รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

การผลิตและทดสอบสมบัติของกระดาษจากสาหร่ายน้ำจืดสีเขียว

A production and testing of paper from freshwater green algae

โดย

อรุณี คงดี อัลเดรด

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

2558

รหัสโครงการวิจัย มจ.1-57-020

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย การผลิตและทดสอบสมบัติกระดาษจากสาหร่ายน้ำจืดสีเขียว สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากการสนับสนุนงบประมาณจากมหาวิทยาลัยแม่โจ้ (งบอุดหนุน) ประจำปี 2557 ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยแม่โจ้ เป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณทิพย์สุดา ปุกมณี และคุณรังสิมา อัมพวัน สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สาหร่ายและเยื่อเซลลูโลส นายทินกร มีคม นางสาวกาญจน์กมล สินปักษา และนางสาวจิราพร เกตุวราภรณ์ ในการช่วยเตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์สมบัติของสาหร่ายและเยื่อเซลลูโลส

บทคัดย่อ

สาหร่ายน้ำจืดสีเขียวพบได้มากในแหล่งน้ำในประเทศไทย สามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วจากสภาพภูมิอากาศที่อำนวย เนื่องจากเส้นใยสาหร่ายเป็นเซลลูโลส ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการนำเส้นใยสาหร่ายมาใช้ประโยชน์โดยการกำจัดเมือก กำจัดคลอโรฟิลล์ ฟอกขาว และขึ้นรูปกระดาษเป็นแผ่น จากนั้นได้ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแผ่นเซลลูโลสในการใช้เป็นกระดาษ จากการทดลองพบว่า การใช้กรดซัลฟุริก เข้มข้น 0.5% สามารถกำจัดเมือกได้ดีกว่าการต้มในน้ำร้อน การใช้เอทิล แอลกอฮอล์ สามารถกำจัดคลอโรฟิลล์ได้ดีกว่าการใช้อะซีโตน และการฟอกขาวด้วยโซเดียมคลอไรท์ตามด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ จะได้เยื่อเซลลูโลสขาวกว่าการใช้โซเดียมคลอไรท์ หรือไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว แผ่นเซลลูโลสหลังขึ้นรูปสามารถอุ้มน้ำได้สูงมาก อย่างไรก็ตามแผ่นเซลลูโลสมีลักษณะเปราะ แม้จะได้เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น คือ พอลิเอทิลีนไกลคอลแล้วก็ตาม จึงสามารถสรุปได้ว่า มีความเป็นไปได้ที่จะไม่สามารถนำแผ่นเซลลูโลสจากสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวไปประยุกต์ใช้กระดาษ หรือบรรจุภัณฑ์ แต่น่าจะสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ เช่น วัสดุรักษาบาดแผล เนื่องจากมีความเหนียวเมื่อเปียกน้ำ และดูดซับน้ำได้ดีมาก ซึ่งน่าจะดูดซับเลือด น้ำหนอง หรือน้ำเหลืองได้ดี

Abstract

Fresh water green algae is abundant in water resource in Thailand, it grows rapidly due to the suitable climate. Algae fiber is cellulose, application of algae fiber in paper making is of interest. Using removals of mucous, chlorophyll, bleaching and making paper sheet flowed by physical testing study the feasibility of paper making from green fresh water algae. The results showed 0.5% sulfuric acid was better than hot water to remove mucous, ethyl alcohol was better than acetone to remove chlorophyll and bleaching with sodium chlorite followed by hydrogen peroxide gave whiter fiber than sodium chlorite or hydrogen peroxide alone. Cellulose sheet from Fresh water green algae was able to large amount of absorb water. However, it found that the cellulose was brittle, even though a plasticizer e.g. polyethylene glycol was added. It can conclude that it is not possible to make paper or packaging from cellulose sheet of fresh water green algae, but the cellulose sheet could be applied as medical materials such as wound healing due to high tenacity at wet state and very high water absorption, it possibly highly adsorbs blood, pus and lymph.

สารบัญเรื่อง

			หน้า
บทที่ 1		**บทนำ**	1
	1.1	ที่มาและความสำคัญ	1
	1.2	สาหร่าย	2
		1.2.1 ประวัติการศึกษาสาหร่าย	2
		1.2.2 การจัดหมวดหมู่ของสาหร่าย	5
		1.2.3 หลักเกณฑ์ในการจัดสาหร่ายออกเป็นหมวดหมู่	8
		1.2.4 สาหร่ายน้ำจืด (เตา)	10
	1.3	สมบัติของเส้นใย และการจำแนกประเภท	12
		1.3.1 จำแนกตามความยาว	12
		1.3.2 จำแนกตามแหล่งที่มา	13
	1.4	เส้นใยเซลลูโลส	14
	1.5	การฟอกขาวเส้นใย	14
	1.6	สารเพิ่มความยืดหยุ่น	22
บทที่ 2		**วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง**	25
	2.1	วัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและวิธีการทดลอง	25
	2.2	การเตรียมสารละลาย	26
	2.3	การกำจัดเมือกเพื่อเตรียมเยื่อสาหร่าย	27
	2.4	การกำจัดคลอโรฟิลล์	27
	2.5	การฟอกขาวสาหร่ายน้ำจืด	27
	2.6	วิธีการเตรียมแผ่นเซลลูโลส	28
	2.7	การเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น	30
	2.8	การวิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสาหร่ายและเยื่อเซลลูโลสจากสาหร่าย	30
		2.8.1 การวิเคราะห์ลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	30
		2.8.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	30
	2.9	การทดสอบสมบัติของแผ่นเซลลูโลส	31
		2.9.1 การทดสอบความหนาด้วยไมโครมิเตอร์	31
		2.9.2 การวัดความขาวด้วยคัลเลอริมิเตอร์	31

		หน้า
	2.9.3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	32
	2.9.4 การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ	34
บทที่ 3	**ผลการทดลองและวิจารณ์**	35
	3.1 ลักษณะของสาหร่ายน้ำจืดภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	35
	3.2 การกำจัดเมือกของสาหร่ายน้ำจืด	37
	3.3 การกำจัดคลอโรฟิลล์ของสาหร่ายน้ำจืด	38
	3.4 การฟอกขาวสาหร่ายน้ำจืด	39
	3.5 ความหนาของแผ่นเซลลูโลส	45
	3.6 ลักษณะของแผ่นเซลลูโลส	46
	3.7 ค่าดรรชนีความขาวของแผ่นเซลลูโลส	50
	3.8 การเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น	54
	3.9 การหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ	58
บทที่ 4	**สรุปผลการทดลอง**	60
	เอกสารอ้างอิง	62

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1.1	สารฟอกขาวเส้นใยสิ่งทอ	16
ตารางที่ 1.2	ข้อดีและข้อเสียของการฟอกขาวด้วยสารฟอกขาวชนิดต่างๆ	21
ตารางที่ 2.1	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	25
ตารางที่ 2.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	26
ตารางที่ 3.1	การกำจัดเมือกของสาหร่ายน้ำจืด	38
ตารางที่ 3.2	การกำจัดคลอโรฟิลล์ของสาหร่ายน้ำจืด	39
ตารางที่ 3.3	การฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ของสาหร่ายน้ำจืด	40
ตารางที่ 3.4	การฟอกขาวด้วยโซเดียมคลอไรท์ของสาหร่ายน้ำจืด	42
ตารางที่ 3.5	ร้อยละผลผลิตของเยื่อเซลลูโลสที่ได้	44
ตารางที่ 3.6	ความหนาของแผ่นเซลลูโลส	46
ตารางที่ 3.7	ค่าดรรชนีความขาวของแผ่นเซลลูโลส	53
ตารางที่ 3.8	การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นเซลลูโลส	55
ตารางที่ 3.9	การหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำของแผ่นเซลลูโลส	58

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	สาหร่ายเตา *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kutzing	11
รูปที่ 1.2	การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศของสไปโรไจราแบบสคาลาริฟอร์มคอนจูเกชัน (scalariform conjugation)	12
รูปที่ 1.3	การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศของสไปโรไจราแบบแลทเทอรัลคอนจูเกชั่น (lateral conjugation)	12
รูปที่ 1.4	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	14
รูปที่ 1.5	โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	14
รูปที่ 1.6	ปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์	17
รูปที่ 1.7	ปฏิกิริยาการฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในภาวะที่มีสารกลุ่มเพอร์แอซิด	17
รูปที่ 1.8	ปฏิกิริยาการสลายตัวของโซเดียมคลอไรท์	18
รูปที่ 1.9	โครงสร้างของออกซีเซลลูโลสที่มีหมู่ (ก) อัลดีไฮด์ (ข) คาร์บอกซิลิก (ค) (ง) (จ) คีโตน (ฉ) ไดอัลดีไฮด์ (ช) ไดแอซิด ที่ได้จากการออกซิเดชันของเซลลูโลสในสารฟอกขาวกลุ่มออกซิแดนท์	20
รูปที่ 1.10	โครงสร้างของ พอลิ(เอทิลีน ไกลคอล)	24
รูปที่ 3.1	ผนังกั้นระหว่างเซลล์ (ก) สาหร่ายสไปโรไจราที่มีลักษณะเป็นปลอกรอบรอยต่อระหว่างเซลล์ และ(ข) สาหร่ายเตา *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing เป็นเกลียวของคลอโรพลาสต์	36
รูปที่ 3.2	รูปของสาหร่ายน้ำจืดภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 40 เท่า (ก) และกำลังขยาย 1000 เท่า (ข)	37
รูปที่ 3.3	ร้อยละผลผลิตของแผ่นเซลลูโลส	45
รูปที่ 3.4	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของแผ่นเซลลูโลสที่เตรียมด้วยวิธีที่ (ก) 1.สาหร่ายน้ำจืด (ข) 2. H_2SO_4-EtOH (ค) 3. H_2SO_4-$NaOCl_2$ (ง) 4. H_2SO_4-EtOH-$NaOCl_2$ และ(จ) 5. H_2SO_4-EtOH-$NaOCl_2$-H_2O_2 (กำลังขยาย 100 เท่า)	47
รูปที่ 3.5	รูปของแผ่นเซลลูโลสที่เตรียมด้วยวิธีที่ (ก) 1.สาหร่ายน้ำจืด (ข) 2. H_2SO_4-EtOH (ค) 3. H_2SO_4-$NaOCl_2$ (ง) 4. H_2SO_4-EtOH-$NaOCl_2$ และ(จ) 5. H_2SO_4-EtOH-$NaOCl_2$-H_2O_2 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	47

หน้า

รูปที่ 3.6	อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) เส้นใยฝ้าย (ข) เยื่อเซลลูโลสจากสาหร่าย	49
รูปที่ 3.7	ค่าดรรชนีความขาวของแผ่นเซลลูโลส	52
รูปที่ 3.8	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นเซลลูโลส 1.5 กรัม ผสมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)	57
รูปที่ 3.9	การยืดณ จุดขาดของแผ่นเซลลูโลส 1.5 กรัม ผสมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก เซลลูโลสได้จากผนังเซลล์พืช และจุลินทรีย์บางชนิด โครงสร้างทางเคมีเป็นพอลิแซคคาไรด์ประกอบด้วยหน่วยกลูโคสต่อกันเป็นสายโซ่ยาว มนุษย์ได้นำเอาเซลลูโลสมาใช้ประโยชน์มากมาย ตั้งแต่เป็น วัสดุสิ่งของเครื่องใช้ เครื่องนุ่งห่ม วัสดุสำนักงาน วัสดุทางการแพทย์ แม้แต่ส่วนประกอบของอาหาร และเครื่องสำอาง หรือพลังงานไบโอดีเซลล์

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและทดสอบสมบัติของแผ่นเซลลูโลสจากสาหร่ายน้ำจืดเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาที่จะนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ประโยชน์ได้ต่อไป เช่น กระดาษ กระดาษซับมัน พลาสติกที่ย่อยสลายในธรรมชาติแปรรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ หรืออาจนำไปทำวัสดุทางการแพทย์ เช่น วัสดุรักษาบาดแผล สาหร่ายน้ำจืดถูกเลือกมาศึกษาในงานวิจัยนี้เนื่องจากเป็นพืชน้ำที่เจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว เลี้ยงง่าย มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว บางครั้งสาหร่ายน้ำจืดมีปริมาณมากจนถูกมองว่าเป็นวัชพืช ในปัจจุบันมีการเลี้ยงสาหร่ายน้ำจืด เช่น ที่บ่อเลี้ยงสาหร่ายอำเภอนาคูหา จังหวัดแพร่ ชาวบ้านจะนำมาทำเป็นอาหารจำพวก ยำ ห่อนึ่ง ชุบแป้งทอด โดยสาหร่ายน้ำจืดมีประโยชน์ทางโภชนาการที่ประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และที่เราสนใจนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้คือเส้นใยของสาหร่ายน้ำจืดนั่นเอง ซึ่งคาดว่าสามารถนำไปทดแทนเส้นใยที่ใช้ผลิตกระดาษและบรรจุภัณฑ์ต่างๆ และเพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนา

วัสดุสำหรับการใช้งานเพื่อสิ่งแวดล้อมทั้งในด้านวัตถุดิบ ลดต้นทุนในการผลิต และลดปัญหาขยะ (เพิ่มศักดิ์ มกราภิรมย์, 2551)

1.2 สาหร่าย

สาหร่ายในที่นี้หมายถึง สิ่งมีชีวิตชั้นต่ำ ตรงกับคำว่า algae ในภาษาอังกฤษ และ phykos ในภาษากรีก เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมาก จนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (microscopic algae : microalgae) ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์มีราก ลำต้น ใบ เรียกว่า ทัลลัส (thallus) ส่วนใหญ่จะมีคลอโรฟิลล์ช่วยในการสังเคราะห์แสง วิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับสาหร่ายมี 2 คำ คือ algology (algae + logy) และ phycology (phykos + logy) ซึ่งมาจากคำว่า phykos หมายถึงสาหร่ายทะเลเท่านั้น แต่มีความหมายถึงการศึกษาสาหร่ายทั้งในน้ำจืดและทะเลเช่นเดียวกับคำว่า algology (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2546)

1.2.1 ประวัติการศึกษาสาหร่าย

จากการศึกษาตารางทางธรณีวิทยา (geological time table) พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเป็นสิ่งมีชีวิตพวกแรกที่อุบัติขึ้นบนโลก นับตั้งแต่มหายุคพรีแคมเบรียน ซึ่งเป็นระยะเวลามากกว่า 6,000 ล้านปี ส่วนสาหร่ายสีเขียวพบในยุคแคมเบรียนเป็นระยะเวลา 600 ล้านปีมาแล้ว และพบว่าสาหร่ายสีเขียวนั้นวิวัฒนาการไปเป็นพืชบก (land plants) ในยุคซิลูเรียนประมาณ 440 ล้านปีที่ผ่านมาจากนั้นวิวัฒนาการของสาหร่ายก็เกิดขึ้นอย่างมากมายทั้งสาหร่ายสีแดง สาหร่ายสีน้ำตาล สาหร่ายสีทอง และสาหร่ายชนิดอื่นๆ ในเวลาต่อมา จึงนับได้ว่าสาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้นก่อนพวกไบรโอไฟต์ (Bryophytes) เฟิร์น (Pteridophytes) สนและปรง (Gymnosperms) และพืชมีดอก (Angiosperms)

งานทางด้านวิชาการของสาหร่ายเริ่มจากประเทศในทวีปยุโรปก่อนปี ค.ศ. 1800 จุดเริ่มต้นที่สำคัญมากคือ การตั้งชื่อวิทยาศาสตร์ของสาหร่ายกลุ่มหนึ่งโดย Carl Linnaeus ส่วน Samuel Gottlieb Gmelin ได้คิดวิธีเก็บตัวอย่างสาหร่ายโดยการอัดแห้ง และได้เขียนหนังสือเกี่ยวกับพืชทะเล ซึ่งรวมทั้งสาหร่ายทะเลด้วย ชื่อว่า *Historium Fucorum*

Jean Vincent Felix Lamourous แห่งประเทศฝรั่งเศสมีผลงานพิมพ์ในปี ค.ศ. 1805–1816 ศึกษาสาหร่ายทะเลและจำแนกออกเป็นหมวดหมู่โดยใช้การสืบพันธุ์และลักษณะโครงสร้างของทัลลัสเป็นหลักแบ่งสาหร่ายออกเป็น สีเขียว สีน้ำตาล และสีแดง โดยใช้สีเป็นหลัก ทำให้ความรู้ทางสาหร่ายกว้างขวางมากขึ้น

