

การเพาะเลี้ยง สาหร่าย ขนาดเล็ก และการใช้ประโยชน์

รศ. ดร. สุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์



การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กและการใช้ประโยชน์

Microalgae Cultivation and Utilizations

สุนีรัตน์ เรืองสมบุญ

Suneerat Ruangsomboon

สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามคัดลอก ตัดตอน หรือนำไปพิมพ์เผยแพร่ต่อ

All right reserved and do not copy, excerpt, print and distribute

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

สุนีรัตน์ เรืองสมบุญ.

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กและการใช้ประโยชน์.- - กรุงเทพฯ : หลักสูตรวิทยาศาสตร์การ
ประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2563.
253 หน้า.

1. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย. 2. สาหร่ายขนาดเล็ก -- การเพาะเลี้ยงและอาหารเลี้ยงเชื้อ. I. ชื่อเรื่อง.

639.89

ISBN (e-book) 978-616-577-009-5

จัดพิมพ์โดย

สุนีรัตน์ เรืองสมบุญ

หลักสูตรวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ถ. ฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 027373000 ต่อ 7086

อีเมล suneerat.ru@kmitl.ac.th

จัดจำหน่ายในรูปแบบ e-book ที่ <https://se-ed.com/s/dbK9>

กล่าวนำ

หนังสือ “การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กและการใช้ประโยชน์” เป็นหนังสือที่ให้ความรู้ด้านการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กและการใช้ประโยชน์ โดยเน้นชนิดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ข้อมูลในหนังสือได้รวบรวมจากตำรา หนังสือ วารสารการวิจัย รวมทั้งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าและวิจัยโดยผู้เขียนที่ได้ทำมานานกว่า 25 ปี หนังสือแบ่งออกได้ 6 บท บทที่ 1 บทนำให้ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสาหร่ายขนาดเล็ก บทที่ 2 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก ให้ความรู้ด้านการเลี้ยงในห้องปฏิบัติการและการเลี้ยงนอกอาคาร รวมทั้งวิธีเก็บเกี่ยว บทที่ 3 กล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยง บทที่ 4-6 กล่าวถึงการนำสาหร่ายขนาดเล็กไปใช้ประโยชน์ต่อมนุษย์และสัตว์ การนำสาหร่ายขนาดเล็กไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงานโดยเฉพาะผลิตไบโอดีเซล และการนำสาหร่ายขนาดเล็กไปใช้ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การบำบัดน้ำเสีย ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังได้รวบรวมองค์ความรู้ใหม่ที่ได้จากงานศึกษาวิจัยของผู้เขียนทั้งด้านการทำเครื่องต้มอะมิโนสบู และการทำเม็ดวุ้นสาหร่ายขนาดเล็ก รวมถึงวิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบหมวมวลโดยเสริมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากโรงไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการปฏิบัติต่อผู้สนใจ โดยวัตถุประสงค์หลักของหนังสือคือเพื่อประกอบการเรียนการสอนวิชา “การใช้ประโยชน์จากสาหร่าย” และเพื่อเป็นแนวทางในการทำปัญหาพิเศษ วิทยานิพนธ์ของนักศึกษา รวมถึงเป็นแนวทางในการทำวิจัยสำหรับนักวิจัย จึงได้จัดทำในรูปแบบที่ให้อ่านมีความรู้และประยุกต์ใช้ในการวางแผนการวิจัยให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ โดยได้แสดงตัวอย่างผลงานวิจัย การวิจารณ์และการสรุปผล ซึ่งผู้อ่านสามารถใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัยหรือเขียนงานตีพิมพ์ สำหรับหนังสือเล่มนี้ใช้คำว่า “สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน” แทน “ไซยาโนแบคทีเรีย” เพื่อให้เป็นคำว่า “สาหร่าย” สอดคล้องกันทั้งเล่ม และการอ้างอิงใช้ระบบตัวเลขเรียงตามลำดับเอกสารที่ใช้อ้างถึง สำหรับภาพและตารางที่ไม่ระบุที่มาคือเป็นของผู้เขียนที่ยังไม่มีการตีพิมพ์เผยแพร่มาก่อน

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ สุภาณิน โล่ห์สวัสดิ์กุล (ลัดดา วงศ์รัตน์) ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้านแพลงก์ตอน ให้คำแนะนำพร้อมกำลังใจระหว่างเขียนหนังสือเล่มนี้ ขอขอบคุณบริษัทบางจากมหาชนและโรงไฟฟ้าบางปะกง โดยผู้เขียนได้นำประสบการณ์จากงานตำแหน่งที่ปรึกษาของหน่วยงานดังกล่าว ด้านการใช้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นแหล่งพลังงาน รวมทั้งการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลีนาโดยการใช้แก๊สที่ปล่อยจากโรงไฟฟ้าบางปะกง มาใช้ประโยชน์ในการเขียนหนังสือเล่มนี้

สุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์

สิงหาคม 2563

สารบัญ

หน้า

กล่าวนำ	I
สารบัญ	II
บทที่ 1 บทนำ	
1 สำหรับขนาดเล็ก	1
2 หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกหมวดหมู่สำหรับขนาดเล็ก	4
2.1 สารสี	4
2.2 อาหารสะสม	4
2.3 ผงเซลล์	5
2.4 หนวด	6
2.5 ลักษณะพิเศษประจำกลุ่มหรือดิวิชัน	6
3 รูปร่างของสำหรับขนาดเล็ก	7
4 คุณสมบัติของสำหรับขนาดเล็ก	9
5 สารชีวโมเลกุลที่สำคัญในสำหรับขนาดเล็กและแนวทางการใช้ประโยชน์	9
5.1 ลิพิด	9
5.2 สารสี	10
5.3 พอลิแซ็กคาไรด์	12
5.4 โปรตีน กรดอะมิโน	13
5.5 วิตามิน	14
5.6 polyphenols	14
5.7 phytosterols	14
5.8 phytohormones	15
6 การใช้ประโยชน์จากสำหรับขนาดเล็กเชิงพาณิชย์	15
บทที่ 2 การเพาะเลี้ยงสำหรับขนาดเล็ก	
1 อาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสำหรับ	17
1.1 การเตรียมอาหารเพาะเลี้ยงสำหรับ	17
1.2 รูปแบบอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสำหรับ	18
1.3 สารอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสำหรับ	19
1.4 สูตรอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสำหรับ	23
2 หัวเชื้อสำหรับ การแยกหัวเชื้อสำหรับจากแหล่งน้ำธรรมชาติ	24
2.1 ข้อควรปฏิบัติในการแยกหัวเชื้อสำหรับ	26
2.2 เทคนิคการแยกเซลล์	27
2.3 การทำให้หัวเชื้อสำหรับปราศจากแบคทีเรียปนเปื้อน	30
2.4 การตรวจสอบการปนเปื้อนของแบคทีเรียในหัวเชื้อสำหรับ	31
2.5 การฆ่าเชื้ออุปกรณ์ ภาชนะเพาะเลี้ยงสำหรับ	32

สารบัญ

	หน้า
2.6 การเก็บรักษาหัวเชื้อสาหร่าย	32
3 รูปแบบการเพาะเลี้ยงสาหร่าย	34
3.1 การแบ่งตามความบริสุทธิ์ของสาหร่ายที่เพาะเลี้ยง	34
3.2 การแบ่งตามระยะเวลาที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย	34
3.3 การแบ่งตามรูปแบบการเก็บเกี่ยวสาหร่าย	34
3.4 การแบ่งตามสถานที่เพาะเลี้ยงสาหร่าย	36
3.5 การแบ่งตามระบบการเพาะเลี้ยงสาหร่าย	38
4 วิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่าย	40
4.1 หัวเชื้อสาหร่าย	40
4.2 การกรองน้ำและการฆ่าเชื้อโรค	42
4.3 วิธีการเพาะเลี้ยงแบบปลอดเชื้อ	43
4.4 วิธีการเพาะเลี้ยงแบบไม่ปลอดเชื้อ	44
5 วิธีวัดการเจริญเติบโตและชีวมวล	46
5.1 การนับเซลล์	46
5.2 การวัดค่าแอมบอร์แบนซ์หรือความขุ่น	46
5.3 การวัดน้ำหนักแห้ง	48
5.4 การวัดค่าคลอโรฟิลล์	48
5.5 วัดปริมาตรเซลล์สาหร่าย	50
5.6 กราฟการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก	50
5.7 สาเหตุการตายของสาหร่าย	52
6 การเก็บเกี่ยวผลผลิตและการทำแห้งสาหร่ายขนาดเล็ก	52
6.1 การหมุนเหวี่ยง	54
6.2 กระบวนการผ่านเยื่อกรอง	54
6.3 การจับก้อนและการเกาะกลุ่มตกตะกอน	55
6.4 กระบวนการลอย	59
6.5 วิธีการเก็บผลผลิตสาหร่ายที่เหมาะสม	61
7 การทำแห้งสาหร่าย	64
บทที่ 3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก	
1 แสง	65
2 อุณหภูมิ	66
3 พีเอช	66
4 ความเค็ม	67
5 คาร์บอนไดออกไซด์	67
6 ฮอโมน	67

สารบัญ

หน้า

7 ปัจจัยอื่น ๆ	68
7.1 ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ	68
7.2 ค่าความกระด้างของน้ำ	68
7.3 การให้พองอากาศการกวนผสมน้ำ	68
8 ตัวอย่างการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กน้ำจืด <i>Botryococcus braunii</i>	69
8.1 การเพาะเลี้ยง <i>Botryococcus braunii</i> ระดับห้องปฏิบัติการ	70
8.2 การเพาะเลี้ยง <i>Botryococcus braunii</i> แบบหมวมวล	75
8.3 การเก็บเกี่ยวผลผลิตและทำแห้ง	80
9 ตัวอย่างการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กน้ำจืดสไปรูลินา (<i>Spirulina platensis</i>)	82
9.1 การเพาะเลี้ยงสไปรูลินาระดับห้องปฏิบัติการ	82
9.2 การเพาะเลี้ยงสไปรูลินาแบบหมวมวล	85
9.3 การเก็บเกี่ยวผลผลิต	90
9.4 การเพาะเลี้ยงสไปรูลินาแบบหมวมวลโดยเสริมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้า	92
9.5 การเก็บเกี่ยวผลผลิตระดับหมวมวลและการตากแห้ง	99
บทที่ 4 การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายขนาดเล็กต่อมนุษย์และสัตว์	
1 การใช้ประโยชน์ด้านอาหารมนุษย์	102
1.1 ที่มาและประวัติการใช้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นอาหารสำหรับมนุษย์	102
1.2 การใช้สาหร่ายขนาดเล็กในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ	104
1.3 การใช้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นอาหารนักบินอวกาศ	105
1.4 ผลิตภัณฑ์อาหารเสริมจากสาหร่ายขนาดเล็ก	106
1.5 ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มจากสาหร่ายสไปรูลินาหรือเครื่องดื่มอะมิโน	107
1.6 การทำเม็ดยูโนสาหร่ายหรือการตรึงเซลล์สาหร่ายในวุ้น	109
2 การใช้ประโยชน์ด้านยา	111
3 การใช้ประโยชน์ด้านเครื่องสำอาง	115
4 การใช้ประโยชน์ด้านอาหารสัตว์น้ำ	118
5 การใช้ประโยชน์ด้านการปลูกพืช	120
5.1 การเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสาหร่าย	121
5.2 ความเป็นพิษของสาหร่ายขนาดเล็กต่อไร่น้ำและกุ้งฝอย	122
5.3 การใช้สาหร่ายขนาดเล็กกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช	122
5.4 การใช้สาหร่ายขนาดเล็กเพื่อกำจัดวัชพืช	124
6 การใช้สาหร่ายขนาดเล็กกำจัดไรฝุ่น	126
7 การใช้สาหร่ายขนาดเล็กทำสบู่ยับยั้งแบคทีเรีย	128
8 การใช้ประโยชน์ด้านผลิตพลาสติกชีวภาพ	129

