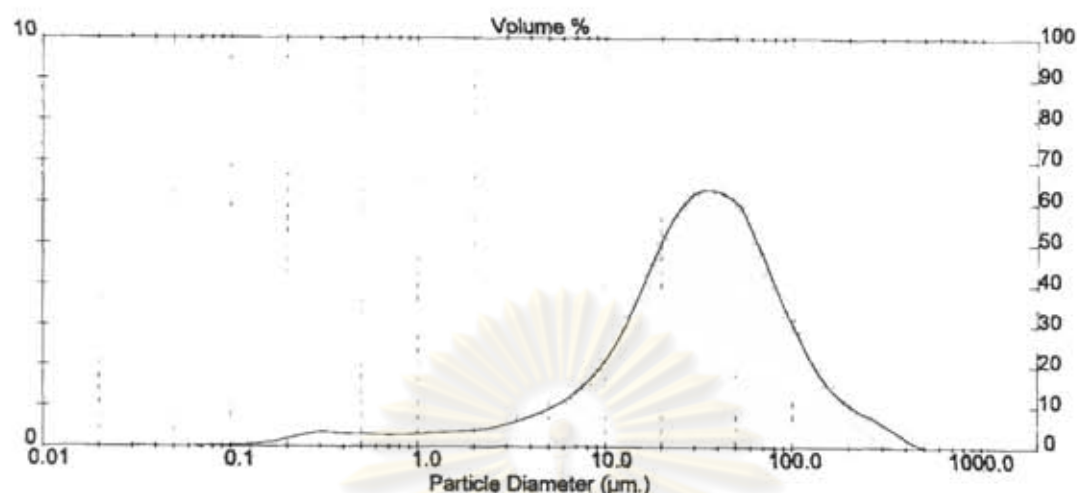


ภาพผนวกที่ 21 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)

ตารางผนวกที่ 8 ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101)

ครั้งที่	ขนาด (μm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)
1	65.58	0.4066
2	68.05	0.3768
3	71.18	0.3858

จากภาคผนวก ง พบว่าจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.6837 g/cm^3 เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลส (Avicel PH101) จะพบว่ามีความเฉลี่ย $68.27 \mu\text{m}$ และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ $0.3897 \text{ m}^2/\text{g}$ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 8

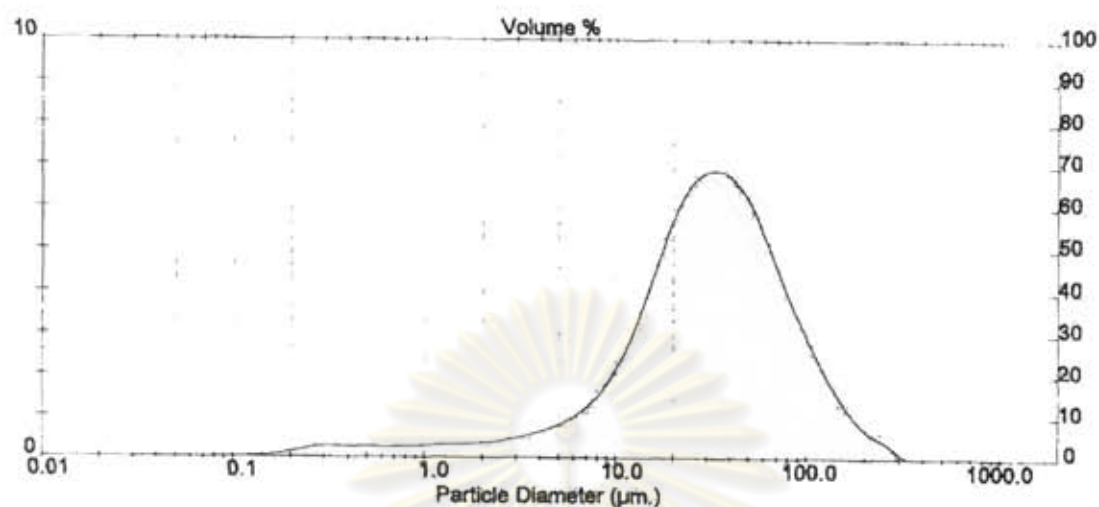


ภาพผนวกที่ 22 การกระจายขนาดอนุภาคของจุดผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 20 นาที

ตารางผนวกที่ 9 ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุดผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 20 นาที

ครั้งที่	ขนาด (μm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)
1	32.50	0.5446
2	34.56	0.5291
3	35.28	0.4867

เส้นใยฝ้ายหลังจากนำมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.6926 g/cm^3 (จากภาคผนวก ง) เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของจุดผลึกเซลลูโลส พบว่าจะได้จุดผลึกเซลลูโลสที่มีขนาดเฉลี่ย $34.11 \mu\text{m}$ ดังแสดงในภาพผนวกที่ 22 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ $0.5201 \text{ m}^2/\text{g}$ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 9

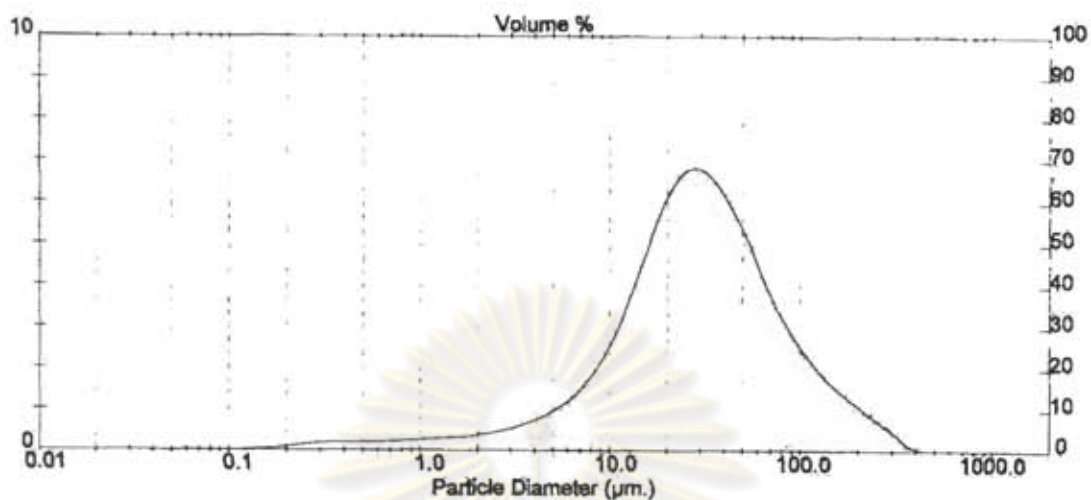


ภาพผนวกที่ 23 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 25 นาที

ตารางผนวกที่ 10 ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 25 นาที

ครั้งที่	ขนาด (μm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)
1	30.65	0.5123
2	31.20	0.5206
3	32.23	0.4962

เส้นใยฝ้ายหลังจากนำมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 25 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.6927 g/cm^3 (จากภาคผนวก ง) เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลส พบว่าจะได้จุลผลึกเซลลูโลสที่มีขนาดเฉลี่ย $31.36 \mu\text{m}$ ดังแสดงดังภาพผนวกที่ 23 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ $0.5097 \text{ m}^2/\text{g}$ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 10

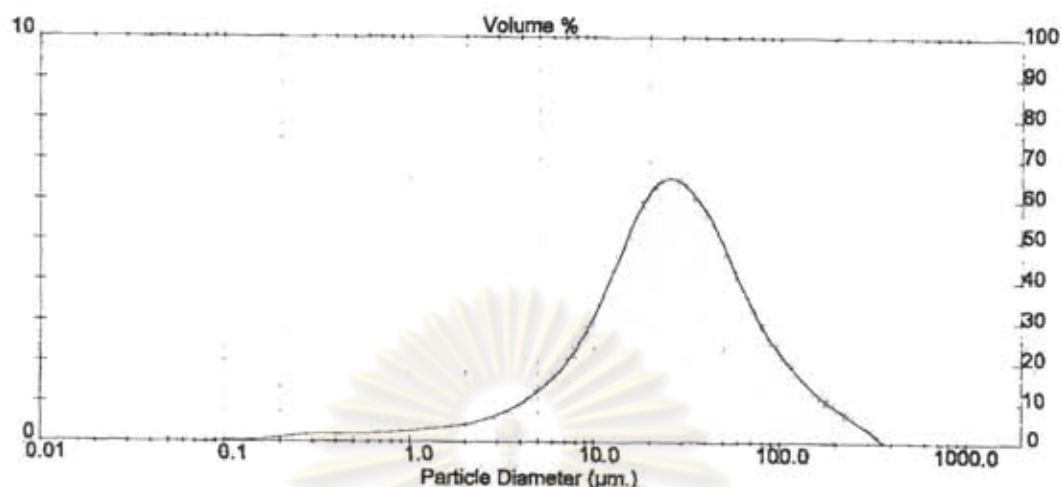


ภาพผนวกที่ 24 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 30 นาที

ตารางผนวกที่ 11 ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 30 นาที

ครั้งที่	ขนาด (μm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)
1	28.64	0.4610
2	28.92	0.4600
3	29.15	0.4674

เส้นใยฝ้ายหลังจากนำมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.7393 g/cm^3 (จากภาคผนวก ง) เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลส พบว่าจะได้จุลผลึกเซลลูโลสที่มีขนาดเฉลี่ย $28.90 \mu\text{m}$ ดังแสดงดังภาพผนวกที่ 24 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ $0.4628 \text{ m}^2/\text{g}$ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 11

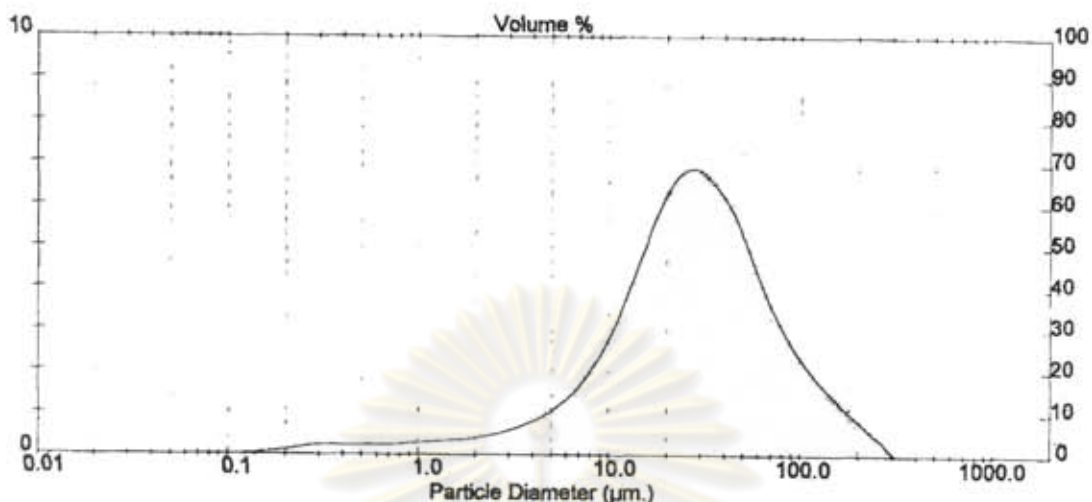


ภาพผนวกที่ 25 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 35 นาที

ตารางผนวกที่ 12 ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 35 นาที

ครั้งที่	ขนาด (μm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)
1	24.84	0.5259
2	25.47	0.4955
3	25.72	0.5078

เส้นใยฝ้ายหลังจากนำมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 35 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.7269 g/cm^3 (จากภาคผนวก ง) เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลส พบว่าจะได้จุลผลึกเซลลูโลสที่มีขนาดเฉลี่ย $25.34 \mu\text{m}$ ดังแสดงดังภาพผนวกที่ 25 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ $0.5097 \text{ m}^2/\text{g}$ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 12

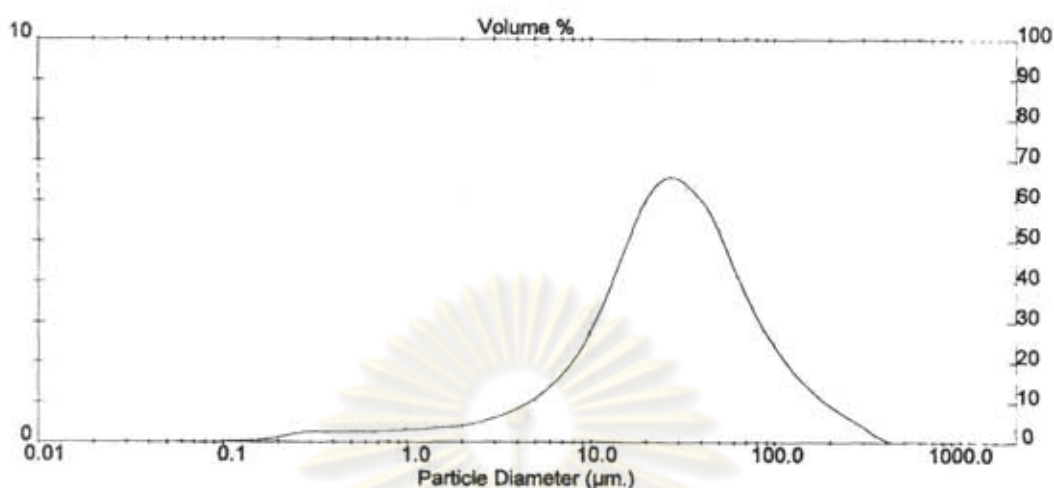


ภาพผนวกที่ 26 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 40 นาที

ตารางผนวกที่ 13 ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 40 นาที

ครั้งที่	ขนาด (μm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)
1	26.61	0.5169
2	27.06	0.5155
3	27.23	0.5048

เส้นใยฝ้ายหลังจากนำมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 40 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.7859 g/cm³ (จากภาคผนวก ง) เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลส พบว่าจะได้จุลผลึกเซลลูโลสที่มีขนาดเฉลี่ย 26.97 μm ดังแสดงดังภาพผนวกที่ 26 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 0.5124 m²/g ดังแสดงในตารางผนวกที่ 13



ภาพผนวกที่ 27 การกระจายขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 45 นาที

ตารางผนวกที่ 14 ขนาดและพื้นที่ผิวจำเพาะของจุลผลึกเซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยา 45 นาที

ครั้งที่	ขนาด (μm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)
1	26.54	0.5756
2	26.69	0.5527
3	27.45	0.5370

เส้นใยฝ้ายหลังจากนำมาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.5 โมลาร์เป็นระยะเวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.7767 g/cm³ (จากภาคผนวก ง) เมื่อทำการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของจุลผลึกเซลลูโลส พบว่าจะได้จุลผลึกเซลลูโลสที่มีขนาดเฉลี่ย 26.89 μm ดังแสดงดังภาพผนวกที่ 27 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 0.5551 m²/g ดังแสดงในตารางผนวกที่ 14