Carl Adolf Agardh และบุตรชาย Jacob George Agardh ชาวสวีเดนในต้นศตวรรษที่ 19 ได้เก็บรวบรวมสาหร่ายในประเทศสวีเดน และต่อมาได้เก็บรวบรวมสาหร่ายในแถบต่างๆทั่วโลก ผลงานมีมากจนทำให้สวีเดนเป็นศูนย์รวมของสาหร่ายแห่งแรกที่มีชื่อเสียง ทั้งคู่ได้เขียนหนังสือเกี่ยวกับสาหร่ายไว้มาก ส่วนใหญ่เป็นภาษาลาตินจึงไม่เป็นที่แพร่หลายเท่าที่ควร ผลงานของบุตรชายมีมาจนถึงศตวรรษที่ 20

ปลายศตวรรษที่ 19 งานทางด้านสาหร่ายส่วนใหญ่ยังเป็นงานอนุกรมวิธานโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวยุโรปได้แก่ Geovani Battista de Toni ได้ศึกษาสาหร่ายจากทั่วโลกแล้วเขียนไว้ในหนังสือชื่อ Sylloge Aharum โดยเริ่มงานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1889 และใช้เวลาถึง 35 ปีจึงเขียนจบนับว่าเป็นเอกสารอ้างอิงที่มีค่าอย่างยิ่งสำหรับอนุกรมวิธาน และยังคงใช้กันมาจนถึงปัจจุบัน

ในศตวรรษที่ 20 ได้มีการศึกษาสาหร่ายกันกว้างมากขึ้น เฉพาะในประเทศยุโรปเท่านั้น แต่ยังได้ไปศึกษายังแหล่งต่างๆ ทั่วโลก เช่น อเมริกาเหนือ หมู่เกาะอินเดียตะวันตก เปรู มหาสมุทรอินเดีย ญี่ปุ่น และทวีปแอนตาร์กติก

สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการศึกษาสาหร่ายทะเลเมื่อกลางศตวรรษที่ 19 และต่อมาถึงปลายศตวรรษที่ 19 William Gibbs Farlow แห่งมหาวิทยาลัยฮาร์วาร์ด เป็นผู้บุกเบิกงานด้านสาหร่าย Farlow Herbarium and library ขึ้น มหาวิทยาลัยฮาร์วาร์ดจึงเป็นแหล่งรวบรวมสาหร่ายที่มีชื่อเสียงมากแห่งหนึ่งของโลก ต่อมามีผู้ศึกษาสาหร่ายอีกเป็นจำนวนมากที่ศึกษาสาหร่ายตามแหล่งต่างๆ ของอเมริกาและได้เขียนตำราทางสาหร่าย ซึ่งมีชื่อเสียงกันเช่น William Randolph Taylor, George Hollenberg, Gilbert Morgan Smith, Felix E. Fritsch, Maxwell Doty, Gerald W. Prescott, Elmer Yale Dawson, Geroge F. Papenfuss, H. C. Bold และM. J. Wyme เป็นต้น

ช่วงกลางศตวรรษที่ 20 จนถึงปัจจุบัน มีนักวิทยาศาสตร์ศึกษาสาหร่ายกันมากขึ้นเกือบทั่วโลกระยะหลังนี้ไม่ได้มีการศึกษาแต่เพียงทางด้านอนุกรมวิธานเท่านั้น แต่ยังครอบคลุมทั้งโครงสร้างภายในเซลล์สาหร่าย ซึ่งต้องศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเลคตรอน นิเวศวิทยา โภชนาการ สรีรวิทยา ชีววิทยา ชีวเคมี การเพาะเลี้ยงทั้งสาหร่ายน้ำจืดและสาหร่ายทะเล ศึกษาผลผลิตจากสาหร่ายที่จะนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์และอาหารของมนุษย์ ซึ่งเป็นที่คาดหมายได้ว่าสิ่งมีชีวิตเล็กๆชนิดนี้จะมีคุณค่าต่อมนุษยชาติกว้างขวางขึ้นในอนาคตอย่างแน่นอน

1.2.2 การจัดหมวดหมู่ของสาหร่าย

ก่อนที่จะศึกษาการจัดหมวดหมู่ของสาหร่าย เราควรทราบว่าสาหร่ายถูกจัดไว้ที่ตำแหน่งใดในอาณาจักรสิ่งมีชีวิตเสียก่อน จากความเป็นมาของสาหร่ายทำให้เราทราบว่านักวิทยาศาสตร์หลายคนศึกษาสาหร่ายและแต่ละคนก็มีวิธีจำแนกสาหร่ายไม่เหมือนกัน ดังนั้นตำแหน่งของสาหร่ายในอาณาจักรสิ่งมีชีวิตจึงแตกต่างกันดังนี้

เริ่มจากปี ค.ศ. 1754 Carl Linnaeus ได้จัดสาหร่ายไว้ใน Class Cryptogamia Order Algae แล้วเขาเป็นบุคคลผู้ตั้งชื่อพืชชั้นต่ำชนิดที่เรากำลังกล่าวถึงอยู่นี้ว่า algae

ปี ค.ศ. 1978 Antonie de Jussieu ได้จำแนกพืชออกเป็น 3 Subdivision คือ Acotyledon, Monocotyledon และ Dicotyledon และจัดสาหร่ายไว้ใน Subdivision Acotyledon ซึ่งหมายถึงไม่มีใบเลี้ยง

ปี ค.ศ. 1838 F. J. A. N Unger ได้รวมสาหร่าย ไลเคน (lichen) และเห็ดรา (fungi) เข้าด้วยกันใน Division Thallophyta ซึ่งหมายถึงพืชที่ไม่มีส่วนของลำต้น ใบ อย่างชัดเจน ส่วนที่เห็นคล้ายใบและลำต้นรวมเรียกว่า Thallus และไซโกท (Zygote) ยังไม่มีการพัฒนาเป็นเอมบริโอ (embryo) ซึ่งเป็นการจัดที่คล้ายคลึงกับ August Wilhelm Eichler ใน ค.ศ. 1883

ตามระบบของ Copeland ได้จำแนกสิ่งมีชีวิตออกเป็น 4 อาณาจักร คือ อาณาจักรโมเนอรา (Kingdom Monera) อาณาจักรโปรติสตา (Kingdom Protista) อาณาจักรเมตาไฟตา (Kingdom Metaphyta) และอาณาจักรเมตาซัว (Kingdom Metazao) สาหร่ายจัดอยู่ใน 2 Kingdom แรก คือ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue green algae) จัดอยู่ในอาณาจักรโมเนอรา ซึ่งได้แก่สิ่งมีชีวิตพวกโปรแคริโอท (procaryote) ส่วนสาหร่ายอื่นๆ ทั้งหมดจัดอยู่ในอาณาจักรโปรติสตา ซึ่งได้แก่สิ่งมีชีวิตพวกยูแคริโอท (eukaryote) สิ่งมีชีวิตในอาณาจักรนี้

ส่วนมากเป็นเซลล์เดี่ยวที่สามารถทำหน้าที่อย่างครบถ้วน บางชนิดมีหลายเซลล์แต่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเนื้อเยื่อหรืออวัยวะที่ทำหน้าที่เฉพาะอย่าง นอกจากสาหร่ายแล้วอาณาจักรนี้ยังประกอบไปด้วยเห็ดรา (fungi) ราเมือก (slime mold) และโปรโตซัว (protozoa)

ส่วนระบบของ Whittaker ได้แบ่งอาณาจักรสิ่งมีชีวิตออกเป็น 5 อาณาจักร คือ โมเนอรา อาณาจักรโปรติสตา อาณาจักรฟังไจ อาณาจักรพืช อาณาจักรสัตว์ และได้จัดสาหร่ายไว้ในอาณาจักรต่างๆ ดังนี้

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจัดอยู่ในอาณาจักรโมเนอรา

สาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง (yellow green algae) สาหร่ายน้ำตาลแกมทอง (golden algae) ไดอะตอม (diatoms) ไดโนแฟลกเจลเลต (dinoflagellates) ยูกลีนอยด์ (euglenoids) และคริปโตโมแนด (cryptomonads) จัดอยู่ในอาณาจักรโปรติสตา

สาหร่ายสีเขียว (green algae) สาหร่ายไฟ (stone worth) สาหร่ายสีน้ำตาล (brown algae) สาหร่ายสีแดง (red algae) จัดอยู่ในอาณาจักรพืช

ในการจัดสาหร่ายออกเป็นหมวดหมู่ได้เริ่มมาตั้งแต่ ค.ศ. 1754 โดย C. Linnaeus ได้เริ่มตั้งชื่อสาหร่ายตามวิธีการตั้งชื่อสาหร่ายตามวิธีการตั้งชื่อทางวิทยาศาสตร์

ในปี ค.ศ.1933 Smith ได้จัดสาหร่ายให้อยู่ใน Division Thallophyta และจำแนกสาหร่ายออกเป็น 11 คลาส ตามชนิดของรงควัตถุ (pigment) อาหารสะสมและการสืบพันธุ์ ดังต่อไปนี้

1. Class Chlorophyceae
2. Class Euglenophyceae
3. Class Xanthophyceae

4. Class Chrysophyceae

5. Class Bacillariophyceae

6. Class Phaeophyceae

7. Class Dinophyceae

8. Class Myxophyceae

9. Class Rhodophyceae

10. Class Cryptophyceae

11. Class Chloromonadaceae

ในปี ค.ศ. 1950 Smith ได้ปรับปรุงการจัดหมวดหมู่ของสาหร่ายใหม่ โดยให้เหลือเพียง 7 กลุ่ม และยกระดับจากคลาสเป็นดิวิชัน ดังต่อไปนี้

1. Division Chlorophyta

2. Division Euglenophyta

3. Division Chrysophyta

4. Division Phaeophyta

5. Division Pyrrophyta (Pyrrhophyta)

6. Division Cyanophyta

7. Division Rhodophyta

การจัดหมวดหมู่ของ Smith สอดคล้องกับการจัดหมวดหมู่ของ Fritch (1945) ส่วน Prescott (1968) ได้เพิ่มขึ้นมาอีก 2 ดิวิชั่น ได้แก่ Division Cryptophyta และ Division

Chloromonadophyta สำหรับการจัดหมวดหมู่ยึดตาม Bold และ Wynne (1978) ซึ่งจำแนกสาหร่ายทั้งหมดออกเป็น 9 ดิวิชั่น (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2546) ดังนี้

1. Division Cyanophyta : สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน
2. Division Chlorophyta : สาหร่ายสีเขียว
3. Division Charophyta : สาหร่ายไฟ
4. Division Euglenophyta : ยูกลีนอยด์
5. Division Phaeophyta : สาหร่ายสีน้ำตาล
6. Division Chrysophyta : สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง หรือสาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง และไดอะตอม
7. Division Pyrrophyta : ไดโนแฟลกเจลเลต
8. Division Cryptophyta : คริพโตโมแนดส์
9. Division Rhodophyta : สาหร่ายสีแดง

1.2.3 หลักเกณฑ์ในการจัดสาหร่ายออกเป็นหมวดหมู่

การที่จะจัดจำแนกสาหร่ายออกเป็นหมวดหมู่ข้างต้นที่กล่าวมาแล้วนั้น พิจารณาลักษณะสำคัญดังนี้

1. รงควัตถุ รงควัตถุในสาหร่ายมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น คลอโรฟิลล์ แคโรตินอยด์ (carotenoid) ซึ่งประกอบด้วยแคโรทีน (carotene) แซนโทฟิลล์ (xanthophyll) ไฟโคบิลิน (phycobiln) ซึ่งประกอบด้วย ไฟโคเออริธริน (phycoerythrin) และไฟโคไซยานิน (phycocyanin) รงควัตถุทั้งหลายนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการสร้างอาหารของสาหร่าย บางชนิดมีผลทำให้สี

ของสาหร่ายคล้อยตามสีของรงควัตถุที่มีอยู่แต่ก็ไม่เสมอไป สาหร่ายแต่ละชนิดมีรงควัตถุแตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ

2. องค์ประกอบของผนังเซลล์ จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเลคตรอน และกระบวนการทางชีวเคมี ทำให้สามารถทราบถึงลักษณะและองค์ประกอบของผนังเซลล์สาหร่าย สาหร่ายหลายชนิดไม่มีผนังเซลล์ บางชนิดผนังเซลล์ก็เปลี่ยนไปโดยมีสารอื่นมาห่อหุ้มแต่ส่วนใหญ่แล้วผนังเซลล์ของสาหร่ายประกอบไปด้วย เซลลูโลส (cellulose) ไซแลน (xylan) แมนแนน (mannan) กรดอัลจีนิค (alginic acid) เพคติน (pectin) ไคติน (chitin) ซิลิกา (silica) และหินปูน เป็นต้น ผนังเซลล์ของสาหร่ายแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบแตกต่างกันไป ซึ่งใช้ลักษณะดังกล่าวนี้แยกหมวดหมู่ของสาหร่ายได้

3. อาหารที่สะสมในเซลล์ จากการสร้างอาหารของสาหร่ายจะได้สารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเก็บสะสมไว้ในรูปของแป้ง (starch) ลิวโคซิน (leucosin) ลามินาริน (laminarin) แมนนิทอล (manitol) ไขมัน (fat) น้ำมัน (oil) คลอเรสเทอรอล (chloresterol) เออโกสเทอรอล (ergoserol) ฟิวโคสเทอรอล (fucosterol) พารามายรอน (paramyron) เป็นต้น

4. จำนวนและตำแหน่งของแฟลกเจลลัม (flagellum) สาหร่ายหลายชนิดสามารถเคลื่อนที่ได้ บางชนิดเคลื่อนที่ไม่ได้ บางชนิดในระยะสืบพันธุ์จะช่วยสร้างเซลล์สืบพันธ์ที่เคลื่อนที่ได้ การที่สาหร่ายสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอาศัยแฟลกเจลลัม สาหร่ายแต่ละชนิดจะมีจำนวนลักษณะและตำแหน่งที่แฟลกเจลลัมฝังตัวอยู่นั้นแตกต่างกันซึ่งสามารถใช้ความแตกต่างดังกล่าวนี้แยกหมวดหมู่สาหร่ายได้ (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2546)

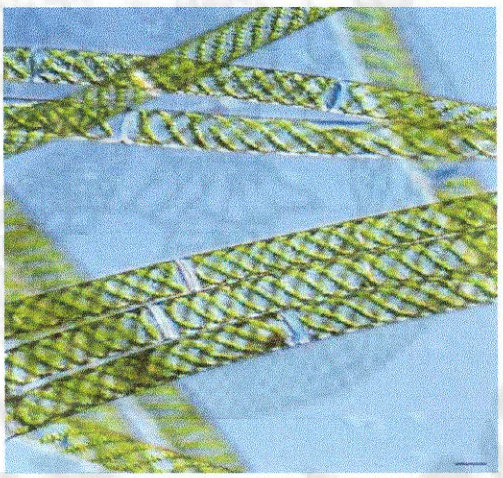
1.2.4 สาหร่ายน้ำจืด (เตา)

สาหร่ายเตา (*Spirogyra sp.*) เป็นสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวขนาดใหญ่ มีลักษณะเป็นเส้นสายยาว คล้ายเส้นผมสีเขียวสด ชาวบ้านในแถบภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย นิยมนำมารับประทานเป็นอาหารและมีรายงานการวิจัยพบว่า สาหร่ายเตามีคุณค่าทางโภชนาการสูง (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2546) คณะผู้วิจัยได้พบว่า ที่ชุมชนบ้านนาคูหา ตำบลสวนเขื่อน อำเภอเมือง จังหวัดแพร่ สามารถเพาะเลี้ยงสาหร่ายเตาได้ตลอดทั้งปี โดยนำสาหร่ายเตามาปรุงเป็น อาหารพื้นบ้านคือ ยำเตา และข้าวเกรียบเตา จึงได้นำสาหร่ายจากหมู่บ้านดังกล่าวมาทำการวิจัย โดยมุ่งเน้นไปที่การมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ต้านการอักเสบ

การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายเตาพบว่า สาหร่ายชนิดนี้มีโปรตีนค่อนข้างสูงถึง 20% มีเส้นใยอยู่ในปริมาณที่พอเหมาะมากกว่าผักหรือผลไม้ทั่วไป คือมี 21% มีคาร์โบไฮเดรตราว 31% มีวิตามินบีโดยเฉพาะบี 2-355 ไมโครกรัมต่อ100 กรัม นอกจากนั้นก็มีกรดโฟลิค และกรดแพนโทธีนิก ซึ่งเป็นกลุ่มวิตามินที่สำคัญอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมอีกด้วย นับได้ว่าสาหร่ายเตามีคุณค่าทางโภชนาการโดยทั่วไปสูงกว่าผักและผลไม้ ซึ่งถือได้ว่าเป็นอาหารกลุ่มที่ให้โปรตีน เส้นใย และวิตามินค่อนข้างสูงทีเดียว คุณค่าของสาหร่ายเตามีปริมาณโปรตีนสูงกว่าปลาน้ำจืดทั่วไปทดแทนการกินปลาได้เป็นอย่างดีและที่โดดเด่นคือมีซิลีเนียม ซึ่งเป็นสารป้องกันการเกิดอนุมูลอิสระสูงมากมีเบต้าแคโรทีนที่มากกว่าแครอทถึง 4 เท่า ช่วยลดคลอเลสเตอรอลจึงไม่ทำให้อ้วน นอกจากนั้น ชาวบ้านมีความเชื่อว่า การทานสาหร่ายเตานี้ จะทำให้ร่างกายกระชุ่มกระชวย ผมดกดำ ไม่หงอกง่าย และชะลอความแก่ ถ้ามองด้านสรรพคุณทางยาก็จะพบว่าสาหร่ายเตา มีฤทธิ์ต้านการเกิดแผลในกระเพาะอาหารได้

