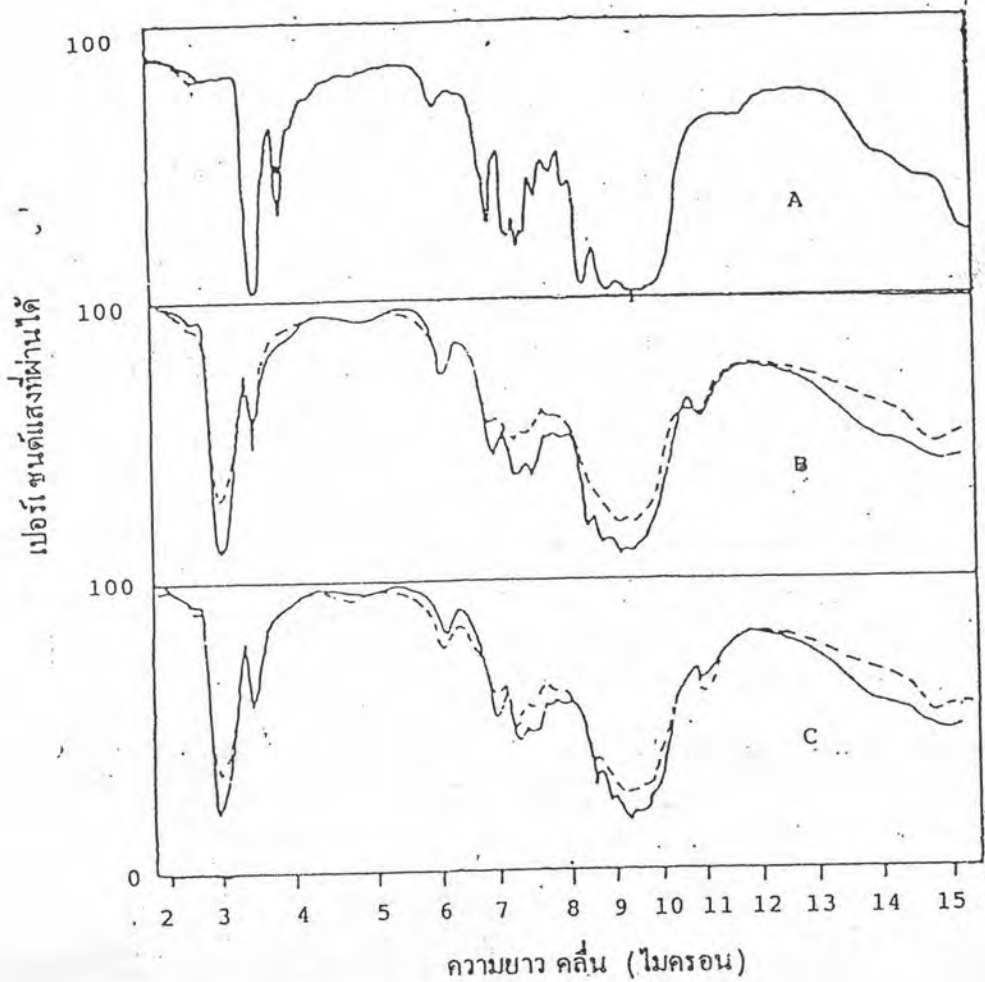




วุ้นน้ำมะพร้าว

วุ้นน้ำมะพร้าวได้จากการหมักน้ำมะพร้าวด้วยเชื้อแบคทีเรียที่สามารถสร้างกรดอะซิติกได้โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย *Acetobacter aceti* subspecies *xylinum* (Tayama et al., 1985) ในการผลิตวุ้นน้ำมะพร้าว น้ำมะพร้าวที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นจะต้องเป็นน้ำมะพร้าวแก่ที่สุดและใหม่ มีไขมันน้อยในปริมาณร้อยละ 10-20 (โดยปริมาตร) ปรับภาวะให้มีค่าความเป็นกรด 4-5 โดยใช้กรดอะซิติก และให้ปริมาณออกซิเจนเพียงพอ มีการเติมน้ำตาลและสารประกอบไนโตรเจน โดยน้ำตาล ได้แก่ กาแลคโตส เด็กซ์โตรส ซูโครส แลคโตส และมอลโตส ใส่ในปริมาณร้อยละ 5-8 น้ำหนักต่อปริมาตร เพื่อเป็นแหล่งของคาร์บอนให้เชื้อเจริญเติบโต (สมคิด ธรรมรัตน์, 2531) ส่วนสารประกอบไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต แอมโมเนียมซัลเฟต ใส่ในปริมาณร้อยละ 0.5-0.6 น้ำหนักต่อปริมาตร เพื่อเร่งให้เชื้อผลิตแผ่นวุ้นน้ำมะพร้าวได้หนาในเวลาอันสั้น ถ้าใส่มากกว่านี้จะทำให้ผลผลิตลดลง (Alaban, 1962) นำน้ำมะพร้าวข้างต้นมาตั้งทิ้งไว้ไม่ให้เกิดการเคลื่อนไหวเป็นเวลา 10-15 วัน จะได้แผ่นวุ้นน้ำมะพร้าวหนา 1-2.5 เซนติเมตร ซึ่งมีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสร้อยละ 95-97 ของน้ำหนักแห้ง (Yamanaka et al., 1989)

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การย่อยด้วยกรด หรือเอนไซม์ การละลายในตัวทำละลายต่างชนิดกัน และการวิเคราะห์โดยเครื่องโครมาโตกราฟ เครื่อง infrared spectroscopy ultraviolet spectroscopy nuclear magnetic resonance X-ray diffraction และ electrophoresis พบว่าเซลลูโลสของวุ้นน้ำมะพร้าวมีลักษณะคล้ายเซลลูโลสจากพืช (Kaushal and Walker, 1951; Hestrin and Schramn, 1954) ตั้งสามารถเปรียบเทียบ IR spectra ของเซลลูโลสจากวุ้นน้ำมะพร้าวกับของเซลลูโลสจากพืช (รูปที่ 1) พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกันมากโดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 9-10 ไมครอน (Hurterbise and Krassig, 1960)



รูปที่ 1 Infrared spectra ของเซลลูโลสในวุ้นน้ำมะพร้าว (A) เปรียบเทียบกับของต้น
เบ็ช (B) และต้นสน (C) (Hurterbise and Krassig, 1960)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวุ้นน้ำมะพร้าว (ตารางที่ 1) พบว่ามี
คาร์โบไฮเดรต และเส้นใย มากถึงร้อยละ 53.57-59.26 และ ร้อยละ 19.64-21.30 ตามลำดับ
(เมื่อคิดจากน้ำหนักแห้ง) โดยที่เส้นใยนี้คือเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในวุ้นน้ำ
มะพร้าว จากการย่อยเซลลูโลสวุ้นน้ำมะพร้าวด้วยกรดพบว่ามีน้ำตาลกลูโคสอยู่ร้อยละ 81.9
แต่เมื่อย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสพบว่ามีน้ำตาลกลูโคสอยู่ร้อยละ 95.9 (Kochler, 1952) นอก
จากนี้วุ้นน้ำมะพร้าวยังประกอบด้วยน้ำตาลแอล-แรมโนส ดี-กลูคูโรนิก และโอ-อะซีติล โดยที่
อัตราส่วนของโมลของน้ำตาล ดี-กลูโคส แอล-แรมโนส ดี-กลูคูโรนิก และโอ-อะซีติล เป็น
4:1:1:1 (Tayama et al., 1985) คาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ในวุ้นน้ำมะพร้าวมีมวลโมเลกุล
เฉลี่ย คือ 300,000 ถึง 500,000 (Savidge and Colvin, 1985)

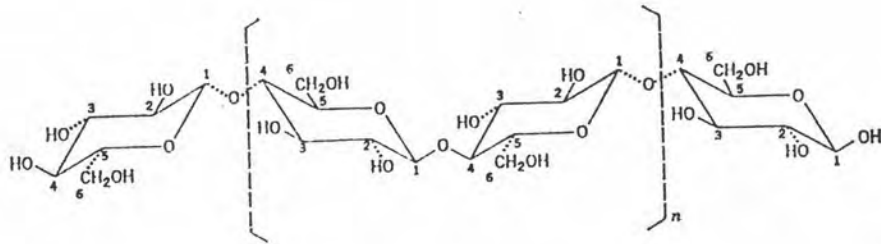
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวุ้นน้ำมะพร้าว (สมคิด ธรรมรัตน์, 2531)

องค์ประกอบทางเคมี	ผลการวิเคราะห์โดย (ร้อยละ)	
	กรมวิทยาศาสตร์บริการ	กองเกษตรเคมี
น้ำ	94.40	94.60
ไขมัน	0.05	0.06
เส้นใย	1.10	1.15
โปรตีน	0.68	0.84
เถ้า	0.77	0.10
คาร์โบไฮเดรต	3.00	3.20