สารบัญ	
	หน้า
8.1 การผลิตพลาสติกชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็ก	130
8.2 วัสดุสำหรับผสมสาหร่ายเพื่อผลิตพลาสติกชีวภาพ	133
บทที่ 5 การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายขนาดเล็กด้านเชื้อเพลิงชีวภาพ	
1 เชื้อเพลิงชีวภาพจากสาหร่าย	135
1.1 ไบโอดีเจนจากสาหร่าย	136
1.2 ไบโอเอทานอลจากสาหร่าย	137
1.3 ไบโอมีเทนจากสาหร่าย	138
1.4 ไบโอดีเซลจากสาหร่าย	139
2 การใช้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล	142
2.1 แนวความคิดการผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่าย	142
2.2 การคัดเลือกสาหร่ายเพื่อเป็นวัตถุดิบผลิตไบโอดีเซล	145
3 ปัจจัยในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่ส่งผลต่อผลผลิตลิพิด	149
3.1 สูตรอาหารในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย	149
3.2 ไนโตรเจน	150
3.3 ฟอสฟอรัส	153
3.4 เหล็ก	154
3.5 ปฏิสัมพันธ์ของไนโตรเจนและเหล็ก	155
3.6 ปฏิสัมพันธ์ของฟอสฟอรัสและเหล็ก	156
3.7 ความเค็ม	157
3.8 แสง	158
3.9 ระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง	159
3.10 คาร์บอนไดออกไซด์	160
3.11 วิตามิน	165
4 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก <i>Botryococcus braunii</i> แบบหมวมวลเพื่อเป็นแหล่งผลิตไบโอดีเซล	171
4.1 การเพาะเลี้ยงแบบ outdoor ใน oval pond และ raceway pond	171
4.2 การเพาะเลี้ยงแบบ outdoor ใน open pond และ closed photobioreactor	175
5 วิธีการคำนวณผลผลิตลิพิดและคุณสมบัติไบโอดีเซล	178
บทที่ 6 การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายขนาดเล็กด้านสิ่งแวดล้อม	
1 การใช้สาหร่ายขนาดเล็กบำบัดน้ำเสีย	179
1.1 การบำบัดน้ำเสีย	179
1.2 การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ	180
1.3 การใช้สาหร่ายขนาดเล็กในการบำบัดน้ำเสีย	181
1.4 การจัดการสาหร่ายขนาดเล็กหลังการบำบัดน้ำเสีย	182

สารบัญ

หน้า

2 บทบาทของหมู่ฟังก์ชันในสหายต่อการบำบัดน้ำเสีย	182
3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสหายขนาดเล็กในการบำบัดน้ำเสีย	184
3.1 พีเอช	184
3.2 ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและน้ำเสีย	185
3.3 ปริมาณหรือความหนาแน่นของตัวดูดซับชีวภาพ	185
3.4 ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน	185
3.5 อุณหภูมิ	185
4 ไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับน้ำเสียโดยสหายขนาดเล็ก	186
4.1 สมการสมดุลและไอโซเทอร์มการดูดซับ	186
4.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับ	187
4.3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ	189
5 การใช้สหายขนาดเล็กบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน	195
5.1 ปัญหาที่เกิดจากโลหะหนัก	195
5.2 การวิจัยการใช้สหายขนาดเล็กบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน	197
6 การใช้สหายขนาดเล็กบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน	208
6.1 ปัญหาที่เกิดจากสีย้อม	208
6.2 การวิจัยการใช้สหายขนาดเล็กบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน	209
7 การใช้สหายขนาดเล็กบำบัดน้ำเสียที่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสปนเปื้อน	214
7.1 ปัญหาที่เกิดจากไนโตรเจนและฟอสฟอรัส	215
7.2 การวิจัยการใช้สหายขนาดเล็กบำบัดน้ำเสียที่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสปนเปื้อน	215
8 เกณฑ์การใช้สหายมีชีวิตเพื่อดูดซับสารปนเปื้อนในระบบบำบัดน้ำเสีย	220
9 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยสหายขนาดเล็ก (<i>Spirulina</i> , <i>Botryococcus</i>)	221
บรรณานุกรม	224
ดัชนี	243

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

สาหร่ายขนาดเล็กมีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายรูปแบบตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน แต่เนื่องจากไม่สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตจากแหล่งน้ำธรรมชาติได้ หรือบางสกุล เช่น *Spirulina* ในบางประเทศสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตจากแหล่งน้ำธรรมชาติได้แต่ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการนำไปใช้ประโยชน์ จึงต้องมีการเพาะเลี้ยงเพื่อให้ได้ผลผลิตสาหร่ายที่เพียงพอในการนำมาใช้ ทั้งเพื่อการใช้เป็นอาหารมนุษย์ อาหารสัตว์ เป็นผลิตภัณฑ์อาหารเสริม และยา เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง ใช้ด้านการเกษตร เช่น ใช้เร่งการเจริญเติบโตของพืช หรือใช้กำจัดวัชพืช ศัตรูพืชทางการเกษตร ใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบเพื่อผลิตพลังงาน หรือใช้ด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ใช้บำบัดน้ำเสีย ใช้ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือใช้เพื่อการศึกษาวิจัย เป็นต้น โดยการนำมาใช้ประโยชน์จำเป็นต้องเพาะเลี้ยงสาหร่ายชนิดที่ต้องการให้มีปริมาณมากและมีคุณภาพตรงตามความต้องการนำไปใช้ประโยชน์ การเพาะเลี้ยงจึงต้องทำในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตหรือต่อองค์ประกอบทางชีวเคมีของสาหร่ายชนิดนั้น ๆ ดังนั้นผู้ประสงค์เพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อนำไปใช้ประโยชน์จึงต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของสาหร่ายขนาดเล็ก องค์ประกอบทางชีวเคมีของสาหร่ายที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ วิธีการเพาะเลี้ยงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลผลิตสาหร่ายปริมาณมากและมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน รวมถึงต้องศึกษาวิธีการเก็บเกี่ยว และการนำไปแปรรูปหรือไปใช้งานอย่างเหมาะสม จึงจะสามารถใช้ประโยชน์จากสาหร่ายขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1 สาหร่ายขนาดเล็ก

สาหร่ายขนาดเล็ก (microalgae) เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่มีสารสี (pigment) ในเซลล์ มีการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) สร้างอาหารได้ด้วยตัวเอง สามารถมองเห็นรูปร่างลักษณะของสาหร่ายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ พบสาหร่ายขนาดเล็กได้ทั้งในน้ำกร่อย น้ำจืด และน้ำเค็ม โดยมีทั้งกลุ่มที่ดำรงชีวิตแบบลอยอิสระในน้ำ กลุ่มที่ยึดเกาะกับพืชน้ำหรือวัสดุต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำ และกลุ่มที่เจริญเติบโตบริเวณที่ชื้นแฉะ การจัดกลุ่มของสาหร่ายขนาดเล็กโดยทั่วไปใช้ลักษณะหลักในการแยกกลุ่มคือประเภทของสารสีที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ประเภทของอาหารสะสม ลักษณะของการเคลื่อนไหวหรือลักษณะการมีหรือไม่มีหนวด จำนวนหนวด ประเภทของหนวดและตำแหน่งของหนวด ลักษณะองค์ประกอบของผนังเซลล์ และรายละเอียดเฉพาะอย่างที่เป็นลักษณะเด่นของแต่ละกลุ่ม ได้มีการจัดลำดับทางอนุกรมวิธานของสาหร่ายขนาดเล็กโดยนักวิจัยทางด้านสาหร่าย โดยจัดเป็นกลุ่มใหญ่และแบ่งเป็นกลุ่มย่อย ซึ่งได้แสดงลักษณะของสารสีและอาหารสะสมของแต่ละดิวิชันไว้ในตารางที่ 1.1 โดยข้อมูลเหล่านี้สามารถใช้ประกอบการพิจารณาคัดเลือกชนิดสาหร่ายที่เหมาะสมมาเพาะเลี้ยงเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ได้

ตารางที่ 1.1 สารสีและอาหารสะสมของสาหร่ายขนาดเล็กแต่ละดิวิชัน

กลุ่ม	สารสี	อาหารสะสม
Division Cyanophyta		
Class Cyanophyceae (blue-green algae/cyanobacteria)	chlorophyll a, β -carotene phycocyanin, phycoerythrin	cyanophycean starch
Division Rhodophyta		
Class Rhodophyceae (red algae)	chlorophyll a, α , β -carotene/ xanthophylls, phycocyanin, phycoerythrin/	floridean starch
Division Chlorophyta		
Class Chlorophyceae (green algae)	chlorophyll a, b, α , β , δ - carotene/ xanthophyll	starch
Class Prasinophyceae (prasinophytes)	chlorophyll a, b, β , δ - carotene/ xanthophyll	starch
Class Euglenophyceae (euglenoids)	chlorophyll a, b, β -carotene/ xanthophyll	paramylon
Division Chromophyta		
Class Bacillariophyceae (diatoms)	chlorophyll a, c, β , δ -carotene/ xanthophyll	chrysolaminarin
Class Dinophyceae (dinoflagellates)	chlorophyll a, c, β -carotene/ xanthophyll	starch
Class Eustigmatophyceae (eustigmatophytes)	chlorophyll a, c, β -carotene/ xanthophyll	starch
Class Prymnesiophyceae (prymnesiophytes, coccolithophores)	chlorophyll a, c, β , δ -carotene/ xanthophyll	chrysolaminarin
Class Chrysophyceae (golden brown algae/chrysophytes)	chlorophyll a, c, β , δ -carotene/ xanthophyll	chrysolaminarin
Class dictyochophyceae (silicoflagellates/ dictyochophytes)	chlorophyll a, c, β , δ - carotene/ xanthophyll	chrysolaminarin
Class Cryptophyceae	chlorophyll a, c, α , β , ϵ - carotene/ xanthophyll	starch

ที่มา : กาญจนภาชน (2527)^[1], ลัดดา (2542)^[2], Round (1990)^[3]

สาหร่ายขนาดเล็กในแต่ละดิวิชันที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ได้แก่

1) Division Cyanophyta สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน/ไซยาโนแบคทีเรีย (blue-green algae/cyanobacteria) สกุลและชนิดที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Spirulina (Arthrospira) platensis*, *Nostoc commune*, *Microcystis* spp., *Anabaena* spp., *Oscillatoria* spp., *Hapalosiphon* spp.

