รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การผลิตตัวดูดซับรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจากสารประกอบของเซลลูโลสเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยาและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

Production of the Porous Spherical Cellulose for Pharmaceutical and Petrochemical Industries

โดย

ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และคณะ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน
ประจำปีงบประมาณ 2546

ชื่อโครงการย่อย	การผลิตตัวดูดซับรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจากสารประกอบของเซลลูโลส เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยาและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี Production of the Porous Spherical Cellulose for Pharmaceutical and Petrochemical Industries
คณะวิจัย	
หัวหน้าโครงการ	รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์
ตำแหน่ง	อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองหัวหน้าโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. หทัยชนก ดุริยะบรรเลง
ตำแหน่ง	อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ร่วมวิจัย	นายปรีชา แสงธีระปิติกุล
ผู้ช่วยวิจัย	นายธนิต เมธีนุกูล นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการผลิตตัวดูดซับรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจากผลผลิตทางการเกษตรกรรม โดยใช้ชานอ้อยซึ่งเป็นผลิตผลจากการเกษตรกรรมที่หาได้ง่ายและมีราคาถูกในประเทศไทย โดยเลือกจากชานอ้อย ฝ้าย หรือ เยื่อกระดาษ 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 ชั่งโมง แล้วเติม CS_2 ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ได้ Cellulose Xanthate จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางที่อุณหภูมิ 4 °C จะได้ Viscose ซึ่งจะนำไปเตรียมเป็นสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า ความหนาแน่นของอนุภาค พื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนมีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ Viscose ลดลง เมื่อเปรียบเทียบวัตถุดิบพบว่าผลิตภัณฑ์จากเยื่อกระดาษมีพื้นที่ผิวมากที่สุด ความหนาแน่นของอนุภาคผลิตภัณฑ์ที่มีค่าใกล้เคียงกับ Sephadex G-25 มากที่สุดคือในตัวอย่างการทดลองที่ 2 โดยมีค่า 1.48 g/cc ในขณะที่ความหนาแน่นของSephadex G-25 มีค่า 1.42 g/cc ผลิตภัณฑ์ผลิตในตัวอย่างการทดลองที่ 1 มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุน คือ 0.007 m^2/g และ 0.00667 cc/ g ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับ Sephadex G-25 ที่มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุน คือ 0.001 m^2/g และ 0.00649 cc/g ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยมีการกระจายขนาดของอนุภาคที่กว้างกว่า Sephadex G-25

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่
เลขทะเบียน 014598
วัน, เดือน, ปี 6 ก.ค. 53

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 $^{\circ}C$ for 5 hours. Pure CS_2 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^2/g and 0.00667 cc/g respectively. That is close to sephadex G-25 which are 0.001 m^2/g and 0.00649 cc/g respectively. Product particles have the size distribution wider than sephadex G-25.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจากโครงการวิจัยร่วมภาครัฐ-เอกชน ของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีอนุภาค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2545 และ 2546 ทุนเมธีวิจัยอาวุโส (ศ.ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล) 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
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วัตถุดิบและสารเคมี	31
วิธีการวิจัย	32
ผลและวิจารณ์	38
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
สรุปผลการวิจัย	58
ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยต่อ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	63
ภาคผนวก ก ความหมายของค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองหาสมบัติทางฟิสิกส์จากเครื่อง Powder Tester	64
ภาคผนวก ข การคำนวณหาค่า Uniformity	67
ภาคผนวก ค ตารางค่าดัชนีของ Flowability และ Floodability	75
ภาคผนวก ง แบบจำลองการเกิดรูพรุนของอนุภาคที่เป็นผลิตภัณฑ์	78
ภาคผนวก จ การกระจายขนาดของรูพรุนในอนุภาค	80

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความทนต่อแรงดึงของเซลลูโลส	5
2	สมบัติทางกายภาพบางประการของเซลลูโลส	6
3	แหล่งที่พบเซลลูโลสตามธรรมชาติ	7
4	ความร้อนจากการดูดซับน้ำของเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ	12
5	องค์ประกอบโดยรวมของฝ้าย หวายบางชนิดและไม้จำพวกสน	19
6	สรุปการเตรียมตัวอย่างการทดลอง	36
7	Angle of Repose และ Angle of Spatula	38
8	ความหนาแน่นและ Compressibility	40
9	Uniformity และ Degree of Flowability	42
10	Angle of Fall, Angle of Difference, Dispersibility และ Degree of Floodability	43
11	ขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย ปริมาตรของรูพรุนและพื้นที่ผิวของอนุภาค	46
12	ปริมาณของซิลิคอนและเหล็กในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมของอนุภาค	47

ตารางผนวกที่		
1	เปรียบเทียบขนาดของอนุภาคและความหนาแน่นโดยเฉลี่ย	68
2	ดัชนีสำหรับประเมินค่า Flowability	76
3	ดัชนีสำหรับประเมินค่า Floodability	77

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สูตรโครงสร้างของกลูโคส	4
2	โครงสร้างแบบ Fischer ของ D-glucose	9
3	โครงสร้างของหน่วยโมโนเมอร์แบบเก้าอี้ในสองลักษณะของกลูโคส	9
4	พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของเซลลูโลส	10
5	ทางเลือกที่เป็นไปได้ของการจัดเรียงตัวในผลึก Micelle	11
6	สมดุลในการดูดซับน้ำของเซลลูโลส	12
7	การแตกตัวด้วยสารละลายอัลคาไลของเซลลูโลส	15
8	ชั้นของผนังเซลล์ของไม้	16
9	โครงสร้างของ Micro-fibril	18
10	(A) พื้นผิวส่วนที่ประสานกันของส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึก (B) พื้นผิวส่วนที่มีความไม่เป็นระเบียบเพียงเล็กน้อย (C) พื้นผิวส่วนที่มีการบิดเป็นเกลียว	18
11	Phase Diagram ของ Seiner	24
12	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 1	47
13	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 2	48
14	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 3	49
15	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 4	50
16	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 5	51
17	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 6	52
18	การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับ Sephadex G-25	53
19	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM ของอนุภาคผลิตภัณฑ์และ Sephadex G-25	54
20	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM แสดงลักษณะของพื้นผิว สำหรับอนุภาคผลิตภัณฑ์และ Sephadex G-25	56

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
1	แผนภาพการเลือกใช้ระหว่าง Cohesion หรือ Uniformity	69
2	การหาค่า Uniformity ของตัวอย่างการทดลองที่ 1	71
3	การหาค่า Uniformity ของตัวอย่างการทดลองที่ 2	71
4	การหาค่า Uniformity ของตัวอย่างการทดลองที่ 3	72
5	การหาค่า Uniformity ของตัวอย่างการทดลองที่ 4	72
6	การหาค่า Uniformity ของตัวอย่างการทดลองที่ 5	73
7	การหาค่า Uniformity ของตัวอย่างการทดลองที่ 6	73
8	การหาค่า Uniformity ของ Sephadex G-25	74
9	แบบจำลองการเกิดรูพรุนในอนุภาคของผลิตภัณฑ์	79
10	การกระจายขนาดของรูพรุนจากตัวอย่างการทดลองที่ 1	81
11	การกระจายขนาดของรูพรุนจากตัวอย่างการทดลองที่ 2	81
12	การกระจายขนาดของรูพรุนจากตัวอย่างการทดลองที่ 3	82
13	การกระจายขนาดของรูพรุนจากตัวอย่างการทดลองที่ 4	82
14	การกระจายขนาดของรูพรุนจากตัวอย่างการทดลองที่ 5	83
15	การกระจายขนาดของรูพรุนจากตัวอย่างการทดลองที่ 6	83
16	การกระจายขนาดของรูพรุนจาก Sephadex G-25	84

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การผลิตตัวดูดซับรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจากสารประกอบของเซลลูโลสเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยาและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

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 วิธีการที่ได้รับความสนใจและให้ผลดีที่สุดคือ วิธี Solvent Precipitation รูพรุนที่ได้จะมีทั้งขนาดเล็กระดับอังสตรอม คือ10^{-8} cm.จนถึงขนาดเล็กระดับ Micron โพลีเมอร์ที่ใช้เตรียมตัวดูดซับที่มีรูพรุนอาจใช้ได้ทั้งเทอร์โมพลาสติกหรือเทอร์โมเซตติ้ง ตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการ Solvent Precipitation เป็นสารที่สามารถละลายโพลีเมอร์ได้และมี Non-solvent ซึ่งเป็นสารที่ไม่ละลายโพลีเมอร์ที่เป็นสารตั้งต้น แต่ละลายได้ในสารละลาย หลักการสำคัญของกระบวนการ Solvent Precipitation คือการผสมกันของสารตั้งต้นทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วนำสารละลายที่ได้หยดลงในของเหลวที่ละลายส่วนของ Non-solvent ออก สารละลายที่หยดลงไป จะกลายเป็นของแข็งรูปทรงกลมและมีรูพรุน จากนั้นจึงนำไปทำให้แห้งจะได้เม็ด Beads ของแข็งรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจากนั้นจึงนำไปทดลอง การไหลของของเหลวผ่านเม็ด Bead ความหนาแน่น ทดสอบความพรุนและหาขนาดของรูพรุน จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

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

งานวิจัยนี้เกิดจากความต้องการในการลดการนำเข้าวัสดุรูปทรงกลมที่มีรูพรุน (Porous Spherical Beads) จากต่างประเทศซึ่งจำเป็นต้องใช้ในกระบวนการดูดซับ งานวิจัยนี้จึงมีส่วนช่วยในการพัฒนาการผลิตทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมยาซึ่งใช้เป็น Medicine Loading (ตัวรองรับ) ทั้งในด้านการค้นคว้าเพื่อพัฒนาวัสดุที่ใช้และช่วยลดต้นทุนในการผลิตทางอุตสาหกรรมอันเป็นการลดการนำเข้าวัสดุรูพรุนจากต่างประเทศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาโพลีเมอร์ที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลสเป็นหลักเพื่อเป็นวัตถุดิบในการเตรียม Micro porous Spherical Cellulose Beads

2. ทดลองเตรียม Porous Spherical Cellulose Bead

3. ศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุรูพรุนที่ผลิตได้ด้วยวัสดุรูพรุนที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ (Sephadex G-25)

ขอบเขตการวิจัย

1. เพื่อศึกษากรรมวิธีการผลิต Micro-porous Spherical Cellulose Beads รูปทรงกลมเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมาก และ มีความแข็งแรงสูง

2. การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของ Micro-porous Spherical Cellulose Beads

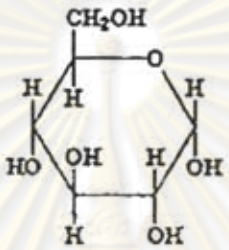
3. การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ Micro-porous Spherical Cellulose Beads

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การตรวจเอกสาร

เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งในหลาย ๆ ชนิดที่พบในธรรมชาติเช่นไม้ กระดาษและฝ้าย สารประกอบเซลลูโลสเกิดจากกลูโคสโมโนเมอร์หลายหน่วยซ้ำ ๆ กันดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างของกลูโคส

เซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ของกลูโคสที่ยาวประมาณ 4,000 ถึง 8,000 โมเลกุล เซลลูโลสโมเลกุลมีความแข็งแรงสูงมากซึ่งสามารถย่อยสลายได้โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลส เซลลูโลสจะให้ความแข็งแรงและเป็นโครงสร้างให้กับพืช เซลลูโลสถูกพบอยู่ร่วมกับเฮไมเซลลูโลส (Hemi-Cellulose) และ ลิกนิน (Lignin)

เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบสำคัญของพืชทุกชนิดและเป็นโพลิเมอร์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามเซลลูโลสจากพืชชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันอาจมีน้ำหนักโมเลกุล Degree of Molecular Orientation และคุณสมบัติทางโครงสร้างไม่เหมือนกัน โดยจะพบว่าฝ้ายเป็นโพลิเมอร์ธรรมชาติที่มีปริมาณของเซลลูโลสสูงสุด

เซลลูโลสมีโครงสร้างในลักษณะผลึกที่เป็นระเบียบ (Crystalline) แข็งแรงและทนต่อการถูกไฮโดรไลซีส ส่วนเฮไมเซลลูโลส มีโครงสร้างในลักษณะอสัณฐาน (Amorphous) ไม่เป็นระเบียบ มีความแข็งแรงต่ำ ถูกไฮโดรไลซีสกลับได้ง่ายด้วยกรดหรือด่างเจือจาง

เซลลูโลสเป็น Polysaccharide ตัวหลักในผนังเซลล์ของพืช อนุพันธ์ของเซลลูโลสบางชนิด เช่น Cellulose Xanthate ค้นพบโดย Cross และ Bevan และเซลลูโลสไนเตรต ถูกค้นพบโดย

Bracannot ซึ่งต่างก็เป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในทางอุตสาหกรรม Franchimont ค้นพบวิธีการผลิตเซลลูโลสอะซีเตรตจากปฏิกิริยาที่เกิดกับ อะซีติคแอนไฮไดรด์ (Acetic Anhydride) โดยมีกรดซัลฟิวริก หรือซิงค์คลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เซลลูโลสบริสุทธิ์เป็นที่รู้จักกันในชื่อของอัลฟ่าเซลลูโลส(α-cellulose) คือสารที่ละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5% เบต้าเซลลูโลส (β-cellulose) และแกมม่าเซลลูโลส (γ-cellulose) ไม่ใช่เซลลูโลสที่แท้จริง เบต้าเซลลูโลสนั้นเชื่อว่าเป็นอัลฟ่าเซลลูโลสที่ถูกทำให้ DP ลดลง ซึ่งเบต้าเซลลูโลสละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5% แต่จะตกตะกอนในสภาพที่เป็นกรด แกมม่าเซลลูโลสละลายได้ทุกสภาพความเป็นกรด-ด่างและถูกคิดว่าเป็นเฮไมเซลลูโลส เช่น ไซแลน (Xylans) แมนแนน (Mannans) และ กาแลคแทน (Galactans) เป็นต้น

คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (Physiochemical Properties) จะประกอบด้วยคุณสมบัติดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความทนต่อแรงดึงของเซลลูโลส

วัตถุดิบ	ความทนต่อแรงดึง (MPa)		ความแข็งแรงสัมพัทธ์ (เปียก/แห้ง) (%)	การยืดตัวเมื่อขาด (%)	
	แห้ง	เปียก		แห้ง	เปียก
ป่านรามี	900	1,060	117	2.3	2.4
ใยฝ้าย	200-800	200-800	105	6-12	6-13
ต้นฝ้าย	824	863	105	1.8	2.2
เรยอนเหลว	610	100-200	50	8-26	13-43
เซลลูโลส อะซีเตด	150-200	100-120	65	21-30	29-30

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพบางประการของเซลลูโลส

คุณสมบัติ	ค่าปริมาณ
ความถ่วงจำเพาะ (ไม่มีหน่วย)	
ในเฮปเทน	1.540
ในเบนซีน	1.570
ในน้ำ	1.604-1.609
ความหนาแน่นเมื่อวัดด้วย (X-ray g/ml)	
ส่วนของโครงสร้างผลึก	1.590-1.630
ส่วนอสัณฐาน	1.482-1.489
ร้อยละของความเป็นโครงสร้างผลึกโดยเฉลี่ย	
เซลลูโลสแบบดั้งเดิม	70
เซลลูโลสที่ขึ้นรูปใหม่	40
ความร้อนจำเพาะ (J/g°C)	1.22
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟได้ (°C)	>290
ความร้อนจากการเผาไหม้ kJ/g	17.43
ค่าคงที่ของฉนวนไฟฟ้า (ไม่มีหน่วย)	
แผ่นเยื่อกระดาษ	2.2-2.3
ส่วนของโครงสร้างผลึก	5.7
ความต้านทานการแยกตัวจากกัน (Ω.cm)	2×10^4
ค่าความเป็นฉนวน (kV/cm)	500

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประโยชน์และแหล่งที่พบของเซลลูโลส (Occurrence and Use)

ด้วยปริมาณที่มีมากมายของเซลลูโลสที่เกิดขึ้นในธรรมชาติตลอดเวลานั้นมีเพียงปริมาณเล็กน้อยเท่านั้นที่นำไปใช้ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อมนุษย์ เซลลูโลสที่พบอยู่ในธรรมชาติจะอยู่ในรูปแบบของอาหารและธัญพืช และใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือเครื่องแต่งบ้าน เป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์สำหรับผลิตเป็นกระดาษหรือสิ่งทอ และอนุพันธ์ของเซลลูโลส ซึ่งใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตกาว สารเพิ่มความเหนียวข้น ฟิล์ม ฟอยล์ และพลาสติก แหล่งธรรมชาติของเซลลูโลสแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แหล่งที่พบเซลลูโลสตามธรรมชาติ

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

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

การผลิตเยื่อกระดาษแบบกึ่งเชิงกลนั้น ไม้ถูกทำปฏิกิริยากับสารละลายซัลไฟต์ ไบซัลไฟต์ หรือไบคาร์บอเนต เพื่อทำให้ส่วนของลิกนินอ่อนนุ่มลง ไม้ที่เตรียมนำไปทำปฏิกิริยาจะถูกย่อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ ในขั้นตอนการรีไฟนิ่ง เพื่อกำจัด ลิกนินที่ถูกทำให้อ่อนนุ่มลง และจะได้เซลลูโลสบริสุทธิ์ การผลิตเยื่อกระดาษแบบกึ่งเคมีก็คล้ายกัน แต่ใช้เวลาในการย่อยนานกว่า และสารละลายที่

ใช้ย่อยมีความเข้มข้นมากกว่า กระบวนการย่อยและละลายบางส่วนของเซลลูโลส ผลที่ได้จะน้อยลง คือ 70-80% ของผลผลิตทั้งหมด

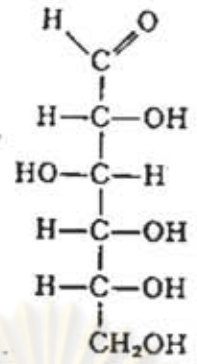
กระดาษที่ถูกผลิตขึ้นโดยวิธีทางเคมีซึ่งใช้สารเคมีละลายและกำจัดลิกนินออกทั้งหมด ผลที่ได้จะน้อยกว่าวิธีการผลิตแบบอื่นร้อยละ 50 แต่อย่างไรก็ตามวิธีการผลิตกระดาษแบบนี้จะทำให้ได้กระดาษสำหรับเขียนและพิมพ์ที่มีคุณภาพสูงสุด กระบวนการสกัดด้วยโซดา ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 25% รวมกับโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 2.4% เป็นสารที่ใช้สกัด ในขณะที่วิธีการสกัดด้วยซัลไฟต์ใช้ส่วนผสมของแคลเซียมไดไฮโดรเจนซัลไฟต์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) การผลิตกระดาษด้วยวิธีซัลเฟตใช้การรวมกันของโซดาไฟ โซเดียม คาร์บอเนต และโซเดียมโมโนซัลเฟต หลังจากการย่อยด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งเยื่อของไม้ถูกกำจัดออกจากเครื่องย่อย และเยื่อกระดาษได้ถูกทำให้บริสุทธิ์ด้วยการกรองและการล้าง กระดาษที่ไม่ได้ฟอกขาวผลิตได้แบบนี้โดยตรง แต่การผลิตกระดาษที่ละเอียดกว่า เยื่อกระดาษจะต้องถูกฟอกขาวโดยคลอรีน-ไฮโปคลอไรต์ คลอรีน-ไดออกไซด์ และ/หรือ การสกัดด้วยอัลคาไลโดยทั่วไปกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษโดยวิธีซัลเฟตจะได้เยื่อกระดาษที่มีสีเข้มกว่าวิธีการผลิตโดยใช้ซัลไฟต์ ดังนั้นการต้องการการฟอกขาวหลายขั้นตอนจะใช้การสกัดด้วยอัลคาไล เพื่อให้ได้เยื่อกระดาษที่มีความขาวสูง

โดยทั่วไปแล้วเซลลูโลสจากผนังเซลทุติยภูมิมีจำนวนของหน่วยกลูโคสต่อโมเลกุลของเซลลูโลสมากกว่าเซลลูโลสจากผนังเซลชั้นปฐมภูมิและไม้เนื้อแข็งมีจำนวนของหน่วยกลูโคสต่อโมเลกุลของเซลลูโลสมากกว่าไม้เนื้ออ่อน

<u>โครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure)</u>

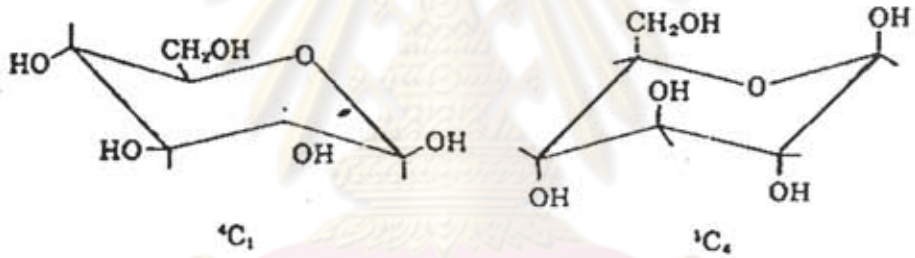
พื้นฐานของเซลลูโลส คือโมโนแซคคาไรด์ D-glucose ที่มีสูตรทางเคมี $C_6H_{12}O_6$ และโครงสร้างของ Fischer:

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2 โครงสร้างแบบ Fischer ของ D-glucose