เซลลูโลส

เซลลูโลสได้จากผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ พืช ได้แก่ ไม้เนื้ออ่อน (softwood) หรือไม้เียวขาว เช่น สน 2 ใบ สน 3 ใบ ไม้เนื้อแข็ง (hardwood) หรือไม้เียวสั้น เช่น ยูคาลิปตัส และพืชที่ไม่ใช่ไม้ (nonwood) เช่น ฝ้าย ชานอ้อย ปอ เป็นต้น นอกจากนี้ *Tunicates* อะมีบาราเมีย อ๊ก สาหร่ายทะเล และแบคทีเรีย *Acetobacter* ก็สามารถผลิตเซลลูโลสจำนวนมากจึงถูกใช้ในการศึกษาการสังเคราะห์เซลลูโลส ไมโครไฟบริลของเซลลูโลสที่พบจากแหล่งต่าง ๆ มีขนาดต่างกัน ไมโครไฟบริลของเซลลูโลสซึ่งพบในพืชหรือแบคทีเรียมีขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร ส่วนที่พบในสาหร่ายทะเลมีขนาดยาวถึง 25-30 นาโนเมตร (กองการวิจัย, 2513; Colvin, 1972; Preston, 1974) แหล่งเซลลูโลสที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ได้จากพืช แต่ในปัจจุบันมีความสนใจที่จะนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียมาใช้ประโยชน์มากขึ้น

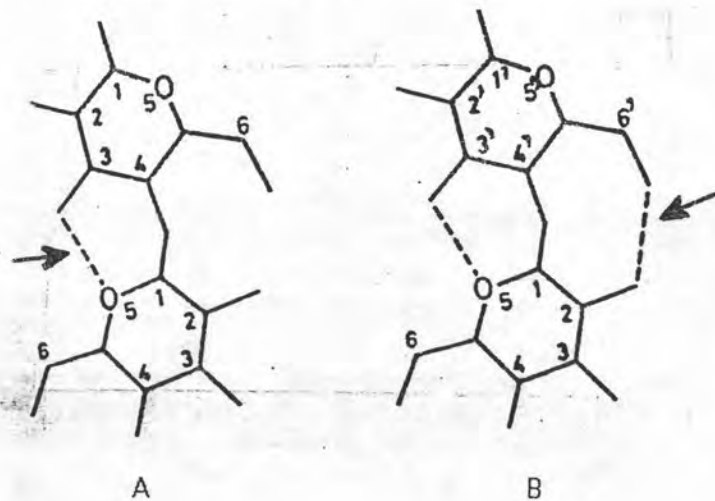
เซลลูโลสเป็นโพลีแซคคาไรด์ซึ่งมีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ และมีชื่อทางเคมีว่า 1,4-β-D-polyanhydroglucopyranose โครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยกลูโคสตั้งแต่ 15 ถึง 40,000 หน่วยต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะ β-(1,4) glycosidic ดังแสดงในรูปที่ 2 (Cowling and Kirk, 1976) น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาซึ่งประมาณ 1,500,000 dalton โดยเฉลี่ย (Brown, 1983)



รูปที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส (Cowling and Kirk, 1976)

จากการศึกษาการจัดเรียงโมเลกุลเซลลูโลสโดยวิธี infrared spectroscopy nuclear magnetic resonance และ x-ray diffraction (Blackwell and Marchessault, 1971) แสดงว่ามีพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลเซลลูโลส คือ

- พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมไฮโดรเจนของกลุ่มไฮดรอกซิลบนอะตอมคาร์บอนตัวที่ 3 กับอะตอมออกซิเจนของ pyranose ring ของหน่วยกลูโคสข้างเคียงตามโมเดลของ Liang and Marchessault (1959) (รูปที่ 3A)
- พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมไฮโดรเจนของกลุ่มไฮดรอกซิลบนอะตอมคาร์บอนตัวที่ 2 กับบนอะตอมคาร์บอนตัวที่ 6' ของหน่วยกลูโคสข้างเคียงตามโมเดลของ Blackwell Kolpak และ Gardner (1977) (รูปที่ 3B)



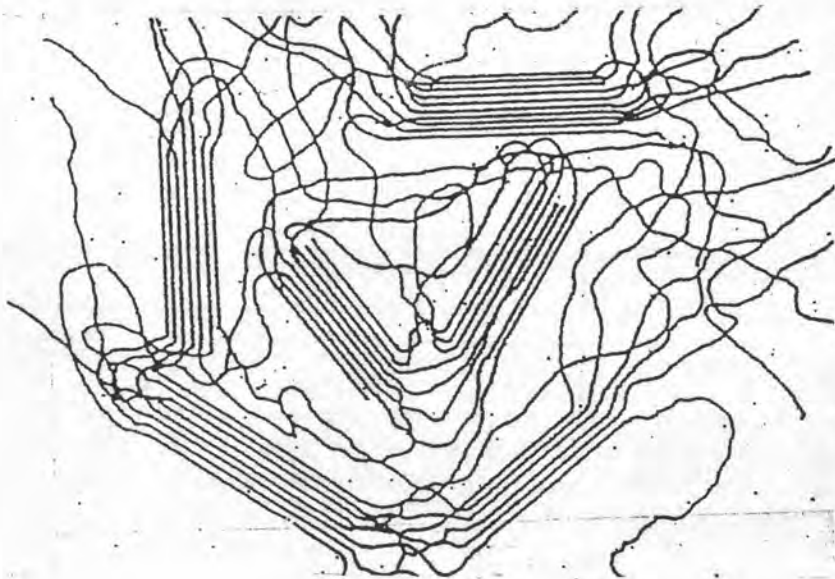
รูปที่ 3 พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลเซลลูโลส (Krässig, 1985)

A : ตามโมเดลของ Liang and Marchessault

B : ตามโมเดลของ Blackwell และคณะ



พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลนี้เป็นเหตุให้สายโซ่ของเซลลูโลสยึดตรงและไม่ยืดหยุ่น และเกิดโครงสร้าง "two-fold screw axis" หรือ "two-fold helical" ซึ่งมีเสถียรภาพสูง พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลนี้ยังกำหนดระยะห่างระหว่างผลึกที่แน่นอนเป็น 1.03 นาโนเมตร (Sarko, 1978) ซึ่งทำให้โครงสร้างโมเลกุลเซลลูโลสในธรรมชาติคงรูป และการมีพันธะไฮโดรเจนยังทำให้สายโซ่มีการจัดเรียงในลักษณะ parallel จนกลายเป็นผลึก (Krässig, 1985) การจัดเรียงตัวนี้ทำให้เกิดโครงสร้างของเส้นใยเซลลูโลสในระดับ supermolecular structure ตามโมเดล Fringe-micellar ดังแสดงในรูปที่ 4 Mark (1940) อธิบายได้ว่าส่วนที่เป็น crystalline micelles มีการจัดเรียงโมเลกุลของเซลลูโลสอย่างเป็นระเบียบล้อมรอบอยู่ในโครงสร้างตาข่ายของส่วนที่เป็นอสัณฐานซึ่งมีการจัดเรียงโมเลกุลไม่เป็นระเบียบ จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสด้วยวิธี x-ray diffraction แสดงว่าการจัดเรียงตัวของผลึกเซลลูโลสมี 4 แบบ คือ เซลลูโลส I II III และ IV ซึ่งมีการจัดเรียงตัวในหน่วยเซลล์ต่างกันตามชนิดและขนาด (ความยาวแกนและมุม) ของหน่วยเซลล์ดังแสดงในตารางที่ 2 (Honeyman, 1959) และแสดงการจัดเรียงตัวเซลลูโลสชนิด I และ II ในหน่วยเซลล์ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 โมเดล fringe-micellar ของเส้นใยเซลลูโลส (Mark, 1940)

ตารางที่ 2 ขนาดหน่วยเซลล์ของเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ (Honeyman, 1959)

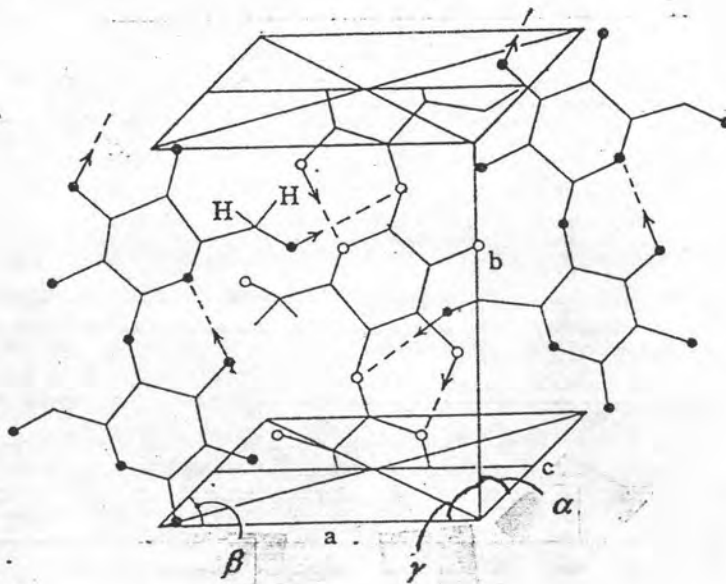
รูปแบบผลึก ของเซลลูโลส	ประเภทของ หน่วยเซลล์	ความยาวแกน (nm)			มุม *
		a	b	c	
เซลลูโลส I	monoclinic	0.82	1.03	0.79	$\alpha = \gamma = 90^\circ ; \beta = 83^\circ$
เซลลูโลส II	monoclinic	0.80	1.03	0.91	$\alpha = \gamma = 90^\circ ; \beta = 62^\circ$
เซลลูโลส III	monoclinic	0.86	1.03	0.86	$\alpha = \gamma = 90^\circ ; \beta = 60^\circ$
เซลลูโลส IV	orthorhombic	0.81	1.03	0.79	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