2) Division Rhodophyta สาหร่ายสีแดง (red algae) สกุลและชนิดที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Cyanidioschyzon merolae*, *Porphyridium* spp., *Galdieria sulphuraria*

3) Division Chlorophyta

สาหร่ายสีเขียว (green algae) สกุลและชนิดที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Botryococcus braunii*, *Haematococcus pluvialis*, *Chlorella* spp., *Scenedesmus* spp., *Desmodesmus* spp., *Pediastrum* spp., *Ankistrodesmus* spp., *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorococcum littorale*

พราซิโนไฟต์ (Prasinophytes) สกุลที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Tetraselmis* spp.

ยูกลีโนอยด์ (euglenoids) ชนิดที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Euglena gracilis*

4) Division Chromophyta

ไดอะตอม (diatoms) สกุลและชนิดที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Chaetoceros calcitrans*, *Chaetoceros gracilis*, *Thalassiosira* spp., *Skeletonema costatum*, *Navicula* spp.

ไดโนแฟลเจลเลต (dinoflagellates) สกุลและชนิดที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Noctiluca scintillans*, *Alexandrium* spp., *Prorocentrum* spp., *Dinophysis acuminata*

ยูสติโกมาโตไฟต์ (Eustigmatophytes) สกุลที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Nannochloropsis* spp.

พริมเนซิโอไฟต์/แฮพโตไฟต์ (Prymnesiophytes/Haptophytes) สกุลที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Isochrysis* spp.

คอคโคลิโธฟอร์/คอคโคลิโธฟอร์ริด (coccolithophores/coccolithophorids) ชนิดที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Coccolithus pelagicus*, *Pleurochrysis carterae*, *Emiliania huxleyi*

สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง/คริโซไฟต์ (golden brown algae/chrysophytes) สกุลและชนิดที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Prymnesium parvum*, *Dinobryon* spp.

ซิลิโคแฟลเจลเลต/ดิคไทโอโคไฟต์ (silicoflagellates/dictyochophytes) สกุลที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Dictyocha* spp.

คริปโตโมแนด/คริปโตไฟต์ (cryptomonads/ cryptophytes) สกุลและชนิดที่นิยมเพาะเลี้ยง เช่น *Cryptomonas* spp., *Rhodomonas* spp.

**หมายเหตุ แพลงก์ตอนพืช (phytoplankton) เป็นสาหร่ายขนาดเล็กกลุ่มที่ดำรงชีวิตแบบลอยอิสระในน้ำเท่านั้น ไม่รวมกลุ่มสาหร่ายขนาดเล็กที่เจริญเติบโตแบบยึดเกาะกับวัสดุอื่น ๆ หรือเจริญเติบโตบนดินหรือพื้นที่ชื้นแฉะ

2 หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกหมวดหมู่สาหร่ายขนาดเล็ก^[2]

2.1 สารสี

การที่สาหร่ายขนาดเล็กมีสีต่าง ๆ ทั้งสีเขียวแกมน้ำเงิน สีเขียว สีน้ำตาลแกมทอง ฯลฯ เนื่องจากมีสารสี (pigment) ประกอบอยู่ในสาหร่ายขนาดเล็กนั่นเอง โดยสารสีหลัก ๆ มี 3 กลุ่มคือ

1) คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) เป็นสารสีที่มีสีเขียว ซึ่งประกอบด้วย chlorophyll a, b, c, d และ e ละลายในสารอินทรีย์ สารที่นิยมใช้สกัดคลอโรฟิลล์ได้แก่เมทานอล โดยคลอโรฟิลล์-เอ สามารถพบได้ในสาหร่ายขนาดเล็กทุกชนิด และคลอโรฟิลล์ทุกตัวจะทำหน้าที่ในการดูดกลืนแสง แต่มีเพียงคลอโรฟิลล์-เอ เท่านั้นที่สามารถเกิดการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ ส่วนคลอโรฟิลล์ตัวอื่น ๆ จะทำหน้าที่ดูดกลืนแสงและส่งต่อไปให้คลอโรฟิลล์-เอ เพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง

2) แคโรทีนอยด์ (carotenoid) มีหน้าที่รับแสงและส่งต่อไปยังคลอโรฟิลล์โดยแสงยังน้อยยิ่งพบแคโรทีนอยด์มาก โดยแคโรทีนอยด์แบ่งเป็นสองกลุ่มหลัก ๆ คือ แคโรทีน (carotene) มีสีส้ม และ แซนโทฟิลล์ (xanthophyll) มีสีเหลือง ซึ่งแคโรทีนแบ่งออกได้เป็น α , β , δ , ϵ -carotene โดยในสาหร่ายขนาดเล็กทุกชนิดจะพบว่ามี β -carotene เป็นสารสีช่วยในการสังเคราะห์ด้วยแสงอยู่ ส่วนแซนโทฟิลล์แบ่งเป็นประเภทย่อย ๆ ได้อีก เช่น lutein, fucoxanthin, myxoxanthophyll ฯลฯ ในการสกัดสารสีกลุ่มนี้พบว่าแคโรทีนละลายได้ดีในปิโตรเลียมอีเธอร์ ส่วนแซนโทฟิลล์นั้นละลายได้ดีใน 90 เปอร์เซ็นต์ ของเมทานอล โดยในแคโรทีนอยด์ทั้งหมดจะประกอบด้วยสัดส่วนของแคโรทีน:แซนโทฟิลล์ เท่ากับ 3:2

3) ไฟโคบิลิน (phycobilin) เป็นสารสีที่รวมอยู่กับโปรตีนในรูปไฟโคบิลิโปรตีน (phycobiliprotein) สามารถละลายได้ดีในน้ำจึงใช้น้ำเป็นตัวสกัดสารสีชนิดนี้ หน้าที่ของไฟโคบิลินคือมีหน้าที่รับแสงและส่งต่อไปยังคลอโรฟิลล์ โดยไฟโคบิลินแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ได้คือไฟโคไซยานิน (phycocyanin) แอลโลไฟโคไซยานิน (allophycocyanin) มีสีน้ำเงิน และไฟโคอีริทริน (phycoerythrin) ซึ่งมีสีแดง โดยไฟโคบิลินจะพบได้ในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและสีแดง

สารสีทุกชนิดที่อยู่ในเซลล์จะรวมอยู่ในออร์แกเนลล์ (organelle) ที่เรียกว่าพลาสทิด (plastid) ซึ่งมีรูปร่างที่แน่นอน ยกเว้นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินซึ่งสารสีกระจายอยู่ทั่วไปในไซโทพลาซึม (cytoplasm) พลาสทิดมี 2 ชนิด คือลิวโคพลาสต์ (leucoplast) เป็นพลาสทิดไม่มีสี ส่วนพลาสทิดที่มีสีมีชื่อเรียกต่างกัน 2 ชื่อ คือถ้ามีสีเขียวเรียกว่าคลอโรพลาสต์ ถ้ามีสีออกสีเหลือง ส้ม หรือ แดง เรียกว่าโครโมพลาสต์ (chromoplast) คลอโรพลาสต์ และโครโมพลาสต์ มีรูปร่างลักษณะและจำนวนแตกต่างกันไปอาจมี 1-2 อัน หรือมีจำนวนมากมายนับไม่ถ้วน

2.2 อาหารสะสม

อาหารสะสม (storage product) เป็นผลจากการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งเป็นการใช้พลังงานแสงเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนที่ได้มาจากน้ำหรือจากแหล่งไฮโดรเจนอื่น ๆ ให้เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ผลจากการสังเคราะห์ด้วยแสงจะได้น้ำตาลซึ่งนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการหายใจ

อาหารสะสมประเภทแป้ง (starch) แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส โดยการเรียงตัวของกลูโคสหรือการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะและตำแหน่งต่างกันทำให้แป้งมีคุณสมบัติต่างกันและมีชื่อเรียกต่างกัน (ตารางที่ 1.1) เช่น starch จะหมายถึงแป้งอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพกทิน (amylopectin) ซึ่งเป็นอาหารสะสมชนิดเดียวกับที่พบในพืชชั้นสูง ตัวอย่างกลูโคสที่มีการเรียงตัวต่างกันทำให้เกิดแป้งชนิดต่างกัน เช่น

1) amylose เกิดจากกลูโคสเรียงต่อกันเป็นสายตรง ต่อกันแบบ α 1, 4 เมื่อทำปฏิกิริยากับ ไอโอดีนให้สีน้ำเงิน เมื่อต้มสุกลักษณะขาวขุ่น เป็นเจลที่แข็งแรง

2) amylopectin เกิดจากกลูโคสเรียงต่อกันเป็นสายตรงและสายแขนง ต่อกันแบบ α 1, 4 และ α 1, 6 เมื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีนให้สีม่วงแดง เมื่อต้มสุกลักษณะใส เหนียว

3) cyanophycean starch เกิดจากกลูโคสเรียงต่อกันแบบ α 1, 4 glucan ทำปฏิกิริยากับ ไอโอดีนได้สีน้ำตาลปนแดง

4) chrysolaminarin หรือ leucosin เกิดจากกลูโคสมาเรียงต่อกันเป็นสายตรง ต่อกันแบบ β 1, 4 และ β 1, 6 เมื่อย้อมสีด้วย cresyl blue จะติดสีชมพู

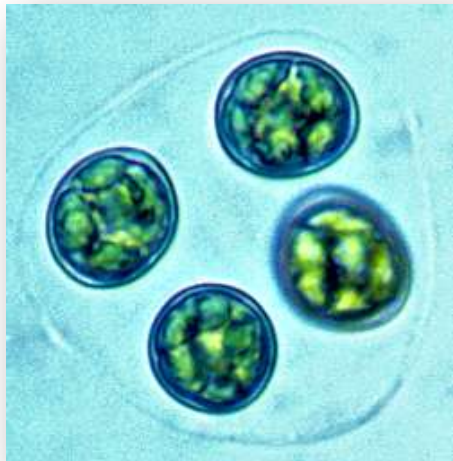
5) floridean starch เกิดจากกลูโคสเรียงต่อกันเป็นสายตรงและสายแขนง ต่อกันแบบ α 1, 4 และตำแหน่งแตกแขนงเชื่อมต่อบนแบบ α 1, 6 (คล้ายกับ amylopectin แต่ตำแหน่งในการแตกแขนงต่างจาก amylopectin จึงมีคุณสมบัติต่างกัน) เมื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีนให้สีน้ำตาลแดง หรือสีม่วง