การจัดเรียงตัวของหน่วยโมโนเมอร์ของ D-glucose อาจปรากฏในการจัดเรียงตัวได้หลายรูปแบบรวมทั้งโครงสร้างแบบเก้าอี้ 2 แบบ



ภาพที่ 3 โครงสร้างของหน่วยโมโนเมอร์แบบเก้าอี้ในสองลักษณะของกลูโคส

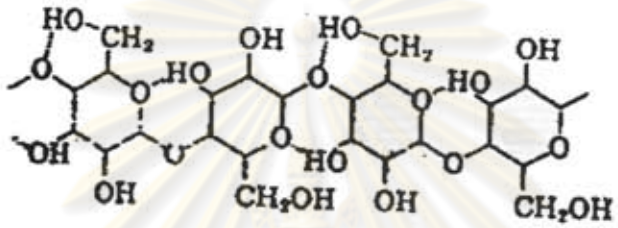
โครงสร้างแบบเรือก็สามารถจัดเรียงตัวได้แต่ไม่ปรากฏบ่อยนัก เพราะมีความเครียดภายในวงแหวน

พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)

เครื่องมือ Spectroscopy ทำให้ทราบถึงพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลและภายนอกโมเลกุลซึ่งมีความสำคัญในลักษณะทางเคมีและกายภาพของเซลลูโลส พันธะภายในโมเลกุล ให้ความแข็งแรงหรือแน่นหนากับโมเลกุลของเซลลูโลส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยปกติจะพบคำว่าเนทีฟเซลลูโลสซึ่งก็คือรีเจนเนอร์เรตเซลลูโลส หรือเซลลูโลสที่ตกตะกอนออกมาจากสารละลายซึ่งโดยทั่วไปเป็นสารละลายด่าง โฮโลเซลลูโลส คือผนังเซลล์ของพืชที่ได้ถูกกำจัดส่วนที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต หรือ ลิกนิน ออก (โฮโลเซลลูโลส = เซลลูโลส + เฮไมเซลลูโลส) และเฮไมเซลลูโลส คือโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งถูกสกัดได้ง่ายด้วยสารละลายด่างเจือจาง เซลลูโลส I และ เซลลูโลส II ถูกใช้เพื่อจำแนกคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างผลึกของหน่วยของเซลลูโลส



ภาพที่ 4 พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของเซลลูโลส

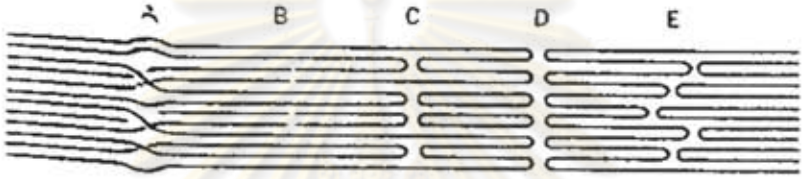
พันธะไฮโดรเจนหลักภายในโมเลกุลของเซลลูโลสจะอยู่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่ตำแหน่ง C-3 ของ Anhydro-D-glucose ที่เหลือและออกซิเจนของส่วนที่ใกล้เคียงที่เหลืออาจจะมีอันตรกิริยา ระหว่างหมู่ OH ที่ตำแน่ง C-6 ของโมเลกุลของกลูโคส ทำให้เซลลูโลสมีโมเลกุลที่แน่นหนาและมีลักษณะโมเลกุลเป็นแท่ง ขณะที่แป้งมีโมเลกุลที่ยืดหยุ่นได้และลักษณะของโมเลกุลเป็นเกลียว พันธะไฮโดรเจนไม่ได้ส่งผลเฉพาะคุณสมบัติทางกายภาพเท่านั้นแต่ส่งผลถึงความว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีด้วย ปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์ที่ตำแหน่ง C-6 ในโมเลกุลของกลูโคสเร็วกว่าที่ตำแหน่งอื่นถึง 10 เท่า ปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์ที่ตำแหน่ง C-2 เร็วกว่าที่ตำแหน่ง C-6 ในโมเลกุลของกลูโคส จะเห็นได้ชัดเจนว่าความว่องไวของปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง C-6 ในโมเลกุลของกลูโคสแตกต่างกัน เนื่องจากการหมุนแบบไอโซเมอร์ ที่พันธะระหว่างตำแหน่ง C-5 และ C-6 ในโมเลกุลของกลูโคส

โครงสร้างทางกายภาพ (Structural Physics)

การศึกษาถึงโครงสร้างผลึก เครื่องมือ Infrared Spectroscopy และการกระจายออกของรังสีเอ็กซ์กับการจัดเรียงตัวของเซลลูโลสในพืช แสดงให้เห็นว่าเซลลูโลสถูกจัดเรียงอยู่ในส่วนของ

โครงสร้างผลึกที่เป็นระเบียบ (Crystalline Micelles หรือ Crystallites) กับการทำให้เกิดการกระจายทั่ว (Interspersed) ในส่วนอสัณฐาน ที่มีการจัดเรียงตัวต่ำ การวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์ แสดงให้เห็นว่า เนทีฟเซลลูโลส I มีหน่วยเซลล์เป็นแบบโมโนคลีนิค ซึ่งถูกทำให้แตกตัวโดยการพองตัวในสารละลายด่างเข้มข้นซึ่งตรงกันข้ามกับ เซลลูโลส II

ส่วนอสัณฐานในโมเลกุลของเซลลูโลสทำให้เกิดการกระจายในรูปแบบของรังสีเอ็กซ์ โครงสร้างหลายรูปแบบที่จัดเรียงตัวกันของไมเซลล์และไมโครไฟบริวสรุปดังภาพที่ 5

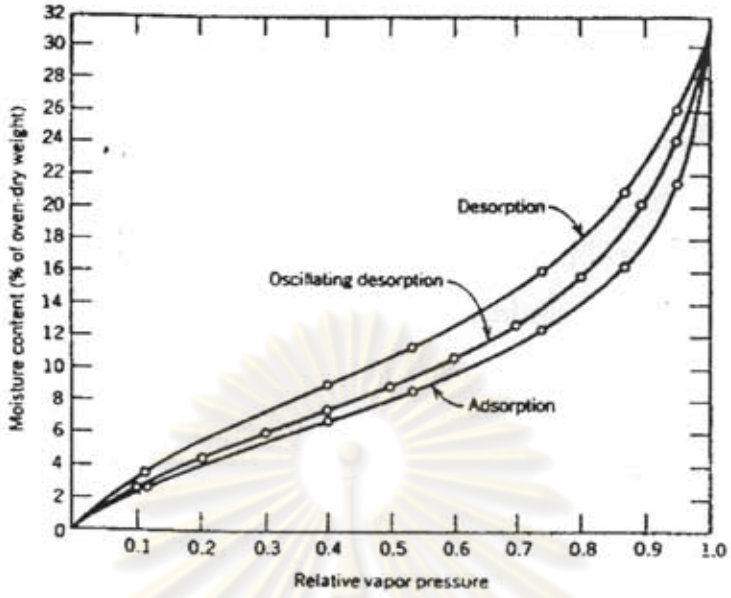


ภาพที่ 5 ทางเลือกที่เป็นไปได้ของการจัดเรียงตัวในผลึก Micelle; A โมเลกุลต่อเนื่องเหมือนโซ่โดยมีการเปลี่ยนทิศทางในเขตที่ไม่เป็นระเบียบ;B โซ่ต่อเนื่องปิดในเขตที่ไม่เป็นระเบียบ; C บางส่วนห่อตัว (Folded); D โซ่ห่อตัวมีลักษณะป้าน ;E โซ่ซ้อนกัน

เนื่องจากในส่วนที่เป็นผลึกมีความเป็นระเบียบสูงและมีพันธะไฮโดรเจน น้ำจะไม่สามารถผ่านหรือแทรกผ่านได้ในส่วนนี้ อย่างไรก็ตามสารละลายด่างเข้มข้นหรือสารเคมีอื่นสามารถทำให้เซลลูโลสจากธรรมชาติพองตัว หรือสามารถเข้าไปแทรกตัวได้อย่างสมบูรณ์ ปฏิกิริยาระหว่างโซดาไฟกับเซลลูโลสเกิดเป็นอัลคาไลเซลลูโลสซึ่งสมมติให้เหมือนเนทีฟเซลลูโลส I ระหว่างการล้างและทำให้แห้งแต่ทำให้กลับสู่สภาพเดิมเป็นเซลลูโลส II ที่มีเสถียรภาพทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics Stability) มากกว่า

คุณสมบัติการกระจายตัว (Dispersion Properties)

การดูดซับน้ำโดยเซลลูโลสจะพบในปริมาณที่แตกต่างกัน ที่ทำให้แน่นที่สุดคือน้ำที่สร้างขึ้นจากกระบวนการไพโรไรซีสของเซลลูโลส น้ำในส่วนนี้ไม่ได้ถูกดูดซับ แต่ถูกนำไปใช้สร้างพันธะโควาเลนซ์ จากการทดลองน้ำที่สร้างพันธะโควาเลนซ์ในเซลลูโลส มีสมดุลระดับหนึ่ง ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 สมดุลในการดูดซับน้ำของเซลลูโลส น้ำที่ถูกดูดซับจะมีค่าต่ำ ปริมาณนั้นเพื่อคงไว้ในกระบวนการคายซับ

จากทฤษฎีของ Brunauer-Emett-Teller (BET) วัตถุที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบแสดงเส้นโค้งของการดูดซับที่สอดคล้องกับการดูดซับโมเลกุลเดี่ยว ติดตามด้วยการดูดซับหลายโมเลกุล การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของการดูดซับน้ำในเซลลูโลส แสดงค่าความร้อนของการดูดซับ ΔH_{ads} มีค่าจาก 342 ถึง 397 J/g (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ความร้อนจากการดูดซับน้ำของเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ

เซลลูโลส	อุณหภูมิ (°C)	ΔH_{ads} (J/g)
ปอยฝ้าย	20	365
เส้นใยฝ้าย	25	384
โฮโลเซลลูโลส	25	344
เยื่อกระดาษที่ฟอกด้วย Sulfite	20	348
เยื่อกระดาษที่ไม่ฟอกด้วย Sulfite	25	342
เยื่อกระดาษที่ถูกตีนวดในกระบวนการ Sulfite	25	345
Cellophane	25	358
Viscose Rayon	25	397

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การพองตัว (Swelling)

การพองตัวของเซลลูโลสโดยน้ำและสารอื่น ๆ จะลดความเป็นผลึกและจะเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงได้ในการทำปฏิกิริยาทางเคมี เซลลูโลสจะบวมหรือพองตัวอย่างช้า ๆ เมื่อสัมผัสกับน้ำ เมื่อเซลลูโลสที่แห้งถูกวางไว้ในบรรยากาศในพื้นที่ควบคุมและความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึง 100 % เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นร้อยละ 20-25 ถ้านำเส้นใย ดังกล่าวมาจุ่มลงในน้ำเส้นผ่านศูนย์กลางจะเพิ่มขึ้นอีก ร้อยละ 20-25 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของขนาดของเส้นใยนั้นจะเป็นไปในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าในแนวตามยาว

การทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสด้วยสารที่ทำให้เซลลูโลสเกิดการพองตัวแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การพองตัวระหว่างผลึก มีสาเหตุมาจากการแทรกของส่วนอสัณฐานระหว่างผลึกและการพองตัวภายในผลึก มีสาเหตุมาจากการแทรกตัวและทำให้ส่วนที่เป็นผลึกในโมเลกุลของเซลลูโลสแตกออก

ความแรงของสารเคมีทั่วไปที่ทำให้เซลลูโลสพองตัวได้เพิ่มขึ้นเป็นลำดับดังนี้ ตัวทำละลายอินทรีย์ <น้ำ<เกลือ<กรด<ด่าง สารอินทรีย์ที่สามารถทำให้เซลลูโลสเกิดการพองตัวได้ระหว่างผลึกมีทั้งเมทานอล เอทานอล, Aniline, Benzaldehyde และไนโตรเบนซีน อย่างไรก็ตามสารเหล่านี้ทำให้เซลลูโลสเกิดการพองได้น้อยกว่าน้ำ เนื่องจากความมีขั้วของสาร ถ้าสารมีความเป็นขั้วสูงจะมีความสามารถทำให้เซลลูโลสพองตัวได้มากกว่าการพองตัวระหว่างผลึกสังเกตได้จากการที่ผ่านลำแสงของรังสีเอ็กซ์นั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง หลังจากเซลลูโลสเกิดการพองตัวส่วนโครงสร้างผลึกที่สำคัญของเซลลูโลสยังคงอยู่ แต่เป็นส่วนอสัณฐานที่ทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาเคมีหรือมีการแตกออกทำให้สารที่เข้าทำปฏิกิริยาสามารถเข้าถึงได้

การพองตัวภายนอกผลึกจะมีการเปลี่ยนรูปแบบลำแสงของรังสีเอ็กซ์เมื่อผ่านลำแสงเข้าไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างนั้นมีมากน้อยเพียงใด ถ้าสารที่ทำให้เซลลูโลสเกิดการพองตัวนั้นได้รวมตัวกับเซลลูโลสในสัดส่วนจำนวนโมลที่สัมพันธ์กันเป็นสารประกอบ เมื่อผ่านลำแสงของรังสีเอ็กซ์เข้าไปแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นการแสดงถึงการลดลงไปของโครงสร้างผลึกในโมเลกุลของเซลลูโลส ถ้ากระบวนการหยุดลงที่จุดนี้และทำให้ได้โครงสร้างที่มีเสถียรภาพแสดงว่าจุดนี้เป็นขีดจำกัดในการพองตัวของเซลลูโลส ในทางตรงกันข้าม ถ้าสารนั้น

มีความซับซ้อนไม่จำกัด การพองตัวของเซลลูโลสจะดำเนินต่อไปจนส่วนโครงสร้างผลึกถูกทำลายและละลายได้ในที่สุด

สารสำคัญที่ทำให้เซลลูโลสเกิดการพองตัวได้แก่ อัลคาไลไฮดรอกไซด์ โดยเฉพาะโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกลืออนินทรีย์ เช่นกรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และ H_3PO_4 และสารละลายเกลือของโลหะ การพองตัวด้วยสารอัลคาไลทำให้เส้นใยแน่นขึ้น กำลังความสามารถในการทำให้เซลลูโลสเกิดการพองตัวของอัลคาไลไฮดรอกไซด์ มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกลับกับรัศมีประจุบวก คือ $Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$

<u>ความสามารถในการละลาย (Solubility)</u>

เนื่องจากเซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ที่มีขั้วและมีลักษณะโครงสร้างผลึกในโมเลกุล จึงเป็นการยากที่จะหาตัวทำละลายที่เหมาะสม ดังนั้นจากทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์

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

สำหรับกระบวนการต่าง ๆ จะสามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพลังงานอิสระ (Gibb Free Energy, ΔG_{diss}) ของการละลายจะต้องเป็นลบ แต่ ΔH_{diss} เป็นบวกและมีค่าที่สูงมาก ΔS_{diss} เป็นบวกแต่มีค่าต่ำ ดังนั้น ΔG_{diss} โดยทั่วไปเป็นบวกสำหรับน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์

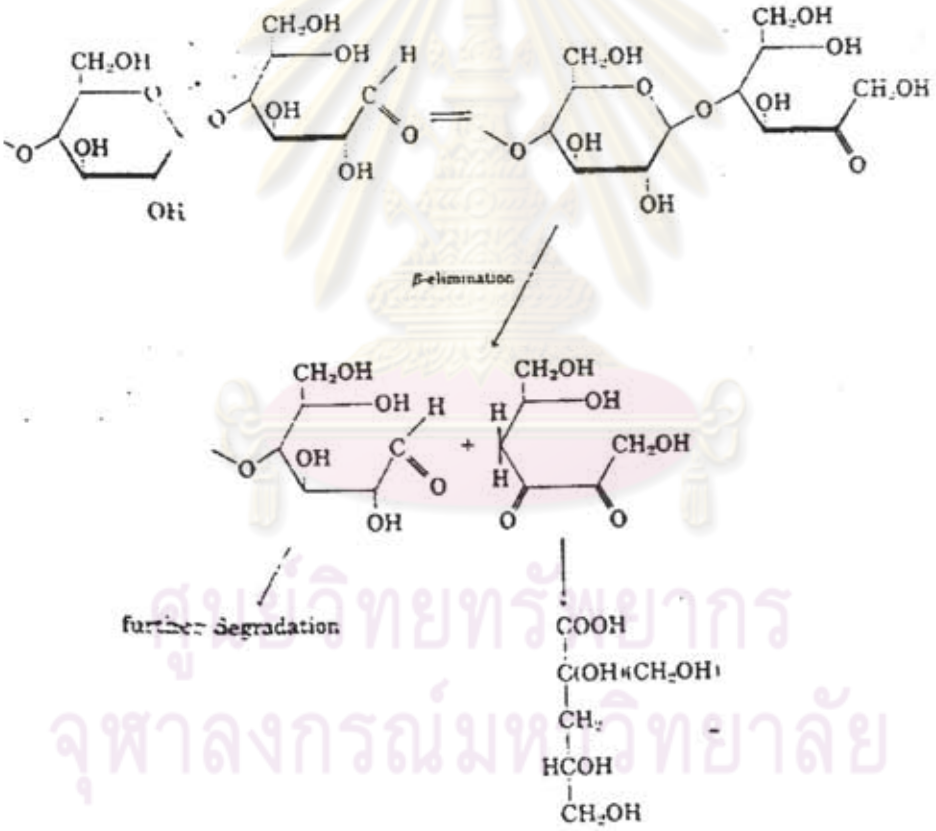
อัลคาไลไฮดรอกไซด์ใช้เป็นตัวทำละลายเซลลูโลสได้ดี นิยามของ อัลฟ่าเซลลูโลส คือ เซลลูโลสที่สามารถละลายได้ในสารละลายโซดาไฟเข้มข้น 17.5 % เนื่องจากความสามารถในการละลายของเซลลูโลสขึ้นอยู่กับประจุเมื่ออยู่ในน้ำ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลง ดังนั้นความสามารถในการละลายของอัลคาไลเซลลูโลสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลงที่อุณหภูมิ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

เซลลูโลสอาจจะละลายได้ด้วยการกระจายโดยตรงซึ่งเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงไปเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลส เช่น ไนเทรต อะซีเตด หรือ Xanthate และละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม การกระจายโดยตรงเกี่ยวข้องกับขั้นตอนลำดับการทำปฏิกิริยาระหว่างผลึกบนส่วนอสัณฐานติดตามด้วยการแทรกผ่านภายนอกผลึกพองตัวอย่างไม่จำกัดและละลายในที่สุด

การทำให้แตกกระจาย (Degradation)

ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของการไฮโดรไรซีสด้วยกรด ขึ้นอยู่กับขอบเขตในส่วนผลึก หรือส่วนอสัณฐาน ความเข้มข้นและชนิดของกรดและอุณหภูมิ

การทำให้แตกสลายด้วยด่างเป็นกระบวนการที่สำคัญมากในทางอุตสาหกรรม ทั้งการให้ความร้อนและการทำให้เยื่อไม้บริสุทธิ์ การทำให้แตกสลายด้วยด่างเป็นที่สนใจในกระบวนการโซดา (Soda Process) แต่เกิดขึ้นกับกระบวนการผลิตกระดาษเหนียวสีน้ำตาล (Kraft -Process) ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โมเลกุลของเซลลูโลสจะแตกตัวที่ตำแหน่ง β ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การแตกตัวด้วยสารละลายอัลคาไลของเซลลูโลส

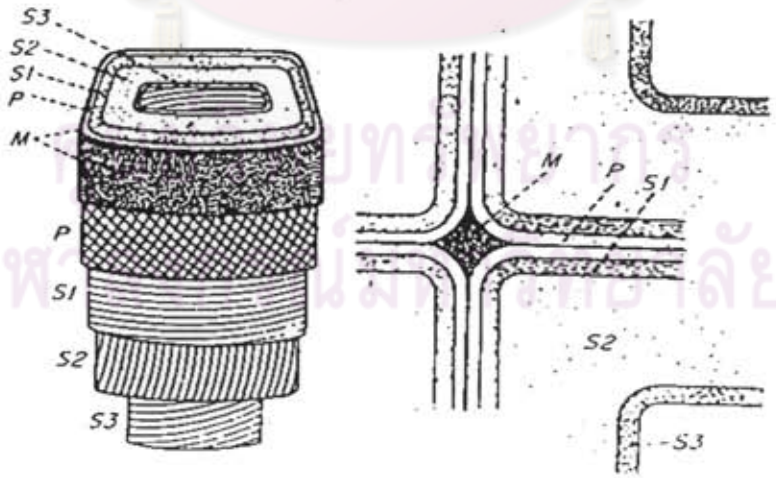
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงื่อนไขข้อบังคับในการเกิดปฏิกิริยา Hydrolysis ในทางกายภาพ และทางเคมีของเซลลูโลสและลิกนิน

ความว่องไวของเซลลูโลสต่อปฏิกิริยาไฮโดรไรซีส โดยมากแล้วจะประเมินจากความสามารถในการเข้าถึงได้ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น กรดแก่ เอนไซม์ชนิดพิเศษ หรือ จุลินทรีย์ การสัมผัสได้โดยตรงในทางกายภาพระหว่างสารเข้าทำปฏิกิริยาเหล่านี้กับเซลลูโลสเป็นสิ่งแรกที่ต้องการของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไรซีส เนื่องจากเซลลูโลสเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำและมีโครงสร้างที่ซับซ้อน การสัมผัสกันของสารที่เข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสนั้นเกิดขึ้นได้เฉพาะการแพร่ในกรณีของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาไปสู่โครงสร้างของเซลลูโลส จะจำกัดความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของเซลลูโลสต่อสารที่เข้าทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซีสทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไรซีสลดลง

โครงสร้างของเส้นใยของเซลลูโลส (Structure of Cellulose Fiber)

เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบประมาณ 90% ของเส้นใยฝ้าย แต่มีอยู่ประมาณ 45% ในผนังเซลล์ของไม้บางชนิด โครงสร้างทางโมเลกุลของเซลลูโลสในฝ้ายและไม้คล้ายกันมาก เส้นใยของฝ้ายเป็นอิสระต่อกันแต่เส้นใยของไม้มีโครงสร้างเป็น 3 มิติดังภาพที่ 8



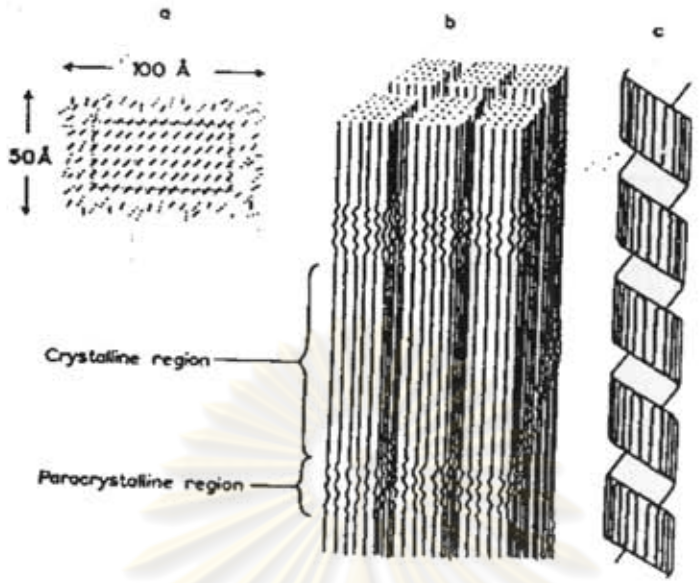
ภาพที่ 8 ชั้นของผนังเซลล์ของไม้ ชั้น M เป็นชั้นกลาง ถัดมาเป็นผนังชั้นปฐมภูมิ (Primary Walls, P) ผนังชั้นทุติยภูมิ (Secondary Walls) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนนอก (S1) ส่วนกลาง (S2) และส่วนใน (S3)

ทั้งฝ้ายและไม้ในเส้นใยจะมีผนังชั้นปฐมภูมิบาง ๆ ซึ่งล้อมรอบด้วยผนังชั้นทุติยภูมิที่หนากว่า 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

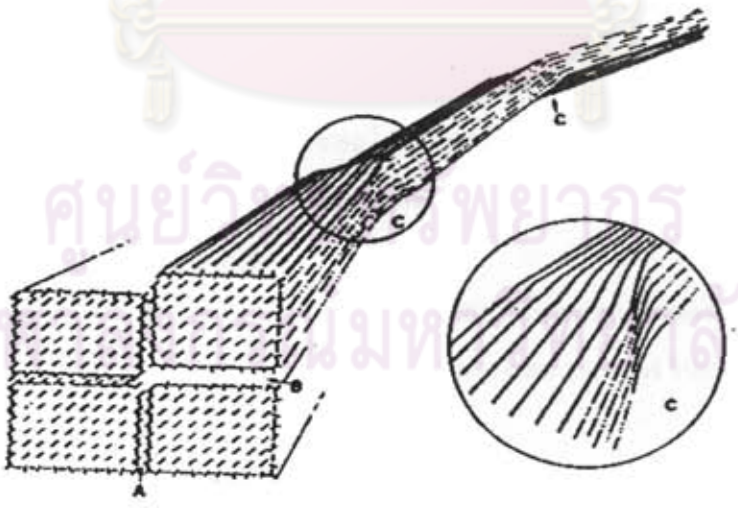
ในเนื้อเยื่อแต่ละส่วนของผนังชั้นทุติยภูมิ เซลลูโลสและส่วนประกอบอื่นของผนังเซลล์ถูกรวมตัวกันเป็นลักษณะมัดที่ยาวและบางเรียกว่าไมโครไฟบริว แต่ละไมโครไฟบริว โมเลกุลของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงมีพันธะไฮโดรเจนเชื่อมต่อกันทางด้านข้าง บริเวณที่มีความขนานกันมากโมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เรียกว่าส่วนโครงสร้างผลึก และส่วนที่มีความเป็นระเบียบน้อยกว่าเรียกว่าส่วนอสัณฐาน ดังแสดงในภาพที่ 9 และ 10

จากภาพที่ 9a แสดงส่วนของ Micro-fibril ที่มีพื้นที่หน้าตัดประมาณ 50×100 อังสตรอม และประกอบด้วยส่วนของแกนที่เป็นผลึก (Crystalline Core) มีความเป็นระเบียบสูงล้อมรอบด้วยส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งในฝ้ายมีโมเลกุลของเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ แต่ในไม้ประกอบด้วยเฮไมเซลลูโลสและโมเลกุลของลิกนิน องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลสในธรรมชาติชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 9 โครงสร้างของไมโครไฟบริว (a) แสดงให้เห็นว่าไมโครไฟบริวประกอบด้วยแกนที่เป็นโครงสร้างผลึกเป็นสี่เหลี่ยมล้อมรอบด้วยส่วนอสัณฐาน (b) แสดงลักษณะของไมโครไฟบริว อีก รูปแบบหนึ่งที่ประกอบด้วยเซลลูโลส 15 ถึง 40 โมเลกุลที่รวมกันเป็นส่วนโครงสร้างผลึกและ ส่วนอสัณฐาน (c) เซลลูโลสโมเลกุลพับตัวเป็นเกลียวเป็นลักษณะของโบว์หมุนในลักษณะเกลียวขวา



ภาพที่ 10 (A) พื้นผิวส่วนที่ประสานกันของส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึก (B) พื้นผิวส่วนที่มีความไม่เป็นระเบียบเพียงเล็กน้อย (C) พื้นผิวส่วนที่มีการบิดเป็นเกลียว

ตารางที่ 5 องค์ประกอบโดยรวมของฝ้าย หวายบางชนิด และไม้จำพวกสน

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก		
	ฝ้าย	หวาย	ต้นสน
โฮโลเซลลูโลส	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

เซลลูโลสของไม้และฝ้ายเป็นโพลีเมอร์เส้นตรงของ D-Anhydroglucopyranose Unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β-1-4-glucosidic จำนวนของกลูโคสต่อหนึ่งหน่วยโมเลกุล (Degree of Polymerization, DP) มีตั้งแต่จำนวนน้อย ๆ คือ 15 หรือ น้อยกว่านั้นไปถึงปริมาณมาก ๆ ประมาณ 10,000 ถึง 14,000

เฮไมเซลลูโลสที่มีมากที่สุดในฝ้ายคือสารจำพวก Pectin ซึ่งในไม้เป็นสารประกอบที่เป็นกิ่ง ประกอบไปด้วยสารหลายชนิดทั้ง กลูโคส ไซโลส กาแลคโตส แมนโนส และอลาบิโนส ปริมาณของกลูโคสต่อหนึ่งหน่วยโมเลกุลของเฮไมเซลลูโลสมักจะไม่เกิน 200 ปริมาณที่เห็นได้ชัดของหมู่อะซิติวปรากฏเป็นกลูโคแมนแนนในพืชจำพวกสน และเป็นไซแลนในพืชจำพวกหวาย

ลิกนินเป็นสารเชิงซ้อนของโพลีเมอร์ 3 มิติที่ประกอบขึ้นจากหน่วยของ Coniferyl Alcohol ในกรณีของพืชจำพวกต้นสน และมีทั้งหน่วยของ Coniferyl และ Syringyl ในกรณีของพืชจำพวกหวาย

การกระจายตัวของส่วนประกอบภายในเส้นใยเซลลูโลส

ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับสารเคมีรวมทั้งเอนไซม์ถูกประเมินจากส่วนต่าง ๆ ของผนังเซลล์ที่มีการกระจายตัวและความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ของผนัง

เซลล์ ผนังเซลล์ชั้นทุติยภูมิของเส้นใยฝ้ายประกอบด้วยส่วนโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสอย่างมาก เกือบทั้งหมดของเฮไมเซลลูโลสและสารประกอบอื่น ๆ อยู่ในส่วนของเปลือกชั้นนอกและเนื้อเยื่อผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ

ในทางตรงกันข้ามสำหรับไม้ สารที่ไม่ใช่สารประกอบเซลลูโลสมีอยู่ทั้งหมดในเขตของผนังเซลล์จากส่วนช่องกลวงตรงกลางเส้นใย (Lumen) ไปจนถึงส่วนประกอบในชั้นกลาง เซลลูโลสมีอยู่มากที่สุดในผนังเซลล์ชั้นทุติยภูมิ มีสารประกอบจำพวกเกลือแร่กระจายอยู่ในทุกส่วนของเนื้อเยื่อผนังเซลล์ในเส้นใยของทั้งไม้และฝ้าย

เฮไมเซลลูโลสและลิกนินมีอยู่รอบ ๆ เซลลูโลสในส่วนของไมโครไฟบริวลิกนิน และเฮไมเซลลูโลสอยู่ระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสในส่วนอสัณฐาน

<u>ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซีส ของเซลลูโลส</u>

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

1. ความชื้นของเส้นใย

วัสดุเซลลูโลสถูกปกป้องจากการถูกทำให้เสื่อมสภาพลงด้วยจุลชีพ ตราบเท่าที่ความชื้นภายในวัสดุเซลลูโลสยังต่ำกว่าระดับวิกฤติ คือ ระดับที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของจุลชีพ สำหรับไม้ความชื้นที่ระดับสูงกว่า 32 % ของน้ำหนักแห้ง สำหรับฝ้ายความชื้นที่ประมาณ 10 % ก็เพียงพอโดยเทียบสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80 % ความชื้นจะทำให้เส้นใยเกิดการพองตัวในระดับโมเลกุลของเซลลูโลส ดังนั้นเป็นการเปิดของโครงสร้างที่ละเอียดทำให้สารที่เข้าทำปฏิกิริยามีความสามารถเข้าทำกับปฏิกิริยากับเซลลูโลสได้ ดังนั้นจึ้งต้องเติมน้ำในขณะที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซีส

2. ขนาดและความสามารถในการแพร่ของโมเลกุลของสารที่มีความสัมพันธ์กับขนาดและคุณสมบัติของพื้นที่ผิวของ Capillaries โดยรวมและพื้นที่ระหว่างไมโครไฟบริว และโมเลกุลของเซลลูโลสในส่วนอสัณฐาน

ความสามารถในการเข้าถึงพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสถูกนิยามโดยขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติของพื้นผิวในระดับจุลภาคและระดับ Capillaries ของเส้นใยที่สัมพันธ์กับขนาดรูปร่างและความสามารถในการแพร่ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส

3. ปริมาณของโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส

จากข้อมูลการทดลองโดยการใช้การหักเหของ X-ray ผลที่ได้บอกว่าเอนไซม์ที่จะทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสมีความสามารถในการเข้าถึงบริเวณอสัณฐานของเซลลูโลสที่ผ่านการก่อตัวขึ้นรูปใหม่ (Regenerated) แต่สามารถกระทำเช่นนี้ได้ในวัตถุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นโครงร่างผลึก

จากกรณีการไฮโดรไลซีสด้วยกรด ปริมาณโครงสร้างผลึกพบได้อย่างมีนัยสำคัญระหว่างการไฮโดรไลซีสของเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ ส่วนของเซลลูโลสที่ถูกทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซีสยิ่งเกิดปฏิกิริยามากขึ้น ส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาจะกลายเป็นโครงร่างผลึกมากขึ้น ดังนั้นจะเกิดแรงด้านการไฮโดรไลซีสมากขึ้น

4. มิติของหน่วยเซลล์

เซลลูโลสมีปรากฏเป็นโครงสร้างผลึก 4 แบบ โดยเรียกเป็น เซลลูโลส I, II, III และ IV เซลลูโลส I เป็นรูปผลึกของวัสดุเซลลูโลสดั้งเดิม เซลลูโลส II เป็นเซลลูโลสที่ผ่านการก่อตัวขึ้นรูปใหม่ เช่น Vicose Filament Cellophane และฝ้ายที่ผ่านการชุบด้วยสารละลายด่างเซลลูโลส III และ IV เกิดจากปฏิกิริยาของเซลลูโลส กับ Anhydrous Ethylamine และการใช้กรดสกัดที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงเป็นไปไม่ได้ในการเตรียมเซลลูโลสII, III และ IVโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโมเลกุลของกลูโคสต่อหนึ่งหน่วยโมเลกุลของเซลลูโลสหรือองศาของความเป็นผลึก เป็นการยากที่จะประเมินหาความเร็วของปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นของเซลลูโลสต่อสารที่เข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงในมิติของหน่วยเซลล์ของผลึกในเซลลูโลสเพียงอย่างเดียว หรือความแตกต่างในปริมาณส่วนอสัณฐาน

5. การจัดเรียงตัวของหน่วยเซลล์

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

6. ปริมาณของกลูโคสต่อหนึ่งหน่วยโมเลกุลเซลลูโลส

ความยาวของโมเลกุลของเซลลูโลสในเส้นใย มีค่าตั้งแต่ระดับในรูปของแกมม่าเซลลูโลส คือมีหน่วยของกลูโคสน้อยกว่า 15 หน่วยไปจนถึงระดับในรูปของอัลฟ่าเซลลูโลสมีหน่วยของกลูโคสมากตั้งแต่ 10,000 ถึง 14,000 หน่วยต่อโมเลกุล จำนวนหน่วยกลูโคสที่แตกต่างกันในโมเลกุลของเซลลูโลส ทำให้คาดว่าจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซีสมากพอควร โดยเฉพาะกับเอนไซม์ที่ทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสแตกออก และยับยั้งกลไกในขั้นตอนสุดท้ายของปฏิกิริยา

เมื่อจำนวนกลูโคสในโมเลกุลของเซลลูโลสถูกทำให้ลดลงระหว่างปฏิกิริยาการ Hydrolysis ด้วยกรด ปลายของโซ่เซลลูโลสที่แตกออกในส่วนอสัณฐานนั้นมีแนวโน้มที่จะกลับมาต่อกันเป็นผลึกและทำให้ผลึกส่วนที่เหลือมีความต้านทานต่อการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์ เมื่อจำนวนกลูโคสในโมเลกุลของเซลลูโลสลดลง จนกระทั่งโมเลกุลของเซลลูโลสสามารถละลายน้ำได้และโครงสร้างนั้นไม่สามารถกลับมาเชื่อมต่อกันและกันได้อีก จะทำให้เพิ่มความสามารถในการเข้าถึงเมื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซีส ด้วยเอนไซม์โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจน แต่การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นไปในทางที่จะทำให้การละลายน้ำดีขึ้น การทำให้โซ่ของเซลลูโลสสั้นลง ดังนั้นจำนวนของกลูโคสในโมเลกุลของเอนไซม์เป็นการจำกัดขอบเขตในการประเมินความว่องไวของเซลลูโลสต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซีส ยกเว้นในกรณีที่เอนไซม์ที่กระทำในปฏิกิริยาเป็นแบบหยุดยั้งกลไกในขั้นตอนของปฏิกิริยา

7. ธรรมชาติของสารที่ทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส

ส่วนประกอบทางแร่ธาตุ (Mineral Constituents)

เส้นใยของเซลลูโลสโดยมากแล้ว มีเถ้าอยู่ประมาณ 1 % ซึ่งรวมธาตุที่จำเป็นทั้งหมดสำหรับการเจริญเติบโตของเซลลูโลสในระดับ Microorganism สารประกอบของธาตุทองแดง เงิน

ปรอท โครเมี่ยมและเกลือของสังกะสี โดยทั่วไปจะหยุดยั้งการทำลายโดยจุลินทรีย์ในขณะที่ โคบอล แมกนีเซียมและแคลเซียมในส่วนผสมที่มีอนุมูลของฟอสเฟต จะกระตุ้นให้เกิดมากขึ้น

8. ความเข้มข้นและการกระจายของหมู่แทนที่ (Substituent Group)

อนุพันธ์ของเซลลูโลสที่เกิดจากการแทนที่ เกิดขึ้นโดยการแทนที่ไฮโดรเจนของหมู่ Hydroxyl ปฐมภูมิและทุติยภูมิของเซลลูโลสโดยหมู่ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เช่น เมทิล เอทิล ไฮดรอกซิลเอทิล คาร์บอกซิลเมทิล ฯลฯ

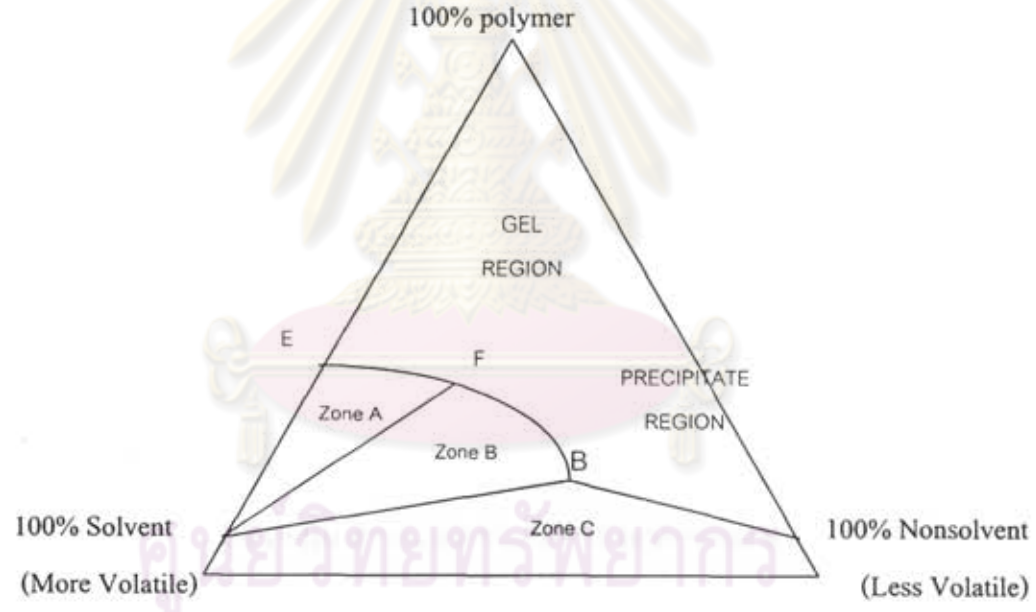
การที่มีกลุ่มเหล่านี้เพิ่มเข้าไป ทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกในโครงสร้างลดลงและละลายในน้ำได้มากขึ้นในสัดส่วนที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของกลุ่มแทนที่(Degree of Substitution, DS) และความสามารถในการละลายน้ำของหมู่แทนที่ (DS หมายถึง จำนวนโดยเฉลี่ยของหมู่แทนที่ซึ่งกระทำต่อกลูโคสแต่ละหน่วยในเซลลูโลส) ค่า DS ซึ่งเป็นการละลายอย่างเสร็จสมบูรณ์ มีค่าจาก 0.5-0.7 โดยขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของหมู่แทนที่ และจำนวนของหน่วยกลูโคสในโมเลกุลของเซลลูโลส

ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่มีหมู่แทนที่ ต่อการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้นพร้อมกับความสามารถในการละลายน้ำได้มากขึ้น และความเป็นผลึกในโครงสร้างที่ลดลง จนถึงจุดที่การละลายเป็นไปอย่างสมบูรณ์ จากจุดนี้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณของหมู่แทนที่ (DS) จนกระทั่งพ้นจากผลการกระทำของเอนไซม์ซึ่งโดยปกติอยู่ที่ค่า DS มากกว่า 1 หมู่แทนที่ขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพในการต้านทานการย่อยสลายของเอนไซม์มากกว่าหมู่แทนที่ขนาดเล็ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kahle (2001) รวบรวมทฤษฎีเกี่ยวกับการเตรียม Micro Porous Organic Thin Film โดยวิธี Solvent Precipitation ซึ่งใช้ได้ทั้งเทอร์โมพลาสติกและ Thermosetting Polymer โดยมีตัวทำละลายที่ละลายโพลีเมอร์ได้ และมี Non-solvent ที่ไม่ละลายโพลีเมอร์แต่ตัวทำละลายและ Non-solvent ต้องเป็นสารที่ละลายซึ่งกันและกันได้ และ Non-solvent ต้องมีจุดเดือดสูงกว่าตัวทำละลาย หลังจากที่นำสารตั้งต้นมาผสมรวมกันแล้วระเหยตัวทำละลายออกไป Non-solvent จะกลายเป็นหยดอยู่บนฟิล์มของโพลีเมอร์ซึ่งจะทำให้เกิดรูพรุนบนแผ่นฟิล์ม ขนาดและปริมาณของรูพรุนบนแผ่นฟิล์มกำหนดได้จากปริมาณของสารตั้งต้น ในการกำจัด Non-solvent ต้องมีการควบคุมขนาดของรูพรุนให้ดี และป้องกันการโค้งงอของแผ่นฟิล์ม