หมายเหตุ เครื่องหมาย * หมายถึง มุมที่อยู่ตรงข้ามแกนต่าง ๆ ดังนี้

มุม α คือ มุมที่อยู่ตรงข้ามแกน a

มุม β คือ มุมที่อยู่ตรงข้ามแกน b

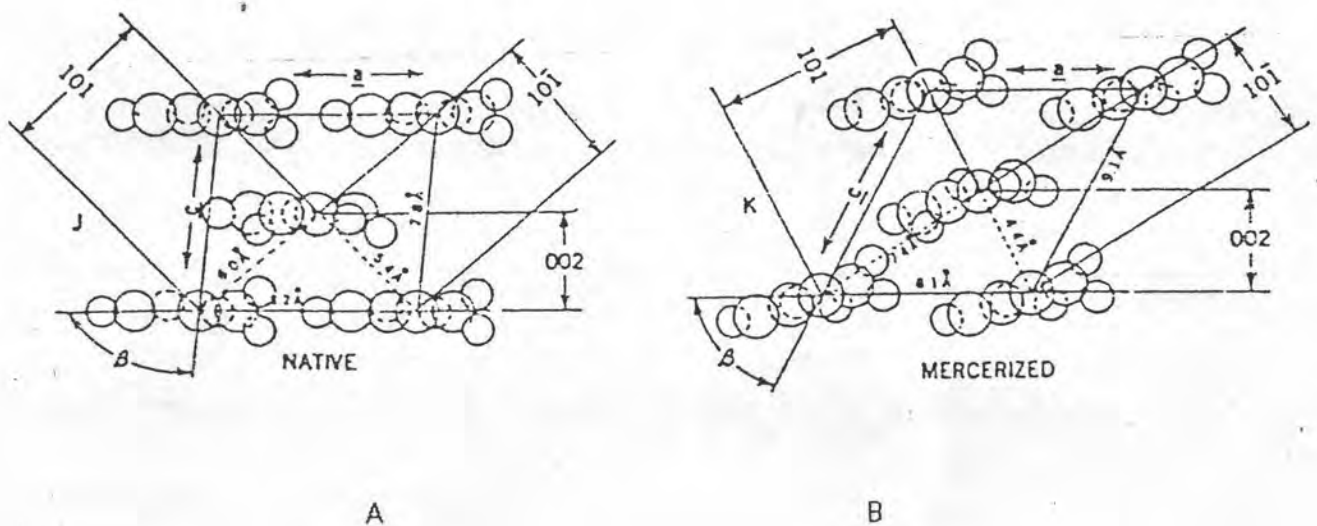
มุม γ คือ มุมที่อยู่ตรงข้ามแกน c



รูปที่ 5 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลสตามธรรมชาติในหน่วยเซลล์

(Liang and Marchessault, 1959)

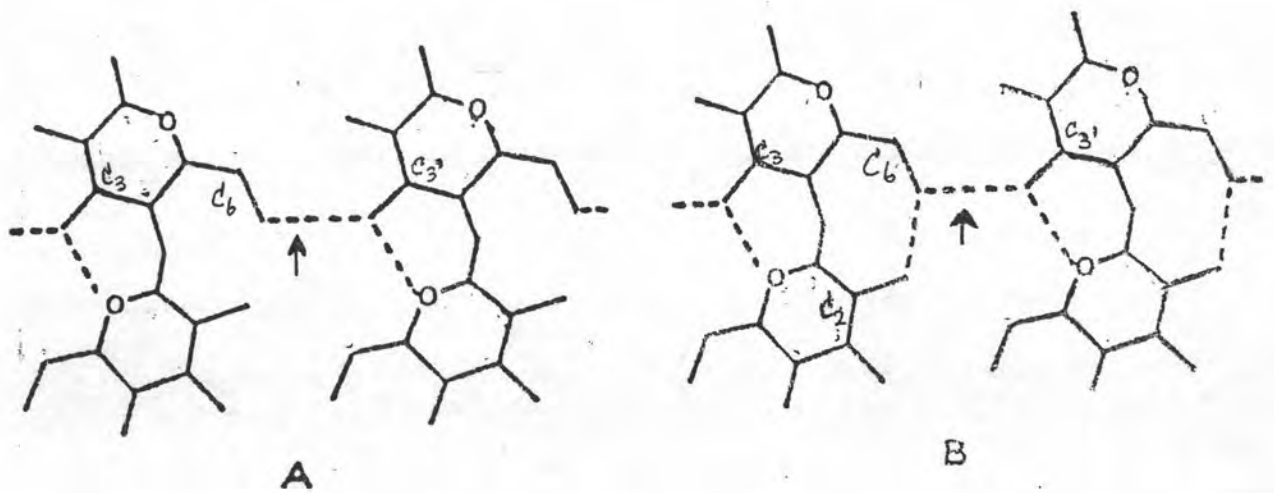
เซลลูโลส I เป็นรูปแบบที่พบทั้งหมดในธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวของไมโครไฟบริลแบบ parallel มากกว่าแบบ random หรือ antiparallel ตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์ เซลลูโลส I ไม่เสถียรเท่าเซลลูโลส II เมื่อนำเซลลูโลส I มาละลายแล้วทำให้ตกผลึกใหม่หรือทำให้พองตัวในด่าง เซลลูโลส I เปลี่ยนไปเป็นเซลลูโลส II ซึ่งเสถียรกว่า เซลลูโลส II นี้มีการจัดเรียงตัวของไมโครไฟบริลแบบ antiparallel ตัวอย่างของเซลลูโลส II คือ regenerated cellulose ได้แก่ เรยอน (rayon) เซลโลเฟน (cellophane) และ mercerized cellulose (Delmer, 1983; Krässig, 1985) การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส I แบบ parallel และของเซลลูโลส II แบบ antiparallel แสดงดังรูปที่ 6 ส่วนเซลลูโลส III และ IV เป็นรูปแบบผลึกที่มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบของเซลลูโลส II และ I ตามลำดับ (Howsmon and Sisson, 1954)



รูปที่ 6 โครงสร้างของหน่วยเซลล์เซลลูโลส I และ II (Krässig, 1985)

- A : เซลลูโลสตามธรรมชาติ (เซลลูโลส I) ตามโมเดลโครงสร้างผลึกของ Meyer-Mark-Misch
- B : mercerized cellulose (เซลลูโลส II) ตามโมเดลโครงสร้างผลึกของ Address

จากตำแหน่งของสายโซ่เซลลูโลสที่อยู่ติดกันภายในหน่วยเซลล์ของเซลลูโลส I ทำให้มีการเกิดพันธะ secondary valence และแรง van-der-Waals ระหว่างสายโซ่ที่อยู่ติดกันใน lattice plane เดียวกัน ซึ่งรูปที่ 6A แสดงให้เห็นถึงโมเลกุลเซลลูโลสที่อยู่ติดกันภายใน 002-lattice layer จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลที่เกิดขึ้นระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิลบนคาร์บอนอะตอมตัวที่ 6 ของสายหนึ่งกับกลุ่มไฮดรอกซิลบนคาร์บอนอะตอมตัวที่ 3' (Liang and Marchessault, 1959 ; Blackwell et al., 1977) (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลภายใน 002-Lattice planes ของเซลลูโลส I (Krässig, 1985)

A : ตามโมเดลของ Liang and Marchessault

B : ตามโมเดลของ Blackwell และคณะ

สำหรับโครงสร้างของเซลลูโลส II กลุ่มไฮดรอกซิลทุกกลุ่มอยู่ในตำแหน่งที่สามารถทำให้เกิดพันธะได้ทั้งพันธะไฮโดรเจนภายในและระหว่างโมเลกุล โดยที่การเกิดพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลเป็นเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในเซลลูโลส I (รูปที่ 7B) สำหรับพันธะระหว่างระนาบ (interplanar bonding) Blackwell และคณะ (1977) คาดว่ามีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้น 3 สาย ดังนี้

- พันธะไฮโดรเจนระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิลบนคาร์บอนตัวที่ 6 ของสายโซ่หนึ่ง กับกลุ่มไฮดรอกซิลบนคาร์บอนตัวที่ 3” ของอีกสายโซ่ที่อยู่ตรงกลางของ 002-plane ตามทิศทาง “ลง” (รูปที่ 8A)

- พันธะไฮโดรเจนระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิลบนคาร์บอนตัวที่ 6 ของสายโซ่หนึ่ง กับกลุ่มไฮดรอกซิลบนคาร์บอนตัวที่ 2” ของอีกสายโซ่โมเลกุลที่อยู่ตรงมุมของ 002-planer ตามทิศทาง “ขึ้น” (รูปที่ 8B)

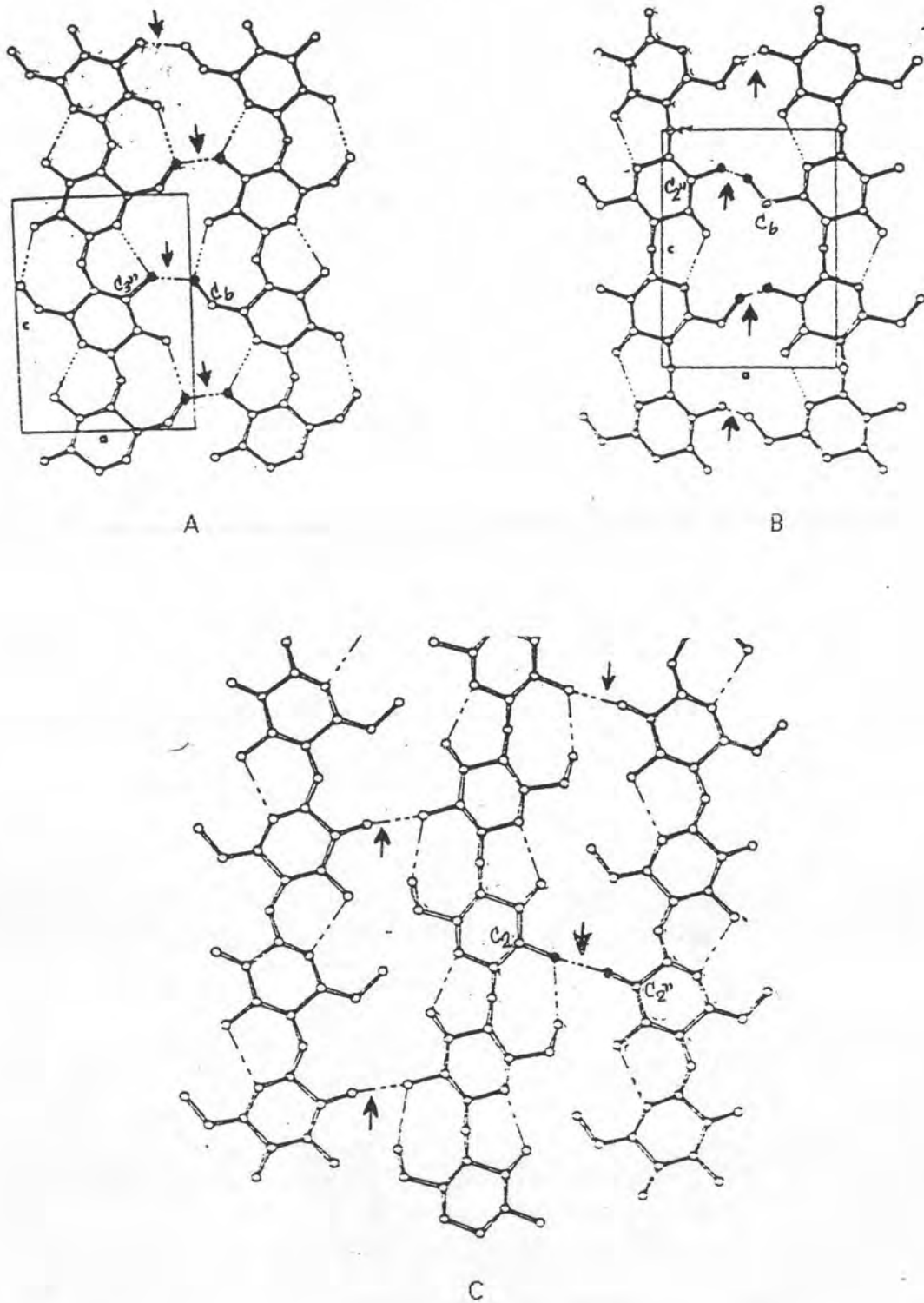
- พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่จัดเรียงแบบ antiparallel ใน 101-plane (รูปที่ 6B) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิลบนอะตอมคาร์บอนตัวที่ 2 ของสายหนึ่ง กับกลุ่มไฮดรอกซิลบนอะตอมคาร์บอนตัวที่ 2” จากแต่ละหน่วยกิโลเซลที่สองของอีกสายโซ่หนึ่งที่เกิดตรงใจกลางตามทิศทาง “ลง” และสายโซ่ที่เกิดตรงมุมตามทิศทาง “ขึ้น” (รูปที่ 8C)

การมีพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นนี้ ทำให้โครงสร้างผลึกของเซลลูโลส II มีโครงสร้างที่อัดแน่นมากกว่าโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส I

โครงสร้าง crystalline มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาใด ๆ กับเซลลูโลส เช่น ในการย่อยเซลลูโลสด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 นอร์มอล อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการย่อยแบบ heterogeneous จะพบว่าอัตราเร็วในการย่อยเปลี่ยนแปลงตามเวลา คือ ในช่วงแรกการย่อยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ต่อมาการย่อยจะเกิดช้าลงจนกระทั่งหยุดอย่างสมบูรณ์เมื่อถึงขนาดของผลึก (DP-length of the crystallites) เพราะเป็นการย่อยของส่วนอสัณฐานซึ่งจะย่อยได้เฉพาะไฟบริลที่ผิวหน้าของผลึกและส่วนที่อยู่ระหว่างรอยต่อระหว่างผลึก แต่จะไม่ย่อยบริเวณผลึกและเรียกจุดที่หยุดการย่อยอย่างสมบูรณ์นี้ว่า “limiting degree of polymerization” (Krässig, 1985)

เยื่อใยวาล์เฟตคือเยื่อที่ได้จากการสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากพืชพวกไม้เนื้ออ่อน มีความยาวของเส้นใย 3-5 มิลลิเมตร โดยทำการละลายลิกนิน*ในส่วนของเชื่อมต่อน้ำตาลและผนังเส้นใยออกมา หรือที่เรียกว่า delignification ด้วยวิธีทางเคมีซึ่งนิยม 2 วิธี ซึ่งทั้งสองวิธี

* ลิกนิน เป็นพอลิเมอร์ของไฮดรอกซีฟีนิลโพรเพน (hydroxyphenyl propane) เป็นสารประกอบที่มีความซับซ้อนมากที่สุด ลิกนินมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและรูปร่างไม่แน่นอน พบระหว่าง middle lamella มีโครงสร้างที่แข็งทำหน้าที่เป็นตัวยึดเส้นใยให้ติดอยู่ด้วยกัน ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายได้ดีในด่าง (Goodwin and Mercer, 1972)



รูปที่ 8 โครงร่างตาข่ายที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างระนาบของโครงสร้างเซลล์ II

(Krässig, 1985)

- A : พันธะไฮโดรเจนที่เกิดกับสายโซ่ที่อยู่ตรงกลางของ 002-plane ตามทิศทาง “ลง”
- B : พันธะไฮโดรเจนที่เกิดกับสายโซ่ที่อยู่ตรงมุมของ 002-planer ตามทิศทาง “ขึ้น”
- C : พันธะไฮโดรเจนระหว่างระนาบที่เกิดระหว่างสายโซ่ที่มีการจัดเรียงตัวแบบ antiparallel ใน $10\bar{1}$ -plane

ต่างกันที่สารเคมีที่ใช้ คือ กระบวนการซัลไฟต์ (sulphite process) ซึ่งใช้โซเดียมหรือแมกนีเซียมไบซัลไฟต์ และกระบวนการซัลเฟต (sulphate process) ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟต์เป็นสารเคมี ซึ่งมีวิธีการดังนี้ คือ นำชิ้นไม้ต้มด้วยสารเคมีในหม้อต้มเยื่อที่อุณหภูมิสูง 150-170 องศาเซลเซียส ทำให้ลิกนินละลายออกมาในรูปไธโอลิกนิน (thiolignin) และแอลคาลิลิกนิน (alkaline lignin) ซึ่งละลายในน้ำ เยื่อซัลเฟตจะมีสีค่อนข้างคล้ำกว่า แต่มีความทนแรงฉีกขาดได้ดีกว่าเยื่อซัลไฟต์ การที่เยื่อมีสีคล้ำเกิดจากสารลิกนินที่ยังคงค้างในเส้นใยจึงจำเป็นต้องนำมาผ่านกระบวนการฟอกเยื่อ (bleaching) เพื่อกำจัดลิกนินและสิ่งเจือปนให้ได้เยื่อที่มีสีขาวเหมาะที่จะนำไปใช้งาน โดยการฟอกเยื่อด้วยคลอรีน คลอรีนไดออกไซด์ คลอริเนตไฮโปคลอไรต์ เป็นต้น เยื่อที่ได้จะมีความขาวสว่างเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 80-95 (สมชาติ รุ่งอินทร์, 2528; พรทวี พิงรัมย์ และ อรุณ หาญสืบสาย, 2537; Kleinert, 1985; McGovern, 1980.)

