

บทที่ 4

ผลและการวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวุ้นน้ำมะพร้าว

จากการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าวุ้นน้ำมะพร้าวประกอบด้วยน้ำร้อยละ 93.51 ± 0.06 เส้นใยซึ่งคือใยเซลลูโลส ร้อยละ 0.96 ± 0.02 โปรตีน ร้อยละ 0.89 ± 0.20 เถ้า ร้อยละ 0.49 ± 0.05 ไขมัน ร้อยละ 0.06 ± 0.01 และคาร์โบไฮเดรตอื่นนอกจากเซลลูโลส ร้อยละ 4.1 (ตารางที่ 4) ค่าที่ได้จากผลการทดลองนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ของกรมวิทยาศาสตร์บริการและกองเกษตรเคมี (ตารางที่ 1) (สมคิด ธรรมรัตน์, 2531) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน คือ น้ำมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 93.45-94.60 ไขมันมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.05-0.06 เส้นใยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.72-1.20 โปรตีนมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.68-0.84 เถ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.10-0.77 และคาร์โบไฮเดรตมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 3.0-4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวุ้นน้ำมะพร้าวมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มากถึงร้อยละ 93.51 เนื่องจากวุ้นน้ำมะพร้าวมีพื้นที่ผิวภายในช่องว่างระหว่างโครงสร้างของวุ้นน้ำมะพร้าวมาก สามารถอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างตาข่ายได้มากถึง 60-700 เท่าของน้ำหนักแห้ง (White and Brown, 1989)

ตารางที่ 4 ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของวุ้นน้ำมะพร้าว (wet basis)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ
ความชื้น	93.51 ± 0.06
ไขมัน	0.06 ± 0.01
เส้นใย	0.96 ± 0.20
โปรตีน	0.89 ± 0.02
เถ้า	0.48 ± 0.05
คาร์โบไฮเดรต	4.1

เมื่อคิดองค์ประกอบของวุ้นน้ำมะพร้าวจากน้ำหนักแห้ง พบว่า ปริมาณเส้นใย เซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับโครงสร้างตาข่าย (Ross, Mayer and Benziman, 1991) มีเพียงร้อยละ 15 นอกนั้นอีกร้อยละ 85 เป็นองค์ประกอบอื่นซึ่งถือได้ว่าเป็นสิ่งเจือปน ถึงแม้ว่าสิ่งเจือปนนี้จะไม่ใช่เซลลูโลส ลิกนิน และเพกติน เช่นเดียวกับที่พบในพืช (Hestrin and Schramn, 1954) ปริมาณโปรตีนในวุ้นน้ำมะพร้าวที่รายงานในการวิจัยนี้คำนวณจากปริมาณไนโตรเจน ซึ่งหมายถึงไนโตรเจนจากโปรตีน และกรดนิวคลีอิกซึ่งเป็นสารภายในเซลล์ แบคทีเรียนั่นเอง ส่วนปริมาณคาร์โบไฮเดรตคือปริมาณของเปปทิโดไกลเคนและไกลโคเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบภายในเซลล์ และปริมาณของ β -1,2-D-glucan และ β -1,3-D-glucan ที่ผลิตจากเชื้อ *A. xylinum* และสายพันธุ์ที่เกิดการกลายพันธุ์ของเชื้อนี้ ซึ่งสารเหล่านี้เกิดขึ้นพร้อมกับการสร้างเซลลูโลส (Aloni and Benziman, 1982; Amemura *et al.*, 1985; Savidge and Colvin, 1985; Tayama *et al.*, 1985) เหล่านี้แสดงว่าเซลล์แบคทีเรียยังคงอยู่ในโครงตาข่ายของวุ้นน้ำมะพร้าวซึ่งเป็นธรรมชาติของเซลลูโลสที่สังเคราะห์จากแบคทีเรีย เนื่องจากเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ซึ่งอยู่ข้างนอกเซลล์จะเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายรอบ ๆ เซลล์แบคทีเรีย (Haigler and Benziman, 1982) สิ่งเจือปนเหล่านี้โดยเฉพาะเซลล์แบคทีเรียอาจจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์ม และการนำฟิล์มนี้มาใช้ในผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ รวมทั้งเครื่องอุปโภคเพื่อสุขภาพต่าง ๆ

การลดขนาดวุ้นน้ำมะพร้าวและการกระจายเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยในการทำให้เซลล์แตก และ/หรือ เซลล์และสิ่งเจือปนอื่น ๆ หลุดออกจากโครงร่างตาข่ายของเซลลูโลส หลังจากนั้นจึงนำเซลลูโลสมาขึ้นรูปฟิล์มซึ่งเป็นวิธีการผลิตฟิล์มในงานวิจัยนี้

ผลของการทำให้วุ้นน้ำมะพร้าวบริสุทธิ์ด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

สมบัติทางกายภาพของฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวแสดงอยู่ในตารางที่ 5 ฟิล์มที่ได้จากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ได้ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์มีน้ำหนักมาตรฐาน 37.74 ± 0.69 กรัม/ตารางเมตร ความหนา 0.0422 ± 0.004 มิลลิเมตร ความหนาแน่นเสมือน 912.33 ± 68.53 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร Young's modulus $8,040.34 \pm 745.03$ เมกกะนิวตัน/ตารางเมตร ความยืด ร้อยละ 2.33 ± 0.29 ดัชนีความต้านแรงดึง 56.31 ± 9.65 กิโลนิวตัน/เมตร/กิโลกรัม ดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาด 1.98 ± 0.68 นิวตัน เมตร/กิโลกรัม ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ 4.25 ± 0.21 เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม และความขาวสว่างร้อยละ 41.53 ± 0.89 ที่

ระดับความชื้นร้อยละ 95 การทำวุ้นน้ำมะพร้าวให้บริสุทธิ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ดัชนีความต้านแรงดันทะลุและความขาวสว่างของฟิล์มเพิ่มขึ้นร้อยละ 33.65 และ 23.72 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเหล่านี้ของฟิล์มที่ได้จากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ แต่สมบัติทางกายภาพอื่นไม่แตกต่างกันระหว่างสองวิธีนี้

ตารางที่ 5 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์และฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์

สมบัติทดสอบ	ค่าสมบัติทางกายภาพของฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าว	
	ที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์	ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์
Basis weight (g/m ²) ^{ns}	37.74±0.69	35.24±0.48
Thickness (mm) ^{ns}	0.0422±0.004	0.0445±0.004
Apparent density (kg/m ³) ^{ns}	912.33±68.53	783.82±73.51
Young's modulus (MN/m ²) ^{ns}	8,040.34±745.03	8,480.39±600.85
Elongation (%) ^{ns}	2.33±0.29	2.86±0.37
Tensile index (kN.m/kg) ^{ns}	56.31±9.65	79.00±11.60
Tear index (N.m ² /kg) ^{ns}	1.98±0.68	2.62±0.42
Burst index (MN/kg)	4.25±0.21 b	5.68±0.76 a
Brightness (%)	41.53±0.89 b	51.38±0.90 a

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าตัวอักษรที่แตกต่างกัน (a, b) ในตาราง แสดงว่า มีความแตกต่าง

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

ns ในตาราง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในขั้นตอนการทำให้วุ้นน้ำมะพร้าวบริสุทธิ์เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนอื่นที่เป็นองค์ประกอบในวุ้นน้ำมะพร้าวออกจากเซลล์ โดยทำให้สิ่งเจือปนอื่นที่เกาะติดอยู่ถูกละลายออกมาพร้อมกับสารละลายต่างและกำจัดออกไป สารละลายต่างนี้สามารถละลายสารภายในเซลล์ซึ่งประกอบ



ด้วยโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตออกมากับสารละลาย นอกจากนั้นยังทำให้เกิดสะพานฟิเคชันของโซลเจลได้เกลือของกรดโซลเจล (Meyer, 1960) และอาจกำจัดได้แก่ สารประกอบฟอสเฟต (Savidge and Colvin, 1985) ซึ่งเป็นสารที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลล์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นนี้ไม่ละลาย β -1,2-D-glucan β -1,3-D-glucan และเซลลูโลส โดยสารเหล่านี้ยังคงโครงสร้างตาข่ายรอบ ๆ ผนังเซลล์ที่เหลืออยู่หลังจากเซลล์ถูกย่อยด้วยต่าง (Cannon and Anderson, 1991; Yamanaka *et al.*, 1989) สารเจือปนเหล่านี้ถูกขจัดออกไปจากเยื่อถั่วหมักน้ำมะพร้าว ซึ่งเป็นผลทำให้ความขาวสว่างเพิ่มขึ้นในฟิล์มที่ได้จากถั่วหมักน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ ในขณะที่เดียวกันการขจัดสิ่งเจือปนเหล่านี้เท่ากับการขจัดสิ่งขัดขวางการเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลส การแช่เซลลูโลสในสารละลายต่างทำให้เกิดการพองตัวของโครงสร้างตาข่ายของเซลลูโลสและทำให้เซลลูโลส I ซึ่งอยู่ในธรรมชาติ (Yamanaka *et al.*, 1989) สามารถเปลี่ยนเป็นเซลลูโลส II ที่เสถียรกว่า กลุ่มไฮดรอกซิลในสายโซ่ของเซลลูโลส II อยู่ในตำแหน่งที่เอื้อต่อการเกิดพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างสายโซ่ ซึ่งโอกาสในการเกิดพันธะไฮโดรเจนภายในสายโซ่เป็นเช่นเดียวกับเซลลูโลส I แต่โอกาสในการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่มีมากกว่าเซลลูโลส I (Krassig, 1985) การเพิ่มพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลสจะมีผลต่อการเพิ่มสมบัติทางเชิงกลของฟิล์ม ซึ่งคือดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 33.65 และมีแนวโน้มให้ดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มสูงขึ้นเช่นกัน