6) paramylon เกิดจากกลูโคสเรียงต่อกันแบบ β 1, 3 glucan เมื่อมองภายใต้กล้องจุลทรรศน์จะ เห็นเป็นก้อนหรือแท่งใส ไม่มีสี

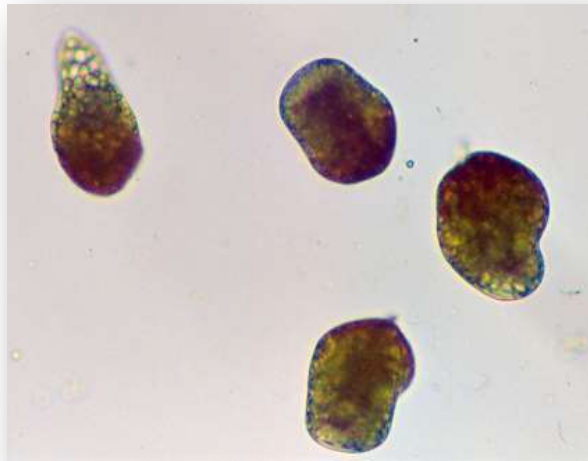
อาหารสะสมประเภทลิพิด (lipid) เป็นอาหารสะสมที่พบบ่อยมากในไดอะตอม สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง ไดโนแฟลเจลเลต และพบในสาหร่ายขนาดเล็กกลุ่มอื่นแต่มีปริมาณน้อย ลิพิดที่พบบ่อยจะพบในลักษณะเป็นเม็ดกลม ใสไม่มีสี

2.3 ผนังเซลล์

เซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็กคล้ายกับเซลล์ของพืชทั่วไป ประกอบด้วยโครงสร้างที่สำคัญคือผนังเซลล์ (cell wall) ไซโทพลาซึม และนิวเคลียส โดยผนังเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็กเป็นสารพวก carbohydrate หรือ silicate สาหร่ายขนาดเล็กบางสกุลผนังเซลล์จะมีส่วนโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย เช่น ผนังเซลล์ของไดอะตอม บางชนิดประกอบด้วย โปรตีน ลิพิด มิวโคเพปไทด์ (mucoprotein) และเซลลูโลส ฯลฯ และที่ภายนอกของผนัง เซลล์อาจมีส่วนของหิโนนูน เหล็ก หรือ chitin หุ้มอยู่ โดยทั่วไปแล้วผนังเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็กจะมี 2 ชั้น แต่มี ยกเว้นในสาหร่ายขนาดเล็กบางชนิดซึ่งอาจมีส่วนของผนังเซลล์ถึง 3 ชั้น พวกสาหร่ายขนาดเล็กที่มีผนังเซลล์ 2 ชั้น นั้น ผนังเซลล์ชั้นนอกจะเป็นสารเมือก (gelatinous sheath) หรือมีลักษณะอ่อนนุ่ม ละลายในน้ำเดือด หรืออาจเป็น สารพวกเพกทิน (pectin) ส่วนผนังเซลล์ชั้นในของสาหร่ายขนาดเล็กนั้นจะเป็นสารพวกเซลลูโลส (cellulose) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ทำให้รูปร่างของเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กคงที่ ให้ความแข็งแรงกับเซลล์ทำให้เซลล์สามารถคง รูปร่างอยู่ได้ ส่วนในสาหร่ายขนาดเล็กบางพวกพบว่าไม่มีผนังเซลล์ที่แท้จริงมีเพียงเยื่อหุ้มเซลล์ (plasma membrane หรือ plasmalemma) ทำหน้าที่เหมือนผนังเซลล์ซึ่งเรียกผนังเซลล์แบบนี้ว่า periplast หรือ pellicle ผนังเซลล์แบบนี้บางชนิดอาจแข็งบางชนิดอาจอ่อน และในบางชนิดสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ซึ่ง ขึ้นอยู่กับลักษณะการเรียงตัวของแผ่นผนังเซลล์ (ภาพที่ 1.1)



สารเมือกที่หุ้มเซลล์ (gelatinous sheat)



สาหร่ายขนาดเล็กที่เปลี่ยนรูปร่างได้

ภาพที่ 1.1 ลักษณะของสารเมือกที่หุ้มเซลล์ (gelatinous sheat) และตัวอย่างสาหร่ายขนาดเล็กที่เปลี่ยนรูปร่างได้

2.4 หนวด

หนวด (flagella) เป็นโครงสร้างที่ใช้ในการเคลื่อนที่ซึ่งอาจพบทั้งในเซลล์ปกติ (vegetative cell) หรือเซลล์สืบพันธุ์ (reproductive cell) ของสาหร่ายขนาดเล็กทุกดิวิชัน ยกเว้นไม่พบในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและสาหร่ายสีแดง อาจมีตั้งแต่ 1, 2, 4, 8 เส้น จนถึงจำนวนมาก หนวดจะมีตำแหน่งที่อยู่หลายตำแหน่งแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของสาหร่ายขนาดเล็ก โดยตำแหน่งที่อยู่ของหนวดหลัก ๆ เช่น ตำแหน่งด้านบนสุดของเซลล์ ด้านบนแต่อยู่ก่อนมาทางด้านข้างของเซลล์ ด้านข้างของเซลล์ ด้านล่างของเซลล์ รูปแบบของหนวดมีได้หลากหลายมีทั้งแบบเรียบและแบบมีขน

2.5 ลักษณะพิเศษประจำกลุ่มหรือดิวิชัน

ลักษณะพิเศษมีประโยชน์ในการจำแนกเบื้องต้น ซึ่งลักษณะพิเศษจะพบเฉพาะกลุ่มสาหร่ายขนาดเล็กบางกลุ่มเท่านั้น เช่น

1) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีโครงสร้างแบบพีชชั้นต่ำ (prokaryotic cell) คือเซลล์ยังไม่มีนิวเคลียสที่แท้จริง (ไม่มีผนังหุ้มนิวเคลียส) ซึ่งต่างจากสาหร่ายขนาดเล็กในกลุ่มอื่น ซึ่งเป็นพวก eukaryote nucleus คือเป็นพวกที่มีนิวเคลียสแยกจาก cytoplasm อย่างแท้จริง นอกจากนี้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินยังไม่มีคลอโรพลาสต์ ดังนั้นสารสีจึงกระจายอยู่ทั่วไปในไซโทพลาซึม ผนังเซลล์ประกอบด้วยมิวโคเพปไทด์

2) ไดอะตอมมีลักษณะพิเศษคือเซลล์ประกอบด้วยฝา 2 ฝา ครอบกันพอดี ผนังเซลล์จะประกอบด้วยซิลิกาและมีลวดลายต่าง ๆ บนฝา

3) ไดโนแฟลเจลเลตมีลักษณะพิเศษต่างจากกลุ่มอื่นคือเซลล์แบ่งออกเป็น 2 ซีก (ซีกบนและล่าง) ด้วยร่องตามขวางเซลล์ (cingulum หรือ girdle) และจุดตั้งต้นของหนวดอยู่ที่ด้านท้อง หรือเซลล์แบ่งออกเป็น 2 ซีก (ซีกซ้ายและซีกขวา) โดยจุดตั้งต้นของหนวดอยู่ด้านบนสุดของเซลล์

3 รูปร่างของสาหร่ายขนาดเล็ก

1) unicellular form/unicell ลักษณะของสาหร่ายขนาดเล็กที่เป็นเซลล์เดี่ยว อาจเคลื่อนที่ได้หรือไม่ได้ และเรียกสาหร่ายขนาดเล็กเซลล์เดี่ยวที่เคลื่อนที่ได้ว่า motile uncel/flagellate uncel โดยพบว่าพวกที่มีหนวดจะเป็นพวกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ส่วนพวกที่ไม่มีหนวดอาจเป็นพวกที่เคลื่อนที่แบบ amoeba หรืออาจเคลื่อนที่ไม่ได้เลย non-motile uncel (ภาพที่ 1.2)

2) colony (โคโลนี) ลักษณะเป็นกลุ่มเซลล์คือเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็กที่มีรูปร่างเหมือนกันทำหน้าที่อย่างเดียวกันมาอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม โดยแบ่งการรวมกลุ่มเป็นรูปแบบย่อยได้อีกคือ

coenobium colony ลักษณะเป็นกลุ่มเซลล์ที่มีจำนวนเซลล์แน่นอน มีการเรียงตัวของเซลล์เป็นระเบียบ เมื่อมีการขาดหรือหักของเซลล์จะไม่มีการสร้างขึ้นมาใหม่เพื่อทดแทน เช่น *Scenedesmus*, *Pediastrum*

aggregate colony ลักษณะเป็นกลุ่มเซลล์ของสาหร่ายขนาดเล็กที่มีจำนวนเซลล์ไม่แน่นอน สร้างขึ้นมาใหม่ได้เมื่อมีการขาด หักของเซลล์ออกไป เช่น *Botryococcus*, *Microcystis*

dendroid colony ลักษณะเป็นกลุ่มเซลล์ที่มีก้านมาเชื่อมต่อระหว่างเซลล์รวมเข้าเป็นกลุ่มไว้ด้วยกัน หรือมีส่วนโคนของแต่ละเซลล์มาแตะกันเชื่อมเป็นกลุ่มเซลล์ เช่น *Dictyosphaerium*, *Dinobryon*

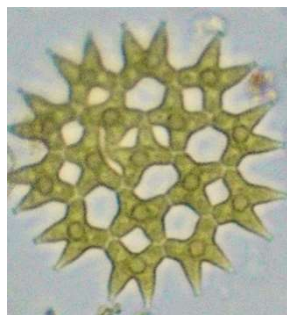
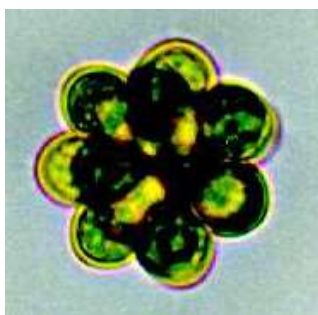
3) filament (trichome + sheath) มีลักษณะเป็นเส้นสายที่เกิดจากการที่เซลล์เดี่ยวมาเรียงต่อกันเพียงแถวเดียว ถ้าเป็นสายของสาหร่ายขนาดเล็กที่มีส่วนของ gelatinous sheath หุ้มจะเรียกสาหร่ายขนาดเล็กลักษณะนี้เป็น filament และถ้าเป็นสายของสาหร่ายขนาดเล็กที่ไม่มี gelatinous sheath หุ้ม จะเรียกว่าเป็น trichome (เส้นสายของ diatom นิยมเรียก chain) สำหรับลักษณะของ filament ยังแบ่งออกเป็น unbranched filament ลักษณะเป็นเส้นสายที่ไม่แตกแขนง และ branch filament ลักษณะเป็นเส้นสายที่แตกแขนง^[2]