เซลลูโลสที่ได้จากการสกัดเซลลูโลสจากพืชออกจากสิ่งเจือปนสามารถแบ่งได้ตามความบริสุทธิ์ซึ่งพิจารณาจากสมบัติการละลายเซลลูโลสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนี้ แอลฟา-เซลลูโลส (α -cellulose) บีตา-เซลลูโลส (β -cellulose) และแกมมา-เซลลูโลส (γ -cellulose) (Heuser, 1944; Whistler and Teng, 1970) แอลฟา-เซลลูโลสไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 17.5 น้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 570,000 และมี degree of polymerization (D.P.) มากกว่า 3,500 มีอยู่ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 95 ปริมาณแอลฟา-เซลลูโลสที่มีมากแสดงถึงปริมาณผลผลิตของเซลลูโลสที่สามารถนำมาใช้ได้มากภายหลังจากการสกัดเส้นใยเซลลูโลสในกระบวนการ pulping ส่วนบีตา-เซลลูโลสละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 17.5 น้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรดต่างเป็นกลาง มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าคือมีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 3,000-15,000 และมี D.P. 10-200 และแกมมา-เซลลูโลสละลายได้ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 17.5 น้ำหนักต่อปริมาตร เช่นเดียวกับบีตา-เซลลูโลส แต่ไม่ตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรดต่างเป็นกลาง มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 3,000 และมี D.P. ต่ำกว่า 10

สำหรับเซลลูโลสวัณน้ำมะพร้าวซึ่งได้จากการสังเคราะห์ด้วยแบคทีเรีย การสร้างเซลลูโลสของแบคทีเรียมี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกกลูโคสในรูปของโมเลกุลอิสระเข้าไปภายในเซลล์และรวมตัวกันเป็นสารตั้งต้นคือพอลิกลูโคแซน สารนี้ถูกส่งผ่านออกมาภายนอกเซลล์ชั้นที่สองพอลิเมอร์เหล่านี้รวมตัวกันเกิดเป็นเส้นใยเซลลูโลสขนาดเล็ก (microfibril) ซึ่งมีความแข็งแรงมากขึ้น เซลลูโลสที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเมือกและเป็นแผ่นฝ้ายที่ผิวหน้าอาหารเหลว



(Colvin *et al.*, 1977) แบบที่เรียสร้างเซลล์ลูไลสขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่เชื่อมระหว่างเซลล์กับอนุภาคดินหรือสารอาหารอื่น ๆ ทำหน้าที่ป้องกันเซลล์ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต เช่น สภาวะที่แห้งและอุณหภูมิต่ำ และทำหน้าที่ป้องกันการติดเชื้อจากไวรัส (Lilly, Wilson, and Leach, 1958; Blanshard and Mitchell, 1978)

ปริมาณเซลล์ลูไลสในแผ่นวุ้นน้ำมะพร้าวเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการหมักเพิ่มขึ้น แต่จะเริ่มคงที่เมื่อเวลาในการหมักประมาณ 10 วัน โดยมีปริมาณเซลล์ลูไลสในแผ่นวุ้นน้ำมะพร้าวเป็นร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก และความหนาของแผ่นวุ้นน้ำมะพร้าวเป็น 10 มิลลิเมตร (Yamanaka *et al.*, 1989) จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นวุ้นน้ำมะพร้าวด้วย scanning electron micrograph พบว่าลักษณะไฟบริลมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และมีขนาดความกว้าง 20-50 นาโนเมตร ความยาวอย่างน้อย 10 ไมโครเมตร ไฟบริลประกอบด้วยไมโครไฟบริลซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นาโนเมตร จำนวนมาก (รูปที่ 9) (Yamanaka *et al.*, 1989) ไฟบริลแตกกิ่งก้านแบบ three-way branching points ตลอดความยาว (รูปที่ 10) การแตกกิ่งก้านของไฟบริลเกิดจากการแบ่งเซลล์ในการแพร่พันธุ์ของแบคทีเรียซึ่งเกิดขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้เกิดการแตกกิ่งก้านกันต่าง ๆ ไป ความยาวของไฟบริลระหว่างจุดที่แตกกิ่งก้านจะมีความยาวประมาณ 180-960 นาโนเมตร (Brown, Willison, and Richardson, 1976)

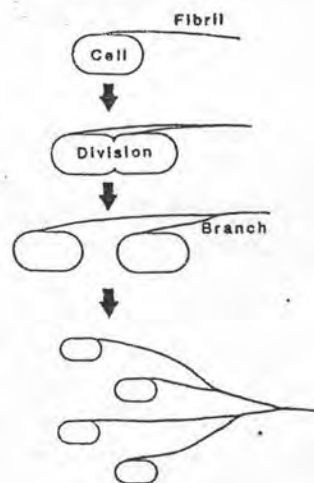
เซลล์ลูไลสวุ้นน้ำมะพร้าวมีลักษณะดังนี้ คือ 1. ไม่มีเฮมิเซลล์* ลิกนิน และ เพกติน** เจือปนทำให้ง่ายต่อการทำให้เซลล์ลูไลสบริสุทธิ์ 2. มีความเป็น hydrophilic สูง เนื่องจากการมีพื้นที่ผิวในโครงสร้างมากจึงสามารถอุ้มน้ำ (water holding capacity) สูงถึง 60-700 เท่าของน้ำหนักแห้ง 3. ทนต่อแรงดึงได้สูงกว่าไฟเบอร์สังเคราะห์ต่าง ๆ โดยมีค่า Young's modulus ประมาณ 30,000 เมกกะปาสคาล ซึ่งสูงกว่า organic fiber ถึง 4 เท่า (Nichi *et al.*, 1990) และค่าความต้านแรงดึงซึ่งมีค่าสูงกว่าฟิล์มโพลีเอทธิลีน (polyethylene) หรือ ไวนิลคลอไรด์ (vinyl chloride) ถึง 5 เท่า 4. ในการสังเคราะห์เส้นใยเซลล์ลูไลสสามารถ

*เฮมิเซลล์ เป็นพอลิเมอร์ของไซแลน แมนแนน และ กรดยูโรนิคชนิดต่าง ๆ มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้าน มีความยาวโมเลกุล 30-50 หน่วย ไม่ละลายในน้ำแต่ละลายในด่าง ถูกย่อยได้ด้วยกรดอ่อน เฮมิเซลล์แทรกอยู่ระหว่างสายโมเลกุลของเซลล์ลูไลสเพื่อทำหน้าที่เป็นสารเชื่อม (cement) ให้เซลล์ลูไลสและลิกนิน

**เพกติน เป็นพอลิเมอร์ของ (1,4)-D-galacturonopyranosyl พบ ในปริมาณน้อย คือ ร้อยละ 1-5 (Goodwin and Mercer, 1972)



รูปที่ 9 scanning electron micrograph ของผิวหน้าวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Yamanaka *et al.*, 1989)



รูปที่ 10 กลไกการแตกกิ่งก้านของไฟบริลเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (Brown *et al.*, 1976)

เลือก substrate ซึ่งมีราคาถูก หาได้ง่ายในท้องถิ่น ทำให้ต้นทุนของการผลิตวุ้นน้ำมะพร้าวมีราคาต่ำ และ 5. การสร้างเซลลูโลสวุ้นน้ำมะพร้าวในช่วงที่ไม่โครไฟบริลเริ่มเกาะกันเป็นสายจนเป็น amorphous cellulose สามารถควบคุมให้มีสมบัติทางกายภาพตามที่ต้องการ โดยจัดการเกี่ยวกับความหนาแน่นของเซลล์ สภาวะในการหมัก ลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการหมัก และองค์ประกอบของอาหารที่ใช้เลี้ยง ซึ่งทำให้สามารถควบคุมสมบัติเกี่ยวกับความขาวสว่าง ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของเซลลูโลสจากแบคทีเรียได้ (White and Brown, 1989)

