

# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การพัฒนาการผลิตตัวดูดซับที่มีรูพรุนรูปทรงกลมจากสารประกอบเซลลูโลสสู่  
ระดับโรงงานต้นแบบเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยาและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

Pilot Scale Development of the Porous Spherical Cellulose Production for  
Pharmaceutical and Petrochemical Industries

โดย

ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันชะพานิชกุล และคณะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน  
ประจำปีงบประมาณ 2547

ชื่อโครงการย่อย                      การพัฒนาการผลิตตัวดูดซับที่มีรูพรุนรูปทรงกลมจากสารประกอบ  
เซลลูโลสสู่ระดับโรงงานต้นแบบ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยา และ  
อุตสาหกรรมปิโตรเคมี  
Pilot Scale Development of the Porous Spherical Cellulose Production  
for Pharmaceutical and Petrochemical Industries

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  
นิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่

เลขทะเบียน 013594

วัน, เดือน, ปี 16 พ.ค. 51

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการผลิตตัวดูดซับรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจากผลผลิตทางการเกษตรกรรม โดยใช้ขานอ้อยซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกษตรกรรมที่หาได้ง่ายและมีราคาถูกในประเทศไทย โดยเลือกจากขานอ้อย ฟ้าย หรือ เขื่อกระดาษ เพื่อใช้ทดแทน Sephadex G-25 ซึ่งเป็นวัสดุรูปทรงกลมที่มีรูพรุนที่ผลิตจากสารประกอบของเซลลูโลส (Bead Cellulose) เป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ที่ผลิตโดยกรรมวิธีการผลิตจาก Viscose ทุก ๆ อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม และมีรูพรุนที่สม่ำเสมอ โดยนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายประการ ได้แก่ วัสดุรองรับทางกายภาพ วัสดุสำหรับกระบวนการโครมาโตกราฟี วัสดุสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ วัสดุสำหรับดูดซับโลหะ (Metal Chelating Metal) ตัวดูดซับทางเคมี (Chemisorbances) ตัวดูดซับที่มีสัมพันธภาพ (Affinity Absorbents) ดูดจับเอนไซม์ (Immobilized Enzymes) ซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาสูงมาก โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยในการผลิตจะนำวัตถุดิบทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% โดยน้ำหนัก พร้อมกับให้ความร้อน 50 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วเติม CS<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ได้ Cellulose Xanthate จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางที่อุณหภูมิ 4 °C จะได้ Viscose ซึ่งจะนำไปเตรียมเป็นสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า ความหนาแน่นของอนุภาค พื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนมีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ Viscose ลดลง เมื่อเปรียบเทียบวัตถุดิบพบว่าผลิตภัณฑ์จากเขื่อกระดาษมีพื้นที่ผิวมากที่สุด ความหนาแน่นของอนุภาคผลิตภัณฑ์ที่มีค่าใกล้เคียงกับ Sephadex G-25 มากที่สุดคือในตัวอย่างการทดลองที่ 2 โดยมีค่า 1.48 g/cc ในขณะที่ความหนาแน่นของ Sephadex G-25 มีค่า 1.42 g/cc ผลิตภัณฑ์ผลิตในตัวอย่างการทดลองที่ 1 มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุน คือ 0.007 m<sup>2</sup>/g และ 0.00667 cc/g ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับ Sephadex G-25 ที่มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุน คือ 0.001 m<sup>2</sup>/g และ 0.00649 cc/g ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยมีการกระจายขนาดของอนุภาคที่กว้างกว่า Sephadex G-25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Abstract

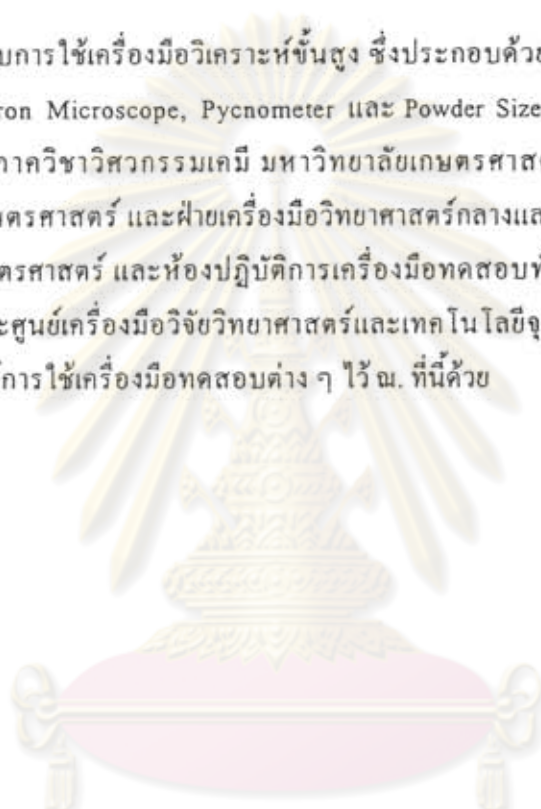
The purpose of this research is to produce the new material (micro porous spherical cellulose beads) obtained from agricultural waste products such as bagasse, cotton and paper pulp. At present, Thailand import micro-porous spherical cellulose beads from oversea (Sephadex G-25) used as physical supports, chromatographic materials, ion exchangers, metal chelating adsorbents, chemisorbent, affinity adsorbents and immobilized enzymes. In this experiment we choose bagasse, cotton, and paper pulp, which having the cellulose complex. There are also the waste products from sugar, textile and pulp paper industries in Thailand. The waste material are mixed with excess NaOH 17.5 w/v and heating at 50 °C for 5 hours. Pure CS<sub>2</sub> and dilute solution of NaOH were added to form sodium cellulose xanthate or viscose in the room temperature. Sodium cellulose xanthate is mixed with starch and diluted by water. After that, the sodium cellulose xanthate is stirred in mineral oil until the size of solution of sodium cellulose xanthate particle is very small. When the small particle disperse in mineral oil, slowly pour HCl 2 N solution, very small micro-porous spherical cellulose beads suddenly appear in the solution. From experiment, density, pore volume and surface area of product particle depend on concentration of viscose. The product particles have the true density close to sephadex G-25 and also the aerated bulk density and packed bulk density is the product from experimental sample 2. The value of true density is 1.48 g/cc and sephadex G-25 is 1.42 g/cc. Product from experimental sample 1 has the value of pore volume and surface area 0.007 m<sup>3</sup>/g and 0.00667 cc/g respectively. That is close to sephadex G-25 which are 0.001 m<sup>3</sup>/g and 0.00649 cc/g respectively. Product particles have the size distribution wider than sephadex G-25.

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชนของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนาคต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2546 และ 2547  
ทุนเมธีวิจัยอาวุโส (ศ.ดร.วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

สำหรับการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง ซึ่งประกอบด้วยเครื่อง Atomic Absorption, Scanning Electron Microscope, Pycnometer และ Powder Size Analyzer ฯลฯ ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์กลางและสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และห้องปฏิบัติการเครื่องมือทดสอบทั่วไป ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติและศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือทดสอบต่าง ๆ ไว้ ณ. ที่นี้ด้วย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย	3
วัตถุประสงค์	3
ขอบเขตการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	4
เชลลูโลส	4
เฮมิเชลลูโลส	18
ลิกนิน	19
สารแทรก	20
โครงสร้างเส้นใยเชลลูโลส	20
การกระจายตัวของส่วนประกอบภายในเส้นใยเชลลูโลส	24
ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	24
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วัตถุดิบและสารเคมี	35
วิธีการวิจัย	36
ผลและวิจารณ์	42
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	62
สรุปผลการวิจัย	62
ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยต่อ	64
เอกสารอ้างอิง	65

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของเซลลูโลส	15
2	แหล่งที่พบเซลลูโลสตามธรรมชาติ	16
3	องค์ประกอบโดยรวมของฝ้าย หวายบางชนิด และไม้จำพวกสน	23
4	สรุปการเตรียมตัวอย่างการทดลอง	41
5	Angle of Repose และ Angle of Spatula	42
6	ความหนาแน่นและ Compressibility ทดลอง	44
7	Uniformity และ Degree of Flowability	46
8	Angle of Fall, Angle of Difference, Dispersibility และ Degree of Floodability	47
9	ขนาดของอนุภาค โดยเฉลี่ย ปริมาตรของรูพรุน และ พื้นที่ผิวของอนุภาค	50
10	ปริมาณของซิลิคอนและเหล็กในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมของอนุภาค	51

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1	4
2	5
3	6
4	7
5	7
6	8
7	9
8	10
9	10
10	11
11	11
12	19
13	21
14	22
15	23



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	Phase Diagram ของ Seiner	28
17	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 1	51
18	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 2	52
19	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 3	53
20	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 4	54
21	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 5	55
22	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 6	56
23	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับ Sephadex G-25	57
24	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM ของอนุภาคผลิตภัณฑ์และ Sephadex G-25	58
25	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM แสดงลักษณะของพื้นผิว สำหรับอนุภาคผลิตภัณฑ์ และSephadex G-25	60

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การผลิตตัวดูดซับรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจากสารประกอบของเซลลูโลสเพื่อใช้ ในอุตสาหกรรมยาและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

### Production of the Porous Spherical Cellulose for Pharmaceutical and Petrochemical Industries

#### คำนำ

ปัจจุบันสารดูดซับที่มีรูพรุนที่ใช้กันอยู่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงจึงมีความพยายามในการผลิตสารดูดซับที่มีรูพรุนจากสารประกอบของเซลลูโลสเพื่อทดแทนการนำเข้า จึงมีแนวทางในการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตสารดูดซับที่มีรูพรุนเพื่อลดต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องมีกระบวนการดูดซับในระหว่างการผลิต ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมที่ใช้ประโยชน์จากสารดูดซับที่มีรูพรุน อาทิเช่น กระบวนการเอนไซม์หรือ Protein Adsorbance การกำจัดอนุภาคโลหะหนักในน้ำเสีย หรือใช้เป็นตัวรองรับเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิว แล้วนำไปใช้ในปฏิกิริยาเคมีที่ต้องสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

การผลิตสารที่มีรูพรุนจากเซลลูโลสซึ่งมีทั้งแบบเซลล์ปิดหรือเซลล์เปิด วิธีการที่ได้รับความนิยมและให้ผลดีที่สุดคือ วิธี Solvent Precipitation รูพรุนที่ได้จะมีทั้งขนาดเล็กระดับอองสตรอม คือ  $10^8$  cm. จนถึงขนาดเล็กระดับ Micron โพลีเมอร์ที่ใช้เตรียมตัวดูดซับที่มีรูพรุนอาจใช้ได้ทั้งเทอร์โมพลาสติกหรือเทอร์โมเซตติง ตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการ Solvent Precipitation เป็นสารที่สามารถละลายโพลีเมอร์ได้และมี Non-solvent ซึ่งเป็นสารที่ไม่ละลายโพลีเมอร์ที่เป็นสารตั้งต้น แต่ละลายได้ในสารละลาย หลักการสำคัญของกระบวนการ Solvent Precipitation คือการผสมกันของสารตั้งต้นทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วนำสารละลายที่ได้หยดลงในของเหลวที่ละลายส่วนของ Non-solvent ออก สารละลายที่หยดลงไป จะกลายเป็นของแข็งรูปทรงกลมและมีรูพรุน จากนั้นจึงนำไปทำให้แห้งจะได้เม็ด Beads ของแข็งรูปทรงกลมที่มีรูพรุน จากนั้นจึงนำไปทดลอง การไหลของของเหลวผ่านเม็ด Bead ความหนาแน่น ทดสอบความพรุนและหาขนาดของรูพรุน จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

โพลีเมอร์ที่ใช้เตรียมวัสดุรูปทรงกลมที่มีรูพรุนที่จะศึกษาในการวิจัยครั้งนี้จะสนใจโพลีเมอร์ที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลสเป็นหลักโดยอาจจะเป็น Sodium Cellulose Xanthate หรือ Cellulose Acetate Xanthate โดยนำโพลีเมอร์ดังกล่าวผสมกับสารละลายเบสเช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับ Soluble Starch หรือแป้งมันสำปะหลังจากนั้นจะทำให้อยู่ในรูปของอนุภาคขนาดเล็กในน้ำมัน Mineral Oil และขึ้นรูปด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเพื่อสกัด Soluble Starch หรือแป้งมันสำปะหลังออก และทำให้กลายเป็นของแข็งที่มีรูพรุน แล้วนำไปล้างด้วยน้ำและเอทานอล เพื่อกำจัดกรดออกไปและล้างด้วยนอลมอลเฮกเซน เพื่อกำจัดน้ำมัน Mineral Oil ออกไป แล้วนำเม็ด Beads ที่ได้ไปอบแห้ง แล้วจึงนำไปทดสอบหาคุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

งานวิจัยนี้เกิดจากความต้องการ ในการลดการนำเข้าวัสดุรูปทรงกลมที่มีรูพรุน (Porous Spherical Beads) จากต่างประเทศซึ่งจำเป็นต้องใช้ในกระบวนการดูดซับ งานวิจัยนี้จึงมีส่วนช่วยในการพัฒนาการผลิตทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมยาซึ่งใช้เป็น Medicine Loading (ตัวรองรับ) ทั้งในด้านการค้นคว้าเพื่อพัฒนาวัสดุที่ใช้และช่วยลดต้นทุนในการผลิตทางอุตสาหกรรมอันเป็นการลดการนำเข้าวัสดุรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจากต่างประเทศ



คุนยวิทยทรพยากร  
จุพาลงกรณ์มหาวิทยาฬย

## วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาการผลิตสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กรูปทรงกลม จากสารประกอบของเซลลูโลสจากระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ไปสู่ระดับโรงงานต้นแบบ
2. สร้างชุดทดลองเป็นอุปกรณ์ผลิตสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กรูปทรงกลมจากสารประกอบของเซลลูโลสในระดับ โรงงานต้นแบบ
3. ทดสอบการผลิตจริงของสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กรูปทรงกลมจากสารประกอบของเซลลูโลสที่ผลิตได้เทียบกับมาตรฐาน
4. ทดสอบการใช้งานจริงของสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กรูปทรงกลมจากสารประกอบของเซลลูโลสที่ผลิตได้เทียบกับมาตรฐาน

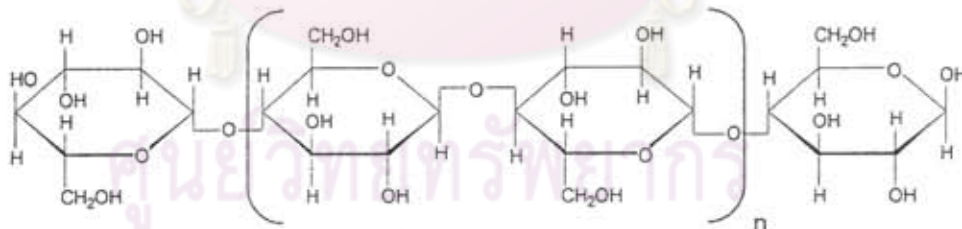
### ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการสร้างประกอบชุดเพื่อใช้ผลิตสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กรูปทรงกลมจากสารประกอบของเซลลูโลสในระดับอุตสาหกรรม และ ทดสอบสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กรูปทรงกลมจากสารประกอบของเซลลูโลสที่ผลิตได้เทียบกับมาตรฐานในการนำสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กรูปทรงกลมจากสารประกอบของเซลลูโลสไปใช้งานจริง เช่น ทดลองใช้ในกระบวนการ Adsorption ทดลองใช้ เช่น การสร้างเครื่องมือชนิด Agitator เพื่อใช้ในการขึ้นรูปสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กรูปทรงกลมจากสารประกอบของเซลลูโลสในอุปกรณ์ของโรงงานต้นแบบ

## การตรวจเอกสาร

### เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักที่มีความสำคัญที่สุดในพืช โดยจะมีประมาณ 40-50% ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช เส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจัดเป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยธาตุหลัก คือ คาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% ในธรรมชาติไม่เคยพบว่ามีเซลลูโลสบริสุทธิ์อยู่ โดยเซลลูโลสที่พบในธรรมชาติจะมีการปะปนไปด้วยสารประเภทลิกนิน เพกติน หรือซีลิ่งด้วยเสมอและมีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยขั้นพื้นฐานซึ่งเรียกว่า anhydro-D-glucose ( $C_6H_{10}O_5$ ) ต่อกันเป็นสายโซ่โมเลกุลยาวแสดงดังภาพที่ 1 โดยในแต่ละหน่วยของกลูโคสจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน (เป็น primary-group 1 หมู่ และ secondary group 2 หมู่) ซึ่งจะเหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาลทั่วไป แต่เนื่องจากโมเลกุลต่อกันยาวเป็นสายโซ่ที่ยาว จึงทำให้ไม่ละลายน้ำเหมือนกับที่เกิดกับน้ำตาล โครงสร้างทางเคมีนี้นับว่ามีบทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการกำหนดสมบัติของเส้นใย กล่าวคือ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จะเป็นตัวดึงดูดน้ำ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี ลักษณะการเรียงตัวเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาวทำให้มีความแข็งแรงสูงตามไปด้วย นอกจากนั้นแล้วในโครงสร้างบริเวณที่เป็นการต่อกันของธาตุ -C-O-C- จะเป็นบริเวณที่ถูกทำลายได้ด้วยผลจากการเกิดออกซิเดชัน หรือจากการถูกทำลายด้วยสภาพภูมิอากาศ ทำให้โมเลกุลยาวขาดลง กลายเป็นส่วนเล็ก ๆ คล้ายน้ำตาลและสลายกลายเป็นอาหารของพืชและสัตว์ต่อไป



ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลส

ถึงแม้เส้นใยเซลลูโลสในธรรมชาติมีอยู่มากมายหลายชนิดก็ตาม แต่เนื่องจากทุกชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีในหน่วยย่อยที่เหมือนกันคือน้ำตาลกลูโคส ดังนั้นจึงทำให้สมบัติของเซลลูโลสเหมือนกัน

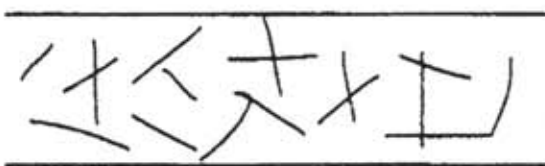
สมบัติต่าง ๆ ของเซลลูโลสในธรรมชาติ

1. เซลลูโลสเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -(1,4) glycosidic linkage
2. เซลลูโลสเกิดจากการประกอบกันด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดเดียว คือ กลูโคส
3. เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูง 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 2 คือ บริเวณที่โพลีเมอร์เรียงตัวชิดกัน สายโมเลกุลจะยึดตรงเรียงขนานทำให้มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลน้อย พันธะเคมีที่ยึดระหว่างโมเลกุลด้านข้างเกิดขึ้นได้มาก ส่วนในบริเวณที่โพลีเมอร์มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเรียกว่าบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (amorphous region) แสดงดังภาพที่ 3 โพลีเมอร์จะเรียงตัวระเกะระกะ สายโพลีเมอร์อาจบิดตัวโค้งงอหรือพาดทับไปบนอีกโพลีเมอร์ ทำให้เกิดมีที่ว่างระหว่างโมเลกุลมากกว่าแบบที่เป็นระเบียบ พันธะเคมีที่ยึดจับด้านข้างของโมเลกุลก็จะมีน้อยกว่า บริเวณดังกล่าวจะทำให้เส้นใยมีการยึดตัวได้และส่วนที่เป็นอสัณฐานนี้ถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าบริเวณที่เป็นผลึก (มณฑา, 2542)



ภาพที่ 2 การเรียงตัวของโซ่โมเลกุลที่เรียงตัวเป็นระเบียบและมีทิศทางขนานไปตามแกนของเส้นใย  
ที่มา: นवलแซ (2542)



ภาพที่ 3 การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลค้ำหรือเรียงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (low orientation หรือ amorphous)