ภาพที่ 11 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 เมื่อกำจัดออกแล้วจะได้แผ่นฟิล์มรูพรุนแบบเซลล์ปิด หรือ Micro-voids และสารตั้งต้นใน Zone C เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะจะได้แผ่นฟิล์มรูพรุนแบบเซลล์เปิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 กลิ่นหมายถึง ส่วนผสมของก๊าซที่ประกอบด้วยสารระเหยหลายชนิดและทำให้เกิดการกระตุ้นให้สูดดม ในการทดลองจะตรวจวัดด้วยระบบ PPF- QCR ที่มีความว่องไวสูงสามารถตรวจพบก๊าซจากสารอินทรีย์ได้แม้ว่ามีปริมาณต่ำ

Rawski and Cole (1997) วิจัยการเตรียม Viscose จากกระดาษหนังสือพิมพ์เก่าเพื่อนำมาก่อตัวขึ้นรูปใหม่เป็นผลิตภัณฑ์เซลลูโลสที่มีประโยชน์ในรูปของแผ่นฟิล์ม 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 รีดสารละลายส่วนเกินออกจะได้ Alkali Mass ทำให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ เก็บในภาชนะปิด นำไปบ่ม จากนั้นเติมคาร์บอนไดซัลไฟด์ เพื่อทำให้เป็น Cellulose Xanthate ซึ่งจะนำไปบ่มอีกครั้งแล้วเจือจางด้วยสารละลายด่างโซดาไฟเข้มข้นร้อยละ 4 เพื่อให้เป็น สารละลาย Viscose หลังจากการบ่ม นำ Viscose ปาดกระจายให้เรียบเสมอบนแผ่นกระจกบาง จุ่มลงในสารละลายกรด Sulfuric เข้มข้นร้อยละ 10 เพื่อก่อตัวขึ้นใหม่เป็นแผ่นฟิล์ม Cellophane เมื่อผสม Viscose กับผลึกของโซเดียมซัลเฟต(Na_2SO_4) จุ่มลงในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 10 เพื่อก่อตัวขึ้นใหม่เป็นฟองน้ำเซลลูโลส (Cellulose Sponge)

Lönnberg *et al.* (1995) ได้ทำการทดลองศึกษาการวัดความหนืดของสารละลาย Viscose ของเซลลูโลส การทำให้สารประกอบของเซลลูโลสก่อตัวใหม่มีความต้องการวัตถุดิบที่มีสารประกอบของเซลลูโลสซึ่งมีลักษณะที่เป็นโครงสร้างผลึกและได้มีการกำจัดสารลิกนินออกไปอย่างดี นอกจากนั้น เส้นใยของวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลสซึ่งถูกฟอกล้างแล้วนั้นต้องนำมาทำให้ละลายน้ำได้ ความสามารถของวัตถุดิบที่มีสารประกอบเซลลูโลสในการละลายในสารละลาย

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

สารละลาย Viscose ของเซลลูโลสสามารถนำไปก่อตัวขึ้นใหม่เป็นรูปแบบของเส้นใยโดยการปั่น ก่อตัวเป็นฟิล์มโดยการดึงให้เป็นแผ่นบาง ๆ หรือก่อตัวเป็นรูปร่างลักษณะเป็นฟองน้ำ โดยการนำสารละลาย Viscose ของเซลลูโลสมาหล่อขึ้นรูป ฟองน้ำของเซลลูโลสถูกนำไปใช้ประโยชน์มาแล้วหลายปีในการทำความสะอาดและวัตถุประสงค์ในด้านการแพทย์ การแพทย์แผนใหม่และเทคโนโลยีทางชีวภาพมีความต้องการฟองน้ำของเซลลูโลสซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวขึ้นอยู่กับประโยชน์ที่ใช้ ในการผลิตฟองน้ำของเซลลูโลสนั้นอยู่บนพื้นฐานความคิดในด้านความหนืดของสารละลาย Viscose เป็นตัวกำหนดการไหลของสารละลาย Viscose รอบผลึกและเส้นใยที่ถูกผสมกับสารละลาย Viscose เพื่อสร้างความพรุนและความแข็งแกร่งของเซลลูโลสที่ก่อตัวขึ้นใหม่ ดังนั้นจึงมุ่งความสนใจต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของสารละลาย Viscose ดังที่มีการบ่งบอกด้วยเทคนิคของเครื่องมือที่ใช้วัดความหนืด ซึ่งสัมพันธ์กับวิธีในการผสมสาร

Rheometer ดูเหมือนว่ามีประโยชน์สำหรับการวัดค่าตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการในการเตรียมสารละลาย Viscose รวมทั้งขั้นตอนการทำปฏิกิริยากับสารละลายด่าง การบ่มด้วยความร้อน Xanthogenatation และการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ จำนวนของกลูโคสโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยโมเลกุลของเซลลูโลส (Degree of Polymerization) ลดลงมากโดยการบ่มด้วยความร้อนที่ยาวนานมากขึ้นในเวลาที่ยาวนานและมีอุณหภูมิสูง ทำให้ความหนืดของสารละลาย Viscose ที่ได้ลดลงไปมากพอสมควร

ความสนใจในฟองน้ำของเซลลูโลสที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นได้รับความสนใจมากขึ้นในทางการวิเคราะห์ด้านการแพทย์ และวัตถุประสงค์ในทางเวชกรรม ฟองน้ำของเซลลูโลสที่ได้ผลิตขึ้นจากวัสดุทางธรรมชาติอย่างเซลลูโลสจะให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ครบถ้วน

กระบวนการผลิตสารละลาย Viscose ตั้งอยู่บนพื้นฐานของขั้นตอน Xanthogenatation ต่อมาก็คือสภาวะในการที่วัตถุดิบซึ่งมีส่วนประกอบของเซลลูโลสแช่อยู่ในสารละลายด่างโซดาไฟและวัตถุดิบนั้นทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างโซดาไฟจัดว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญจากการนำไปใช้

ประโยชน์ในงานหลายประเภทสำหรับการผลิตเส้นใยสิ่งทอ ฟิล์ม และฟองน้ำของเซลลูโลส ในทางการแพทย์และเวชกรรม ฟองน้ำของเซลลูโลสที่นำมาใช้ควรจะเป็นเซลลูโลสที่บริสุทธิ์ และยิ่งไปกว่านั้นควรจะมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของพื้นที่ผิวที่ดีด้วย

สารละลาย Viscose ที่มีความหนืดสูงจะมีการไหลรอบอนุภาค เช่น โมเลกุลของโครงสร้างผลึกได้ไม่ดี ผลิตภัณฑ์ฟองน้ำของเซลลูโลสที่ได้จะมีช่องเปิดมากเกินไปจึงทำให้มีความแข็งแกร่งและความยืดหยุ่นที่ต่ำ ในทางตรงกันข้าม สารละลาย Viscose ที่มีความหนืดต่ำจะมีการไหลที่ดีเพื่อก่อตัวเป็นลักษณะของเนื้อผนังที่มีความต่อเนื่องของพื้นผิวและให้โครงสร้างที่ดีสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการ เช่น การจับเซลล์ของเม็ดเลือด

ความหนืดของสารละลาย Viscose สามารถหาได้ง่ายด้วยเครื่องมือผสมที่ทำงานภายใต้สภาวะควบคุม (ความเข้มข้นคงที่ ภาชนะผสมออกแบบอย่างเหมาะสม และลักษณะของแกนหมุนของเครื่องผสม) โดยการวัดแรงบิดของเพลาเป็นค่าตัวอย่างที่ความเร็วในการหมุนค่าหนึ่งซึ่งจะวางหลักของความสัมพันธ์ดังนี้

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

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

แบบจำลองทั่วไปสามารถพัฒนาขึ้นโดยการใช้วิธี Dimensional Analysis:

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

เมื่อ c = ค่าคงที่ของการแปรผัน

จากแบบจำลองนี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P และ n^2 จะได้ฟังก์ชั่นความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาคุณสมบัติของสารละลาย Viscose ที่เกิดจากกระบวนการ Xanthogenate ของสารละลาย Viscose ทำได้โดยวัดคุณสมบัติบางประการกับฟองน้ำของเซลลูโลสที่ผลิตได้และโดยการวัดความหนืดของสารละลาย Viscose สามารถวัดได้ด้วยการใช้เครื่องมือ Rheometer ที่มีขายอยู่ทั่วไป เช่น Bohlin VOR Rheometer ด้วยการใช้ Carbon-14 ภายในภาชนะปิด ภาชนะที่ใช้บรรจุสารตัวอย่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.4 มิลลิเมตร และมีความสูง 27.9 มิลลิเมตร ลูกดิ่งในภาชนะที่ใช้บรรจุสารตัวอย่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร และมีความสูง 21 มิลลิเมตร ปริมาณของสารตัวอย่างที่ต้องการวัดในภาชนะคือ 2 มิลลิลิตร ในเครื่องมือนี้ภาชนะบรรจุสารตัวอย่างจะหมุน ในขณะที่ลูกดิ่งจะอยู่นิ่ง

Davidson *et al.* (1995) ได้ศึกษาการขึ้นรูปเม็ดยาจากวัสดุเซลลูโลสที่มีรูพรุน ในการกำหนดสูตรในทางเภสัชกรรม บ่อยครั้งที่ต้องการลดอัตราที่ต้องการใช้เพื่อให้มีประสิทธิภาพจากการกลืนตัวยาซึ่งมีรูปแบบที่รู้จักคือ Multiple-Unit Dosage และมักจะประกอบไปด้วยแกนของ Beads ซึ่งนำมาใช้ในลักษณะการเคลือบด้วยฟิล์มของตัวยา หรือในลักษณะที่มีตัวยาในเนื้อของสารเพื่อให้มีการแพร่ของตัวยาออกมาในลักษณะที่ต้องการ กระบวนการผลิต Beads ในทางการค้าไม่สามารถหลีกเลี่ยงความสิ้นเปลืองจากการกำหนดขนาดเช่นเดียวกับฝุ่นผงจากการบรรจุยาเพื่อกำจัดข้อบกพร่องดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาระบบการผลิตสารที่จะนำมาเคลือบจากเซลลูโลส แนวความคิดคือการผลิตวัสดุเซลลูโลสที่มีรูพรุนซึ่งมีพื้นที่ผิวสำหรับให้สารอื่นมาเคลือบหรือยึดเกาะได้ โดยให้มีขนาดสัดส่วนตามต้องการและมีการนำตัวยาเคลือบลงไปบนพื้นที่ผิวของวัสดุเซลลูโลสที่มีรูพรุนนั้น ซึ่งการผลิตวัสดุเซลลูโลสที่มีรูพรุนนี้เป็นเสมือนวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตยาและเป็นการทำงานที่สัมพันธ์กัน

Laszkiewicz *et al.* (1990) ศึกษาวิธีในการปรับปรุงความคุ้มทุนในการผลิต Viscose โดยผลิตเส้นใยจากสารละลาย Sodium Cellulose Xanthate เข้มข้น ในการทดลองการนำเซลลูโลสมาชุบด้วยด่าง ใช้เยื่อไม้ 20 กรัม ผสมกับสารละลายด่างโซดาไฟเข้มข้นร้อยละ 4-24 โดยน้ำหนักในอัตราส่วน 1 ต่อ15 ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยมีการกวนเป็นครั้งคราว เซลลูโลสบางส่วนถูกเคลือบด้วยสารละลายด่างโซดาไฟผสมกับสารละลายยูเรียเข้มข้นร้อยละ 1 ของปริมาณด่างโซดาไฟ เมื่อเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์แล้วแยกสารละลายด่างโซดาไฟส่วนเกินออก จะได้อัลคาไลเซลลูโลส นำไปบ่มไว้อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ล้างด้วยสารละลายด่างโซดาไฟเจือจางก่อนใช้รังสี Infrared ตรวจหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา

Marukami et al. (1984) ได้ทำการศึกษาการสร้าง Porous Membrane ที่ประกอบด้วยเซลลูโลสอะซิเตทและอะคริลิกโพลีเมอร์เช่น โพลีเมทิลอะซิเตรท หรือ Methyl Acrylate-methyl Methacrylate Copolymer ซึ่งจะเหมาะกับกระบวนการ Plasmapheresis และโพลีเมอร์อัลลอยที่ประกอบด้วยเซลลูโลสอะซิเตท อะคลีลิกโพลีเมอร์ และเซลลูโลสไนเตรทปริมาณเล็กน้อยสร้างเนื้อเยื่อเทียมที่ร่างกายสิ่งมีชีวิตไม่ต่อต้าน

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 โคโพลีเมอร์ที่นิยมใช้คือ เซลลูโลสอะซิเตท และ Methacrylic Ester Copolymer

การเตรียม Porous Membrane โดยวิธี Solvent Precipitation Solvent สำหรับ Binary Polymer นี้มักจะใช้สารจำพวกเมธิลคลอไรด์ อะซีโตน เมธิลเอธิลคีโตน เอธิลอะซีเตรท N-methylpyrolidone และไดเมธิลซัลฟอกซ์ไซด์ 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

การทำให้แผ่นฟิล์มแข็งตัวจะเทสารละลายลงผิวน้ำ หรือสารละลายเมทธานอลที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส หรือเทบนแผ่นแก้วผิวเรียบ Rotary Drum หรือแผ่นสแตนเลสเจาะรู และมีการปรับปรุง Solubility Parameter โดยการเพิ่มเซลลูโลสไนเตรทเข้าไปเป็น Ternary Alloy

Jones et al. (1975) วิจัยเกี่ยวกับการผลิตวัสดุแลกเปลี่ยนประจุจากเซลลูโลส ในงานวิจัยจะผลิตวัสดุเซลลูโลสเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนประจุจากเซลลูโลสที่นำมาก่อตัวขึ้นใหม่ให้มีหลากหลายรูปแบบรวมทั้งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ตามต้องการ โดยใช้ประโยชน์ในการแลกเปลี่ยนประจุที่เป็นอนุมูลของโปรตีน ได้แก่ เอนไซม์ ส่วนประกอบของเลือด และ เนื้อเยื่อ อนุมูลของคาร์โบไฮเดรท ได้แก่ Mucopolysacharide Nucleic Acid ได้แก่ Ribonucleic Acid และ Deoxy-ribonucleic Acid และกรดไขมันโมเลกุลใหญ่

ถ้าต้องการให้วัสดุเซลลูโลสสำหรับแลกเปลี่ยนประจุที่ผลิตขึ้นมีเสถียรภาพที่ดีเป็นพิเศษจะต้องมีการเพิ่มสารเข้าไปเพื่อไปทำปฏิกิริยา Cross-link ซึ่งได้แก่ Epichlorohydrin, Dichlorohydrin, Dibromoethane, Dichloroethane, 1,23,4,-Diepoxybutane, Bisepoxxy Propyl Ether และ 1,4-Butanediol Bisepoxy Proply Ether สารทำปฏิกิริยา Cross-link ดังกล่าวมักจะทำปฏิกิริยาในสารละลายด่างเช่นสารละลายด่างโซดาไฟ หรือ สารทำปฏิกิริยา Cross-link บางชนิด เช่น อัลดีไฮด์ ได้แก่ ฟอร์มัลดีไฮด์ซึ่งอยู่ในสารละลายกรด หรืออาจจะทำปฏิกิริยา Cross-link จากการแตกตัวเป็นประจุด้วยการฉายรังสี เช่น Ultra-violet Gamma หรืออิเล็กตรอน

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

Anzar ey al ได้ศึกษาการกรองของน้ำอสุจิของวัวโดยกรองผ่าน Sephadex ion-exchange คอลัมน์เพื่อปรับปรุงคุณภาพก่อนและหลังการแช่แข็ง และการป้องกันสเปริ์มโดยกลีเซอร์ลอลระหว่างการแช่แข็งและขณะละลาย

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. มอเตอร์ขนาด 70 วัตต์ พร้อมขาตั้ง
2. ใบกวน (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-1
12. เครื่อง Autoscan
13. เครื่อง Powder Tester ของ Hosogawa Micron
14. ชุดอุปกรณ์ Sieve
15. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
16. เครื่อง AA

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัตถุดิบและสารเคมี

1. ชานอ้อย ฝ้าย หรือเยื่อกระดาษ จากโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตหรือใช้วัตถุดิบเหล่านี้
2. โซดาไฟหรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH)
3. คาร์บอนไดซัลไฟด์บริสุทธิ์ (Carbon Disulfide, CS_2)
4. กรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric, HCl)
5. นอมอลเฮกเซน (n-Hexane, C_6H_6)
6. เอทานอลหรือเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethanol, C_2H_5OH)
7. น้ำมัน Carnation-70 (Mineral Oil)

8. แป้งสังเคราะห์หรือแป้งมันสำปะหลัง
9. น้ำกลั่น
10 Sephadex G-25

Sephadex G-25 เป็นวัสดุรูปทรงกลมที่มีรูพรุนที่ผลิตจากสารประกอบของเซลลูโลส (Bead Cellulose) ที่ได้มีการผลิตจำหน่ายในปัจจุบัน โดย Sephadex G-25 เป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ที่ก่อตัวขึ้นใหม่โดยกรรมวิธีการผลิตจาก Viscose ทุก ๆ อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม ถูกควบคุมให้มีรูพรุนที่สม่ำเสมอ โดยนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายประการ ได้แก่ วัสดุรองรับทางการภาพ (Physical Support) วัสดุสำหรับกระบวนการ Chromatography วัสดุสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchanger) ดูดซับโลหะ (Metal Chelating Metal) ตัวดูดซับทางเคมี (Chemisorbances) ตัวดูดซับที่มีสัมพันธภาพ (Affinity Absorbents) ดูดจับเอนไซม์ (Immobilized Enzymes)

วิธีการวิจัย

ในการทดลองเพื่อวิจัยการผลิตตัวดูดซับรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจากสารประกอบของเซลลูโลสจากผลิตผลทางการเกษตร เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) ที่จำเป็นต้องใช้อุตสาหกรรม ซึ่งกระบวนการดูดซับเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการผลิต ในการผลิตจะแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูง (Viscose)โดยนำวัสดุจากทางเกษตรกรรม เช่น ฝ้าย ชานอ้อย หรือเยื่อกระดาษ ซึ่งเป็นวัสดุจากทางเกษตรกรรมที่มีราคาถูกและหาได้ง่าย โดยนำมาบด หรือตัดให้มีขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา แล้วนำมาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 17.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในปริมาณที่มากเกินพอ เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วจึงให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พร้อมกับการคนเป็นครั้งคราว จากนั้นแยกสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่วนเกินออก นำมาบ่มโดยให้ความร้อนในอุณหภูมิ 50 ถึง 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ถึง 6 ชั่วโมงเพื่อให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันอย่างทั่วถึงเพื่อให้เป็นอัลคาไลเซลลูโลส

จากนั้นจึงลดอุณหภูมิของสารตั้งต้นลงสู่อุณหภูมิห้อง คนอย่างช้า ๆ แล้วจึงเติมสารคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) บริสุทธิ์ ในอัตราส่วนระหว่างอัลคาไลเซลลูโลสต่อคาร์บอนไดซัลไฟด์ คือ 67 ต่อ 33 เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็น Sodium Cellulose Xanthate โดยมีการกวนผสมเพื่อให้เป็น

เนื้อเดียวกัน ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำ Sodium Cellulose Xanthate ผสมกับสารละลาย ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรอุณหภูมิ 0 ถึง 5 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากันกลายเป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง (Viscose) (Laszkiewicz , 1986)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในส่วนของการเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูงจากสารประกอบของเซลลูโลส มีขั้นตอนดังนี้

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

$$R_{cell}OH + NaOH \rightarrow R_{cell}ONa + H_2O$$

เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับสารละลาย Sodium Hydroxide เกิดเป็นอัลคาไลเซลลูโลสซึ่งเป็นสารละลายที่มีสีเหลืองเข้ม

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

ขั้นที่ 2 เป็นการบ่มอัลคาไลเซลลูโลสเพื่อให้สารที่ได้มีความหนืดตามต้องการ

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

$$R_{cell}ONa + CS_2 \rightarrow R_{cell}OCSSNa$$

อัลคาไลเซลลูโลสที่ผ่านการบ่มเมื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดซัลไฟด์จะได้ Sodium Cellulose Xanthate

ขั้นที่ 4 Sodium Cellulose Xanthate + สารละลายด่างโซดาไฟเจือจาง $\rightarrow$ สารละลายที่มีความหนืดสูง

$$R_{cell}OCSSNa + NaOH \rightarrow Viscose$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Sodium Cellulose Xanthate ทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างโซดาไฟเจือจางจะได้สารละลายที่มีความหนืดสูง ซึ่งเป็นส่วนผสมของ Sodium Cellulose Xanthate สารละลายด่างโซดาไฟ และน้ำ

ขั้นที่ 1 โครงสร้างของเซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นผลึกในวัตถุดิบที่ถูกบดหรือตัดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสำผัสในการทำปฏิกิริยาได้ถูกสารโซดาไฟเข้าแทรกซึม โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสดังกล่าวทำให้เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ เมื่อโซดาไฟแทรกซึมเข้าไป ประจุบวกของอนุมูล Sodium จะแทนที่ไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ทำให้โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสเกิดการพองตัว

ขั้นที่ 2 เซลลูโลสที่เกิดการพองตัวถูกบ่มด้วยความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา De-polymerized ที่สายโซ่ของ Anhydroglucose เนื่องจากเซลลูโลสเกิดการพองตัวเพราะทำปฏิกิริยากับโซดาไฟ ออกซิเจนในบรรยากาศจึงซึมผ่านที่พันธะ β-1,4-glucosidic ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูง (Viscose) การบ่มด้วยความร้อนเป็นเวลานานทำให้เกิดปฏิกิริยา De-polymerized มากขึ้น Viscose ที่เตรียมได้จะมีความหนืดต่ำ การบ่มด้วยความร้อนในช่วงเวลาสั้นทำให้ Viscose ที่เตรียมได้จะมีความหนืดสูง