การเตรียมเยื่อเซลลูโลส

วิธีการเตรียมเยื่อเซลลูโลสมี 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนการทำเยื่อเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ เพื่อกำจัดเซลล์ของเชื้อแบคทีเรีย กรดอะซิติก และสารอื่น ๆ ที่ติดมาในโครงสร้างขณะการหมักและเพื่อให้เซลลูโลสอยู่ในสภาพที่เป็นกลาง การทำให้เซลลูโลสบริสุทธิ์มีหลายวิธีได้แก่ การนำวุ้นน้ำมะพร้าวมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 2 (น้ำหนักต่อปริมาตร) นาน 10 ชั่วโมง ล้างออกด้วยน้ำและสารละลายกรดอะซิติกเจือจาง แล้วแช่ในน้ำกลั่นนาน 12 ชั่วโมง (Kaushal and Walker, 1951) หรือล้างหลาย ๆ ครั้งแล้วต้มในน้ำเดือดจนหมดความเป็นกรด (จุฬารักษ์ เลิศบวรวงศ์, 2533) วิธีนี้เป็นวิธีการที่สะดวก รวดเร็ว และเสียค่าใช้จ่ายน้อย ให้เซลลูโลสสีขาว เนื้อสัมผัสอ่อนนุ่ม อีกวิธีคือการนำวุ้นน้ำมะพร้าวมาต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 2 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ใน อัตราส่วน 1 : 10 โดยน้ำหนักเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วล้างจนสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง จะได้ปริมาณแอลฟา-เซลลูโลสที่สกัดได้ร้อยละ 97 (Yamanaka *et al.*, 1989)

ขั้นตอนที่สองคือการปรับสภาพเซลลูโลสโดยวิธีทางเคมี หรือ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมีทำได้โดยใช้กรดซัลฟูริกเพื่อทำลายพันธะไฮโดรเจนในบริเวณที่เป็นผลึกของเซลลูโลส จากการศึกษาผลของการแปรความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่ใช้ระหว่างร้อยละ 1 ถึง 1.5 โดยปริมาตร ในการย่อยเซลลูโลสพืชจากแหล่งต่าง ๆ กัน ที่อุณหภูมิ 160 170 และ 180 องศาเซลเซียส การย่อยนี้เป็นแบบ first-order reaction ซึ่งแสดงด้วย Sharples' model เหมาะกับเซลลูโลส II มากกว่าเซลลูโลส I และมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการย่อย คือ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของกรด (Lin, Conner, and Hill, 1992) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการย่อยเซลลูโลสจากปาล์มด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 1 5 และ 10 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-60 นาที ซึ่งพบว่าปริมาณการย่อยเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 100 และปริมาณการย่อยจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความเข้มข้นของกรดมากกว่าร้อยละ 5 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณการย่อยเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเวลาในการย่อยเพิ่มขึ้นเป็น 30 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และปริมาณการย่อยจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาในการย่อยมากกว่า 30 นาที (Koba and Ishizaki, 1990)

วิธีทางกายภาพทำได้โดยใช้ไอน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูงทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลเพื่อลดบริเวณที่เป็นผลึก จากการศึกษาการใช้ไอน้ำที่ความดัน 2.9

เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 วินาที กับเยื่อเซลลูโลสของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน เซลลูโลสที่ได้นำมาละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 9.1 (น้ำหนักต่อ ปริมาตร) ที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 8 ชม. ส่วนเยื่อเซลลูโลสที่ไม่ละลายในต่างซึ่งเป็นผลึกเซลลูโลส I จะถูกแยกออกไป เยื่อเซลลูโลสที่ละลายได้ในต่างซึ่งเป็นผลึกเซลลูโลส II ที่มีความเป็นผลึกสูงกว่าจะถูกนำไปทำ multifilament spinning ในสารละลายกรดซัลฟูริก เข้มข้นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ 5 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิด coagulation เป็นเส้นใยซึ่งมี รูปแบบเซลลูโลส II (Yamashiki *et al.*, 1992) ส่วนการใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที กับเส้นใยปาล์มซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ก่อนที่จะย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสให้ได้น้ำตาลไซโลส กลูโคส และอะราบินอส พบว่าการ ใช้ไอน้ำทำให้ผลผลิตมีค่าเพิ่มขึ้น 3-5 เท่าเมื่อเทียบกับวิธีที่ไม่ใช้ไอน้ำ เนื่องจากการใช้ไอน้ำ ที่ความดันสูงทำให้เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเกิดการสูญเสียโครงสร้างภายในเซลล์ ซึ่งทำให้ เอนไซม์เข้าไปย่อยได้ง่ายขึ้น (Oi *et al.*, 1994)

ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับสภาพวุ้นน้ำมะพร้าวโดยวิธีทางเคมีจึงใช้กรด ซัลฟูริกที่ความเข้มข้นต่ำซึ่งเป็นการย่อยแบบ heterogeneous ของกรดอ่อน และสำหรับการ ปรับสภาพวุ้นน้ำมะพร้าวโดยวิธีทางกายภาพจึงใช้ไอน้ำที่ความดันสูง เพื่อทำลายพันธะ ไฮโดรเจนภายในโมเลกุลบริเวณผลึกและให้มีการจัดเรียงพันธะใหม่ขณะขึ้นรูปฟิล์ม

การผลิตฟิล์มเซลลูโลส

Yamanaka และคณะ (1989) ได้ทดลองผลิตฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวทั้งแผ่นภาย หลังจากการทำให้บริสุทธิ์ด้วยต่าง โดยใช้ hydraulic plate กดวุ้นน้ำมะพร้าวพร้อมกับให้ ความร้อน วุ้นน้ำมะพร้าวจะถูกประกบอยู่ระหว่างแผ่นตะแกรงขนาด 150 meshes ที่ทำ ด้วยเหล็กกล้าปลอดสนิมนาน 5 นาทีเพื่อไล่น้ำออก โดยแปรความดันอุทก (hydraulic pressure) ในช่วง 49-1960 เมกกะปาสคาล และแปรอุณหภูมิในช่วง 120-200 องศาเซลเซียส แล้วทดสอบสมบัติทางกายภาพ

สำหรับวิธีการผลิตฟิล์มจากเยื่อเซลลูโลสจากพืชซึ่งเป็นการทำ handsheet ใน ห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินคุณภาพเยื่อ ได้ทำตามวิธีของ ISO 5269/2 (1980) โดยมีขั้นตอน ดังนี้ (Young, 1980)

1. การกระจายเยื่อ (disintegration) เพื่อแยกเส้นใยของเยื่อที่เป็นก้อนหรือเป็น แผ่นให้กระจายในน้ำไม่ให้จับกันเป็นก้อน โดยใช้ disintegrator กระจายเยื่อที่ความเร็วต่าง ๆ

ขึ้นอยู่กับเยื่อที่ใช้ว่าเป็นเยื่อใยยาวหรือเยื่อใยสั้น โดยเยื่อใยยาวจะใช้ความเร็วรอบขึ้นถึง 1,200 รอบต่อนาที ส่วนเยื่อใยสั้นจะใช้ความเร็วรอบขึ้นถึง 600 รอบต่อนาที

2. การบดเยื่อ (beating) เพื่อนวดหรือคลึงให้เส้นใยแตกตัวออกเป็นเส้นใยเล็ก ๆ เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการเกาะเกี่ยวระหว่างเส้นใยให้มากขึ้น หรือเพื่อตัดเส้นใยให้มีขนาดสั้นลงโดยไม่ให้เกิดเสี้ยน แต่ในทางปฏิบัติแล้วจุดประสงค์ของการบดเยื่อจะเกิดขึ้นทั้งสองอย่างขึ้นกับการเลือกใช้อุปกรณ์ และระยะเวลาของการบดเยื่อ ซึ่งจะทำให้การเพิ่มพื้นที่การเกาะเกี่ยวหรือการตัดเส้นใยอย่างใดอย่างหนึ่งเกิดขึ้นมากกว่า การบดเยื่อมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของแผ่นโดยจะปรับปรุงค่าความแข็งแรงของแรงดันทะลุ แต่จะลดค่าความต้านทานแรงฉีกขาด

เครื่องมือที่ใช้บดเยื่อในห้องปฏิบัติการมีหลายชนิดได้แก่ PFI mill Valley beater เป็นต้น สำหรับ PFI mill จะทำการเตรียมเยื่อให้ขึ้นให้มีความชื้น (consistency) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จำนวนรอบหรือเวลาในการบดขึ้นอยู่กับประเภทของเยื่อและสมบัติทางกายภาพที่ต้องการโดยดูจาก beating curve ของเยื่อชนิดนั้น ๆ พร้อมกับหาค่า freeness ซึ่งเป็นค่าแสดงสมบัติให้น้ำไหลผ่านเยื่อไปได้ช้าหรือเร็วเพียงใดในขณะที่ทำแผ่นเพื่อบอก degree of beating

3. การเตรียมน้ำเยื่อ เพื่อเจือจางเยื่อหลังจากผ่านการกระจายเยื่อให้ได้ความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามต้องการประมาณ 0.15-0.3 กรัมต่อเดซิลิตร เทน้ำเยื่อที่ได้ในถังที่มีใบพัดกวนเพื่อให้เยื่อกระจายสม่ำเสมอ

4. การทำแผ่น โดยใช้เครื่องทำแผ่นซึ่งมีตะแกรงที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 200 ตารางเซนติเมตร ขนาดตะแกรง 150 meshes มีท่อน้ำเข้าและออกเพื่อให้น้ำผสมน้ำเยื่อและใช้ stirrer กวนผสมน้ำเยื่อให้เข้ากันและปล่อยน้ำออก จนเหลือแผ่นเยื่อบนตะแกรง