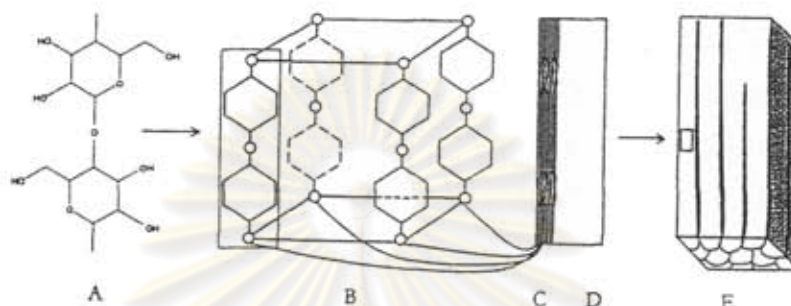
ที่มา: นवल แซ (2542)

คำว่าเซลลูโลสบริสุทธิ์ เป็นการเรียกเซลลูโลสชนิดแอลฟาเซลลูโลส ( $\alpha$ -cellulose) คือเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ส่วนเซลลูโลสชนิดเบต้าเซลลูโลส ( $\beta$ -cellulose) และแกรมม่าเซลลูโลส ( $\gamma$ -cellulose) จะไม่ใช่เซลลูโลสที่บริสุทธิ์โดยเบต้าเซลลูโลสนั้นเป็นส่วนของอัลฟาเซลลูโลสที่ถูกทำให้ห้องสภาวะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันซึ่งเบต้าเซลลูโลสสามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% แต่ตกตะกอนในสภาพที่เป็นกรด ส่วนแกรมม่าเซลลูโลสสามารถละลายได้ในทุกสภาพความเป็นกรดและด่าง และถูกคิดว่าเป็นส่วนของเฮมิเซลลูโลส เช่น ไซแลน (xylans) แมนแนน (mannans) และ กาลแลคแทน (galactans) เป็นต้น

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

## 1. โครงสร้างทางกายภาพ

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเซลลูโลสเกิดจากการรวมตัวกันของหน่วยซ้ำของเซลโลไบโอสยูนิต และเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4-glycosidic แสดงดังภาพที่ 4

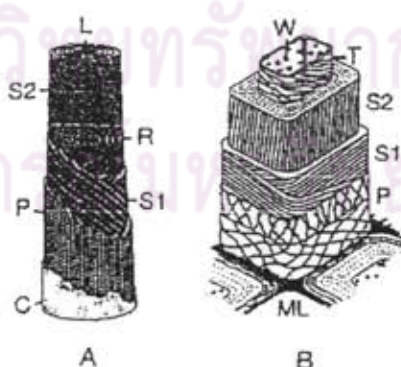


ภาพที่ 4 เซลโลไบโอสยูนิต (A) ยูนิตเซลขนาดใหญ่ (B) รูปแบบส่วนที่เป็นผลึก (C) ส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐานปะปนกันอยู่ในไมโครไฟบริล (D) ไฟบริล (E)

ที่มา: Luukkonen (2001)

### 1.1 โครงสร้างเส้นใยของเซลลูโลส (Klemm, 1998)

เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบประมาณ 90% ของเส้นใยฝ้าย แต่มีอยู่ประมาณ 45% ในผนังเซลล์ของไม้บางชนิด โครงสร้างทางโมเลกุลของเซลลูโลสในฝ้ายและไม้คล้ายกันมาก เส้นใยของฝ้ายเป็นอิสระต่อกันแต่เส้นใยของไม้มีโครงสร้างเป็น 3 มิติ แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 รูปร่างลักษณะของเส้นใยฝ้าย (A) และรูปร่างลักษณะของไม้จำพวกสน (B)

ที่มา: Klemm (1998)

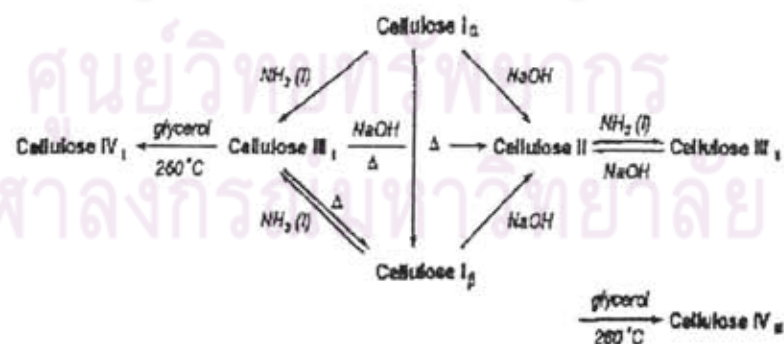


## 1.2 โครงสร้างผลึก

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

## 1.3 รูปร่างของเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ

เซลลูโลสในปัจจุบันสามารถแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกออกได้เป็น 4 รูปแบบ คือ เซลลูโลส I, II, III และ IV โดยเซลลูโลส II สามารถเตรียมได้โดยการคกตะกอนของเซลลูโลสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นประมาณ 17-20% โดยกระบวนการนี้จะเรียกว่ากระบวนการเมอร์เซอร์ไรเซชัน (mercerization process) โดยกระบวนการเมอร์เซอร์ไรเซชันจะเป็นกระบวนการที่ใช้เปลี่ยนรูปแบบของเซลลูโลส I กลายเป็นเซลลูโลส II โดยปกติทั่วไปกระบวนการนี้จะไม่ผันกลับแสดงดังภาพที่ 6



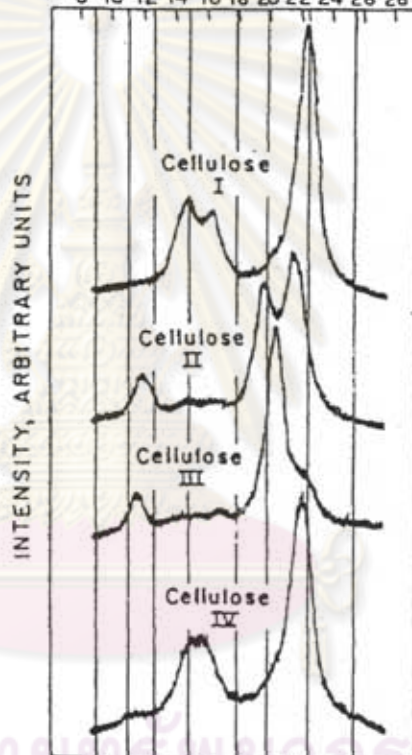
ภาพที่ 6 การเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสในรูปแบบต่าง ๆ

ที่มา: Klemm (1998)

องศาของความเป็นผลึกสามารถหาได้โดยใช้การกระจายของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) สำหรับเซลลูโลสในธรรมชาติจะมีองศาความเป็นผลึกประมาณ 70% สำหรับเมอร์เซอร์ไรต์เซลลูโลส (mercerized cellulose) จะมีค่าประมาณ 50% สำหรับรีเจนเนอเรทเซลลูโลส (regenerated cellulose) จะมีค่าประมาณ 40% ในส่วนที่เป็นอสัณฐานในโมเลกุลของเซลลูโลสจะถูกวัดออกมาในรูปของแบล็คกาวด์ของการวัดการกระจายของรังสีเอ็กซ์ รูปแบบของความเป็นผลึกของเซลลูโลสทั้ง 4 ชนิด แสดงดังภาพที่ 7

DIFFRACTOMETER ANGLE,  $2\theta$  DEGREES

8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28



INTERPLANAR DISTANCE, ÅNGSTROM

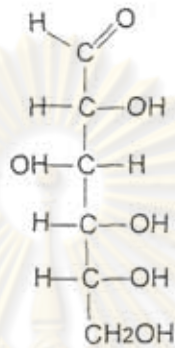
10 8 7 6 5 4.5 4 3.5

ภาพที่ 7 รูปแบบความเป็นผลึกของเซลลูโลสทั้ง 4 ชนิดจากเครื่อง XRD.

ที่มา: O'Connor (1972)

## 2. โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

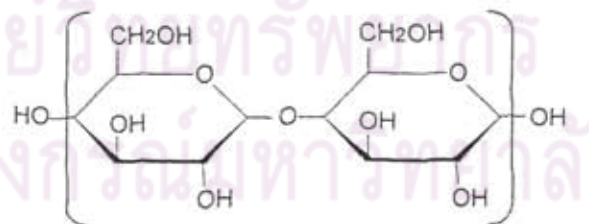
หน่วยพื้นฐานของเซลลูโลส คือ โมโนแซ็กคาไรด์ (mono-saccharine) D-glucose ที่มีสูตรทางเคมี  $C_6H_{12}O_6$  สามารถแสดงสูตรโครงสร้างของ Fischer ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 สูตรโครงสร้างแบบ Fischer ของน้ำตาล D-Glucose

### 2.1 โมโนเมอร์ยูนิตของเซลลูโลส

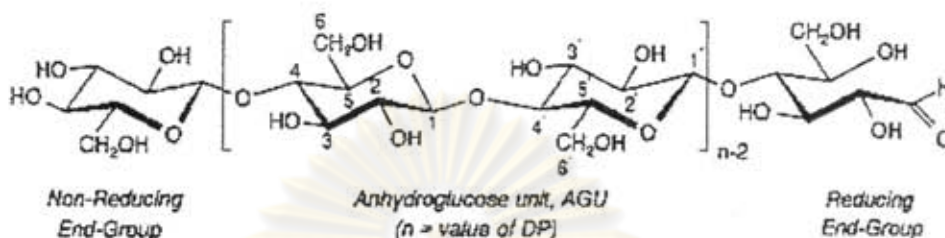
จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าโมเลกุลของเซลลูโลสจะเกิดจากหน่วยโมเลกุลซ้ำ (repeat unit) ยึดจับกันเป็นสายยาว หน่วยโมเลกุลที่ซ้ำกันคือ เซลโลไบโอส (cellulobiose) จะเกิดจากเบต้ากลูโคส 2 โมเลกุลยึดเกาะกันด้วยพันธะ  $-C-O-C-$  แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 โครงสร้างหน่วยโมเลกุลซ้ำของเซลโลไบโอส

ที่มา: Nissan (1986)

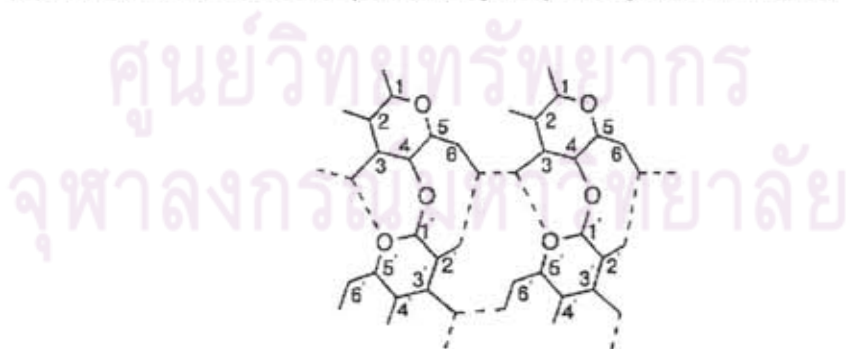
เซลลูโลสเป็นโฮโมพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ไม่มีกิ่งก้านสาขา โดยเกิดจากการรวมกันของ D-glucopyranose โดยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4-glycosidic ดังนั้นจึงรวมเรียกว่า แอนไฮโดรกลูโคส ยูนิท (anhydroglucose unit; AGU) แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลสโดยแสดงการจัดเรียงตัวเป็นแบบแกวี่  
ที่มา: Klemm (1998)

## 2.2 พันธะไฮโดรเจน

พันธะไฮโดรเจนภายในเซลลูโลสจะมีการจับพันธะกันได้สองรูปแบบ 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) กับกลูโคสยูนิทที่อยู่ถัดไป ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 พันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลส I หรือเนทีฟเซลลูโลส  
ที่มา: Klemm (1998)

### 3. คุณสมบัติการกระจายตัว (Nissan, 1986)

#### 3.1 คุณสมบัติการดูดซับ (adsorption)

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

#### 3.2 การพองตัว (swelling)

การพองตัวของเซลลูโลสโดยน้ำและสารอื่น ๆ จะลดความเป็นผลึกและจะไปเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงได้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งเป็นแฟคเตอร์ที่มีความสำคัญมากในการเข้าไปทำปฏิกิริยาเคมีหรือการเสื่อมสภาพของเซลลูโลส

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

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

สารที่สามารถทำให้เซลลูโลสเกิดการพองตัวมีหลายชนิดได้แก่ สารอัลคาไลโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกลืออนินทรีย์ต่าง ๆ เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก กรดฟอสฟอริก และสารละลายเกลือของโลหะ ความสามารถในการทำให้เซลลูโลสเกิดการพองตัวของสารจำพวกอัลคาไล มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกลับของประจุบวก คือ  $Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$

### 3.3 ความสามารถในการละลาย

เนื่องจากเซลลูโลสเป็นสารประกอบโพลีเมอร์ที่มีขั้ว อีกทั้งยังมีลักษณะ โครงสร้างภายในเป็นผลึก จึงเป็นการยากที่จะหาตัวทำละลายที่เหมาะสมในการละลายสารประกอบเซลลูโลส

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

จากทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic) สำหรับปฏิกิริยาต่าง ๆ หรือความสามารถในการละลายจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพลังงานอิสระ (Gibb free energy,  $\Delta G_{diss}$ ) ของการละลายจะต้องมีค่าเป็นลบ แต่จากสมการ  $\Delta H_{diss}$  มีค่าเป็นบวกและมีค่าที่สูงมากและ  $\Delta S_{diss}$  มีค่าเป็นบวกและมีค่าต่ำ ดังนั้น  $\Delta G_{diss}$  โดยทั่วไปจึงมีค่าออกมาเป็นบวกสำหรับน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ดังนั้นเซลลูโลสจึงไม่สามารถละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์

อัลคาไลไฮดรอกไซด์ใช้เป็นตัวทำละลายเซลลูโลสได้ดี นิยามของ อัลฟ่าเซลลูโลส คือ เซลลูโลสที่สามารถละลายได้ในสารละลายโซดาไฟเข้มข้น 17.5 % เนื่องจากความสามารถในการละลายของเซลลูโลสขึ้นอยู่กับประจุเมื่ออยู่ในน้ำ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลง ดังนั้นความสามารถในการละลายของอัลคาไลเซลลูโลสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลงที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ลำดับประสิทธิภาพของสารประกอบไฮดรอกไซด์ คือ  $LiOH < NaOH < (CH_3)_4NOH$

เซลลูโลสอาจจะละลายได้ด้วยการกระจายโดยตรงซึ่งเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงไปเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลส เช่น ไนเตรต อะซิเตด หรือ Xanthate และละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม การกระจายโดยตรงเกี่ยวข้องกับขั้นตอนลำดับการทำปฏิกิริยาระหว่างผลึกบนส่วนอัดแน่น ติดตามด้วยการแทรกผ่านภายนอกผลึกพองตัวอย่างไม่จำกัดและละลายในที่สุด

### 3.4 การทำให้เสื่อมสภาพ

ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ด้วยกรด ขึ้นอยู่กับขอบเขตในส่วนผลึก หรือส่วนอสัณฐาน รวมทั้งความเข้มข้นของกรด ชนิดของกรด และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ความว่องไวของเซลลูโลสต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยมากแล้วจะประเมินจากความสามารถในการเข้าถึงได้ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น กรดแก่ เอนไซม์ชนิดพิเศษ หรือ จุลินทรีย์ (microorganism) การสัมผัสได้โดยตรงในทางกายภาพระหว่างสารเข้าทำปฏิกิริยาเหล่านี้กับเซลลูโลสเป็นสิ่งแรกที่ต้องการของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เนื่องจากเซลลูโลสเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำและมีโครงสร้างที่ซับซ้อน การสัมผัสกันของสารที่เข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสนั้นเกิดขึ้นได้เฉพาะการแพร่

### 4. สมบัติทางกายภาพ

ถึงแม้เซลลูโลสในธรรมชาติจะมีอยู่อย่างมากมายหลายชนิดในธรรมชาติ แต่เนื่องจากทุกชนิดจะมีองค์ประกอบทางเคมีในหน่วยย่อยที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงทำให้สมบัติของเซลลูโลสในธรรมชาติมีความคล้ายคลึงกัน โดยสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 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 ( $J/g^{\circ}C$ )	1.22
จุดไหม้ไฟ ( $^{\circ}C$ )	>290
พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ (kJ/g)	17.43
ค่าคงที่ของฉนวนไฟฟ้า	
เยื่อกระดาษแบบแผ่น	2.2-2.6
ส่วนของผลึก	5.7
ค่าความเป็นฉนวน ( $kV/cm$ )	$2 \times 10^4$

ที่มา: Nissan (1986)

### ประโยชน์และแหล่งที่พบของเซลลูโลส

ด้วยปริมาณที่มีมากมายของเซลลูโลสที่เกิดขึ้นในธรรมชาติตลอดเวลานั้นมีเพียงปริมาณเล็กน้อยเท่านั้นที่นำไปใช้ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อมนุษย์ เซลลูโลสที่พบอยู่ในธรรมชาติจะอยู่ในรูปแบบของอาหารและธัญพืช และใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือเครื่องแต่งบ้าน เป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์สำหรับผลิตเป็นกระดาษหรือสิ่งทอ และอนุพันธ์ของเซลลูโลส ซึ่งใช้อย่างกว้างขวางในการผลิต



กาว สารเพิ่มความเหนียวชั้น ฟิล์ม ฟอยล์ และพลาสติก แหล่งธรรมชาติของเซลลูโลสแสดงดัง ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แหล่งที่พบเซลลูโลสตามธรรมชาติ

แหล่งตามธรรมชาติ	ปริมาณร้อยละของเซลลูโลส	ส่วนของพืชที่พบเซลลูโลส
ชานอ้อย	38	ต้นอ้อย
ไม้ไผ่	40-50	ลำต้น
ใยฝ้าย	94	
ต้นฝ้าย	75	เยื่อชั้นในของเปลือกไม้
ต้นป่าน	77	เยื่อชั้นในของเปลือกไม้
ปอ	63	เยื่อชั้นในของเปลือกไม้
นุ่น	75	เส้นใยหุ้มเมล็ด
ป่านรามี่	73	เยื่อชั้นในของเปลือกไม้
ต้นอ้อ	40-50	ลำต้นและใบ
เยื่อไม้เหนียว	75	เส้นใยจากใย
ฟางข้าว	40-50	ลำต้น
ไม้ เช่น ต้นสน	50	ลำต้นและกิ่ง
เปลือกไม้		

การผลิตเซลลูโลสเพื่อการค้าจะสนใจพืชที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงมากเช่นฝ้าย ประโยชน์หลักที่เซลลูโลสถูกนำมาใช้คือเป็นเส้นใย และกระดาษ เซลลูโลสถูกใช้ผลิตเป็นกระดาษมากกว่าใช้เป็นเส้นใย กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษถูกออกแบบเพื่อกำจัดสารลิกนิน ซึ่งไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตและเป็นส่วนประกอบ 25% ของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนที่น้ำหนักแห้งและ 25% -เฮมิเซลลูโลส วิธีการผลิตเยื่อกระดาษมีทั้งกึ่งเชิงกล กึ่งเคมี หรือ กรรมวิธีทางเคมี

การผลิตเยื่อกระดาษแบบกึ่งเชิงกลนั้น ไม่ถูกทำปฏิกิริยากับสารละลายซัลไฟต์ ไบซัลไฟต์ หรือไบคาร์บอเนต เพื่อให้ส่วนของลิกนินอ่อนนุ่มลง ไม้ที่เตรียมนำไปทำปฏิกิริยาจะถูกย่อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ ในขั้นตอนการรีไฟน์นิ่ง เพื่อกำจัด ลิกนินที่ถูกทำให้อ่อนนุ่มลง และจะได้เซลลูโลสบริสุทธิ์ การผลิตเยื่อกระดาษแบบกึ่งเคมีก็คล้ายกัน แต่ใช้เวลาในการย่อยนานกว่า และสารละลายที่ใช้ย่อยมีความเข้มข้นมากกว่า กระบวนการย่อยและละลายบางส่วนของเซลลูโลส ผลที่ได้จะน้อยลงคือ 70-80% ของผลผลิตทั้งหมด