การทำให้ถั่วหมักน้ำมะพร้าวบริสุทธิ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติด้านความต้านแรงดันทะลุ และความขาวสว่างสูงกว่าฟิล์มที่ได้จากถั่วหมักน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ วิธีการนี้เป็นวิธีที่ใช้กำจัดสิ่งเจือปนอื่นออกจากถั่วหมักน้ำมะพร้าวและเป็นวิธีเดียวกับการทำให้เส้นใยฝ้ายบริสุทธิ์โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 (น้ำหนักต่อปริมาตร) อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 50 ปอนด์/ตารางนิ้ว (Reese, Segal, and Tripp, 1957) ดังนั้นจึงนำเยื่อถั่วหมักน้ำมะพร้าวมาผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยต่างเพื่อเตรียมทำการปรับสภาพเยื่อด้วยวิธีการดังในการทดลองต่อไป

ผลของการปรับสภาพวุ้นน้ำมะพร้าวโดยใช้กรดซัลฟูริกภายหลังการทำให้บริสุทธิ์ต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

สมบัติทางกายภาพของฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้กรดซัลฟูริกภายหลังการทำให้บริสุทธิ์แสดงอยู่ในตารางที่ 6 ฟิล์มที่ได้จากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกคือวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ มีสมบัติทางกายภาพดังนี้ น้ำหนักมาตรฐาน 35.24 ± 0.48 กรัม/ตารางเมตร ความหนา 0.0445 ± 0.004 มิลลิเมตร ความหนาแน่นเสมือน 783.82 ± 73.51 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร Young's modulus $8,480.39 \pm 600.85$ เมกกะนิวตัน/ตารางเมตร ความยืด ร้อยละ 2.86 ± 0.37 ดัชนีความต้านแรงดึง 79.00 ± 11.60 กิโลนิวตัน เมตร/กิโลกรัม ดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาด 2.62 ± 0.42 นิวตัน ตารางเมตร/กิโลกรัม ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ 5.68 ± 0.76 เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม และความขาวสว่างร้อยละ 51.38 ± 0.90 การปรับสภาพวุ้นน้ำมะพร้าวด้วยกรดซัลฟูริกมีผลทำให้ค่า Young's modulus ความยืด ดัชนีความต้านแรงดึง ดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาด และดัชนีความต้านแรงดันทะลุลดลงร้อยละ 37.32 46.2 45.4 58.0 และ 56.7 ตามลำดับที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเหล่านี้ของฟิล์มที่ได้จากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยกรด แต่การแปรระดับความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการทดลองไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของฟิล์มข้างต้นนี้

การปรับปรุงคุณภาพวุ้นน้ำมะพร้าวด้วยกรดซัลฟูริกหลังจากการทำให้บริสุทธิ์ด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้กรดซัลฟูริกไปทำลายพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในสายโซ่และในบริเวณผลึกของเซลลูโลส ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลสมากขึ้น (Robinson, 1980; Smook, 1992) ซึ่งมีผลในการเพิ่มสมบัติทางเชิงกลของฟิล์มดังกล่าวข้างต้น แต่ผลของการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซัลฟูริกนี้ทำให้สมบัติทางเชิงกลของฟิล์มลดลง ทั้งนี้ภาวะที่ใช้ในการปรับปรุงคือความเข้มข้นของกรดระหว่างร้อยละ 1.25-5 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ได้ทำลายพันธะไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นผลึกของเซลลูโลสธรรมชาติ พร้อมทั้งทำลาย back-bone linkage ของเซลลูโลสบางส่วนด้วย ทำให้สายโซ่เซลลูโลสสั้นลงและทำให้ความแข็งแรงของโครงร่างตาข่ายลดลง (Battista, 1975) เป็นผลทำให้สมบัติทางเชิงกลดังกล่าวลดลง ซึ่งคล้ายกับการทำ microcrystalline cellulose จากเซลลูโลสพืช เช่น ฝ้าย หรือเยื่อไม้เนื่องจากการย่อยเส้นใยเซลลูโลสด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.5 นอร์มอล อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที (Battista and Smith, 1962) ทำให้เส้นใยเซลลูโลสสั้นลง (DP ลดลง)

ตารางที่ 6 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่ได้จากการปรับสภาพหุ่นน้ำมะพร้าวด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สมบัติทดสอบ	ค่าสมบัติทางกายภาพของฟิล์มจากการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก (ร้อยละโดยปริมาตร)					
	0.00	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00
Basis weight (g/m ²) ^{ns}	35.24±0.48	37.82±1.93	37.55±1.39	35.59±0.16	36.53±2.09	34.82±3.02
Thickness (mm) ^{ns}	0.0445±0.004	0.0513±0.009	0.0484±0.001	0.0457±0.002	0.0458±0.006	0.0439±0.004
Apparent density (kg/m ³) ^{ns}	783.82±73.51	763.37±164.47	775.87±35.71	765.61±36.97	802.35±62.78	793.03±12.09
Young's modulus (MN/m ²)	8,480.39±600.85 a	5,315.65±280.33 b	6,010.17±1061.36 b	6,240.29±1101.81 b	6,100.72±167.0 b	6,618.64±781.62 b
Elongation (%)	2.86±0.37 a	1.54±0.32 b	1.30±0.20 b	1.64±0.39 b	1.51±0.26 b	1.42±0.07 b
Tensile index (KN.m/kg)	79.00±11.60 a	43.17±11.69 b	40.00±5.47 b	47.24±4.83 b	44.80±5.88 b	45.53±5.44 b
Tear index (N.m ² /kg)	2.62±0.42 a	1.10±0.20 b	1.02±0.16 b	0.98±0.12 b	1.00±0.16 b	0.96±0.06 b
Burst index (MN/kg)	5.68±0.76 a	2.46±0.31 b	2.66±0.58 b	2.30±0.82 b	3.22±0.33 b	2.81±0.11 b
Brightness (%) ^{ns}	51.38±0.90	49.38±1.22	50.26±0.34	51.44±2.43	51.97±1.81	51.75±0.69

หมายเหตุ ตัวเลขที่อยู่หน้าตัวอักษรที่แตกต่างกัน (a, b) ในตาราง แสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
 ns ในตาราง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

นอกจากนี้ยังพบว่า การปรับสภาพโดยใช้กรดซัลฟูริกที่ระดับความเข้มข้นของกรดที่เพิ่มขึ้นไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพของฟิล์มแตกต่างกัน เนื่องจากกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.25-5 ซึ่งเป็นการย่อยแบบ heterogeneous สามารถย่อยไฟบริลเซลลูโลสของวุ้นน้ำมะพร้าวจนถึงระดับที่ไม่เกิดการย่อยต่อไปได้อีก (limiting degree of polymerization) (Krassig, 1985) และจากผลการวิจัยของ Koba และ Ishizaki (1990) ที่แสดงการย่อยเส้นใยปาล์มเป็นกลูโคส ไฮโดรลิก อะราบิโนส และแมนโนส ด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-10 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จะทำให้ปริมาณของการย่อยเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น โดยค่าร้อยละของการย่อยเป็นร้อยละ 7 ที่ความเข้มข้นของกรดเริ่มต้นร้อยละ 1 และปริมาณการย่อยเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็นร้อยละ 38 ที่ความเข้มข้นของกรดร้อยละ 5 การเพิ่มความเข้มข้นของกรดมากกว่าร้อยละ 5 จะไม่ทำให้ปริมาณของการย่อยเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยปาล์มมีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส และลิกนินปนอยู่ด้วย สารดังกล่าวมีโครงสร้างที่ถูกย่อยได้ง่ายด้วยกรดอ่อน (Goodwin and Mercer, 1972) จึงทำให้ปริมาณของการย่อยเส้นใยปาล์มเป็นน้ำตาลเกิดขึ้นมากเมื่อใช้ความเข้มข้นของกรดมากขึ้น แต่วุ้นน้ำมะพร้าวไม่มีองค์ประกอบเหล่านี้ (Hestrin and Sharmmm, 1954) ทำให้การย่อยด้วยกรดที่ความเข้มข้นดังกล่าวเกิดช้าลงจนกระทั่งหยุดอย่างสมบูรณ์

การปรับสภาพเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวภายหลังการทำให้บริสุทธิ์โดยใช้กรดซัลฟูริกไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม แต่ทำให้สมบัติทางเชิงกลของฟิล์มดังแสดงจากค่า Young's modulus ความยืด ดัชนีความต้านแรงดึง ดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาด และดัชนีความต้านแรงดันทะลุลดลง ฟิล์มที่มีสมบัติทางกายภาพเช่นนี้จึงไม่เหมาะในการนำไปใช้งานเพียงแต่ทำให้ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มเร็วขึ้นเนื่องจากไฟบริลเซลลูโลสมีขนาดสั้นลง การไหลของน้ำจึงเกิดขึ้นได้เร็ว ดังนั้นจึงสมควรศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการใช้กรดซัลฟูริกเพื่อเพิ่มสมบัติทางเชิงกลของฟิล์ม ซึ่งอาจศึกษาการแปรความเข้มข้นอุณหภูมิในช่วงที่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส และเวลาในช่วงที่ต่ำกว่า 30 นาที

ผลของการปรับสภาพวุ้นน้ำมะพร้าวโดยใช้ไอน้ำภายหลังการทำให้บริสุทธิ์ต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

สมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่ได้จากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้ไอน้ำภายหลังการทำให้บริสุทธิ์ที่ความดัน 586 กิโลปาสคาล อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส แสดงอยู่ในตารางที่ 7 ฟิล์มที่ได้จากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยไอน้ำมีสมบัติทางกายภาพดังนี้ น้ำหนักมาตรฐาน 35.24 ± 0.48 กรัม/ตารางเมตร ความหนา 0.0445 ± 0.004 มิลลิเมตร ความหนาแน่นเสมือน 783.82 ± 73.51 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร Young's modulus $8,480.39 \pm 600.85$ เมกกะนิวตัน/ตารางเมตร ความยืด ร้อยละ 2.86 ± 0.37 ดัชนีความต้านแรงดึง 79.00 ± 11.60 กิโลนิวตัน เมตร/กิโลกรัม ดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาด 2.62 ± 0.42 นิวตัน ตารางเมตร/กิโลกรัม ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ 5.68 ± 0.76 เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม และความขาวสว่างร้อยละ 51.38 ± 0.90 ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95 การแปรระยะเวลาที่ให้ไอน้ำแก่เยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ความดันและอุณหภูมิดังกล่าวมีผลต่อค่าความหนาแน่นเสมือนและค่าความขาวสว่างของฟิล์ม โดยที่ค่าความหนาแน่นเสมือนเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 963.99 ± 26.67 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เมื่อเวลาของการให้ไอน้ำเป็น 4 ชั่วโมง และค่าความขาวสว่างของฟิล์มลดลงเมื่อแปรเวลาของการให้ไอน้ำสูงขึ้น (รูปที่ 12) โดยมีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล (สมการที่ 2)

$$Y = 49.34 - 7.57 X - 0.85 X^2 \quad (R^2 = 0.83) \quad (2)$$

เมื่อ Y คือ ค่าความขาวสว่าง (%)

X คือ เวลาที่ให้ไอน้ำ (ชั่วโมง)

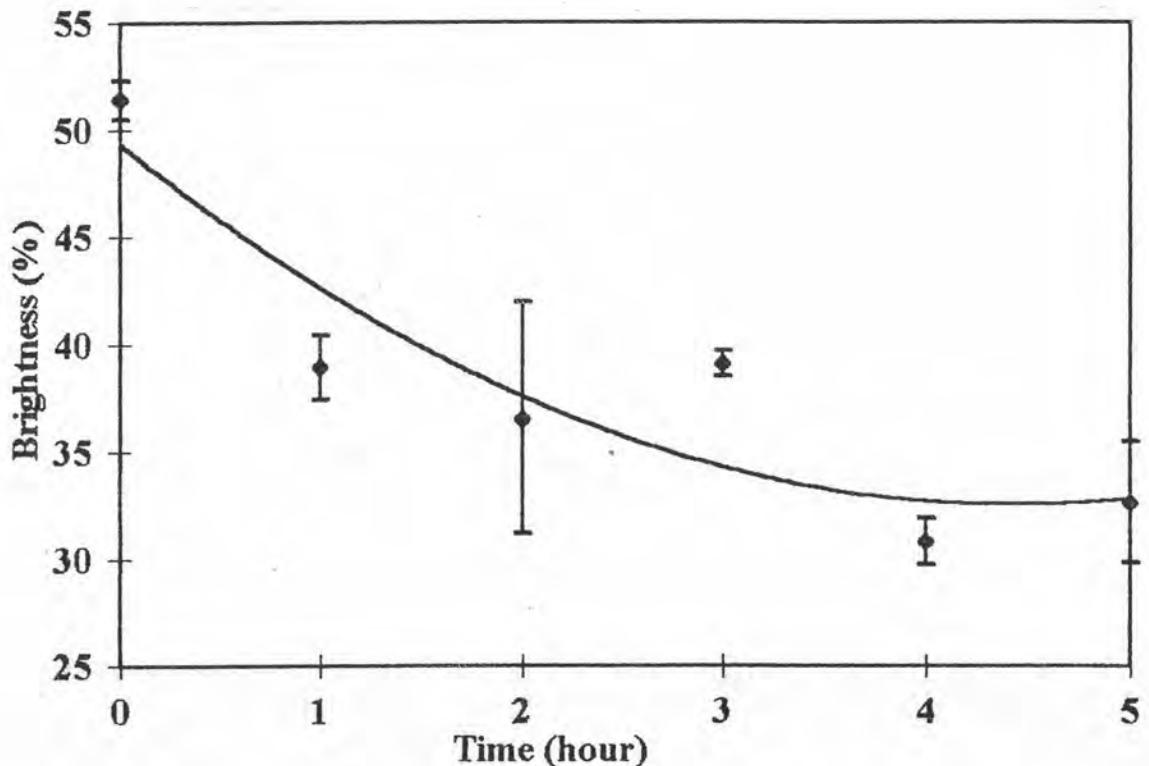
สำหรับการใช้ไอน้ำเพื่อปรับสภาพวุ้นน้ำมะพร้าวไม่มีผลทำให้สมบัติทางเชิงกลของฟิล์มเปลี่ยนแปลง

การปรับสภาพวุ้นน้ำมะพร้าวด้วยไอน้ำหลังจากการทำให้บริสุทธิ์ด้วยไอน้ำเดี่ยวไฮดรอกไซด์เพื่อให้ไอน้ำไปทำลายพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในสายโซ่และในบริเวณผลึกของเซลลูโลส ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลสมากขึ้น (Robinson, 1980; Smook, 1992) ซึ่งน่าจะมีผลในการเพิ่มสมบัติทางเชิงกลของฟิล์มดังกล่าวข้างต้น แต่จากผลการทดลองพบว่าสมบัติทางเชิงกลของฟิล์มไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากการใช้ไอน้ำเพื่อเพิ่มสมบัติทางเชิงกลของฟิล์มตามที่ได้มีรายงานต้องใช้ความดันสูง 2.9 เมกกะปาสคาล ในระยะ

ตารางที่ 7 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่ได้จากการปรับสภาพพูนน้ำมะพร้าวด้วยไอน้ำที่ความดัน 586 กิโลปาสคาล ในช่วงเวลา 1-5 ชั่วโมง

สมบัติทดสอบ	ค่าสมบัติทางกายภาพของฟิล์มจากการปรับสภาพพูนน้ำมะพร้าวด้วยไอน้ำที่ความดัน 586 กิโลปาสคาล ในช่วงเวลา (ชั่วโมง)					
	0	1	2	3	4	5
Basis weight (g/m^2) ^{ns}	35.24±0.48	38.25±1.19	34.81±1.91	36.78±1.32	38.16±0.12	35.33±1.25
Thickness (mm) ^{ns}	0.0445±0.004	0.0431±0.004	0.0435±0.002	0.0420±0.001	0.0396±0.001	0.0418±0.001
Apparent density (kg/m^3)	783.82±73.51 b	891.53±71.63 ab	802.73±75.47 b	876.16±54.68 ab	963.99±26.67 a	844.44±20.40 b
Young's modulus (MN/m^2) ^{ns}	8,480.39±600.85	7,359.59±950.06	8,655.98±1382.59	8,347.54±790.29	8,463.94±1092.32	8,827.7±1315.38
Elongation (%) ^{ns}	2.86±0.37	2.51±0.50	2.61±0.79	2.78±0.20	3.45±0.36	2.70±0.01
Tensile index (kN.m/kg) ^{ns}	79.00±11.60	74.84±7.52	78.30±1.16	84.10±7.35	78.51±2.82	76.73±4.61
Tear index ($\text{N.m}^2/\text{kg}$) ^{ns}	2.62±0.42	3.08±0.46	2.76±0.52	3.04±0.36	3.08±0.22	3.12±0.38
Burst index (MN/kg) ^{ns}	5.68±0.76	4.85±0.81	4.44±0.99	4.66±0.15	5.65±0.12	5.20±0.05
Brightness (%)	51.38±0.90 a	38.94±1.49 b	36.55±5.41 bc	39.10±0.60 b	30.80±1.08 d	32.66±2.85 cd

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าตัวอักษรที่แตกต่างกัน (a, b, c และ d) ในตาราง แสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
ns ในตาราง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความขาวสว่างของฟิล์มและเวลาที่ให้ไอหน้าที่ความดัน 586 กิโลปาสคาล อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

เวลาสั้นเพียง 30 วินาที (Yamashiki et al., 1992) เครื่องมือที่สามารถให้ความดันสูงขนาดนั้น สำหรับการวิจัยไม่มี ในการวิจัยนี้จึงใช้ความดันสูงสุด (586 กิโลปาสคาล) ของเครื่องมือที่มี โดยแปรเวลาที่ใช้ให้สูงขึ้นในช่วง 1-5 ชั่วโมง ซึ่งความดันและเวลาของการให้ไอหน้าขนาดนี้อาจไม่พอเพียงต่อการทำลายพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในสายโซ่และบริเวณผลึกเซลลูโลสได้ และโครงสร้างเซลลูโลสของวุ้นน้ำมะพร้าวมีความเป็นผลึกสูงถึงร้อยละ 63 (Yamanaka et al., 1989) จึงทำให้ฟิล์มที่ได้จากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไอน้ำมีสมบัติทางเชิงกลไม่แตกต่างกับฟิล์มที่ได้จากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยไอน้ำดังที่กล่าวข้างต้น เพียงแต่ให้ค่าความหนาแน่นเสมือนของฟิล์มสูงขึ้นและค่าความขาวสว่างของฟิล์มต่ำลง อาจเนื่องจากสารคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนที่หลงเหลืออยู่ในวุ้นน้ำมะพร้าวถูกกำจัดออกไปด้วยไอหน้าที่ความดันขนาดนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Oi และคณะ (1994) โดยให้ไอหน้าที่ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส กับเส้นใยปาล์มเป็นเวลา 10 นาที ซึ่งพบว่าเส้นใยปาล์มที่ได้มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ถูกสกัดได้ในน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่าเปรียบเทียบกับเส้นใยปาล์มที่ไม่ได้ผ่านการให้ไอน้ำ เนื่องจากไอหน้าที่ความดันสูงจะทำให้น้ำในเซลล์ขยายตัวดันให้เซลล์