5. การรีดแผ่น เพื่อให้แผ่นที่อยู่บนตะแกรงมาติดอยู่บนกระดาษซับโดยมีแผ่นโลหะวางบนกระดาษซับและใช้ couch roll ขนาด 13 กิโลกรัมกลิ้งทับ

6. การอัดแผ่น เพื่อรีดเข้าน้ำออกจากแผ่นและให้แผ่นฟิล์มมาติดกับแผ่นโลหะอีกครั้ง โดยวางแผ่นโลหะสัมผัสกับแผ่นฟิล์มแล้วตามด้วยกระดาษซับ การอัดแผ่นขึ้นกับความดันและเวลาในการอัดเพราะมีผลต่อการเกิดพันธะของเส้นใยภายในแผ่นและส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

7. การทำให้แห้ง เพื่อทำแผ่นฟิล์มให้แห้งโดยวางแผ่นโลหะที่มีฟิล์มเปียกบนกรอบ (drying ring) โดยให้แผ่นฟิล์มอยู่ด้านบน และฝั่งลมที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งแห้ง การใช้กรอบเพื่อป้องกันไม่ให้ฟิล์มหดตัวเมื่อฟิล์มแห้ง

สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

การเลือกใช้ฟิล์มในงานประเภทต่าง ๆ จำเป็นต้องทราบสมบัติของฟิล์มก่อน เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติของการนำไปใช้งาน สมบัติทางกายภาพที่ทำการทดสอบเริ่มตั้งแต่สมบัติพื้นฐานเพื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของฟิล์ม รวมทั้งสมบัติทางเชิงกลที่เกี่ยวข้องกับการรับแรงกระทำหรือความแข็งแรงของฟิล์มเพื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน สมบัติทางกายภาพที่ใช้ทดสอบฟิล์มจากเยื่อเซลลูโลสโดยทั่วไปมีดังนี้ (สมอ., 2529; สมอ., 2533; Brandon, 1981)

1. สมบัติพื้นฐาน

1.1 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) เป็นน้ำหนักต่อพื้นที่มาตรฐาน (กรัม/ตารางเมตร) ที่เก็บรักษาในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่ใช้ควบคุมมาตรฐานการทดสอบ โดยทั่วไปนิยมที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 การทดสอบค่านี้เพื่อควบคุมให้แผ่นทดสอบทุก ๆ แผ่นที่ใช้ในการทดสอบมีสมบัติพื้นฐานใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อเปรียบเทียบผลและสรุปผล

1.2 ความหนา (thickness) เป็นระยะตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้งสองของแผ่น เป็นไมครอนหรือมิลลิเมตร ความหนาของวัสดุมีส่วนสัมพันธ์กับความต้านทานในการโค้งงอ ราคาและกรรมวิธีต่าง ๆ ในการแปรรูปเป็นภาชนะบรรจุ

1.3 ความหนาแน่นเสมือน (apparent density) ได้จากการนำน้ำหนักมาตรฐานหารด้วยความหนา ค่านี้เกี่ยวข้องกับความพรุน rigidity hardness และความแข็งแรงของแผ่น ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นเสมือน คือ ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณพันธะของเส้นใย ได้แก่ fineness ความยืดหยุ่นของเส้นใย ปริมาณการตีบด ปริมาณของเยื่อเซลลูโลส และอีกปัจจัย คือ การมีวัสดุอื่นซึ่งจะเพิ่มน้ำหนักแต่ไม่เพิ่มความหนา

2. สมบัติทางเชิงกล

2.1 Young's modulus เป็นค่าอัตราส่วนของแรงเครียด (stress) ต่อ แรงเค้น (strain) และเป็นสมบัติที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง ค่านี้แสดงความยืดหยุ่นและความแกร่งของฟิล์ม Perkins และ Mark (1976) พบว่าสมบัติของความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์มขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นของเส้นใยและรูปทรงของโครงร่างตาข่าย ถ้าเส้นใยมีความยืดหยุ่นดีและมีรูปทรงของโครงร่างตาข่ายสมมาตรจะทำให้ฟิล์มที่ได้มีความยืดหยุ่นดี ค่านี้จึงขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยมากกว่าความแข็งแรงของเส้นใย (Brown et al., 1976)

2.2 ความยืด (% elongation) เป็นระยะทางที่ฟิล์มยืดออกด้วยแรงดึงจนขาด ค่านี้แสดงความเหนียวของฟิล์ม การบดเยื่อและการตีเยื่อจะเพิ่มการยืดตัวของฟิล์ม ส่วนการใช้เยื่อใยสั้นจะได้ฟิล์มที่มีค่านี้ลดลง ความยืดของฟิล์มขึ้นอยู่กับระยะทางของเส้นใยระหว่าง junction zone ซึ่งระยะทางนี้สั้น ความยืดของฟิล์มมีค่าน้อย (Flory, 1953)

2.3 ความต้านแรงดึง (tensile strength) เป็นค่าแรงเครียดที่ใช้ในการดึงฟิล์มที่ปลายข้างใดข้างหนึ่งของแผ่นทดสอบที่มีความกว้างคงที่จนขาดภายใต้สภาวะการทดสอบที่กำหนด ค่านี้ขึ้นอยู่กับการบดเยื่อและความดึงของแผ่นระหว่างที่ทำให้แห้ง การบดเยื่อและความดึงของแผ่นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่เส้นใยสัมผัสกันมากจึงทำให้ค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ถ้าบดเยื่อมากจนทำให้โครงสร้างเส้นใยเสียหายจนไม่สามารถเกิดพันธะระหว่างเส้นใยจะทำให้ค่าความต้านแรงดึงลดลง ค่านี้ตรงข้ามกับค่าความต้านทานแรงฉีกขาด (Parsons, 1969) Robinson (1980) พบว่าความแข็งแรงของกระดาษขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างเส้นใยมากกว่าความแข็งแรงของเส้นใยเมื่อออกแรงดึงฟิล์มจะเป็นการทำลายพันธะระหว่างเส้นใยก่อนแล้วจึงจะทำลายตัวเส้นใย (Page, 1969)

2.4 ความต้านทานแรงฉีกขาด (tearing resistance) เป็นค่าแรงภายในฟิล์มที่เกิดจากการมีรอยฉีกขาดนำอยู่ก่อนแล้ว ปัจจัยที่มีผล คือ จำนวนของเส้นใยที่เกาะเกี่ยวในแผ่น ความยาวของเส้นใย จำนวนและความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย ฟิล์มที่ใช้เส้นใยยาวจะมีค่านี้สูงกว่าฟิล์มที่ใช้เส้นใยสั้น ดังนั้นการเพิ่มเส้นใยยาวจะมีผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงฉีกขาดมากกว่าการเพิ่มพันธะระหว่างเส้นใย (Parsons, 1969) เช่นเดียวกับ Robinson (1980) กล่าวไว้ว่าความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยมากกว่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย

2.5 ความต้านแรงดันทะลุ (bursting strength) เป็นค่าความดันสูงสุดที่ฟิล์มจะทนได้เมื่อใช้ความดันกระทำตั้งฉากกับระนาบของฟิล์มจนทำให้ฟิล์มแตกทะลุ ค่านี้ขึ้นอยู่กับพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและความยาวของเส้นใย โดยที่พันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยจะมีผลกระทบต่อค่านี้มากกว่าความยาวของเส้นใย ค่านี้เป็นฟังก์ชันของความต้านแรงดึงและการยืดตัวของฟิล์ม (Brandon, 1981) ความต้านแรงดันทะลุของฟิล์มจึงขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยมากกว่าความแข็งแรงของเส้นใยเช่นเดียวกับค่าความต้านแรงดึง (Robinson, 1980)

การเปรียบเทียบสมบัติทางเชิงกลที่เกี่ยวข้องกับการรับแรงแม้กรายงานในรูปของดัชนี (index) ซึ่งเทียบต่อหน่วยน้ำหนักมาตรฐาน

3. ความขาวสว่าง (brightness) คือ ค่าอัตราส่วนร้อยละของค่าสะท้อนแสงของกระดาษที่แสงไม่สามารถทะลุผ่านต่อค่าสะท้อนแสงของวัตถุสะท้อนแสงได้สมบูรณ์ โดยวัดการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับแบเรียมซัลเฟต ค่าที่วัดขึ้นอยู่กับการกระจายและการดูดซับแสงของเยื่อ

เนื่องจากลักษณะความแข็งแรงของฟิล์มที่เกิดจากโครงร่างตาข่ายของเส้นใยเซลลูโลสที่ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจะแสดงออกมาในรูปสมบัติทางเชิงกลของฟิล์ม โดยเฉพาะค่าความต้านแรงดึงของฟิล์ม ซึ่ง Page (1969) อธิบายไว้ว่า ความต้านแรงดึงจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยหรือความแข็งแรงในรูปของความต้านแรงดึงของเส้นใย และขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย ซึ่งความสัมพันธ์นี้แสดงในสมการที่ 1 (Page, 1969; Robinson, 1980)