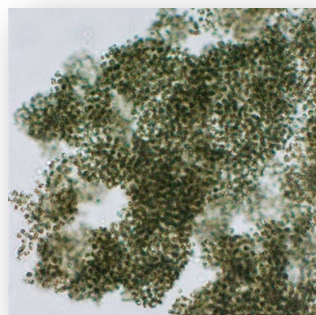
motile unicel



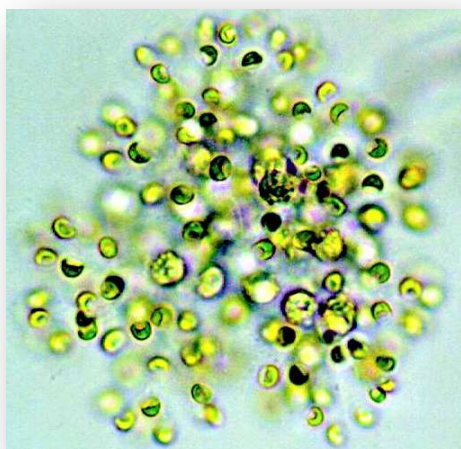
non-motile unicel



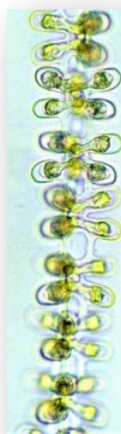
coenobium colony



aggregate colony



dendroid colony



unbranch and branch filament

ภาพที่ 1.2 รูปร่างของสาหร่ายขนาดเล็กแบบต่าง ๆ

4 คุณสมบัติของสาหร่ายขนาดเล็ก

สาเหตุที่ต้องทราบคุณสมบัติของสาหร่ายแต่ละกลุ่มนั้นเพื่อจัดการเพาะเลี้ยงให้เหมาะสม ให้ได้ผลผลิตปริมาณมาก คุณภาพดี โดยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายต้องเริ่มต้นตั้งแต่เลือกชนิดสาหร่ายที่ต้องการเพาะเลี้ยงตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ประโยชน์ โดยผู้เพาะเลี้ยงต้องเตรียมอาหารหรือปุ๋ยสำหรับสาหร่ายที่เหมาะสมกับสาหร่ายนั้น ๆ ไว้ ซึ่งต้องคำนึงว่าเป็นสาหร่ายน้ำจืดหรือน้ำเค็ม เป็นสาหร่ายกลุ่มใด และควรทราบพีเอช (pH) แสง อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงที่เหมาะสม เป็นต้น โดยการแบ่งกลุ่มสาหร่ายขนาดเล็กยังสามารถแบ่งกลุ่มได้อีกแบบคือแบ่งตามความต้องการแหล่งอาหารและพลังงาน^[4-10] ซึ่งเป็นข้อมูลเพื่อเลือกภาวะในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายให้เหมาะสม เช่น แหล่งคาร์บอน หรือแสง เป็นต้น โดยมีการแบ่งกลุ่มดังนี้

1) ออโตโทรฟ (autotrophs) คือกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่สร้างสารอินทรีย์ได้เอง ใช้แหล่งคาร์บอนที่เป็นสารอนินทรีย์ (เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไบคาร์บอเนต) และใช้พลังงานจากแสงหรือสารอนินทรีย์เพื่อผลิตสารอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรต ลิพิด และโปรตีน โดยแบ่งย่อยได้เป็นกลุ่ม โฟโตออโตโทรฟ (photoautotrophs/phototrophs) คือกลุ่มที่ใช้แสงเป็นแหล่งพลังงานผลิตอาหารโดยการสังเคราะห์ด้วยแสง และกลุ่มคีโมออโตโทรฟ (chemoautotrophs) คือกลุ่มที่ใช้สารอนินทรีย์เป็นแหล่งพลังงาน เช่น จากการออกซิไดส์ซัลเฟอร์และแอมโมเนีย

2) เฮเทโรโทรฟ (heterotrophs) คือกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่ต้องการสารอินทรีย์จากสิ่งมีชีวิตอื่น ใช้แหล่งคาร์บอนที่เป็นสารอินทรีย์ และใช้พลังงานจากแสงหรือสารอนินทรีย์ โดยแบ่งย่อยได้เป็นกลุ่มโฟโตเฮเทโรโทรฟ (photoheterotrophs) คือกลุ่มที่ใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน กลุ่มคีโมเฮเทโรโทรฟ (chemoheterotrophs) คือกลุ่มที่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งพลังงาน (เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือเหล็กโลหะ)

3) มิโซโทรฟ (mixotrophs) คือกลุ่มสิ่งมีชีวิตที่ใช้แหล่งพลังงานได้ทั้งจากแสงและสารอินทรีย์ ใช้แหล่งคาร์บอนได้ทั้งจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

4) ออโซโทรฟ (auxotrophs) คือสิ่งมีชีวิตที่ไม่สามารถสร้างสารอินทรีย์ที่เฉพาะเจาะจงบางชนิดเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้ด้วยตนเอง เช่น สาหร่ายกลุ่ม vitamin auxotrophs คือกลุ่มสาหร่ายที่ต้องการวิตามินในการเจริญเติบโต เพราะไม่สามารถสร้างวิตามินได้ด้วยตนเอง

5 สารชีวโมเลกุลที่สำคัญในสาหร่ายขนาดเล็กและแนวทางการใช้ประโยชน์^[11-13]

สารชีวโมเลกุล (biomolecules) คือสารที่พบได้ในสิ่งมีชีวิต มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก สารชีวโมเลกุลที่พบในสาหร่ายขนาดเล็กและได้รับความสนใจนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านอาหาร อาหารเสริม เครื่องสำอาง และทางการแพทย์ ได้แก่ ลิพิด พอลิแซ็กคาไรด์ โปรตีน วิตามิน สารสี (คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ ไฟโคบิลิน) พอลิฟีนอล (polyphenol), phytosterol และ ฮอร์โมน เป็นต้น โดยมีรายละเอียดคุณสมบัติของสารชีวโมเลกุลแต่ละประเภทและแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ ดังนี้

5.1 ลิพิด

ลิพิด (lipid) ของสาหร่ายขนาดเล็กมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่หลายคู่ (PUFA-polyunsaturated fatty acid) เป็นองค์ประกอบ โดย PUFA มีประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์โดยเฉพาะกรดไขมันกลุ่มโอเมก้า-3 และ 6 เพราะมนุษย์ไม่สามารถสร้างได้เองต้องได้รับจากการบริโภคอาหาร กรดไขมันไม่อิ่มตัวกลุ่มโอเมก้า-3 ที่สำคัญได้แก่ alpha-linolenic acid (ALA), eicosapentaenoic acid (EPA) และ docosahexaenoic acid (DHA) โดย

โอเมก้า-3 ช่วยต้านอนุมูลอิสระ ลดคอเลสเตอรอล (cholesterol) ควบคุมความดันเลือด ทำให้เลือดไม่ตกตะกอน ช่วยป้องกันโรคหลอดเลือดอุดตัน โรคหัวใจ โรคไมเกรน โรคอ้วน และบรรเทาอาการโรคเบาหวาน ช่วยกระตุ้นการสร้างสารที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการอักเสบภายในร่างกาย บรรเทาอาการโรคข้ออักเสบ ช่วยลดความเสี่ยงการเกิดมะเร็ง ป้องกันโรคอัลไซเมอร์ กระตุ้นการสร้างสารเซโรโทนิน (serotonin) ในสมองซึ่งมีฤทธิ์ด้านการซึมเศร้า กระตุ้นให้เซลล์สมองไวต่อการรับสัญญาณประสาท สร้างเซลล์ประสาท โอเมก้า-3 จึงมีความจำเป็นต่อการสร้างและซ่อมแซมเซลล์ และที่สำคัญ DHA เป็นกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของสมอง พัฒนาการทำงานของระบบประสาทและสายตา ส่วนกรดไขมันโอเมก้า-6 ในสาหร่ายขนาดเล็กที่สำคัญได้แก่ linoleic acid (LA), arachidonic acid (AA), gamma linolenic acid (GLA) และ dihomogamma linolenic acid (DGLA) โดยช่วยทำให้ผิวหนังมีสุขภาพดี ช่วยลดคอเลสเตอรอล ลดอาการปวดประจำเดือน และลดผื่นแพ้จากกรรมพันธุ์ ในด้านพลังงานลพิตจากสาหร่ายขนาดเล็กสามารถใช้เป็นแหล่งผลิตไบโอดีเซลได้

สาหร่ายขนาดเล็กที่ได้มีการศึกษาเพื่อใช้เป็นแหล่งผลิต DHA และ EPA เช่น *Chlorella*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Cryptocodinium*, *Schizochytrium*, *Ulkenia*, *Phaeodactylum tricornutum*, *Nonodus subterraneus*, *Porphyridium*, *Chaetoceros*, *Nannochloropsis*, *Cryptocodinium*, *Isochrysis*, *Pavlova* โดย DHA และ EPA ที่ผลิตจากสาหร่ายขนาดเล็กมีข้อดีกว่าที่ผลิตจากปลาคือไม่มีการปนเปื้อนของสารพิษ ไม่มีกลิ่นเหม็นคาว และไม่มีรสชาติที่ไม่พึงปรารถนา

5.2 สารสี

สารสี (pigment) ในสาหร่ายขนาดเล็กมีบทบาทหลักเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยกลุ่มสารสีที่พบในสาหร่ายขนาดเล็กได้แก่ คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ และไฟโคบิลิน โดยสารสีแต่ละกลุ่มมีคุณสมบัติต่างกัน จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ กัน ดังนี้