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

ขั้นที่ 4 สารละลายด่างโซดาไฟความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยแท้แล้ว Viscose เป็นส่วนผสมของ Cellulose Xanthate เซลลูโลสส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยา สารละลายด่างโซดาไฟ และน้ำ

ส่วนที่สองของการทดลองในงานวิจัยวิจัย คือการผลิตเซลลูโลสที่มีรูพรุนรูปทรงกลมจากผลิตผลทางการเกษตร เมื่อได้สารละลายที่มีความหนืดสูง (Viscose) แล้ว นำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นและเติมแป้งลงไป ผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปเทลงในน้ำมัน Carnation-70 เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงไปช้า ๆ โดยสารละลาย Viscose จะไม่ละลายในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แต่สาร

ละลายกรดไฮโดรคลอริกสามารถละลายแป้งได้ จึงทำให้เกิดเป็นวัสดุของแข็งรูปทรงกลมที่มีรูพรุนอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นจึงนำเม็ดวัสดุของแข็งรูปทรงกลมที่มีรูพรุนที่ได้มาล้างในเอธานอลเพื่อล้างสารละลายกรดไฮโดรคลอริกออกจากเม็ดวัสดุของแข็งรูปทรงกลมที่มีรูพรุน จากนั้นจึงนำมาทำให้แห้งด้วยการอบ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้

$$R_{cell}OCSSNa + HCl \rightarrow R_{cell}OH + NaCl + CS_2$$

ไฮโดรเจนจากกรดไฮโดรคลอริกเกิดการแทนที่กับอนุมูลของโซเดียมที่มีประจุบวก ทำให้พันธะโควาเลนท์ ของ คาร์บอน-ออกซิเจนแยกกัน ด้วยเหตุนั้น จึงเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ทำให้คาร์บอนและซัลเฟอร์ ใช้อิเล็กตรอนสร้างพันธะคู่ โดยไฮโดรเจนถูกแยกออกจากคลอไรด์ของกรดไฮโดรคลอริก และสร้างพันธะใหม่กับออกซิเจนใน Cellulose Xanthate ทำให้ก่อตัวเป็นหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งทำให้กลับมาเป็นโครงสร้างของเซลลูโลสแบบเดิม

ในขั้นตอนของการทดลองการขึ้นรูปเป็นวัสดุรูปทรงกลมที่มีรูพรุน จาก Viscose เตรียมตัวอย่างการทดลองดังนี้

ตัวอย่างการทดลองที่ 1

สารละลาย Viscose 25 % จากชานอ้อย ผสมกับแป้ง Soluble Starch 20 % โดยน้ำหนัก นำไปกวนใน Mineral Oil เพื่อให้มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ รูปทรงกลม ด้วยความเร็ว 720 รอบ ต่อนาที จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 N ลงไป จนกระทั่งสารละลาย Viscose ที่เป็นเล็ก ๆ แข็งตัวเปลี่ยนเป็น Cellulose Beads สีขาว จึงแยกออกจาก Mineral Oil นำไปล้างด้วย n-Hexane เพื่อล้าง Mineral Oil ออก และล้างด้วย น้ำสะอาด หรือเอทานอลเพื่อล้างกรดไฮโดรคลอริกออก

ตัวอย่างการทดลองที่ 2

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

ตัวอย่างการทดลองที่ 3

สารละลาย Viscose 7.5 % จากชานอ้อย ผสมกับแป้ง Soluble Starch 20 % โดยน้ำหนักจากนั้นทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I32576216

ตัวอย่างการทดลองที่ 4

สารละลาย Viscose 7.5 % จากชานอ้อย ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง 10% โดยน้ำหนักจากนั้นทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างการทดลองที่ 5

สารละลาย Viscose 7.5 % จากฝ้าย ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง 10% โดยน้ำหนักจากนั้นทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1

ตัวอย่างการทดลองที่ 6

สารละลาย Viscose 7.5 % จากเยื่อกระดาษ ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง 10% โดยน้ำหนักจากนั้นทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลและวิจารณ์

ตารางที่ 7 Angle of Repose และ Angle of Spatula

ตัวอย่างการทดลอง	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 7 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 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีศักยการในการเคลื่อนตัวที่ต่ำกว่า Sephadex G-25 และมีแนวโน้มที่อนุภาคจุจับตัวกันเองได้มากกว่า

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 ซึ่งใช้เยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมสารละลาย Viscose มีค่า Angle of Repose น้อยที่สุด แสดงว่า ผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads จากวัตถุดิบตั้งต้นทั้งสามชนิดมีแนวโน้มที่จะเกิดการยึดเกาะจับตัวกันจากมากไปน้อยที่สุดตามลำดับ 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 ซึ่งใช้ฝ้ายเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมสารละลาย Viscose มีค่า Angle of Spatula ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ในตัวอย่างการทดลองที่ 4 ซึ่งใช้ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมสารละลาย Viscose มีค่า Angle of Spatula น้อยที่สุด ดังนั้น ในการใช้วัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็น Micro-porous Spherical Cellulose Beads มีแรงเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคจากมากที่สุดถึงน้อยที่สุดตามลำดับ คือ ฝ้าย เยื่อกระดาษ และ ชานอ้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8 ความหนาแน่นและ Compressibility

ตัวอย่างการทดลอง	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 8 เป็นผลการทดลองของค่าความหนาแน่น และความสามารถในการถูกอัดตัวได้ (Compressibility) ของอนุภาค

ความหนาแน่นของอนุภาคที่วัดโดยใช้ก๊าซฮีเลียมหรือค่าความหนาแน่นที่แท้จริงของอนุภาค (True Density) ซึ่งหาจากเครื่องมือ Multi-pyconometer 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 ชานอ้อย ฝ้าย และ เยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็น Micro-porous Spherical Cellulose Beads มีค่า Aerated Bulk Density ใกล้เคียงกัน

Packed Bulk Density คือ การวัดความหนาแน่นจากการอัดอนุภาคให้เต็มภาชนะที่กำหนดปริมาตรแน่นอนในเวลาที่กำหนดจากความสูงของภาชนะที่อัดวัสดุผงควที่แล้วจึงคำนวณน้ำหนักของอนุภาคหลังการอัดหารด้วยปริมาตรของภาชนะ

ในชุดการทดลองของตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 Packed Bulk Density มีค่าลดลงเมื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ในขณะที่ ตัวอย่างการทดลองที่ 4 ถึง 6 ซึ่งใช้ ชานอ้อย ฝ้าย และ เยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมละลาย 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 ชานอ้อย และเยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการเตรียมละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 9 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 9 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 19 เมื่อพิจารณาตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 พบว่าเมื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ทำให้

Degree of Flowability เพิ่มขึ้น แสดงว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการผลิตขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ลดลงทำให้อนุภาคของผลิตภัณฑ์มีการไหลเคลื่อนตัวได้ดีขึ้น

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

ตารางที่ 10 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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 10 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 คือค่าความฟุ้ง (Scattering) การเกิดฝุ่น (Dusting) การพุ่ง (Flushing) และการแพร่กระจายตัว (Dispersing) ของวัสดุผง

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

พิจารณาจากตารางที่ 10 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 แสดงว่าอนุภาคมีความฟุ้ง การเกิดฝุ่น การพุ่ง และการแพร่กระจายตัว ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 พบว่าทั้งสามตัวอย่างการทดลองมีค่า Dispersibility ต่ำกว่า Sephadex G-25 แสดงว่า อนุภาค Sephadex G-25 มีความฟุ้ง 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 ที่นำมาผลิตขึ้นรูปเป็น ผลิตภัณฑ์ 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 แสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้ชานอ้อย 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 ความฟุ้ง (Scattering) การเกิดฝุ่น (Dusting) การพุ่ง (Flushing) และการแพร่กระจายตัว (Dispersing) สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นดังนี้ ผลิตภัณฑ์จากฝ้าย เยื่อกระดาษ และ ชานอ้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 พบว่าผลิต

ภัณฑ์ในส่วนนี้มีค่า Dispersibility ที่ต่ำกว่า แสดงว่า มีความฟุ้ง การเกิดฝุ่น การพุ่ง และการแพร่กระจายตัว มากกว่า Sephadex G-25

ส่วนในกรณีของ Degree of Floodability ผลิตภัณฑ์ของตัวอย่างการทดลองที่ 6 มีค่ามากที่สุด และ ผลิตภัณฑ์ของตัวอย่างการทดลองที่ 4 มีค่าน้อยที่สุด แสดงว่า ลำดับความสามารถในการฟุ้งกระจายของอนุภาคที่เป็นผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ที่นำมาผลิตขึ้นรูปเป็น ผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads เพิ่มขึ้นดังนี้ ชานอ้อย ฝ้าย และเยื่อกระดาษ เมื่อเปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 พบว่าผลิตภัณฑ์ในส่วนนี้มีค่า Degree of Floodability ต่ำกว่า แสดงว่าผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads มีความสามารถในการฟุ้งกระจายของอนุภาคต่ำกว่า Sephadex G-25

ตารางที่ 11 ขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย ปริมาตรของรูพรุน และ พื้นที่ผิวของอนุภาค

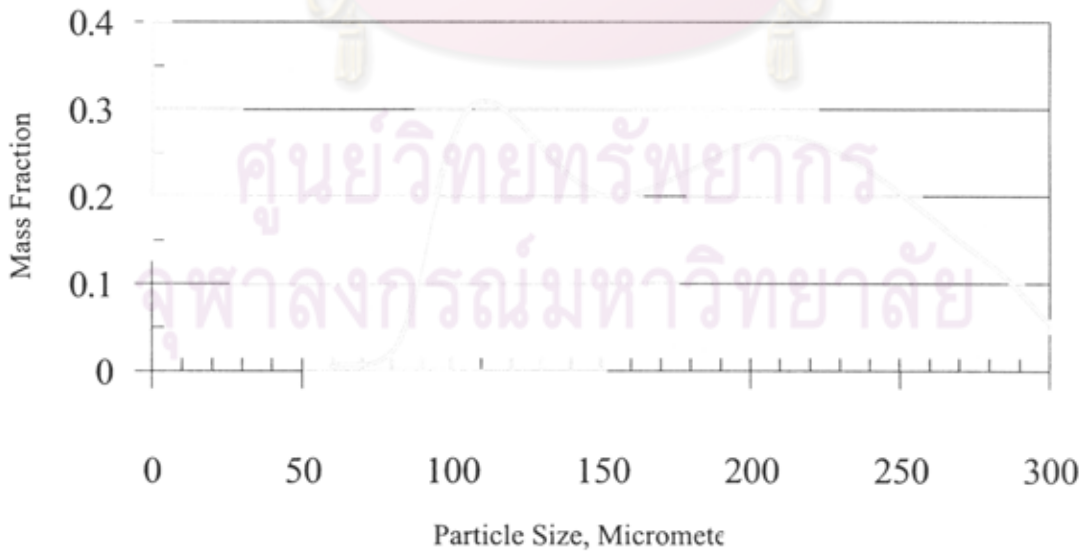
ตัวอย่างการทดลอง	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคโดยเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	ปริมาตรของรูพรุน(cc / g)	พื้นที่ผิวของอนุภาค (m^2/ g)
1	177.29	0.00667	0.007
2	162.24	0.00716	0.012
3	155.64	0.02249	0.325
4	179.80	0.00776	1.188
5	197.76	0.00714	2.971
6	213.09	0.00696	28.429
Sephadex G-25	212.09	0.00649	0.001

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 12 ปริมาณของซิลิคอนและเหล็กในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมของอนุภาค

ตัวอย่างการทดลอง	ซิลิคอน	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

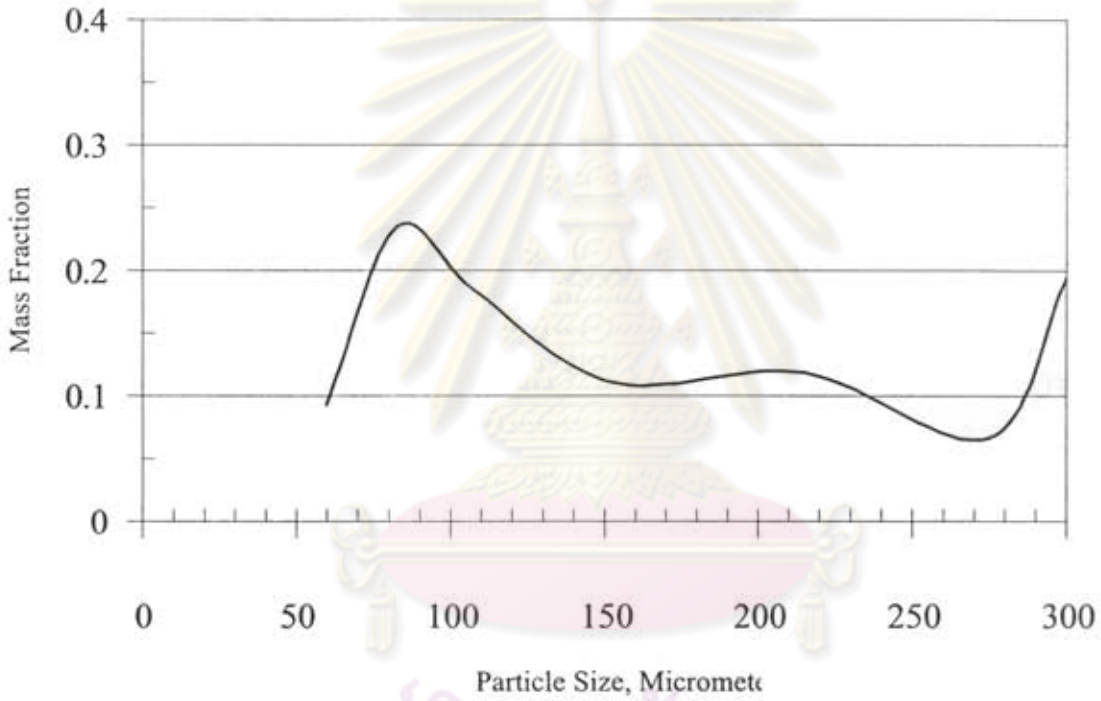
จากการหาปริมาณของซิลิคอนและเหล็กในผลิตภัณฑ์จากการวิจัย และ Sephadex G-25 พบว่า ปริมาณของซิลิคอนในผลิตภัณฑ์จากการวิจัยมีต่ำกว่าใน Sephadex G-25 ในขณะที่ผลิตภัณฑ์จากการวิจัยของตัวอย่างการทดลองที่ 2 ถึง 6 มีปริมาณเหล็กใกล้เคียงกับ Sephadex G-25 แต่ในตัวอย่างการทดลองที่ 1 มีปริมาณสูงกว่า Sephadex G-25 เพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์จากการวิจัยมีความปลอยภัยเพียงพอที่จะใช้ในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์อาการและยาเช่นเดียวกับ G-25



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 12 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 1

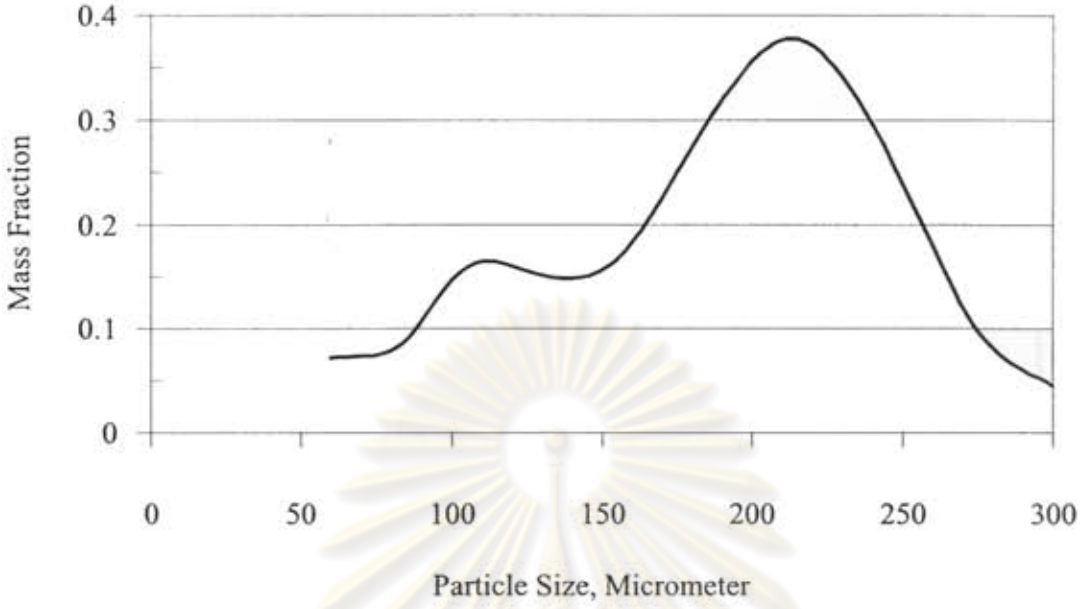
จากภาพที่ 12 เส้นโค้งแสดงการกระจายขนาดสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 1 พบว่าเส้นโค้งมีจุดยอด (Peak) อยู่สองจุด คือ จุดที่อนุภาคมีขนาด 110 ไมโครเมตร และ จุดที่อนุภาคมีขนาด 215 ไมโครเมตร โดยอนุภาคมีปริมาณร้อยละ 30 และร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งทำให้เส้นโค้งแสดงการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างกาสรทดลองนี้มีลักษณะแตกต่างจากเส้นโค้งปกติ (Normal Curve) และแสดงให้เห็นว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์จากตัวอย่างการทดลองนี้มีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้อนุภาคของผลิตภัณฑ์มีการกระจายขนาดที่กว้าง คำนวณขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยจะได้ 177.29 ไมโครเมตร



ภาพที่ 13 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 2

จากภาพที่ 13 เส้นโค้งแสดงการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองที่ 2 พบว่าเส้นโค้งมีจุดยอดที่อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 ไมโครเมตร ในปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และที่อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 ไมโครเมตร ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยในช่วงที่อนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 ถึง 150 ไมโครเมตร มีลักษณะเป็นเส้นโค้งปกติ อนุภาคของผลิตภัณฑ์จากตัวอย่างการทดลองนี้มีลักษณะของการกระจายขนาดที่กว้าง คำนวณขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยจะได้ 162.24 ไมโครเมตร

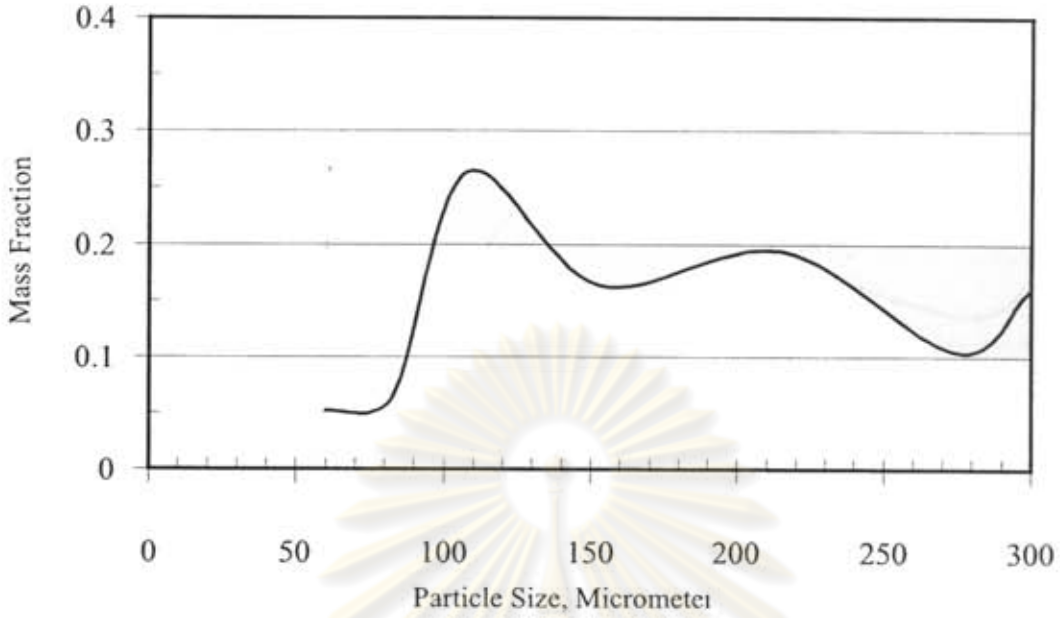
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 14 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 3

จากภาพที่ 14 เส้นโค้งการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองที่ 3 พบว่าเส้นโค้งการกระจายเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับเส้นโค้งปกติ โดยมีจุดยอดอยู่ที่ 110 ไมโครเมตร ในปริมาณร้อยละ 38 โดยน้ำหนัก แต่อนุภาคของผลิตภัณฑ์มีการกระจายขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้าง และคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซึ่งเฉลี่ยโดยน้ำหนักได้ 155.64 ไมโครเมตร