กระดาษที่ถูกผลิตขึ้นโดยวิธีทางเคมีซึ่งใช้สารเคมีละลายและกำจัดลิกนินออกทั้งหมด ผลที่ได้จะน้อยกว่าวิธีการผลิตแบบอื่นร้อยละ 50 แต่อย่างไรก็ตามวิธีการผลิตกระดาษแบบนี้จะทำให้ได้กระดาษสำหรับเขียนและพิมพ์ที่มีคุณภาพสูงสุด กระบวนการสกัดด้วยโซดา ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 25% ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 2.4% เป็นสารที่ใช้สกัด ในขณะที่วิธีการสกัดด้วยซัลไฟต์ใช้ส่วนผสมของแคลเซียมไดไฮโดรเจนซัลไฟต์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) การผลิตกระดาษด้วยวิธีซัลเฟตใช้การรวมกันของโซดาไฟ โซเดียม คาร์บอเนต และโซเดียมโมโนซัลเฟต หลังจากการย่อยด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งเยื่อของไม้ถูกกำจัดออกจากเครื่องย่อย และเยื่อกระดาษได้ถูกทำให้บริสุทธิ์ด้วยการกรองและการล้าง กระดาษที่ไม่ได้ฟอกขาวผลิตได้แบบนี้โดยตรง แต่การผลิตกระดาษที่ละเอียดกว่า เยื่อกระดาษจะต้องถูกฟอกขาวโดยคลอรีน-ไฮโปคลอไรต์ คลอรีน-ไดออกไซด์ และ/หรือ การสกัดด้วยอัลคาไลโดยทั่วไปกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษโดยวิธีซัลเฟตจะได้เยื่อกระดาษที่มีสีเข้มกว่าวิธีการผลิตโดยใช้ซัลไฟต์ ดังนั้นการต้องการการฟอกขาวหลายขั้นตอนจะใช้การสกัดด้วยอัลคาไล เพื่อให้ได้เยื่อกระดาษที่มีความขาวสูง

โดยทั่วไปแล้วเซลลูโลสจากผืนเซลทูตียภูมิมีจำนวนของหน่วยกลูโคสต่อโมเลกุลของเซลลูโลสมากกว่าเซลลูโลสจากผืนเซลชันปรัมภูมิและไม้เนื้อแข็งมีจำนวนของหน่วยกลูโคสต่อโมเลกุลของเซลลูโลสมากกว่าไม้เนื้ออ่อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายเซลลูโลส โดยเซลลูโลสเกิดจากการประกอบกันด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดเดียว คือ กลูโคส แต่เฮมิเซลลูโลสจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส (mannose) ไซโลส (xylose) อะราบินโนส (arabinose) รวมทั้งกรดกลูโคโนิก (glucuronic acid) และกรดกาแลกทูโรนิก (galacturonic) คำว่าเฮมิเซลลูโลสเริ่มปรากฏในปี ค.ศ. 1891 เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยรวมอยู่กับสารชนิดอื่น เช่น ลิกนิน และเซลลูโลส โดยเฮมิเซลลูโลสจะพบมากในแกลบ ชังข้าวโพค เฮกโซแซน (hexosan)

องค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสในไม้เนื้อแข็ง (hardwoods) และไม้เนื้ออ่อน (softwoods) จะมีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อย โดยในไม้เนื้อแข็ง เช่น จำพวกสนจะพบเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นตัวหลักคือกลูโคโนไซแลน (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

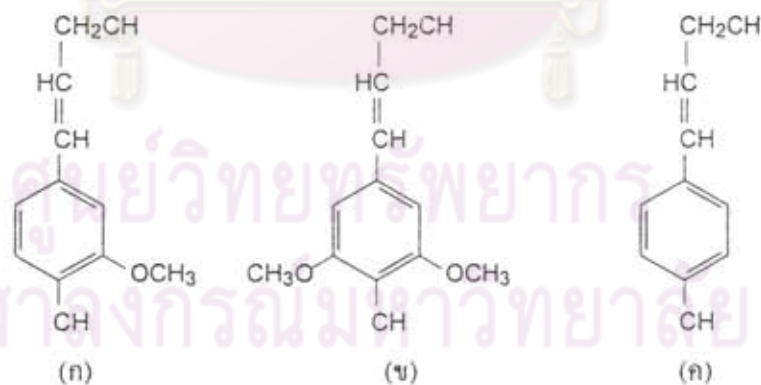
เฮมิเซลลูโลสมีคุณสมบัติทั่ว ๆ ไปดังนี้คือ

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

## ลิกนิน

ลิกนินเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญในองค์ประกอบของพืชที่พบในธรรมชาติ โดยในพืชแต่ละชนิดจะพบปริมาณของลิกนินแตกต่างกัน โดยลิกนินในพืชที่พบอยู่โดยทั่วไปจะมีปริมาณอยู่ในช่วง 10-30% ลิกนินเป็นโพลิเมอร์ที่เกิดจากการดีไฮโดรจีเนชันของฟีนิลโพรเพน (phenylpropanes) และมีโครงสร้างเป็นแบบ 3 มิติ (Berggren, 2003) โดยทั่วไปลิกนินจะไม่ละลายในน้ำ แต่จะสามารถละลายในกรดได้เล็กน้อย และจะสามารถละลายได้ดีในสถานะที่เป็นด่าง อีกทั้งยังสามารถถูกออกซิไดซ์ได้ในบรรยากาศ เนื่องจากลิกนินไม่มีสมบัติทางการยึดหยุ่น จึงทำให้ต้นไม้หรือพืชที่มีปริมาณลิกนินมากจะมีความแข็งแรงมากตามไปด้วย ลิกนินในไม้เนื้ออ่อนประกอบด้วย guaiacyl units เกิดจากกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันของ trans-coniferyl alcohol ดังแสดงในภาพที่ 12 (ก) ลิกนินในไม้เนื้อแข็งประกอบด้วย guaiacyl และ syringyl units เกิดจากกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันของ trans-coniferyl และ trans-sinapyl alcohol ดังแสดงในรูปที่ (ข) ส่วนลิกนินในหญ้าประกอบด้วย P-hydroxyphenyl units เกิดจากกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันของ trans-P-coumaryl alcohol ดังแสดงในรูปที่ (ค) (David, 2001)

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



ภาพที่ 12 สูตรโครงสร้างทางเคมีของลิกนินที่พบในธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด  
ที่มา: David (2001)

ลิกนินเป็นส่วนที่ป้องกันเซลลูโลสไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่าย โดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์และจะทำหน้าที่ห่อหุ้มและเชื่อมต่อบริเวณระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้ยึดติดกัน ทั้งลิกนินและสารแทรกในต้นไม้สามารถที่จะกำจัดหรือย่อยได้ในสัตว์ ลิกนิน มีส่วนร่วมในการฟอร์มรูปร่างกับเฮมิเซลลูโลสในบางกรณี

### สารแทรก

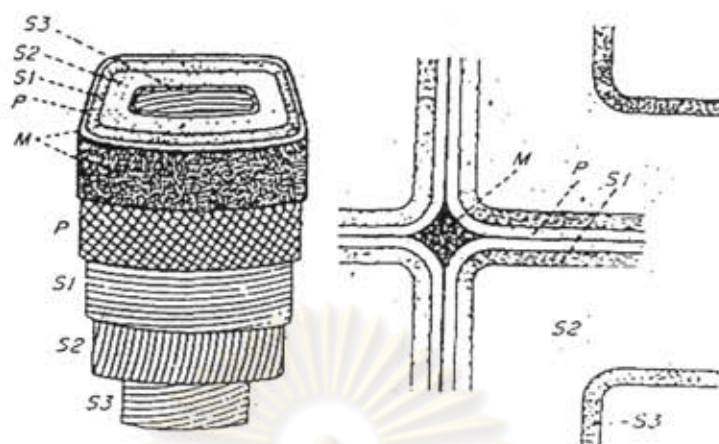
สารแทรกในพืช ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์มากมายหลายชนิด ซึ่งสามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่เป็นกลางเช่น อะซิโตน อีเธอร์ เมทานอล เอทานอล เบนซีน และน้ำ องค์ประกอบของสารแทรกจะแตกต่างกันไปในพืชที่แตกต่างกัน (different wood species) หรือแม้แต่ในพืชชนิดเดียวกัน แต่คนละส่วนกันก็จะมีองค์ประกอบของสารแทรกที่แตกต่างกันไปโดยสารแทรกในไม้สามารถแบ่งออกได้เป็น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

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

สารแทรกในโครงสร้างของเส้นใยต่าง ๆ ได้แสดงถึงการลดลงของความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเส้นใยของเซลลูโลสในผนังของเส้นใยโดยการ ใช้กรดแก่ และเบสแก่ ดังนั้นในก่อนการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะต้องทำการสกัดหรือแยกสารแทรกออกก่อน เพื่อให้สารเคมีสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์

### โครงสร้างของเส้นใยของเซลลูโลส (Structure of Cellulose Fiber)

เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบประมาณ 90% ของเส้นใยฝ้าย แต่มีอยู่ประมาณ 45% ในผนังเซลล์ของไม้บางชนิด โครงสร้างทางโมเลกุลของเซลลูโลสในฝ้ายและไม้คล้ายกันมาก เส้นใยของฝ้ายเป็นอิสระต่อกันแต่เส้นใยของไม้มีโครงสร้างเป็น 3 มิติดังภาพที่ 13



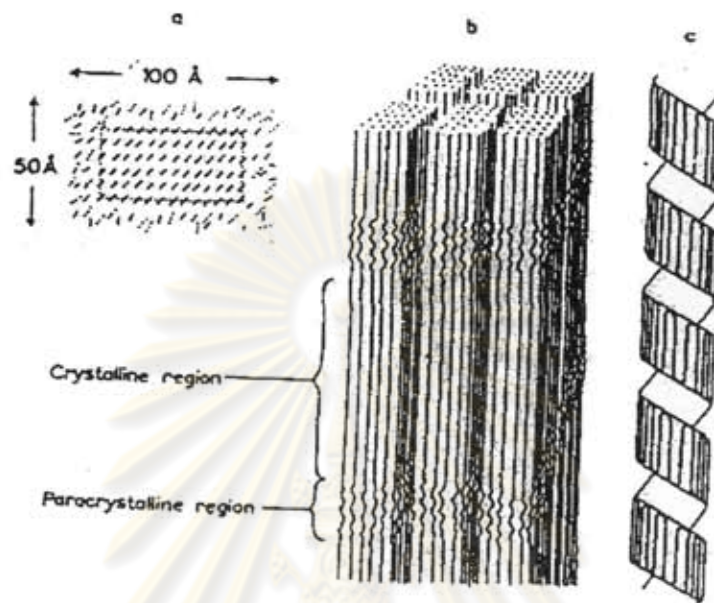
ภาพที่ 13 ชั้นของผนังเซลล์ของไม้ ชั้น M เป็นชั้นกลาง ถัดมาเป็นผนังชั้นปฐมภูมิ (Primary Walls, P) ผนังชั้นทุติยภูมิ (Secondary Walls) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนนอก (S1) ส่วนกลาง (S2) และส่วนใน (S3)

ทั้งฝ้ายและไม้ในเส้นใย จะมีผนังชั้นปฐมภูมิบาง ๆ ซึ่งล้อมรอบด้วยผนังชั้นทุติยภูมิที่หนา กว่า ทั้งไม้และฝ้ายจะมีผนังชั้นทุติยภูมิที่ประกอบไปด้วยเนื้อเยื่อ 3 ส่วน เรียกว่า S1 S2 และ S3 ชั้นเนื้อเยื่อ S2 มีความหนาที่ไม่แน่นอน แต่มักเป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ของสารในผนังเซลล์ โมเลกุลของเซลลูโลสในชั้นเนื้อเยื่อ S1 และ S3 มีลักษณะเป็นเส้นแบนขดเป็นเกลียวเมื่อเทียบกับแกนของเส้นใย ในขณะที่เนื้อเยื่อชั้น S2 ตั้งขนานกับแกนของเส้นใย ในฝ้าย เนื้อเยื่อชั้น S2 ตั้งในลำดับของวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางร่วมกัน โดยจำนวนของเนื้อเยื่อชั้น S2 นั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเจริญเติบโตของเส้นใย

ในเนื้อเยื่อแต่ละส่วนของผนังชั้นทุติยภูมิ เซลลูโลสและส่วนประกอบอื่นของผนังเซลล์ถูกรวมตัวกันเป็นลักษณะมัดที่ยาวและบางเรียกว่าไมโครไฟบริว แต่ละไมโครไฟบริว โมเลกุลของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงมีพันธะไฮโดรเจนเชื่อมต่อกันทางด้านข้าง บริเวณที่มีความขนานกันมาก โมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เรียกว่าส่วนโครงสร้างผลึก และส่วนที่มีความเป็นระเบียบน้อยกว่าเรียกว่าส่วนอสัณฐาน ดังแสดงในภาพที่ 14 และ 15

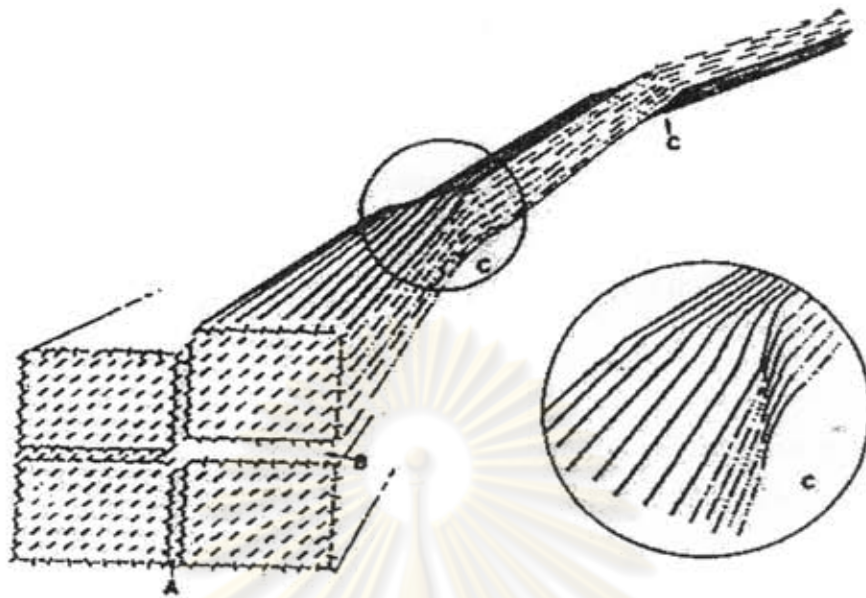
จากภาพที่ 14a แสดงส่วนของ Micro-fibril ที่มีพื้นที่หน้าตัดประมาณ  $50 \times 100$  อังสตรอม และประกอบด้วยส่วนของแกนที่เป็นผลึก (Crystalline Core) มีความเป็นระเบียบสูงล้อมรอบด้วยส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งในฝ้ายมีโมเลกุลของเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ แต่ในไม้ประกอบด้วยเฮมิ

เซลลูโลสและโมเลกุลของลิกนิน องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลสในธรรมชาติชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3



ภาพที่ 4 โครงสร้างของไมโครไฟบริล (a) แสดงให้เห็นว่าไมโครไฟบริลประกอบด้วยแกนที่เป็นโครงสร้างผลึกเป็นสี่เหลี่ยมล้อมรอบด้วยส่วนอสัณฐาน (b) แสดงลักษณะของไมโครไฟบริล อีก รูปแบบหนึ่งที่ประกอบด้วยเซลลูโลส 15 ถึง 40 โมเลกุลที่รวมกันเป็นส่วนโครงสร้างผลึกและ ส่วนอสัณฐาน (c) เซลลูโลสโมเลกุลพับตัวเป็นเกลียวเป็นลักษณะของโบว์หมุ่นในลักษณะเกลียวขวา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 15 (A) พื้นที่ส่วนที่ประสานกันของส่วนที่เป็นโครงสร้างหลัก (B) พื้นที่ส่วนที่มีความไม่  
เป็นระเบียบเพียงเล็กน้อย (C) พื้นที่ส่วนที่มีการบิดเป็นเกลียว

ตารางที่ 3 องค์ประกอบโดยรวมของฝ้าย หวายบางชนิด และไม้จำพวกสน

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนัก		
	ฝ้าย	หวาย	ต้นสน
ไฮโดรเซลลูโลส	94.0	77.6	70.7
เซลลูโลส	89.0	44.9	46.1
โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส	5.0	32.7	24.6
ลิกนิน	0.0	19.3	26.3
โปรตีน	1.3	0.5	0.2
เถ้า	1.2	0.3	0.3
สารประกอบอื่น ๆ	2.5	2.3	2.5



### การกระจายตัวของส่วนประกอบภายในเส้นใยเซลลูโลส

ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับสารเคมีรวมทั้งเอนไซม์ถูกประเมินจากส่วนต่าง ๆ ของผนังเซลล์ที่มีการกระจายตัวและความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ของผนังเซลล์ ผนังเซลล์ชั้นทุติยภูมิของเส้นใยฝ้ายประกอบด้วยส่วนโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสอย่างมากเกือบทั้งหมดของเฮมิเซลลูโลสและสารประกอบอื่น ๆ อยู่ในส่วนของเปลือกชั้นนอกและเนื้อเยื่อผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ

ในทางตรงกันข้ามสำหรับไม้ สารที่ไม่ใช่สารประกอบเซลลูโลสมีอยู่ทั้งหมดในเขตของผนังเซลล์จากส่วนช่องกลางตรงกลางเส้นใย (Lumen) ไปจนถึงส่วนประกอบในชั้นกลาง เซลลูโลสมีอยู่มากที่สุดในผนังเซลล์ชั้นทุติยภูมิ มีสารประกอบจำพวกเกลือแร่กระจายอยู่ในทุกส่วนของเนื้อเยื่อผนังเซลล์ในเส้นใยของทั้งไม้และฝ้าย

เฮมิเซลลูโลสและลิกนินมีอยู่รอบ ๆ เซลลูโลสในส่วนของไมโครไฟบริลลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสอยู่ระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสในส่วนอสังฐาน

### ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเซลลูโลส

ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของสารประกอบเซลลูโลส ที่นำมาประเมินหาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับสารที่ประกอบด้วย ; 1) ความชื้นในเส้นใย 2) ขนาด และความสามารถในการแพร่ของโมเลกุลของสารที่มีความสัมพันธ์กับขนาด และคุณสมบัติของพื้นที่ผิวของ Capillaries โดยรวม และพื้นที่ระหว่าง Micro-fibril และ โมเลกุลของเซลลูโลสในส่วนอสังฐาน 3) ปริมาณของโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส 4) มิติของหน่วยเซลล์ 5) การจัดเรียงตัวของหน่วยเซลล์ 6) ปริมาณของกลูโคสต่อหนึ่งหน่วยโมเลกุลเซลลูโลส 7) ธรรมชาติของสารที่ทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส และ 8) ความเข้มข้น และการกระจายของหมู่แทนที่

#### 1. ความชื้นของเส้นใย

วัสดุเซลลูโลสถูกปกป้องจากการถูกทำให้เสื่อมสภาพลงด้วยจุลชีพ ครอบงำที่ความชื้นภายในวัสดุเซลลูโลสยังต่ำกว่าระดับวิกฤติ คือ ระดับที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของจุลชีพ สำหรับไม้ความชื้นที่ระดับสูงกว่า 32 % ของน้ำหนักแห้ง สำหรับฝ้ายความชื้นที่ประมาณ 10 % ก็

เพียงพอโดยเทียบสมควรกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80 % ความชื้นจะทำให้เส้นใยเกิดการพองตัวในระดับโมเลกุลของเซลลูโลส ดังนั้นเป็นการเปิดของโครงสร้างที่ละเอียดทำให้สารที่เข้าทำปฏิกิริยามีความสามารถเข้าทำกับปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ ดังนั้นจึงต้องเติมน้ำในขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

2. ขนาดและความสามารถในการแพร่ของโมเลกุลของสารที่มีความสัมพันธ์กับขนาดและคุณสมบัติของพื้นที่ผิวของ Capillaries โดยรวมและพื้นที่ระหว่างไมโครไฟบริล และโมเลกุลของเซลลูโลสในส่วนอสัณฐาน

ความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่ผิวของเส้นใยเซลลูโลสถูกนิยามโดยขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติของพื้นที่ผิวในระดับจุลภาคและระดับ Capillaries ของเส้นใยที่สัมพันธ์กับขนาดรูปร่างและความสามารถในการแพร่ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส

### 3. ปริมาณของโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส

จากข้อมูลการทดลองโดยการหักเหของ X-ray ผลที่ได้บอกว่าเอนไซม์ที่จะทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสมีความสามารถในการเข้าถึงบริเวณอสัณฐานของเซลลูโลสที่ผ่านการก่อตัวขึ้นรูปใหม่ (Regenerated) แต่สามารถกระทำเช่นนี้ได้ในวัตถุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็น โครงร่างผลึก

จากกรณีการไฮโดรไลซิสด้วยกรด ปริมาณ โครงสร้างผลึกพบได้อย่างมีนัยสำคัญระหว่างการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ ส่วนของเซลลูโลสที่ถูกทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสยังเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาจะกลายเป็นโครงร่างผลึกมากขึ้น ดังนั้นจะเกิดแรงต้านการไฮโดรไลซิสมากขึ้น

### 4. มิติของหน่วยเซลล์

เซลลูโลสมีปรากฏเป็น โครงสร้างผลึก 4 แบบ โดยเรียกเป็น เซลลูโลส I, II, III และ IV เซลลูโลส I เป็นรูปผลึกของวัสดุเซลลูโลสดั้งเดิม เซลลูโลส II เป็นเซลลูโลสที่ผ่านการก่อตัวขึ้นรูปใหม่ เช่น Viscose Filament Cellophane และฝ้ายที่ผ่านการชุบด้วยสารละลายต่างเซลลูโลส III และ IV เกิดจากปฏิกิริยาของเซลลูโลส กับ Anhydrous Ethylamine และการใช้กรดสกัดที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ในการเตรียมเซลลูโลส II, III และ IV โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมเลกุลของกลูโคสต่อหนึ่งหน่วยโมเลกุลของเซลลูโลสหรือองศาของความเป็นผลึก เป็นการยาก

ที่จะประเมินหาความเร็วของปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นของเซลลูโลสต่อสารที่เข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงในมิติของหน่วยเซลล์ของผลึกในเซลลูโลสเพียงอย่างเดียว หรือความแตกต่างในปริมาณส่วนอสัณฐาน

#### 5. การจัดเรียงตัวของหน่วยเซลล์

ความต้านทานต่อการถูกทำลายโครงสร้างของส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกในเซลลูโลสที่แข็งแกร่งกว่าส่วนอสัณฐานอย่างมากรุนั้น ไม่ได้เกิดจากด้านกายภาพต่อการเข้าไปไม่ถึงของเอนไซม์เท่านั้น แต่เกิดจากการจัดเรียงตัวของหน่วย Anhydroglucose ในส่วนโครงสร้างผลึกด้วย ในส่วนนี้หน่วยของกลูโคสจะปรากฏในรูปแบบเก้าอี้ (Chair,  $C_1$ ) กับหน่วยของ Glucopyranose เรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามของโครงสร้างผลึก

#### 6. ปริมาณของกลูโคสต่อหนึ่งหน่วยโมเลกุลเซลลูโลส

ความยาวของโมเลกุลของเซลลูโลสในเส้นใย มีค่าตั้งแต่ระดับในรูปของแอมม่อนเซลลูโลสคือมีหน่วยของกลูโคสน้อยกว่า 15 หน่วยไปจนถึงระดับในรูปของอัลฟาเซลลูโลสมีหน่วยของกลูโคสมากถึง 10,000 ถึง 14,000 หน่วยต่อโมเลกุล จำนวนหน่วยกลูโคสที่แตกต่างกันในโมเลกุลของเซลลูโลส ทำให้คาดว่ามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากพอควร โดยเฉพาะกับเอนไซม์ที่ทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสแตกออก และยับยั้งกลไกในขั้นตอนสุดท้ายของปฏิกิริยา

เมื่อจำนวนกลูโคสในโมเลกุลของเซลลูโลสถูกทำให้ลดลงระหว่างปฏิกิริยาการ Hydrolysis ด้วยกรด ปลายของโซ่เซลลูโลสที่แตกออกในส่วนอสัณฐานนั้นมีแนวโน้มที่จะกลับมาต่อกันเป็นผลึกและทำให้ผลึกส่วนที่เหลือมีความต้านทานต่อการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ เมื่อจำนวนกลูโคสในโมเลกุลของเซลลูโลสลดลง จนกระทั่งโมเลกุลของเซลลูโลสสามารถละลายน้ำได้และโครงสร้างนั้นไม่สามารถกลับมาเชื่อมต่อกันและกันได้อีก จะทำให้เพิ่มความสามารถในการเข้าถึงเมื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ด้วยเอนไซม์โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจน แต่การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นไปในทางที่จะทำให้การละลายน้ำดีขึ้น การทำให้โซ่ของเซลลูโลสสั้นลง ดังนั้นจำนวนของกลูโคสในโมเลกุลของเอนไซม์เป็นการจำกัดขอบเขตในการประเมินความว่องไวของเซลลูโลสต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ยกเว้นในกรณีที่เอนไซม์ที่กระทำในปฏิกิริยาเป็นแบบหยุดยั้งกลไกในขั้นตอนของปฏิกิริยา

## 7. ธรรมชาติของสารที่ทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส

### ส่วนประกอบทางแร่ธาตุ (Mineral Constituents)

เส้นใยของเซลลูโลส โดยมากแล้ว มีเถ้าอยู่ประมาณ 1 % ซึ่งรวมธาตุที่จำเป็นทั้งหมด สำหรับการเจริญเติบโตของเซลลูโลสในระดับ Microorganism สารประกอบของธาตุทองแดง เงิน โปรท โครเมียมและเกลือของสังกะสี โดยทั่วไปจะหยุดยั้งการทำลายโดยจุลินทรีย์ในขณะที่ โคบอล แมกนีเซียมและแคลเซียมในส่วนผสมที่มีอนุโมลของฟอสเฟต จะกระตุ้นให้เกิดมากขึ้น

## 8. ความเข้มข้นและการกระจายของหมู่แทนที่ (Substituent Group)

อนุพันธ์ของเซลลูโลสที่เกิดจากการแทนที่ เกิดขึ้นโดยการแทนที่ไฮโดรเจนของหมู่ Hydroxyl ปฐมภูมิและทุติยภูมิของเซลลูโลสโดยหมู่ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เช่น เมทิล เอทิล ไฮดรอกซิลเอทิล คาร์บอกซิลเมทิล ฯลฯ

การที่มีกลุ่มเหล่านี้เพิ่มเข้าไป ทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกในโครงสร้างลดลงและ ละลายในน้ำได้มากขึ้นในสัดส่วนที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของกลุ่มแทนที่ (Degree of Substitution, DS) และความสามารถในการละลายน้ำของหมู่แทนที่ (DS หมายถึง จำนวนโดยเฉลี่ยของหมู่แทนที่ ซึ่งกระทำต่อกลูโคสแต่ละหน่วยในเซลลูโลส) ค่า DS ซึ่งเป็นการละลายอย่างเสรีสมบูรณ์ มีค่า จาก 0.5-0.7 โดยขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของหมู่แทนที่ และจำนวนของหน่วยกลูโคส ในโมเลกุลของเซลลูโลส

ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่มีหมู่แทนที่ ต่อการไฮโดรไล ซิสด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้นพร้อมกับความสามารถในการละลายน้ำได้มากขึ้น และความเป็นผลึกใน โครงสร้างที่ลดลง จนถึงจุดที่การละลายเป็นไปอย่างสมบูรณ์ จากจุดนี้ความว่องไวในการ เกิดปฏิกิริยาลดลง กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณของหมู่แทนที่ (DS) จนกระทั่งพ้นจากผลการกระทำ ของเอนไซม์ซึ่งโดยปกติอยู่ที่ค่า DS มากกว่า 1 หมู่แทนที่ขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพในการต้านทาน การย่อยสลายของเอนไซม์มากกว่าหมู่แทนที่ขนาดเล็ก

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kahle (2001) รวบรวมทฤษฎีเกี่ยวกับการเตรียม Micro Porous Organic Thin Film โดยวิธีการตกตะกอนด้วยสารละลาย ซึ่งใช้ได้ทั้งเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตติง โดยมีตัวทำละลายที่ละลายโพลีเมอร์ได้ และมี Non-solvent ที่ไม่ละลายโพลีเมอร์แต่ตัวทำละลายและ Non-solvent ต้องเป็นสารที่ละลายซึ่งกันและกันได้ และ Non-solvent จะต้องมีจุดเดือดสูงกว่าตัวทำละลาย หลังจากที่น่าสารตั้งต้นมาผสมรวมกันแล้วระเหยตัวทำละลายออกไป Non-solvent จะกลายเป็นหยดอยู่บนฟิล์มของโพลีเมอร์ซึ่งจะทำให้เกิดรูพรุนบนแผ่นฟิล์ม ขนาดและปริมาณของรูพรุนบนแผ่นฟิล์มกำหนดได้จากปริมาณของสารตั้งต้น ในการกำจัด Non-solvent ต้องมีการควบคุมขนาดของรูพรุนให้ดี และป้องกันการโค้งงอของแผ่นฟิล์ม



ภาพที่ 16 Phase Diagram ของ Seiner

จากเฟสไดอะแกรมของ Seiner, Zone A มีความเข้มข้นของ Non-solvent ต่ำที่สุด ถ้าฟิล์มก่อตัวจาก Zone A ไปสู่ Gel Region จะได้แผ่นฟิล์มโปร่งใสที่ไม่มีรูพรุน สำหรับสารตั้งต้นจาก Zone B เปลี่ยนแปลงสู่ Gel Region โดย Non-solvent จะมีลักษณะเป็น Micro-droplet เมื่อกำจัดออกแล้วจะได้แผ่นฟิล์มรูพรุนแบบเซลล์เปิด หรือ Micro-voids และสารตั้งต้นใน Zone C เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะจะได้แผ่นฟิล์มรูพรุนแบบเซลล์เปิด

Seyama *et al.* (2001) ศึกษาการแพร่กระจายของกลิ่นจาก Essential Oil ที่สกัดจากพืช 6 ชนิด โดยการนำ Essential Oil บรรจุไว้ในพื้นผิวของรูพรุนที่อยู่ภายใน Porous Cellulose Beads และใช้ฟิล์ม Plasma-deposited Polymer Film หรือ PPF ที่เคลือบด้วย Quartz (Quartz Crystal Resonator, QCR) ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจสอบกลิ่นที่เกิดขึ้น โดยนิยาม กลิ่นจะหมายถึง ส่วนผสมของก๊าซที่ประกอบด้วยสารระเหยหลายชนิดและทำให้เกิดการกระตุ้นให้สูดคม ในการทดลองจะตรวจวัดด้วยระบบ PPF- QCR ที่มีความไวสูงสามารถตรวจพบก๊าซจากสารอินทรีย์ได้แม้ว่ามีปริมาณต่ำ

Rawski and Cole (1997) วิจัยการเตรียม Viscose จากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าเพื่อนำมาทำก่อดัวขึ้นรูปใหม่เป็นผลิตภัณฑ์เซลลูโลสที่มีประโยชน์ในรูปของแผ่นฟิล์ม Cellophane และฟองน้ำเซลลูโลส นอกจากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่า (Old Newspaper, ONP) ในงานวิจัยนี้ยังมีการทดลองใช้กระดาษสำเนาจากสำนักงาน (Office Copies Paper, OCP) กระดาษถุงใส่สินค้า (Grocery Bag Paper, GB) กระดาษแข็งลูกฟูก (Cardboard Corrugated, CB) และกระดาษนิตยสารเก่า (Old Magazine Paper, OMP) Viscose สามารถเตรียมได้จากการตัดวัตถุดิบให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ประมาณ 1 ตารางนิ้ว เตรียมสารละลายดังนี้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 20 และ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ผสมวัตถุดิบกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 20 ในปริมาณมากเกินพอนำไปบ่ม ริดสารละลายส่วนเกินออกจะได้ Alkali Mas: ทำให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ เก็บในภาชนะปิด นำไปบ่ม จากนั้นเติมคาร์บอนไดซัลไฟด์ เพื่อทำให้เป็น Cellulose Xanthate ซึ่งจะนำไปบ่มอีกครั้งแล้วเจือจางด้วยสารละลายด่างโซดาไฟเข้มข้นร้อยละ 4 เพื่อให้เป็น สารละลาย Viscose หลังจากการบ่มนำ Viscose ปาดกระจายให้เรียบเสมอบนแผ่นกระจกบาง จุ่มลงในสารละลายกรด Sulfuric เข้มข้นร้อยละ 10 เพื่อทำก่อดัวขึ้นใหม่เป็นแผ่นฟิล์ม Cellophane เมื่อผสม Viscose กับผลึกของโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) จุ่มลงในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 10 เพื่อทำก่อดัวขึ้นใหม่เป็นฟองน้ำเซลลูโลส (Cellulose Sponge)

Lönnerberg *et al.* (1995) ได้ทำการทดลองศึกษาการวัดความหนืดของสารละลาย Viscose ของเซลลูโลส การทำให้สารประกอบของเซลลูโลสทำก่อดัวใหม่มีความต้องการวัตถุดิบที่มีสารประกอบของเซลลูโลสซึ่งมีลักษณะที่เป็นโครงสร้างผลึกและได้มีการกำจัดสารลิกนินออกไปอย่างดี นอกจากนั้น เส้นใยของวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลสซึ่งถูกฟอกล้างแล้วนั้นต้องนำมาทำให้ละลายน้ำได้ ความสามารถของวัตถุดิบที่มีสารประกอบเซลลูโลสในการละลายใน

สารละลายอัลคาไลอ่อน ๆ เกิดขึ้นในขั้นตอน Xanthogenate ของอัลคาไลเซลลูโลส ดังที่เคยมีการนำเสนอโดย Cross, Bevan และ Beadle ในปี 1891 สารละลาย Viscose ของเซลลูโลสจากกระบวนการ Xanthogenate ที่ได้อาจจะนำไปก่อตัวขึ้นใหม่ได้หลายวิธี ทั้งการใช้ความร้อน หรือการทำปฏิกิริยากับสารละลายกรด

สารละลาย Viscose ของเซลลูโลสสามารถนำไปก่อตัวขึ้นใหม่เป็นรูปแบบของเส้นใยโดยการปั่น ก่อตัวเป็นฟิล์มโดยการดึงให้เป็นแผ่นบาง ๆ หรือก่อตัวเป็นรูปร่างลักษณะเป็นฟองน้ำ โดยการนำสารละลาย Viscose ของเซลลูโลสมาหล่อขึ้นรูป ฟองน้ำของเซลลูโลสถูกนำไปใช้ประโยชน์มาแล้วหลายปีในการทำความสะดวกและวัสดุประสงค์ในด้านการแพทย์ การแพทย์แผนใหม่และเทคโนโลยีทางชีวภาพมีความต้องการฟองน้ำของเซลลูโลสซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวขึ้นอยู่กับประโยชน์ที่ใช้ ในการผลิตฟองน้ำของเซลลูโลสนั้นอยู่บนพื้นฐานความคิดในด้านความหนืดของสารละลาย Viscose เป็นตัวกำหนดการไหลของสารละลาย Viscose รอบผลึกและเส้นใยที่ถูกผสมกับสารละลาย Viscose เพื่อสร้างความพรุนและความแข็งแรงของเซลลูโลสที่ก่อตัวขึ้นใหม่ ดังนั้นจึงมุ่งความสนใจต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของสารละลาย Viscose ดังที่มีการบ่งบอกด้วยเทคนิคของเครื่องมือที่ใช้วัดความหนืด ซึ่งสัมพันธ์กับวิธีในการผสมสาร

Rheometer ดูเหมือนว่ามีประโยชน์สำหรับการวัดค่าตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการในการเตรียมสารละลาย Viscose รวมทั้งขั้นตอนการทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง การบ่มด้วยความร้อน Xanthogenatation และการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ จำนวนของกลูโคสโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยโมเลกุลของเซลลูโลส (Degree of Polymerization) ลดลงมากโดยการบ่มด้วยความร้อนที่ยาวนานมากขึ้น ในเวลาที่ยาวนานและมีอุณหภูมิสูง ทำให้ความหนืดของสารละลาย Viscose ที่ได้ลดลงไปมากพอสมควร

ความสนใจในฟองน้ำของเซลลูโลสที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นได้รับความสนใจมากขึ้นในทางการวิเคราะห์ด้านการแพทย์ และวัตถุประสงค์ในทางเวชกรรม ฟองน้ำของเซลลูโลสที่ได้ผลิตขึ้นจากวัสดุทางธรรมชาติอย่างเซลลูโลสจะให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ครบถ้วน

กระบวนการผลิตสารละลาย Viscose ตั้งอยู่บนพื้นฐานของขั้นตอน Xanthogenatation ต่อมาก็คือสภาวะในการที่วัตถุดิบซึ่งมีส่วนประกอบของเซลลูโลสแช่อยู่ในสารละลายต่าง โซดาไฟ และวัตถุดิบนั้นทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง โซดาไฟจัดว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญจากการนำไปใช้

ประโยชน์ในงานหลายประเภทสำหรับการผลิตเส้นใยสังทอ ฟิล์ม และฟองน้ำของเซลลูโลส ในทางการแพทย์และเวชกรรม ฟองน้ำของเซลลูโลสที่นำมาใช้ควรจะเป็นเซลลูโลสที่บริสุทธิ์ และ ยิ่งไปกว่านั้นควรมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของพื้นที่ผิวที่ดีด้วย

สารละลาย Viscose ที่มีความหนืดสูงจะมีการไหลรอบอนุภาค เช่น โมเลกุลของโครงสร้าง ผลึกได้ไม่ดี ผลิตภัณฑ์ฟองน้ำของเซลลูโลสที่ได้จะมีช่องเปิดมากเกินไปจึงทำให้มีความแข็งแรง และความยืดหยุ่นที่ต่ำ ในทางตรงกันข้าม สารละลาย Viscose ที่มีความหนืดต่ำจะมีการไหลที่ดีเพื่อก่อตัวเป็นลักษณะของเนื้อผนังที่มีความต่อเนื่องของพื้นผิวและให้โครงสร้างที่ดีสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการ เช่น การจับเซลล์ของเม็ดเลือด

ความหนืดของสารละลาย Viscose สามารถหาได้ง่ายด้วยเครื่องมือผสมที่ทำงานภายใต้สภาวะควบคุม (ความเข้มข้นคงที่ ภาชนะผสมออกแบบอย่างเหมาะสม และลักษณะของแกนหมุนของเครื่องผสม) โดยการวัดแรงบิดของเพลเป็นค่าตัวอย่างที่ความเร็วในการหมุนค่าหนึ่งซึ่งจะวางหลักของความสัมพันธ์ดังนี้

$$P = f(d, n, \eta)$$

- เมื่อ
- $P$  = กำลังสุทธิของแกนหมุน ( $W$ ) ซึ่งคำนวณจากความต้านทานแรงบิด
  - $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะผสม (เมตร)
  - $n$  = ความเร็วในการหมุนของแกนหมุน (รอบต่อวินาที)
  - $\eta$  = ความหนืดของสารละลาย Viscose ( $Ns/m^2$ )