แตก (Tanahashi, 1983) ซึ่งจะ去做ทำลายโครงสร้างขององค์ประกอบของเส้นใยปาล์ม จึงได้คาร์โบไฮเดรตที่มีมวลโมเลกุลต่ำลงซึ่งสามารถถูกสกัดได้ในน้ำเพิ่มขึ้น การขจัดสิ่งเจือปนที่ยังเหลืออยู่ในโครงสร้างวุ้นน้ำมะพร้าวออกไปทำให้เส้นใยวุ้นน้ำมะพร้าวมีการสานตัวซึ่งให้ฟิล์มที่มีความหนาแน่นเสมือนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ได้จากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยไอน้ำ คาร์โบไฮเดรตที่เหลืออยู่ในวุ้นน้ำมะพร้าวเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงและเวลานานทำให้เกิดปฏิกิริยา browning จึงทำให้ค่าความขาวสว่างของฟิล์มลดลง เวลาของการให้ไอน้ำมากขึ้นเป็น 4 ชั่วโมงสามารถกำจัดสิ่งเจือปนออกจากวุ้นน้ำมะพร้าวได้มาก จึงให้ฟิล์มมีค่าความหนาแน่นเสมือนเพิ่มขึ้น และมีค่าความขาวสว่างลดลง

การปรับสภาพเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวภายหลังการทำให้บริสุทธิ์โดยใช้ไอน้ำที่ความดัน 586 กิโลปาสกาล ไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางเชิงกลของฟิล์ม เพียงแต่ทำให้ความหนาแน่นเสมือนของฟิล์มเพิ่มขึ้น และมีผลให้ค่าความขาวสว่างของฟิล์มลดลง ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไอน้ำนี้เหมาะไปใช้งานบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง ทนแรงดึง และแรงดันทะลุสูง และต้องการความพรุนต่ำ โดยที่ไม่ต้องการการกั้นการยึด การทนแรงฉีกขาดและความขาวสว่างของฟิล์ม



ผลของการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวกับเยื่อใยยาวต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

สมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่ได้จากการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวทั้งที่ไม่ได้ผ่านและผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวแสดงอยู่ในตารางที่ 8 เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ได้ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวเมื่อแปรปริมาณเยื่อใยยาวต่าง ๆ มีผลต่อค่าความหนาแน่นเสมือน Young's modulus ความยืด ดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาด ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ และความขาวสว่างของฟิล์ม ส่วนการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวเมื่อแปรปริมาณเยื่อใยยาวต่าง ๆ มีผลต่อสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกับการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาว และยังมีผลต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงของฟิล์ม แต่ไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นเสมือน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ค่าความหนาแน่นเสมือนของฟิล์มที่ได้จากการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวเมื่อปริมาณเยื่อใยยาวร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ไม่แตกต่างจากค่านี้ของฟิล์มที่ไม่ได้ผสมเยื่อใยยาว แต่ฟิล์มที่ผสมเยื่อใยยาวในปริมาณร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นเสมือนเท่ากับค่านี้ของฟิล์มจากเยื่อใยยาวทั้งหมด ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นเสมือนของฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวอย่างเดียวยกเว้นร้อยละ 23.32

ค่า Young's modulus ของฟิล์มที่ได้จากการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวจะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของเยื่อใยยาว (รูปที่ 13) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's modulus ของฟิล์มและปริมาณของเยื่อใยยาวเป็นแบบเส้นตรงดังแสดงในสมการที่ 3 และ 4

$$Y_1 = 8339.8 - 40.53 X \quad (R^2 = 0.97) \quad (3)$$

$$Y_2 = 8752.0 - 545.08 X \quad (R^2 = 0.98) \quad (4)$$

เมื่อ Y_1 คือ ค่า Young's modulus ของฟิล์มที่ได้จากการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาว

(แมกกะนิวตัน ต่อ ตารางเมตร)

Y_2 คือ ค่า Young's modulus ของฟิล์มที่ได้จากการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาว

(แมกกะนิวตัน ต่อ ตารางเมตร)

X คือ ปริมาณของเยื่อใยยาว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

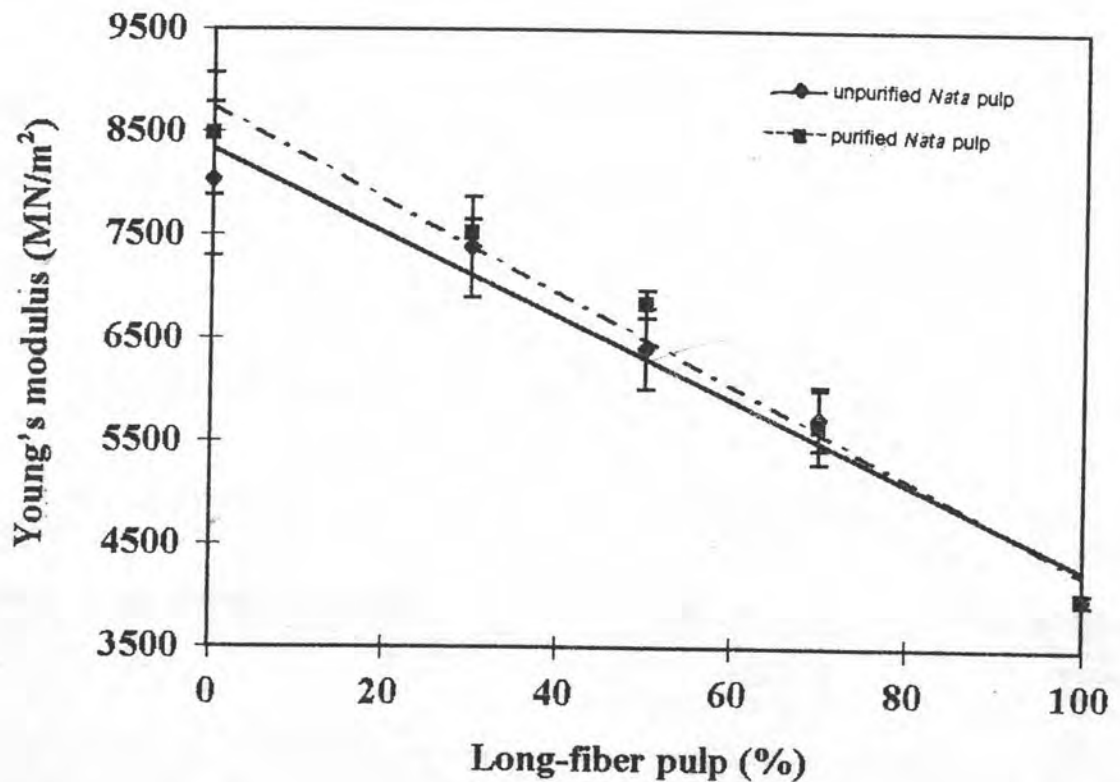
ตารางที่ 8 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่ได้จากการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวกับเยื่อไผ่

สมบัติทดสอบ	ชนิดของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าว ที่ผสมกับเยื่อไผ่	ค่าสมบัติทางกายภาพของฟิล์มจากการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวกับเยื่อไผ่ ที่ปริมาณเยื่อไผ่ต่าง ๆ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
		0	30	50	70	100
Basis weight (g/m ²) ^{ns}	1. unpurified <i>Nata</i> pulp	37.74±0.69	38.58±1.90	36.89±0.04	39.60±0.33	36.49±0.44
	2. purified <i>Nata</i> pulp	35.24±0.48	35.30±0.62	37.91±0.30	36.38±1.63	36.49±0.44
Thickness (mm) ^{ns}	1. unpurified <i>Nata</i> pulp	0.0422±0.004	0.0455±0.002	0.0536±0.000	0.0593±0.000	0.0572±0.004
	2. purified <i>Nata</i> pulp	0.0445±0.004	0.0493±0.002	0.0534±0.000	0.0539±0.002	0.0572±0.004
Apparent density (kg/m ³)	1. unpurified <i>Nata</i> pulp	912.33±68.53 a	819.21±7.28 a	685.07±1.56 b	667.79±0.71 b	638.74±36.09 b
	2. purified <i>Nata</i> pulp ^{ns}	738.82±73.51	716.66±39.21	709.84±5.69	674.83±7.16	638.74±36.09
Young's modulus (MN/m ²)	1. unpurified <i>Nata</i> pulp	8,040.34±745.03 a	7,388.47±487.47 ab	6,403.53±387.65 bc	5,733.90±304.92 c	4,001.22±59.06 d
	2. purified <i>Nata</i> pulp	8,480.39±600.85 A	7,524.29±138.01 B	6,834.80±132.96 B	5,649.94±359.94 C	4,000.22±59.06 D
Elongation (%)	1. unpurified <i>Nata</i> pulp	2.33±0.29 b	2.03±0.11 bc	1.63±0.18 c	1.78±0.12 c	3.25±0.27 a
	2. purified <i>Nata</i> pulp	2.86±0.37 AB	2.03±0.74 BC	1.91±0.22 BC	1.43±0.46 C	3.25±0.27 A
Tensile index (kN.m/kg)	1. unpurified <i>Nata</i> pulp ^{ns}	56.31±9.65	56.80±3.14	46.36±4.33	43.69±3.05	60.07±4.78
	2. purified <i>Nata</i> pulp	79.00±11.60 A	59.16±4.60 B	53.38±0.70 BC	39.30±3.33 C	30.07±4.78 B
Tear index (N.m /kg) ²	1. unpurified <i>Nata</i> pulp	1.98±0.68 d	5.78±0.08 c	10.88±1.53 b	13.86±0.29 a	13.37±0.88 a
	2. purified <i>Nata</i> pulp	2.62±0.42 D	2.97±0.26 B	2.35±0.43 B	13.50±1.68 A	13.37±0.88 A
Burst index (MN/kg)	1. unpurified <i>Nata</i> pulp	4.25±0.21 b	2.59±0.00 c	2.23±0.02 d	2.66±0.01 c	4.75±0.13 a
	2. purified <i>Nata</i> pulp	5.68±0.76 A	2.97±0.26 B	2.35±0.43 B	2.81±0.37 B	4.75±0.13 A
Brightness (%)	1. unpurified <i>Nata</i> pulp	41.53±0.89 e	48.70±0.06 d	55.57±0.99 c	62.61±0.77 b	75.27±1.46 a
	2. purified <i>Nata</i> pulp	51.38±0.90 C	51.72±1.06 C	55.46±3.90 C	68.55±0.34 B	75.27±1.46 A

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าตัวอักษรที่แตกต่างกัน (a, b, c, d และ e) ในตาราง แสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตัวเลขหน้าตัวอักษรที่แตกต่างกัน (A, B, C, และ D) ในตาราง แสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ns ในตาราง แสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

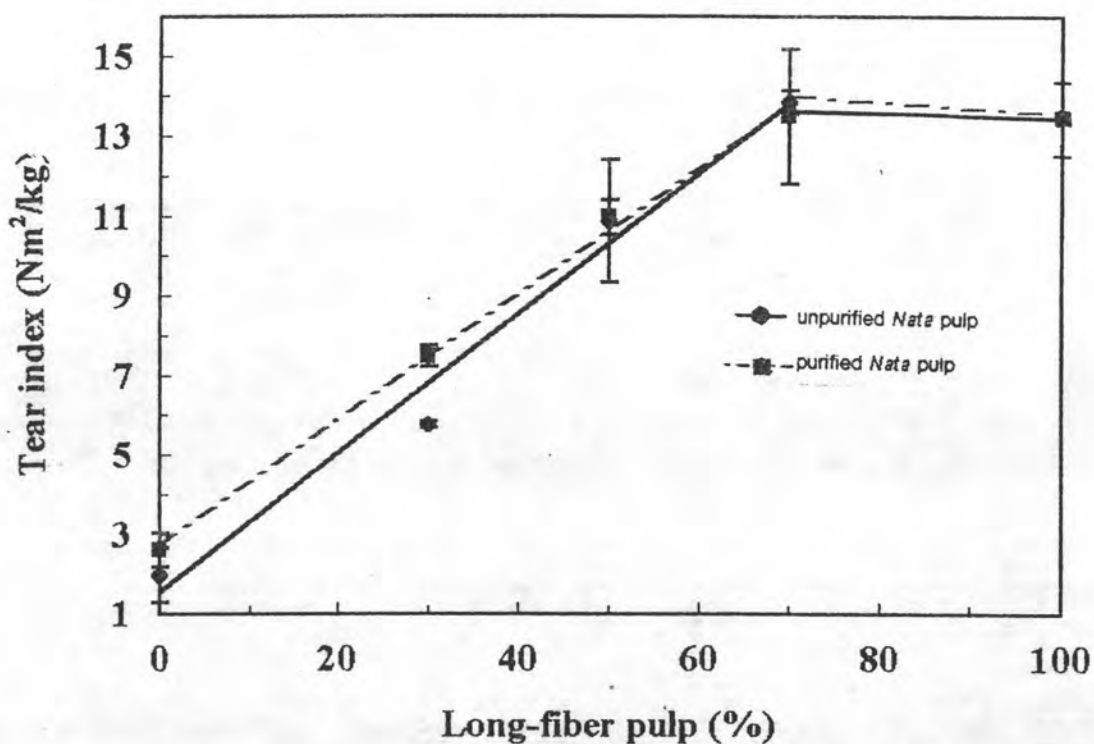


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's modulus และปริมาณของเยื่อใยยาวของฟิล์มที่ได้จากการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวที่อัตราส่วนต่างกัน

ค่าความยืดของฟิล์มจากเยื่อใยยาวสูงกว่าฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ร้อยละ 28.31 ส่วนความยืดของฟิล์มจากเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์จะมีสูงขึ้นและมีค่าไม่แตกต่างกับฟิล์มจากเยื่อใยยาว การผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวในช่วงปริมาณของเยื่อใยยาวเป็นร้อยละ 30 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความยืดลดลงจากฟิล์มที่ได้จากวุ้นน้ำมะพร้าวอย่างเดียว

ค่าดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์สูงกว่าค่านี้ของฟิล์มจากเยื่อใยยาวร้อยละ 20.16 การผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์และเยื่อใยยาวในปริมาณของเยื่อใยยาวเป็นร้อยละ 30 และ 50 ทำให้ค่าดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มไม่แตกต่างกับค่านี้ของฟิล์มจากเยื่อใยยาว แต่การผสมเยื่อใยยาวที่ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มต่ำสุดเป็น 39.30 กิโลนิวตัน เมตร/กิโลกรัม

ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเยื่อใยยาวที่ผสมลงในเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการทำให้บริสุทธิ์ในช่วงปริมาณเยื่อใยยาวร้อยละ 0 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ความสัมพันธ์ระหว่างสองค่านี้เป็นแบบเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 14 และสมการที่ 5 และ 6 แต่ฟิล์มที่ได้จากเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการทำให้บริสุทธิ์ และเยื่อใยยาวที่ปริมาณเยื่อใยยาวเป็นร้อยละ 70 มีค่านี้ไม่แตกต่างกับค่านี้ของฟิล์มจากเยื่อใยยาวอย่างเดียว



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดและปริมาณของเยื่อใยยาวของฟิล์มที่ได้จากผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวที่อัตราส่วนต่างกัน

$$Y_1 = 1.55 + 0.18 X \quad (R^2 = 0.98) \quad (5)$$

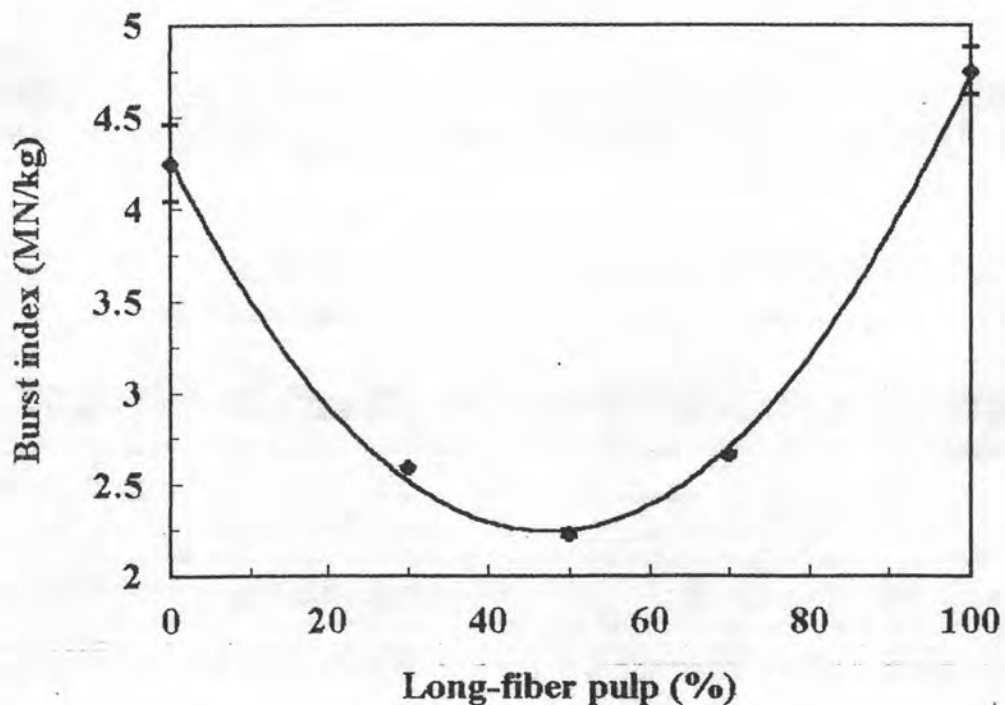
$$Y_2 = 2.74 + 0.16 X \quad (R^2 = 1.00) \quad (6)$$

เมื่อ Y_1 คือ ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มที่ได้จากเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาว (นิวตัน ตารางเมตร/กิโลกรัม)

Y_2 คือ ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มที่ได้จากเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาว (นิวตัน ตารางเมตร/กิโลกรัม)

X คือ ปริมาณของเยื่อใยยาว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มเยื่อใยยาวสูงกว่าฟิล์มของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ร้อยละ 11.76 การผสมเยื่อสองชนิดมีผลให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มลดลง โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มและปริมาณของเยื่อใยยาวเป็นแบบพาราโบลา ดังแสดงในรูปที่ 15 และสมการที่ 7 ซึ่งฟิล์มที่มีปริมาณของเยื่อใยยาวเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าต่ำสุด



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดและปริมาณของเยื่อใยยาวของฟิล์มที่ได้จากผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวที่อัตราส่วนต่างกัน

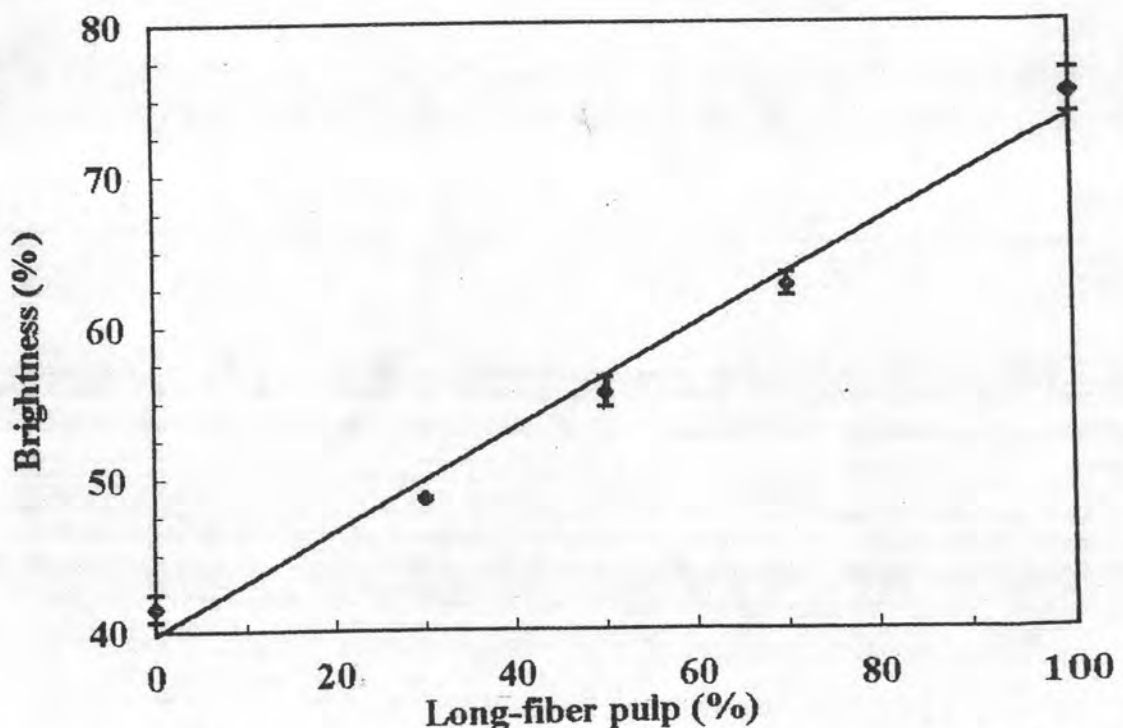
$$Y = 4.27 - 8.55 \times 10^{-2} X - 9.00 \times 10^{-4} X^2 \quad (R^2 = 1.00) \quad (7)$$

เมื่อ Y คือ ค่าดัชนีความต้านแรงดันทะลุของฟิล์มที่ได้จากเยื่อถุ่นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาว (เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม)

X คือ ปริมาณของเยื่อใยยาว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ส่วนฟิล์มจากเยื่อถุ่นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์และฟิล์มจากเยื่อใยยาวมีค่าดัชนีความต้านแรงดันทะลุไม่แตกต่างกันแต่มีค่าสูงกว่าฟิล์มที่ได้จากเยื่อผสม และที่ปริมาณของเยื่อใยยาวในฟิล์มที่ได้จากเยื่อผสมในช่วงร้อยละ 30 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ไม่มีผลต่อค่าดัชนีความต้านแรงดันทะลุของฟิล์ม

ค่าความขาวสว่างของฟิล์มที่ได้จากเยื่อถุ่นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของเยื่อใยยาว (รูปที่ 16) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวสว่างของฟิล์มและปริมาณของเยื่อใยยาวเป็นแบบเส้นตรง (สมการที่ 8)



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวสว่างและปริมาณของเยื่อใยยาวของฟิล์มที่ได้จากการผสมเยื่อถุ่นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวที่อัตราส่วนต่างกัน

$$Y = 39.79 + 0.34 X \quad (R^2 = 0.99) \quad (8)$$

เมื่อ Y คือ ค่าความขาวสว่างของฟิล์ม (ร้อยละ)

X คือ ปริมาณของเยื่อใยยาว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ส่วนฟิล์มที่ได้จากเยื่อถุ่นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาว ที่ปริมาณของเยื่อใยยาวเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 50 ถึง 100 ทำให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้นร้อยละ 35.72 และมีค่านี้สูงกว่าฟิล์มที่มีเยื่อใยยาวผสมเป็นปริมาณร้อยละ 0 30 และ 50 ซึ่งฟิล์มของเยื่อผสมทั้งสามนี้มีค่าความขาวสว่างไม่แตกต่างกัน

การเพิ่มเยื่อใยยาวในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ไม่มีผลต่อค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของกาซออกซิเจนของฟิล์มที่ได้จากการผสมเยื่อถุ่นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาว แต่ค่านี้เพิ่มขึ้นประมาณ 5 เท่า เมื่อปริมาณเยื่อใยยาวเพิ่มขึ้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ส่วนฟิล์มที่ได้จากเยื่อถุ่นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวมีค่านี้เพิ่มขึ้นประมาณ 3 และ 2 เท่า เมื่อปริมาณเยื่อใยยาวเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อปริมาณเยื่อใยยาวเป็นร้อยละ 70 และ 100 โดยน้ำหนักทำให้ความสามารถในการซึมผ่านกาซออกซิเจนของฟิล์มทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาว เร็วมากจนไม่สามารถทดสอบด้วยเครื่องมือชนิดนี้ได้

ผลของการผสมเยื่อถุ่นน้ำมะพร้าวและเยื่อใยยาวที่ให้โครงร่างตาข่ายของฟิล์มที่มีสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ กัน เนื่องจากความแข็งแรงของฟิล์มที่แสดงในรูปของความต้านแรงดึงจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยเอง และความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยดังสมการที่ 1 หน้า 21 (Page, 1969; Robinson, 1980) ซึ่ง Page (1969) ได้อธิบายไว้ว่าความแข็งแรงของเส้นใยเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาด (ความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลาง) ของเส้นใย ดังนั้นเยื่อใยยาวจึงมีความแข็งแรงของเส้นใยสูงกว่าเยื่อถุ่นน้ำมะพร้าว เนื่องจากเยื่อใยยาวซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย 22-50 ไมโครเมตร (กองการวิจัย, 2513) จึงมีขนาดของเส้นใยใหญ่กว่าเยื่อถุ่นน้ำมะพร้าวซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย 2-4 นาโนเมตร (Brown et al., 1976; Zaar, 1977) การดึงเส้นใยให้ขาดจะต้องใช้แรงที่สูงอย่างน้อยเท่ากับความแข็งแรงของเส้นใยเพื่อทำลายความแข็งแรงของ back-bone ของสายโซ่เซลลูโลสและความแข็งแรงของพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่ เนื่องจากความแข็งแรงของเส้นใยเป็นสัดส่วนกับความแข็งแรงของ back-bone ของสายโซ่เซลลูโลสและความแข็งแรงของพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่ดังแสดงในสมการที่ 9

$$F \propto n_c E_c + n_h E_h \quad (9)$$

เมื่อ F คือ ความแข็งแรงของเส้นใย

n_c คือ จำนวนสายโซ่เซลลูโลส

E_c คือ เอนทาลปีของพันธะโควาเลนต์ของ back-bone
สายโซ่เซลลูโลส ซึ่งมีค่าประมาณ 50 Kcal/mole

n_h คือ จำนวนของพันธะระหว่างสายโซ่เซลลูโลส

E_h คือ เอนทาลปีของพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสายโซ่
เซลลูโลส ซึ่งมีค่าประมาณ 15 Kcal/mole

จากสมการที่ 9 สามารถอธิบายเทอมต่าง ๆ ที่แสดงออกมาเป็นความแข็งแรงของเส้นใยได้ตามลักษณะของเส้นใยแต่ละชนิดดังรูปที่ 17 โดยเส้นใยของเยื่อใยยาวที่ประกอบด้วยสายโซ่เซลลูโลสหลาย ๆ สายพันกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (รูปที่ 17 a) และมีจำนวนสายโซ่เซลลูโลส (n_c) มากกว่าเส้นใยของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าว (รูปที่ 17 b) ดังนั้นเส้นใยของเยื่อใยยาวจึงมีความแข็งแรงของ back-bone ของสายโซ่เซลลูโลส ($n_c E_c$) สูงกว่าเส้นใยของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าว ทั้งความยาวของสายโซ่เซลลูโลสในเส้นใยของเยื่อใยยาวอาจจะยาวกว่าความยาวของสายโซ่เซลลูโลสของเส้นใยของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าว ซึ่งอาจจะทำให้จำนวนพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ (n_h) ในเยื่อใยยาวสูงกว่า ดังนั้นเส้นใยของเยื่อใยยาวจึงมีความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลส ($n_h E_h$) สูงกว่าเส้นใยของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าว ทั้งหมดนี้ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยของเยื่อใยยาวสูงกว่าเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าว

ส่วนความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยซึ่งเกิดจากการสานตัวของเส้นใย (รูปที่ 19) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับจำนวนพันธะไฮโดรเจนที่ยึดเกาะระหว่างเส้นใยดังสมการที่ 10

$$B \propto n_f \cdot \overline{n_h} \cdot E_h \quad (10)$$

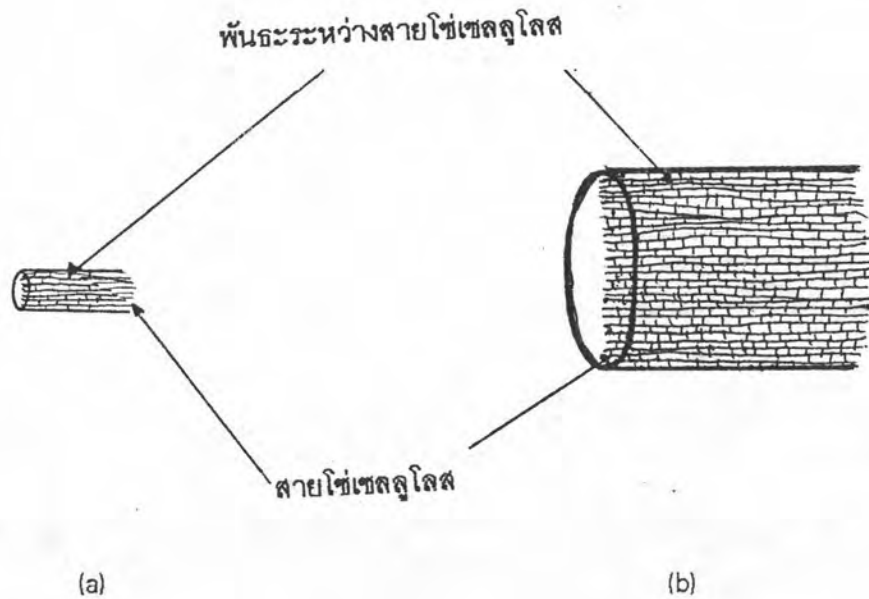
เมื่อ B คือ ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย

n_f คือ จำนวนของเส้นใย

$\overline{n_h}$ คือ จำนวนเฉลี่ยของพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยต่อ 1 เส้นใย

E_h คือ เอนทาลปีของพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างเส้นใย

เซลลูโลส ซึ่งมีค่าประมาณ 15 Kcal/mole



รูปที่ 17 ลักษณะของเส้นใยเซลลูโลสในระดับ microscopic และ submicroscopic structure

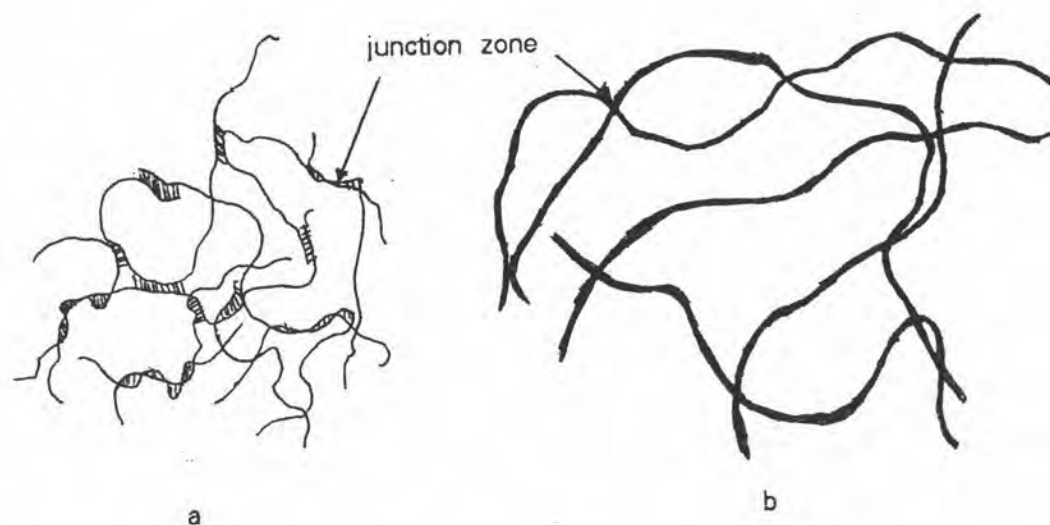
a คือ เส้นใยเซลลูโลสของเยื่อใยยาว

b คือ เส้นใยเซลลูโลสของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าว

(ดัดแปลงจาก Page, 1969; Robinson, 1980; Smook, 1992)

เนื่องจากเส้นใยของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวมีลักษณะบางและละเอียดจึงทำให้พื้นที่สัมผัสกันระหว่างเส้นใยและความหนาแน่นของเส้นใยสูง (Brown *et al.*, 1980) และอาจเป็นผลทำให้เส้นใยของวุ้นน้ำมะพร้าวยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนได้มาก (รูปที่ 18 a) มีผลทำให้ขนาดของ junction zone ใหญ่กว่าเส้นใยของเยื่อใยยาว (รูปที่ 18 b) ขณะที่ความยาวของเส้นใยระหว่าง junction zone ของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวสั้นกว่าของเยื่อใยยาว ดังนั้นเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวจะมีความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยสูงกว่าเยื่อใยยาว

จากที่กล่าวข้างต้น สรุปได้ว่าเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวจะมีความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยสูง แต่มีความแข็งแรงของเส้นใยต่ำ ส่วนเยื่อใยยาวจะมีความแข็งแรงของเส้นใยสูง แต่มีความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยต่ำ



รูปที่ 18 ลักษณะโครงสร้างตาข่ายของเส้นใยแต่ละชนิด

a คือ โครงสร้างตาข่ายของเส้นใยของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าว

b คือ โครงสร้างตาข่ายของเส้นใยของเยื่อใยยาว

(ดัดแปลงจาก Page, 1969; Robinson, 1980; Smook, 1992)

การผสมเยื่อทั้งสองชนิดเพื่อดัดแปรสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม โดยเฉพาะสมบัติทางเชิงกลของฟิล์ม ซึ่งอธิบายผลได้ดังนี้ ดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มที่ได้จากเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์มีค่าสูงกว่าเยื่อใยยาว แสดงว่าความแข็งแรงของพันธะมีผลต่อค่านี้น่ามากกว่าความแข็งแรงของเส้นใย เช่นเดียวกับที่ Robinson (1980) พบว่าความแข็งแรงของกระดาษขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างเส้นใยมากกว่าความแข็งแรงของเส้นใย เมื่อออกแรงดึงฟิล์มจะเป็นการทำลายพันธะระหว่างเส้นใยก่อนแล้วจึงจะทำลายตัวเส้นใย (Page, 1969) แต่ฟิล์มจากเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์มีค่าดัชนีความต้านแรงดึงไม่แตกต่างกับฟิล์มที่มีเยื่อใยยาวผสม เนื่องจากสิ่งเจือปนในวุ้นน้ำมะพร้าวจะขัดขวางการเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลส ส่วนการผสมเยื่อใยยาวลงในเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวทำให้ค่าดัชนีความต้านแรงดึงของฟิล์มลดลง เนื่องจากเป็นการลดจำนวนพันธะระหว่างเส้นใย

Young's modulus จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยมากกว่าความแข็งแรงของเส้นใย (Brown et al., 1976) ดังนั้นฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวหรือฟิล์มที่มีปริมาณเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวผสมอยู่ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยสูงกว่าฟิล์มจาก

เยื่อใยยาวจึงมีค่านี้นสูงกว่าดังผลการทดลองที่ได้ แต่ฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์มีค่า Young's modulus ต่ำกว่าฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์อธิบายได้เช่นเดียวกับข้างต้นคือวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ยังมีสิ่งเจือปนซึ่งขัดขวางการเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลส

ความยืดของฟิล์มขึ้นอยู่กับระยะทางของเส้นใยระหว่าง junction zone ฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวมีระยะทางระหว่าง junction zone สั้น ทำให้โครงร่างตาข่ายยึดกันอย่างแข็งแรง ดังนั้นค่าความยืดของฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์จึงมีค่าต่ำ ส่วนฟิล์มจากเยื่อใยยาวมีระยะทางระหว่าง junction zone มากทำให้ฟิล์มมีการยืดตัวได้มาก การผสมเยื่อใยยาวในเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวทำให้ฟิล์มที่ได้มีค่าความยืดลดลง และมีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อปริมาณเยื่อใยยาวมากขึ้น เนื่องจากเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่มีอยู่ในโครงร่างตาข่ายจะไปช่วยยึดระหว่างช่องว่างของเยื่อใยยาวทำให้การยืดตัวของฟิล์มลดลง

ความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยมากกว่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย (Robinson, 1980) ดังนั้นฟิล์มจากเยื่อใยยาวจึงมีค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดสูงกว่าฟิล์มจากเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าว และการผสมเยื่อใยยาวมากขึ้นทำให้ค่านี้นี้เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงเนื่องจากการเพิ่มความแข็งแรงของเส้นใยและการเพิ่มปริมาณเยื่อใยยาวตั้งแต่ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักเป็นต้นไป ทำให้มีความแข็งแรงของเส้นใยเช่นเดียวกับฟิล์มจากเยื่อใยยาว

ความต้านทานแรงดันทะลุของฟิล์มขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยมากกว่าความแข็งแรงของเส้นใยเช่นเดียวกับความต้านทานแรงดึง (Robinson, 1980) ฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์จึงมีค่าดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุสูงกว่าฟิล์มจากวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ เนื่องจากการขจัดสิ่งเจือปนในขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ซึ่งเป็นขจัดสารขัดขวางการเกาะกันของพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลสทำให้การยึดเกาะระหว่างสายโซ่เซลลูโลสมีมาก และมีค่าไม่แตกต่างกับฟิล์มจากเยื่อใยยาวแสดงว่าความแข็งแรงของตัวเส้นใยของเยื่อใยยาวมีผลต่อความแข็งแรงของโครงร่างตาข่ายของฟิล์มเช่นเดียวกับความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าว การผสมเยื่อใยยาวในเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวทำให้ค่านี้นี้ลดลงเนื่องจากการผสมเยื่อใยยาวเป็นการลดความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย และการผสมเยื่อใยยาวไม่ทำให้ค่านี้นี้แตกต่างกันเมื่อปริมาณเยื่อใยยาวมากขึ้นเนื่องจากผลของการทำให้วุ้นน้ำมะพร้าวบริสุทธิ์ซึ่งทำให้ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใยมีมากและส่งผลกระทบมากกว่าความแข็งแรงของเส้นใย ถึงแม้จะมีการเพิ่มเยื่อใยยาวก็ไม่ทำให้ค่านี้นี้เปลี่ยนแปลง แต่การผสมวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์

กับเยื่อใยยาวที่ปริมาณเยื่อใยยาวเป็นร้อยละ 50 มีค่าดัชนีความต้านแรงดันทะลุของฟิล์มลดลงต่ำสุด เนื่องจากผลของการมีสิ่งเจือปนในวุ้นน้ำมะพร้าวและการลดความแข็งแรงของทั้งพันธะและเส้นใยจึงทำให้ค่านี้มีค่าต่ำสุด

สมบัติการนำไปใช้เป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหารของฟิล์มซึ่งทำการทดสอบค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนดังแสดงในตารางที่ 9 เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิดจะมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การสูญเสียความชื้น และจากจุลินทรีย์ การใช้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ห่อหุ้มอาหารเพื่อลดและป้องกันการสัมผัสของอาหารกับสิ่งที่ทำให้เกิดความเสื่อมสภาพ ซึ่งไอน้ำและก๊าซออกซิเจนเป็นสิ่งที่จะทำให้อาหารเสื่อมสภาพได้ จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่ได้จากเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์มีค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำ 1.79 ± 0.29 กรัม-มิลลิเมตร/ตารางเมตร/วัน/กิโลปาสกาล และค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจน 12.14 ± 2.83 ลูกบาศก์เซนติเมตร-มิลลิเมตร/ตารางเมตร/วัน/กิโลปาสกาล ส่วนฟิล์มที่ได้จากเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์มีค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำ 2.18 ± 0.02 กรัม-มิลลิเมตร/ตารางเมตร/วัน/กิโลปาสกาล และค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจน 11.84 ± 3.75 ลูกบาศก์เซนติเมตร-มิลลิเมตร/ตารางเมตร/วัน/กิโลปาสกาล ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95 ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเยื่อใยยาวเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 19 โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำและปริมาณของเยื่อใยยาวเป็นแบบโพลิโนเมียล (สมการที่ 11 และ 12) ดังนี้

$$Y_1 = 2.22 - 6.92 \times 10^{-2} X + 1.87 \times 10^{-3} X^2 \quad (R^2 = 0.97) \quad (11)$$

$$Y_2 = 2.44 - 3.01 \times 10^{-2} X + 1.49 \times 10^{-3} X^2 \quad (R^2 = 0.99) \quad (12)$$

เมื่อ Y_1 คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มที่ได้จากเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาว (กรัม-มิลลิเมตร/ตารางเมตร/วัน/กิโลปาสกาล)

Y_2 คือ ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มที่ได้จากเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาว (กรัม-มิลลิเมตร/ตารางเมตร/วัน/กิโลปาสกาล)

X คือ ปริมาณของเยื่อใยยาว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ตารางที่ 9 ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำและกาซออกซิเจนของฟิล์มที่ได้จากเยื่อหุ้มน้ำมะพร้าวกับเยื่อใยยาว

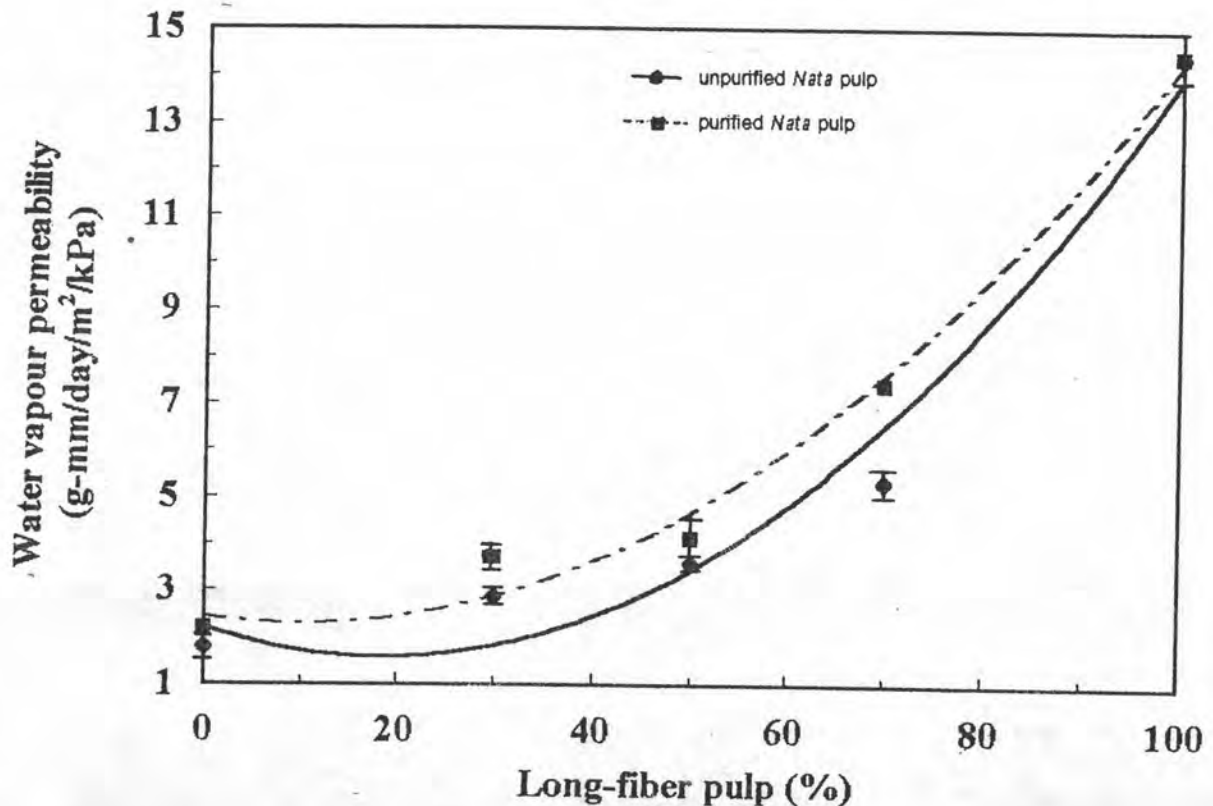
สมบัติทดสอบ	ชนิดของเยื่อหุ้มน้ำมะพร้าว ที่ผสมกับเยื่อใยยาว	ค่าสมบัติของฟิล์มจากการผสมเยื่อหุ้มน้ำมะพร้าวกับเยื่อใยยาว ที่ปริมาณเยื่อใยยาวต่าง ๆ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
		0	30	50	70	100
Water vapour permeability (g-mm/m ² /day/kPa)	1. unpurified <i>Nata</i> pulp	1.79±0.29 a	2.86±0.15 b	3.59±0.24 b	5.32±0.47 c	14.45±0.47 d
	2. purified <i>Nata</i> pulp	2.18±0.02 A	3.71±0.33 B	4.12±0.47 B	7.41±0.11 C	14.45±0.47 D
Oxygen gas permeability (cm ³ -mm/m ² /day/kPa)	1. unpurified <i>Nata</i> pulp	12.14±2.83 a	19.15±2.37 a	60.50±8.78 b	- *	- *
	2. purified <i>Nata</i> pulp	11.84±3.75 A	37.50±9.38 B	73.13±4.05 C	- *	- *

หมายเหตุ สภาวะทดลองที่อุณหภูมิ 27±1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65±2

ตัวเลขหน้าตัวอักษรที่แตกต่างกัน (a, b, c, และ d) ในตาราง แสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตัวเลขหน้าตัวอักษรที่แตกต่างกัน (A, B, C, และ D) ในตาราง แสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

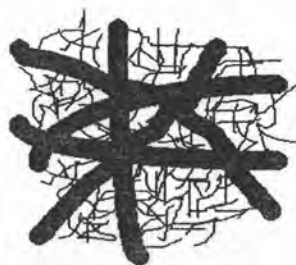
เครื่องหมาย * หมายถึง ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของกาซออกซิเจน > 140 ลูกบาศก์เซนติเมตร-มิลลิเมตร/ตารางเมตร/วัน/กิโลปาสคาล



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำและปริมาณของเยื่อใยยาวของฟิล์มที่ได้จากผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวที่อัตราส่วนต่างกัน

สำหรับค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำและกาซออกซิเจนของฟิล์มจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเยื่อใยยาวมากขึ้น โดยฟิล์มที่มีค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำและกาซออกซิเจนต่ำจะแสดงถึงความสามารถป้องกันการซึมผ่านสารเหล่านี้ได้ดีกว่าฟิล์มที่มีค่าเหล่านี้สูง นั่นคือ การผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวมากขึ้นจะมีความสามารถป้องกันการซึมผ่านไอน้ำและกาซออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์มที่ได้จากเยื่อใยยาว โดยปริมาณของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 50 (โดยน้ำหนัก) เป็นต้นไปจะให้ฟิล์มที่มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านไอน้ำและกาซออกซิเจนได้ดีขึ้น เนื่องจากเส้นใยของวุ้นน้ำมะพร้าวจะมีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นของเส้นใยสูง และมีระยะทางของเส้นใยระหว่าง junction zone สั้นทำให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยแคบซึ่งช่วยป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและกาซออกซิเจนได้ดีกว่าเส้นใยของเยื่อใยยาวซึ่งเป็นเส้นใยขนาดใหญ่ และมีช่องว่างระหว่างเส้นใยกว้างเนื่องจาก

ระยะทางของเส้นใยระหว่าง junction zone ยาว เมื่อผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวกับเยื่อใยยาวจึงทำให้เส้นใยละเอียดของวุ้นน้ำมะพร้าวซึ่งสั้นกว่าขนาดช่องว่างระหว่างเยื่อใยยาวได้เข้าไปสานตัวและปิดช่องว่างระหว่างเส้นใยของเยื่อใยยาว ดังแสดงในรูปที่ 20 ซึ่งทำให้ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มที่ได้จากเยื่อผสมมีค่าต่ำกว่าฟิล์มจากเยื่อใยยาว แต่การผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์จะมีค่านี้ต่ำกว่าการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ เนื่องจากสิ่งเจือปนในวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ซึ่งจะไปขัดขวางการเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เซลลูโลสทำให้สมบัติทางเชิงกลของฟิล์มลดลงแล้ว ยังเข้าไปสานตัวกันในช่องว่างระหว่างเส้นใยของเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าว จึงให้ฟิล์มที่มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจนได้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 20 ภาพเสมือนของโครงร่างตาข่ายของเส้นใยเยื่อใยยาวกับเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าว

ดังนั้นการผลิตฟิล์มที่ได้จากการผสมเยื่อระหว่างเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการทำให้บริสุทธิ์กับเยื่อใยยาวจะให้สมบัติของฟิล์มต่าง ๆ กันโดยเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวจะลดค่าความยืดตัวของฟิล์มและให้ลักษณะฟิล์มที่มีความยืดหยุ่นและมีความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุดี แต่จะลดความต้านทานการฉีกขาดลง จึงต้องปรับปรุงด้วยการเติมเยื่อใยยาวผสมเข้าไปตามอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานต่าง ๆ และจะต้องคำนึงถึงสมบัติของความสามารถในการซึมผ่านได้ของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มอีกด้วย การผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์จะให้สมบัติทางกายภาพของฟิล์มโดยรวมดีกว่าการผสมเยื่อวุ้นน้ำมะพร้าวที่ไม่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ แต่จะให้สมบัติการป้องกันการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจนลดลง จากสมบัติทางกายภาพทั้งหมดของฟิล์มที่ผลิตได้จะนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารต่อไป