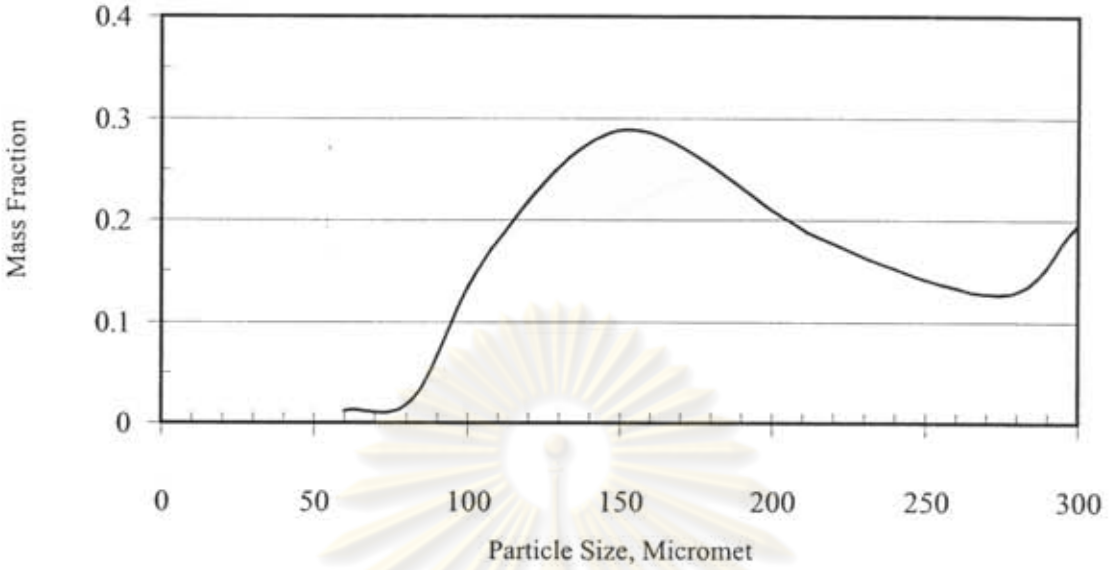
จากการทดลองในตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 3 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ก่อนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย Viscose ร้อยละ 25, 15 และ 7.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์มีลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคที่สม่ำเสมอมากขึ้นตามลำดับ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



ภาพที่ 15 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 4

จากภาพที่ 15 เส้นโค้งแสดงการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสำหรับผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองที่ 4 พบว่าเส้นโค้งมีจุดยอดอยู่สองจุดคือที่อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 และ 210 ไมโครเมตร ในปริมาณร้อยละ 25 และร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ อนุภาคของผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองนี้มีลักษณะการกระจายขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่กว้าง แสดงว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์จากตัวอย่างการทดลองนี้มีลักษณะรูปร่างและเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่สม่ำเสมอ คำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยโดยน้ำหนักจะได้ 179.80 ไมโครเมตร

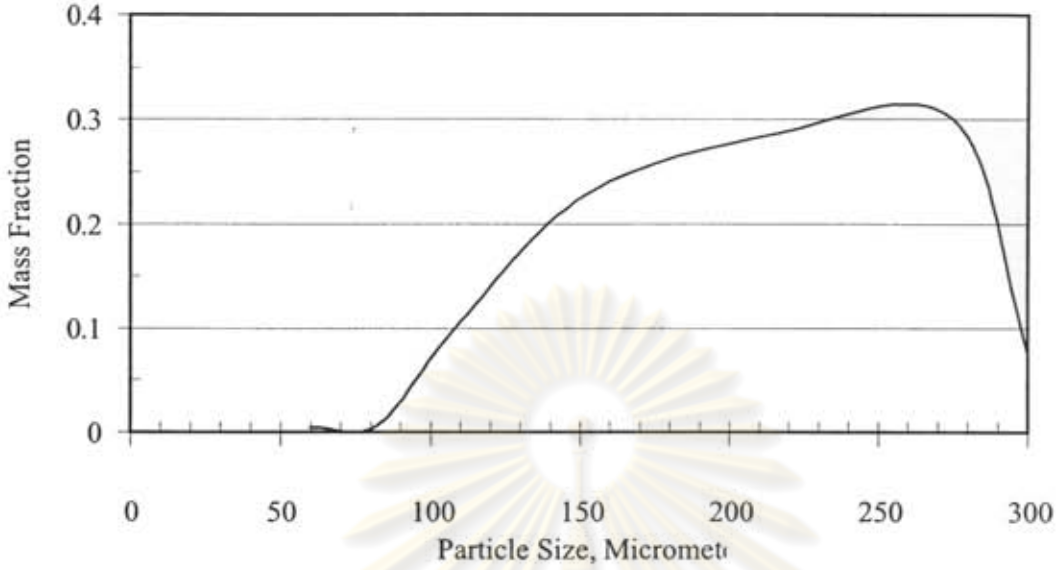
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 16 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 5

จากภาพที่ 16 เส้นโค้งการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในตัวอย่างการทดลองที่ 5 พบว่ามีลักษณะที่ใกล้เคียงกับเส้นโค้งปกติ มีจุดสูงสุดของเส้นโค้งอยู่ที่อนุภาคขนาด 150 ไมโครเมตร ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก อนุภาคของผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองนี้มีลักษณะการกระจายขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้าง คำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในตัวอย่างการทดลองนี้เฉลี่ยโดยน้ำหนักจะได้ 197.76 ไมโครเมตร

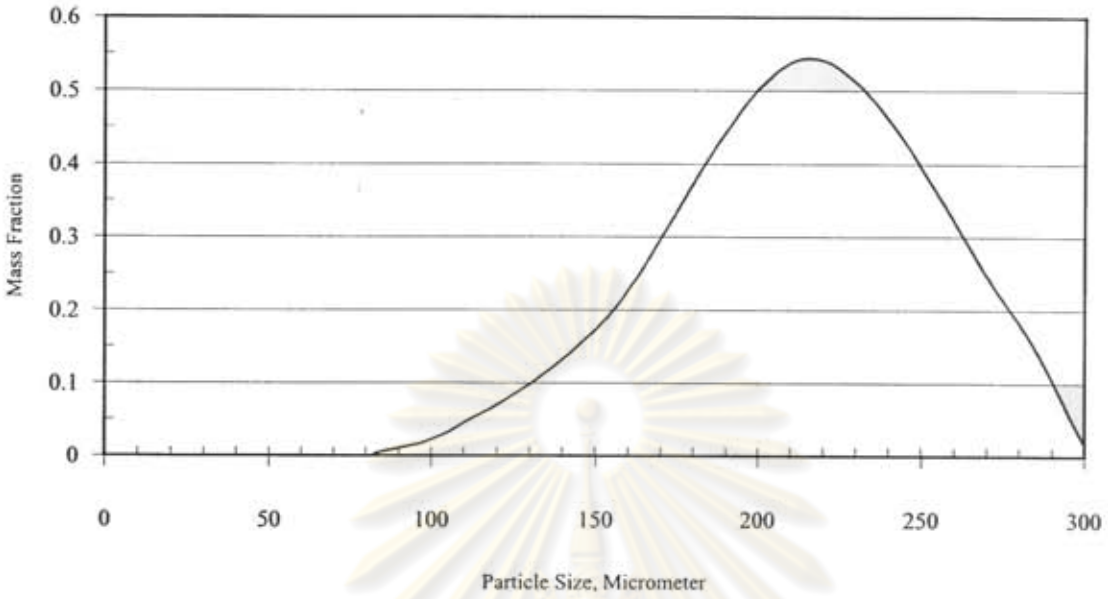
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 17 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 6

ส่วนผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองที่ 6 จากภาพที่ 17 เส้นโค้งแสดงการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคไม่ปรากฏจุดยอดของเส้นโค้งอย่างชัดเจน แสดงว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์สำหรับตัวอย่างการทดลองนี้มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ขนาดต่าง ๆ ในปริมาณใกล้เคียงกัน และมีการกระจายขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้าง คำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสำหรับผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างการทดลองนี้เฉลี่ยโดยน้ำหนัก จะได้ 213.09 ไมโครเมตร

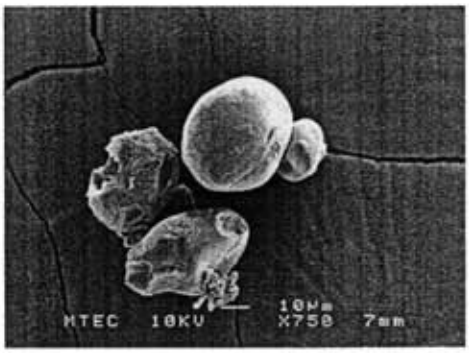
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



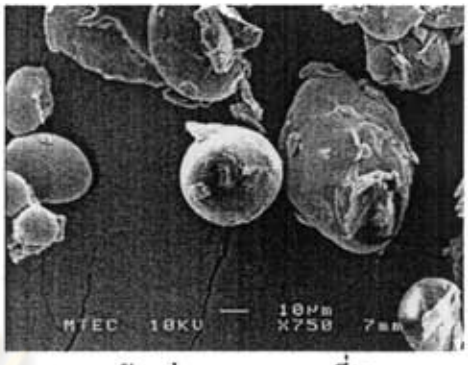
ภาพที่ 18 การกระจายขนาดของอนุภาคสำหรับ Sephadex G-25

จากภาพที่ 18 Sephadex G-25 มีเส้นโค้งลักษณะการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเป็นลักษณะของเส้นโค้งปกติ มีจุดสูงสุดของเส้นโค้งที่อนุภาคขนาดประมาณ 210 ไมโครเมตร แสดงว่าอนุภาคมีลักษณะของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปร่างที่สม่ำเสมอ คำนวณขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยโดยน้ำหนักจะได้ 212.09 ไมโครเมตร

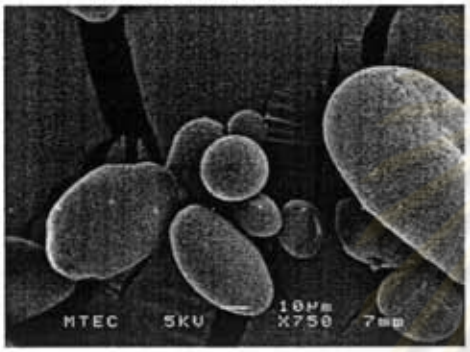
ลักษณะของเส้นโค้งแสดงการกระจายขนาดสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์จะมีการกระจายขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่กว้างเมื่อเทียบกับ Sephadex G-25 แสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้เครื่องมือที่ทางภาควิชาจัดหาดังกล่าวในหัวข้ออุปกรณ์และวิธีการวิจัย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



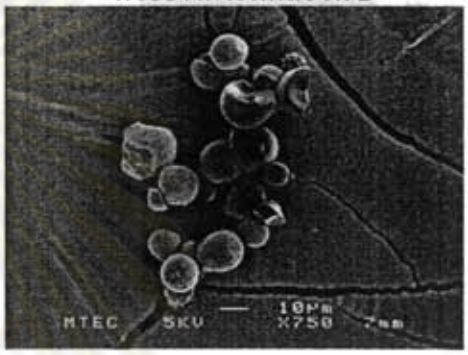
ตัวอย่างการทดลองที่ 1



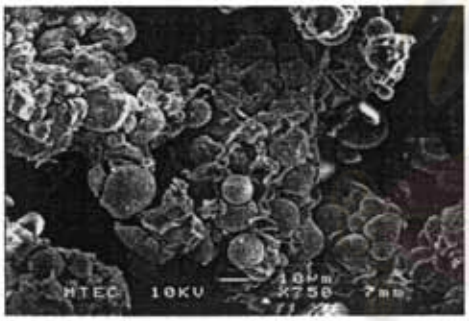
ตัวอย่างการทดลองที่ 2



ตัวอย่างการทดลองที่ 3

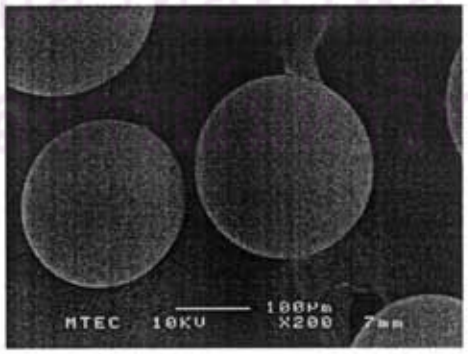


ตัวอย่างการทดลองที่ 4



ตัวอย่างการทดลองที่ 5

ตัวอย่างการทดลองที่ 6

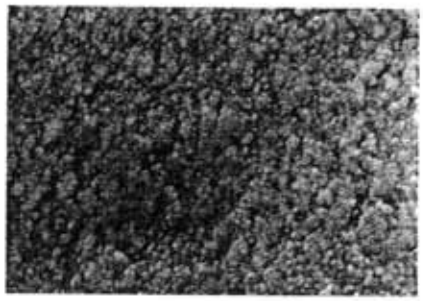


Sephadex G-25

ภาพที่ 19 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM ของอนุภาคผลิตภัณฑ์ และ Sephadex G-25)

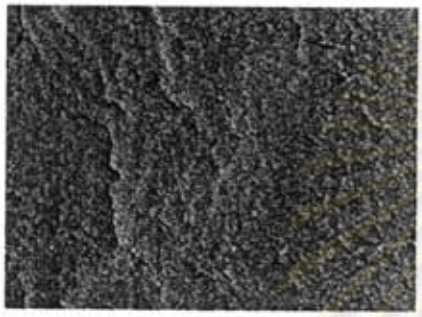
สำหรับภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ Scanning Electron Microscope (SEM) (ภาพที่ 19) ซึ่งเป็นภาพถ่ายที่แสดงลักษณะรูปทรงของอนุภาคสำหรับผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้ และ Sephadex G-25 พบว่าอนุภาคของผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้แต่ละอนุภาคมีขนาดไม่เท่ากันและมีลักษณะของพื้นผิวที่ไม่เรียบ 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 โดยความแตกต่างนี้มีผลมาจากข้อจำกัดของชุดเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองวิจัยดังที่กล่าวถึงในหัวข้อของอุปกรณ์และวิธีการวิจัย ที่ใช้ในขั้นตอนการนำสารละลาย Viscose มาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads มีข้อจำกัดในการควบคุมลักษณะในด้านของขนาดและรูปทรงสำหรับอนุภาคของผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้ให้มีความสม่ำเสมอ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

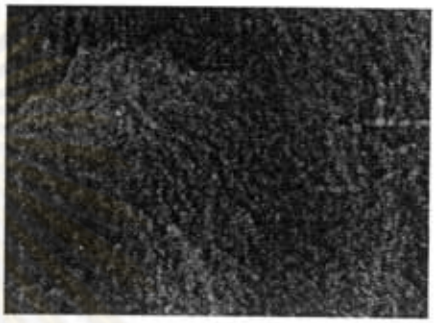


ตัวอย่างการทดลองที่ 1

ตัวอย่างการทดลองที่ 2

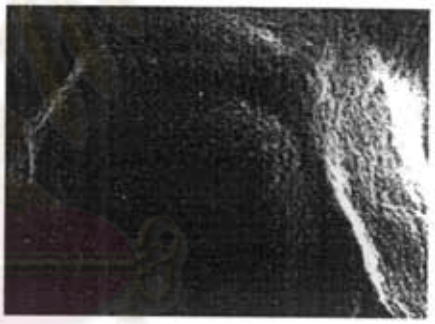


ตัวอย่างการทดลองที่ 3

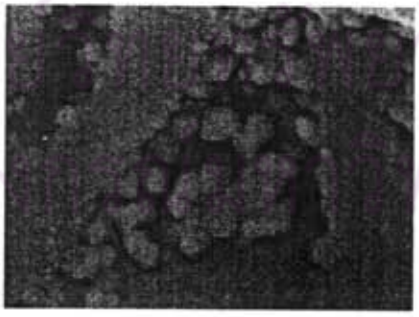


ตัวอย่างการทดลองที่ 4

ตัวอย่างการทดลองที่ 5



ตัวอย่างการทดลองที่ 6



Sephadex G-25

ภาพที่ 20 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM แสดงลักษณะของพื้นผิว สำหรับอนุภาคผลิตภัณฑ์และSephadex G-25

จากภาพที่ 20 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงลักษณะของพื้นผิวสำหรับผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 โดยสามารถมองเห็นรูพรุน (Pore) บนพื้นผิวของทั้งผลิตภัณฑ์ Micro-porous Spherical Cellulose Beads ที่ผลิตได้ และ Sephadex G-25 จากการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์ 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 มุมที่บ่งบอกถึงแรงเสียดทานภายในของวัสดุผง 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 ซึ่งจากการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีค่า Dispersibility มีค่าต่ำกว่า Sephadex G-25 แสดงว่า Sephadex G-25 มีความสามารถในการฟุ้งกระจายได้ดีกว่า เมื่อนำค่าดัชนีจาก Angle of Fall, Dispersibility, Angle of

Difference และ Flowability จากตารางผนวกที่ 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 ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ เมื่อเปรียบเทียบค่า Flowability พบว่าตัวอย่างการทดลองที่ 6 ซึ่งใช้เยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบมีค่า Flowability สูงที่สุด ซึ่งแสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้เยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบ มีคุณสมบัติการเคลื่อนตัวของอนุภาคดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบค่า Floodability พบว่าพบว่าตัวอย่างการทดลองที่ 6 ซึ่งใช้เยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบมีค่า Floodability สูงที่สุด แสดงว่ามีการแพร่กระจายได้ดีที่สุด แต่ค่าทั้งสองของผลิตภัณฑ์ยังต่ำกว่า Sephadex G-25

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

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

8. เมื่อทดสอบหาปริมาณของเหล็กและซิลิคอนในผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบกับ Sephadex G-25 พบว่ามีเหล็กและซิลิคอนในผลิตภัณฑ์จากการวิจัยในปริมาณที่ใกล้เคียงกับ Sephadex G-25 แสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีความปลอดภัยเพียงพอที่จะใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมเช่นเดียวกันกับ Sephadex G-25

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยต่อ

1. ควรมีการวิเคราะห์หาสารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ นอกจาก เหล็ก อลูมิเนียม และซิลิคอน

2. ขยายขนาดของชุดเครื่องมือและอุปกรณ์การทำวิจัยเพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้นเพื่อพัฒนาไปสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรม

3. พัฒนาระบบการผลิตโดยใช้เครื่องมือที่สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่เป็นผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น

4. ทดลองผสมวัสดุชนิดอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษบางประการในผลิตภัณฑ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

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 Matrics-A Novel Excipient in Pharmaceutical Formulation. **Cellulose and Cellulose Derivatives: Physico-chemical Aspects and Industrial Applications.** 445-452.

Jones, D.T., K.R. Ress and G.E. Jowett. 1975. **Ion Exchange Cellulose**. The Patant Office London 1383265..

Kahle, C.F. 2001. Micro-Porous Organic Thin Film by the solvent precipitation Method. **Ind. Eng. Chem.** 40: 33-36.

Laszkiewicz, B., P. Wcislo and B. Domasik. 1990. Preparation of Viscose Fibres from Concentrated Solution of Sodium Cellulose Xanthate. **Cellulose Source and Exploitation.** Ellis Horwood Limited, West Sussex.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Lönnberg, 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 Verginia Pulp & Paper Company. **Encyclopedia of Polymer Science & Technology.** 1(3): 131-226.

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 Generatedfrom Essential Oils with an Array of Quartz Crystal Resonators Coated with Plasma-Deposited Polymers. **Analytical Science 2001.** 17: i257-i260.