5.2.1 คลอโรฟิลล์

คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) มีสีเขียวพบในสาหร่ายทุกชนิด โครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์และอีโมโกลบินเหมือนกัน คือมีลักษณะเป็นวงแหวนไพโรล (pyrrole ring) ต่างกันเพียงส่วนกลางของโครงสร้าง คลอโรฟิลล์เป็นแมกนีเซียม (Mg) ส่วนอีโมโกลบินเป็นเหล็ก (Fe) ร่างกายเพียงแต่เปลี่ยนแมกนีเซียมที่อยู่ในคลอโรฟิลล์ให้เหล็กเข้ามาแทน ก็สามารถเปลี่ยนคลอโรฟิลล์เป็นอีโมโกลบินได้ (สาหร่ายยังมีกรดโฟลิกและวิตามินบี 12 เป็นตัวช่วยในการสร้างเม็ดเลือดแดงอีกด้วย) คลอโรฟิลล์ช่วยกระตุ้นการสร้างเม็ดเลือดแดงจึงช่วยรักษาโรคโลหิตจาง ช่วยในกระบวนการล้างสารพิษในเลือดและขจัดของเสียสะสมในร่างกาย ฟันฟูการทำงานของตับที่อักเสบ เพิ่มการหลั่งน้ำดี ช่วยเร่งการทำงานของเนื้อเยื่ออวัยวะต่าง ๆ ช่วยกระตุ้นให้เซลล์แบ่งตัวและเจริญได้เร็ว ช่วยขยายหลอดเลือดทำให้ระบบไหลเวียนของโลหิตในร่างกายดีขึ้น ช่วยในการทำงานของกล้ามเนื้อและเส้นประสาททำให้กล้ามเนื้อหัวใจหดตัวได้ดีขึ้น เส้นโลหิตฝอยขยายตัวดีขึ้น ลดปัญหาเส้นเลือดหัวใจตีบตัน อัตราการหายใจดีขึ้น ลดปัญหาเส้นเลือดอุดตัน ลดรอยคล้ำใต้ตา ใบหน้าหมองคล้ำ ช่วยกระตุ้นการบีบตัวของลำไส้ทำให้ขับถ่ายดีขึ้น

คลอโรฟิลล์มีคุณสมบัติยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (bacteriostatic) ทำให้เชื้อหยุดแบ่งตัวเชื้อจึงไม่เจริญเติบโต แมกนีเซียมในคลอโรฟิลล์มีบทบาทสำคัญในการรักษาบาดแผลป้องกันการเกิดของแบคทีเรียแผลจึงไม่ติดเชื้อและยังช่วยสร้างเซลล์ใหม่ คลอโรฟิลล์ช่วยทำให้แผลแห้งและช่วยลดสารคัดหลั่ง คลอโรฟิลล์จึงถูกใช้เป็นยาใส่แผลในสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยช่วยยับยั้งหรือลดการอักเสบและบวม คลอโรฟิลล์

สามารถรักษาโรคเหงือกอักเสบทำให้ไม่มีกลิ่นปาก ในปัจจุบันจึงนิยมใส่คลอโรฟิลล์ในยาอมบ้วนปากเพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและสีเขียวของคลอโรฟิลล์ยังทำให้ยาอมบ้วนปากดูมีลักษณะที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีการผสมคลอโรฟิลล์ในผลิตภัณฑ์ หมากฝรั่ง สบู่ และผสมในอาหารขบเคี้ยวของสุนัขเพื่อช่วยยับยั้งแบคทีเรียในช่องปาก ทำความสะอาดปากและฟันของสุนัข

คลอโรฟิลล์มีคุณสมบัติช่วยในการต้านอนุมูลอิสระ ช่วยกระตุ้นภูมิคุ้มกัน ป้องกันการเกิดเนื้องอก ป้องกันโรคมะเร็ง และลดอาการเจ็บปวดต่าง ๆ มีการใช้คลอโรฟิลล์ในผลิตภัณฑ์เพื่อช่วยแก้ปัญหากลากเกลื้อน ลำไส้อักเสบ ลดอาการปวดประจำเดือน แก้ปวดศีรษะ ปวดไมเกรน ดับกลิ่นตัว กลิ่นปาก กลิ่นเท้า รักษาแผลอักเสบ แผลติดเชื้อ แผลเปื่อยแผลถลอก ช่วยรักษาแผลเปื่อยในกระเพาะอาหารและการอักเสบของทางเดินอาหาร แผลโดนไฟไหม้ เหนืออักเสบ หรือแผลในช่องปาก ลดอาการภูมิแพ้ ผื่นลมพิษ แพ้อากาศ โรคหอบหืด ปรับสมดุลกรด-ด่าง (pH) ในโรคเกาต์ รูห์มาตอยด์ เบาหวาน รักษาแผลริดสีดวง

สาหร่ายขนาดเล็กที่นักวิจัยได้มีการศึกษาเพื่อใช้เป็นแหล่งผลิตคลอโรฟิลล์ เช่น *Chlorella*, *Monoraphidium*, *Scenedesmus*, *Gloeotheca*, *Arthrospira* เป็นต้น โดยพบปริมาณคลอโรฟิลล์ในสาหร่ายได้ตั้งแต่ 0.5 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งขึ้นกับภาวะในการเพาะเลี้ยง

5.2.2 แคโรทีนอยด์^[13]

แคโรทีนอยด์ (carotenoids) เป็นกลุ่มสารสีที่มีสีเหลือง ส้ม หรือแดง แคโรทีนอยด์แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ แคโรทีน (เช่น beta-carotene, alpha-carotene, lycopene) และแซนโทฟิลล์ (เช่น astaxanthin, violaxanthin, antheraxanthin, zeaxanthin, neoxanthin, lutein) แคโรทีนอยด์มีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ เป็นแหล่งของวิตามิน กระตุ้นการสร้างภูมิคุ้มกันในร่างกาย เพิ่มภูมิต้านทานต่อไวรัส แบคทีเรีย เชื้อรา และปรสิต ต้านการอักเสบ ป้องกันระบบประสาท ป้องกันการเกิดมะเร็ง ลดการสะสมลพิดป้องกันการเกิดโรคอ้วน ป้องกันการเกิดโรคหัวใจ โรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน ลดความดัน

lutein มีสีเหลือง มีคุณสมบัติช่วยป้องกันอันตรายจากแสงแดดและช่วยป้องกันเลนส์แก้วตาจากแสง จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง สาหร่ายที่เป็นแหล่งผลิต lutein เช่น *Muriellopsis*, *Chlorella*, *Chlorococcum*, *Neosporangiococcus*, *Scenedesmus*, *Dunaliella*, *Tetraselmis* เป็นต้น โดยสามารถผลิต lutein ได้มากถึง 0.5 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักแห้ง

lycopene มีสีแดง มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ใช้เป็นครีมกันแดด ครีมลดเลือนริ้วรอย ต้านการชราก่อนวัย ช่วยชะลอวัย (anti-aging) และใช้ในทางการแพทย์คือป้องกันมะเร็ง ป้องกันการอุดตันของเส้นเลือดหัวใจ

violaxanthin มีสีส้ม มีคุณสมบัติต้านการอักเสบ ต้านมะเร็ง โดยผลิตจากสาหร่าย *Chlorella ellipsoidea* และ *Dunaliella tertiolecta*

zeaxanthin มีสีเหลือง เป็นแหล่งวิตามินบำรุงสายตา ช่วยป้องกันอันตรายจากแสงต่อสายตา นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ยา เครื่องสำอาง โดยผลิตจากสาหร่าย *Scenedesmus almeriensis* และ *Nannochloropsis oculata*

แคโรทีนอยด์ในสาหร่ายขนาดเล็กมีประมาณ 0.1-12 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักแห้งของสาหร่าย ขึ้นกับภาวะในการเพาะเลี้ยง แคโรทีนอยด์ที่เป็นที่ต้องการของตลาดมากที่สุดคือ beta-carotene และ astaxanthin สาหร่ายที่ใช้เป็นแหล่งผลิต beta-carotene เช่น *Scenedesmus*, *Dunaliella*, *Chlorella*, *Chlorococcum*,

Chlamydomonas, *Botryococcus* สาหร่ายที่ใช้เป็นแหล่งผลิต astaxanthin เช่น *Chlorella*, *Chlorococcum*, *Scenedesmus*, *Haematococcus*, *Botryococcus*, *Monoraphidium*, *Chlamydomonas*, *Chlorococcum*, *Neosporangium*

5.2.3 ไฟโคบิลิโปรตีน

ไฟโคบิลิโปรตีน (phycobiliproteins) เป็นชีวโมเลกุลประเภทโปรตีน มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบของโครงสร้าง โดยสารสีที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ได้แก่ ไฟโคไซยานิน (phycocyanin) ซึ่งมีสีน้ำเงิน และไฟโคอีริทริน (phycoerythrin) ซึ่งมีสีแดง ไฟโคบิลิโปรตีนละลายได้ดีในน้ำ มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านการอักเสบ ช่วยป้องกันการเสื่อมหรือการทำลายของระบบประสาทและตับ ไฟโคไซยานินใช้เป็นสีผสมอาหาร ตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ (bioindicator) และส่วนที่มีโปรตีนสูงจะใช้เป็นอาหารของสัตว์ ทั้งนี้เนื่องจากไฟโคไซยานินมีคุณสมบัติเรืองแสงได้จึงใช้ไฟโคไซยานินบริสุทธิ์เป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ การเป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพคือเป็นตัวสืบค้นทางชีวเคมีในเรื่องการตรวจสอบภูมิคุ้มกันโรค หรือการเจริญผิดปกติของเนื้อเยื่อ หรือการตรวจสอบทาง DNA การตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์และการวัดขนาดเซลล์ ประเทศที่มีการผลิตไฟโคไซยานินบริสุทธิ์มากที่สุดคือประเทศอเมริกา การผลิตไฟโคบิลิโปรตีนในทางอุตสาหกรรมมีการผลิตจากสาหร่าย *Porphyridium*, *Arthrospira* และ *Aphanizomenon flosaquae*

5.3 พอลิแซ็กคาไรด์

พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ที่ประกอบด้วย monosaccharide หลายโมเลกุลมาเชื่อมต่อกัน สาหร่ายขนาดเล็กมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักแห้ง ขึ้นกับชนิดและภาวะในการเพาะเลี้ยง พอลิแซ็กคาไรด์มีบทบาทต่างกันโดยพอลิแซ็กคาไรด์กลุ่มที่เป็นอาหารสะสม (storage polysaccharide) นิยมใช้เป็นแหล่งพลังงาน ส่วนพอลิแซ็กคาไรด์กลุ่มที่เป็นโครงสร้าง (structural polysaccharide) กลุ่มนี้มีลักษณะที่ทำให้เกิดความหนืดเหนียว เป็นเจล สามารถนำไปใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวหรือเป็นตัวดูดซับสารปนเปื้อนทางชีวภาพในน้ำและดินได้ด้วย

พอลิแซ็กคาไรด์กลุ่มที่ปล่อยออกนอกเซลล์ (exopolysaccharide-EPS) มีความเหนียวช่วยในการยึดเกาะ การรวมกลุ่ม การเกิดไบโอฟิล์ม (biofilm) EPS มีคุณสมบัติเก็บน้ำได้ดีช่วยปรับให้ส่วนผสมต่าง ๆ มีเนื้อสัมผัสที่ละเอียด ใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียว เพิ่มความคงตัว ช่วยให้สารต่างชนิดกันผสมด้วยกันไม่แยกชั้น เช่น น้ำและน้ำมันผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของอาหาร EPS ยังมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ต้านไวรัส (HIV, เริม) ป้องกันการเกิดเนื้องอก มะเร็ง ป้องกันการอุดตันเส้นเลือด ช่วยลดไขมันในเส้นเลือด กระตุ้นภูมิคุ้มกัน ต้านการอักเสบ บรรเทาอาการโรคหัวใจ โรคหลอดเลือดแข็งและ HIV