แบบจำลองทั่วไปสามารถพัฒนาขึ้นโดยใช้วิธี Dimensional Analysis:

$$P = cd^n\eta n^2$$

- เมื่อ  $c$  = ค่าคงที่ของการแปรผัน

จากแบบจำลองนี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $P$  และ  $n^2$  จะได้ฟังก์ชันความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง



การหาคุณสมบัติของสารละลาย Viscose ที่เกิดจากกระบวนการ Xanthogenate ของสารละลาย Viscose ทำได้โดยวัดคุณสมบัติบางประการกับฟองน้ำของเซลลูโลสที่ผลิตได้และโดยการวัดความหนืดของสารละลาย Viscose สามารถวัดได้ด้วยการใช้เครื่องมือ Rheometer ที่มีขายอยู่ทั่วไป เช่น Bohlin VOR Rheometer ด้วยการใส่ Carbon-14 ภายในภาชนะปิด ภาชนะที่ใช้บรรจุสารตัวอย่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.4 มิลลิเมตร และมีความสูง 27.9 มิลลิเมตร ลูกคั่งในภาชนะที่ใช้บรรจุสารตัวอย่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร และมีความสูง 21 มิลลิเมตร ปริมาณของสารตัวอย่างที่ต้องการวัดในภาชนะคือ 2 มิลลิลิตร ในเครื่องมือนี้ภาชนะบรรจุสารตัวอย่างจะหมุนในขณะที่ลูกคั่งจะอยู่นิ่ง

Davidson *et al.* (1995) ได้ศึกษาการขึ้นรูปเม็ดจากวัสดุเซลลูโลสที่มีรูพรุน ในการกำหนดสูตรในทางเภสัชกรรม บ่อยครั้งที่ต้องการลดอัตราที่ต้องการใช้เพื่อให้มีประสิทธิภาพจากการกลืนตัวยานซึ่งมีรูปแบบที่รู้จักคือ Multiple-Unit Dosage และมักจะประกอบไปด้วยแกนของ Beads ซึ่งนำมาใช้ในลักษณะการเคลือบด้วยฟิล์มของตัวยา หรือในลักษณะที่มีตัวยาในเนื้อของสาร เพื่อให้มีการแพร่ของตัวยาออกมาในลักษณะที่ต้องการ กระบวนการผลิต Beads ในทางการค้าไม่สามารถหลีกเลี่ยงความเสี่ยงจากการเล่นเปลืองจากการกำหนดขนาดเช่นเดียวกับฝุ่นผงจากการบรรจุยา เพื่อกำจัดข้อบกพร่องดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาระบบการผลิตสารที่จะนำมาเคลือบจากเซลลูโลสแนวความคิดคือการผลิตวัสดุเซลลูโลสที่มีรูพรุนซึ่งมีพื้นที่ผิวสำหรับให้สารอื่นมาเคลือบหรือยึดเกาะได้ โดยให้มีขนาดสัดส่วนตามต้องการและมีการนำตัวยาเคลือบลงไปบนพื้นที่ผิวของวัสดุเซลลูโลสที่มีรูพรุนนั้น ซึ่งการผลิตวัสดุเซลลูโลสที่มีรูพรุนนี้เป็นเสมือนวัสดุดิบสำหรับกระบวนการผลิตยาและเป็นการทำงานที่สัมพันธ์กัน

Laszkiewicz *et al.* (1990) ศึกษาวิธีการปรับปรุงความคุ้มค่าในการผลิต Viscose โดยผลิตเส้นใยจากสารละลาย Sodium Cellulose Xanthate เข้มข้น ในการทดลองการนำเซลลูโลสมาชุบด้วยด่าง ใช้เยื่อไม้ 20 กรัม ผสมกับสารละลายด่างโซดาไฟเข้มข้นร้อยละ 4-24 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 1 ต่อ 15 ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยมีการกวนเป็นครั้งคราว เซลลูโลสบางส่วนถูกเคลือบด้วยสารละลายด่างโซดาไฟผสมกับสารละลายยูเรียเข้มข้นร้อยละ 1 ของปริมาณด่างโซดาไฟ เมื่อเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์แล้วแยกสารละลายด่างโซดาไฟส่วนเกินออก จะได้อัลคาไลเซลลูโลส นำไปบ่มไว้อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ล้างด้วยสารละลายด่างโซดาไฟเจือจางก่อนใช้รังสี Infrared ตรวจสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยา

Marukami et al. (1984) ได้ทำการศึกษาการสร้าง Porous Membrane ที่ประกอบด้วย เซลลูโลสอะซิเตทและอะคริลิกโพลีเมอร์เช่น โพลีเมทิลอะซิเตรท หรือ Methyl Acrylate-methyl Methacrylate Copolymer ซึ่งจะเหมาะกับกระบวนการ Plasmapheresis และโพลีเมอร์อัลลอยที่ ประกอบด้วยเซลลูโลสอะซิเตท อะคริลิกโพลีเมอร์ และเซลลูโลสไนเตรทปริมาณเล็กน้อยสร้าง เนื้อเยื่อเทียมที่ร่างกายสิ่งมีชีวิตไม่ต่อต้าน

ในทางอายุรเวทจะใช้ Porous Membrane ในกระบวนการ Plasmapheresis ซึ่งใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนพลาสมา ซึ่งใช้ได้ดีกว่าวิธีการปั่นแยก ซึ่งทั้งกระบวนการ Hemodialysis, Hemofiltration และ Plasma Separation แต่เดิม เยื่อกึ่งเลือกผ่าน (Semi-permeable Membrane) ที่ใช้สร้างจากเซลลูโลสอะซิเตทเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการกรองจะลดลงจึงไม่เหมาะในทางการแพทย์ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงคุณสมบัติของโพลีเมอร์ที่ใช้โดยมีการเพิ่ม Alkyl Acrylic Polymer กลายเป็น Copolymer ซึ่งมีคุณสมบัติลดการสูญเสียเกล็ดเลือด ในระหว่างการกรองโดยมีการควบคุมขนาดของรูพรุนบนเยื่อเลือกผ่านประมาณ 0.2-0.6 ไมโครเมตร โคลิโพลีเมอร์ที่นิยมใช้คือ เซลลูโลสอะซิเตท และ Methacrylic Ester Copolymer

การเตรียม Porous Membrane โดยวิธี Solvent Precipitation Solvent สำหรับ Binary Polymer นี้มักจะใช้สารจำพวกเมทิลคลอไรด์ อะซีโตน เมทิลเอธิลคีโตน เอธิลอะซิเตรท N-methylpyrrolidone และไดเมทิลซัลฟอกไซด์ ซึ่งสามารถละลายโพลีเมอร์ทั้งสองชนิด และ Non-solvent ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดรูพรุนและไม่ละลายโพลีเมอร์ทั้งสองชนิด ได้แก่ เฮกเซน ไซโครเฮกเซน ไซโครเฮกซานอล เมทานอล เอทานอล โพรพานอล หรือบิวทานอล

ระหว่างการแยกสถานะการเติมเกลือแอมโมเนีย แคลเซียม หรือ แมกนีเซียม ช่วยให้เกิดการแยกสถานะได้เร็วขึ้นโดยเติมประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 10 โดยน้ำหนัก Binary Polymer Alloy ประมาณร้อยละ 5 ถึง 20 โดยน้ำหนัก Non-solvent ประมาณร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนัก ละลายที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งถึง 50 องศาเซลเซียส ประมาณ 5 ชั่วโมง

การทำให้แผ่นฟิล์มแข็งตัวจะเทสาร ละลายลงผิวน้ำ หรือสารละลายเมทานอลที่อุณหภูมิ ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส หรือเทบนแผ่นแก้วผิวเรียบ Rotary Drum หรือแผ่นสแตนเลสเจาะรู และมี การปรับปรุง Solubility Parameter โดยการเพิ่มเซลลูโลสไนเตรทเข้าไปเป็น Ternary Alloy

Jones et al. (1975) วิจัยเกี่ยวกับการผลิตวัสดุแลกเปลี่ยนประจุจากเซลลูโลส ในงานวิจัยจะผลิตวัสดุเซลลูโลสเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนประจุจากเซลลูโลสที่นำมาก่อตัวขึ้นใหม่ให้มีหลากหลายรูปแบบรวมทั้งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ตามต้องการ โดยใช้ประโยชน์ในการแลกเปลี่ยนประจุที่เป็นอนุผลของโปรตีน ได้แก่ เอนไซม์ ส่วนประกอบของเลือด และ เนื้อเยื่อ อนุผลของคาร์โบไฮเดรต ได้แก่ Mucopolysaccharide Nucleic Acid ได้แก่ Ribonucleic Acid และ Deoxyribonucleic Acid และกรดไขมันโมเลกุลใหญ่

ถ้าต้องการให้วัสดุเซลลูโลสสำหรับแลกเปลี่ยนประจุที่ผลิตขึ้นมีเสถียรภาพที่ดีเป็นพิเศษ จะต้องมีการเพิ่มสารเข้าไปเพื่อไปทำปฏิกิริยา Cross-link ซึ่งได้แก่ Epichlorohydrin, Dichlorohydrin, Dibromoethane, Dichloroethane, 1,2,3,4-Diepoxybutane, Bisepoxy Propyl Ether และ 1,4-Butanediol Bisepoxy Propyl Ether สารทำปฏิกิริยา Cross-link ดังกล่าวมักจะทำปฏิกิริยาในสารละลายต่างเช่นสารละลายต่างโซคาไฟ หรือ สารทำปฏิกิริยา Cross-link บางชนิดเช่น อัลดีไฮด์ ได้แก่ ฟอรัลดีไฮด์ซึ่งอยู่ในสารละลายกรด หรืออาจจะทำปฏิกิริยา Cross-link จากการแตกตัวเป็นประจุด้วยการฉายรังสี เช่น Ultra-violet Gamma หรืออิเล็กตรอน

Sylvana et al. (1997) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ Sephadex สำหรับแยกเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ของเฮโมโกลบินของหนอนที่มีขนาดใหญ่ *Glossoscolex paulistus* ในกรดอะมิโน methionine

Anzar ey al ได้ศึกษาการกรองของน้ำสุจิของวัวโดยกรองผ่าน Sephadex ion-exchange คอลัมน์เพื่อปรับปรุงคุณภาพก่อนและหลังการแช่แข็ง และการป้องกันสเปิร์มโดยกลีเซอรอลระหว่างการแช่แข็งและขณะละลาย

Ruben et al (2004) ได้ศึกษาสารยับยั้งธรรมชาติ papain ที่ได้จากยางของมะละกอ ยางสดจากมะละกอพันธุ์ Carica จะถูกเก็บและถูกเคลื่อนย้ายไปในเครื่องแช่แข็งอย่างทันทีทันใดในห้องปฏิบัติการสามส่วนของสารยับยั้งจะถูกแยกออกจากกันโดยใช้ latex dialysis ซึ่งจะประกอบไปด้วย Sephadex G-25 gel และ โครมาโตกราฟีโดยใช้ Sephadex C-25

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. มอเตอร์ขนาด 70 วัตต์ พร้อมขาตั้ง
2. ไบกวน (Stirrer)
3. ภาชนะสำหรับใช้เป็น Reactor
4. ตู้ดูดควัน
5. Hot Plate
6. Water Bath
7. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Pump Filter)
8. เครื่องมือวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter)
9. เครื่องชั่งที่สามารถวัดน้ำหนักได้ละเอียดโดยมีทศนิยม 4 ตำแหน่ง
10. เครื่อง Multi-pyconometer
11. เครื่อง Autosorb-
12. เครื่อง Autoscan
13. เครื่อง Powder Tester ของ Hosogawa Micron
14. ชุดอุปกรณ์ Sieve
15. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
16. เครื่อง AA

### วัตถุดิบและสารเคมี

1. ชานอ้อย ฝ้าย หรือเยื่อกระดาษ จากโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตหรือใช้วัตถุดิบเหล่านี้
2. โซดาไฟหรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH)
3. คาร์บอนไดซัลไฟด์บริสุทธิ์ (Carbon Disulfide, CS<sub>2</sub>)
4. กรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric, HCl)
5. นอมอลเฮกเซน (n-Hexane, C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>)
6. เอทานอลหรือเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethanol, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)
7. น้ำมัน Camation-70 (Mineral Oil)

8. แป้งสังเคราะห์หรือแป้งมันสำปะหลัง
9. น้ำกลั่น
10. Sephadex G-25

Sephadex G-25 เป็นวัสดุรูปทรงกลมที่มีรูพรุนที่ผลิตจากสารประกอบของเซลลูโลส (Bead Cellulose) ที่ได้มีการผลิตและจำหน่ายในปัจจุบัน โดย Sephadex G-25 เป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ที่ก่อตัวขึ้นใหม่โดยกรรมวิธีการผลิตจาก Viscose โดยทุก ๆ อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม ถูกควบคุมให้มีรูพรุนที่สม่ำเสมอ โดยนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายประการ ได้แก่ วัสดุรองรับทางการภาพ (Physical Support) วัสดุสำหรับกระบวนการ Chromatography วัสดุสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchanger) สำหรับดูดซับโลหะ (Metal Chelating Metal) เป็นวัสดุดูดซับทางเคมี (Chemisorbances) เป็นวัสดุดูดซับที่มีสัมพันธ์ภาพ (Affinity Absorbents) และเป็นวัสดุจับเอนไซม์ (Immobilized Enzymes)

### วิธีการวิจัย

#### การเตรียมวัตถุดิบ

นำวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ ฝ้าย ชานอ้อย เยื่อกระดาษไปทำการผึ่งแดดให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดเพื่อเป็นการลดขนาดและเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา จากนั้นจึงนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เก็บใส่เดซิเกตเตอร์เพื่อป้องกันความชื้น

#### การเตรียมของผสมหนืด

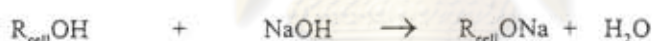
ในการทดลองเพื่อวิจัยการผลิตตัวดูดซับรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจากสารประกอบของเซลลูโลสจากผลิตผลทางการเกษตร เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) ในอุตสาหกรรม ในการผลิตในการผลิตสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ โดยในส่วนแรกจะเป็นการเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูง (Viscose) นำมาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 17.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในปริมาณที่มากเกินไป เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วจึงให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที พร้อมกับการคนเป็นครั้งคราว หลังจากนั้นแยก

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่วนเกินออก นำกากที่เหลือมาบ่ม โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ถึง 6 ชั่วโมงเพื่อให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันอย่างทั่วถึง เพื่อให้เป็นอัลคาไลเซลลูโลส

หลังจากนั้นจึงลดอุณหภูมิของอัลคาไลเซลลูโลสลงสู่ที่อุณหภูมิห้อง คนอย่างช้า ๆ แล้วจึงเติมสารคาร์บอนไดซัลไฟด์ ( $CS_2$ ) บริสุทธิ์ ในอัตราส่วนระหว่างอัลคาไลเซลลูโลสต่อคาร์บอนไดซัลไฟด์ คือ 67 ต่อ 33 เพื่อให้อัลคาไลเซลลูโลสเกิดปฏิกิริยากลายเป็น Sodium Cellulose Xanthate โดยมีการกวนผสมเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำ Sodium Cellulose Xanthate ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรที่อุณหภูมิ 0 ถึง 5 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากันกลายเป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง (Viscose) (Laszkiewicz, 1986)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในส่วนของการเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูงจากสารประกอบของเซลลูโลสมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 เซลลูโลส + สารละลาย Sodium Hydroxide  $\rightarrow$  อัลคาไลเซลลูโลส + น้ำ



เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับสารละลาย Sodium Hydroxide เกิดเป็นอัลคาไลเซลลูโลสซึ่งเป็นสารละลายที่มีสีเหลืองเข้ม

ขั้นที่ 2 อัลคาไลเซลลูโลส  $\rightarrow$  บ่มด้วยความร้อน  $\rightarrow$  อัลคาไลเซลลูโลสที่ผ่านการบ่ม

ขั้นที่ 2 เป็นการบ่มอัลคาไลเซลลูโลสเพื่อให้สารที่ได้มีความหนืดตามต้องการ

ขั้นที่ 3 อัลคาไลเซลลูโลสที่ผ่านการบ่ม + คาร์บอนไดซัลไฟด์  $\rightarrow$  Sodium Cellulose Xanthate



อัลคาไลเซลลูโลสที่ผ่านการบ่มเมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดซัลไฟด์จะได้ Sodium Cellulose Xanthate

ขั้นที่ 4 Sodium Cellulose Xanthate + สารละลายด่างโซดาไฟเจือจาง → สารละลายที่มีความหนืดสูง



Sodium Cellulose Xanthate ทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างโซดาไฟเจือจางจะได้สารละลายที่มีความหนืดสูง ซึ่งเป็นส่วนผสมของ Sodium Cellulose Xanthate สารละลายด่างโซดาไฟ และน้ำ

ขั้นที่ 1 โครงสร้างของเซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นผลึกในวัตถุดิบที่ถูกบดหรือตัดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการทำปฏิกิริยาได้ถูกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าแทรกซึม โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสดังกล่าวทำให้เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ เมื่อโซเดียมไฮดรอกไซด์แทรกซึมเข้าไป ประจุบวกของอนุภาค Sodium จะแทนที่ไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ทำให้โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสเกิดการพองตัว

ขั้นที่ 2 เซลลูโลสหลังจากทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการพองตัวขึ้นและจะถูกบ่มด้วยความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา De-polymerized ที่สายโซ่ของ Anhydroglucose เนื่องจากเซลลูโลสเกิดการพองตัว ออกซิเจนในบรรยากาศจึงซึมผ่านที่พันธะ  $\beta$ -1,4-glycosidic ชั้นตอนนี้จัดได้ว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูง การบ่มด้วยความร้อนเป็นเวลานานทำให้เกิดปฏิกิริยา De-polymerized ได้มากขึ้น Viscose ที่เตรียมได้จะมีความหนืดต่ำ การบ่มด้วยความร้อนในช่วงเวลาสั้นทำให้ Viscose ที่เตรียมได้จะมีความหนืดสูง

ขั้นที่ 3 อัลคาไลเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการ De-polymerized แล้วจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดซัลไฟด์เพื่อให้เกิดเป็น Cellulose Xanthate โมเลกุลของคาร์บอนไดซัลไฟด์จะอยู่ที่ด้านหน้าของ Sodium อะตอมตรงตำแหน่งที่หมู่ Hydroxyl เกิดปฏิกิริยาการแทนที่ ทำให้ Sulfer สร้างพันธะเคียวอยู่ในโมเลกุลของ Cellulose Xanthate มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวเหลืออยู่มากทำให้เกิดพันธะ Ionic กับ Sodium

- ขั้นที่ 4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยแท้แล้ว Viscose เป็นส่วนผสมของ Cellulose Xanthate เซลลูโลสส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยา สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ

### กระบวนการผลิตเซลลูโลสที่มีรูพรุนรูปทรงกลม

ส่วนที่สองของการทดลอง คือกระบวนการผลิตเซลลูโลสที่มีรูพรุนรูปทรงกลม เมื่อได้สารละลายที่มีความหนืดสูง (Viscose) แล้ว จะนำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น และจะทำการเติมแป้งลงไปเพื่อนำไปใช้ในการสร้างรูพรุน ผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้นจึงนำไปเทลงในน้ำมัน ปั่นกวนด้วยมอเตอร์ความเร็วสูง จะทำให้เกิดสารละลายที่มีความหนืดสูงกลายเป็นหยดรูปทรงกลมกระจายตัวอยู่ในเฟสของน้ำมัน หลังจากนั้นจึงทำการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงไปช้า ๆ เพื่อทำการ regenerate cellulose โดยสารละลายที่มีความหนืดสูง จะไม่ละลายในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แต่สารละลายกรดไฮโดรคลอริกจะสามารถละลายแป้งที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายที่มีความหนืดได้ จึงทำให้เกิดเป็นวัสดุของแข็งรูปทรงกลมที่มีรูพรุนอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นจึงแยกแข็งรูปทรงกลมที่มีรูพรุนที่ได้มาล้างในเอธานอลเพื่อล้างสารละลายกรดไฮโดรคลอริกออกจากเม็ดวัสดุของแข็งรูปทรงกลมที่มีรูพรุน แล้วจึงทำให้แห้งด้วยการอบ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้