Sylvana, C. M. Agustinho, H. T. Maria, R. P. Janice, Maecel Tabak and Hidetake Imasato., 1997. Fluorescence Studies of Extracellular Hemoglobin of Glossoscolex paulistus in Met 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

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ความหมายของค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองหาสมบัติทางฟิสิกส์จากเครื่อง Powder Tester

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความหมายของค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองหาสมบัติทางฟิสิกส์ ที่สามารถหาหาได้จากเครื่อง Powder Tester

Angle of Repose หมายถึง การบ่งบอกศักยภาพของ Flowability ของวัสดุผงแห้ง Angle of Repose ถ้ามีค่าต่ำ แสดงว่า Flowability มีค่าสูง และมีแนวโน้มที่จะเกิด Reproduction แต่ถ้า Angle of Repose มีค่าสูง แสดงว่า Flowability มีค่าต่ำ โดยเฉพาะในกรณีที่วัสดุผงจับตัวรวมกันได้ง่ายหรือยึดตัวติดกัน Angle of Repose เป็นการวัดมุมที่เกิดจากการเทวัสดุผงผ่านตะแกรงที่มีการสั่นและกรวยแก้วลงบนที่รองรับลักษณะแบนกลม

Angle of Fall หมายถึง การบ่งบอกค่า Floodability ของวัสดุผง ถ้า Angle of Fall ลดลง วัสดุผงจะไหลอย่างอิสระมากขึ้น Angle of Fall เป็นการวัดมุมที่เกิดจากการเทวัสดุผงผ่านตะแกรงที่มีการสั่นและกรวยแก้วลงบนที่รองรับลักษณะแบนกลม หลังจากให้แรงในขนาดที่กำหนดกระทำที่ฐานของที่รองรับ

Angle of Difference หมายถึง ลักษณะการไหลพุ่งได้ดีขึ้นของวัสดุผงเมื่อ มีค่า Angle of Difference มากขึ้น Angle of Difference เป็นผลต่างระหว่าง Angle of Repose และ Angle of Fall

Aerated Bulk Density หมายถึง ความหนาแน่นที่เกิดจากการเทวัสดุผงผ่านรางที่มีการสั่นลงสู่ภาชนะที่กำหนดปริมาตรแน่นอน โดยคำนวณจากน้ำหนักของอนุภาคหารด้วยปริมาตรของภาชนะ

Packed Bulk Density หมายถึง ความหนาแน่นที่วัดจากการอัดอนุภาคให้เต็มภาชนะที่กำหนดปริมาตรแน่นอนในเวลาที่กำหนดจากความสูงของภาชนะในการอัดคงที่ และคำนวณจากน้ำหนักของอนุภาคหลังจากการอัดตัวแล้วหารด้วยปริมาตรของภาชนะ

Compressibility หมายถึง การเปรียบเทียบผลต่างระหว่าง Aerated Bulk Density ซึ่งวัสดุผงบรรจุอยู่ในภาชนะอย่างหลวมๆ และ Packed Bulk Density ซึ่งวัสดุผงบรรจุอยู่ในภาชนะได้ถูกอัดแน่น ถ้า Compressibility มีค่าสูงเกิน 20% อาจต้องมีการป้องกันการก่อตัว (Bridge) ในรางลำเลียง (Hopper) หรือภาชนะเก็บวัสดุผง วัสดุผงจะถูกลำเลียงได้ยากเมื่อมีค่า Compressibility สูงถึง 40 ถึง 50 % หากมีการเก็บไว้ในรางสำหรับลำเลียงเป็นเวลานาน

Cohesion หมายถึง ปริมาณของวัสดุผงที่เหลือค้างอยู่บนตะแกรงหลังจากการสั่นที่ความกว้างของคลื่น (Amplitude) คงที่ในเวลาที่กำหนดต่อวัสดุผงบนตะแกรง Cohesion บ่งบอกถึงค่า Flowability ของวัสดุผง โดยต้องมีการออกแบบระบบการลำเลียงวัสดุผงและอุปกรณ์อื่นๆ ที่สัมผัสกับวัสดุผงอย่างพิถีพิถันสำหรับวัสดุผงที่มีค่า Cohesion สูง

Angle of Spatula หมายถึง มุมที่บ่งบอกถึงแรงเสียดทานภายในของวัสดุผง Angle of Spatula วัดโดยที่ช้อนพายของเครื่องมือ (Spatula) แทรกเข้าไปในกองของวัสดุผงและนำขึ้นมาเพื่อวัดมุมที่วัสดุผงก่อตัวอยู่บนช้อนพายของเครื่องมือ Angle of Spatula มักจะมีค่าสูงกว่า Angle of Repose

Dispersibility หมายถึง การฟุ้ง (Scatter) การเกิดฝุ่น(Dusting) การพุ่ง (Flushing) และการแพร่กระจายตัว (Dispersing) ของวัสดุผง ถ้าดัชนีของ Dispersibility มีค่ามากกว่า 50 % วัสดุผงมีลักษณะการพุ่งตัวได้มาก Dispersibility ประเมินได้จากการเทวัสดุผงในปริมาณที่กำหนดจากความสูงที่ควที่ลงบนกระจกนาฬิกา แล้ววัดปริมาณของอนุภาคที่เหลืออยู่บนกระจกนาฬิกา

Uniformity หมายถึง อัตราส่วนของ d60 ต่อ d10 โดยที่ d60 คือ อนุภาคในปริมาณร้อยละ 60 ที่ลอดผ่านตะแกรง และ d10 คือ อนุภาคในปริมาณร้อยละ 10 ที่ลอดผ่านตะแกรง ซึ่งวัดโดยการนำอนุภาคมาผ่านตะแกรง และ/หรือ การหาการกระจายขนาดของอนุภาค ถ้าอนุภาคมีการกระจายของขนาดที่แคบจะทำให้ Uniformity มีค่าเข้าใกล้ 1 ทำให้มี Flowability สูงด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาค่า Uniformity

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

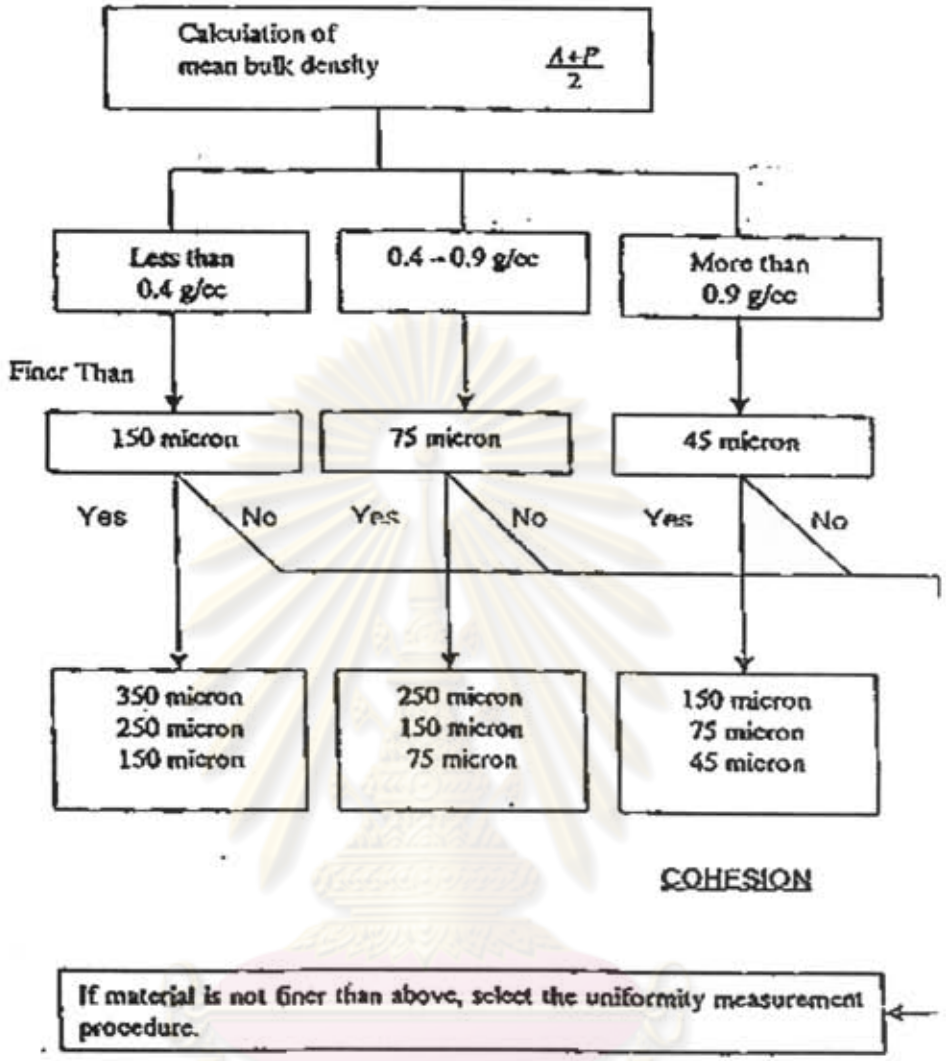
เมื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยและความหนาแน่นโดยเฉลี่ยระหว่าง Aerated Bulk Density และ Packed Bulk Density ดังนี้

ตารางผนวกที่ 1 เปรียบเทียบขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยและความหนาแน่นโดยเฉลี่ย

ตัวอย่างการทดลอง	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคโดยเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่นโดยเฉลี่ย (g/cc)
1	177.29	0.658
2	162.24	0.689
3	155.64	0.598
4	179.80	0.625
5	197.76	0.582
6	213.09	0.590
Sephadex G-25	212.09	0.888

จากตารางภาคผนวกที่ 1 พบว่าความหนาแน่นโดยเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.4 ถึง 0.9 g/cc แต่ขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยของทุกตัวอย่างการทดลองรวมทั้ง Sephadex G-25 มีขนาดมากกว่า 75 ไมโครเมตร ดังนั้นจากแผนภาพการเลือกใช้ระหว่าง Cohesion หรือ Uniformity จึงเลือกใช้ค่า Uniformity

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพผนวกที่ 1 แผนภาพการเลือกใช้ระหว่าง Cohesion หรือ Uniformity

การหาค่า Uniformity ทำได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์แบบ Semi-logarithm ระหว่าง Undersize Fraction และ ขนาดของอนุภาคในหน่วยไมโครเมตร ดังภาพผนวกที่ 2 ถึง 8 ซึ่งได้ผลดังนี้ดังนี้

ตัวอย่างการทดลองที่ 1

d60 = 150

d10 = 59

Uniformity = 150/59 = 2.54

ตัวอย่างการทดลองที่ 2

d60 = 150

d10 = 60

Uniformity = 150/60 = 2.50

ตัวอย่างการทดลองที่ 3

d60 = 135

d10 = 76

Uniformity = 135/76 = 1.78

ตัวอย่างการทดลองที่ 4

d60 = 175

d10 = 80

Uniformity = 175/80 = 2.19

ตัวอย่างการทดลองที่ 5

d60 = 130

d10 = 34

Uniformity = 130/34 = 3.0

ตัวอย่างการทดลองที่ 6

d60 = 100

d10 = 63

Uniformity = 100/63 = 1.59.

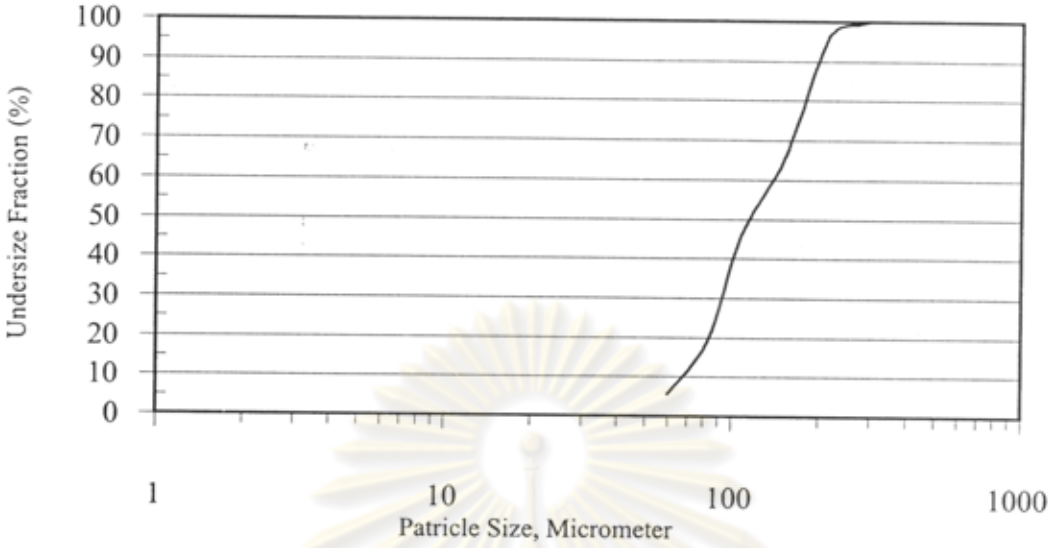
Sephadex G-25

d60 = 150

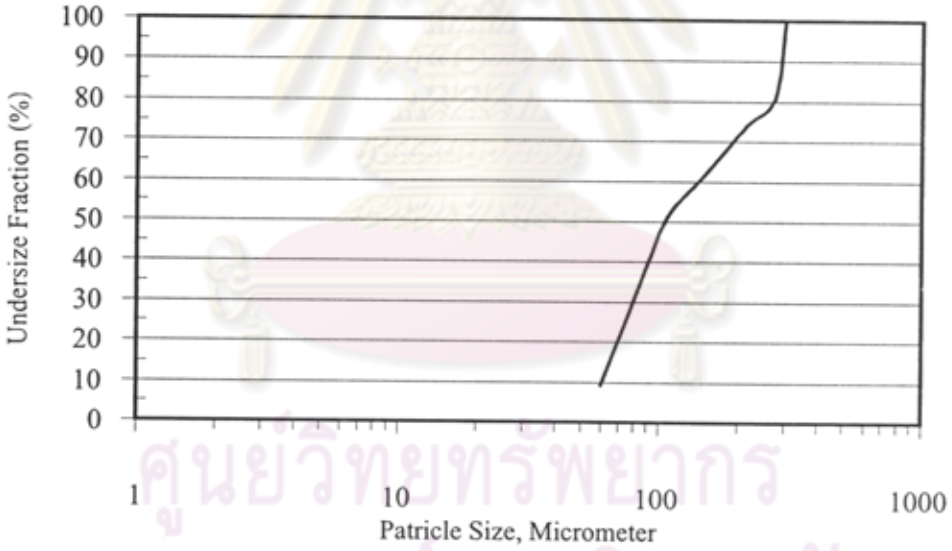
d10 = 50

Uniformity = 150/50 = 3.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

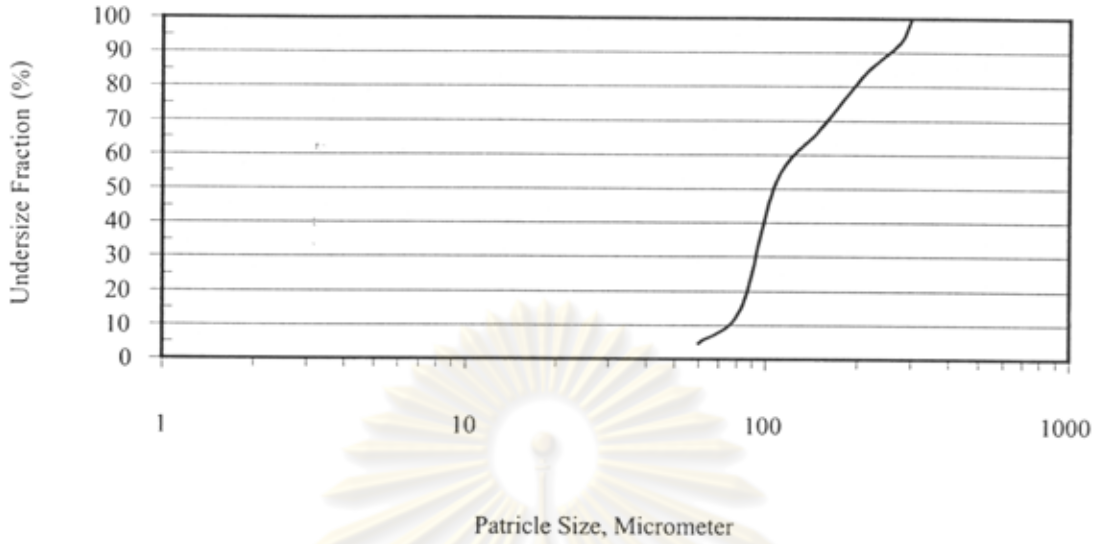


ภาพผนวกที่ 2 การหาค่า Uniformity ของตัวอย่างการทดลองที่ 1

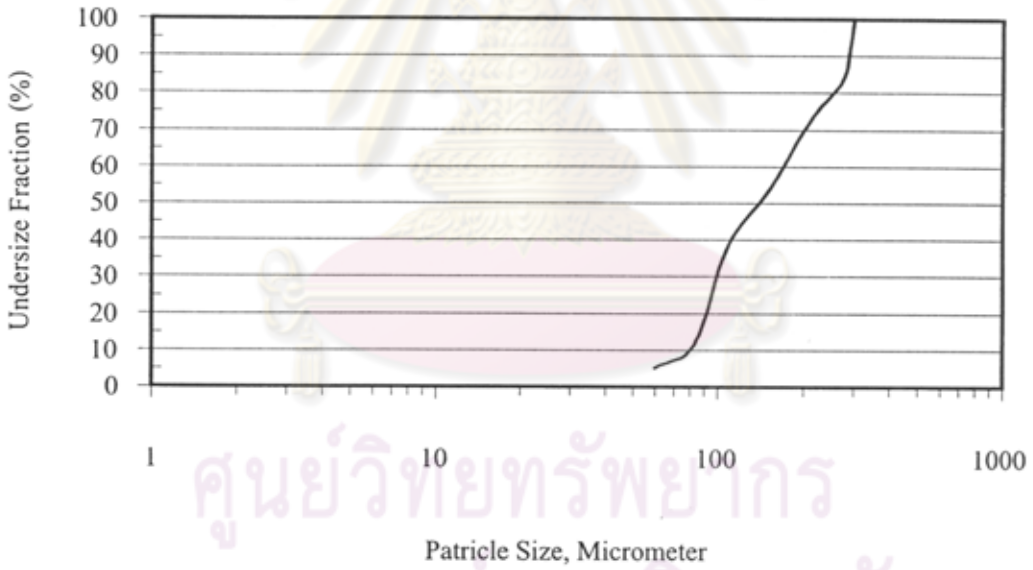


ภาพผนวกที่ 3 การหาค่า Uniformity ของตัวอย่างการทดลองที่ 2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

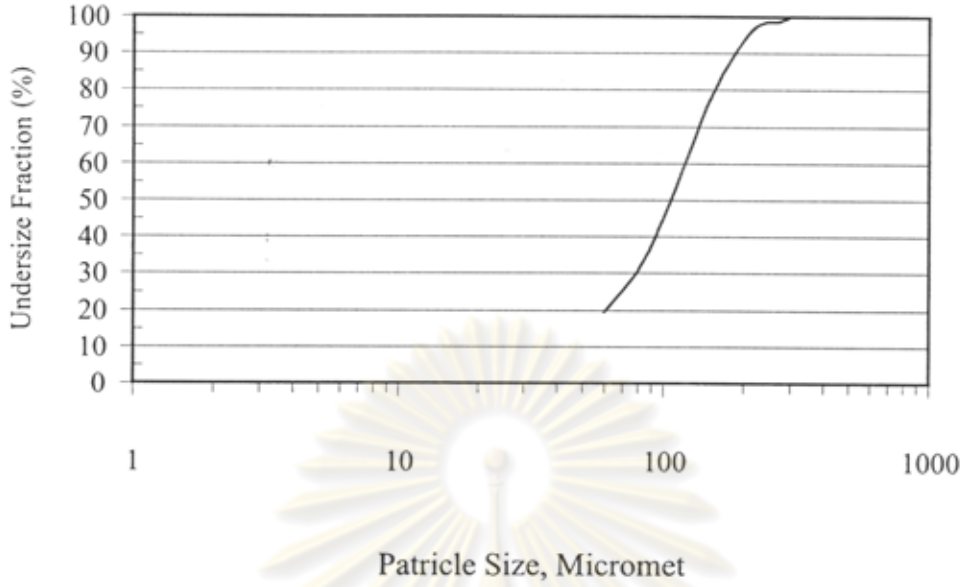


ภาพผนวกที่ 4 การหาค่า Uniformity ของตัวอย่างการทดลองที่ 3

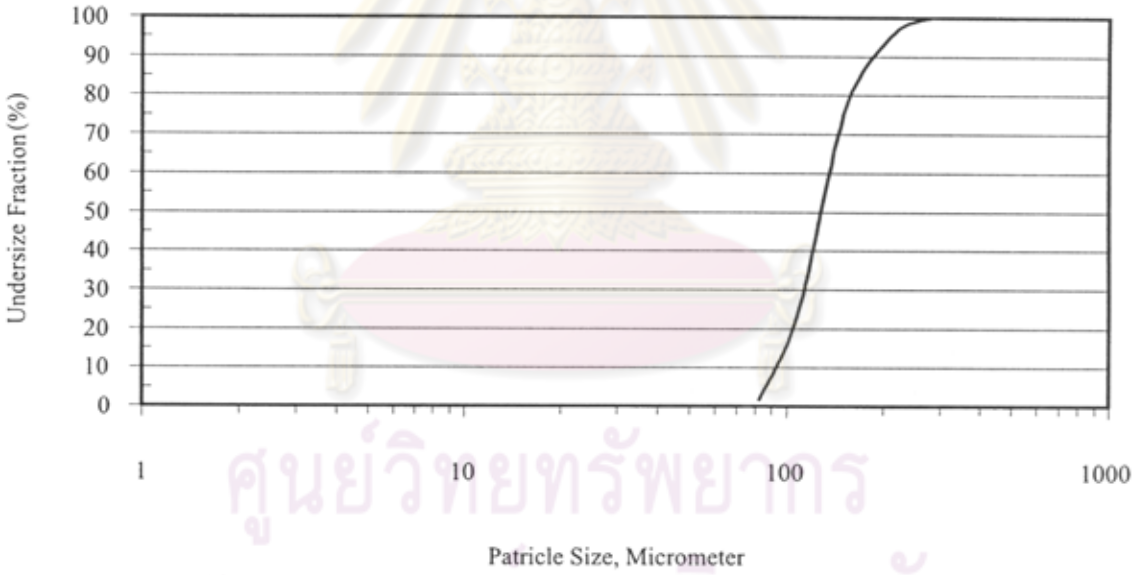


ภาพผนวกที่ 5 การหาค่า Uniformity ของตัวอย่างการทดลองที่ 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