มีการนำพอลิแซ็กคาไรด์จากสาหร่ายขนาดเล็กไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ยา และเครื่องสำอาง สาหร่ายขนาดเล็กสร้าง EPS ได้ประมาณ 0.5-20 กรัมต่อลิตร สาหร่ายที่มีการเพาะเลี้ยงเพื่อใช้เป็นแหล่งผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ได้แก่ *Tetraselmis*, *Isochrysis*, *Porphyridium cruentum*, *Porphyridium purpureum*, *Chlorella* และ *Rhodella reticulata* ส่วนในด้านพลังงานพอลิแซ็กคาไรด์ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตไบโอเอทานอลและไบโอมิเทน

5.4 โปรตีน กรดอะมิโน

โปรตีนของสาหร่ายประกอบด้วยกรดอะมิโนที่ต่างกัน กรดอะมิโนส่วนใหญ่ที่พบคือ aspartate และ glutamate โดยโปรตีนในสาหร่ายนิยมใช้เป็นแหล่งสารอาหาร ยา และเครื่องสำอาง ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็น โภชนเภสัช (nutraceutical) ซึ่งหมายถึงอาหารหรือส่วนหนึ่งของอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ ประโยชน์ในทาง การแพทย์ช่วยป้องกันโรค รักษาโรค และชะลอวัย หรือใช้เป็นส่วนผสมในอาหารฟังก์ชัน (functional food) ซึ่ง หมายถึงอาหารที่มีสารอื่นที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพนอกเหนือจากมีสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย ช่วยเสริมระบบ ป้องกันตนเอง ทำให้ระบบต่าง ๆ ในร่างกายทำงานได้สม่เสมอ ป้องกันการเสื่อมของเซลล์ ลดความเสี่ยงต่อการ เกิดโรคต่าง ๆ

สาหร่ายขนาดเล็กมีปริมาณโปรตีนในช่วงกว้างตั้งแต่ 6-70 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นกับชนิดและภาวะการ เพาะเลี้ยง สาหร่ายขนาดเล็กที่มีการเพาะเลี้ยงและใช้เป็นแหล่งโปรตีนเชิงพาณิชย์ได้แก่ *Arthrospira (Spirulina)*, *Chlorella* และ *Dunaliella salina* โดยนักวิจัยได้คาดการณ์ว่าในปี ค.ศ. 2054 (พ.ศ. 2597) ทั่วโลกจะมีการใช้ สาหร่ายและแมลงมาเป็นแหล่งโปรตีนแทนที่เนื้อสัตว์ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์^[12] การใช้สาหร่ายเป็นแหล่งโปรตีน จำเป็นต้องพิจารณาถึงความสามารถของผู้บริโภคในการย่อยสาหร่ายเพื่อดูดซึมโปรตีนไปใช้ในร่างกาย โดยพบว่า สาหร่ายขนาดเล็กถูกย่อยได้ประมาณ 50-82 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นกับชนิดสาหร่าย ซึ่งตัวอย่างสาหร่ายขนาดเล็กที่ถูกย่อย ได้สูงกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ *Nostoc sphaeroides*, *Arthrospira platensis* และ *Chlorella vulgaris* สาหร่ายที่มีผนังบาง เช่น กลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะถูกย่อยได้ง่ายกว่า ส่วนกลุ่มสาหร่ายสีเขียวซึ่งมีผนังหนา มากกว่าจึงถูกย่อยได้ยากกว่า โดยหากเป็นสาหร่ายที่มีคุณค่าโภชนเภสัชสูงแต่ย่อยยาก ต้องนำสาหร่ายไปผ่าน ขบวนการทำให้ผนังเซลล์บางหรือย่อยได้ง่ายก่อนนำไปบริโภค

โปรตีนในสาหร่าย *Chlorella vulgaris* และ *Tetraselmis* มีคุณสมบัติเป็นตัวกระทำอิมัลชัน (emulsifying agents) และเป็นสารช่วยก่อให้เกิดฟอง ส่วนโปรตีนของ *Arthrospira platensis* และ *Tetraselmis suecica* มีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มความข้นเหนียว ทำให้เป็นเจล นิยมใช้สารสกัดโปรตีนจาก *Arthrospira* และ *Chlorella* ผสมในเครื่องสำอางโดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับผิวหนังเพราะมีคุณสมบัติกระตุ้นการ สร้างคอลลาเจน สารสกัดโปรตีนจาก *Arthrospira* มีกรดอะมิโนคล้ายไมโครสปอรีน (microsporine-like amino acids) ซึ่งช่วยปกป้องผิวหนังจากแสงแดด รังสียูวี มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ จึงนิยมใช้ผสมในเครื่องสำอางเพื่อ ช่วยซ่อมแซมผิวและชะลอการเสื่อมของผิว ชะลอความชราของผิว ส่วนในด้านพลังงานโปรตีนใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ในการผลิตไบโอดีเซล

ด้านเภสัชวิทยา (pharmacological) โปรตีนจากสาหร่ายมีคุณสมบัติเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความปลอดภัยช่วยในการต้านการอักเสบ ต้านอนุมูลอิสระ ต้านมะเร็ง ลดไขมันและน้ำตาลในกระแสเลือด ลด ความดันโลหิต ด้านแบคทีเรีย ช่วยทำให้เป็นอาหารหรือยาคอาหาร ช่วยกระตุ้นการสร้างโปรตีนในร่างกาย โดย ฤทธิ์ทางชีวภาพของโปรตีนขึ้นกับชนิดกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบและการเรียงตัวของกรดอะมิโน เช่น โปรตีน จาก *Chlorella ellipsoidea* มีการเรียงตัวของกรดอะมิโนคือ leucine-asparagine-glycine-aspartic-valine-tryptophan มีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ และลดความดันได้ดี ส่วนกรดอะมิโนของ *Chlorella vulgaris* ที่ มีการเรียงตัว phenylalanine-alanine-leucine พบว่ามีฤทธิ์ทางชีวภาพในการกำจัดแบคทีเรียสูงกว่าการเรียงตัว แบบ alanine-phenylalanine-leucine โดยพบว่าโปรตีนจาก *Dunaliella salina* มีฤทธิ์ในการยับยั้งการแบ่งตัว ของมะเร็งลำไส้ใหญ่

5.5 วิตามิน

วิตามินเป็นสารตั้งต้น (precursor) ของเอนไซม์ที่สำคัญในร่างกาย ช่วยในการทำงานของเอนไซม์ ช่วยต้านอนุมูลอิสระ สาหร่ายขนาดเล็กมีวิตามินหลายชนิด เช่น A, B₁, B₂, B₃, B₅, B₆, B₇, B₈, B₉, B₁₂, C, E และ K โดยปริมาณวิตามินที่พบขึ้นกับชนิดของสาหร่าย ระยะการเจริญเติบโต และภาวะในการเพาะเลี้ยง โดยพบว่าสาหร่ายขนาดเล็กมีปริมาณวิตามิน K₁, A, E, B₁ มากกว่าแหล่งอาหารในอดีต เช่น ส้ม แครอท แป้งข้าวโพด แป้งถั่วเหลือง แป้งข้าวไรย์ (rye flour) แป้งข้าวสาลี การใช้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นแหล่งวิตามินนอกจากต้องคำนึงถึงชนิดสาหร่ายที่เหมาะสมแล้ว ต้องคำนึงถึงภาวะการเพาะเลี้ยง การทำแห้งหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งต้องระมัดระวังเรื่องความร้อนซึ่งจะส่งผลให้วิตามิน B₁, B₂, B₃ และ C มีปริมาณลดลงได้ โดยพบว่า *Anabaena cylindrica* สามารถเป็นแหล่งวิตามิน K₁ ที่ปลอดภัยและมีปริมาณวิตามินมากกว่าพืชบก โดยวิตามินนี้จากสาหร่ายมีบทบาทสำคัญในการช่วยป้องกันการเกิดโรคเรื้อรังที่เกิดจากสารเคมี

ในทางอุตสาหกรรมได้มีการจำหน่ายสาหร่ายผงเพื่อเป็นแหล่งวิตามิน B₂, B₃, B₉ และ B₁₂ ให้กับมนุษย์ โดยผลิตจากสาหร่าย เช่น *Spirulina*, *Chlorella* และ *Nannochloropsis* วิตามิน B₁₂ พบได้น้อยในผักและผลไม้ทั่วไป ทำให้ผู้บริโภคมีสิทธิขาดวิตามินชนิดนี้ จึงได้มีการนำสาหร่ายขนาดเล็กมาใช้เป็นแหล่งวิตามินชนิดนี้เพื่อทดแทน โดยการบริโภคผงสาหร่าย *Chlorella* 5 กรัม จะได้รับวิตามิน B₁₂ สูงเพียงพอต่อความต้องการของร่างกายต่อวัน ส่วนสาหร่าย *Anabaena cylindrica* 1 กรัม สามารถให้วิตามิน B₁₂ ได้มากถึง 64 เปอร์เซ็นต์ ของที่ร่างกายต้องการ

มีการใช้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นแหล่งวิตามินและแหล่งอาหารที่สำคัญสำหรับสัตว์น้ำวัยอ่อนโดยเฉพาะสัตว์ทะเล เช่น ตัวอ่อนของหอยสองฝา ลูกปลา ลูกกุ้ง และแพลงก์ตอนสัตว์ สาหร่ายให้วิตามินที่จำเป็นต่อการพัฒนาของสัตว์น้ำวัยอ่อน ซึ่งเป็นวิตามินที่สัตว์น้ำไม่สามารถสร้างได้ด้วยตนเอง

5.6 polyphenols

polyphenols ในสาหร่ายขนาดเล็กสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านโภชนเภสัช โดย polyphenols เป็นสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิ (secondary metabolites) ประกอบด้วย phenolic acid, flavonoids, isoflavonoids, stilbenes, lignans และ phenolic polymer โดยมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบ ต้านมะเร็ง ป้องกันการเกิดภูมิแพ้ ป้องกันการเกิดโรคเบาหวาน ด้านเชื้อราและจุลชีพ ป้องกันพิษจากเชื้อรา ป้องกันการทำงานของเส้นเลือดหัวใจ และช่วยชะลอการแก่ก่อนวัย ปริมาณ polyphenols ที่พบขึ้นกับชนิดของสาหร่าย สาหร่ายขนาดเล็กที่มีปริมาณ polyphenols สูง เช่น *Haematococcus pluvialis*, *Phaeodactylum tricornutum*, *Arthrospira platensis* และ *Chlorella vulgaris* เป็นต้น