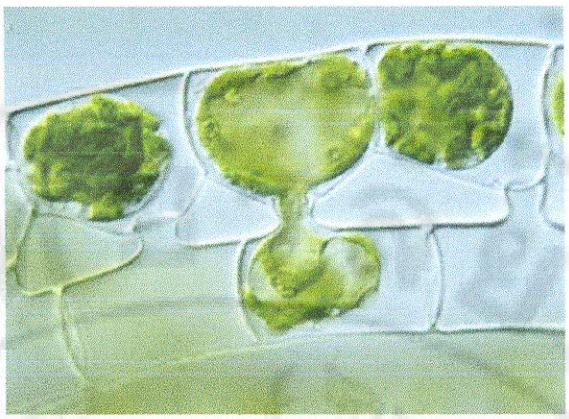
นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มยับยั้งการหดเกร็งของกล้ามเนื้อเรียบ ขยายหลอดลมต้านการอักเสบ ระงับปวดและลดความดันโลหิตได้ด้วย

ตัวอย่างสาหร่ายเตาที่ศึกษาเป็นสาหร่ายชนิด *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kutzing จัดอยู่ใน Division Chlorophyta, Class Zygnematophyceae, Order Zygnematales, Family Zygnemataceae ลักษณะของสาหร่ายชนิดนี้ จะเป็นเส้นสายยาว ไม่แตกแขนง เซลล์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ความกว้างของเซลล์ 50-58 ไมโครเมตร ความยาวเป็น 2-5 เท่าของความกว้าง ในแต่ละเซลล์ประกอบ ด้วย 3 คลอโรพลาสต์ ซึ่งจะหมุนวน 2-2.5 รอบภายในเซลล์ (รูปที่ 1.1)

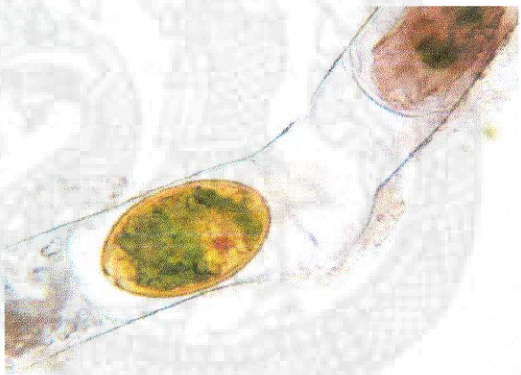


รูปที่ 1.1 สาหร่ายเตา *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kutzing

สไปโรไจราสามารถเพิ่มจำนวนได้ทั้งการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศโดยการหักเป็นท่อน (fragmentation) และการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศที่เรียกว่า คอนจูเกชัน (conjugation) หมายถึง การรวมตัวของเซลล์สืบพันธุ์ที่มีขนาดและรูปร่างเหมือนกัน ซึ่งมี 2 แบบ คือ สคาลาริฟอร์มคอนจูเกชัน (scalariform conjugation) เป็นการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศโดยสร้างท่อคอนจูเกชันเชื่อมระหว่างเซลล์ต่างเส้นสายดังรูปที่ 1.2 และแลทเทอรัลคอนจูเกชั่น (lateral conjugation) เป็นการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ ซึ่งเกิดในสาหร่ายเส้นเดียวกันดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.2 การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศของสไปโรไจราแบบสคาลาริฟอร์มคอนจูเกชัน (scalariform conjugation)



รูปที่ 1.3 การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศของสไปโรไจราแบบแลทเทอรัลคอนจูเกชั่น (lateral conjugation)

1.3 สมบัติของเส้นใย และการจำแนกประเภท

เส้นใย (Fiber) หมายถึง วัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นบางยาว โค้งได้ งอได้ โดยไม่หัก จำแนกได้หลายประเภท (อรุณี คงดี, 2555) ดังนี้

1.3.1 จำแนกตามความยาว

1. เส้นใยสั้น (Staple) เป็นเส้นใยขนาดสั้น ได้แก่ เส้นใยธรรมชาติทุกชนิด ยกเว้นไหม

2. เส้นใยยาว (Filament) เป็นเส้นใยขนาดยาวมากๆ ได้แก่ ไหมและเส้นใยประดิษฐ์ อย่างไรก็ตามเส้นใยยาวสามารถทำให้เป็นเส้นใยสั้นได้โดยการตัดในภายหลัง

1.3.2 จำแนกตามแหล่งที่มา

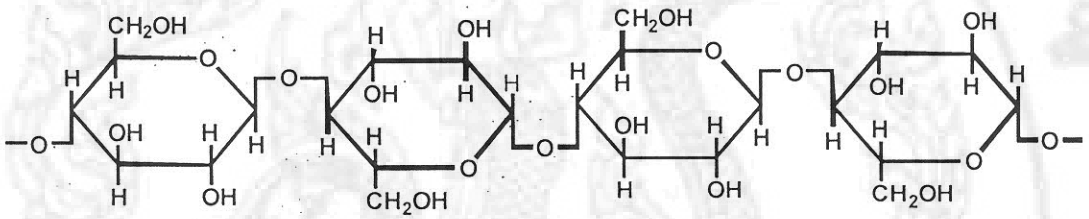
การจำแนกเส้นใยสิ่งทอตามแหล่งที่มา สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยประดิษฐ์

เส้นใยธรรมชาติ พบได้ในธรรมชาติ ได้แก่ จากพืช สัตว์ หรือแร่ธาตุ เส้นใยจากพืชได้จากหลายส่วนของพืช ได้แก่ เมล็ด (เช่น ฝ้าย นุ่น ใยมะพร้าว) เปลือกลำต้น (เช่น แฟลกซ์ ปอ กัญชง ป่านรามี) และจากใบ (เช่น อะบาคา ป่านมะนิลา ใยสับปะรด และป่านศรนารายณ์) เส้นใยจากสัตว์ได้แก่ ไหม และเส้นใยอื่นที่เป็นขนสัตว์ เช่น ขนแกะ แพะ อูฐ เป็นต้น ส่วนเส้นใยจากแร่ธาตุ ได้แก่ แร่ใยหิน เป็นต้น

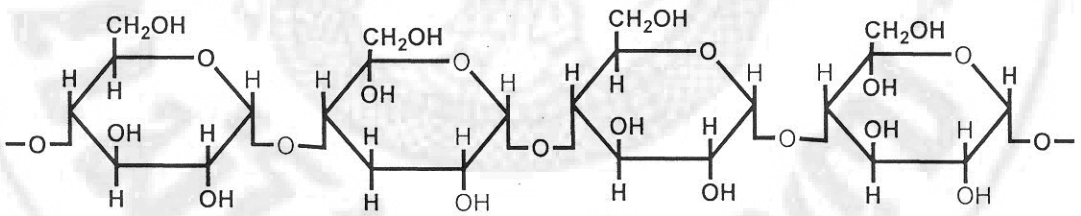
เส้นใยประดิษฐ์ แบ่งออกเป็น เส้นใยสังเคราะห์ และเส้นใยรีเจนเนอเรต เส้นใยสังเคราะห์ได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น พอลิคาร์บาไมด์ พอลิยูรีเทน พอลิโอเลฟินส์ พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอไมด์ พอลิเอสเทอร์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิไอโซพรีน ส่วนเส้นใย รีเจนเนอเรต เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติทั้งจากพืชและสัตว์ที่ผ่านการประดิษฐ์เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพ หรือทางเคมี ที่ได้จากพืช เช่น เส้นใยอัลจิเนตจากสาหร่ายทะเล เส้นใยจากยางธรรมชาติ เซลลูโลส และเซลลูโลสเอสเทอร์ เส้นใยรีเจนเนอเรตจากสัตว์ ได้แก่ เคซีน เป็นต้น นอกจากนั้น เส้นใยอื่นๆ เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว เส้นใยโลหะ และเส้นใยซิลิกา ก็จัดเป็นเส้นใยประดิษฐ์ด้วยเช่นกัน

1.4 เส้นใยเซลลูโลส

เซลลูโลส (Cellulose) จัดเป็นพอลิแซคคาไรด์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ทางธรรมชาติที่มีมากที่สุดในโลก มีลักษณะเป็นเส้นใยพบในส่วนต่างๆ ของพืช เมล็ด ลำต้น หรือใบ เช่น ผ้าย ลินิน ป่าน ปอ กัญชง นุ่น ที่มีการต่อกันของหน่วยกลูโคสที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 4 กับคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 เรียกว่า พันธะ 1,4-ไกลโคซิดิก (1,4-glycosidic linkage) ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับน้ำตาลโมเลกุลใหญ่หรือแป้งจากพืช(starch) แต่ละเซลลูโลสมีโครงสร้างแบบเบต้า (β) ดังแสดงดังรูปที่ 1.4 ในขณะที่แป้งมีโครงสร้างแบบแอลฟา (α) ดังโครงสร้างในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส



รูปที่ 1.5 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง

1.5 การฟอกขาวเส้นใย

การฟอกขาวเป็นการกำจัดสีที่มีอยู่ตามธรรมชาติในวัสดุออก อาจจะโดยการผึ่งแดด แช่ในสารละลายด่างที่มีอยู่ตามธรรมชาติตามที่เคยใช้ในอดีต หรือจะใช้สารเคมีซึ่งให้ผลรวดเร็วกว่า แต่ขณะเดียวกันก็ทำให้เส้นใยเปื่อย สูญเสียความแข็งแรงได้ สารเคมีที่ใช้ในการฟอกขาวแบ่งออกเป็น 6 กลุ่มใหญ่ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 สารฟอกขาวเส้นใยสิ่งทอ

สารฟอกขาว	สูตรเคมี
กลุ่มที่ 1 Chlorine Oxidant	
Sodium hypochlorite	NaOCl
Sodium chlorite	$NaOCl_2$
Sodium dichloroisocyanurate	N,N'-dichloro compound
กลุ่มที่ 2 Inorganic peroxide Oxidant	
Hydrogen peroxide	H_2O_2
Ozone	O_3
Sulfur dioxide	SO_2
Sodium perborate	$NaBO_2.H_2O_2.3H_2O$
Potassium permanganate	$KMnO_4$
Sodium percarbonate	$Na_2CO_3.3H_2O_2$
Sodium bromated	$NaBrO_3$
Sodium bromite	$NaBrO_2$
Potassium peroxydiphosphate	$K_4P_2O_8$
กลุ่มที่ 3 Organic peroxide Oxidant	
Peracetic acid	CH3CO-OOH
Peroxydodecanedionic acid	$HOO-CO-(CH2)_{10}-OOH$
Tetra-acetylenediamine / hydrogen peroxide	Generates $CH_3CO-OOH$

ตารางที่ 1.1 สารฟอกขาวเส้นใยสิ่งทอ (**ต่อ**)

สารฟอกขาว	สูตรเคมี
กลุ่มที่ 4 Reductant	
Sulfur dioxide	SO_2
Sulfuric acid	H_2SO_4
Sodium bisulfite	NaH_2SO_3
Sodium sulfite	$NaHSO_3$
Sodium hydrosulfite (Sulfoxylate, dithionite)	NaO_2SSO_2Na
Sodium formaldehyde sulfoxylate (Sodium hydroxylmathanesulfinate)	$HOCH_2SO_2Na$
Sodium borohydride	$NaBH_4$
Thiourea dioxide (formamidine sulfonic acid)	$H_2NC(=NH)SO_2H$
Sodium sulfinate	HSO_2Na
Trisodium trithioisocyanurate / hydrogen peroxide	Generates HSO_2Na

สูตรของสารละลายที่ใช้ในการฟอกขาวส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยสารที่ทำหน้าที่ฟอกขาว บัฟเฟอร์ สารลดแรงตึงผิว และสารจับโลหะ เช่น ซิลิเกต ฟอสเฟต ออกซาเลต ซึ่งจะไปจับกับไอออนของโลหะเพื่อป้องกันการเกิดฟรีแรดิคัลที่จะเข้าไปทำลายเส้นใย สารฟอกขาวบางสูตร เรียกว่า เมทัลซอลท์ จากการที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนีย โซเดียมไนเตรต เป็นส่วนประกอบ บางสูตรมีการเติมสารทำให้ขาว (optical brightening agent) สารที่นิยมใช้ในการฟอกขาว ได้แก่ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ สารประกอบคลอไรท์ เช่น สารประกอบไฮโปคลอไรท์ และสารประกอบคลอไรท์ เป็นต้น

ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ เป็นสารออกซิไดซ์ที่นิยมใช้ในการฟอกเส้นใยมากที่สุด แตกตัวได้ดีในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูง เช่น ที่พีเอช 11.5 ซึ่งสามารถปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนตสำหรับฝ้าย แอมโมเนีย และเตตระโซเดียมไพโรฟอสเฟตสำหรับเส้นใยขน

สัตว์ ให้ไฮโดรเจนไอออน และเพอร์ไฮดรอกซิลไอออน (HOO^-) ตามปฏิกิริยาในรูปที่ 1.6 แต่การฟอกที่ภาวะนี้ทำให้ฝ้ายเกิดความเสียหายได้

H_2O_2	$\rightarrow$	$H_2O + O^* + X$ kcal	การสลายตัวตามปกติ
H_2O_2	$\rightleftharpoons$	$H^+ + HOO^-$	การแตกตัวในน้ำ
HOO^-	$\rightarrow$	$OH^- + O^*$	ปลดปล่อยแอคทีฟออกซิเจนในการฟอกขาว
$NaHO_2$	$\rightleftharpoons$	$Na^+ + HOO^-$	ปลดปล่อยสารฟอกในการฟอกขาวในสภาวะด่าง
$2H_2O_2$	$\rightarrow$	$2H_2O + O_2$	การสลายตัวให้ก๊าซออกซิเจนไม่ฟอกขาว

รูปที่ 1.6 ปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

ที่พีเอช 11.5 ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์แตกตัวกลายเป็นออกซิเจนได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ผ้าฝ้ายสีซีดจึงต้องเติมสารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) เช่น เอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก แอซิด (EDTA) หรือโซเดียมซิลิเกต ให้ปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดช้าลง ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้การฟอกขาวเป็นไปตามที่ต้องการ โดยทั่วไปจะใช้สารเพิ่มความคงตัว 10–20% ของปริมาณไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่ใช้

มีการทำการวิจัยเพื่อเพิ่มความขาวของเส้นใยฝ้ายด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำ โดยมีสารกลุ่มเพอร์แอซิด เช่น กรดเพอร์อะซิติก ช่วยในการฟอกขาว และมีกรดซัลฟุริก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาการฟอกขาวถูกเสนอขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1.7

$$H_2O_2 + CH_3COOH \longrightarrow CH_3CO\text{-}O\text{-}OH + H_2O$$

รูปที่ 1.7 ปฏิกิริยาการฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในภาวะที่มีสารกลุ่มเพอร์แอซิด