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{F} + \frac{1}{B} \quad (1)$$

เมื่อ T คือ ความต้านแรงดึง

F คือ ดัชนีความแข็งแรงของเส้นใย

B คือ ดัชนีความแข็งแรงของพันธะ

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Nishi และคณะ (1990) ซึ่งได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเซลลูโลสจากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ โดยการแช่วุ้นน้ำมะพร้าวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นระหว่างร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นเวลา 15 ชั่วโมง แล้วล้างล้างออกให้หมดด้วยน้ำแล้วทำให้แห้งทั้งแผ่นตามวิธีของ Yamanaka และคณะ (1989) (ดังกล่าวมาแล้วในการผลิตฟิล์มเซลลูโลส) ทำให้ค่า Young's modulus ของฟิล์มวุ้นน้ำมะพร้าวสูงกว่าฟิล์มวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยต่าง กล่าวคือ ค่า Young's modulus ของฟิล์มวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการแช่ด้วยความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรมีค่า 23 จิกะปาสคาล ส่วนค่าของฟิล์มที่ไม่ได้แช่ต่างเป็น 15 จิกะปาสคาล การทำแห้งโดยวิธีให้แรงกดดังกล่าวไม่มีผลทำให้ค่า Young's modulus ของฟิล์มวุ้นน้ำมะพร้าวต่างไปจากวิธีการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนเพียงอย่างเดียวแต่ทำให้ความต้านแรงดึงและร้อยละความยืดของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อใช้ความดันมากกว่า 500 เมกกะปาสคาล (Yamanaka et al., 1989) การที่ค่า Young's modulus สูงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจน



ระหว่างไฟบริลมีมาก ถึงแม้ไฟบริลจะมีขนาดเล็กก็ตาม ความหนาแน่นของพันธะไฮโดรเจนในแผ่นฟิล์มนี้จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มเซลลูโลสมีค่าสูง (Brown *et al.*, 1976)

ฟิล์มที่ผลิตได้จากการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวกับเยื่อปุยฝ้ายที่อัตราส่วนของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวต่อเยื่อปุยฝ้าย เป็น 4:0 3:1 1:1 และ 0:4 ในเครื่องกระจายเยื่อ สารแขวนลอยของเยื่อที่ได้นี้มากรองผ่านตะแกรงขนาด 100 meshes และทำฟิล์มด้วยเครื่องมือที่เป็นแผ่นตะแกรงทำด้วยเหล็กกล้าปลอดสนิมขนาดตะแกรง 200 meshes กดน้ำออกนาน 5 นาที พบว่าค่า Young's modulus และ ความแข็งแรงตึงของเยื่อเซลลูโลสจากวุ้นน้ำมะพร้าวอย่างเดียวมีค่าสูงสุดและค่าทั้งสองลดลงเมื่อมีเยื่อปุยฝ้ายผสม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความต่อเนื่องของโครงสร้างเซลลูโลสเดิมสูญเสีย (Yamanaka และคณะ, 1989) ส่วนการผลิตฟิล์มที่ได้จากการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวกับเยื่อใยยาวจากไม้และแคลเซียมคาร์บอเนตเข้มข้นร้อยละ 1 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ในอัตราส่วน 50 : 11 : 100 โดยน้ำหนัก จะให้ฟิล์มที่มีค่าความแข็งแรงตึงสูงขึ้น (Kitamura and Katasura, 1989)

นอกเหนือจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวด้วยวิธีการต่าง ๆ แล้วยังทำการศึกษากการผลิตฟิล์มจากการผสมเยื่อเซลลูโลสจากวุ้นน้ำมะพร้าวกับเยื่อเซลลูโลสจากพืชเพื่อตัดแปรสมบัติทางกายภาพของฟิล์มให้เหมาะกับการนำไปใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยทำการทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนเพื่อจะได้นำไปใช้ให้สอดคล้องกับชนิดของอาหาร เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิดต้องการฟิล์มห่อหุ้มอาหารที่มีสมบัติการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจนต่าง ๆ กัน เช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ต้องการฟิล์มที่มีการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนดีเพื่อรักษาเนื้อให้มีสีสดของฮีโมโกลบิน ผักและผลไม้ต้องการฟิล์มที่มีการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจนดีเพื่อให้ระบายหยดน้ำและความร้อนที่เกิดจากการคายน้ำของพืช เป็นต้น สมบัติของฟิล์มที่ใช้ทดสอบการเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหารมีดังนี้ คือ

1. อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (water vapour transmission rate) คือ ปริมาณไอน้ำที่ซึมผ่านจากผิวหน้าหนึ่งไปยังอีกผิวหน้าหนึ่งของหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของวัสดุหรือภาชนะบรรจุในระยะเวลาที่กำหนดและภายใต้สภาวะที่คงที่ มีหน่วยเป็นกรัม-มิลลิเมตร/ตารางเมตร/24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในการวิเคราะห์ ปริมาณการซึมผ่านไอน้ำของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุจะมีความสัมพันธ์กับการเลือกใช้ภาชนะบรรจุที่เหมาะสมให้คุ้มครอง สินค้ามิให้เสื่อมสภาพในระยะเวลาที่กำหนด อัตราการซึมผ่านไอน้ำเมื่อคำนวณคิดเทียบต่อผลต่างของความดันไอของแต่ละด้านของฟิล์มที่ทดสอบผ่านความหนาของฟิล์ม ซึ่งจะเรียกว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water vapour

permeability, WVP) (มยุรี ภาคกล้าเจียก และ อมรรัตน์ สวัสดิ์ทัต, 2533)

2. อัตราการซึมผ่านก๊าซ (gas transmission rate) คือ ปริมาตรของก๊าซที่ซึมผ่านจากผิวหน้าหนึ่งไปยังอีกผิวหน้าหนึ่งของหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของวัสดุหรือภาชนะบรรจุ ในระยะเวลาที่กำหนดและภายใต้ผลต่างของความดันหนึ่งหน่วย มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร-มิลลิเมตร/ตารางเมตร/วัน/บรรยากาศที่อุณหภูมิในการวิเคราะห์ ก๊าซที่ซึมผ่านภาชนะบรรจุได้อาจเป็นออกซิเจน ไนโตรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซบางชนิดทำให้สินค้าเสื่อมคุณภาพ แต่สินค้าบางชนิดต้องการก๊าซเพื่อรักษาคุณภาพ ปริมาณการซึมผ่านของก๊าซของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุจึงมีความสัมพันธ์กับการเลือกใช้ภาชนะที่สามารถคุ้มครองสินค้าไม่ให้เสื่อมสภาพในระยะเวลาที่กำหนด ค่าที่ได้จากการหาอัตราการซึมผ่านก๊าซเมื่อบรรณผ่านความหนาของฟิล์มจะเรียกว่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของก๊าซ (gas permeability) (มยุรี ภาคกล้าเจียก และ อมรรัตน์ สวัสดิ์ทัต, 2533)

ฟิล์มที่ประกอบด้วยเส้นใยซึ่งมีระยะทางระหว่าง junction zone สั้น ทำให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยแคบ (Flory, 1953) จึงช่วยป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดีกว่า

สมบัติของการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มอนุพันธ์เซลลูโลสชนิดต่างที่ใช้ในการหีบห่อแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าฟิล์มอนุพันธ์เซลลูโลสอะซิเตทมีสมบัติของการซึมผ่านไอน้ำไม่แตกต่างกันและมีค่าต่ำ แต่มีสมบัติการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนต่างกัน โดยที่ฟิล์มเซลลูโลสอะซิเตทมีค่าความสามารถในการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนน้อยที่สุดเนื่องจากโครงสร้างมีส่วนที่เป็นผลึกมากที่สุดและมีความพรุนน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มเซลลูโลสไตรอะซิเตทและฟิล์มเซลลูโลสอะซิเตทบิวไทเรต

ตารางที่ 3 สมบัติของการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มอนุพันธ์เซลลูโลสชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการหีบห่อ (มยุรี ภาคกล้าเจียก และ อมรรัตน์ สวัสดิ์ทิต, 2533)

Types of cellulose derivative	Rate of water vapour transmission (g-mm/m ² /24 hr.)		Permeability to oxygen gas (cc-mil/100 in ² /24 hr./atm) at 25 °C ^c
	at 23 °C ^a	at 37.8 °C ^b	
Cellulose acetate	12-16	-	117-150
Cellulose triacetate	12-16	-	150
Cellulose acetate butyrate	12-16	-	600-1,000
Cellulose propionate	-	100-350	-
Ethyl cellulose	-	50	2,000

หมายเหตุ ตัวอักษร a หมายถึง ทดสอบตามวิธี ASTM E96(B)

b หมายถึง ทดสอบตามวิธี ASTM E96(E)

c หมายถึง ทดสอบตามวิธี ASTM D1434