5.7 phytosterols

phytosterols เป็นสเตอรอล (sterols) ที่พบในพืชหรือสาหร่าย ในส่วนของสาหร่ายขนาดเล็กนั้น sterols เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ทำหน้าที่ควบคุมการแพร่ผ่านของน้ำและไอออน โดยการควบคุมความยาวของสายกรดไขมันภายในเซลล์ sterols ในสาหร่ายขนาดเล็กมีหลายชนิด ชนิดที่พบมากคือ 24-ethylcholesterol ปริมาณที่พบขึ้นกับชนิดสาหร่ายและภาวะในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย เช่น แสง อุณหภูมิ ความเค็ม และระยะการเจริญเติบโต โดย phytosterols จากสาหร่ายช่วยลดคอเลสเตอรอลชนิด LDL กระตุ้นการทำงานของเส้นเลือดหัวใจ ป้องกันการเกิดเส้นเลือดอุดตัน ต้านอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบ ต้านมะเร็ง ป้องกันการทำงานของระบบประสาทไม่ให้ทำงานผิดปกติ สาหร่ายขนาดเล็กที่มีปริมาณ phytosterols สูง เช่น *Pavlova lutheri*,

Tetraselmis, *Nannochloropsis* โดยมี phytosterols 0.4-5 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักแห้ง ซึ่งสูงกว่าพืชบกที่เป็นแหล่งผลิต phytosterols ในปัจจุบันคือข้าวโพดและเรพซีด (rapeseed)

5.8 phytohormones

phytohormones หรือฮอร์โมนพืช สาหร่ายขนาดเล็กสร้าง phytohormones ได้หลายชนิด เช่น auxin, abscisic acid, cytokinin, ethylene, gibberellin, polyamines, jasmonides, salicylates และ brassinosteroids โดยฮอร์โมนเหล่านี้มีบทบาทช่วยในการพัฒนาและการเจริญเติบโตของสาหร่าย การตอบสนองต่อแสง การสังเคราะห์สารเมแทบอลิต์ทุติยภูมิ การเสื่อมสลายของเนื้อเยื่อสาหร่าย ช่วยควบคุมภาวะสมดุลของเซลล์เมื่อสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงหรือเมื่ออยู่ในภาวะเครียด phytohormones จึงช่วยเพิ่มชีวมวลและเพิ่มการผลิตสารเมแทบอลิต์ทุติยภูมิของสาหร่าย นอกจากนี้ยังพบว่าฮอร์โมนจากสาหร่ายขนาดเล็กสามารถช่วยในการลดเลือนรื้อรอยจิ้งจิกนำไปผสมในเครื่องสำอาง

6 การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายขนาดเล็กเชิงพาณิชย์

การผลิตสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์พบว่าในปี พ.ศ. 2560 สาหร่ายที่ผลิตขึ้นทั่วโลกมากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ ถูกใช้เป็นอาหารมนุษย์ อาหารสัตว์ และใช้ในทางโภชนเภสัช และในปี พ.ศ. 2563 พบว่ามีมูลค่าการใช้สาหร่ายเป็นสารแต่งสีสูงที่สุด รองลงมาคือใช้ในการแพทย์ โภชนเภสัช และเครื่องสำอาง ตามลำดับ โดยสาหร่ายที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ *Arthrospira* (*Spirulina*) และ *Chlorella* โดย

Spirulina เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีโปรตีนประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ มีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายครบทุกชนิด ได้แก่ isoleucine, leucine, lysine, methionine, phenylalanine, threonine, tryptophan, valine, histidine มีกรดไขมันที่มีประโยชน์ เช่น gamma-linolenic, alpha-linolenic, linoleic, stearidonic, EPA, DHA, ALA มีวิตามิน เช่น A, B₁, B₂, B₃, B₆, B₉ (folic acid), B₁₂, C, D, E, K แร่ธาตุ Mg, P, K, Na, Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Se, Zn สารสี เช่น chlorophyll-a, beta-carotene, xanthophyll, myxoxanthophyll, canthaxanthin, diadinoxanthin, beta-cryptoxanthin, oscillaxanthin, phycobiliprotein, phycocyanin โดย *Spirulina* นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร อาหารเสริม ยา เครื่องสำอาง มีจำหน่ายในรูปสาหร่ายสด สาหร่ายอัดเม็ด สาหร่ายผง

Chlorella เป็นสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก เป็นแหล่งโปรตีน วิตามิน และเกลือแร่ มีโปรตีนในรูปกรดนิวคลีอิกคือ RNA สูง (มากกว่าในปลาซาร์ดีน 17 เท่า) ซึ่งช่วยกระตุ้นให้เซลล์ร่างกายกระปรี้กระเปร่า อ่อนเยาว์ ชะลอความชราได้ โปรตีนจาก *Chlorella* ยังประกอบด้วยกรดอะมิโนจำเป็นที่ร่างกายมนุษย์สร้างขึ้นมาใช้เองไม่ได้ โปรตีนจาก *Chlorella* มีคุณภาพเทียบเท่าโปรตีนจากเนื้อสัตว์แต่มี methionine ต่ำกว่า มีวิตามิน C, E, K, B₁, B₂, B₁₂, beta-carotene, niacin, folic acid, pantothenic acid, biotin, P, K, Mg, S, Fe, Ca, Na, Cu, Zn, I, Co สารสี เช่น chlorophyll-a, beta-carotene สาหร่าย *Chlorella* นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร อาหารเสริม ยา เครื่องสำอาง มีจำหน่ายในรูปสาหร่ายอัดเม็ด สาหร่ายผง และน้ำสกัด

ในอนาคตความต้องการสารที่มาจากธรรมชาติและผลิตภัณฑ์อินทรีย์มีความต้องการเพิ่มมากขึ้น เพราะความใส่ใจต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะ astaxanthin จากธรรมชาติ ที่มีราคา 2,500- 7,150 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม โดยเน้นใช้ประโยชน์ทางโภชนเภสัช ปัจจุบันมีการผลิต astaxanthin จากสาหร่าย *Haematococcus pluvialis* เป็นหลัก โดยมีต้นทุนประมาณ 300-3,600 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม แม้

astaxanthin สังเคราะห์จะมีราคาถูกกว่าคือราคาเพียง 1,000 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม แต่เมื่อพิจารณาถึงความปลอดภัยแล้วมีน้อยกว่าจากแหล่งธรรมชาติ นอกจากนี้ร่างกายของมนุษย์และสัตว์ยังดูดซึม astaxanthin สังเคราะห์เข้าไปใช้ในร่างกายได้น้อยกว่า astaxanthin จากธรรมชาติ โดยจากการคาดการณ์ของนักการตลาดพบว่าในอนาคต ปี ค.ศ. 2025 (พ.ศ. 2568) คาดว่า astaxanthin รวมทั้งจากการสังเคราะห์และจากสาหร่ายจะมีส่วนแบ่งหรือมูลค่าทางการตลาดมากถึง 2.57 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ (ตารางที่ 1.2)

ตารางที่ 1.2 มูลค่าทางการตลาดของผลิตภัณฑ์ชีวโมเลกุลจากสาหร่ายขนาดเล็กที่ใช้ ณ ปัจจุบัน และความต้องการในอนาคต^[12]

ชีวโมเลกุล	มูลค่าความต้องการทางการตลาดในปัจจุบัน	มูลค่าความต้องการทางการตลาดในอนาคต	ชนิดสาหร่ายขนาดเล็กที่ใช้เป็นแหล่งผลิต
Omega-3 PUFAs ^[14-15]	2.5 พันล้าน \$ (ค.ศ. 2014)	5 พันล้าน \$ (ค.ศ. 2020)	
EPA ^[16]	300 ล้าน \$ (ค.ศ. 2010)	4 พันล้าน \$ (ค.ศ. 2022)	<i>Isochrysis galbana</i> , <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Phaeodactylum tricornutum</i>
DHA ^[16]	1.5 พันล้าน \$ (ค.ศ. 2010)	-	<i>Cryptocodinium cohnii</i> , <i>Schizochytrium limacinum</i> , <i>Ulkenia</i>
Carotenoids ^[17-19]	1.5 พันล้าน \$ (ค.ศ. 2017)	2 พันล้าน \$ (ค.ศ. 2019-2022)	
Astaxanthin ^[20-21]	ทั้งสังเคราะห์และธรรมชาติ 555.4 ล้าน \$ (ค.ศ. 2016)	1.1 พันล้าน \$ (ค.ศ. 2020) 2.57 พันล้าน \$ (ค.ศ. 2025)	<i>Haematococcus pluvialis</i>
Beta-carotene ^[21]	224-285 ล้าน \$ (ค.ศ. 2019)	-	<i>Dunaliella salina</i>
Phycobiliproteins ^[15]	มากกว่า 60 ล้าน \$ (ค.ศ. 2010)	-	
Phycoerythrin ^[18]	10-50 ล้าน \$ (ค.ศ. 2019)	-	<i>Porphyridium</i> , <i>Rhodella</i>
phycocyanin ^[21]	112.3 ล้าน \$ (ค.ศ. 2018)	232.9 ล้าน \$ (ค.ศ. 2025)	<i>Arthrospira</i> , <i>Porphyridium aeruginosum</i>

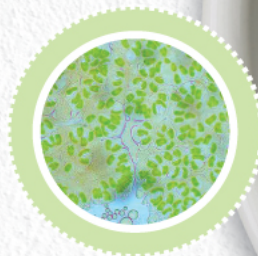
ที่มา : FAO (nd)^[16]; Shah et al. (2016)^[20]; Matos (2017)^[14]; Mu et al. (2019)^[21]; Butler and Golan (2020)^[17]; Nwoba et al. (2020)^[18]; Ruiz et al. (2020)^[19]; Wang et al. (2020)^[15]

หมายเหตุ : \$-ดอลลาร์สหรัฐ, - ไม่มีข้อมูล

การเพาะเลี้ยง

สาหร่ายขนาดเล็ก และการใช้ประโยชน์

- การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก
- การเพาะเลี้ยงสไปรูลินาเสริมด้วย CO₂ จากโรงไฟฟ้า
- การเพาะเลี้ยงสาหร่ายน้ำมัน
- อาหาร ยา และ เครื่องสำอางจากสาหร่าย
- การทำเครื่องดื่มอะมิโนจากสาหร่าย
- การทำสบู่รักษาผิวจากสาหร่าย
- การทำเม็ดวันสาหร่าย
- สารกำจัดไรฟุนจากสาหร่าย
- การผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่าย
- การบำบัดน้ำเสียโดยสาหร่าย
- การดูดซับ CO₂ โดยสาหร่าย



ISBN 978615770095



9 786165 770095