สารประกอบไฮโปคลอไรท์ เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง ใช้ฟอกขาวได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ มีความเสถียรที่พีเอช 10 โซเดียมไฮโปคลอไรท์อยู่ในรูปของเหลว ส่วนแคลเซียมคลอไรท์อยู่ในรูปของแข็ง สารประกอบคลอไรท์จะแตกตัวให้ก๊าซคลอรีน และไฮดรอกซิลไอออนที่ทำให้เกิดการฟอกขาวได้ การเติมกรดเพื่อลดค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 5.0-8.5 จะทำให้เกิดกรดไฮโปคลอรัส การฟอกขาวด้วยไฮโปคลอไรท์จะทำให้เส้นใยเปื่อยง่ายและมีสีเหลือง โดยเฉพาะกับเส้นใยโปรตีนหรือไนลอน และหลังการฟอกต้องล้างคลอรีนที่ตกค้างออกด้วยสารรีดิวซ์ เช่น โซเดียมไบซัลไฟท์ โซเดียมไทโอซัลเฟต หรือไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ แล้วปรับสภาพให้ผ้ามีความเป็นกลาง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างแอคทีฟคลอรีน และคลอรามีน (RNHCl ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่เส้นใยโปรตีนทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโปคลอไรท์กับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์) ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 1.8 กระบวนการนี้เรียกว่า การต้านคลอรีน (anti-chlor)

$$NaOCl + H_2O_2 \longrightarrow NaCl + H_2O + O_2$$

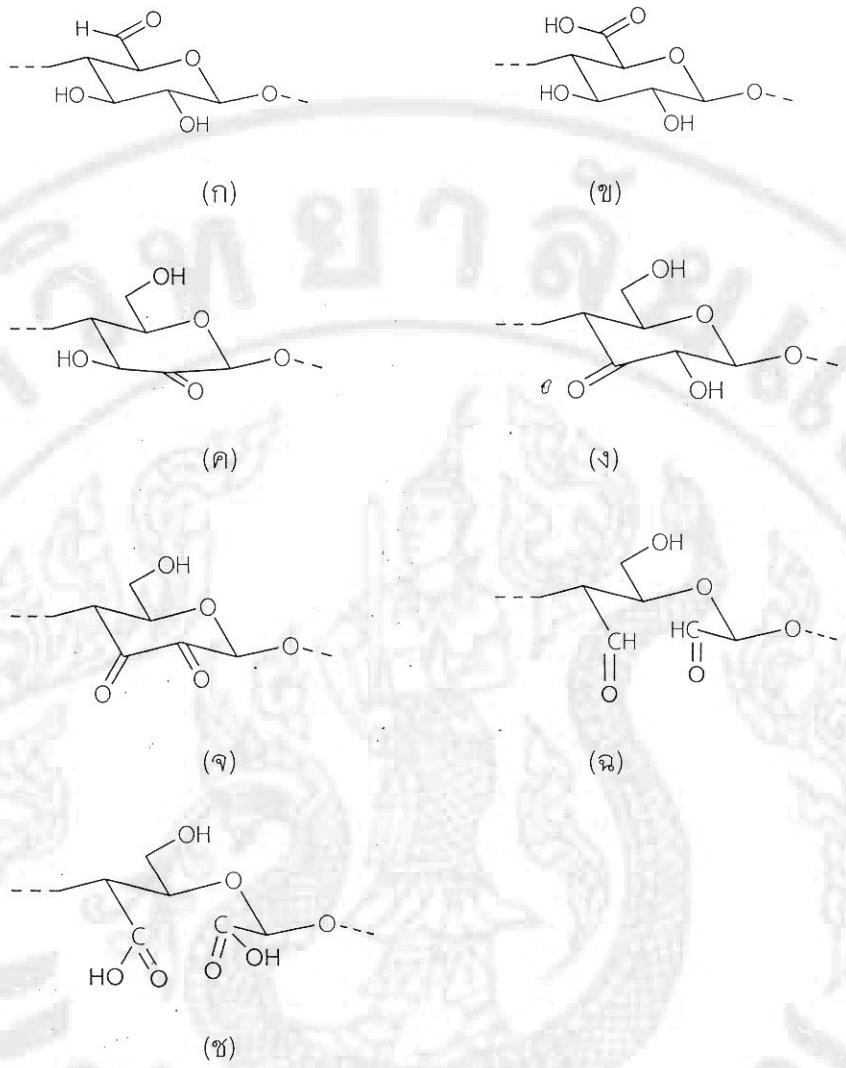
$$RNHCl + H_2O_2 \longrightarrow 4ClO_2 + HCl + 2H_2O$$

$$4ClO_2 + 4H^+ + 5e^- \longrightarrow Cl^- + 2H_2O$$

รูปที่ 1.8 ปฏิกิริยาการสลายตัวของโซเดียมคลอไรท์

คลอรีนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการฟอกขาวเป็นสารอันตราย และกัดกร่อนโลหะที่เป็นของส่วนประกอบของเครื่องจักรได้ การฟอกขาวด้วยโซเดียมคลอไรท์ทำได้ที่พีเอช 3.5-4.0 ในสารละลายบัฟเฟอร์ เช่น โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต การฟอกฝ้ายที่พีเอชในช่วง 1.76-6.05 ที่ 20 °C ที่ทำให้เกิดออกซีเซลลูโลส (oxycellulose) ได้ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเซลลูโลสเมื่อฟอกขาวด้วยกลุ่มออกซิแดนท์ ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส

กลายเป็นหมู่อัลดีไฮด์ คีโตน และคาร์บอกซิล ได้เป็นออกซีเซลลูโลสเช่นกัน ดังโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 1.9 การเกิดออกซีเซลลูโลสบางครั้งอาจทำให้โซ่ยาวของเซลลูโลสขาดได้ ซึ่งสามารถตรวจสอบการลดลงของความหนืดของสารละลาย การลดลงของความแข็งแรงของเส้นใยและการเพิ่มขึ้นของจำนวนหมู่คาร์บอนิล ผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นจากออกซิเดชันที่หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ได้หมู่แอลดีไฮด์ ดังรูปที่ 1.9 (ก) หรือคาร์บอกซิลิก ดังรูปที่ 1.9 (ข) นอกจากนั้นที่หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 หรือทั้งสองตำแหน่งยังสามารถเกิดการออกซิไดซ์กลายเป็นหมู่คีโตน ดังรูปที่ 1.9 (ค) (ง) และ (จ) การขาดออกของพันธะระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ3 ทำให้เกิดไดแอลดีไฮด์ ดังรูปที่ 1.9 (ฉ) ซึ่งสามารถถูกออกซิไดซ์ต่อกลายเป็นไดแอซิด ดังรูปที่ 1.9 (ช)



รูปที่ 1.9 โครงสร้างของออกซีเซลลูโลสที่มีหมู่ (ก) อัลดีไฮด์ (ข) คาร์บอกซิลิก (ค) (ง) (จ) คีโตน (ฉ) ไดอัลดีไฮด์ (ช) ไดแอซิด ที่ได้จากการออกซิเดชันของเซลลูโลสในสารฟอกขาวกลุ่มออกซิแดนท์

การฟอกขาวไหมเป็นการกำจัดสีเหลืองหรือน้ำตาลที่มีอยู่ในเส้นใยไหมออก การฟอกขาวด้วยสารประกอบไฮโปคลอไรท์ที่พีเอช 10.3 จะทำให้การฟอกขาวมีประสิทธิภาพมาก เส้นใยไหมประกอบด้วยส่วนผลึก (crystalline region) มากกว่าขนสัตว์ จึงฟอกขาวไหมในภาวะที่มีพีเอชสูงได้ แต่อย่างไรก็ตาม การฟอกขาวไหมในสภาวะรุนแรงก็ทำให้เส้นใยไหมเปื่อยได้ การใช้

สารประกอบไฮโปคลอไรท์และคลอรีนไดออกไซด์จะทำให้ไหมเปลี่ยนสีในภายหลัง ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ใช้ฟอกขาวไหมได้ดี นอกจากนี้ การใช้เอนไซม์ย่อยโปรตีน เช่น เอนไซม์โปรติเอส เป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาก ซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการลอกกาวไหมในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเจือจางก่อน และขั้นตอนการลอกกาวไหมอีกครั้งด้วยเอนไซม์โปรติเอส

การฟอกขาวด้วยสารฟอกขาวแต่ละชนิดข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน และมีความเหมาะสมกับเส้นใยบางชนิดเท่านั้น ดังจะสรุปไว้ในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ข้อดีและข้อเสียของการฟอกขาวด้วยสารฟอกขาวชนิดต่างๆ

สารฟอกขาว	**ข้อดี**	**ข้อเสีย**
ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์	ใช้กับเส้นใยโปรตีนได้ ไม่เป็นพิษ ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม	ทำให้ผ้าเป็นรู (pinholes) ได้ถ้าน้ำที่ใช้ฟอกมีไอออนของเหล็กปนอยู่ กัดกร่อนผิวหนัง ทำให้เกิดการติดไฟได้
สารประกอบไฮโปคลอไรท์	ราคาถูก ประสิทธิภาพการฟอกสูง ใช้งานง่าย	ให้ก๊าซที่เป็นพิษที่กัดกร่อนโลหะ เนื้อเยื่อร่างกาย ใช้กับเส้นใยโปรตีนไม่ได้ เกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว ในขณะการเก็บรักษา
สารประกอบคลอไรท์	ไม่ทำให้ผ้าเป็นรู ไม่ทำลายเส้นใยเซลลูโลส ประสิทธิภาพการฟอกสูง ใช้งานในสภาวะกรด	มีกลิ่นฉุน ใช้กับเส้นใยโปรตีนไม่ได้ ให้ก๊าซที่เป็นพิษที่กัดกร่อนโลหะ เนื้อเยื่อร่างกาย สูงมาก เกิดมลภาวะจากก๊าซคลอรีน

1.6 สารเพิ่มความยืดหยุ่น (Plasticizer)

สารเพิ่มความยืดหยุ่น คือ สารเคมีที่มีคุณสมบัติในการเพิ่มความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ที่ผสมโดยสารเพิ่มความยืดหยุ่นอาจมีสถานะเป็นของแข็งหรือของเหลวหรือเป็นพอลิเมอร์ชนิดอื่นก็ได้ การเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นในพอลิเมอร์ มีผลทำให้ T_g ของพอลิเมอร์ลดลงโดยสารเพิ่มความยืดหยุ่นจะเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์โดยการแทรกตัวเข้าไประหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์และเกิดพันธะกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์อยู่ห่างกันมากขึ้นกล่าวได้ว่าสารเพิ่มความยืดหยุ่นเป็นตัวลดแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์ลงทำให้สมบัติของพอลิเมอร์มีความอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นมากขึ้น และง่ายต่อกระบวนการดัดแปลงเปลี่ยนรูปทรงเพื่อขึ้นรูปตามแบบต่างๆ โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากนัก

สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ดีจะเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ได้แข็งแรงเป็นผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายบริสุทธิ์เข้มข้น ตรงกันข้ามกับสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ไม่ดีจะทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลงสะดวกในอุตสาหกรรมแปลรูป แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถละลายยึดกับพอลิเมอร์ได้นานกล่าวคือไม่มีความคงทนทำให้พอลิเมอร์ที่ผสมมีสมบัติเปลี่ยนไปโดยมีความเปราะมากขึ้น ดังนั้นการเลือกใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพและความคงทน

สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. มวลโมเลกุลมีค่าสูง และโดยปกติมีค่าสูงกว่าตัวทำละลายเพื่อให้การระเหยเป็นไปได้ยาก (low volatility)

2. สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ที่ผสมในระดับโมเลกุลโดยต้องมีหมู่หรือส่วนที่จะเกิดพันธะทุติยภูมิกับพอลิเมอร์ได้ดีและแข็งแรง (high compatibility)

3. มีอุณหภูมิเปลี่ยน สถานะคล้ายแก้วต่ำมีผลทำให้ช่วยลด T_g ของพอลิเมอร์ (low T_g)

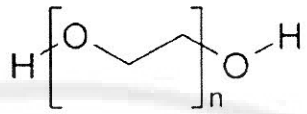
4. สามารถสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้ยาก มีความทนทาน และมีอัตราการแพร่ที่ต่ำ (low extractability)

5. มีความเป็นพิษน้อยหรือไม่มีความเป็นพิษเลย (low toxicity)

6. ราคาถูก (low cost)

สมบัติเหล่านี้เป็นตัวกำหนดการเลือกใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้การผสมกับพอลิเมอร์ที่มีสัณฐานเป็นแบบกึ่งผลึก สารเพิ่มความยืดหยุ่นจะช่วยลด T_m และในบางกรณียังช่วยลดดีกรีความเป็นผลึก (degree of crystallinity) ด้วย สารเพิ่มความยืดหยุ่นจะมีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ในบริเวณอสัณฐานเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่มีปริมาณเล็กน้อยเข้าไปในบริเวณของผลึก ทำให้เกิด 2 บริเวณที่ต่างกัน หลังจากเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นคือบริเวณของผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูง และบริเวณอสัณฐานที่มีการผสมกันเกิดขึ้น แม้ว่าในความเป็นจริงจะเกิด 2 บริเวณที่แยกกันที่อัตราส่วนการเติมต่างๆ แต่สามารถเรียกได้ว่ามีความเข้ากันได้ เนื่องจากของไหลผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) ของพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อพอลิเมอร์มีความเป็นผลึกสูง การหาสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์จะทำได้ยากขึ้นเพื่อให้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่ดีตามต้องการ

สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ พอลิ(เอทิลีน ไกลคอล), PEG จากโครงสร้างที่เป็นพอลิอีเทอร์สายโซ่ตรง ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้มีสมบัติความยืดหยุ่นสูง มีความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพมีความเป็นพิษต่ำและสามารถสลายตัวทางชีวภาพได้ (ปิยธิดา กล่ำภู่, 2552)



รูปที่ 1.10 โครงสร้างของพอลิ(เอทิลีน ไกลคอล)

การผลิตกระดาษจากสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวไม่มีรายงานมาก่อน มีรายงานการผลิตกระดาษจากสาหร่ายทะเลสีแดงจาก Seo และคณะ (Seo et al , 2010) ที่ได้นำสาหร่ายสีแดงมากำจัดเมือกที่ 120 และ 140 °C และในกรดซัลฟุริกเข้มข้น 0.5 % และฟอกขาวด้วยคลอรีนไดออกไซด์ (5% active) ที่พีเอช 3.5 และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (5% active) ที่พีเอช 3.5 อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 60 นาที แล้วขึ้นรูปเป็นกระดาษโดยไม่ใส่สารตัวเติม จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องกราดพบว่า เส้นใยจากสาหร่ายสีแดงเรียงตัวสานกันดี แผ่นเซลลูโลสมีสมบัติด้านความแข็งแรงใกล้เคียงกับกระดาษที่ใช้ในสำนักงาน

บทที่ 2

วัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและวิธีการทดลอง

2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลองจะแสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์	รุ่น	ยี่ห้อ	ประเทศ
1. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง			
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	5410LV	Jeol	ญี่ปุ่น
3. เครื่องคนแม่เหล็กให้ความร้อน	SpectrumRX 1	Fisher scientific	สหรัฐอเมริกา
4. เครื่องชั่งวิเคราะห์	5410LV	Mettler Toledo	สวิตเซอร์แลนด์
5. เครื่องวัดความต้านทานต่อแรงดึง	Model LRX	LLOYD	สหรัฐอเมริกา
6. เครื่องวัดสี	Ultra scan ®Pro	Hunter Lab	สหรัฐอเมริกา
7. ตะแกรง	SpectrumRX 1	Perkin Elmer	สหรัฐอเมริกา
8. ตู้อบ			จีน
9. เทอร์โมมิเตอร์			จีน

ตารางที่ 2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	ความบริสุทธิ์	บริษัทผู้ผลิต	ประเทศ
1. กรดซัลฟุริก (H_2SO_4)	98%	Ajax Finechem Pty Ltd.	นิวซีแลนด์
2. โซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$)	80%	Loba Chemie Pvt.Ltd	อินเดีย
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	97%	Ajax Finechem Pty Ltd	นิวซีแลนด์
4. แป้งมัน	-	Bangkok inter food co.,Ltd	ไทย
5. พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)		Ajax Finechem Pty Ltd	นิวซีแลนด์
6. เอทิลแอลกอฮอล์ (EtOH)	95%	-	ไทย
7. ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2)	100%	Ajax Finechem Pty Ltd	นิวซีแลนด์

2.2 การเตรียมสารละลายต่างๆ

2.2.1 สารละลาย 0.5%v/v กรดซัลฟุริก

ปิเปตกรดซัลฟุริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) มา 5.10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000.00 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

2.2.2 สารละลาย 2%w/v โซเดียมคลอไรท์

ชั่งโซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$) มา 25.00 กรัม แล้วนำมาละลายในน้ำปราศจากไอออนปรับปริมาตรให้เป็น 1000.00 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

2.2.3 สารละลาย 1%v/v ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

ปิเปตไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) มา 10.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000.00 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

2.2.4 สารละลาย 2 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 8.00 กรัม แล้วนำไปละลายในน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.00 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

2.2.5 สารละลาย 2.5, 5.0, 10, 15 % w/w พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)

ชั่งพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) 0.0375, 0.0750, 0.1500, 0.2250 กรัม ตามลำดับ แล้วนำไปปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.00 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน

2.3 การกำจัดเมือกเพื่อเตรียมเยื่อสาหร่าย

กำจัดเมือก (คาร์โบไฮเดรต) ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม ต้มในน้ำในอัตราส่วน 1:30 ที่อุณหภูมิ 70.0–90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการต้มใน 0.5% กรดซัลฟุริก ในสภาวะเดียวกันแล้วล้างเอาเมือกออกด้วยน้ำ (Seo et al., 2010)

2.4 การกำจัดคลอโรฟิลล์

แช่สาหร่ายน้ำจืดใน 95% เอทิล แอลกอฮอล์ (95% ethyl alcohol) 1:20 ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการแช่ในอะซิโตน (acetone) ในสภาวะเดียวกัน เทของเหลวออกแล้วอบสาหร่ายให้แห้ง (Lan et al., 2011)