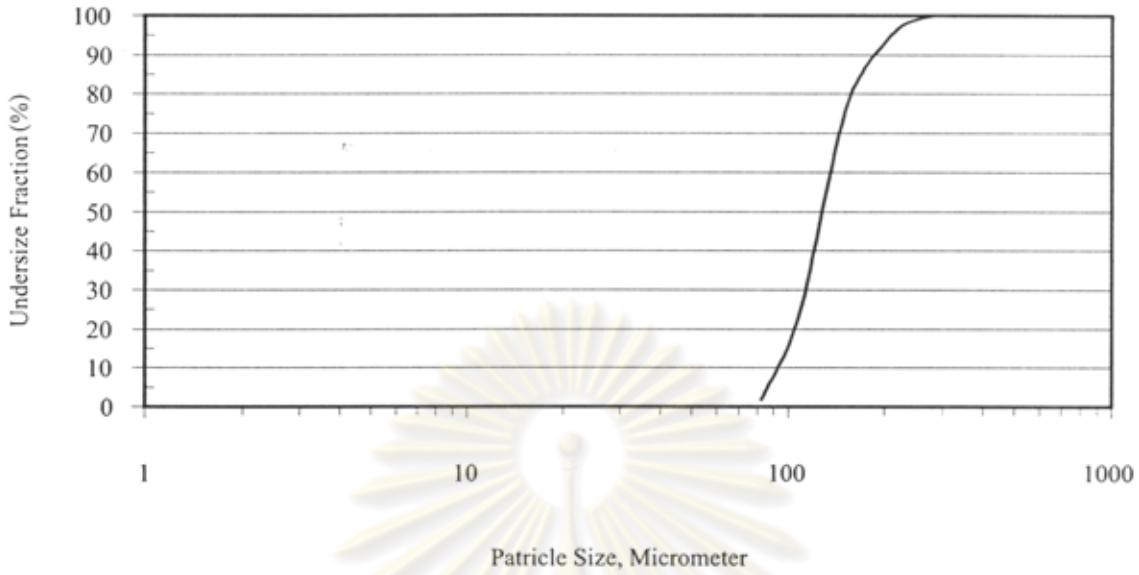


ภาพผนวกที่ 6 การหาค่า Uniformity ของตัวอย่างการทดลองที่ 5



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพผนวกที่ 7 การหาค่า Uniformity ของตัวอย่างการทดลองที่ 6



ภาพผนวกที่ 8 การหาค่า Uniformity ของ Sephadex G-25

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ตารางค่าดัชนีของ Floowability และ Floodability

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผนวกที่ 2 ดัชนีสำหรับประเมินค่า Flowability

Degree of Flowability	Flow-Ability Index	Necessity of Bridge-breaking Measures	Angle of Repose		Compress-ibility		Angle of Spatula		Uniformity		Cohesion	
			Degree	Index	%	Index	Degree	Index	No.	Index	%	Index
Very Good	90-100	Not Required	≤ 25	25	≤ 5	25	≤ 25	25	1	25		
			26-29	24	6-9	24	26-30	24	2-4	23		
			30	22.5	10	22.5	31	22.5	5	22.5		
Fairly Good	80-89	Not Required	31	22	11	22	32	22	6	22		
			32-34	21	12-14	21	33-37	21	7	21		
			35	20	15	20	38	20	8	20		
Good	70-79	Sometimes Vibrator is Required	36	19.5	16	19.5	39	19.5	9	19.5		
			37-39	18	17-19	18	40-44	18	10-11	18		
			40	17.5	20	17.5	45	17.5	12	17.5		
Normal	60-69	Bridging will take place at The marginal point	41	17	21	17	46	17	13	17		
			42-44	16	22-24	16	47-59	16	14-16	16		
			45	15	25	15	60	15	17	15	≤ 6	15
Not Good	40-59	Required	46	14.5	26	14.5	61	14.5	18	14.5	6-9	14.5
			47-54	12	27-30	12	62-74	12	19-21	12	10-29	12
			55	10	31	10	75	10	22	10	30	10
Bad	20-39	Powerful meas-ures should be provided	56	9.5	32	9.5	76	9.5	23	9.5	31	9.5
			57-64	7	33-36	7	77-89	7	24-26	7	32-54	7
			65	5	37	5	90	5	27	5	55	5
Very Bad	0-19	Spacial appara-Tus & tech-Niques are Required	66	4.5	38	4.5	91	4.5	28	4.5	56	4.5
			67-89	2	39-45	2	92-99	2	29-35	2	57-59	2
			90	0	≥ 45	0	≥ 99	0	≥ 35	0	≥ 79	0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผนวกที่ 3 ดัชนีสำหรับประเมินค่า Floodability

Degree of	Flood-ability	Measures for Flushing Prevention	Flowability		Angle of Fall		Angle of Fall		Dispersibility	
			Index From Table 1	Index	Degree	Index	Degree	Index	%	Index
Very High	80-100	Rotary seal must be used	≥ 60	25	≤ 10	25	≥ 30	25	≥ 50	25
			56-59	24	11-19	24	28-29	24	44-49	24
			55	22.5	20	22.5	27	22.5	43	22.5
			54	22	21	22	26	22	42	22
			50-53	21	22-24	21	25	21	41-36	21
			49	20	25	20	24	20	35	20
Fairly High	60-79	Rotary seal is required	48	19.5	26	19.5	23	19.5	34	19.5
			45-47	18	27-29	18	20-22	18	29-33	18
			44	17.5	30	17.5	19	17.5	28	17.5
			43	17	31	17	18	17	27	17
			40-42	16	32-39	16	16-17	16	21-26	16
			39	15	40	15	15	15	20	15
Tend to flush	40-59	Sometime rotary seal is required	38	14.5	41	14.5	14	14.5	19	14.5
			34-37	12	42-49	12	11-13	12	11-18	12
			33	10	50	10	10	10	10	10
May flush	25-39	Rotary seal is necessary depending on flow speed & feeding condition	32	9.5	51	9.5	9	9.5	9	9.5
			29-31	8	52-56	8	8	8	8	8
			28	5.25	57	5.25	7	5.25	7	5.25
Won' t flush	0-24	Not required	27	6	58	6	6	6	6	6
			23-26	3	59-64	3	1-5	3	1-5	3
			>23	0	<54	0	0	0	0	0

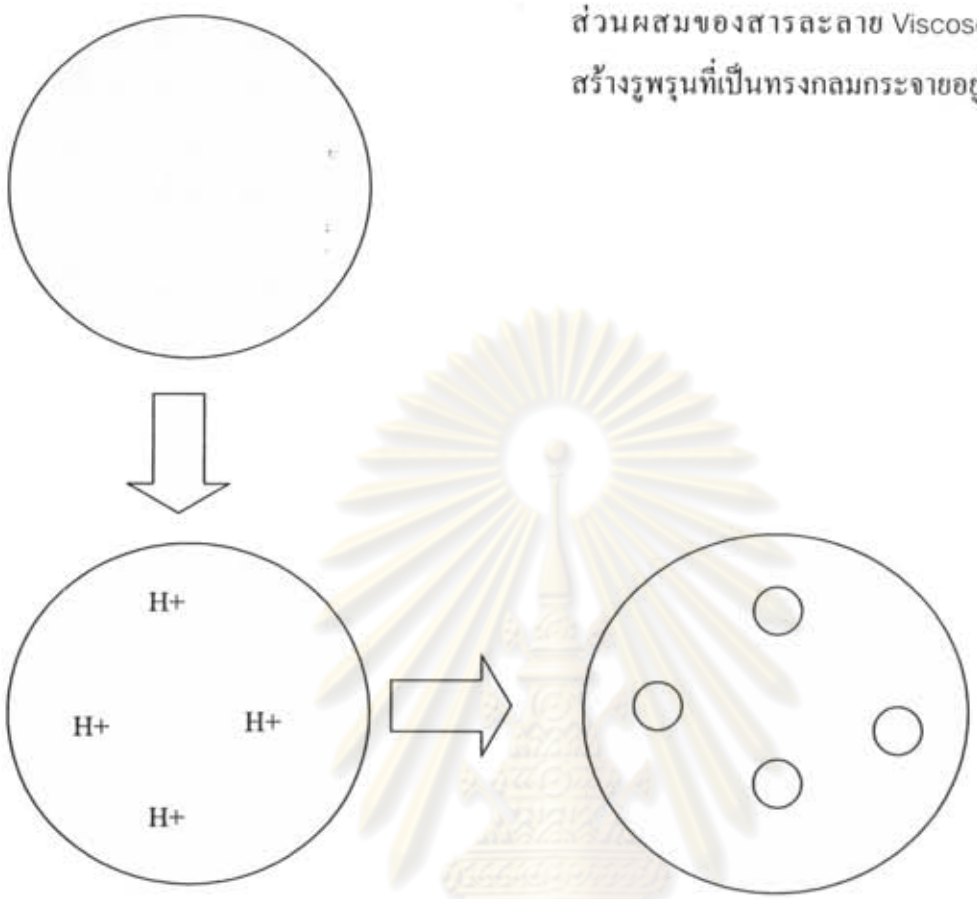
หมายเหตุ : ตารางข้างต้นมาจากหนังสือ " Chemical Engineering" หน้า 166 และ 167 วันที่ 18 มกราคม 1965 โดย Ralph Carr, Jr., McGraw-Hill, New York, USA.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

แบบจำลองการเกิดรูพรุนของอนุภาคที่เป็นผลิตภัณฑ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพผนวกที่ 9 แบบจำลองการเกิดรูพรุนในอนุภาคของผลิตภัณฑ์

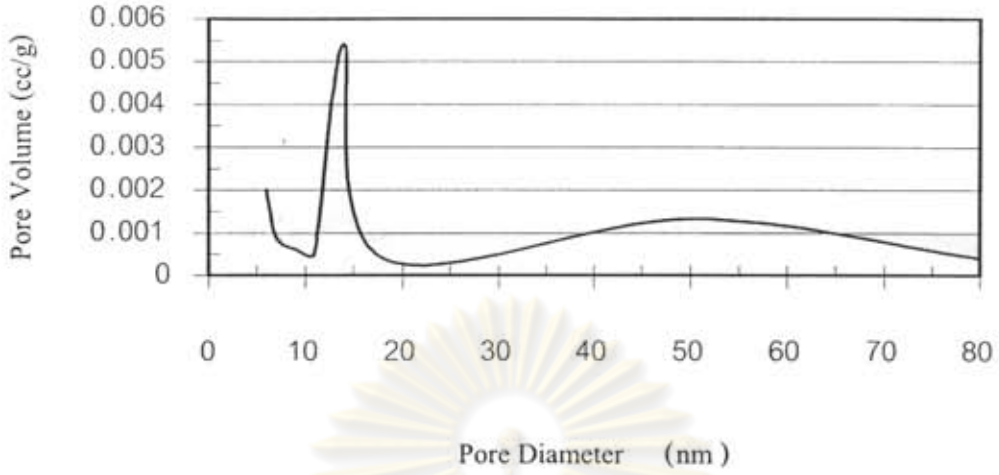
เมื่อผสมสารละลาย Viscose เข้ากับสารสร้างรูพรุน (Soluble Starch หรือ แป้งมันสำปะหลัง) แล้วกวนส่วนผสมดังกล่าวในน้ำมันจะทำให้ส่วนผสมนั้นมีลักษณะเป็นทรงกลมกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำมันที่เป็นตัวกลางสำหรับการแพร่กระจาย

จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริคลงไป สารละลายกรดจะทำปฏิกิริยา Hydrolysis กับสารสร้างรูพรุนทำให้สารสร้างรูพรุนมีขนาดโมเลกุลที่เล็กลงและหลุดออกมาจากหยดของสารละลาย Viscose ที่เป็นทรงกลม ในขณะเดียวกัน สารละลาย Viscose ที่เป็นทรงกลมจะเกิดการแข็งตัวกลายเป็นอนุภาคเมื่อสารสร้างรูพรุนหลุดออกไปจึงทำให้เกิดรูพรุนบนอนุภาค

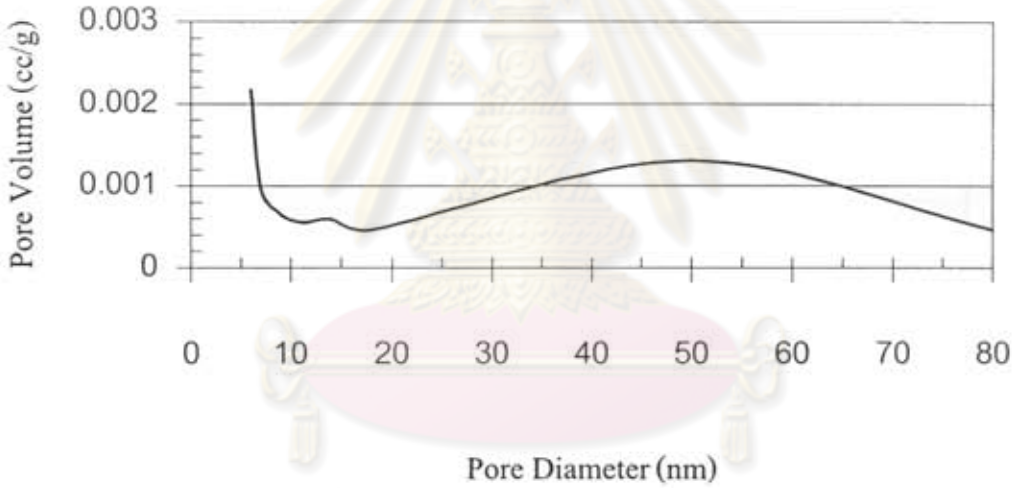
ภาคผนวก จ

การกระจายขนาดของรูพรุนในอนุภาค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

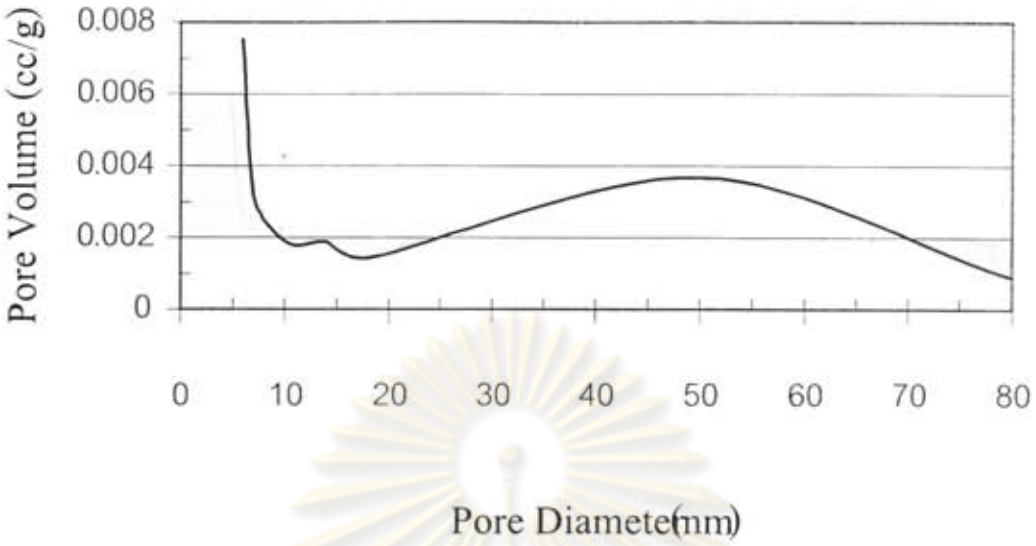


ภาพผนวกที่ 10 การกระจายขนาดของรูพรุนจากตัวอย่างการทดลองที่ 1

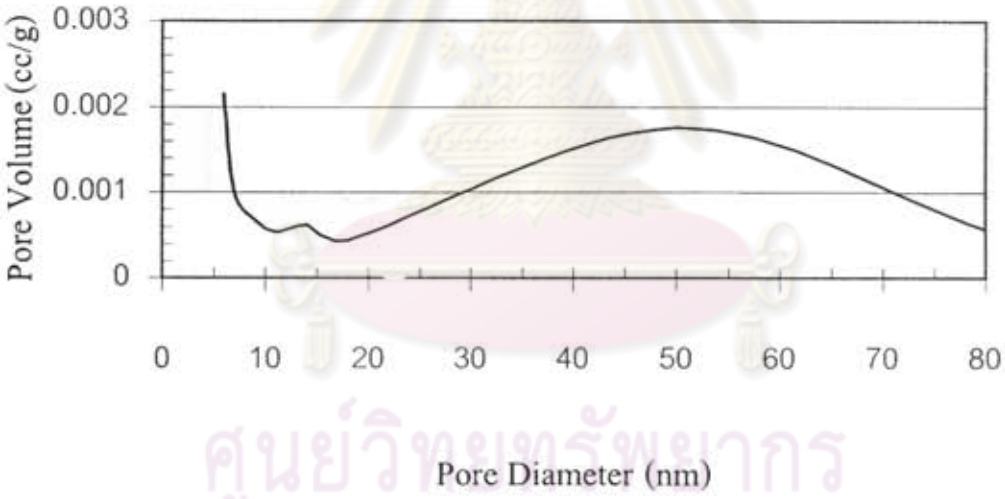


ภาพผนวกที่ 11 การกระจายขนาดของรูพรุนจากตัวอย่างการทดลองที่ 2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

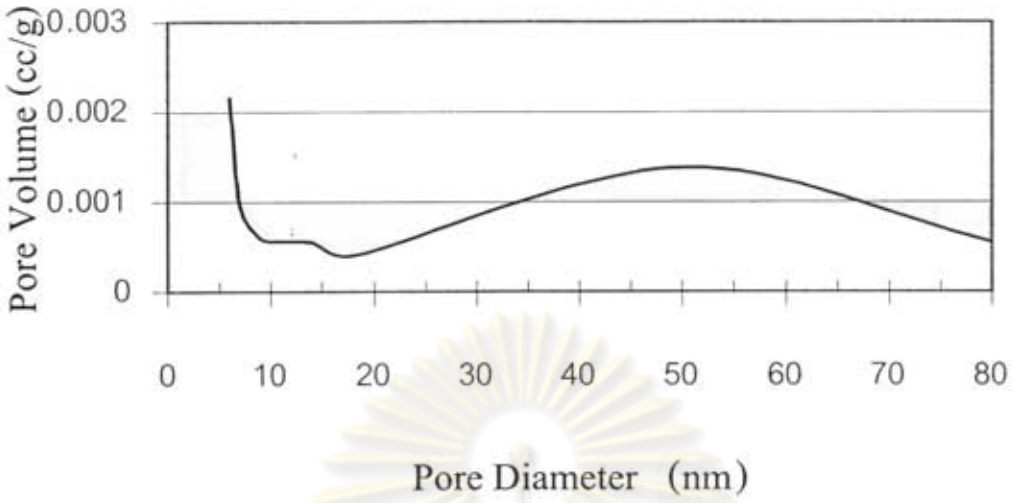


ภาพผนวกที่ 12 การกระจายขนาดของรูพรุนจากตัวอย่างการทดลองที่ 3

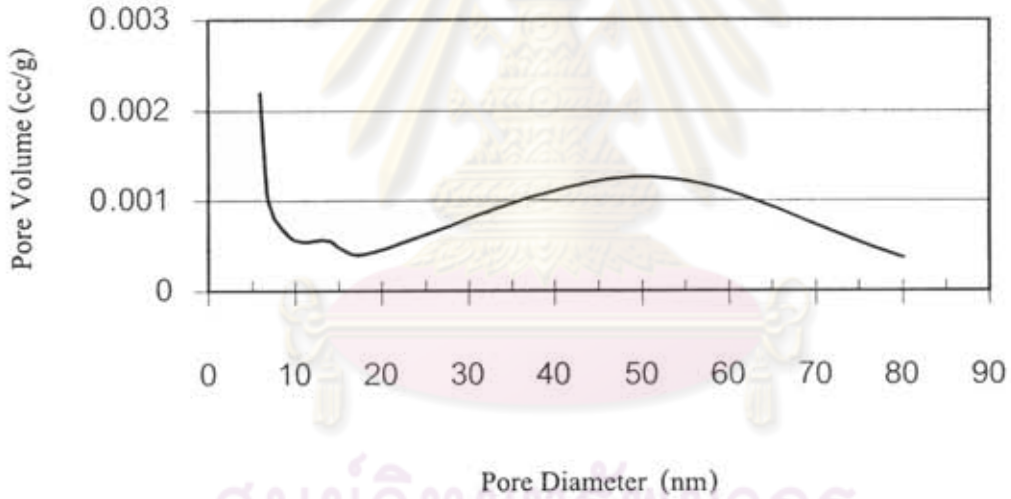


ภาพผนวกที่ 13 การกระจายขนาดของรูพรุนจากตัวอย่างการทดลองที่ 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

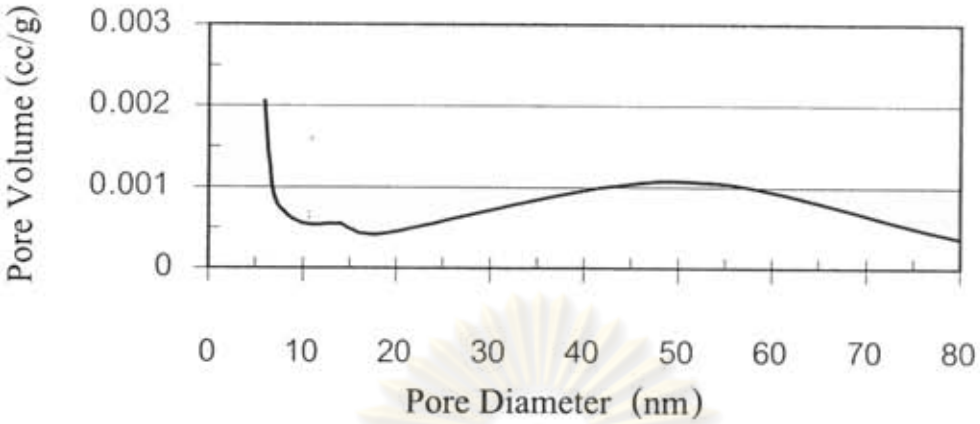


ภาพผนวกที่ 14 การกระจายขนาดของรูพรุนจากตัวอย่างการทดลองที่ 5



ภาพผนวกที่ 15 การกระจายขนาดของรูพรุนจากตัวอย่างการทดลองที่ 6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพผนวกที่ 16 การกระจายขนาดของรูพรุนจาก Sephadex G-25

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย