บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)

เส้นใยที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเรียกว่า เส้นใยธรรมชาติ แบ่งได้เป็นสามกลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ เส้นใยจากพืช ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือเซลลูโลส เส้นใยจากสัตว์ซึ่งมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก และเส้นใยจากแร่ที่เป็นสารอนินทรีย์ เส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืชมีความสำคัญมากในระดับอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ และอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ โดยองค์ประกอบหลักของเซลล์พืชคือ ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) องค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ เพคติน แป้ง ไขมัน แวกซ์ เทนนิน ส่วนที่ละลายน้ำได้ และน้ำ (Mohanty *et al.*, 2005) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ (Mohanty *et al.*, 2005)

Fiber	Cellulose (wt%)	Hemicelluloses (wt%)	Lignin (wt%)	Pectin (wt%)	Moisture Content (wt%)	Waxes (wt%)	Microfibrillar Angle (deg)
Flax	71	18.6–20.6	2.2	2.3	8–12	1.7	5–10
Hemp	70–74	17.9–22.4	3.7–5.7	0.9	6.2–12	0.8	2–6.2
Jute	61–71.5	13.6–20.4	12–13	0.2	12.5–13.7	0.5	8
Kenaf	45–57	21.5	8–13	3–5			
Ramie	68.6–76.2	13.1–16.7	0.6–0.7	1.9	7.5–17	0.3	7.5
Nettle	86				11–17		
Sisal	66–78	10–14	10–14	10	10–22	2	10–22
Henequen	77.6	4–8	13.1				
PALF	70–82		5–12.7		11.8		14
Banana	63–64	10	5		10–12		
Abaca	56–63		12–13	1	5–10		
Oil palm EFB	65		19				42
Oil palm mesocarp	60		11				46
Cotton	85–90	5.7		0–1	7.85–8.5	0.6	—
Coir	32–43	0.15–0.25	40–45	3–4	8		30–49
Cereal straw	38–45	15–31	12–20	8			

ประเทศไทยมีการนำพืชที่ให้เส้นใยธรรมชาติมาใช้งานหลายชนิด ได้แก่ ยูคาลิปตัส ฝ้าย ไหม ป่าน ปอ ฯลฯ และผลพลอยได้จากการเกษตร เช่น ฟางข้าวและซังข้าวโพด ของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ได้แก่ เส้นใยเปลือกผลปาล์ม ทะลายปาล์ม และอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ วัสดุดังกล่าวมีเซลลูโลสประมาณร้อยละ 40-90 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 10-30 และลิกนินร้อยละ 10-30 ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของพืช (Mohanty *et al.*, 2005) ข้อดีของเส้นใยธรรมชาติจากพืชได้แก่ สามารถผลิตขึ้นใหม่ได้

(Renewable resource) มีปริมาณมาก นำมาผลิตซ้ำ (Recycle) ได้โดยไม่สึกหรอหรือเสื่อมสภาพ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สมบัติบางประการของเส้นใยธรรมชาติ (Mohanty *et al.*, 2005) แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะเฉพาะบางประการของเส้นใยธรรมชาติเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ (Mohanty *et al.*, 2005)

Fiber	Density (g cm^{-3})	Diameter (μm)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
Flax	1.5	40–600	345–1500	27.6	2.7–3.2
Hemp	1.47	25–500	690	70	1.6
Jute	1.3–1.49	25–200	393–800	13–26.5	1.16–1.5
Kenaf			930	53	1.6
Ramie	1.55	—	400–938	61.4–128	1.2–3.8
Nettle			650	38	1.7
Sisal	1.45	50–200	468–700	9.4–22	3–7
Henequen					
PALF		20–80	413–1627	34.5–82.5	1.6
Abaca			430–760		
Oil palm EFB	0.7–1.55	150–500	248	3.2	25
Oil palm mesocarp			80	0.5	17
Cotton	1.5–1.6	12–38	287–800	5.5–12.6	7–8
Coir	1.15–1.46	100–460	131–220	4–6	15–40
E-glass	2.55	<17	3400	73	2.5
Kevlar	1.44		3000	60	2.5–3.7
Carbon	1.78	5–7	3400[a]–4800[b]	240[b]–425[a]	1.4–1.8

[a] Ultra high modulus carbon fibers.
[b] Ultra high tenacity carbon fibers.

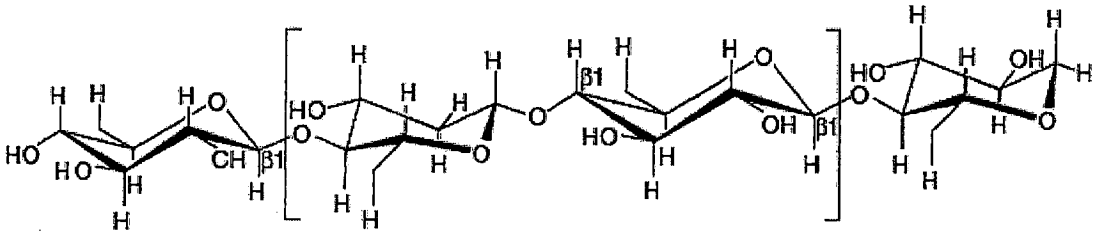
อย่างไรก็ดีเส้นใยธรรมชาติก็ยังมีข้อด้อย เช่น ไม่มีความสม่ำเสมอของเส้นใยและดูดความชื้นได้ดี ดังนั้นจึงต้องมีงานวิจัยเพื่อศึกษาการแยกและเตรียมเส้นใยเซลลูโลสจากพืชให้มีขนาดที่สม่ำเสมอและการปรับสภาพเส้นใยให้เหมาะสมต่อการใช้งานประเภทต่างๆ

2.2 องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ

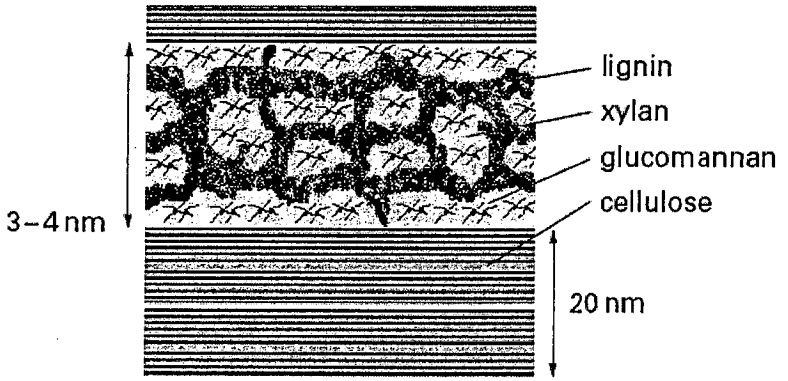
2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืช รวมถึงส่วนใบและลำต้น เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงของกลูโคสหรือคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่มีมวลโมเลกุลสูง ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 8,000-12,000 ยูนิต เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1,4-Glucosidic linkage (รูปที่ 2.1) และสายโซ่เหล่านี้จะยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซีของแต่ละสายโซ่จนมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนหรือเรียกว่า crystalline fibrillar micelles ซึ่งละลายน้ำได้น้อยและมีความแข็งแรง ทนต่อปฏิกิริยาเคมีของเอนไซม์และเบส แต่ละลาย

ได้กับกรดเข้มข้น เนื่องจากในโครงสร้างของเซลลูโลสมีช่องว่าง จึงทำให้เซลลูโลสจากพืชมักมีสิ่งเจือปนต่าง ๆ ได้แก่ แป้ง เพคติน เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน โดยเซลลูโลสที่อยู่รวมกันเป็นมัดหรือกลุ่มก้อนจะถูกล้อมรอบด้วยเฮมิเซลลูโลส และมีลิกนินห่อหุ้มอยู่ภายนอกอีกชั้น (รูปที่ 2.2) เส้นใยเซลลูโลสมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกที่เป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ ส่วนที่เรียงตัวเป็นระเบียบจะให้ความแข็งแรงแก่เส้นใย สำหรับเซลลูโลสส่วนที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบจะช่วยให้เกิดความยืดหยุ่นกับเส้นใย (Mohanty *et al.*, 2005)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลลูโลส (Mohanty *et al.*, 2005)



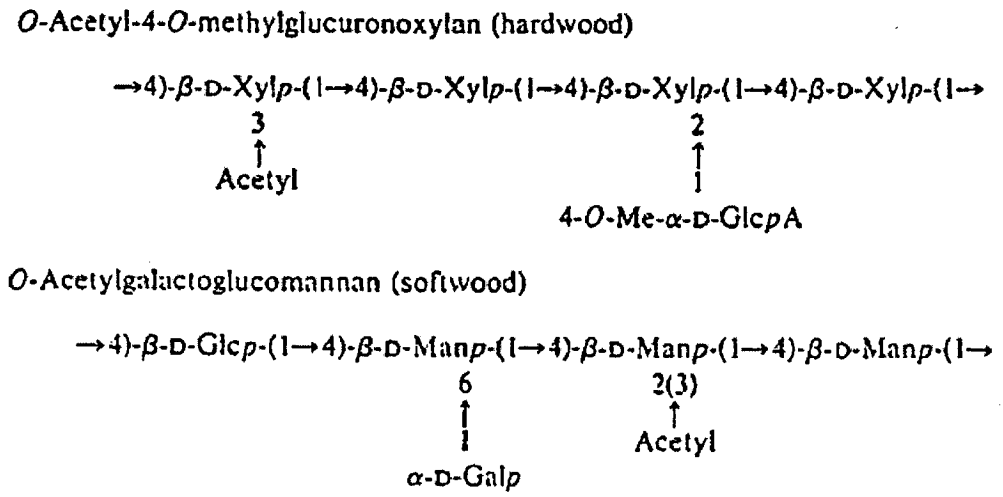
รูปที่ 2.2 ลิกโนเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช (Salmén, 2009)

เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ เบสหรือกรดอ่อน รวมถึงสารอินทรีย์ใดๆ แต่สามารถละลายได้ในกรดแก่หรือเบสแก่ เซลลูโลสที่เป็นผลึกส่วนใหญ่อยู่ในรูป cellulose I_α และ I_β ซึ่งมีการจัดเรียงระนาบของชั้นเซลลูโลสแตกต่างกัน ส่งผลให้การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แตกต่างกัน เมื่อ cellulose I_α ได้รับความร้อนจะเปลี่ยนเป็น cellulose I_β ซึ่งละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วเปลี่ยนเป็น cellulose II นอกจากนี้เซลลูโลสยังมีรูปผลึกอื่นๆ ได้แก่ cellulose III และ cellulose IV (Henriksson and Lennholm, 2009)

2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน (Matrix polysaccharides) ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด สายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสจะสั้นกว่าเซลลูโลส โดยเฮมิเซลลูโลสมีหน่วยกลูโคสประมาณ 40 ยูนิต สายโซ่หลักประกอบด้วยหน่วยย่อยของ β-1,4-linked D-xylopyranosyl และมีสายโซ่ข้าง (side chain) เป็น L-arabinose, D-Glucuronic acid, D-Galactose, D-Mannose และ D-Glucose

(Teleman, 2009) เฮมิเซลลูโลสในพืชแต่ละชนิดมีโครงสร้างและสมบัติต่างกัน เช่น กรณีไม้เนื้อแข็ง เฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่จะเป็น glucuronoxylan ขณะที่เฮมิเซลลูโลสในไม้เนื้ออ่อนส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็น glucomannan (Saka, 2001) ดังรูปที่ 2.3

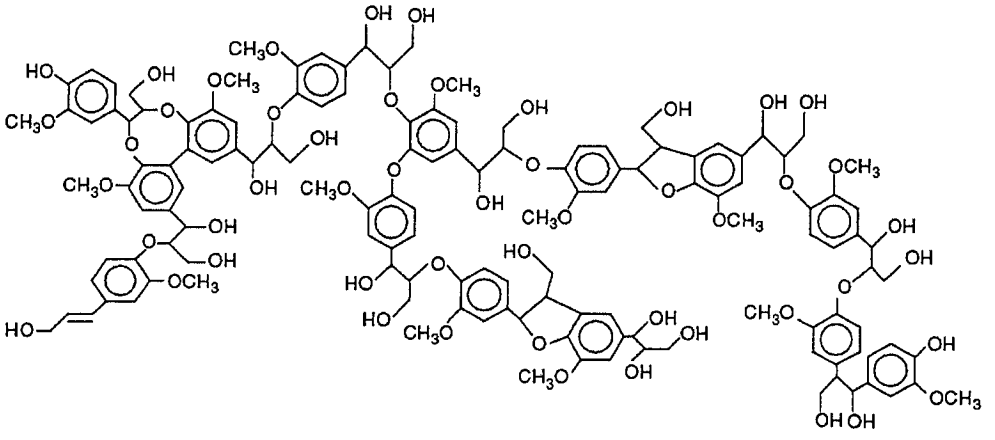


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Saka, 2001)

เฮมิเซลลูโลสไม่ละลายในน้ำร้อน แต่สามารถย่อยได้ด้วยสารละลายกรดเจือจาง และละลายได้ดีในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 17.5 แต่การที่เฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชยึดเหนี่ยวกับเซลลูโลสด้วยแรงระหว่างโมเลกุลชนิดพันธะไฮโดรเจนที่มีความแข็งแรง จึงอาจทำให้เฮมิเซลลูโลสหลงเหลืออยู่ภายหลังจากการกำจัดหรือปรับสภาพเส้นใยด้วยการใช้สารละลายเบส (Saka, 2001)

2.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินทำหน้าที่ป้องกันผนังเซลล์พืชไม่ให้เอนไซม์ย่อยสลายได้ง่าย ลิกนินไม่มีความเป็นผลึก มีองค์ประกอบหลักเป็นสารกลุ่มอะลิฟาติกและอะโรมาติก โดยมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ของ p-hydroxyphenylpropane ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ C-C และ C-O-C linkage ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของลิกนิน (Mohanty *et al.*, 2005)

การวิเคราะห์ปริมาณลิกนินทำได้โดยการเติมสารฟอกขาวเช่นคลอรีน ตามด้วยสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ จากนั้นละลายลิกนินด้วยโซเดียมคลอไรต์ ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษจะได้ลิกนินเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (By product) ซึ่งสามารถนำลิกนินไปใช้ประโยชน์มากมาย ส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิง กาวโคมอนอเมอร์ reformed composite polymers, interfacial agents สำหรับเส้นใยธรรมชาติ และในวัสดุเชิงประกอบอื่นๆ (Khalil *et al.*, 2011)

2.2.4 สารแทรกหรือองค์ประกอบอื่น ๆ

องค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ นอกเหนือจากลิกโนเซลลูโลสที่ต้องกำจัดออกเพื่อให้ได้เส้นใยเซลลูโลสที่บริสุทธิ์ (Batra, 2007) ได้แก่

(1) ไขมันและแวกซ์ มักพบที่บริเวณผิวหน้าของผนังเซลล์ สามารถกำจัดออกได้โดยการละลายด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เบนซีน

(2) ส่วนที่ละลายน้ำได้ ซึ่งกำจัดออกได้โดยการนำเส้นใยที่กำจัดแวกซ์ออกแล้วไปแช่ในน้ำร้อนหรือน้ำเดือด

(3) เพคติน เป็นสายโซ่สั้นๆ ของ polyuronides มีมวลโมเลกุล 35,000-100,000 เพคตินจะไม่ละลายน้ำถ้าอยู่ในรูปเกลือของแคลเซียม แมกนีเซียม หรือเหล็กของกรดเพคติก เพคตินจะละลายได้ดีเมื่อต้มในสารละลายแอมโมเนียมออกซาเลตหรือซิเตรต

(4) สารสี ได้แก่ chlorophyll, xanthophyll และ carotene ซึ่งอาจอยู่ในรูปสารเชิงซ้อนกับ tannin

2.3 ปาล์มน้ำมันและชีวมวลจากต้นปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Elaeis guineensis* Jacq. อยู่ในวงศ์ Palmae เป็นพืชตระกูลปาล์มลำต้นเดี่ยว มีถิ่นกำเนิดในทวีปแอฟริกา ผลปาล์มจะให้ผลผลิตเป็นน้ำมันที่บริโภคได้ (Edible oil) มากกว่าพืชน้ำมันทุกชนิด (ประมาณ 640-800 กิโลกรัมน้ำมันต่อพื้นที่ปลูก 1 ไร่) ปาล์มน้ำมันปลูกกันมากใน 42 ประเทศทั่วโลก โดยเฉพาะในประเทศอินโดนีเซียและมาเลเซีย ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชเศรษฐกิจของโลกเนื่องจากมีศักยภาพสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่นในด้านการผลิตและการตลาด นอกจากนี้ในส่วนของต้น ใบและผลยังมีศักยภาพสูงในการแยกเส้นใยเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอื่น สำหรับประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันมากทางภาคใต้ของประเทศซึ่งมีภูมิอากาศร้อนชื้นและพื้นที่ที่เหมาะสม (ธีระ, 2546)

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ไม่มีกิ่งก้านมีเพียงลำต้น (Trunk หรือ stipe) ซึ่งเป็นท่อน้ำเลี้ยงเดี่ยว (Single stem) และใบ (Leaf) ให้ผลผลิตเป็นผลปาล์มน้ำมันภายหลังการปลูกในระยะ 3-4 ปี และมีอายุยืนนานหลายสิบปี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นประมาณ 22-75 cm และสูงถึง 18-30 m อย่างไรก็ตามต้นปาล์มที่อายุเกินกว่า 25 ปี จะให้ผลผลิตน้อยลงจนไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ จำเป็นต้องกำจัดเพื่อปลูกต้นปาล์มใหม่ ต้นปาล์มที่ถูกกำจัดหรือโค่นทิ้งหากไม่ปล่อยให้สลายไปตามธรรมชาติซึ่งอาจก่อให้เกิดผลเสียทางสิ่งแวดล้อม จะถูกนำไปผลิตเป็นไม้อัด หรือทำปุ๋ย ลักษณะต้นปาล์มที่ถูกโค่นทิ้งแสดงดังรูปที่ 2.5 หากนำลำต้นปาล์มแห้งไปแยกเส้นใยออกจะได้เส้นใยประมาณร้อยละ 53.87 (เทียบกับน้ำหนักแห้ง) อีกร้อยละ 14.45 เป็นส่วนของเปลือก และอีกร้อยละ 31.68 เป็นส่วนของ parenchyma tissues (Beijing Forestry and Parks

Department of International Cooperation, 2012) ต้นปาล์มน้ำมันแห้งประกอบด้วย เซลลูโลส ร้อยละ 37.14 เฮมิเซลลูโลสในรูปของเพนโตแซนร้อยละ 30.59 ลิกนินร้อยละ 22.32 และสารแทรกอีกร้อยละ 8.07 (Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 2012)

รูปที่ 2.5 ลักษณะลำต้นปาล์มน้ำมันที่ถูกโค่น (Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 2012)

เส้นใยปาล์มมีความพรุนตัว ภาคตัดขวางของเส้นใยมีลักษณะเป็น lacuna-like และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีหลากหลายขนาดซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเส้นใย เส้นใยปาล์มมีสมบัติเหนียว (Ductile) มาก แต่ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) มีค่าต่ำกว่าพืชอื่นๆ (Mohanty *et al.*, 2005) จากสมบัติดังกล่าวจึงได้มีการนำเส้นใยปาล์มไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิเมอร์เชิงประกอบ

ชีวมวลจากต้นปาล์มน้ำมัน ได้แก่ ส่วนลำต้น ใบ และทะลายปาล์มเปล่า สามารถนำไปทำเป็นปุ๋ยได้ เนื่องจากมีคุณค่าทางอาหารคือมีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และแมกนีเซียม โดยทั่วไปชีวมวลจากปาล์มน้ำมันประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 65-80 และลิกนินประมาณ ร้อยละ 18-21 (ดังตารางที่ 2.3) ซึ่งปริมาณของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสดังกล่าวสามารถนำไปทำประโยชน์ได้เช่นเดียวกับพืชหรือไม้อื่นๆ ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ วัสดุเชิงประกอบ ผลิตภัณฑ์ของคาร์บอน และรวมถึงการแยกองค์ประกอบทางเคมี (Beijing Forestry and Parks Department of International Cooperation, 2012)

เส้นใยปาล์มจากชีวมวลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunches, EFB) ใบปาล์ม (Oil palm fronds, OPF) และต้นปาล์ม (Oil palm trunk, OPT) เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ เช่น ความยาว ความกว้าง และพื้นที่ผิว กับเส้นใยจากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งได้ดังตารางที่ 2.4 พบว่าเส้นใยจากต้นปาล์มน้ำมันมีความยาวและความกว้างมากกว่าเส้นใยจากส่วนอื่นของต้นปาล์มน้ำมัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะแยกเส้นใยเซลลูโลสจากส่วนลำต้นปาล์มน้ำมันให้ได้เป็นเส้นใยนาโนเซลลูโลสเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

ตารางที่ 2.3 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลปาล์มน้ำมัน (Beijing Forestry and Parks Department of International Cooperation, 2012)

Compositions	Biomass (%, dry weight)		
	Oil palm trunk	Oil palm fronds	Empty fruit bunch
Lignin	18.1	18.3	21.2
Hemicellulose	25.3	33.9	24.0
α-Cellulose	45.9	46.6	41.0
Holocellulose	76.3	80.5	65.5
Ash	1.1	2.5	3.5
Alcohol-benzene solubility	1.8	5.0	4.1

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยที่ได้จากชีวมวลปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับเส้นใยจากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง (Mohanty *et al.*, 2005)

Properties	EFB	OPF	Oil Palm Trunk	Hardwood	Softwood
Fiber length (mm)	0.67	1.03	1.37	0.83	2.39
Width of fiber (μm)	12.50	15.10	20.50	14.70	26.80
Width of lumen (μm)	7.90	8.20	17.60	10.70	19.80
Runkel ratio	0.59	0.84	0.26	0.37	0.35
Area of fiber (μm^2)	75.60	126.20	86.70	79.00	256.10

2.4 การปรับสภาพเพื่อแยกเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Pretreatment)

เส้นใยเซลลูโลสสามารถแยกจากชีวมวลได้ด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อแยกองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่ลิกโนเซลลูโลสออกไป เช่น เพคติน โปรตีน น้ำตาล แป้ง ไขมันและแวกซ์ แทนนิน รวมถึงแร่ธาตุต่างๆ (Calcium, potassium, magnesium, iron, sulfur, และ phosphorous) ขั้นตอนนี้เป็นการปรับสภาพเส้นใยเพื่อแยกเซลลูโลส ซึ่งมีทั้งการปรับสภาพเชิงเคมีและเชิงกล เพื่อแตกโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส รวมถึงลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส และเพิ่มความพรุนของลิกโนเซลลูโลส กรรมวิธีต่างๆ ที่ใช้ในการแยกเส้นใยเซลลูโลส มีดังนี้

2.4.1 การปรับสภาพทางกายภาพหรือเชิงกล (Physical or Mechanical pretreatment)

กระบวนการเชิงกลเป็นขั้นตอนแรกในการแยกเซลลูโลสจากพืชและชีวมวล เพื่อลดขนาดและแตกย่อยโครงสร้างเส้นใยทางกายภาพ วิธีการเชิงกล ได้แก่ การย่อย สับ บด หรือตัดให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงอยู่ในช่วงประมาณ 0.2-2 mm แต่จะไม่บดให้เส้นใยมีขนาดเล็กมากๆ เนื่องจากจะมีค่าใช้จ่ายที่สูง (Pandey *et al.*, 2011)

2.4.2 การปรับสภาพทางเคมี (Chemical pretreatment)

การแยกองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ออกจากเส้นใยพืชเพื่อให้ได้เส้นใยเซลลูโลสโดยการใช้สารเคมีที่เป็นกรด (Acid hydrolysis) หรือเบส (Alkaline hydrolysis) เพื่อเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน เพคติน และแวกซ์ (Kumar *et al.*, 2009) วิธีการปรับสภาพทางเคมี ได้แก่

(1) การไฮโดรไลซ์ด้วยกรด (Acid hydrolysis)

การปรับสภาพเส้นใยโดยการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดจะทำให้เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสแตกออกจากกัน กรดที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์เป็นกรดแก่ เช่น H_2SO_4 และ HCl แต่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้มากเช่นกัน จึงนิยมใช้กรดเจือจางร่วมกับการใช้ความร้อนในการไฮโดรไลซ์เส้นใย โดยทำให้พอลิแซคคาไรด์เช่น เฮมิเซลลูโลส เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้เป็นส่วนใหญ่ (Kumar *et al.*, 2009)

(2) การไฮโดรไลซ์ด้วยเบส (Alkaline hydrolysis)

การปรับสภาพเส้นใยโดยใช้สารละลายเบสอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันของพันธะเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลที่ยึดเหนี่ยวระหว่างไซเลนหรือเฮมิเซลลูโลสกับองค์ประกอบอื่น เช่น ลิกนินหรือกับเฮมิเซลลูโลสอื่น การไฮโดรไลซ์ด้วยเบสจะทำที่อุณหภูมิและความดันต่ำกว่าวิธีการอื่นๆ ถ้าใช้สารละลายเจือจางของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพเส้นใยจะทำให้เส้นใยเกิดการบวมพอง เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวภายใน ลดองศาการเกิดพอลิเมอร์ ลดความเป็นผลึก และแยกโครงสร้างที่เชื่อมต่อระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรตได้ รวมถึงการกำจัดลิกนิน เบสที่นิยมใช้ในการไฮโดรไลซ์เส้นใย ได้แก่ NaOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ เช่น ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และเบสอื่นๆ ได้แก่ $Ca(OH)_2$, KOH และ NH_4OH (Kumar *et al.*, 2009)

(3) การสลายด้วยโอโซน (Ozonolysis)

การใช้โอโซนมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณลิกนิน โดยไม่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นมลพิษ นอกจากนี้โอโซนสามารถที่จะสลายเฮมิโซลลูโลสได้รองลงมาจากลิกนินที่อยู่ในพืชหลายชนิด เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย เปลือกถั่ว ต้นสน และขี้เลื่อย (Kumar *et al.*, 2009)

2.4.3 การปรับสภาพทางกายภาพเชิงเคมี (Physicochemical pretreatment)

วิธีการนี้เป็นการแตกองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส เช่น ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสออกจากกัน รวมถึงการลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส โดยใช้วิธีการทางกายภาพร่วมกับวิธีการทางเคมี (Pandey *et al.*, 2011) ได้แก่

(1) การระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion)

วิธีการระเบิดด้วยไอน้ำเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการแยกลิกโนเซลลูโลส โดยการนำเส้นใยที่ผ่านการลดขนาดไปต้มในหม้อนึ่งไอน้ำความดันสูง ที่อุณหภูมิประมาณ 160-260°C ความดัน 0.69-4.83 MPa เป็นเวลาสั้นๆ ในระดับวินาทีไปจนถึงไม่กี่นาที จะทำให้โครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยแตกออก และสลายแรงยึดเหนี่ยวของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน การระเบิดด้วยไอน้ำอาจจะทำในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น กรดหรือเบส ปัจจัยสำคัญในการแตกลิกโนเซลลูโลสด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา ตัวเร่งปฏิกิริยา ระยะเวลาในการแช่เส้นใย (Presoaking) และความชื้นในเส้นใย มีการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับ

การระเบิดด้วยไอน้ำสำหรับการแยกเส้นใยจากชีวมวลต่างๆ เช่น สับปะรด (Cherian *et al.*, 2010) ชานอ้อย (Punsuvon *et al.*, 2008) เส้นใยกล้วย (Deepa *et al.*, 2011) และอื่นๆ

(2) การใช้น้ำร้อน (Liquid hot water)

วิธีการใช้น้ำร้อนเป็นวิธีที่ง่าย ได้ผลิตภัณฑ์พลอยได้น้อยและให้ร้อยละผลได้มาก ทำได้โดยการแช่เส้นใยในน้ำร้อนภายใต้ความดัน อุณหภูมิ 170-230°C ความดันมากกว่า 5 MPa ซึ่งจะทำให้น้ำอยู่ในสภาวะ subcritical pressurized water ในบางระบบอาจใช้ร่วมกับการไฮโดรไลซิสด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้วิธีการใช้น้ำร้อนจะทำให้สมบัติทางกายภาพบางประการของเส้นใยเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น dielectric strength และ ionic strength (Pandey *et al.*, 2011)

(3) การใช้คลื่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic pretreatment)

การปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเป็นอีกวิธีที่นำมาใช้ในการทำให้เกิดการแตกโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสในเส้นใยธรรมชาติ เป็นการเพิ่มความสามารถในการแยกเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน และทำให้ได้เส้นใยเซลลูโลสที่บริสุทธิ์ได้ในกระบวนการต่อไป อย่างไรก็ตาม คลื่นอัลตราโซนิคไม่ทำให้เส้นใยธรรมชาติเกิดการไฮโดรไลซ์ แต่ทำให้เกิดส่วนที่จะเกิดการไฮโดรไลซ์ได้ง่ายขึ้น โดยอนุภาคจะเกิดการชนกันหรือเสียดสีกับฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะผ่านคลื่นอัลตราโซนิคในของเหลวที่มีเส้นใย ทำให้เส้นใยมีขนาดลดลง พลังงานของคลื่นอัลตราโซนิคจะทำให้ผนังเซลล์พืชแตกออก และทำให้เส้นใยเล็ก ๆ ระเบิดหรือแตกออกมา จึงเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว และมีผลต่อความเป็นผลึกของเซลลูโลส การใช้คลื่นอัลตราโซนิคสามารถใช้ร่วมกับการไฮโดรไลซ์ด้วยสารเคมี เช่น กรดต่าง ๆ ได้ คลื่นอัลตราโซนิคที่นำมาใช้ในการปรับสภาพเส้นใยมีความถี่ตั้งแต่ 20 kHz ขึ้นไป ที่กำลังต่าง ๆ กัน (Yunus *et al.*, 2010)

2.4.4 การปรับสภาพด้วยวิธีการอื่นๆ

วิธีการอื่นๆ ที่นำมาใช้ในการปรับสภาพเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ วิธีการทางชีววิทยา (Biological pretreatment) เช่น การย่อยสลายด้วยการใช้จุลินทรีย์ชนิดต่างๆ การใช้เอนไซม์ เพื่อสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลส การใช้ตัวออกซิไดซ์ เช่น H_2O_2 ร่วมกับเอนไซม์ และการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ร่วมกับสารละลายกรดอนินทรีย์ (Organosolv process) (Kumar *et al.*, 2009)

2.5 การฟอกและการแยกเส้นใยนาโนเซลลูโลส (Bleaching and Isolation of nanocellulose)

เส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับสภาพเพื่อแตกโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสหรือกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่แล้ว จะนำไปฟอกขาวเพื่อกำจัดลิกนินที่เหลืออยู่ โดยใช้สารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ได้แก่ NaClO, $Na(ClO)_2$ และ H_2O_2 เส้นใยที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพและฟอกแล้วจะยังเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน จึงต้องนำเส้นใยไปผ่านกระบวนการแยกหรือแตกเส้นใยเซลลูโลสเพื่อให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กลง เช่น nanocellulose, cellulose whiskers หรือ cellulose microfibrils การแยกเส้นใยนาโนเซลลูโลสจึงเป็นการสลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้สารเคมี เช่น การไฮโดรไลซ์ด้วยกรด (Acid hydrolysis) (Johar *et al.*, 2012; Sheltami *et al.*, 2012) และการใช้คลื่นอัลตราโซนิค

(Ultrasosonic treatment) ความเข้มสูง (Chen *et al.*, 2011b; Mandal and Chakrabarty, 2011; Rosa *et al.*, 2012)

2.5.1 การฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สามารถฟอกขาวเส้นใยได้ทุกชนิดโดยไม่ทำให้เส้นใยเสียหาย ไม่ก่อให้เกิดสารพิษในระหว่างการฟอกและน้ำทิ้งมีความเป็นพิษต่ำ มีความเสถียรในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกเร่งให้สลายตัวได้ด้วยความร้อนหรือไอออนของโลหะหนักและด่าง (เกษม, 2537)

กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีดังนี้

$$H_2O_2(aq) \rightarrow H_2O(l) + O + X\ kcal \quad .....(2.1)$$

$$H_2O_2(aq) \rightleftharpoons H^+(aq) + HO_2^-(aq) \quad .....(2.2)$$

$$HO_2^-(aq) \rightarrow OH^-(aq) + O \quad .....(2.3)$$

$$NaHO_2(aq) \rightleftharpoons Na^+(aq) + HO_2^-(aq) \quad .....(2.4)$$

$$2H_2O_2(aq) \rightarrow 2H_2O(l) + O_2(g) \quad .....(2.5)$$

เมื่อ (2.1) = ปฏิกิริยาการสลายตัวตามปกติของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

(2.2) = ปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำ

(2.3) = ปฏิกิริยาปลดปล่อยสารฟอก ออกซิเจนอะตอมที่แอคทีฟในการฟอก

(2.4) = ปฏิกิริยาปลดปล่อยสารฟอกในสารละลายที่เป็นด่าง

(2.5) = ปฏิกิริยาการสลายตัวให้ออกซิเจนโมเลกุลที่ไม่แอคทีฟในการฟอก

2.5.2 การฟอกขาวด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์

โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) เป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงที่สุดเมื่อเทียบกับสารฟอกชนิดอื่น แต่มีราคาถูกและสลายตัวได้เอง โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งให้เกิดการออกซิไดซ์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ทำให้เส้นใยเปื่อยเร็วขึ้น กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ มีดังนี้ (เกษม, 2537)

$$NaOCl(s) + H_2O(l) \rightleftharpoons NaOH(aq) + HOCl(aq) \quad .....(2.6)$$

$$HOCl(aq) \rightarrow HCl(aq) + O \quad .....(2.7)$$

$$NaOCl(aq) + HCl(aq) \rightarrow NaCl(aq) + HOCl(aq) \quad .....(2.8)$$

$$HOCl(aq) + HCl(aq) \rightleftharpoons H_2O(l) + Cl_2(g) \quad .....(2.9)$$

เมื่อ (2.6) = ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ในน้ำ

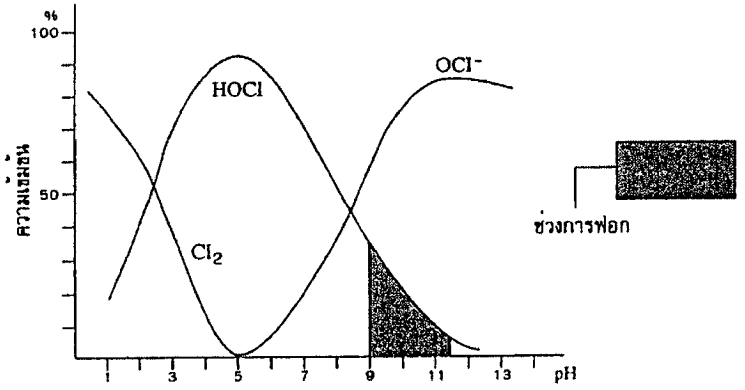
(2.7) = ปฏิกิริยาปลดปล่อยสารฟอก

(2.8) = ปฏิกิริยาการเกิด HOCl สูงสุด

(2.9) = ปฏิกิริยาการสลายตัวให้แก๊สคลอรีน

เมื่อเติมกรดลงในน้ำยาฟอกจะทำให้เกิดการฟอกอย่างรุนแรง การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้สมดุลปฏิกิริยา (2.6) เลื่อนมาทางซ้าย ทำให้ HOCl ลดลง น้ำยาฟอกจะมีความเสถียรมากขึ้น ทำให้การฟอกลดลง การเติมกรดลงไปจนค่า pH ของสารละลายต่ำกว่า 7 จะทำให้ HOCl ลดลง โดยจะเปลี่ยนรูปและเกิดการสลายตัว เกิดแก๊สคลอรีนซึ่งเป็นพิษ

การสลายตัวของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ที่ค่า pH ต่างๆ กัน สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.6 ช่วงค่า pH เหมาะสมในการฟอก คือ 9-11.5 ซึ่งจะปล่อยแอคทีฟออกซิเจนออกมาช้าๆ ทำให้เกิดการฟอกอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.6 การสลายตัวของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ที่ค่า pH ต่างๆ (เกษม, 2537)

2.5.3 การฟอกขาวด้วยโซเดียมคลอไรต์

โซเดียมคลอไรต์ ($NaClO_2$) เป็นสารฟอกที่ไม่ทำลายเส้นใยและมีความแรงในออกซิไดซ์ปานกลาง ถูกเร่งให้เกิดการสลายตัวได้โดยความร้อน ไขมัน น้ำมัน ยาง สารประกอบของกำมะถัน สารรีดิวซ์ กรด สารประกอบแอมโมเนียและไซยาไนด์

การฟอกด้วยโซเดียมคลอไรต์จะทำในสภาพที่เป็นกรด ซึ่งมีข้อเสียคือทำให้เกิดแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ที่เป็นพิษ เกิดการกัดกร่อนสูง และมีกลิ่นฉุน แต่มีข้อดีคือไม่มีปัญหาเรื่องไอออนของโลหะไปเร่งการฟอก กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของโซเดียมคลอไรต์ มีดังนี้

$$NaClO_2(s) + H_2O(l) \rightarrow NaOH(aq) + HClO_2(aq) \quad \text{.....(2.10)}$$

$$HClO_2(aq) \rightarrow HCl(aq) + 2O \quad \text{.....(2.11)}$$

$$NaClO_2(s) + HCl(aq) \rightarrow NaCl(aq) + HClO_2(aq) \quad \text{.....(2.12)}$$

$$5HClO_2(aq) \rightarrow 4ClO_2(aq) + HCl(aq) + 2H_2O \quad \text{.....(2.13)}$$

$$3HClO_2(aq) \rightarrow 2HClO_3(aq) + HCl(aq) \quad \text{.....(2.14)}$$

เมื่อ (2.10) = ปฏิกิริยาการแตกตัวของโซเดียมคลอไรต์ในน้ำ

(2.11) = ปฏิกิริยาปลดปล่อยสารฟอก ให้แอคทีฟออกซิเจน

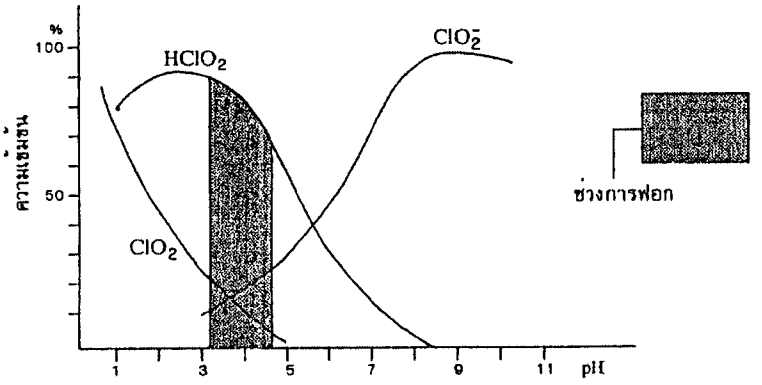
(2.12) = ปฏิกิริยาการแตกตัว เมื่อเติมกรดลงไป

เมื่อเติมกรดในน้ำยาฟอกจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นกรดคลอรัส ซึ่งจะแตกตัวตามปฏิกิริยา (2.11) ให้แอคทีฟออกซิเจน ทำให้ปฏิกิริยาของการฟอกสูงขึ้น หากเติมด่างในน้ำยาฟอกจะเกิดกรดคลอรัสน้อยลง แต่ยังสามารถฟอกได้ และจะไม่เกิดปฏิกิริยาการฟอกเมื่อค่า pH สูงกว่า 8.5

(2.13) และ (2.14) = ปฏิกิริยาการแตกตัว เมื่อเติมกรดมากเกินไป

ถ้าเติมกรดลงในน้ำยาฟอกมากเกินไปส่งผลให้การแตกตัวของกรดคลอรัสไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ที่เป็นแก๊สพิษ

การสลายตัวของโซเดียมคลอไรต์ ที่ค่า pH ต่างๆ กัน สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.7 ช่วงค่า pH เหมาะสมในการฟอก คือ 3.5-4.5 อุณหภูมิที่ใช้ควรสูงกว่า 85°C



รูปที่ 2.7 การสลายตัวของโซเดียมคลอไรต์ ที่ค่า pH ต่างๆ (เกษม, 2537)

2.5.4 การฟอกขาวด้วยแคลเซียมไฮโปคลอไรต์

แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Calcium hypochlorite, $Ca(OCl)_2$) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าคลอไรด์ของปูน (Chloride of lime) ปูนคลอรีน (Chlorinated lime) หรือผงฟอกจาง (Bleaching powder) เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคลอรีนกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปฏิกิริยา 2.15) จากนั้นนำไประเหยในสุญญากาศให้แห้ง จะได้ผงฟอกจาง (เกษม, 2537)

$$Ca(OH)_2(aq) + Cl_2(g) \rightarrow Ca(OCl)_2(s) + H_2O(l) \quad .....(2.15)$$

แคลเซียมไฮโปคลอไรต์เป็นผงสีขาว มีกลิ่นคลอรีน ละลายน้ำจะได้สารละลายขุ่นเมื่อแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดเจือจางจะได้แก๊สคลอรีนเรียกว่า Available chlorine แคลเซียมไฮโปคลอไรต์จะคงตัวในสภาวะที่เป็นด่าง เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจะสลายตัวได้ง่าย เนื่องจากทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วได้แคลเซียมคาร์บอเนตตกตะกอนออกมา เมื่อแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ละลายน้ำจะได้กรดไฮโปคลอรัส (HClO) ซึ่งสามารถสลายตัวต่อไปได้แอคทีฟออกซิเจน (O) และสุดท้ายได้แก๊สคลอรีน ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$2Ca(OCl)_2(s) + CO_2(g) + H_2O(l) \rightarrow CaCO_3(s) + CaCl_2(s) + 2HClO(aq) \quad .....(2.16)$$

$$HClO(aq) \rightarrow HCl(aq) + O \quad .....(2.17)$$

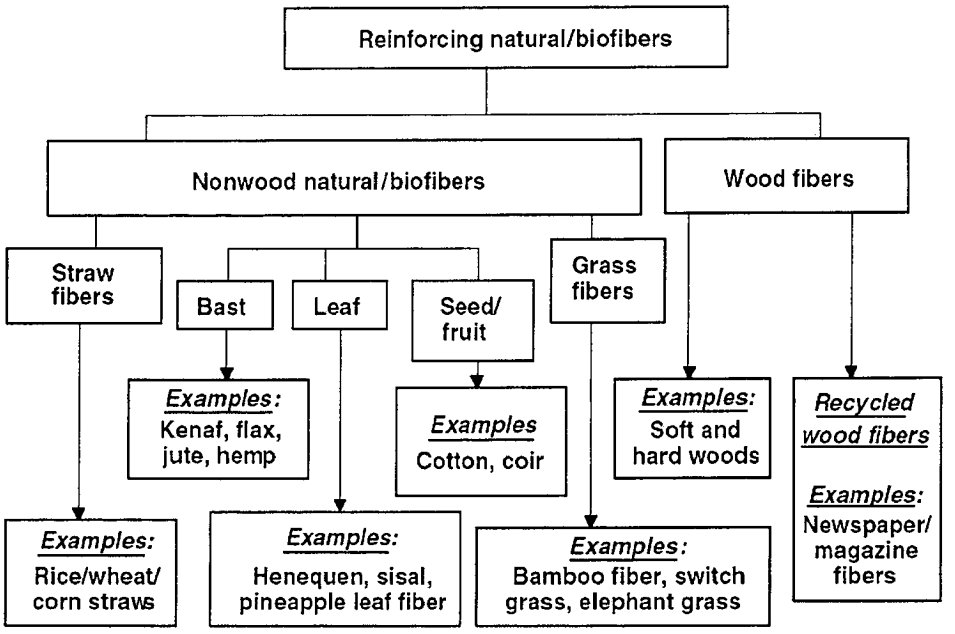
$$2HCl(aq) + O \rightarrow H_2O(l) + Cl_2(g) \quad .....(2.18)$$

ออกไซด์ของโลหะต่างๆ จะเป็นตัวเร่งให้แคลเซียมไฮโปคลอไรต์สลายตัวเร็วขึ้น ดังนั้นการฟอกขาวจึงไม่ควรใช้ภาชนะที่เป็นโลหะ

ในการฟอกขาวจะใช้แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ในการฟอกขาวเส้นใยเซลลูโลสเหมือนโซเดียมไฮโปคลอไรต์ แต่จะไม่นิยมใช้ฟอกเส้นใยไหมหรือขนสัตว์เพราะจะทำลายเส้นใย สภาวะการฟอกขาวโดยทั่วไปคืออุณหภูมิห้องและในระบบที่เป็นด่าง หลังการฟอกจะมีคลอรีนตกค้างอยู่บนเส้นใย ในขณะฟอกต้องควบคุมสภาวะการฟอกให้เหมาะสม เพราะแคลเซียมไฮโปคลอไรต์เปลี่ยนโครงสร้างของเซลลูโลสเป็นออกซิเซลลูโลสได้เช่นกัน การเตรียมสารละลายฟอกขาวทำได้โดยนำผงแคลเซียมไฮโปคลอไรต์มาบดให้ละเอียดเติมน้ำลงไปกวนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน รินเฉพาะน้ำใสๆ มาใช้ในการฟอก และสามารถเติมน้ำลงไปกวนให้เข้ากัน แล้วนำส่วนที่ใสมาใช้ต่อได้อีก

2.6 การใช้ประโยชน์จากเส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ

ปัจจุบันมีการนำเส้นใยจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์มากขึ้น เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ สามารถหาได้ง่าย และช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุต่างๆ ได้แก่ พาร์ติเคิลบอร์ด (Particleboard) ไฟเบอร์บอร์ด (Fiberboard) การใช้เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement materials) ในพอลิเมอร์เชิงประกอบ (Cheng *et al.*, 2009) หรือ Biocomposites เพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และการก่อสร้าง การผสมในวัสดุเชิงประกอบชนิดเทอร์มอแซต เทอร์มอพลาสติก และวัสดุเชิงประกอบของยาง วัสดุเชิงประกอบเหล่านี้จัดเป็นวัสดุเชิงประกอบสะอาด (Green composites) และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Khalil *et al.*, 2012; Mohanty *et al.*, 2005) ตัวอย่างเส้นใยจากพืชชนิดต่างๆ ที่มีการนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เส้นใยธรรมชาติที่มีการนำไปใช้ในวัสดุเสริมแรง (Mohanty *et al.*, 2005)

ประเทศมาเลเซียมีการนำเส้นใยส่วนต่างๆ จากปาล์มน้ำมันไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ที่กล่าวมาเป็นอย่างมาก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเส้นใยเซลลูโลสจากปาล์มน้ำมันไปใช้ในวัสดุเชิงประกอบเทอร์มอพลาสติก ได้แก่ high-density polyethylene (HDPE) composites filled with OPF and EFB, polystyrene (PS), polyvinylchloride (PVC), and PP filled with EFB เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะด้านการเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ (Mohanty *et al.*, 2005) นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยที่นำเส้นในนาโนเซลลูโลสจากพืชไปใช้ทำกระดาษทนไฟโดยการผสมกับสารอนินทรีย์เช่น มอนต์โมริลโลไนต์ เพื่อใช้ทดแทนวัสดุจากปิโตรเลียมในอุตสาหกรรมยานยนต์ (Liu *et al.*, 2011; Liu and Berglund, 2012; 2013) นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยที่นำเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากพืชไปใช้ทำกระดาษนาโนคอมโพสิตที่มีสมบัติทนไฟโดยผสมกับสารอนินทรีย์ เช่น มอนต์โมริลโลไนต์ ไคโตซาน และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพื่อใช้ทดแทนวัสดุจากปิโตรเลียมในอุตสาหกรรมยานยนต์ (Liu *et al.*, 2011; Liu and Berglund, 2012; 2013)