2.5 การฟอกขาวสาหร่ายน้ำจืด

การฟอกขาวสาหร่ายใช้สองวิธีดังนี้ (Seo et al., 2010)

1) วิธีที่ 1 การฟอกขาวโดยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ โดยต้มสาหร่ายจากข้อ 2.4 ในไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 5, 6, 7 และ10%v/v ที่มี พีเอช 12 (ควบคุมโดย โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์) ที่อุณหภูมิ 70-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างเยื่อที่ได้ด้วยน้ำเปล่าให้สะอาด

2) วิธีที่ 2 การฟอกขาวโดยโซเดียมคลอไรท์ โดยต้มสาหร่ายใน 2%w/v โดยต้มสาหร่ายจากข้อ 2.4 ใน 2% โซเดียมคลอไรท์ที่มี พีเอช 3 (ควบคุมโดยกรดซัลฟุริก เข้มข้น 0.5%v/v) ที่อุณหภูมิ 70-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างเยื่อที่ได้ด้วยน้ำเปล่าให้สะอาด

2.6 วิธีการเตรียมแผ่นเซลลูโลส

การเตรียมแผ่นเซลลูโลสทำในหลายสภาวะดังนี้

แผ่นที่ 1 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม ใส่ลงในน้ำ 100.00 มิลลิลิตร จากนั้นขึ้นรูปโดยการช้อนด้วยตะแกรงแล้วอบที่ 70.0 องศาเซลเซียส

แผ่นที่ 2 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม กำจัดเมือกโดยต้มใน 0.5% v/v กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:30 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกำจัดคลอโรฟิลล์โดยแช่สาหร่ายใน 95% เอทิล แอลกอฮอล์ (95% ethyl alcohol) ในอัตราส่วน 1:20 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างน้ำให้สะอาดก่อนขึ้นรูปโดยการช้อนด้วยตะแกรง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส

แผ่นที่ 3 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม กำจัดเมือกโดยต้มใน 0.5% v/v กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:30 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการฟอกขาวโดยต้มเยื่อกับโซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$) ความเข้มข้น 2 % w/v พีเอช 3 (ควบคุมโดยใช้ 0.5% v/v กรดซัลฟุริก) ที่

อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างน้ำให้สะอาดขึ้นรูป โดยการช้อนด้วยตะแกรง อบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส

แผ่นที่ 4 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม กำจัดเมือกโดยต้มใน 0.5% v/v กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:30 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกำจัดคลอโรฟิลล์โดยแช่สาหร่ายใน 95% เอทิล แอลกอฮอล์ (95% ethyl alcohol) ในอัตราส่วน 1:20 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต้มเยื่อกับโซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$) ความเข้มข้น 2 % w/v พีเอช 3 (ควบคุมโดยใช้ 0.5% v/v กรดซัลฟุริก) อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างน้ำให้สะอาดขึ้นรูปโดยการช้อนด้วยตะแกรงแล้วอบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส

แผ่นที่ 5 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม กำจัดเมือกโดยต้มใน 0.5% v/v กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:30 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกำจัดคลอโรฟิลล์โดยแช่สาหร่ายใน 95% เอทิล แอลกอฮอล์ (95% Ethyl alcohol) ในอัตราส่วน 1:20 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต้มเยื่อกับโซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$) ความเข้มข้น 2 % w/v พีเอช 3 (ควบคุมโดยใช้ 0.5% v/v กรดซัลฟุริก) ที่อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต้มเยื่อกับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 1%v/v พีเอช 12 (ควบคุมโดยใช้ 2 M โซเดียม ไฮดรอกไซด์) อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อล้างคลอรีนที่ตกค้างออก ล้างน้ำให้สะอาดขึ้นรูปโดยการช้อนด้วยตะแกรงแล้วอบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส

2.7 การเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น

นำแผ่นเซลลูโลสหนัก 1.50 กรัม ผสมกับเป็นพลาสติไซเซอร์ คือ พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) เข้มข้น 2.5 5.0 10.0 และ 15.0%w/w แล้วกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กให้เข้ากัน จากนั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยตะแกรง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

2.8 การวิเคราะห์และตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสาหร่ายและเยื่อเซลลูโลสจากสาหร่าย

2.8.1 การวิเคราะห์ลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

นำสาหร่าย และเยื่อเซลลูโลสจากสาหร่ายที่ได้จากการกำจัดเมือก คลอโรฟิลล์ และการฟอกขาวมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Olympus) ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า

2.8.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำแผ่นเซลลูโลสมาเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำด้วยเทคนิคสปัทเทอริง จากนั้นนำวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Jeol, 5410LV) ที่ 15 kV

2.8.3 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเยื่อเซลลูโลสด้วยเทคนิคฟูเรียร์ ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรเมตรี

นำแผ่นเซลลูโลสมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วบดผสมผงโพแทสเซียมโบรไมด์ อัดเป็นแผ่น แล้วนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรเมตรี ในช่วงเลขคลื่น 400 –4000 cm^{-1}

2.9 การทดสอบสมบัติของแผ่นเซลลูโลส

นำเซลลูโลสที่ขึ้นแผ่นแล้ว มาทดสอบสมบัติ ดังต่อไปนี้

2.9.1 การทดสอบความหนาด้วยไมโครมิเตอร์

นำแผ่นเซลลูโลสไปวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร สุ่มวัดทั้งหมด 5 ตำแหน่ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

2.9.2 การวัดความขาวด้วยคัลเลอริมิเตอร์

เป็นการวัดค่า L* ค่า a* และค่า b* ของแผ่นเซลลูโลสด้วยเครื่องวัดสี (colorimeter) ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Ultra scan ®Pro โดยค่า L* ค่าความสว่าง (lightness) a* เป็นค่าสีแดง และสีเขียว (redness/greenness) และ b* เป็นค่าสีเหลือง และสีน้ำเงิน (yellowness/blueness)

L* คือ ค่าความสว่างมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100

a* คือ ค่าสีแดงและสีเขียว เมื่อ a* มีค่าบวกเป็นสีแดง เมื่อ a* มีค่าลบเป็นสีเขียว

b* คือ ค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน เมื่อ b* มีค่าบวกเป็นสีเหลือง เมื่อ b* มีค่าลบเป็นสีน้ำเงิน

ก่อนการวัดสีทุกครั้งต้องปรับมาตรฐานเครื่อง (calibration) โดยใช้แผ่นสีขาวมาตร ฐาน (white blank; L* = 97, a* = -0.18, b* = 1.84) แล้วจึงวัดสีของแผ่นเซลลูโลสการคำนวณผลจากสูตร

$$WI_{(Hunter)} = L-3b$$

เมื่อ WI คือ ค่าดรรชนีความขาว (whiteness index)

L* และ b* เป็นค่าแสดงความสว่าง และสีเหลืองและสีน้ำเงิน ตามลำดับ

2.9.3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นเซลลูโลส (Tensile strength) (Bruch, 1986) ทำได้ดังนี้

1. ตัวอย่างแผ่นเซลลูโลสที่ใช้ทดสอบ จะต้องแบน หนาไม่ต่ำกว่า 1.5 มิลลิเมตร และไม่เกิน 3 มิลลิเมตร ผิวของตัวอย่างควรเรียบ ไม่มีรอยขรุขระ การตัดให้ตัดตามความยาวของ grain การตัดนั้นจะต้องตัดให้ขาดในการกดหนึ่งครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่ารอยตัดได้ผิวเรียบจริง ถ้าไม่กำหนดชนิดของ die ก็ให้ใช้ die type 1

2. นำตัวอย่างที่ได้ขีดเส้นบนตัวอย่างแผ่นเซลลูโลส กว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร แล้วตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

3. การวัดความหนาของตัวอย่างแผ่นเซลลูโลส ให้วัดความหนาของตัวอย่าง 3 แห่ง คือตรงกลางของตัวอย่าง และตรงปลายเลยรอยขีดทั้งสอง ให้ใช้ค่า median ของความหนาที่วัดได้ดังกล่าว ส่วนความกว้างของตัวอย่างส่วนที่ทดสอบให้ถือเอาตัวเลขกำหนดของ die

4. นำผลการวัดในข้อที่ 2.8.3.3 มาคำนวณ

ค่า Tensile stress หรือ modulus คำนวณดังนี้

$$\text{Tensile stress} = F/A \qquad (1)$$

โดยที่ F = แรงที่ใช้

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างขณะที่ไม่ได้ยืด

ค่า Tensile strength คำนวณโดยใช้แรง F เท่ากับที่ยืดตัวอย่างจนขาด ทั้งค่า tensile stress และ tensile strength ใช้หน่วยเป็น megapascals หรือ pounds-force ต่อตารางนิ้ว

(หมายเหตุ: 1 pascal = 1 นิวตัน/ตารางเมตร, 1 megapascal = 1 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)

ค่า Elongation คำนวณดังนี้

$$\text{Elongation, \%} = 100 \times (L-L_o)/L_o \qquad (2)$$

โดย L = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนตัวอย่างเมื่อยืด

L_o = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนตัวอย่างเดิม

ค่า Ultimate Elongation หรือ Elongation at break คำนวณ โดยใช้ค่า L เท่ากับระยะห่างระหว่างขีดในขณะที่ตัวอย่างขาดพอดี

การทดสอบความทนต่อแรงดึง ทำได้โดย นำตัวอย่างที่จะทดสอบมาใส่ในที่จับ พยายามวางตัวอย่างให้ได้แนวกลางของที่จับเพื่อให้แรงกระจายได้สมดุล ให้ยืดตัวอย่างออกด้วยความเร็วหนึ่งที่จะทำให้ตัวอย่างยืดได้ถึงระยะกำหนดภายในเวลา 15 วินาที ปล่อยให้ตัวอย่างยืดในระยะระดับนั้นเป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบเวลากำหนด 10 นาที ให้รีบปล่อยตัวอย่างกลับเข้าสู่รูปเดิม และตั้งแผ่นเซลลูโลสทิ้งไว้ 10 นาที เมื่อครบ 10 นาทีแล้ว ให้วัดระยะห่างระหว่างรอยที่ขีดไว้ การคำนวณค่า tensile set ทำโดยการแทนค่า L ในสมการที่ 2 ด้วยค่าระยะห่างระหว่างรอยขีดที่วัดได้หลังจากที่ตั้งทิ้งไว้ 10 นาทีนั้น

2.9.4 การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ

การหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำของแผ่นเซลลูโลสทำได้โดยตัดแผ่นเซลลูโลสให้เป็นชิ้น กว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร แช่น้ำประมาณ 4 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักเปียก อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักแห้ง ทำ 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ย

การหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ (%Water retention) คำนวณได้โดยใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$\%\text{Water retention} = \left(\frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}}\right) \times 100$$

เมื่อ Water retention = เปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ

น้ำหนักเปียก = น้ำหนักเยื่อสาหร่ายหลังแช่น้ำ (กรัม)

น้ำหนักเปียก = น้ำหนักเยื่อสาหร่ายหลังการอบ (กรัม)

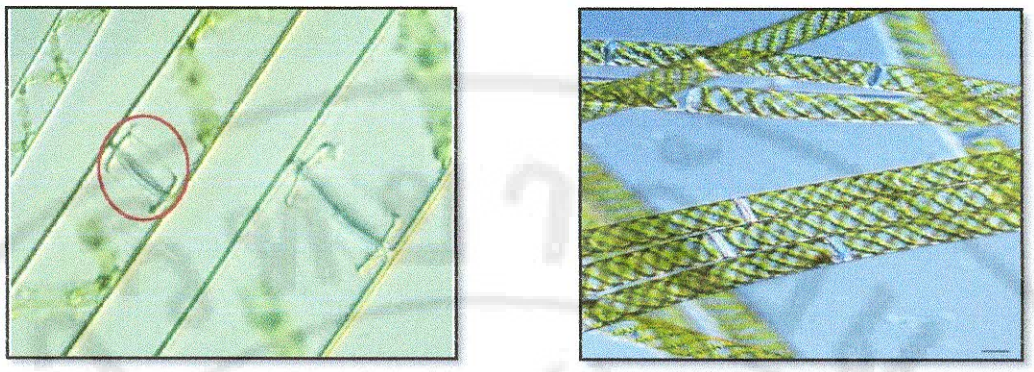
บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและทดสอบสมบัติของแผ่นเซลลูโลสจากสาหร่ายน้ำจืดโดยจะนำเอาสาหร่ายน้ำจืดมากำจัดเมือก ฟอกขาว และเตรียมเป็นแผ่นเซลลูโลส โดยจะหาสภาวะการเตรียมแผ่นเซลลูโลสที่ดีที่สุดและนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ได้ผลการทดลองดังนี้

3.1 ลักษณะของสาหร่ายน้ำจืดภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

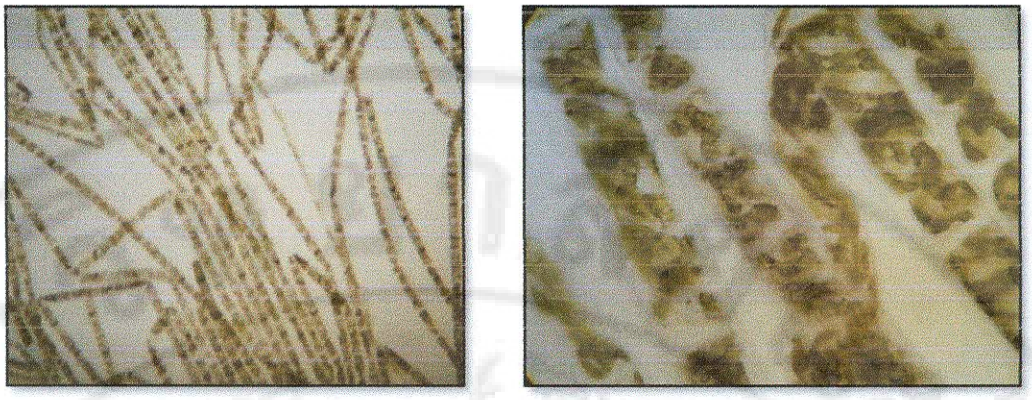
การจัดจำแนกชนิดของสาหร่าย *Spirogyra* spp. ใช้หลักการของลักษณะทางสัณฐานวิทยาหลายองค์ประกอบ เช่น ขนาดความกว้างความยาวของเส้นสาย ลักษณะของผนังกั้นระหว่างเซลล์ อาจเป็นแบบระนาบ (end wall plane) หรือมีลักษณะซ้อนพับเป็นวงแหวน (replicate) หรืออาจมีลักษณะเป็นปลอกรอบระหว่างรอยต่อระหว่างเซลล์ (colligate) (ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ก) จำนวนของคลอโรพลาสต์ จำนวนของรอบหมุนเป็นเกลียวของคลอโรพลาสต์ (ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ข) ลักษณะของการคอนจูเกชัน เช่น เป็นแบบ ladder-like หรือ lateral รูปร่างของท่อคอนจูเกชัน และลักษณะของไซโกสปอร์ เช่น ขนาด สี รูปร่าง



(ก) (ข)

รูปที่ 3.1 ผนังกั้นระหว่างเซลล์ (ก) สาหร่ายสไปโรไจราที่มีลักษณะเป็นปลอกรอบรอยต่อระหว่างเซลล์ และ(ข) สาหร่ายเตา *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing เป็นเกลียวของคลอโรพลาสต์ (ยุวดี พีรพรพิศาล, 2555)

จากการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่าตัวอย่างสาหร่ายเตาที่ศึกษาเป็นสาหร่ายชนิด *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing (ฐิติกานต์ ปัญโญใหญ่, 2550) จัดอยู่ใน Division Chlorophyta, Class Zygnematophyceae, Order Zygnematales, Family Zygnemataceae ลักษณะของสาหร่ายชนิดนี้ จะเป็นเส้นสายยาว ไม่แตกแขนง เซลล์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก (ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ก และ ข) ความกว้างของเซลล์ 50-58 ไมโครเมตร ความ ยาวเป็น 2-5 เท่าของความกว้าง ในแต่ละเซลล์ประกอบ ด้วย 3 คลอโรพลาสต์ ซึ่งจะหมุนวน 2-2.5 รอบภายใน เซลล์ ส่วนการสืบพันธุ์เป็นแบบอาศัยเพศ มีการสร้างท่อ conjugation มาเชื่อมกันระหว่างเส้นสายทั้งสองเส้น เซลล์ที่สร้างไซโกสปอร์ (zygospore) มีลักษณะบวมเล็กน้อย โดยไซโกสปอร์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นรูปไข่ หรือวงรี ผิวเรียบ สีน้ำตาลเข้ม ขนาดความกว้าง 54-58 ไมโครเมตร และยาวเป็น 1.5 เท่าของความกว้าง



(ก) (ข)

รูปที่ 3.2 รูปของสาหร่ายน้ำจืดภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 40 เท่า (ก) และกำลังขยาย 100 เท่า (ข)

3.2 การกำจัดเมือกของสาหร่ายน้ำจืด

เตรียมแผ่นเซลลูโลส โดยจะกำจัดเมือก (พอลิแซคคาไรด์) โดยชั่งสาหร่ายน้ำจืด 25.00 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ต้มในน้ำ 1:30 ใช้อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการต้มใน 0.5% กรดซัลฟุริก (0.5% H_2SO_4) ในสภาวะเดียวกันแล้วล้างเอาเมือกออก ผลที่ได้คือ การต้มในน้ำ และ 0.5% กรดซัลฟุริก สามารถกำจัดเมือกได้เหมือนกัน แต่ในน้ำจะใช้เวลาที่นานกว่า ดังนั้นจึงเลือก 0.5% กรดซัลฟุริก ในการกำจัดเมือก ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การกำจัดเมือกของสาหร่ายน้ำจืด

สารเคมี	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ผลการกำจัดเมือก
น้ำ	70-90	60	กำจัดเมือกได้ (ทำ 3 ซ้ำ)
0.5 %v/v H_2SO_4	70-90	60	กำจัดเมือกได้

3.3 การกำจัดคลอโรฟิลล์ของสาหร่ายน้ำจืด

นำเยื่อมากำจัดคลอโรฟิลล์โดยอาศัยหลักการที่ว่า "สารที่มีขั้วก็จะละลายในตัวทำละลายที่มีขั้ว" จึงเปรียบเทียบโดยแช่สาหร่ายน้ำจืดใน 95% เอทิลแอลกอฮอล์ 1:20 ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และอะซิโตน ในสภาวะเดียวกัน ผลที่ได้คือ 95% เอทิล แอลกอฮอล์ สามารถกำจัดคลอโรฟิลล์ได้ดีกว่าอะซิโตนสังเกตได้จากสีของน้ำหลังการสกัดที่มีสีเขียวเข้ม และสีของเยื่อหลังการสกัดที่มีสีซีด ดังนั้นจึงเลือกใช้ 95% เอทิล แอลกอฮอล์ ในการกำจัดคลอโรฟิลล์ ในอุณหภูมิ 60.0 องศาเซลเซียสดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การกำจัดคลอโรฟิลล์ของสาหร่ายน้ำจืด

สารเคมี	สีของน้ำหลังการสกัด	สีของเยื่อ
95% Ethyl alcohol	สีเขียวเข้ม	
Acetone	สีเขียวอ่อน	

3.4 การฟอกขาวสาหร่ายน้ำจืด

กระบวนการฟอกขาวในงานวิจัยใช้สารฟอกขาวดังต่อไปนี้

1. ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

เป็นสารออกซิไดซ์ที่นิยมใช้ในการฟอกเส้นใยมากที่สุดซึ่งปลอดภัยต่อผู้ผลิตและผู้บริโภคแตกตัวได้ดีในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูง เช่น ที่พีเอช 11.5 ซึ่งสามารถปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ไฮโดรเจนไอออน และเพอร์ไฮดรอกซิลไอออน (HOO^-) ตามปฏิกิริยา แต่การฟอกที่ภาวะนี้ทำให้เส้นใยเกิดความเสียหายได้ ในการทดลองต้มเยื่อกับ

ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 5-10 %v/v พีเอช 12 (2 M ควบคุมโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์) อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.3 การฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ของสาหร่ายน้ำจืด

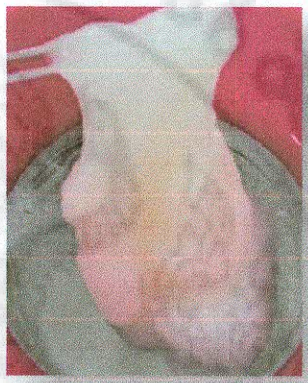
ความเข้มข้น H_2O_2 (%v/v)	**อุณหภูมิ** (°C)	**เวลา** (min)	**ผลการทดลอง**
5	70-90	60	
6	70-90	60	
7	70-90	60	
10	70-90	60	

จากผลการทดลองในตารางที่ 3.3 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เยื่อสาหร่ายที่ได้จากการฟอกขาวมีสีเขียวจางลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์จนถึง 10%v/v เยื่อสาหร่ายเกิดการเปื่อยยุ่ยอาจเนื่องมาจากโมเลกุลเซลลูโลสเกิดการขาด

2. โซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$)

เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง สารประกอบคลอไรท์จะแตกตัวให้ก๊าซคลอรีน และไฮดรอกซิลไอออนที่ทำให้เกิดการฟอกขาวได้ การเติมกรดเพื่อลดค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 5.0-8.5 จะทำให้เกิดกรดไฮโปคลอรัส การฟอกขาวด้วยไฮโปคลอไรท์จะทำให้เส้นใยเปื่อยง่าย และมีสีเหลือง โดยเฉพาะกับเส้นใยโปรตีน และหลังการฟอกต้องล้างคลอรีนที่ตกค้างออกด้วยสารรีดิวซ์ เช่น โซเดียมไบซัลไฟท์ โซเดียมไทโอซัลเฟต หรือไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ แล้วปรับสภาพให้ผ้ามีความเป็นกลาง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างแอคทีฟคลอรีน และคลอรามีน (RNHCl) ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่เส้นใยโปรตีนทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโปคลอไรท์) กับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ กระบวนการนี้เรียกว่า การต้านคลอรีน (anti-chlor) ในการทดลองต้มเยื่อกับโซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$) ความเข้มข้น 2 % w/v พีเอช 3 (ควบคุมโดยใช้กรดซัลฟุริก) อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.4 การฟอกขาวด้วยโซเดียมคลอไรท์ของสาหร่ายน้ำจืด

ความเข้มข้น $NaOCl_2$ (%w/v)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ผลการทดลอง
2	70-90	60	

กระบวนการขึ้นรูปด้วยตะแกรงแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำมาชั่งน้ำหนักหลังอบอีกครั้ง ได้ผลผลิตร้อยละแล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟแผ่นภูมิแท่งในดังแสดงในรูปที่ 3.3 ดังแสดงรายละเอียดในการทำแผ่นเซลลูโลส 5 วิธี ดังนี้

แผ่นที่ 1 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม ใส่ลงในน้ำ 100.00 มิลลิลิตร จากนั้นขึ้นรูปโดยการช้อนด้วยตะแกรงแล้วอบที่ 70.0 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตร้อยละ 81.24

แผ่นที่ 2 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม กำจัดเมือกโดยต้มใน 0.5% v/v กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:30 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกำจัดคลอโรฟิลล์โดยแช่สาหร่ายใน 95% เอทิล แอลกอฮอล์ (95% ethyl alcohol) ในอัตราส่วน 1:20 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างน้ำให้สะอาดก่อนขึ้นรูปโดยการช้อนด้วยตะแกรง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตร้อยละ 36.28

แผ่นที่ 3 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม กำจัดเมือกโดยต้มใน 0.5% v/v กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:30 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการฟอกขาวโดยต้มเยื่อกับโซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$) ความเข้มข้น 2 % w/v พีเอช 3 (ควบคุมโดยใช้ 0.5% v/v กรดซัลฟุริก) ที่อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างน้ำให้สะอาดขึ้นรูปแล้วโดยการช้อนด้วยตะแกรงอบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตร้อยละ 31.40

แผ่นที่ 4 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม กำจัดเมือกโดยต้มใน 0.5% v/v กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:30 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกำจัดคลอโรฟิลล์โดยแช่สาหร่ายใน 95% เอทิล แอลกอฮอล์ (95% ethyl alcohol) ในอัตราส่วน 1:20 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต้มเยื่อกับโซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$) ความเข้มข้น 2 % w/v พีเอช 3 (ควบคุมโดยใช้ 0.5% v/v กรดซัลฟุริก) อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างน้ำให้สะอาดขึ้นรูปโดยการช้อนด้วยตะแกรงแล้วอบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตร้อยละ 25.15

แผ่นที่ 5 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม กำจัดเมือกโดยต้มใน 0.5% v/v กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:30 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกำจัดคลอโรฟิลล์โดยแช่สาหร่ายใน 95% เอทิล แอลกอฮอล์ (95% ethyl alcohol) ในอัตราส่วน 1:20 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต้มเยื่อกับโซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$) ความเข้มข้น 2 % w/v พีเอช 3 (ควบคุมโดยใช้ 0.5% v/v กรดซัลฟุริก) ที่อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต้มเยื่อกับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 1%v/v พีเอช 12 (ควบคุมโดยใช้ 2 M โซเดียมไฮดรอกไซด์) อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อ

ล้างคลอรีนที่ตกค้างออก ล้างน้ำให้สะอาดขึ้นรูปโดยการช้อนด้วยตะแกรงแล้วอบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตร้อยละ 27.40

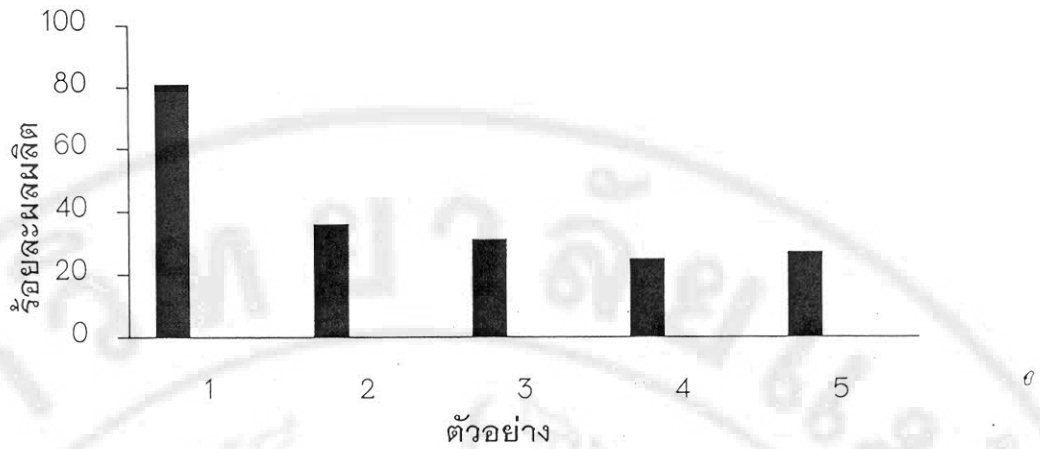
ซึ่งสามารถสรุปข้อมูลร้อยละผลผลิตได้เป็นตารางดังแสดงตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ร้อยละผลผลิตของเยื่อเซลลูโลสที่ได้

แผ่นที่	สภาวะการเตรียมเยื่อ	ผลผลิตร้อยละ
1	สาหร่ายน้ำจืด	24.87
2	H_2SO_4-EtOH	36.28
3	H_2SO_4-$NaOCl_2$	31.40
4	H_2SO_4-EtOH-$NaOCl_2$	25.15
5	H_2SO_4-EtOH-$NaOCl_2$-H_2O_2	27.40

หมายเหตุ ตัวอย่าง 1. สาหร่ายน้ำจืด 2. H_2SO_4-EtOH 3. H_2SO_4-$NaOCl_2$ 4. H_2SO_4-EtOH-$NaOCl_2$ และ 5.H_2SO_4-EtOH-$NaOCl_2$-H_2O_2

ซึ่งสามารถพล็อตเป็นกราฟแผนภูมิแท่งได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ร้อยละผลผลิตของแผ่นเซลลูโลส

จากแผนภูมิแท่งดังแสดงในรูปที่ 3.3 การเตรียมแผ่นเซลลูโลสโดยด้วยวิธีการต่างๆ ตัวอย่างที่ 1 มีค่าร้อยละของแผ่นเซลลูโลสมากที่สุดเนื่องจากเป็นสาหร่ายน้ำจืดที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทางเคมีจึงไม่มีการสูญเสียองค์ประกอบของสาหร่ายทำให้มีค่าร้อยละผลผลิตมากที่สุด ตัวอย่างที่ 2, 3, 4 และ5 มีค่าผลร้อยละของแผ่นเซลลูโลสค่อนข้างน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการกำจัดเมือกด้วยกรดซัลฟุริกและการฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ จึงทำให้เส้นใยขาดแล้วสั้นลง ในขั้นตอนการล้างเส้นใยจะหลุดหายไปทำให้มีค่าผลร้อยละผลผลิตของแผ่นเซลลูโลสน้อยลง

3.5 ความหนาของแผ่นเซลลูโลส

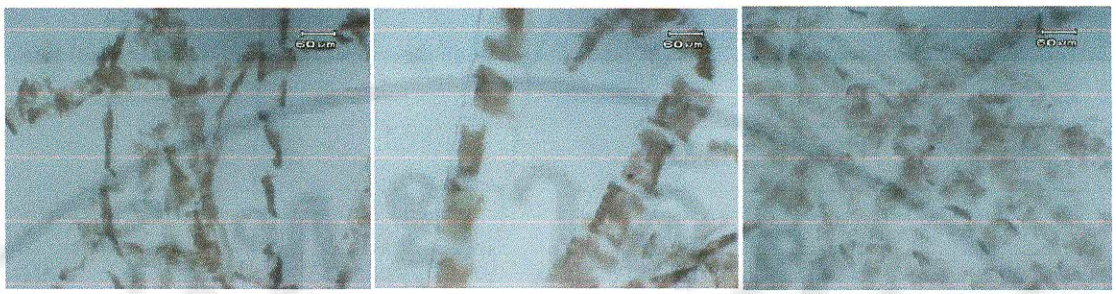
ในการเตรียมแผ่นเซลลูโลสมีการขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยตะแกรง ทำให้แผ่นเซลลูโลสแต่ละแผ่นมีความหนาไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น เมื่อทำการวัดค่าความหนาของแผ่นเซลลูโลสด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ พบว่า มีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ความหนาของแผ่นเซลลูโลส

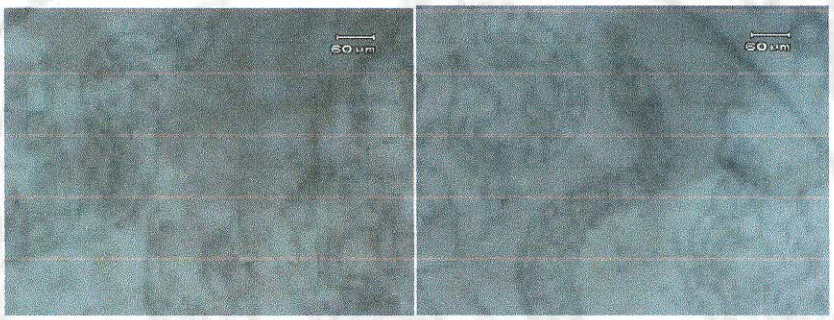
ตัวอย่าง	สภาวะการเตรียมเยื่อ	ความหนา (มิลลิเมตร)					เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		1	2	3	4	5		
1	สาหร่ายน้ำจืด	1.16	1.00	0.80	1.12	1.10	1.036	0.13
2	H_2SO_4–EtOH	0.55	0.23	0.41	0.47	0.45	0.422	0.09
3	H_2SO_4–$NaOCl_2$	0.51	0.46	0.47	0.47	0.44	0.47	0.02
4	H_2SO_4–EtOH–$NaOCl_2$	0.18	0.20	0.17	0.16	0.19	0.18	0.01
5	H_2SO_4–EtOH–$NaOCl_2$–H_2O_2	0.11	0.06	0.07	0.10	0.09	0.086	0.02

3.6 ลักษณะของแผ่นเซลลูโลส

เมื่อนำแผ่นเซลลูโลสที่เตรียมโดย 5 วิธี คือ 1.สาหร่ายน้ำจืด, 2.H_2SO_4–EtOH, 3.H_2SO_4–$NaOCl_2$, 4.H_2SO_4–EtOH–$NaOCl_2$ และ 5.H_2SO_4–EtOH–$NaOCl_2$–H_2O_2 มาวิเคราะห์ลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ได้ผลดังรูปที่ 3.4 จากรูปจะเห็นได้ว่า เยื่อสาหร่ายที่ถูกกำจัดเอาเมือกและคลอโรฟิลล์ออก (ข,ค) มีลักษณะเป็นเส้นยาว ยังคงความเป็นเซลล์อยู่ และมีเม็ดสีอยู่ภายในเซลล์ และมีเม็ดสีน้อยลงเมื่อผ่านการฟอกขาวด้วย $NaOCl_2$ และ H_2O_2 (ง,จ)



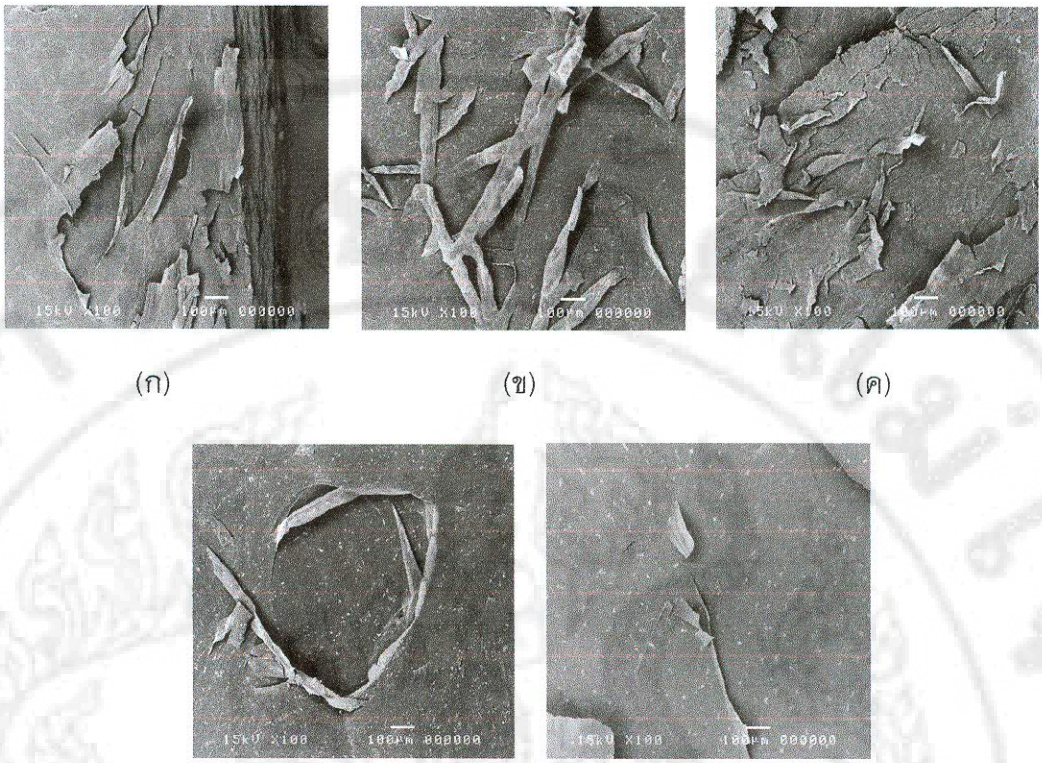
(ก) (ข) (ค)



(ง) (จ)

รูปที่ 3.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของแผ่นเซลลูโลสที่เตรียมด้วยวิธีที่ (ก) 1. สาหร่ายน้ำจืด (ข) 2. H_2SO_4–EtOH (ค) 3. H_2SO_4–$NaOCl_2$ (ง) 4. H_2SO_4–EtOH–$NaOCl_2$ และ(จ) 5. H_2SO_4–EtOH–$NaOCl_2$–H_2O_2 (กำลังขยาย 100 เท่า)

ผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าแผ่นเซลลูโลสมีเส้นใยที่แบนแทรกออกมา เนื่องจากเซลลูโลสเกิดพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมต่อกันทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสชิดกันเพิ่มมากขึ้นทำให้เส้นใยยุบตัวจึงไม่เห็นลักษณะเส้นใยที่ชัดเจน มีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.5

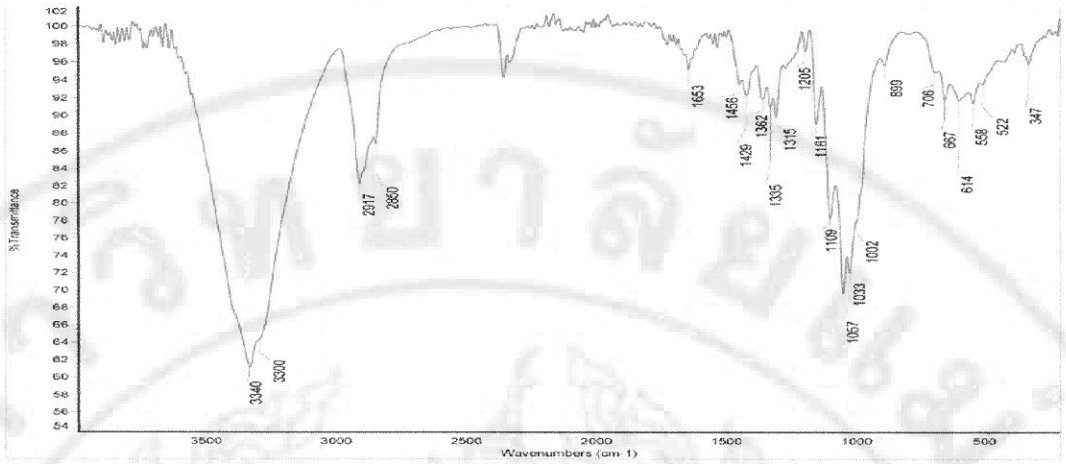


(ก) (ข) (ค)

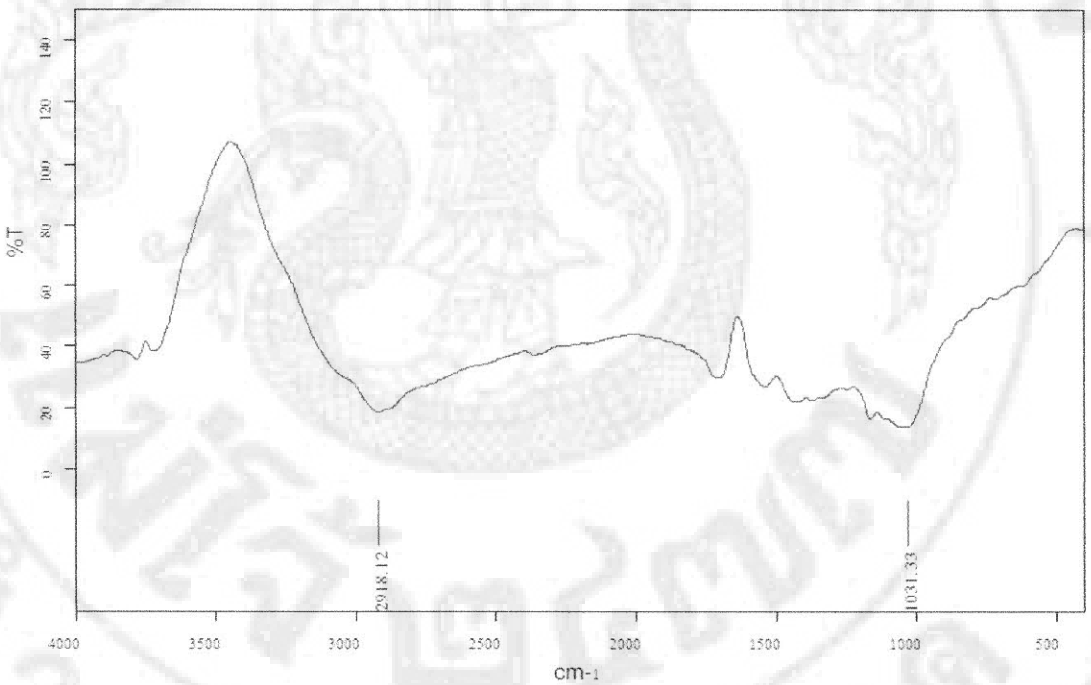
(ง) (จ)

รูปที่ 3.5 รูปของแผ่นเซลลูโลสที่เตรียมด้วยวิธีที่ (ก) 1.สาหร่ายน้ำจืด (ข) 2. H_2SO_4-EtOH (ค) 3. H_2SO_4-$NaOCl_2$ (ง) 4. H_2SO_4-EtOH-$NaOCl_2$ และ(จ) 5. H_2SO_4-EtOH-$NaOCl_2$-H_2O_2 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของเยื่อเซลลูโลสจากสาหร่าย นำอินฟราเรด สเปกโทรมิเตอร์ แล้วนำอินฟราเรด สเปกตรัมเพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางเคมี แสดงผลดังรูปที่ 3.6



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) เส้นใยฝ้าย (ข) เยื่อเซลลูโลสจากสาหร่าย

ที่มา (ก) http://tera.chem.ut.ee/IR_spectra/images/stories/cotton.png

ถ้ามีการยืดออกของอินฟราเรดสเปกตรัมของเยื่อเซลลูโลสจากสาหร่ายในแนวตั้ง จะพบว่า มีอินฟราเรดสเปกตรัมของเยื่อเซลลูโลสจากสาหร่าย และเส้นใยฝ้ายจะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แสดงว่ามีโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเหมือนกัน เนื่องจากเป็นเซลลูโลสเช่นเดียวกัน

3.7 ค่าดรรชนีความขาวของแผ่นเซลลูโลส

เมื่อนำแผ่นเซลลูโลสที่ผ่านการกำจัดเมือกและฟอกขาวและขึ้นรูปเป็นแผ่นแล้ว นำไปคำนวณหาร้อยละผลผลิต และวัดค่า L* และ b* เพื่อคำนวณค่าดรรชนีความขาวแล้ว ได้รายละเอียดค่าดรรชนีความขาวดังต่อไปนี้

แผ่นที่ 1 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม ใส่ลงในน้ำ 100.00 มิลลิลิตร จากนั้นขึ้นรูปโดยการช้อนด้วยตะแกรงแล้วอบที่ 70.0 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตร้อยละ 81.24 จากนั้นนำไปทดสอบค่าดรรชนีความขาวพบว่าได้ค่าเท่ากับ 24.87

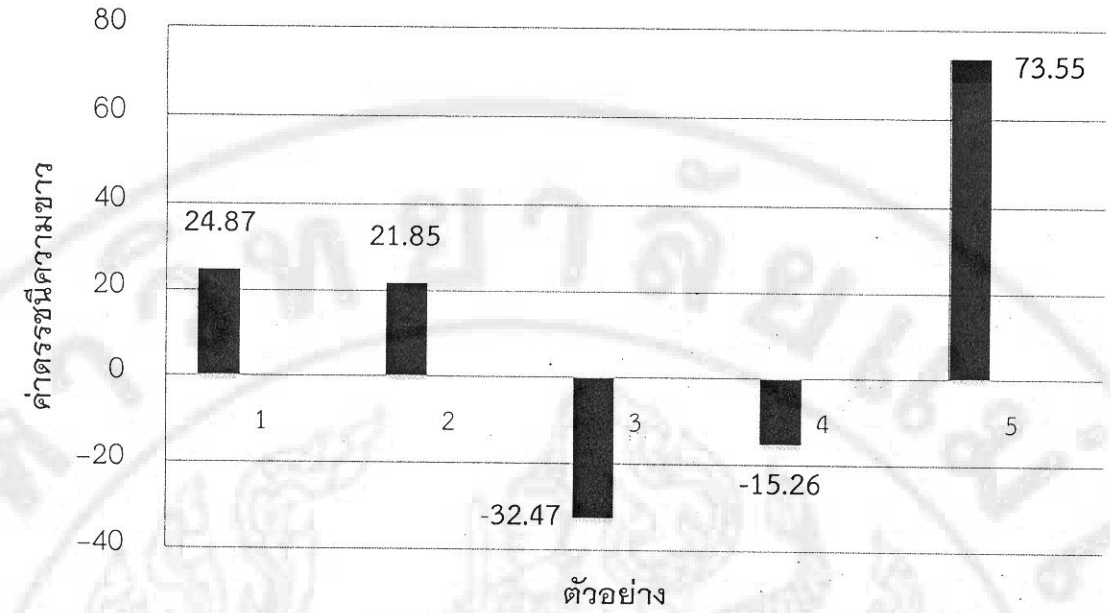
แผ่นที่ 2 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม กำจัดเมือกโดยต้มใน 0.5% v/v กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:30 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกำจัดคลอโรฟิลล์โดยแช่สาหร่ายใน 95% เอทิล แอลกอฮอล์ (95% ethyl alcohol) ในอัตราส่วน 1:20 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างน้ำให้สะอาดก่อนขึ้นรูปโดยการช้อนด้วยตะแกรง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตร้อยละ 36.28 จากนั้นนำไปทดสอบค่าดรรชนีความขาวพบว่าได้ค่าเท่ากับ 21.85

แผ่นที่ 3 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม กำจัดเมือกโดยต้มใน 0.5% v/v กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:30 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการฟอกขาวโดยต้มเยื่อกับโซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$) ความเข้มข้น 2 % w/v พีเอช 3 (ควบคุมโดยใช้ 0.5% v/v กรดซัลฟุริก) ที่อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างน้ำให้สะอาดขึ้นรูปแล้วโดยการช้อนด้วยตะแกรงอบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตร้อยละ 31.40 จากนั้นนำไปทดสอบค่าดรรชนีความขาวพบว่าได้ค่าเท่ากับ -32.47

แผ่นที่ 4 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม กำจัดเมือกโดยต้มใน 0.5% v/v กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:30 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกำจัดคลอโรฟิลล์โดยแช่สาหร่ายใน 95% เอทิล แอลกอฮอล์ (95% ethyl alcohol) ในอัตราส่วน 1:20 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต้มเยื่อกับโซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$) ความเข้มข้น 2 % w/v พีเอช 3 (ควบคุมโดยใช้ 0.5% v/v กรดซัลฟุริก) อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างน้ำให้สะอาดขึ้นรูปโดยการช้อนด้วยตะแกรงแล้วอบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตร้อยละ 25.15 จากนั้นนำไปทดสอบค่าดรรชนีความขาวพบว่าได้ค่าเท่ากับ -15.26

แผ่นที่ 5 ชั่งสาหร่ายน้ำจืดแห้ง 25.00 กรัม กำจัดเมือกโดยต้มใน 0.5% v/v กรดซัลฟุริก (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:30 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกำจัดคลอโรฟิลล์โดยแช่สาหร่ายใน 95% เอทิล แอลกอฮอล์ (95% ethyl alcohol) ในอัตราส่วน 1:20 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต้มเยื่อกับโซเดียมคลอไรท์ ($NaOCl_2$) ความเข้มข้น 2 % w/v พีเอช 3 (ควบคุมโดยใช้ 0.5% v/v กรดซัลฟุริก) ที่อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต้มเยื่อกับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 1%v/v พีเอช 12 (ควบคุมโดยใช้ 2 M โซเดียมไฮดรอกไซด์) อุณหภูมิ 70.0-90.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อล้างคลอรีนที่ตกค้างออก ล้างน้ำให้สะอาดขึ้นรูปโดยการช้อนด้วยตะแกรงแล้วอบที่อุณหภูมิ 70.0 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตร้อยละ 27.40 จากนั้นนำไปทดสอบค่าดรรชนีความขาวพบว่าได้ค่าเท่ากับ 73.55

ซึ่งสามารถสรุปค่าดรรชนีความขาวในรูปของตาราง ดังแสดงในตารางที่ 3.7 และสามารถพล็อตเป็นกราฟแผ่นภูมิแท่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ค่าดรรชนีความขาวของแผ่นเซลลูโลส

หมายเหตุ ตัวอย่าง 1. สาหร่ายน้ำจืด 2. H_2SO_4–EtOH 3. H_2SO_4–$NaOCl_2$ 4. H_2SO_4–EtOH–$NaOCl_2$ และ 5. H_2SO_4–EtOH–$NaOCl_2$–H_2O_2

ตารางที่ 3.7 ค่าดรรชนีความขาวของแผ่นเซลลูโลส

ตัวอย่าง	สภาวะการเตรียมเยื่อ	X	Y	Z	L*	a*	b*	C*	h*	WI
1	สาหร่ายน้ำจืด	4.237	4.477	4.785	25.190	-0.089	0.108	0.140	129.5000	24.87
2	H_2SO_4-EtOH	4.266	4.436	4.550	25.060	0.858	1.070	1.372	51.250	21.85
3	H_2SO_4-$NaOCl_2$	51.460	51.560	25.510	77.020	6.967	36.500	37.160	79.160	-32.47
4	H_2SO_4-EtOH-$NaOCl_2$	71.320	75.360	42.690	89.560	-0.236	34.940	34.940	90.420	-15.26
5	H_2SO_4-EtOH-$NaOCl_2$-H_2O_2	85.220	90.780	86.450	96.320	-1.558	7.590	7.748	101.600	73.55
6	เยื่อ 0.50 กรัม	79.096	84.118	86.281	93.502	-1.252	2.854	3.117	113.713	84.94
7	เยื่อ 1.00 กรัม	78.117	83.212	84.328	93.107	-1.382	3.587	3.844	111.098	82.35
8	เยื่อ 1.50 กรัม	77.123	82.328	80.528	92.719	-1.827	5.733	6.017	107.705	75.52
9	เยื่อ 2.00 กรัม	78.372	83.493	84.073	93.230	-1.521	3.985	4.265	110.919	81.27
10	เยื่อ 1.50 กรัม + 2.5%PEG	77.143	82.221	81.266	92.672	-1.584	5.098	5.338	107.290	86.02
11	เยื่อ 1.50 กรัม + 5%PEG	78.593	83.702	84.916	93.321	-1.473	3.528	3.823	112.688	89.33
12	เยื่อ 1.50 กรัม + 10%PEG	78.002	83.120	82.857	93.067	-1.559	4.597	4.854	108.762	79.28
13	เยื่อ 1.50 กรัม + 15%PEG	76.555	81.701	78.084	92.443	-1.783	7.113	7.333	104.103	71.10