ไฮโดรเจนจากกรดไฮโดรคลอริกเกิดการแทนที่กับอนุมูลของโซเดียมที่มีประจุบวก ทำให้พันธะโควาเลนต์ ของ คาร์บอน-ออกซิเจนแยกกัน ด้วยเหตุนี้ จึงเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ทำให้คาร์บอนและซัลเฟอร์ ใช้อิเล็กตรอนสร้างพันธะคู่ โดยไฮโดรเจนถูกแยกออกจากคลอไรด์ของกรดไฮโดรคลอริก และสร้างพันธะใหม่กับออกซิเจนใน Cellulose Xanthate ทำให้ก่อตัวเป็นหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งทำให้กลับมาเป็นโครงสร้างของเซลลูโลสแบบเดิม

ในขั้นตอนของการทดลองการขึ้นรูปเป็นวัสดุรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจาก Viscose เตรียมตัวอย่างการทดลองดังนี้

ตัวอย่างการทดลองที่ 1

สารละลาย Viscose 25 % จากซานฮ้อย ผสมกับแป้ง Soluble Starch 20 % โดยน้ำหนักนำไปกวนใน Mineral Oil เพื่อให้มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ รูปทรงกลม ด้วยความเร็ว 720 รอบ ต่อ นาที จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 N ลงไป จนกระทั่งสารละลาย Viscose ที่เป็นเล็กๆ แข็งตัวเปลี่ยนเป็น Cellulose Beads สีขาว จึงแยกออกจาก Mineral Oil นำไปล้างด้วย n-



Hexane เพื่อล้าง Mineral Oil ออก และล้างด้วย น้ำสะอาด หรือเอทานอลเพื่อล้างกรดไฮโดรคลอริก ออก

ตัวอย่างการทดลองที่ 2

สารละลาย Viscose 15 % จากซานฮ้อย ผสมกับแป้ง Soluble Starch 20 % โดยน้ำหนัก จากนั้นทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างการทดลองที่ 3

สารละลาย Viscose 7.5 % จากซานฮ้อย ผสมกับแป้ง Soluble Starch 20 % โดยน้ำหนัก จากนั้นทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างการทดลองที่ 4

สารละลาย Viscose 7.5 % จากซานฮ้อย ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง 10% โดยน้ำหนัก จากนั้นทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างการทดลองที่ 5

สารละลาย Viscose 7.5 % จากส่าย ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง 10% โดยน้ำหนัก จากนั้นทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างการทดลองที่ 6

สารละลาย Viscose 7.5 % จากเยื่อกระดาษ ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง 10% โดยน้ำหนัก จากนั้นทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6 สรุปการเตรียมตัวอย่างการทดลอง

ตัวอย่างการทดลอง	วัตถุดิบของสารละลาย Viscose	ความเข้มข้นโดยน้ำหนักของสารละลาย Viscose	สารที่ใช้สร้างรูพรุน	ปริมาณโดยน้ำหนักของสารที่ใช้สร้างรูพรุน
1	ชานอ้อย	25%	Soluble Starch	20%
2	ชานอ้อย	15%	Soluble Starch	20%
3	ชานอ้อย	7.50%	Soluble Starch	20%
4	ชานอ้อย	7.50%	แป้งมันสำปะหลัง	10%
5	ฝ้าย	7.50%	แป้งมันสำปะหลัง	10%
6	เยื่อกระดาษ	7.50%	แป้งมันสำปะหลัง	10%

ตารางที่ 6 เป็นการเตรียมตัวอย่างการทดลองโดยมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้กับตัวแปรนั้น

ตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 เป็นการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในส่วนของความเข้มข้นของสารละลาย Viscose เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ที่ใช้ในการผลิตขึ้นรูปเป็น Micro-porous Spherical Cellulose Beads

ตัวอย่างการทดลองที่ 3 และ 4 เป็นการเปลี่ยนตัวแปรในส่วนของวัสดุที่ใช้สร้างรูพรุนของ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่เติมลงไปหลังจากขั้นตอนการเตรียมสารละลาย Viscose แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะของรูพรุนของผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้

ตัวอย่างการทดลองที่ 4 ถึง 6 คือชุดการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลส เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเคมีของการเตรียมสารละลาย Viscose เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads

## ผลและวิจารณ์

ตารางที่ 4 Angle of Repose และ Angle of Spatula

ตัวอย่าง การทดลอง	Angle of Repose (Degree)	Angle of Spatula (Degree)		
		Before Impact	After Impact	ค่าโดยเฉลี่ย
1	47.9	67.4	57.8	62.6
2	48.9	58.7	56.6	57.7
3	49.1	57.7	52.0	54.8
4	55.2	61.6	46.8	54.2
5	53.6	67.1	58.3	62.7
6	51.0	58.3	55.3	59.0
Sephadex G-25	20.2	30.1	0.0	15.1

ตารางที่ 4 คือผลการทดลองในลักษณะคุณสมบัติของ Angle of Repose และ Angle of Spatula ของผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับ Sephadex G-25

Angle of Repose เป็นค่าที่บ่งบอกศักยภาพในการเคลื่อนตัว (Flowability) สำหรับวัสดุผงแห้ง จากผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่า Angle of Repose มีค่าสูงกว่า Sephadex G-25 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีศักยภาพในการเคลื่อนตัวที่ต่ำกว่า Sephadex G-25 และมีแนวโน้มที่อนุภาคจะจับตัวกันเองได้มากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 พบว่า Angle of Repose มีค่าสูงขึ้นเมื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย Viscose แสดงให้เห็นว่าเมื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ที่นำมาใช้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ทำให้อนุภาคของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มที่จะยึดเกาะตัวกันเองมากขึ้น

จากผลการทดลองของตัวอย่างการทดลองที่ 4 ถึง 6 พบว่า Angle of Repose ของตัวอย่างการทดลองที่ 4 ซึ่งใช้ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมสารละลาย Viscose มีค่า Angle of

Repose มากที่สุด และตัวอย่างการทดลองที่ 6 ซึ่งใช้เยื่อกระดาษเป็นวัตถุค้ำยันในการเตรียมสารละลาย Viscose มีค่า Angle of Repose น้อยที่สุด แสดงว่า ผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads จากวัตถุค้ำยันทั้งสามชนิดมีแนวโน้มที่จะเกิดการยึดเกาะจับตัวกันจากมากไปน้อยที่สุดตามลำดับ คือ ชานอ้อย ฝ้าย และ เยื่อกระดาษ

Angle of Spatula เป็นการบ่งบอกถึงแรงเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคของวัสดุผง จากผลการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้มีค่า Angle of Spatula สูงกว่า Sephadex G-25 แสดงให้เห็นว่า อนุภาคของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีแรงเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคที่มากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 จะมีค่า Angle of Spatula ลดลงเมื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ที่เตรียมขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads แสดงว่า แรงเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ที่เตรียมขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ลดลง

จากผลการทดลองในตัวอย่างการทดลองที่ 4 ถึง 6 พบว่า ผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ตัวอย่างการทดลองที่ 5 ซึ่งใช้ฝ้ายเป็นวัตถุค้ำยันในการเตรียมสารละลาย Viscose มีค่า Angle of Spatula ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ในตัวอย่างการทดลองที่ 4 ซึ่งใช้ชานอ้อยเป็นวัตถุค้ำยันในการเตรียมสารละลาย Viscose มีค่า Angle of Spatula น้อยที่สุด ดังนั้น ในการใช้วัตถุค้ำยันในการเตรียมสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็น Micro-porous Spherical Cellulose Beads มีแรงเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคจากมากที่สุดถึงน้อยที่สุดตามลำดับ คือ ฝ้าย เยื่อกระดาษ และ ชานอ้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5 ความหนาแน่นและ Compressibility

ตัวอย่าง การทดลอง	He Density (g/cc)	Aerated Bulk Density (g/cc)	Packed Bulk Density (g/cc)	Compressibility (%)
1	1.50	0.569	0.747	23.8
2	1.48	0.603	0.774	22.1
3	1.77	0.519	0.676	23.2
4	1.30	0.532	0.718	25.9
5	1.23	0.485	0.687	29.4
6	1.24	0.514	0.666	22.8
Sephadex G-25	1.42	0.861	0.914	5.80

ตารางที่ 5 เป็นผลการทดลองของค่าความหนาแน่น และความสามารถในการถูกอัดตัวได้ (Compressibility) ของอนุภาค

ความหนาแน่นของอนุภาคที่วัดโดยใช้ก๊าซฮีเลียมหรือค่าความหนาแน่นที่แท้จริงของอนุภาค (True Density) ซึ่งหาจากเครื่องมือ Multi-pycnometer โดยใช้หาปริมาตรของอนุภาคที่แท้จริงแล้วนำไปหารกับน้ำหนักของอนุภาค

จากผลการทดลองในตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็น Micro-porous Spherical Cellulose Beads ลดลง ทำให้ความหนาแน่นที่แท้จริงของอนุภาคลดลง โดยที่ตัวอย่างการทดลองที่ 3 มีค่าความหนาแน่นของอนุภาคที่แท้จริงใกล้เคียงกับ Sephadex G-25 มากที่สุด ในขณะที่ชุดการทดลองของตัวอย่างการทดลองที่ 4 ถึง 6 มีความหนาแน่นที่แท้จริงของอนุภาคใกล้เคียงกัน

Aerated Bulk Density คือการวัดความหนาแน่นโดยการเทวัสดุผงผ่านลงสู่ภาชนะที่กำหนดปริมาตรแน่นอน แล้วคำนวณน้ำหนักของอนุภาคหารด้วยปริมาตรของภาชนะ

จากผลการทดลองที่ 1 ถึง 3 เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็น Micro-porous Spherical Cellulose Beads ลดลง Aerated Bulk Density จะลดลงด้วย ในขณะที่

ตัวอย่างการทดลองที่ 4 ถึง 6 ซึ่งใช้ ไซนออย ฝ้าย และ เชื้อกระดาษเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็น Micro-porous Spherical Cellulose Beads มีค่า Aerated Bulk Density ใกล้เคียงกัน

**Packed Bulk Density** คือ การวัดความหนาแน่นจากการอัดอนุภาคให้เต็มภาชนะที่กำหนด ปริมาตรแน่นอนในเวลาที่กำหนดจากความสูงของภาชนะที่อัดวัสดุผงควที่แล้วจึงคำนวณน้ำหนักของอนุภาคหลังการอัดหารด้วยปริมาตรของภาชนะ

ในชุดการทดลองของตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 Packed Bulk Density มีค่าลดลงเมื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ในขณะที่ ตัวอย่างการทดลองที่ 4 ถึง 6 ซึ่งใช้ ไซนออย ฝ้าย และ เชื้อกระดาษเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads มีค่า Packed Bulk Density ใกล้เคียงกัน

**Compressibility** หรือความสามารถในการอัดตัวได้ของวัสดุผง เป็นการเปรียบเทียบค่าระหว่าง Packed Bulk Density และ Aerated Bulk Density

จากผลการทดลอง ตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 มีค่า Compressibility ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างการทดลองที่ 4 ถึง 6 พบว่าตัวอย่างการทดลองที่ 5 ซึ่งใช้ฝ้ายเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads มีค่า Compressibility สูงกว่า ตัวอย่างการทดลองที่ 4 และ 6 ซึ่งใช้ ไซนออย และเชื้อกระดาษเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ตามลำดับ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6 Uniformity และ Degree of Flowability

ตัวอย่างการทดลอง	Uniformity	Degree of Flowability
1	2.54	63.0
2	2.50	67.0
3	1.78	69.0
4	2.19	63.5
5	3.82	59.0
6	1.59	69.0
Sephadex G-25	3.00	96.0

ตารางที่ 6 เป็นผลการทดลองในคุณสมบัติของ Uniformity และ Degree of Flowability

Uniformity คืออัตราส่วนของอนุภาคในปริมาณร้อยละ 60 ต่ออนุภาคในปริมาณร้อยละ 10 ที่ลอดผ่านชุดตะแกรงที่กำหนด

จากชุดการทดลองของตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 เมื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ทำให้ค่า Uniformity ลดลง

สำหรับชุดการทดลองของตัวอย่างการทดลองที่ 4 ถึง 6 พบว่า ตัวอย่างการทดลองที่ 5 ซึ่งใช้ฝ้ายเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads มีค่า Uniformity สูงที่สุด

Degree of Flowability เป็นคุณสมบัติในการไหลเคลื่อนตัวของอนุภาค ซึ่งถ้ามีค่าสูงแสดงว่าอนุภาควัสดุผงมีการไหลเคลื่อนตัวได้ดี โดยประเมินจากผลรวมจากค่าดัชนีของคุณสมบัติต่าง ๆ คือ Angle of Repose, Compressibility, Angle of Spatula และ Uniformity

จากตารางที่ 6 เมื่อพิจารณาตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 พบว่าเมื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ทำให้

ให้ Degree of Flowability เพิ่มขึ้น แสดงว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ลดลงทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มีการไหลเคลื่อนตัวได้ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาตัวอย่างการทดลองที่ 4 ถึง 6 พบว่า ตัวอย่างการทดลองที่ 6 มีค่า Degree of Flowability สูงที่สุด และตัวอย่างการทดลองที่ 5 มีค่า Degree of Flowability ต่ำที่สุด ดังนั้น เรียงลำดับของวัตถุดิบตั้งต้นที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสามารถในการไหลเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นคือ ฝ้าย ชานอ้อย และ เยื่อกระดาษ ตามลำดับ และจากการทดลอง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่า Degree of Flowability ที่ต่ำกว่า Sephadex G-25 แสดงให้เห็นว่า ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีความสามารถในการไหลเคลื่อนตัวที่ต่ำกว่า Sephadex G-25

ตารางที่ 7 Angle of Fall, Angle of Difference, Dispersibility และ Degree of Floodability

ตัวอย่างการทดลอง	Angle of Fall (Degree)	Angle of Difference (Degree)	Dispersibility (%)	Degree of Floodability
1	41.5	6.4	6.1	49
2	38.6	10.3	10.4	61
3	45.2	3.9	5.5	46
4	53.4	1.8	6.3	42
5	49.3	4.3	4.4	43
6	39.7	11.3	4.6	55
Sephadex G-25	14.3	5.9	19.6	70

ตารางที่ 7 คือผลการทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ในส่วนของ Angle of Fall, Angle of Difference, Dispersibility และ Degree of Floodability

Angle of Fall เป็นค่าที่แสดงถึงการไหลอย่างอิสระของวัสดุผง ถ้า Angle of Fall ลดลง วัสดุผงจะไหลอย่างอิสระมากขึ้น



**Angle of Difference** คือ ผลต่างระหว่าง Angle of Repose และ Angle of Fall ลักษณะที่วัสดุผงจะไหลพุ่งได้ดีเมื่อ Angle of Difference มากขึ้น

**Dispersibility** คือค่าความพุ่ง (Scattering) การเกิดฝุ่น (Dusting) การพุ่ง (Flushing) และการแพร่กระจายตัว (Dispersing) ของวัสดุผง

**Degree of Floodability** คือคุณสมบัติในการพุ่งกระจายของอนุภาค ซึ่งประเมินจากผลรวมจากค่าดัชนีของคุณสมบัติต่าง ๆ คือ Degree of Flowability, Angle of Fall, Angle of Difference และ Dispersibility

พิจารณาจากตารางที่ 7 Angle of Fall ในชุดของตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 พบว่าในตัวอย่างการทดลองที่ 2 มีค่าต่ำที่สุด แสดงว่า วัสดุผงมีการไหลได้อย่างอิสระมากที่สุด ซึ่งแนวโน้มไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads และเมื่อเปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ในส่วนนี้มีค่า Angle of Fall สูงกว่า Sephadex G-25 แสดงว่า อนุภาคของ Sephadex G-25 ไหลได้อย่างอิสระมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ในส่วนนี้

สำหรับกรณีของ Angle of Difference ในชุดของตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 พบว่าในตัวอย่างการทดลองที่ 2 มีค่าสูงที่สุด แสดงว่าผลิตภัณฑ์วัสดุผงในตัวอย่างการทดลองนี้ไหลแบบพุ่งได้ดีที่สุด และแนวโน้มของคุณสมบัตินี้สำหรับตัวอย่างการทดลองในชุดนี้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads เมื่อเปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 พบว่าตัวอย่างการทดลองที่ 2 มีค่า Angle of Difference มากกว่า Sephadex G-25 แสดงว่ามีการไหลแบบพุ่งของอนุภาคได้ดีกว่า

ในกรณีของ Dispersibility ตัวอย่างการทดลองที่ 2 มีค่าสูงที่สุด แสดงว่าอนุภาคมีความพุ่ง การเกิดฝุ่น การพุ่ง และการแพร่กระจายตัว ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 พบว่าทั้งสามตัวอย่างการทดลองมีค่า Dispersibility ต่ำกว่า Sephadex G-25 แสดงว่า อนุภาค Sephadex G-25 มีความพุ่ง การเกิดฝุ่น การพุ่ง และการแพร่กระจายตัว ได้ดีกว่า

ส่วนกรณีของ Degree of Floodability สำหรับชุดของตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 พบว่า ตัวอย่างการทดลองที่ 2 มีค่า Degree of Floodability มากที่สุด แสดงว่าผลิตภัณฑ์วัสดุผงในตัวอย่างการทดลองนี้แพร่กระจายได้ดีที่สุด ซึ่งไม่เป็นไปตามแนวโน้มสำหรับความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads เมื่อเปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 พบว่า ผลิตภัณฑ์จากการทดลองมีค่า Degree of Floodability ต่ำกว่า Sephadex G-25 แสดงว่า อนุภาคของ Sephadex G-25 แพร่กระจายได้ดีกว่าผลิตภัณฑ์จากการทดลอง

จากชุดของตัวอย่างการทดลองที่ 4 ถึง 6 ในกรณีของ Angle of Fall พบว่า ตัวอย่างการทดลองที่ 4 มีค่าสูงที่สุด และตัวอย่างการทดลองที่ 6 มีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นเรียงลำดับความสามารถในการไหลอย่างอิสระของอนุภาคที่เป็นผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ที่นำมาผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads เพิ่มขึ้นดังนี้ ชานอ้อย ฝ้าย และเยื่อกระดาษ และเมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้กับ Sephadex G-25 พบว่า ค่า Angle of Fall ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่ามากกว่า Sephadex G-25 แสดงว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีความสามารถในการไหลได้อย่างอิสระต่ำกว่า Sephadex G-25

สำหรับกรณีของ Angle of Difference ผลิตภัณฑ์ของตัวอย่างการทดลองที่ 6 มีค่ามากที่สุด และ ผลิตภัณฑ์ของตัวอย่างการทดลองที่ 4 มีค่าน้อยที่สุด แสดงว่า ลำดับความสามารถในการไหลพุ่งของอนุภาคที่เป็นผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ที่นำมาผลิตขึ้นรูปเป็น ผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ได้ดีเป็นดังนี้ ผลิตภัณฑ์จากเยื่อกระดาษ ฝ้าย และชานอ้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 พบว่าในตัวอย่างการทดลองที่ 4 และ 5 มีค่าต่ำกว่า แสดงว่า ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ชานอ้อย และ ฝ้าย เป็นวัตถุดิบตั้งต้นของผลิตภัณฑ์ มีลักษณะการไหลพุ่งที่น้อยกว่า Sephadex G-25 แต่ในตัวอย่างการทดลองที่ 6 พบว่ามีค่า Angle of Difference มากกว่า Sephadex G-25 แสดงว่า ผลิตภัณฑ์ที่ใช้เยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบตั้งต้นของผลิตภัณฑ์ มีลักษณะการไหลพุ่งที่มากกว่า Sephadex G-25