จากค่าดรรชนีความขาวของแผ่นเซลลูโลสที่คำนวณได้ มีบางตัวอย่างได้ค่าติดลบทั้งนี้อาจเนื่องจากตัวอย่างแผ่นเซลลูโลสมีลักษณะใส ความโปร่งแสง ทำให้แสงทะลุผ่าน ทำให้ได้ค่า L* และ b* ที่จะนำมาคำนวณค่าดรรชนีความขาวมีค่าคลาดเคลื่อนไป จึงทำให้ได้ค่าดรรชนีความขาวได้น้อยกว่าความเป็นจริง ส่วนค่าดรรชนีความขาวของแผ่นเซลลูโลสที่เป็นบวกได้เนื่องจากมีแผ่นเซลลูโลสมีความทึบแสง ได้ค่า L* และ b* ที่เป็นจริง ทำให้มีค่าดรรชนีความขาวสูง เมื่อสังเกตด้วยสายตาพบว่าความขาวของแผ่นเซลลูโลสเรียงตามลำดับตัวอย่างดังนี้คือ 5 > 4 > 3 > 2 > 1

3.8 การเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น

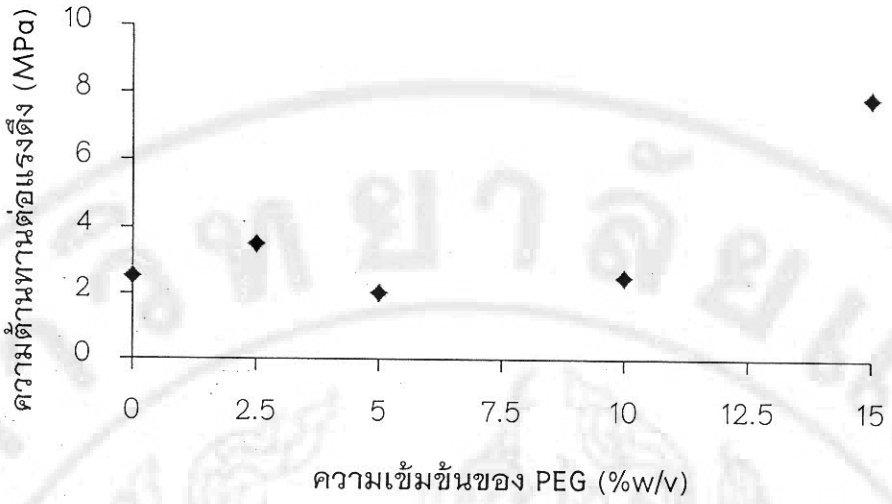
เนื่องจากการเตรียมแผ่นเซลลูโลสโดยวิธีการต่างๆ ไม่สามารถนำไปวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงได้ เนื่องจากแผ่นเซลลูโลสมีความเปราะ ซึ่งอาจเกิดจากการกำจัดเมือกด้วยกรดซัลฟุริกและการฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ จึงทำให้โมเลกุลเส้นใยขาดออกจากกันและสั้นลง ในขั้นตอนการล้างเส้นใยจะหลุดหายไปทำให้มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นเซลลูโลสมีค่าน้อย แผ่นเซลลูโลสที่เตรียมได้ทั้ง 5 แผ่น มีคุณสมบัติใส เปราะ จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่แผ่นเซลลูโลสโดยการเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น (Plasticizer) คือ พอลิเอทิลีนไกลคอล เพื่อเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์โดยการแทรกตัวเข้าไประหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์และเกิดพันธะทุติยภูมิกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์อยู่ห่างกันมากขึ้นกล่าวได้ว่าสารเพิ่มความยืดหยุ่นเป็นตัวลดแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์ลงทำให้สมบัติของพอลิเมอร์มีความอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นมากขึ้น และง่ายต่อกระบวนการดัดแปลงเปลี่ยนรูปทรงเพื่อขึ้นรูปตามแบบต่างๆ โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากนัก สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้ในการทดลองคือพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) โดยนำแผ่นเซลลูโลส 1.50 กรัม ผสมกับ 2.5 5.0 10.0 และ15.0% w/w พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ได้ค่า tensile strength, Elongation at break และ Young Modulus ดังแสดงในตารางที่ 3.8 พบว่าจากกราฟมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) เท่ากับ 3.50 2.04 2.50 และ 7.81 MPa (ดังแสดงในรูปที่ 3.8) และความสามารถในการยืดตัวต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.8 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นเซลลูโลส

ตัวอย่าง	สภาวะการเตรียมเยื่อ	Test No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)
1	เยื่อ 0.50 กรัม	ไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากตัวอย่างเปราะ			
2	เยื่อ 1.00 กรัม	1	1.38	2.13	168.66
		2	2.49	2.38	470.74
		3	2.02	3.19	920.93
	ค่าเฉลี่ย		1.96	2.57	520
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.56	0.55	378.56
3	เยื่อ 1.50 กรัม	1	2.28	1.05	328.12
		2	2.92	1.79	449.45
		3	2.42	1.03	393.34
	ค่าเฉลี่ย		2.54	1.29	390.30
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.34	0.43	60.72
4	เยื่อ 2.00 กรัม	1	2.89	1.10	428.06
		2	2.50	1.20	959.27
		3	1.78	0.65	362.13
	ค่าเฉลี่ย		2.39	0.98	583.15
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.56	0.29	327.39
5	เยื่อ 1.50 กรัม +	1	3.82	0.69	898.01
	2.5%PEG	2	3.33	0.58	655.98
		3	3.36	0.60	1,234.66
	ค่าเฉลี่ย		3.50	0.62	929.55
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.27	0.06	290.63

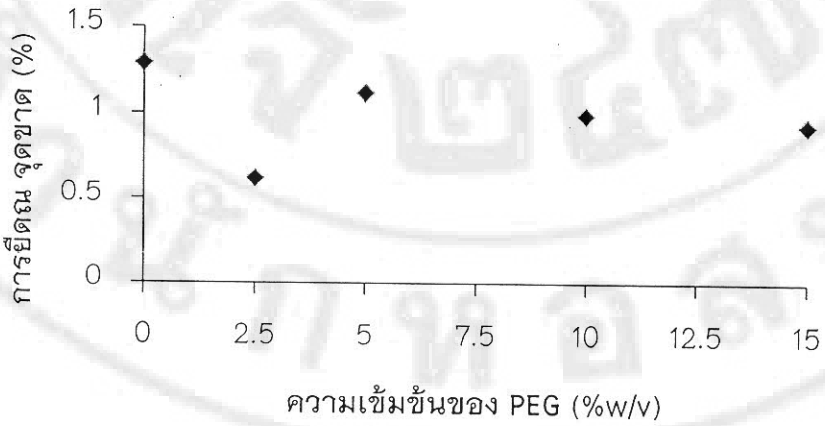
ตารางที่ 3.8 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นเซลลูโลส (ต่อ)

ตัวอย่าง	สภาวะการเตรียมเยื่อ	Test No.	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's Modulus (MPa)
6	เยื่อ 1.50 กรัม + 5%PEG	1	2.00	1.14	704.19
		2	1.98	1.05	548.29
		3	2.15	1.17	1,196.81
	ค่าเฉลี่ย		2.04	1.12	816.43
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.09	0.06	338.52
7	เยื่อ 1.50 กรัม +	1	1.75	1.01	284.17
	10%PEG	2	3.64	1.02	642.88
		3	2.11	0.95	333.26
	ค่าเฉลี่ย		2.50	0.99	420.10
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.00	0.04	194.48
8	เยื่อ 1.50 กรัม +	1	8.52	1.13	965.57
	15%PEG	2	7.15	0.93	938.72
		3	7.76	0.73	1,580.30
	ค่าเฉลี่ย		7.81	0.93	1161.53
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.69	0.2	362.91



รูปที่ 3.8 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นเซลลูโลส 1.5 กรัม ผสมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)

แผ่นเซลลูโลสมีความเปราะ ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากเป็นเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เมื่อมีการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอลในความเข้มข้นในช่วง 5 – 15 %w/v ลงในเซลลูโลส 1.5 กรัม ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นเซลลูโลสมีค่าขึ้นลง แสดงว่าพอลิเอทิลีนไกลคอลไม่มีผลไม่สามารถทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นเซลลูโลสเพิ่มขึ้นได้ อาจเกิดจากความไม่เข้ากันของเซลลูโลสกับพอลิเอทิลีนไกลคอล จึงไม่เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเซลลูโลสและโมเลกุลพอลิเอทิลีนไกลคอล จึงทำให้แผ่นเซลลูโลสมีความเปราะเช่นเดิม



รูปที่ 3.9 การยืดณ จุดขาดของแผ่นเซลลูโลส 1.5 กรัม ผสมพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)

เช่นเดียวกันกับสมบัติการยืด ณ จุดขาด ที่แสดงในรูปที่ 3.8 ที่ไม่แสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อมีการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอลลงในเซลลูโลส ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกันกับความต้านทานต่อแรงดึง คือ อาจเกิดจากความไม่เข้ากันของเซลลูโลสกับพอลิเอทิลีนไกลคอล จึงไม่เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเซลลูโลสและพอลิเอทิลีนไกลคอล จึงทำให้แผ่นเซลลูโลสมีความเปราะเช่นเดิม จึงไม่ได้ทดสอบสมบัติอย่างอื่น เช่น ความเหนียว ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ต่อไป

3.9 การหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ

จากสภาวะการเตรียมเยื่อ ได้เลือกสภาวะในการเตรียมแผ่นเซลลูโลสที่มีความขาวมากที่สุดคือกำจัดเมือกด้วยกรดซัลฟุริก กำจัดคลอโรฟิลล์โดยแช่สาหร่ายในเอทิลแอลกอฮอล์ ฟอกขาวโดยต้มสาหร่ายในโซเดียมคลอไรท์ (ควบคุมพีเอชโดย 0.5% กรดซัลฟุริก) และฟอกขาวโดยต้มสาหร่ายในไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (ควบคุมพีเอชโดย 2 M โซเดียมไฮดรอกไซด์) (H_2SO_4–EtOH–$NaOCl_2$–H_2O_2)แล้ว นำไปขึ้นรูปแล้วนำไปอบ และหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำได้ผลแสดงดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 การหาเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำของแผ่นเซลลูโลส

ตัวอย่างที่	น้ำหนักเปียก (g)	น้ำหนักแห้ง (g)	เปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำ
1	2.6625	0.0355	7,400
2	3.1838	0.0427	7,356
3	3.7777	0.0480	7,770
	เฉลี่ย		7,508.68
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		185.66

แผ่นเซลลูโลสที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ ยังไม่มีสมบัติเหมาะสมในการเป็นกระดาษ เนื่องจากมีลักษณะเปราะ และมีความแข็งแรงต่ำ แต่แผ่นเซลลูโลสจากสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวมีความเหนียวสูงเมื่อเปียกน้ำ อาจจะเนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนเชื่อมระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส แผ่นเซลลูโลสจากสาหร่ายน้ำจืดสีเขียว ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีที่จะพัฒนาต่อไปเป็นวัสดุทางการแพทย์ที่สามารถย่อยสลายได้ เช่น วัสดุรักษาบาดแผล เนื่องจากความเหนียวเมื่อเปียกน้ำ และความสามารถในการดูดซับน้ำที่ดีมาก ซึ่งจะสามารถประยุกต์ใช้ในการดูดน้ำเลือด น้ำเหลือง หรือหนองผู้ป่วยได้

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่าตัวอย่างสาหร่ายเตาที่ศึกษาเป็นสาหร่ายชนิด *Spirogyra neglecta* (Hassall) Kützing เมือกในสาหร่าย สามารถกำจัดได้ด้วยการต้มในน้ำร้อน หรือการใช้กรดซัลฟุริกเข้มข้น 0.5% ส่วนการกำจัดคลอโรฟิลล์สามารถทำได้โดยการใช้อะซีโตนหรือเอทิลแอลกอฮอล์ จากนั้นทำการฟอกจางสีด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และโซเดียมคลอไรท์ พบว่า เยื่อที่ฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีสีจางลง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้น เยื่อที่ได้จากสาหร่ายเปื่อยยุ่ย ส่วนการฟอกขาวด้วยโซเดียมคลอไรท์ให้เยื่อสาหร่ายขาวกว่าเยื่อที่ฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และแผ่นเซลลูโลสมีลักษณะใสทำให้ค่าดรรชนีความขาวเป็นลบ ผลผลิตร้อยละของเยื่อสาหร่ายที่ได้ลดลงตามลำดับ เมื่อนำสาหร่ายมาผ่านกระบวนการต่างๆ ได้แก่ การกำจัดเมือก การกำจัดคลอโรฟิลล์ และฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และโซเดียมคลอไรท์

สาหร่ายจากการกำจัดเมือก การสกัดคลอโรฟิลล์ และการฟอกจางสีสามารถขึ้นเป็นแผ่นได้ และพบว่า แผ่นที่ทำจากสาหร่ายที่ไม่ผ่านการกำจัดเมือก การสกัดคลอโรฟิลล์ และการฟอกจางสีมีความหนามากที่สุด และการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า มีเส้นใยลักษณะแบน ขนาดเล็ก ปรากฏที่ผิวหน้าแผ่นที่ขึ้นมาจากสาหร่าย

การเติมพอลิเอทิลีนไกลคอลลงในเยื่อเซลลูโลสแล้วขึ้นแผ่น ไม่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง และการยืด ณ จุดขาด ของแผ่นเซลลูโลส ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการไม่เข้ากันของโมเลกุลเซลลูโลสและพอลิเอทิลีนไกลคอล จึงไม่เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลซึ่งกันและกัน มีผลให้การต้านทานต่อแรงดึง และการยืด ณ จุดขาดไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลง และค่าเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำของแผ่นเซลลูโลสที่กำจัดเมือกด้วยกรดซัลฟุริก กำจัดคลอโรฟิลล์โดยแช่สาหร่ายในเอทิลแอลกอฮอล์ ฟอกขาวโดยต้มสาหร่ายในโซเดียมคลอไรท์ และฟอกขาวโดยต้มสาหร่ายในไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์สูงมาก ถึง 7508 เปอร์เซ็นต์

จากการศึกษาสภาวะการเตรียมและสมบัติต่างๆ ของแผ่นเซลลูโลสจากสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวสามารถสรุปได้ว่า แผ่นเซลลูโลสยังไม่มีสมบัติเหมาะสมในการเป็นกระดาษ เนื่องจากมีลักษณะเปราะ และมีความแข็งแรงต่ำ แต่แผ่นเซลลูโลสจากสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวมีความเหนียวสูงเมื่อเปียกน้ำ และค่าการดูดซับน้ำสูงมาก ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีในการพัฒนาต่อไปเป็นวัสดุทางการแพทย์ที่สามารถย่อยสลายได้ เช่น วัสดุรักษาบาดแผล เพื่อใช้ในการดูดซับเลือด หนอง หรือน้ำเหลืองผู้ป่วยได้

เอกสารอ้างอิง

เพิ่มศักดิ์ มกราภิรมย์. ความมั่นคงของผืนแผ่นดินไทย ภายใต้ร่มเงายูคาลิปตัส. เข้าถึงได้จาก http://www.http://news.sanook.com/scoop/0/scoop_253343.php 22 ธันวาคม 2556.

ยุวดี พีรพรพิศาล. สาหร่ายวิทยา.เชียงใหม่: ภาควิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.

ปิยธิดา กล่ำภู่. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมสามองค์ประกอบ พอลิ(แลคติก แอซิด) เซลลูโลสอะซิเตทโพรพิโอเนต และสารเพิ่มความยืดหยุ่นสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายทางชีวภาพตัวใหม่, ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2552.

ฐิติกานต์ ปัญโญใหญ่. ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านการอักเสบของสาหร่ายเตา, ภาควิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550.

อรุณี คงดี. คู่มือปฏิบัติการการย้อมสี การวิเคราะห์ และการทดสอบสิ่งทอ. นพบุรีการพิมพ์ จำกัด; เชียงใหม่. 2555.

Y.-B. Seo, Y.-W. Lee, C.-H. Lee and H.-C. You, Red algae and their use in papermaking. *Bioresource Techonolgy*, 101, 2549–2553, 2010.

http://tera.chem.ut.ee/IR_spectra/images/stories/cotton.png