กรณีของ Dispersibility ผลิตภัณฑ์ของตัวอย่างการทดลองที่ 4 มีค่าสูงสุด และ ผลิตภัณฑ์ของตัวอย่างการทดลองที่ 5 มีค่าต่ำสุด ดังนั้น ลำดับของ ความพุ่ง (Scattering) การเกิดฝุ่น (Dusting) การพุ่ง (Flushing) และการแพร่กระจายตัว (Dispersing) สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นดังนี้ ผลิตภัณฑ์จากฝ้าย เยื่อกระดาษ และ ชานอ้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 พบว่า

ผลิตภัณฑ์ในส่วนนี้มีค่า Dispersibility ที่ต่ำกว่า แสดงว่า มีความฟู่ง การเกิดฝุ่น การฟู่ง และการแพร่กระจายตัว มากกว่า Sephadex G-25

ส่วนในกรณีของ Degree of Floodability ผลิตภัณฑ์ของตัวอย่างการทดลองที่ 6 มีค่ามากที่สุด และ ผลิตภัณฑ์ของตัวอย่างการทดลองที่ 4 มีค่าน้อยที่สุด แสดงว่า ลำดับความสามารถในการฟู่งกระจายของอนุภาคที่เป็นผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ที่นำมาผลิตขึ้นรูปเป็น ผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads เพิ่มขึ้นดังนี้ ซานอ้อย ฝ้าย และเชื้อกระดาษ เมื่อเปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 พบว่าผลิตภัณฑ์ในส่วนนี้มีค่า Degree of Floodability ต่ำกว่า แสดงว่าผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads มีความสามารถในการฟู่งกระจายของอนุภาคต่ำกว่า Sephadex G-25

ตารางที่ 8 ขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย ปริมาตรของรูพรุน และ พื้นที่ผิวของอนุภาค

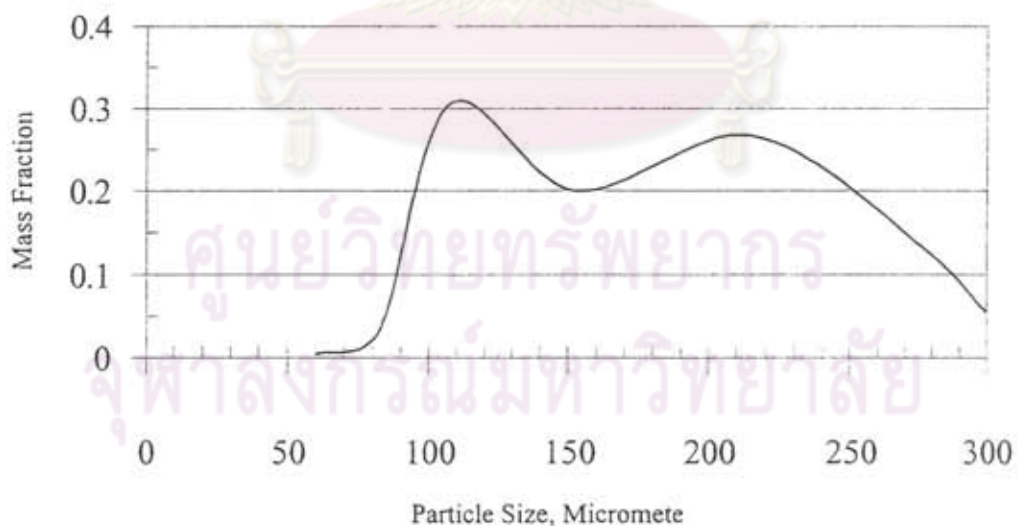
ตัวอย่างการทดลอง	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคโดยเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	ปริมาตรของรูพรุน(cc / g)	พื้นที่ผิวของอนุภาค (m <sup>2</sup> /g)
1	177.29	0.00667	0.007
2	162.24	0.00716	0.012
3	155.64	0.02249	0.325
4	179.80	0.00776	1.188
5	197.76	0.00714	2.971
6	213.09	0.00696	28.429
Sephadex G-25	212.09	0.00649	0.001

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 9 ปริมาณของซิลิกอนและเหล็กในหน่วยมิลลิกรัมต่อกกรัมของอนุภาค

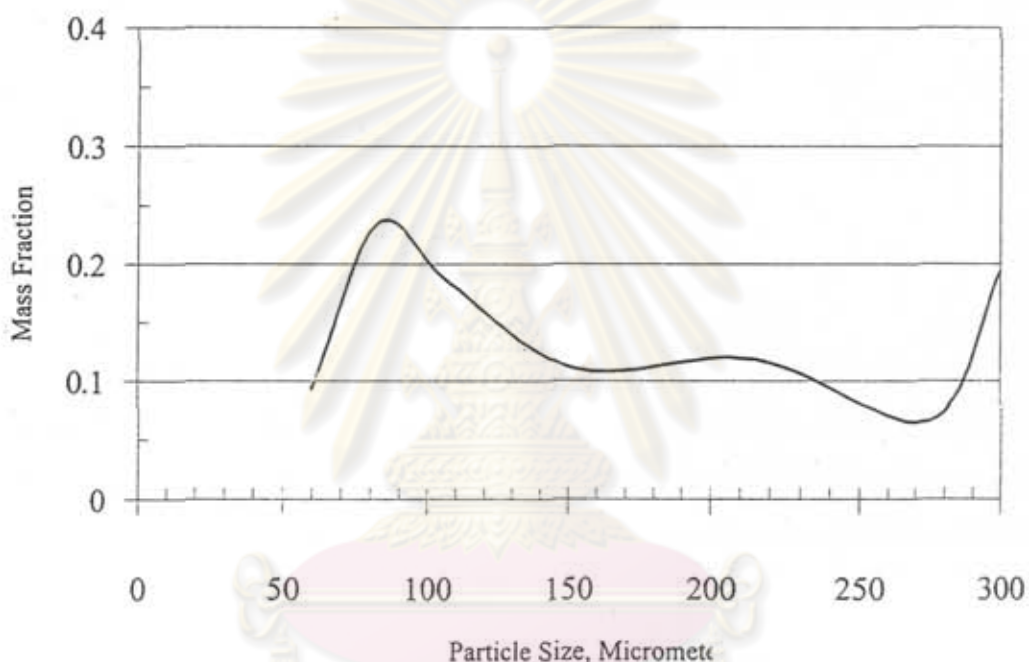
ตัวอย่างการทดลอง	ซิลิกอน	เหล็ก
1	5.52	0.16
2	5.20	0.08
3	4.88	0.08
4	5.36	0.08
5	5.84	0.04
6	6.16	0.08
Sephadex G-25	6.32	0.08

จากการหาปริมาณของซิลิกอนและเหล็กในผลิตภัณฑ์จากการวิจัย และ Sephadex G-25 พบว่า ปริมาณของซิลิกอนในผลิตภัณฑ์จากการวิจัยมีต่ำกว่าใน Sephadex G-25 ในขณะที่ผลิตภัณฑ์จากการวิจัยของตัวอย่างการทดลองที่ 2 ถึง 6 มีปริมาณเหล็กใกล้เคียงกับ Sephadex G-25 แต่ในตัวอย่างการทดลองที่ 1 มีปริมาณสูงกว่า Sephadex G-25 เพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์จากการวิจัยมีความปลอดภัยเพียงพอที่จะใช้ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์อาหารและยา เช่นเดียวกับ G-25



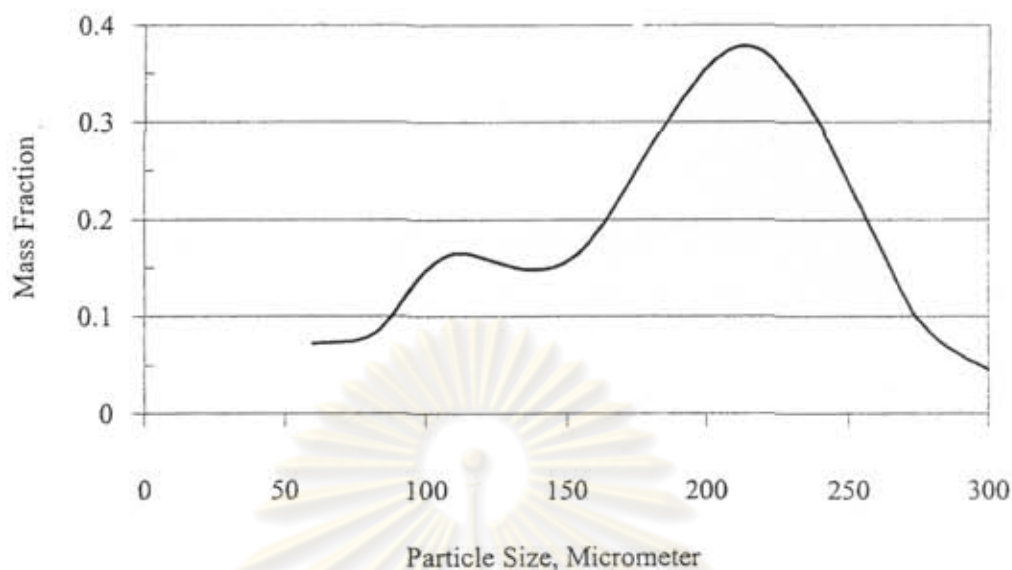
ภาพที่ 17 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 1

จากภาพที่ 17 เส้นโค้งแสดงการกระจายขนาดสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 1 พบว่าเส้นโค้งมีจุดยอด (Peak) อยู่สองจุด คือ จุดที่อนุภาคมีขนาด 110 ไมโครเมตร และ จุดที่อนุภาคมีขนาด 215 ไมโครเมตร โดยอนุภาคมีปริมาณร้อยละ 30 และร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งทำให้เส้นโค้งแสดงการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองนี้มีลักษณะแตกต่างจากเส้นโค้งปกติ (Normal Curve) และแสดงให้เห็นว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์จากตัวอย่างการทดลองนี้มีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอทำให้อนุภาคของผลิตภัณฑ์มีการกระจายขนาดที่กว้าง ค่ามวลขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยจะได้ 177.29 ไมโครเมตร



ภาพที่ 18 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 2

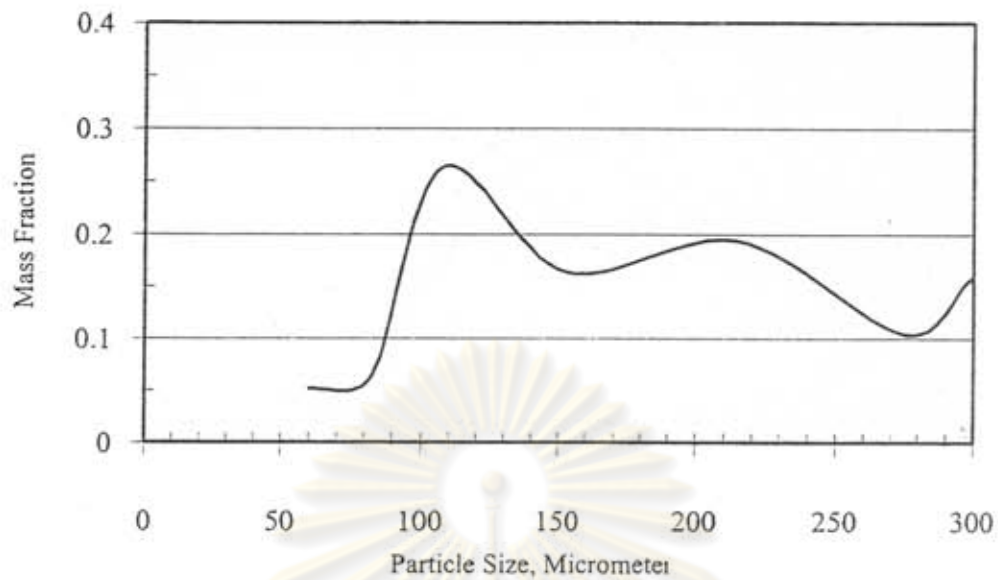
จากภาพที่ 18 เส้นโค้งแสดงการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองที่ 2 พบว่าเส้นโค้งมีจุดยอดที่อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 ไมโครเมตร ในปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และที่อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 ไมโครเมตร ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยในช่วงที่อนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 ถึง 150 ไมโครเมตร มีลักษณะเป็นเส้นโค้งปกติ อนุภาคของผลิตภัณฑ์จากตัวอย่างการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายขนาดที่กว้าง ค่ามวลขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยจะได้ 162.24 ไมโครเมตร



ภาพที่ 19 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 3

จากภาพที่ 19 เห็นโค้งการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองที่ 3 พบว่าเส้นโค้งการกระจายเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับเส้นโค้งปกติ โดยมีจุดยอดอยู่ที่ 110 ไมโครเมตร ในปริมาณร้อยละ 38 โดยน้ำหนัก แต่อนุภาคของผลิตภัณฑ์มีการกระจายขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้าง และคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซึ่งเฉลี่ยโดยน้ำหนักได้ 155.64 ไมโครเมตร

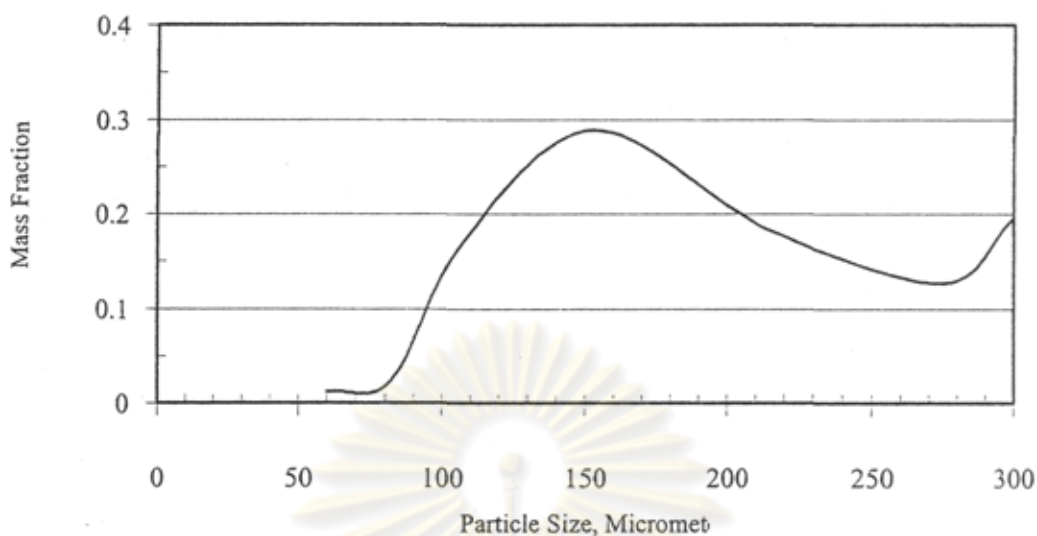
จากการทดลองในตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ร้อยละ 25, 15 และ 7.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์มีลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคที่สม่ำเสมอมากขึ้นตามลำดับ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซึ่งเฉลี่ยโดยน้ำหนักลดลงโดยลำดับ



ภาพที่ 20 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 4

จากภาพที่ 20 เส้นโค้งแสดงการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสำหรับผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองที่ 4 พบว่าเส้นโค้งมีจุดยอดอยู่สองจุดคือที่อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 และ 210 ไมโครเมตร ในปริมาณร้อยละ 25 และร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ อนุภาคของผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองนี้มีลักษณะการกระจายขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่กว้าง แสดงว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์จากตัวอย่างการทดลองนี้มีลักษณะรูปร่างและเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่สม่ำเสมอ คำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยโดยน้ำหนักจะได้ 179.80 ไมโครเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

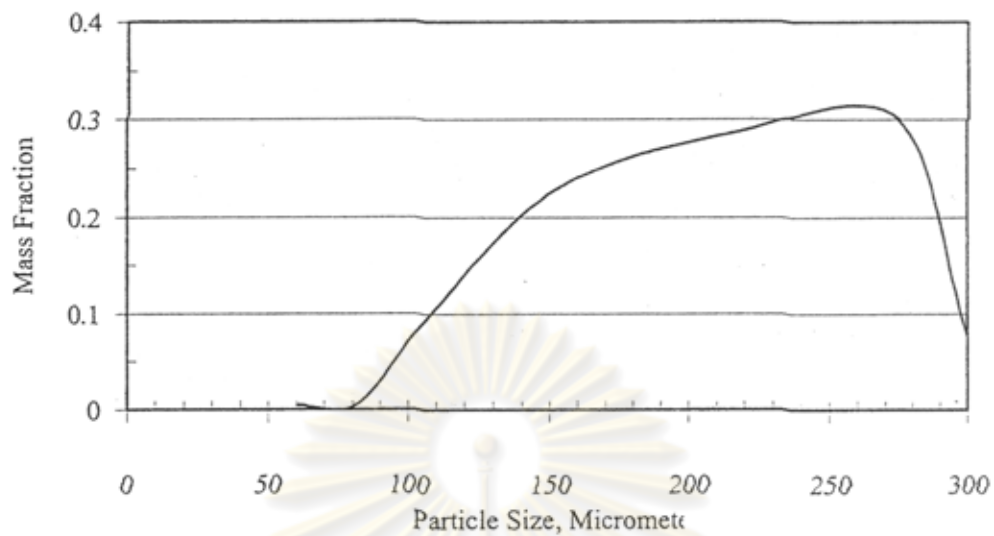


ภาพที่ 21 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 5

จากภาพที่ 21 เส้นโค้งการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในตัวอย่างการทดลองที่ 5 พบว่ามีลักษณะที่ใกล้เคียงกับเส้นโค้งปกติ มีจุดสูงสุดของเส้นโค้งอยู่ที่อนุภาคขนาด 150 ไมโครเมตร ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก อนุภาคของผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองนี้มีลักษณะการกระจายขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้าง ค่าพวมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในตัวอย่างการทดลองนี้เฉลี่ยโดยน้ำหนักจะได้ 197.76 ไมโครเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

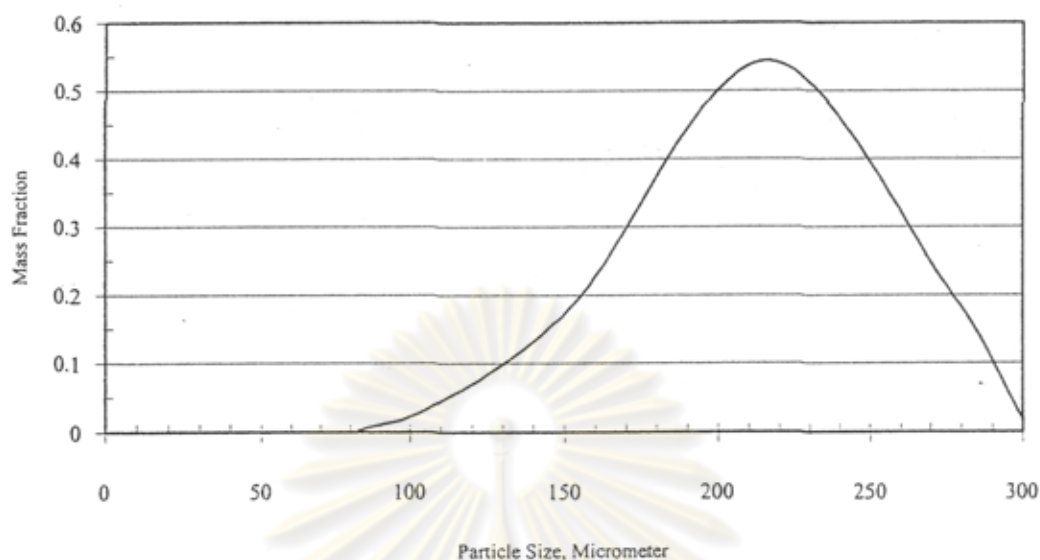




ภาพที่ 22 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 6

ส่วนผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองที่ 6 จากภาพที่ 22 เส้นโค้งแสดงการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคไม่ปรากฏจุดยอดของเส้นโค้งอย่างชัดเจน แสดงว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์สำหรับตัวอย่างการทดลองนี้มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ขนาดต่าง ๆ ในปริมาณใกล้เคียงกัน และมีการกระจายขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้าง ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสำหรับผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองนี้เฉลี่ยโดยน้ำหนัก จะได้ 213.09 ไมโครเมตร

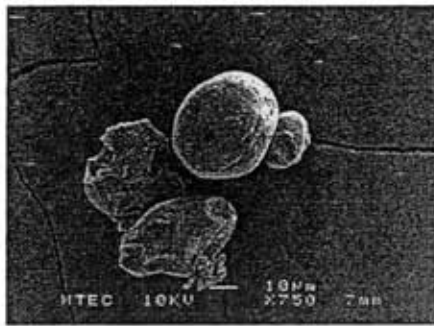
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



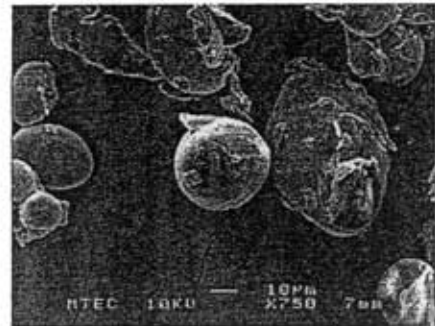
ภาพที่ 23 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับ Sephadex G-25

จากภาพที่ 23 Sephadex G-25 มีเส้นโค้งลักษณะการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเป็นลักษณะของเส้นโค้งปกติ มีจุดสูงสุดของเส้นโค้งที่อนุภาคขนาดประมาณ 210 ไมโครเมตร แสดงว่าอนุภาคมีลักษณะของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปร่างที่สม่ำเสมอ ค่ามวลขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยโดยน้ำหนักจะได้ 212.09 ไมโครเมตร

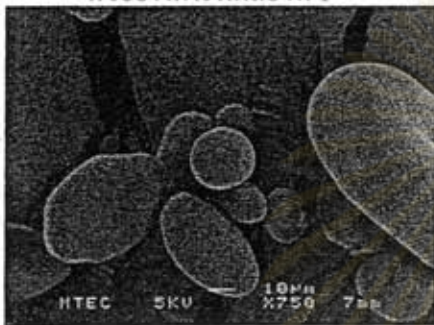
ลักษณะของเส้นโค้งแสดงการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์จะมีการกระจายขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่กว้างเมื่อเทียบกับ Sephadex G-25 แสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้เครื่องมือที่ทางภาควิชาจัดหาค้างกล่าวในหัวข้ออุปกรณ์และวิธีการวิจัย ทำให้ควบคุมขนาดอนุภาคของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอได้ยาก และเนื่องจากอนุภาคของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีการกระจายขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับอนุภาคที่กว้างเมื่อเทียบกับ Sephadex G-25 ทำให้อนุภาคของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีความสามารถในการอัดตัว (Compressibility) ที่สูงกว่า Sephadex G-25



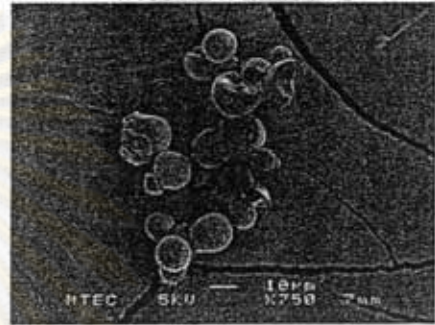
ตัวอย่างการทดลองที่ 1



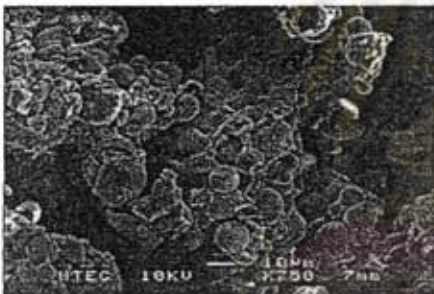
ตัวอย่างการทดลองที่ 2



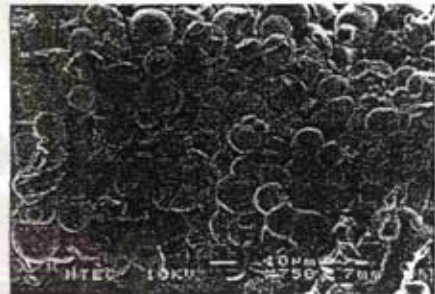
ตัวอย่างการทดลองที่ 3



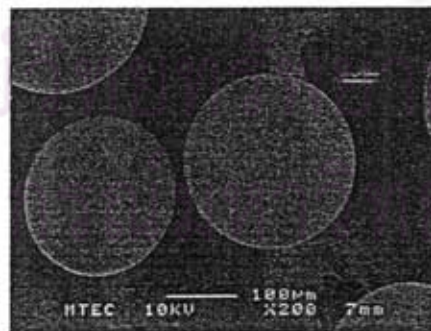
ตัวอย่างการทดลองที่ 4



ตัวอย่างการทดลองที่ 5



ตัวอย่างการทดลองที่ 6



ศูนย์  
จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย

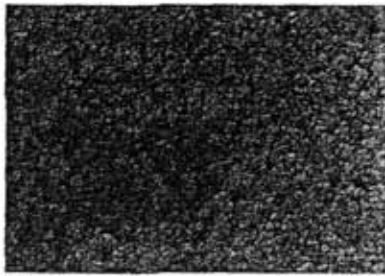
Sephadex G-25

ภาพที่ 24 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM ของอนุภาคผลิตภัณฑ์ และ Sephadex G-25)

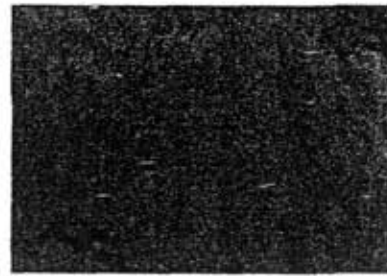
สำหรับภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ Scanning Electron Microscope (SEM) (ภาพที่ 24) ซึ่งเป็นภาพถ่ายที่แสดงลักษณะรูปทรงของอนุภาคสำหรับผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้ และ Sephadex G-25 พบว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้แต่ละอนุภาคมีขนาดไม่เท่ากันและมีลักษณะของพื้นผิวที่ไม่เรียบ บางอนุภาคมีลักษณะที่ไม่เป็นทรงกลม บางอนุภาคแตกออกโดยมีลักษณะที่เป็นเหลี่ยม ทำให้มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพด้านต่าง ๆ ได้แก่ Angle of Fall, Angle of Repose, Angle of Difference, Angle of Spatula, Compressibility รวมทั้ง Degree of Flowability และ Degree of Floodability ซึ่งแตกต่างจาก Sephadex G-25 ที่อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่สม่ำเสมอ โดยความแตกต่างนี้มีผลมาจากข้อจำกัดของชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองวิจัยตั้งที่กล่าวถึงในหัวข้อของอุปกรณ์และวิธีการวิจัย ที่ใช้ในขั้นตอนการนำสารละลาย Viscose มาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads มีข้อจำกัดในการควบคุมลักษณะในด้านของขนาดและรูปทรงสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้ให้มีความสม่ำเสมอ



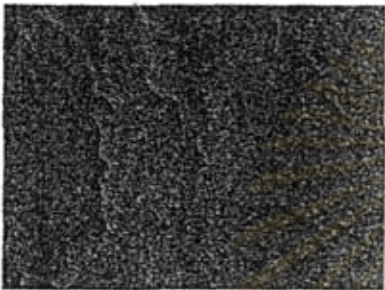
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



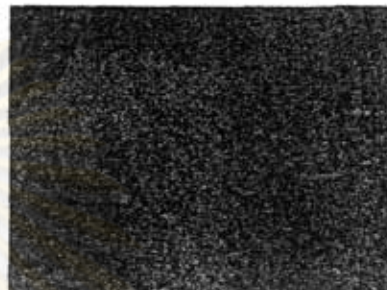
ตัวอย่างการทดลองที่ 1



ตัวอย่างการทดลองที่ 2



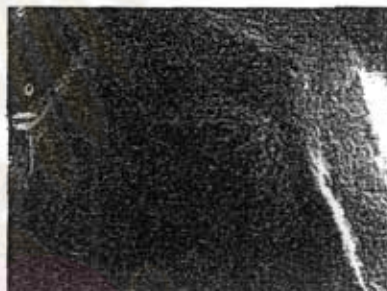
ตัวอย่างการทดลองที่ 3



ตัวอย่างการทดลองที่ 4



ตัวอย่างการทดลองที่ 5



ตัวอย่างการทดลองที่ 6



Sephadex G-25

ภาพที่ 25 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM แสดงลักษณะของพื้นผิว สำหรับอนุภาคผลิตภัณฑ์ และ Sephadex G-25

จากภาพที่ 25 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงลักษณะของพื้นผิวสำหรับผลิตกัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 โดยสามารถมองเห็นรูพรุน (Pore) บนพื้นผิวของทั้งผลิตกัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้ และ Sephadex G-25 จากการทดลองพบว่าผลิตกัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ในตัวอย่างการทดลองที่ 5 ซึ่งใช้เส้นใยฝ้ายเป็นวัตถุดิบในการเตรียมสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็น Micro-porous Spherical Cellulose Beads มีลักษณะของพื้นผิวใกล้เคียงกับ Sephadex G-25 มากที่สุด



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### สรุปผลการวิจัย

1. จากการวิจัยโดยตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นอนุภาคของวัสดุที่มีรูพรุนรูปทรงกลมจากสารประกอบของเซลลูโลส และมีการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้กับ Sephadex G-25 โดยเมื่อเปรียบเทียบ Angle of Repose ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่าสูงกว่า Sephadex G-25 ถึงประมาณเท่าตัว ซึ่ง Angle of Repose บ่งบอกศักยภาพของ Flowability ของวัสดุผงแห้ง แสดงว่า ศักยภาพ Flowability ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ยังต่ำกว่า Sephadex G-25 เปรียบเทียบ Angle of Spatula หรือ นุ่มที่บ่งบอกถึงแรงเสียดทานภายในของวัสดุผง พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่า Angle of Spatula สูงกว่า Sephadex G-25 ซึ่งแสดงว่า ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคสูงกว่า Sephadex G-25 และความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ส่งผลต่อ Angle of Repose และ Angle of Spatula โดยทำให้มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย Viscose

2. ความเข้มข้นของสารละลาย Viscose มีผลสำหรับความหนาแน่นของอนุภาคที่แท้จริง หรือ He Density ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้รวมทั้ง Aerated Bulk Density และ Packed Bulk Density ด้วย ซึ่งค่าที่วัดได้จากผลการทดลองไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย Viscose แต่ค่าความสามารถในการอัดตัว (Compressibility) ของผลิตภัณฑ์จากการวิจัยมีค่าสูงกว่า Sephadex G-25 มาก โดยมีสาเหตุมาจาก ผลิตภัณฑ์จากการวิจัยมีการกระจายขนาดของอนุภาคที่กว้างกว่า Sephadex G-25 ซึ่งทำให้อัดตัวกันได้ดีกว่า ดังนั้นเมื่อนำค่าดัชนีของค่าต่าง ๆ ที่ได้มารวมกันตามตารางผนวกที่ 1 ทำให้สามารถหาค่า Flowability ได้ ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่าต่ำกว่า Sephadex G-25

3. Angle of Fall ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย Viscose เช่นกัน โดยผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ มีค่า Angle of Fall สูงกว่า Sephadex G-25 มาก และจากการวัดค่า Dispersibility ซึ่งเป็นการบ่งบอกการฟุ้งกระจายของอนุภาคที่มากขึ้นเมื่อค่า Dispersibility สูงขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่า Dispersibility มีค่าต่ำกว่า Sephadex G-25 แสดงว่า Sephadex G-25 มีความสามารถในการฟุ้งกระจายได้ดีกว่า เมื่อนำค่าดัชนีจาก Angle of Fall, Dispersibility, Angle of

Difference และ Flowability จากตารางหมวดที่ 2 มารวมกันจะได้ค่า Floodability พบว่ามีค่าต่ำกว่า Sephadex G-25 แสดงว่า Sephadex G-25 แพร่กระจายตัวได้ดีกว่า ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้

4. จากการทดลองหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ปริมาตรของรูพรุน และ พื้นที่ผิวของอนุภาค พบว่ามีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการเตรียมขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ลดลง

5. สำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 4 ถึง 6 เป็นการทดลองเปรียบเทียบผลของวัตถุดิบที่ใช้เตรียมสารละลาย Viscose คือคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เมื่อเปรียบเทียบค่า Flowability พบว่าตัวอย่างการทดลองที่ 6 ซึ่งใช้เยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบมีค่า Flowability สูงที่สุด ซึ่งแสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้เยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบ มีคุณสมบัติการเคลื่อนตัวของอนุภาคดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบค่า Floodability พบว่าพบว่าการทดลองที่ 6 ซึ่งใช้เยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบมีค่า Floodability สูงที่สุด แสดงว่ามีการแพร่กระจายได้ดีที่สุด แต่ค่าทั้งสองของผลิตภัณฑ์ยังต่ำกว่า Sephadex G-25

6. คุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ โดยเฉพาะ Flowability และ Floodability ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่าน้อยกว่า Sephadex G-25 เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือในการผลิต ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ที่ทางภาควิชาไม่มีความสะดวกในการจัดหาเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

7. จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าผลิตภัณฑ์จากการทดลองที่ 5 มีลักษณะของพื้นผิวใกล้เคียงกับ Sephadex G-25 มากที่สุด

8. เมื่อทดสอบหาปริมาณของเหล็กและซิลิกอนในผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 พบว่ามีเหล็กและซิลิกอนในผลิตภัณฑ์จากการวิจัยในปริมาณที่ใกล้เคียงกับ Sephadex G-25 แสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีความปลอดภัยเพียงพอที่จะใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่นเดียวกับ Sephadex G-25



9. จากการทดสอบการกระจายขนาดของอนุภาคพบว่าผลิตภัณฑ์จากตัวอย่างการทดลองที่ 3 และ 5 มีการกระจายขนาดของอนุภาคที่ดีที่สุดคือเส้นกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคเป็นเส้นโค้งปกติใกล้เคียงกับ Sephadex G-25 มากที่สุด

#### ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยต่อ

1. ควรมีการวิเคราะห์หาสารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ นอกจาก เหล็ก อลูมิเนียม และซิลิกอน
2. การขยายขนาดของชุดเครื่องมือ ในการปั่นกวนควรเป็นเครื่องมือที่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้อย่างแม่นยำ
3. พัฒนาระบบการผลิตโดยใช้เครื่องมือที่สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เป็นผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น โดยการเปลี่ยนจากการให้ของเหลวที่มีความหนืดสูงกระจายตัวอยู่ในน้ำมันแล้วจึงค่อยขึ้นรูปด้วยกรด เป็นการนำของเหลวไหลผ่านรูซึ่งสามารถควบคุมขนาดได้แล้ว จึงปั่นด้วยความเร็วแทน
4. ทดลองผสมวัสดุชนิดอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษบางประการในผลิตภัณฑ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## เอกสารอ้างอิง

- นวลแข ปาลิวณิช. 2542. ความรู้เรื่องผ้าและเส้นใย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- มณฑา จันทร์เกตุเสียด. 2542. วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น. สมาคมคหเศรษฐศาสตร์แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ. 330 น.
- วีระศักดิ์ ยุคมกิจเดชา. 2543. วิทยาศาสตร์เส้นใย. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ 323 น.
- สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2536. เอกสารวิชาการเรื่อง ฝ้าย. 168 น.
- Anzar, M., E.F. Graham and N. Iqbal., 1996, Post-Thaw Plasma Membrane Integrity of Bull Spermatozoa Separated with a sephadex Ion-Exchange Column, *Theriogenology*, 47: 845-856
- Candau, F. 1990. Polymerization in Inverse Emulsion and Micro-emulsions. **An Introduction to Polymer Colloid**. Kluwer Academic Publisher, London.
- Croucher, M.D. and M.A. Winnik. 1990. Preparation of Polymer Particles by Dispersion Polymerization. **An Introduction to Polymer Colloid**. Kluwer Academic Publisher, London.
- Daniel, J.R. 1986. *Encyclopedia of Polymer Science & Engineering*. Purdue University. 1(3): 90-117.
- Davidson, R., H. Nyqvist and G. Ragnarsson. 1995. Porous Cellulose Matrices-A Novel Excipient in Pharmaceutical Formulation. **Cellulose and Cellulose Derivatives: Physico-chemical Aspects and Industrial Applications**. 445-452.

- Jones, D.T., K.R. Riss and G.E. Jowett. 1975. **Ion Exchange Cellulose**. The Patent Office London 1383265..
- Kahle, C.F. 2001. Micro-Porous Organic Thin Film by the solvent precipitation Method. **Ind. Eng. Chem.** 40: 33-36.
- Klemm, D., Philipp, Bertram, T. Heinze, U. Heinze and W. Wagenknecht. 1998. **Comprehensive Cellulose Chemistry**., Wiley-VCH.
- Laszkiewicz, B., P. Weislo and B. Domasik. 1990. Preparation of Viscose Fibres from Concentrated Solution of Sodium Cellulose Xanthate. **Cellulose Source and Exploitation**. Ellis Horwood Limited, West Sussex.
- Lönnerberg, B., S. Rosenberg and K. Lönnqvist. 1995. Rheology of Cellulose Viscose. **Cellulose and Cellulose Derivatives: Physico-chemical Aspects and Industrial Applications**. 475-482.
- Nissan, A.H. and G.K Hunger. 1986. West Virginia Pulp & Paper Company. **Encyclopedia of Polymer Science & Technology**. 1(3): 131-226.
- O'Connor, Robert T. 1972. **Instrumental Analysis of Cotton Cellulose and Modified Cotton Cellulose**. Marcel Dekker, Inc., New York. 490 p.
- Preston, R.D. 1986. Natural Cellulose. **Cellulose Structure Modification and Hydrolysis**. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Rawski, E.D. and C.A. Cole. 1997. Conversion of Old Newspaper and Other Post-consumer Recycled Paper to Regenerated Cellulose. **Journal of Solid Waste Technology and Management**. 24 (3): 143-148.

Rubens Monti, Jonas Contiero and Antonio Jose Goulart., 2004, Isolation of Natural Inhibitors of Papain Obtained from *Carica papaya* Latex., **Brazilian Archives of Biology and Technology**, 47(5): 747-754

Seyama, M., I. Sugimoto and T. Miyaki. 2001. Detection and Discrimination of Odors Generated from Essential Oils with an Array of Quartz Crystal Resonators Coated with Plasma-Deposited Polymers. **Analytical Science** 2001. 17: i257-i260.

Sylvana, C. M. Agostinho, H. T. Maria, R. P. Janice, Maecel Tabak and Hidetake Imasato., 1997. Fluorescence Studies of Extracellular Hemoglobin of *Glossoscolex paulistus* in Metalloproteinase From Obtained from Sephadex Gel Filtration., **Biochem. Physiol.** 118(1): 171-181

Young, R.A. and M.A. Rowell. 1986. Structure, Swelling and Bonding of Cellulose Fibers. **Cellulose Structure Modification and Hydrolysis**. John Wiley and Sons, Inc., New York.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย