บทที่ 2
การตรวจเอกสาร

สาหร่าย

สาหร่าย หมายถึง สิ่งมีชีวิตชั้นต่ำตรงกับภาษาอังกฤษว่า algae และภาษากรีกว่า phykos เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์จนถึง ขนาดใหญ่ที่มองดูเหมือนมีรากลำต้นและใบ ซึ่งรวมเรียกว่า ทัลลัส (thallus) ส่วนใหญ่มีคลอโรฟิลล์ช่วยในการสังเคราะห์แสง (จงกล, 2552)

การจัดหมวดหมู่ของสาหร่าย

Bold and Wyne (1978) ได้จำแนกหมวดหมู่สาหร่ายโดยใช้รูปร่างและลักษณะภายนอกที่เหมือนกัน และคล้ายคลึงจัดรวมไว้ในกลุ่มเดียวกัน และดูจากสิ่งที่ปรากฏออกมาให้เห็น จึงแยกออกเป็น 9 กลุ่มดังนี้

1. Division Cyanophyta ได้แก่ พวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae)
2. Division Chlorophyta ได้แก่ พวกสาหร่ายสีเขียว (Green algae)
3. Division Charophyta ได้แก่ สาหร่ายไฟ (Stoneworts)
4. Division Euglenophyta ได้แก่ Euglenoids
5. Division Phaeophyta ได้แก่ สาหร่ายสีน้ำตาล (Brown algae)
6. Division Chrysophyta ได้แก่ สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง (Golden algae)
   สาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง (Yellow green algae และ diatom)
7. Division Pyrrhophyta ได้แก่ Dinoflagellates
8. Division Cryptophyta ได้แก่ Cryptomonads
9. Division Rhodophyta ได้แก่ สาหร่ายสีแดง (Red algae)

การจัดจำแนกลักษณะทางอนุกรมวิธารของสาหร่าย *Oscillatoria* sp.

สาหร่าย *Oscillatoria* sp. เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเซลล์เดียวที่มีลักษณะคล้ายแบคทีเรีย ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตชั้นต่ำ ซึ่ง Smith (1950; Prescott, 1978; ลัดดา, 2544) ได้จัดจำแนกไว้ดังนี้

Division Cyanophyta

Class Cyanophyceaer

Order Nostocales

Family Oscillatoriaceae

Genus *Oscillatoria* sp.

ลักษณะทั่วไป (กาญจนภาชน์, 2527; นุชนรี, 2543; ลัดดา, 2544; ยุวดี, 2546)

Oscillatoria sp. ลักษณะเป็นเส้นสายเดี่ยวๆ หรืออยู่รวมเป็นกลุ่มหนาแน่น แต่ละสายไม่แตกแขนง ทรัยโคมประกอบด้วยเซลล์แถวเดียวเรียงต่อเป็นสาย โดยมีความกว้างของเซลล์สม่ำเสมอตลอดสาย โดยปกติแต่ละเซลล์มักมีขนาดความกว้างมากกว่าความยาว ยกเว้นบางชนิดเท่านั้นที่เฉพาะเซลล์ปลายๆ ทรัยโคมเท่านั้นที่อาจเรียงยาวหรือแคบลง และเซลล์ปลายสุด (apical cell) อาจมีคาลิพทรา (calyptra) อยู่ซึ่งมีลักษณะคล้ายหมวกปีกหรือมีผนังเซลล์พองออก (capitate) *Oscillatoria* sp. เป็นสกุลที่ไม่มีชีทหุ้ม แต่อาจมีน้ำใสๆ หุ้มอยู่ เป็นสกุลที่สามารถเคลื่อนไหวได้แบบเลื่อนไหล (gliding) หรือแกว่งซ้ายขวา (oscillating) สืบพันธุ์โดยเกิดเซลล์ตายภายในสายและสร้างเซพาเรชันอิส (separation disc) แบ่งทรัยโคมออกเป็นฮอร์โมโกนหรือฮอร์โมโกเนีย

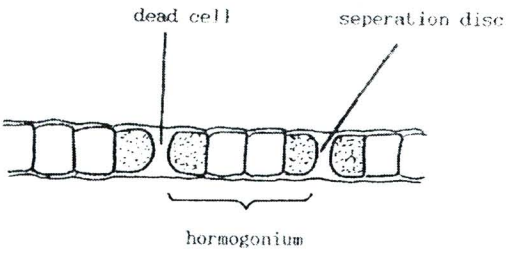
การสืบพันธุ์ (นุชนรี, 2543; ยุวดี, 2546)

สาหร่ายพวกที่เป็นเส้นสาย หรืออาจจะพบในพวกที่เป็นโคโลนีบ้าง ถ้าเกิดในพวกที่เป็นเส้นสายจะเริ่มจากการแบ่งเซลล์แล้วทำให้ทรัยโคมยืดยาวออก เมื่อมีการกระทบกระเทือนก็จะทำให้มีการขาดออกเป็นท่อน แล้วแต่ละท่อนก็สามารถเจริญไปเป็นทรัยโคมใหม่ต่อไป แต่ละท่อนที่หลุดออกมาเรียกว่า ฮอร์โมโกเนีย (hormogonium) หรือฮอร์โมโกน (hormogone) บริเวณที่จะเกิดการขาดหรือหลุดออกมามักจะเป็นบริเวณที่เรียกว่า เซพาเรชันดิส (separation disc) และเซลล์ตาย (dead cell) ซึ่งเกิดจากเซลล์ใดเซลล์หนึ่ง หรือหลายๆ เซลล์ในทรัยโคมเกิดตายลงเซลล์ข้างเคียง

ทั้งสองด้านจึงเกิดการขยายโป่งออกมา จึงมองดูบริเวณที่เซลล์ตายไปนี้มีลักษณะเหมือนเลนส์เว้า ซึ่งเรียกว่า เซพาเรชันดิส ดังนั้นบริเวณนี้จึงเป็นจุดอ่อนที่สามารถจะเกิดการขาด หรือหลุดออกมาได้

ถ้าเป็นพวกสาหร่ายที่มีเฮทเทอโรซีทจะเกิดการขาด หรือหลุดตรงบริเวณรอยต่อระหว่าง เฮทเทอโรซีทกับเซลล์ที่อยู่ติดกัน

การสืบพันธุ์ของ *Oscillatoria* sp. ซึ่งเป็นสาหร่ายพวกเส้นสายจะเป็นแบบไม่อาศัยเพศ โดยจะมีการแบ่งเซลล์ทำให้ทรัยโคมยืดยาวออก แต่ส่วนมากจะเกิดการขาดท่อน (fragmentation) ก่อนที่จะยาวมากเกินไป ซึ่งแต่ละท่อนสามารถเจริญเป็นทรัยโคมใหม่ต่อไปได้ การขาดท่อนอาจ มีสาเหตุมาจากสัตว์น้ำมากระแทกโดยแรง หรือโดนกระแสน้ำพัด แต่จุดอ่อนที่สำคัญที่ทำให้เกิดการขาดท่อน คือ การเกิดเซลล์ตาย (dead cell) ภายในสาย ทำให้ภายในเซลล์ว่างเปล่ามีแต่ผนังเซลล์อย่างเดียวจึงทำให้เกิดการขาดได้ง่าย และสร้างเซพาเรชันดิส (separation dise) ขึ้นมา เมื่อเกิดเซลล์ตายมากๆ จะเห็นกลุ่มเซลล์ท่อนสั้นๆ หรือที่เรียกว่า "hormogone หรือ hormogonia" เป็นจำนวนมาก



ภาพ 1 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินแบบเส้นสายแสดงฮอร์โมโกเนียม เซลล์ตายและเซพาเรชันดิส ที่มา: ยุวดี (2546)

การแพร่กระจาย (นุชนรี, 2543)

การแพร่กระจายของ *Oscillatoria* sp. จะพบทั่วไปตามแหล่งน้ำจืด น้ำกร่อย น้ำเค็ม และ ที่ชื้นแฉะทั่วไป แม้กระทั้งแหล่งน้ำที่มีอุณหภูมิสูงๆ เช่น บ่อน้ำพุร้อนก็สามารถพบได้เช่นกัน นักเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำนิยมเรียก *Oscillatoria* sp. ว่า สาหร่ายขนแมว

Oscillatoria sp. ทรัยโคมอาจอยู่เดี่ยวๆ หรืออยู่รวมกันเป็นแผ่น ทรัยโคมอาจตรงหรือโค้งงอเล็กน้อยโดยเฉพาะที่ส่วนปลายของทรัยโคม เซลล์ปลายสุดกลมมน เส้นผ่าศูนย์กลางเซลล์ 5 - 8 ไมครอน ยาว 2.5 - 3.2 ไมครอน มีรอยคอดที่ผนังกั้นเซลล์ และมีเม็ดกลมเล็กๆ เรียงกันเป็นแถวๆ พบเสมอในแหล่งน้ำทั่วไป

คุณสมบัติพิเศษของสาหร่าย *Oscillatoria* sp. (นุชนรี, 2543; ยุวดี, 2546)

1 การเคลื่อนไหวแบบเลื่อนไหล (gliding movement)

สาหร่ายที่สามารถเคลื่อนที่ได้นั้น มักจะเป็นสาหร่ายที่มีแฟลกเจลลัม แต่สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเป็นสาหร่ายที่เคลื่อนที่ได้ โดยไม่ต้องอาศัยแฟลกเจลลัม สาหร่ายที่เคลื่อนที่ได้ส่วนมากอยู่ใน Family Oscillatoriaceae แต่สาหร่ายพวกอื่นๆ เป็นต้นว่า *Oscillatoria* sp., *Trichodesmium* sp., *Spirulina* sp., *Arthrospira* sp., *Microcoleus* sp., *Aphanizomenon* sp. และ *Cylindrospermum* sp. ส่วนพวกเซลล์เดียวที่เคลื่อนที่ได้ ได้แก่ *Synechococcus* sp., *Gloeotheca* sp., *Chroococcus* sp. และ *Microcystis* sp. เป็นต้น

การเคลื่อนที่ของสาหร่ายดังกล่าวนี้ อาจจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และถอยหลังในทิศทางตามยาวของเส้นสาย เคลื่อนที่เฉพาะตรงปลายไปข้างซ้ายและขวา เคลื่อนที่เป็นคลื่น หรือเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นเกลียวคล้ายควงสว่าน การเคลื่อนที่ของสาหร่ายเหล่านี้เกิดจากปัจจัยหลายประการ ดังต่อไปนี้

1.1 สาหร่ายจะผลิตสารเมือก แล้วขับออกมาทางรูเล็กๆ บริเวณผนังเซลล์ ทำให้เกิดแรงผลักดันน้ำรอบๆ สาหร่ายจึงเคลื่อนที่ไปได้

1.2 เกิดจากการยืดและหดตัวของเซลล์ในเส้นสายไม่เท่ากัน บางเซลล์ยืดตัว บางเซลล์หดตัว ทำให้เกิดเป็นการเคลื่อนที่ไปได้

1.3 เกิดจากการแลกเปลี่ยนน้ำกับสารละลายภายในเซลล์ด้วยกระบวนการออสโมซิส ซึ่งมีไม่เท่ากันตลอดทั้งสาย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงตึงผิว (surface tension) ทำให้สาหร่ายเคลื่อนที่ไปได้

การเคลื่อนที่ของสาหร่ายดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยของสิ่งแวดล้อมได้แก่ อุณหภูมิและความเข้มของแสง พบว่าถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นและความเข้มของแสงมีมากขึ้น จะทำให้การเคลื่อนที่มีมากขึ้นด้วย

2 การเปลี่ยนสี (chromatic adaptation)

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีความพิเศษที่แตกต่างจากสาหร่ายอื่นอีกประการหนึ่งคือ สามารถเปลี่ยนสีได้ การเปลี่ยนสีขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสง (wave length) และความเข้มของแสง (intensity) Gaidukov ได้ตั้งสมมุติฐานเรียกว่า "Gaidukov phenomenon" ซึ่งอธิบายว่าสาหร่ายสามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อเลี้ยงในที่มีแสงสีต่างๆ กัน (ซึ่งมีความยาวคลื่นแสงต่างกัน) ทั้งนี้เพราะแสงสีต่างกันทำให้สาหร่ายสร้างรงควัตถุมีปริมาณมากน้อยต่างกัน

Gaidukov ได้ใช้ *Oscillatoria* sp. ทดลองโดยให้แสงสีเขียว สาหร่ายชนิดนี้จะมีสีแดง เพราะแสงสีเขียวไปกระตุ้นให้สร้างรงควัตถุสีแดงพวกไฟโคเออริทริน แต่ถ้าเลี้ยงในแสงสีแดงจะทำให้สาหร่ายมีสีน้ำเงินมากขึ้น เพราะแสงสีแดงกระตุ้นให้สร้างไฟโคไซยานิน ซึ่งเป็นรงควัตถุสีน้ำเงิน เป็นต้น ส่วนอีกการทดลองหนึ่งให้ความเข้มแสงต่างกัน พบว่าถ้าให้ความเข้มแสงสูง สาหร่ายจะมีน้ำเงิน ถ้าความเข้มแสงต่ำจะเป็นสีแดง ซึ่งตรงกับความจริงตามธรรมชาติที่ว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่ขึ้นในระดับน้ำลึกๆ จะมีสีแดงหรือม่วง ส่วนที่ขึ้นอยู่ผิวหน้าน้ำ หรือผิวดินจะมีสีน้ำเงินเข้ม

การเปลี่ยนสีเซลล์ให้สัมพันธ์กับความยาวของคลื่นแสงได้ เช่น *Oscillatoria sancta* จะเปลี่ยนสีของเส้นสายเป็นสีเขียวเมื่อเลี้ยงในแสงสีแดงถ้าเลี้ยงในแสงสีน้ำตาลแกมเหลืองจะมีสีเขียวออกน้ำเงินแต่ถ้าเลี้ยงในแสงสีเขียวจะมีสีแดงและจะมีสีเหลืองแกมน้ำตาลเมื่อเลี้ยงในแสงสีน้ำเงิน ส่วน *Oscillatoria erythraeum* หรือ *Trichodesnium erythraeum* ซึ่งเป็นสาหร่ายที่พบใน น้ำลึก สีของเส้นสายจะมีสีออกแดงหรือม่วง แต่ถ้าเลี้ยงสาหร่ายในที่ที่มีความเข้มแสงมาก สีของเส้นสายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน แต่ถ้าความเข้มแสงน้อยจะมีสีแดง (นุชนรี, 2543)

การเปลี่ยนสีอีกประการหนึ่งของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน คาดว่าจะเกี่ยวกับการขาดไนโตรเจน พบว่าถ้าขาดสารอาหารตัวนี้จะทำให้สาหร่ายมีสีซีดลง หรือสีเหลือง แต่สำหรับสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่สามารถตรึงไนโตรเจนจากสิ่งแวดล้อม ก็จะไม่เปลี่ยนสีด้วยกรณีดังกล่าว

3 การก่อให้เกิดการบลูม (water bloom)

ในกระบวนการยูโทรพีเคชั่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่ทำให้เกิดการบลูมมักเป็นพวกสาหร่าย อาจจะเป็นพวกเซลล์เดียว เช่น *Microcystis* sp. หรือพวกที่เป็นเส้นสาย เช่น *Anabaenopsis* sp., *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Nostoc* sp., *Nodularia* sp., *Spirulina* sp., *Arthrospira* sp., *Oscillatoria* sp. และ *Gloeotrichia* sp. เป็นต้น

Oscillatoria sp. ชนิดที่ทำให้เกิดการบลูมของน้ำ ได้แก่ *Oscillatoria agardhii*, *Oscillatoria rubescens*, *Oscillatoria planctonica*, *Oscillatoria redekei*, *Oscillatoria erythraeum* และ *Oscillatoria thiebautii* นอกจากนี้ยังสามารถสร้างสารประกอบทางเคมีที่ทำให้เกิดกลิ่นโคลนขึ้นในสัตว์น้ำได้ ซึ่งสารประกอบดังกล่าวคือ จีออสมิน และเอ็มไอบี นอกจากนี้ *Oscillatoria agardhii* และ *Oscillatoria rubescens* สามารถปล่อยพิษที่มีผลต่อระบบการย่อยอาหารของสัตว์บางชนิดได้ เช่น แกะ ลิง และสุนัข เป็นต้น (Schwimmer and Schwimmer, 1985) โดยสารพิษจะไปทำลายตับ ซึ่งจะเรียกสารนี้ว่า “hepatotoxins” Sivonen (1990 อ้างโดย นุชนรี, 2543) รายงานว่า

การผลิต hepatotoxins นี้จะเกิดได้มากเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงๆ และมีความเข้มแสงต่ำ ทำให้เซลล์ตับตายจนเกิดอาการช็อกได้ภายในเวลา 2 - 3 ชั่วโมง หรือตายได้ในภายในเวลา 2 - 3 วัน และผลพวงมาจากการบลูมของ ได้แก่ *Oscillatoria agardhii*, *Oscillatoria rubescens* และ *Oscillatoria nigroviridis* คือ การเกิดอาการคัดผิวหนังเป็นผื่นหรือบวม เมื่อสัมผัสกับแหล่งน้ำที่มีการบลูมของสาหร่ายดังกล่าว (นุชนรี, 2543)

เมื่อเกิดสภาพการบลูมก็จะทำให้เกิดมลพิษของน้ำบริเวณนั้นน้ำจะเน่าเสีย เปลี่ยนสี เกิดกลิ่นเหม็น น้ำขาดออกซิเจน นอกจากนี้สาหร่ายบางชนิดยังปล่อยสารพิษออกมาในน้ำ ทำให้ปลาหรือสัตว์น้ำบริเวณนี้ตาย เนื่องจากสารพิษเหล่านี้ทำให้การหายใจติดขัดและอาจทำลายเนื้อเยื่อของตับ และถ้าสัตว์เลี้ยงมาบริโภคน้ำบริเวณนั้นก็อาจจะเป็นพิษต่อสัตว์เลี้ยงได้ บางครั้งปลาอาจตายด้วยสาเหตุที่สาหร่ายปริมาณมากเช่นนี้เข้าไปอุดช่องเหงือกทำให้ขาดออกซิเจน

นอกจากนี้ *Oscillatoria rubescens* ยังเป็นตัวชี้วัดการเกิด Eutrophication (คือ การเพิ่มขึ้นของกำลังผลิตปฐมภูมิ (primary productivity) ของแหล่งน้ำโดยมีสาเหตุมาจากการเพิ่มปริมาณของธาตุอาหารซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือจากการกระทำของมนุษย์) อย่างฉับพลันได้อีกด้วย (ลัดดา, 2530)

สภาวะแวดล้อม และปัจจัยที่มีผลต่อการเติบโตของสาหร่าย *Oscillatoria* sp.

สภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการเติบโตของสาหร่าย *Oscillatoria* sp.

1 ปัจจัยทางกายภาพ ประกอบด้วย (นุชนรี, 2543)

1.1 คลื่นแสง (light quality) รังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องผ่านผิวโลกและที่มองเห็นด้วยตาเปล่า จะมีช่วงคลื่นแสงตั้งแต่ 390 - 810 นาโนเมตร (Salisbury and Ross, 1969 อ้างโดย นุชนรี, 2543) เพื่อที่สาหร่ายสามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์แสงได้อยู่ระหว่าง 400 - 600 นาโนเมตร แต่ในพวกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถใช้แสงที่ช่วงคลื่น 275 นาโนเมตร ได้

1.2 ความเข้มแสง (light intensity) ถ้าสาหร่ายได้รับแสงที่มีความเข้มแสงมากเกินไปจะทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่สะสมในเซลล์ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของกลูตาเมต มีผลทำให้การสังเคราะห์แสง ATP ลดลง ส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตลดน้อยลงไปด้วย เนื่องจากการสังเคราะห์แสงลดลง (Oppenheimer, 1966; Falkowski, 1980 อ้างโดย นุชนรี, 2543) ส่วนการสังเคราะห์แสงที่ความเข้มแสงต่ำนั้นจะทำให้ปริมาณ

สารประกอบไนโตรเจนสูงขึ้น และความเข้มแสงจะสัมพันธ์กับการสร้างคาร์โบไฮเดรต ซึ่งถ้าความเข้มแสงสูง พบว่าจะมีการสร้างคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่

1.3 การให้แสง (light - dark cycle) ระยะเวลาที่สาหร่ายได้รับแสงและไม่ได้รับแสงมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงมาก เนื่องจากในช่วงมืดจะมีกระบวนการเมตาโบลิซึมเกิดขึ้น แต่ถ้ามีการให้แสงสว่างตลอด 24 ชั่วโมง จะทำให้สาหร่ายมีกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงตลอดเวลาเกินความจำเป็น (Eppley *et al*., 1971; Falkowski, 1980 อ้างโดย นุชนรี, 2543)

1.4 อุณหภูมิ (temperature) สาหร่ายจะทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงจำกัด ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วประมาณ 10 - 15 องศาเซลเซียส หรือมากกว่านั้น สาหร่ายจะไม่สามารถปรับตัวได้และจะตายในที่สุด และถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิประมาณ 4 - 5 องศาเซลเซียส จะมีผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงเพียงเล็กน้อย นอกจากนั้นอุณหภูมิยังมีผลต่อการแบ่งเซลล์ด้วย ในส่วนของ *Oscillatoria* sp. เองนั้นเป็นสาหร่ายที่สามารถอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างกว้าง Tabachek and Yurkowski (1976 อ้างโดย นุชนรี, 2543) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน 11 ชนิด ทั้งแบบ unialgal และ axenic culture โดยใช้แสง 1,000 ลักซ์ ที่อุณหภูมิ 15 และ 30 องศาเซลเซียส พบว่าสาหร่ายโตช้า แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้แสง 2,500 ลักซ์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมงต่อวัน และ 1,000 ลักซ์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน พบว่าสาหร่ายโตดี และถ้าใช้ความเข้มแสง 1,500 ลักซ์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าสาหร่ายมีการเจริญเติบโตที่ดีเช่นกัน

1.5 การเคลื่อนตัวของน้ำ มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย พบว่า สาหร่ายที่เลี้ยงอยู่ในน้ำที่เคลื่อนไหวตลอดเวลา มีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าสาหร่ายที่อยู่ในน้ำนิ่ง เนื่องจากไอออนสามารถผ่านและแพร่ผ่านเข้าสู่เซลล์ได้ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุอาหารด้วย

2 ปัจจัยทางเคมี ประกอบด้วย (จงกล และขจรเกียรติ์, 2548)

2.1 ธาตุอาหาร (nutrient) การเลี้ยงสาหร่ายในห้องปฏิบัติการนั้นหากมีการเติมอาหารที่สำคัญซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ลงไป โดยให้ได้รับแสง อุณหภูมิ และการหมุนเวียนของอากาศที่พอเหมาะ การเจริญเติบโตจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเลี้ยงสาหร่ายไว้นานๆ อาหารเริ่มหมดไป จะพบว่าไนเตรท และเหล็กเป็นธาตุอาหารที่จำกัดการเจริญเติบโต กรณีดังกล่าวต้องเติมไนเตรทและเหล็กลงไปเพื่อให้การเจริญเติบโตดำเนินต่อไปจนกระทั่งธาตุอาหารตัวอื่นหมดสำหรับธาตุเหล็กที่อยู่ในรูป unchelating agent ที่เมื่อเติมลงไปในอาหารจะไปจับกับอนุมูลฟอสเฟสเกิด

ตะกอนในอาหารที่เป็นด่าง ซึ่งทำให้สาหร่ายตายหมด ด้วยเหตุนี้สิ่งมีชีวิตจึงใช้ธาตุเหล็กในรูป chelating agent เช่น ethylene diamine tetra acetic acid (EDTA) (Fogg, 1966 อ้างโดย จงกล และขจรเกียรติ์, 2548) ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต และคุณภาพของสาหร่ายมีหลายชนิด ซึ่งแตกต่างกันตามชนิดของสาหร่าย แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ

2.1.1 ธาตุอาหารหลัก (macronutrient) หมายถึง ธาตุอาหารที่สาหร่ายสามารถนำไปใช้ในการสร้างโครงสร้าง เช่น ใช้ในการสร้างผนังเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ สารสี โปรตีน คาร์โบไฮเดรต จึงใช้ค่อนข้างมาก ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม ซัลเฟอร์ และโพแทสเซียม สำหรับไนโตรเจนรูปอนินทรีย์สารที่พบมากที่สุดและอาจถูกนำไปใช้ได้ตรงในรูปของโมเลกุลก๊าซไนโตรเจน ส่วนรูปอนินทรีย์สารที่สาหร่ายใช้มากที่สุด คือ แอมโมเนีย ส่วนไนเตรทเป็นสารอนินทรีย์สารที่มักพบได้มากที่สุดในทะเล และเป็นแหล่งให้ไนโตรเจนที่สำคัญแก่สาหร่าย ส่วนในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินนั้นสามารถใช้ในรูปแอมโมเนียได้ดีกว่าในรูปเกลือไนเตรท (Boussiba *et al.*, 1984) ซึ่งหากมีการขาดธาตุไนโตรเจนจะส่งผลให้เกิดการยับยั้งการสร้างไฟโคบิลินมากกว่าการไปยับยั้งการสร้างคลอโรฟิลล์ (Humm and Wicks, 1980) สัมพันธ์ (2529) รายงานว่าแหล่งธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนได้มาจากคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และ ก๊าซออกซิเจน ตามลำดับ แต่ธาตุคาร์บอนที่สาหร่ายใช้อาจอยู่ในรูปกรดคาร์บอนิคได้ ซึ่งจะใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง กรดคาร์บอนิคที่เป็นก๊าซซึ่งละลายในน้ำจะอยู่ในรูปต่างๆ กัน และมีผลต่อความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำด้วย ถ้าค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มจะพบคาร์บอนในรูปคาร์บอเนตมาก ทั้งคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นสารประกอบที่สำคัญของสารหลักภายในพืช ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ส่วนฟอสฟอรัสที่สาหร่ายใช้จะอยู่ในรูปของเกลือฟอสเฟตซึ่งเป็นพวกสารอนินทรีย์และที่พบอยู่ในแหล่งน้ำจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์มากกว่าสารอนินทรีย์ เช่น $H_2PO_4^-$, HPO_4^- และ PO_4^{3-} ทั้ง 3 รูปนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำ ลัดดา (2544) กล่าวว่าโซเดียมเป็นธาตุอาหารที่สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินต้องการปริมาณมากกว่าแพลงก์ตอนพืชชนิดอื่นที่อยู่ในน้ำจืด และถ้าขาดโซเดียมจะทำให้ไปยับยั้งการสร้างไฟโคบิลิน (Humm and Wicks, 1980) ซึ่งจะมีผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราส่วนของโซเดียมกับโปแตสเซียมยังมีผลต่อการใช้คลอรีนของสาหร่ายด้วย ในขณะที่แมกนีเซียมเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์

2.1.2 ธาตุอาหารรอง (micronutrient) หมายถึง ธาตุอาหารที่สาหร่ายสามารถนำมาใช้เป็นตัวช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์ ซึ่งสาหร่ายต้องการในปริมาณน้อยแต่ไม่สามารถขาดได้ โดยต้องการเป็นปริมาณมิลลิกรัมต่อลิตรหรือน้อยกว่านี้ แร่ธาตุเหล่านี้เป็นส่วนประกอบโมเลกุลที่สำคัญ เช่น เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต การผลิตเอ็นไซม์

หรือเป็นตัวกระตุ้นเอ็นไซม์ (ลัดดา, 2530) ซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้มีอยู่ 7 ชนิด ได้แก่ คลอรีน เหล็ก แมงกานีส โบรอน สังกะสี ทองแดง และโมลิบดีนัม (สัมพันธ์, 2529) ลัดดา (2544) กล่าวว่า ธาตุเหล็กมีความสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและช่วยดูดซับไนโตรเจน โดยจะช่วยสร้างคลอโรฟิลล์ เอ และ ไฟโคไซยานิน จึงจำเป็นต่อสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ถ้าเกิดการขาดจะมีผลต่อการเจริญเติบโตและสรีระของเซลล์ ส่วนแมงกานีสจำเป็นต้องใช้ในการสร้างคลอโรฟิลล์ โมลิบดีนัมมีผลต่อการสร้างไฟโคบิลิน ในขณะที่แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี เป็นธาตุอาหารที่เป็นองค์ประกอบสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและเอ็นไซม์หลายชนิด ซึ่งถ้ามีมากเกินไปอาจส่งผลให้สาหร่ายตายได้ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

1) ธาตุอาหารรองอนินทรีย์ (inorganic micronutrients) ธาตุอาหารรองอนินทรีย์ที่สาหร่ายส่วนมากต้องการใช้ ได้แก่ แมงกานีส เหล็ก สังกะสี ทองแดง โคบอลล์ โบรอน โซเดียม และซิลิกา

2) ธาตุอาหารรองอินทรีย์ (organic micronutrients) ธาตุอาหารรองอินทรีย์ที่สาหร่ายส่วนมากต้องการใช้ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต เกลืออินทรีย์ และวิตามิน

2.1.3 ลักษณะของสาหร่ายที่ขาดธาตุอาหาร (ยุวดี, 2546)

1) ปริมาณสีสำหรับใช้ในการสังเคราะห์แสงลดลง เช่น ถ้าขาดธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ ซิลิกา แมกนีเซียม เหล็ก โพแทศเซียม และโมลิบดินัม สีของเซลล์จะจางลง

2) เซลล์มีการสะสมอาหารเพิ่มขึ้นกว่าปกติ เช่น สะสมแป้ง หรือไขมัน จะเกิดขึ้นเมื่อสาหร่ายขาดธาตุอาหารบางชนิดหรือหลายชนิด

3) เซลล์มีการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิค และโปรตีนลดลง ซึ่งเป็นผลต่อเนื่องจากการที่เซลล์มีการสะสมแป้ง หรือไขมันเพิ่มขึ้น

2.2 ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเค็ม และปริมาณกรดคาร์บอนิค สาหร่ายแต่ละชนิดจะเจริญเติบโตได้ดีที่ความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำต่างกัน เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะเจริญเติบโตที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 6 - 11 (Richmond, 1986) แต่ค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วงประมาณ 9 - 10 และความเป็นกรดเป็นด่างที่ต่ำที่สุดไม่ควรเกิน 4.5 - 5.0 (Rippka *et al.*, 1981) ซึ่งความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสมทำให้มีการดูดซึมอาหารเป็นไปด้วยดี

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

3 ปัจจัยทางชีวภาพ สาหร่ายที่ยังอ่อนหรืออายุน้อย จะสามารถดูดซึมธาตุอาหารได้ดีกว่าสาหร่ายที่มีอายุมาก สภาพของสาหร่ายที่อยู่ในบริเวณที่มีธาตุอาหารแตกต่างกันพบว่าสาหร่ายอยู่ในบริเวณที่มีธาตุอาหารปริมาณมาก เมื่อนำมาเลี้ยงใหม่เพื่อศึกษาการดูดซึมธาตุอาหาร พบว่าสาหร่ายดังกล่าวจะมีอัตราการดูดซึมน้อยกว่าสาหร่ายที่อยู่ในบริเวณที่มีธาตุอาหารปริมาณน้อย

การเจริญเติบโตของสาหร่าย *Oscillatoria* sp. (นุชนรี, 2543; ขจรเกียรติ์, 2549)

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระบบปิด (closed system) สาหร่ายจะมีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์ แต่อัตราการเจริญเติบโตจะลดลงจนกลายเป็นศูนย์ในที่สุด เนื่องจากสาหร่ายทนไม่ได้ต่อสารที่เซลล์สาหร่ายปล่อยออกมารวมถึงการมีแร่ธาตุอาหาร และแสงสว่างไม่เพียงพอต่อความต้องการ

การวัดมวลชีวภาพหรือปริมาณของสาหร่าย เพื่อศึกษาการเพิ่มจำนวน และการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่ทำการเพาะเลี้ยงนั้น สามารถประเมินหรือทำการวัดได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การนับจำนวน (Number) หรือหามวลชีวภาพ (Biomass) ของสาหร่ายต่อหน่วยปริมาตรน้ำ โดยการที่จะเลือกใช้วิธีใดนั้นต้องคำนึงถึงความเหมาะสม และข้อจำกัดของแต่ละวิธี ตลอดจนชนิดของสาหร่าย อย่างไรก็ตามก็ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการศึกษาด้วย การวัดมวลชีวภาพ และการเจริญเติบโตของสาหร่าย จะทำให้ทราบอัตราการเติบโต หรือ “Growth rate” ของเซลล์สาหร่ายที่ทำการเพาะเลี้ยง ซึ่งมีความสำคัญต่อการตรวจสอบประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงสาหร่ายตลอดจนระบบการจัดการเพาะเลี้ยงให้ได้ผลผลิตของสาหร่ายสูงสุด ทั้งนี้การเจริญเติบโตของสาหร่ายมีลักษณะกราฟโค้งรูปตัว “ S ” (sigmoid curve) ซึ่งเรียกว่า เส้นโค้งการเติบโต (growth curve) โดยเส้นกราฟหรือเส้นโค้งการเจริญเติบโต แบ่งออกได้ 5 ระยะ คือ

1 ระยะปรับตัว (Lag phase or inductional phase) เป็นช่วงที่มีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ระยะนี้จะไม่มีการเพิ่มจำนวนเซลล์

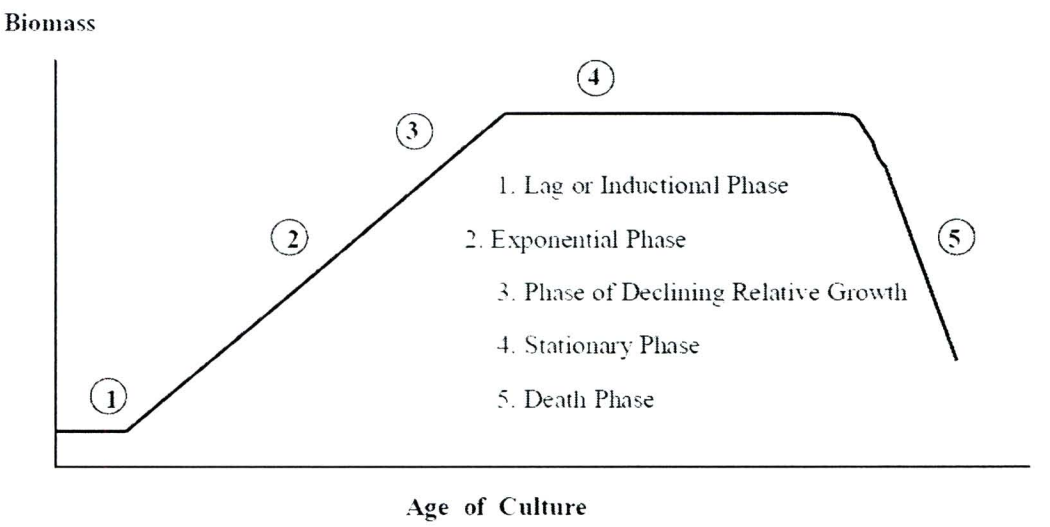
2 ระยะเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential phase) เป็นช่วงที่มีการแบ่งเซลล์และเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว มีเมตาโบลิซึมสูงที่สุด จึงมีอัตราการเจริญสูงสุดและเป็นอัตราการเจริญเติบโตที่คงที่ ระยะนี้จะนานเท่าใดขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหาร และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมีของสิ่งแวดล้อม รวมถึงผลผลิตภายนอกของเซลล์ด้วย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 12 ก.ย. 2554
เลขทะเบียน 242304
เลขเรียกหนังสือ

3 ระยะเฉื่อย (Retardation phase or phase of declining relative growth) เป็นช่วงที่การเจริญเติบโตของสาหร่ายเริ่มน้อยลง เพราะขาดธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน เหล็ก คาร์บอน เป็นต้น หรือเนื่องจากมวลมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้เกิดการบังแสงระหว่างเซลล์เอง ซึ่งจะมีผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงที่ลดลง ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายลงด้วย

4 ระยะคงที่ (Stationary phase) เป็นช่วงที่มวลหรือจำนวนมีปริมาณคงที่ แต่องค์ประกอบต่างๆ ภายในเซลล์บางอย่างอาจมีปริมาณเพิ่มขึ้น บางอย่างอาจมีปริมาณลดลง เนื่องจากการขาดแคลนแร่ธาตุอาหารที่สำคัญ รวมถึงการขาดแคลนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการยับยั้งการเจริญเติบโตโดยผลผลิตภายนอกเซลล์ที่สาหร่ายปล่อยออกมา การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างในอาหาร การได้รับแสงไม่พอเพียงเนื่องจากความหนาแน่นของเซลล์

5 ระยะตาย (Death phase) มวลเริ่มลดลงเนื่องจากอัตราส่วนของการหายใจต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เซลล์หยุดการเติบโตเนื่องจากธาตุอาหารหมดลง เซลล์จะเริ่มตายและตายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



ภาพ 2 กราฟการเจริญเติบโตของสาหร่าย

ที่มา: ลัดดา (2544)

คุณค่าทางโภชนาการ และรงควัตถุสารสี (pigment) ของสาหร่าย *Oscillatoria* sp.

คุณค่าทางโภชนาการของสาหร่าย *Oscillatoria* sp.

1 ความชื้น (Moisture)

การหาความชื้น เป็นสิ่งจำเป็นมากเพื่อจะได้สามารถหาค่าตัวอย่างสาหร่ายเปียกเมื่อคำนวณกลับมา การหาความชื้นนั้นทำได้หลายวิธีแต่ละวิธีที่ง่ายที่สุดคือ การทำให้แห้งซึ่งเป็นวิธีที่ใช้คำนวณหาปริมาณน้ำที่สูญเสียไป หลังจากที่ทำให้แห้งแล้ว ข้อเสีย ที่อาจเกิดขึ้นจากการทำวิธีนี้คือ

1.1 เป็นการยากที่จะทำให้แห้งสนิท

1.2 ที่อุณหภูมิหนึ่งขณะทำให้แห้ง อาจทำให้สารอาหารบางชนิดสูญสลายไปด้วย

1.3 สารอื่นๆ ที่ระเหยได้นอกจากนั้น จะสูญเสียไปด้วย (นิวุฒิ, 2549)

สุมนทิพย์ และปิยะดา (2532) ได้วิเคราะห์คุณค่าทางอาหารของ *Oscillatoria* sp. พบว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ 12.37 $\pm$ 0.12 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสาหร่าย *Spirulina* sp. ความชื้นเท่ากับ 12.34$\pm$0.19 เปอร์เซ็นต์ จงกล และคณะ (2552) กล่าวว่าสาหร่าย *Spirulina platensis* มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ อยู่ระหว่าง 6.65 - 11.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ที่เลี้ยงในสูตรอาหาร MZm ส่วนในสาหร่ายสีเขียว พวกสาหร่าย *Cladophora* sp. พบว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ 6.61 เปอร์เซ็นต์ (ยุวดี, 2548) สุฤทธิ์ และคณะ (2551) กล่าวว่าสาหร่าย *Cladophora* sp. มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ 13.19 เปอร์เซ็นต์

2 เถ้า (Ash)

ปริมาณสารอินทรีย์ ที่มีอยู่ในสาหร่ายหลังจากที่เผาผลาญ สารอินทรีย์หมดแล้ว ในการหามักจะใช้ความร้อนเผาผลาญสารอินทรีย์ ดังนั้น ค่าเถ้า หรือ ash ที่ได้จึงจำเป็นต้องเท่ากับปริมาณสารเกลือแร่ ทั้งหมดที่มีอยู่ในสาหร่าย ในตอนแรกเพราะสารอินทรีย์ หรือเกลือแร่บางส่วนจะสูญเสียไปโดยระเหยเพราะความร้อนสูงที่ใช้การเผานั่นเอง ค่าเถ้าที่ได้จึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของสารอาหารนั้นๆ (นิวุฒิ, 2549)

สุมนทิพย์ และปิยะดา (2532) ได้วิเคราะห์คุณค่าทางอาหารของสาหร่าย *Oscillatoria* sp. พบว่าเปอร์เซ็นต์เถ้าเท่ากับ 11.85$\pm$0.68 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสาหร่าย *Spirulina* sp. เปอร์เซ็นต์เถ้าเท่ากับ 7.31$\pm$0.22 เปอร์เซ็นต์ จงกล และคณะ (2552) กล่าวว่าสาหร่าย *Spirulina*

platensis มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับอยู่ระหว่าง 4.25 - 26.58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ที่เลี้ยงในสูตรอาหารน้ำทิ้งจากโรงอาหาร (cafeteria water; Cw) Cw 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสาหร่ายสีเขียวพวกสาหร่าย *Cladophora* sp. พบว่าเปอร์เซ็นต์เถ้าเท่ากับ 19.6 เปอร์เซ็นต์ (ยุวดี, 2548) สุฤทธิ์ และคณะ (2551) กล่าวว่าสาหร่าย *Cladophora* sp. มีเปอร์เซ็นต์เถ้าเท่ากับ 20.80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสาหร่าย *Spirogyra* sp. มีเปอร์เซ็นต์เถ้า 7.66 เปอร์เซ็นต์ (Peerapornisal *et al.*, 1997 อ้างโดยจงกล, 2552)

3 โปรตีน (protein)

โปรตีนเป็นสารอาหารที่ให้พลังงานและเป็นองค์ประกอบของเซลล์ทุกส่วนของร่างกายเซลล์ต้องการโปรตีน เพื่อการเจริญเติบโต และซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ แหล่งของโปรตีนมีอยู่ด้วยกัน 2 แหล่งคือ แหล่งโปรตีนจากสัตว์ ได้แก่ เนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์จากสัตว์ เช่น ไรแดง หนอนแดง เนื้อปน ปลาเป็ด เป็นต้น และแหล่งโปรตีนจากพืช ได้แก่ พืชผักทุกชนิดที่ประกอบด้วยโปรตีน เช่น กากถั่วเหลือง เมล็ดถั่วเหลือง กาถั่วลิสง และสาหร่าย เป็นต้น

สุมนทิพย์ และปิยะดา (2532) ได้วิเคราะห์คุณค่าทางอาหารของสาหร่าย *Oscillatoria* sp. พบว่าเปอร์เซ็นต์โปรตีนเท่ากับ 44.57±0.16 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสาหร่าย *Spirulina* sp. เปอร์เซ็นต์โปรตีนเท่ากับ 53.88±0.27 เปอร์เซ็นต์ Mohan *et al.* (2010) กล่าวว่าสาหร่าย *Oscillatoria* sp. มีโปรตีนเท่ากับ 14.24 กรัมต่อมิลลิลิตร Gisela *et al.* (2009) กล่าวว่าสาหร่าย *Oscillatoria* sp. MOF-06 มีโปรตีนเท่ากับ 486.07±26.78 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จงกล และคณะ (2552) กล่าวว่าสาหร่าย *Spirulina platensis* มีเปอร์เซ็นต์โปรตีนเท่ากับ อยู่ระหว่าง 31.94 - 55.44 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ที่เลี้ยงในสูตรอาหาร MZm ส่วนในสาหร่ายสีเขียว พวกสาหร่าย *Cladophora* sp. พบว่าเปอร์เซ็นต์โปรตีนเท่ากับ 19.3 เปอร์เซ็นต์ (ยุวดี, 2548)

4 ไขมัน (lipid)

ไขมันเป็นสารอาหารที่ให้พลังงานสูง ซึ่งสูงกว่าคาร์โบไฮเดรตและถ้าเหลือใช้เกินความต้องการ สามารถเก็บสะสมไว้ใช่เองได้ในเวลาที่ขาดแคลน ไขมันเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต เพราะว่าไขมันเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์ แหล่งของไขมันที่เป็นวัตถุดิบอาหาร ได้แก่ กากถั่วเหลือง รำละเอียด ปลาหมักป่น กากถั่วลิสง และรำข้าวโพด เป็นต้น

สุมนทิพย์ และปิยะดา (2532) ได้วิเคราะห์คุณค่าทางอาหารของสาหร่าย *Oscillatoria* sp. พบว่าเปอร์เซ็นต์ไขมันเท่ากับ 1.88±0.10 เปอร์เซ็นต์ Mohan *et al.* (2010) กล่าวว่าสาหร่าย *Oscillatoria* sp. มีไขมันเท่ากับ 18.99 กรัมต่อมิลลิลิตร จงกล และคณะ (2552) กล่าวว่า

สาหร่าย *Spirulina platensis* มีเปอร์เซ็นต์ไขมันเท่ากับ อยู่ระหว่าง 1.79 - 3.57เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ที่เลี้ยงในสูตรอาหารน้ำทิ้งจากโรงอาหาร (cafeteria water; Cw) Cw 100 เปอร์เซ็นต์ สุมนทิพย์ และ ปิยะดา (2532) ได้วิเคราะห์คุณค่าทางอาหารของสาหร่าย *Spirulina* sp. เปอร์เซ็นต์ไขมันเท่ากับ 2.10±0.01 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสาหร่ายสีเขียว พวกสาหร่าย *Cladophora* sp. พบว่าเปอร์เซ็นต์ไขมันเท่ากับ 3.12 เปอร์เซ็นต์ (ยุวดี, 2548) สุฤทธิ์ และคณะ (2551) กล่าวว่าสาหร่าย *Cladophora* sp. มีเปอร์เซ็นต์ไขมันเท่ากับ 6.81 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสาหร่าย *Spirogyra* sp. มีเปอร์เซ็นต์ไขมัน 5.12 เปอร์เซ็นต์ (Peerapornisal *et al*., 1997 อ้างโดย จงกล, 2552)

5 เยื่อใย (Fiber)

การหาเยื่อใยสามารถกระทำได้โดยการต้มตัวอย่างกับกรด H_2SO_4 ที่เข้มข้น 1.25 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลานาน 30 นาที เสร็จแล้วจึงกรอง ต่อมานำกากนั้นไปต้มด้วยด่าง NaOH ที่เข้มข้น 1.25 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลาอีก 30 นาที นำกากที่เหลือไปเผาที่ 500 - 600 องศาเซลเซียส ส่วนที่หายไปคือเยื่อใยหยาบ ซึ่งประกอบด้วย Hemicellulose, Cellulose และ Lignin ค่าปริมาณเยื่อใยหยาบ ถ้าสูงมากแสดงว่าคุณค่าทางโภชนาการของอาหารนั้นต่ำ (นิวุฒิ, 2549)

สุมนทิพย์ และปิยะดา (2532) ได้วิเคราะห์คุณค่าทางอาหารของสาหร่าย *Oscillatoria* sp. พบว่าเปอร์เซ็นต์เยื่อใยเท่ากับ 1.45±0.13 เปอร์เซ็นต์ จงกล และคณะ (2552) กล่าวว่าสาหร่าย *Spirulina platensis* มีเปอร์เซ็นต์เยื่อใยเท่ากับ อยู่ระหว่าง 2.12 - 10.11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ที่เลี้ยงในสูตรอาหาร MZm สุมนทิพย์ และปิยะดา (2532) ได้วิเคราะห์คุณค่าทางอาหารของสาหร่าย *Spirulina* sp. เปอร์เซ็นต์เยื่อใยเท่ากับ 0.93±0.08 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสาหร่ายสีเขียว พวกสาหร่าย *Cladophora* sp. พบว่าเปอร์เซ็นต์เยื่อใยเท่ากับ 21.9 เปอร์เซ็นต์ (ยุวดี, 2548) สุฤทธิ์ และคณะ (2551) กล่าวว่าสาหร่าย *Cladophora* sp. มีเปอร์เซ็นต์เยื่อใยเท่ากับ 19.06 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสาหร่าย *Spirogyra* sp. มีเปอร์เซ็นต์เยื่อใย 11.78 เปอร์เซ็นต์ (Peerapornisal *et al*., 1997 อ้างโดย จงกล, 2552)

6 คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)

คาร์โบไฮเดรตเป็นสารอาหารที่ให้พลังงานเป็นสำคัญ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ไม่เหมือนกับโปรตีนหรือไขมัน ซึ่งจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาหนึ่งในการเผาผลาญให้ได้พลังงาน และถ้าเหลือใช้เกินความต้องการ คาร์โบไฮเดรตจะเปลี่ยนเป็นพลังงานสำรองในรูปของไขมัน และเมื่อขาดแคลนคาร์โบไฮเดรต จะเปลี่ยนไขมันให้กลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้ง

แหล่งของคาร์โบไฮเดรต ได้จากพืชเป็นวัสดุอาหาร เช่น รำข้าว ปลายข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง สาหร่ายทะเลป่น และ กากถั่วเหลือง เป็นต้น (นิวุฒิ, 2549)

สุมนทิพย์ และปิยะดา (2532) ได้วิเคราะห์คุณค่าทางอาหารของสาหร่าย *Oscillatoria* sp. พบว่าเปอร์เซ็นต์คาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 27.87 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสาหร่าย *Spirulina* sp. เปอร์เซ็นต์คาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 23.44 เปอร์เซ็นต์ Mohan *et al.* (2010) กล่าวว่าสาหร่าย *Oscillatoria* sp. มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 61.71 กรัมต่อมิลลิลิตร Gisela *et al.* (2009) กล่าวว่าสาหร่าย *Oscillatoria* sp. MOF-06 มีคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 6.91±0.11 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จงกล และคณะ (2552) กล่าวว่าสาหร่าย *Spirulina platensis* มีเปอร์เซ็นต์คาร์โบไฮเดรตเท่ากับ อยู่ระหว่าง 15.82 - 25.24 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ที่เลี้ยงในสูตรอาหาร MZm ส่วนในสาหร่ายสีเขียว พวกสาหร่าย *Cladophora* sp. พบว่าเปอร์เซ็นต์คาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 30.34 เปอร์เซ็นต์ (ยุวดี, 2548) สุฤทธิ์ และคณะ (2551) กล่าวว่าสาหร่าย *Cladophora* sp. มีเปอร์เซ็นต์คาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 11.92 เปอร์เซ็นต์ Peerapornisal *et al.* (1997 อ้างโดย จงกล, 2552) กล่าวว่าสาหร่าย *Spirogyra* sp. มีเปอร์เซ็นต์คาร์โบไฮเดรต 56.31 เปอร์เซ็นต์

7 กรดไขมัน (Fatty Acid) (พรพจน์, ม.ป.ป.; ดุจชีวัน, ม.ป.ป.)

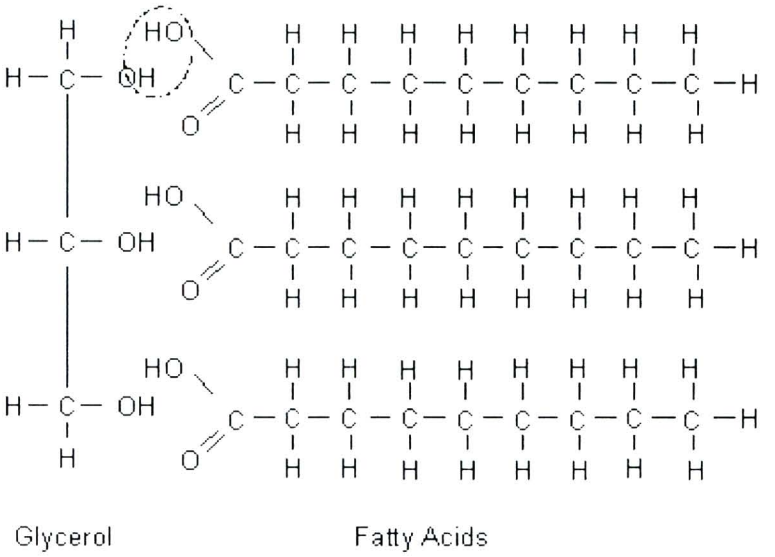
กรดไขมันหลายชนิดเป็นที่รู้จักกันดีในปัจจุบันว่ามีส่วนช่วยในการเสริมสร้างสุขภาพ โดยไขมันที่เรารับประทานนั้นมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ใหญ่ๆ คือ

7.1 ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ส่วนใหญ่ไขมันที่เรากินไปทั้งหมด ก็คือไตรกลีเซอไรด์ ช่วยสร้างความอบอุ่นให้แก่ร่างกาย และยังเป็นตัวทำละลายสำหรับวิตามินกลุ่มที่ละลายในไขมัน ได้แก่ วิตามินเอ ดี อี และเค

7.2 คอเลสเตอรอล (cholesterol) เป็นส่วนประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ เป็นองค์ประกอบสำคัญในเยื่อของสมองและระบบประสาท ใช้สร้างกรดน้ำดี ทั้งยังเป็นวัตถุดิบในการสร้างฮอร์โมนบางชนิด เช่น ฮอร์โมนเพศชาย ฮอร์โมนเพศหญิง และฮอร์โมนคอร์ติโซน และเป็นส่วนประกอบในโมเลกุลของวิตามิน ร่างกายสามารถสร้างคอเลสเตอรอลขึ้นเองได้จากตับ คอเลสเตอรอลที่ได้จากอาหารมีเฉพาะในอาหารที่มาจากสัตว์เท่านั้น มีมากในอาหารบางชนิด เช่น ไข่แดง เครื่องในสัตว์ มันสัตว์ สัตว์น้ำบางชนิด

7.3 ฟอสโฟลิพิด (phospholipids) เป็นไขมันชนิดหนึ่งที่ร่างกายใช้เป็นส่วนประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ เช่น เซลล์เม็ดเลือดแดง เซลล์ผนังหลอดเลือด เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นสารลดความ ตึงผิวที่อยู่ภายในถุงลมของปอด ถ้าขาดสารนี้เสียแล้ว ถุงลมปอดก็ไม่อาจพองตัว

ได้ในยามที่เราสูดลมหายในเข้าไป ฟอสโฟไลปิดจึงเป็นทั้งสารที่ร่างกายต้องใช้ในขณะทำงานตามสรีรของร่างกาย



ภาพ 3 โครงสร้างของ Triglyceride
ที่มา: ดุจชีวัน (ม.ป.ป.)

โครงสร้างของกรดไขมัน (พรพจน์, ม.ป.ป.; ดุจชีวัน, ม.ป.ป.)

กรดไขมันประกอบขึ้นจากการเรียงตัวเป็นสายโซ่ของธาตุคาร์บอนโดยที่ปลายข้างหนึ่งเป็นหมู่ methyl group ($-CH_3$) และปลายอีกข้างหนึ่งเป็นหมู่ carboxyl group (-COOH) ซึ่งจำนวนของคาร์บอนมีได้หลายตัว โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 4 - 22 อะตอมหากมีความยาวน้อยกว่า 6 จะเรียกว่ากรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid) หากมีความยาวมากกว่า 12 ก็จะเรียกว่า กรดไขมันสายยาว (long chain fatty acid) ซึ่งกรดไขมันเหล่านี้อาจจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเดี่ยวหรือพันธะคู่ก็ได้ ชื่อของกรดไขมันที่เรารู้จักกันนั้น ส่วนใหญ่มักจะเป็นชื่อสามัญในขณะที่ชื่อวิทยาศาสตร์ของกรดไขมันนั้น ไม่ค่อยเป็นที่นิยมเรียกกันเท่าไรนัก การตั้งชื่อวิทยาศาสตร์ของกรดไขมัน จะอาศัยความยาวของคาร์บอน ตำแหน่งและจำนวนของพันธะคู่ของสายโซ่คาร์บอนเป็นสำคัญกรดไขมันสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่คือ

ไขมันเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งของสิ่งมีชีวิต ไขมันส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) ซึ่งไตรกลีเซอไรด์ประกอบด้วยกรดไขมัน (Fatty acid) และ กลีเซอรอล (glycerol) กรดไขมันเป็นสารประกอบอินทรีย์หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

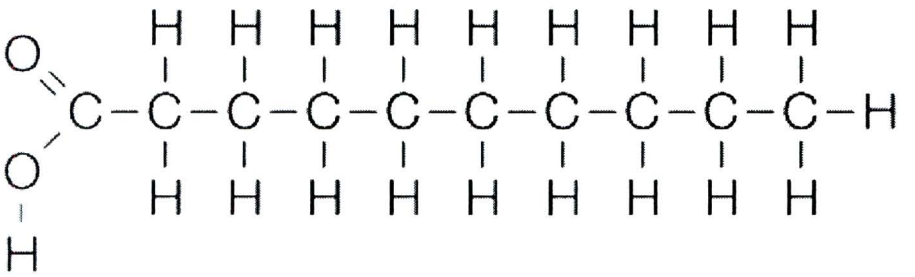
ซึ่งไขมันส่วนใหญ่จะมีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ระหว่าง 4 - 20 อะตอม ที่พบมากมีจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 อะตอม พันธะที่ต่อระหว่างคาร์บอนอะตอมมีทั้งชนิดที่เป็นพันธะเดี่ยว (Single bond) และพันธะคู่ (Double bond) กรดไขมันที่พบเฉพาะพันธะเดี่ยวเรียกว่า "กรดไขมันอิ่มตัว" (Saturated Fatty Acid) พบในปริมาณที่สูงในไขมันสัตว์ และกรดไขมันที่พบพันธะคู่รวมอยู่ด้วยเรียกว่า "กรดไขมันไม่อิ่มตัว" (Unsaturated Fatty Acid) พบในปริมาณที่สูงในน้ำมันพืช

การจำแนกชนิดกรดไขมัน (ดุจชีวัน, ม.ป.ป.)

โครงสร้างของกรดไขมันประกอบด้วยส่วนของไฮโดรคาร์บอนและหมู่คาร์บอกซิล กรดไขมันอาจมีพันธะเดี่ยว พันธะคู่ หรือพันธะสาม ดังนั้นจึงจัดจำแนกชนิดของกรดไขมันได้เป็น 2 ชนิด คือ กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty Acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acid)

1) กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid)

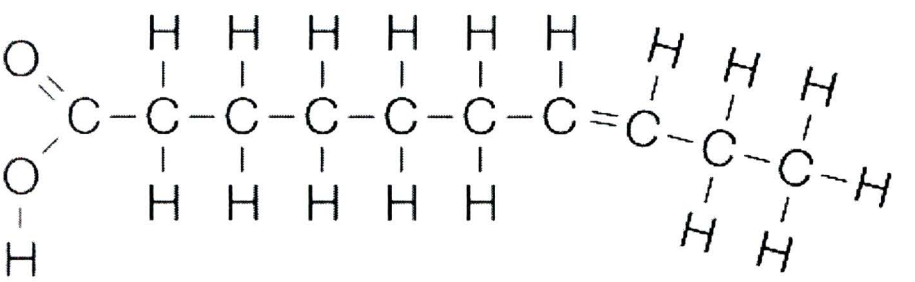
กรดไขมันอิ่มตัว หมายถึง กรดไขมันที่มีธาตุคาร์บอนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเดี่ยวเท่านั้น ส่วนใหญ่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง กรดไขมันอิ่มตัวนี้ร่างกายสามารถสังเคราะห์ขึ้นมาเองได้ จึงจัดว่าเป็นกรดไขมันที่ไม่จำเป็น (Nonessential fatty acid) ตัวอย่างเช่น กรดบิวทาริก (Butyric acid, C4:0), กรดปาล์มมิติก (Plamitic acid, C16:0), กรดสเตียริก (Stearic acid, C18:0), กรดอะราคิดิก (Arachidic acid, C20:0) ซึ่งการรับประทานอาหารที่มีไขมันชนิดอิ่มตัว จะทำให้ไขมันในเลือดสูง และเป็นปัจจัยเสี่ยงต่อโรคหลอดเลือดตีบ แหล่งอาหารที่มีกรดไขมันอิ่มตัวมาก ได้แก่ อาหารที่ได้จากไขมันสัตว์ หรือผลิตภัณฑ์จากสัตว์ น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว เป็นต้น



ภาพ 4 โครงสร้างของกรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid)
ที่มา: กุสุมา (ม.ป.ป.)

2) กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid)

กรดไขมันไม่อิ่มตัว หมายถึง กรดไขมันที่มีธาตุคาร์บอนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ จะมีอะตอมของคาร์บอนที่เรียงตัวกันเกิดมีบางตำแหน่งที่จับไฮโดรเจนไม่เต็มกำลังเกิดมีพันธะคู่ (double bond) อยู่บางตำแหน่งหรือมากกว่า กรดไขมันไม่อิ่มตัวนี้ ร่างกายไม่สามารถสังเคราะห์ขึ้นมาเองได้ จึงจัดว่าเป็นกรดไขมันที่จำเป็น (Essential fatty acid) ตัวอย่างเช่น กรดไลโนเลอิก (Lionleic acid, C18:2), กรดโอเลอิก (Oleic acid, C18:1), กรดไลโนเลนิก (Linolenic acid, C18:3), กรดอะราคิโดนิก (Arachidonic acid, C20:4) ซึ่งสามารถแบ่งกรดไขมันชนิดนี้ออกเป็น 2 ชนิด



ภาพ 5 โครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid)
ที่มา: กุสุมา (ม.ป.ป.)

2.1) กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (Monounsaturated Fatty Acid; MUFA) เป็นกรดไขมันที่มีธาตุคาร์บอนในสายโซ่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่เพียงหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น ส่วนใหญ่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง เป็นสารอาหารที่แพทย์ และนักโภชนาการ แนะนำให้รับประทานเพราะสามารถช่วยลดคอเลสเตอรอลไตรกลีเซอไรด์ และยังช่วยให้น้ำเลือดไม่หนืดข้น ซึ่งเป็นผลดีต่อสุขภาพหัวใจและหลอดเลือด นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มคอเลสเตอรอลความหนาแน่นสูง (High Density Lipoprotein Cholesterol; HDL Cholesterol) ซึ่งมีส่วนช่วยในการลดคอเลสเตอรอลในเลือดอาหารที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวสูงได้แก่ ถั่วต่างๆ และ ผลมะกอก เป็นต้น กรดไขมันในกลุ่มนี้ที่พบมากในธรรมชาติ คือ กรดไลโนเลอิก กรดปาล์มมิติก

2.2) กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyunsaturated Fatty Acid; PUFA) เป็นกรดไขมันที่มีธาตุคาร์บอนในสายโซ่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่หลายตำแหน่งซึ่งคนทั่วไปรู้จักดี มี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มโอเมกา 3 (omega 3) และกลุ่มโอเมกา 6 (omega 6) โดยทั้ง 2 กลุ่มจัดเป็นกรดไขมันจำเป็น (Essential Fatty Acid; EFA) สำหรับร่างกาย การรับประทานไขมันกลุ่มนี้จะสามารถลดระดับคอเลสเตอรอลได้อีกด้วย ซึ่งกรดไขมันชนิดนี้ พบได้ทั่วไปในน้ำมันพืชทั้งหลาย ไม่ว่าจะเป็น น้ำมันข้าวโพด น้ำมันดอกทานตะวัน หรือน้ำมันถั่วเหลือง กรดไขมันในกลุ่มนี้ที่พบมากในธรรมชาติได้แก่ กรดไลโนเลอิก ซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย

ตาราง 1 กรดไขมันชนิดต่างๆ ที่พบได้ทั่วไปในพืชและสัตว์

ชื่อสามัญ	ชื่อวิทยาศาสตร์	ชื่อย่อ
กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acids)		
acetic	ethanoic	2:0
butyric	butanoic	4:0
caproic	hexanoic	6:0
caprylic	octanoic	8:0
capric	decanoic	10:0
lauric	dodecanoic	12:0
myristic	tetradecanoic	14:0
palmitic	hexadecanoic	16:0
stearic	octadecanoic	18:0
arachidic	eicosanoic	20:0
behenic	docasanoic	22:0
กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (Monounsaturated fatty acids)		
palmitoleic	*Cis*-9-hehadecenoic	16:1 (n-7)
petroselinic	*Cis*-6-octadecenoic	18:1 (n-12)
oleic	*Cis*-9- octadecenoic	18:1 (n-9)
Cis-vaccenic	*Cis*-11- octadecenoic	18:1 (n-7)
erucic	*Cis*-13-docosenoic	22:1 (n-9)
nervonic	*Cis*-15- tetracosenoic	24:1 (n-9)

ตาราง 1 (ต่อ)

กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyunsaturated fatty acids)		
ชื่อสามัญ	**ชื่อวิทยาศาสตร์**	**ชื่อย่อ**
linoleic	9,12-octadecadienoic	18:2 (n-6)
γ -linolenic	6,9,12-octadecadienoic	18:3 (n-6)
α-linolenic	9,12,15-octadecadienoic	18:3 (n-3)
Arachidonic (ARA)	5, 8,11,14-eicosatetraenoic	20:3 (n-6)
Eicosapentaenoic (EPA)	5,8,11,14,17-eicosapentaenoic	20:5 (n-3)
Docosahexaenoic (DHA)	4,7,10,13,16,19-docosahexaenoic	22:6 (n-3)

ที่มา: พรพจน์ (ม.ป.ป.)

คุณสมบัติของกรดไขมัน (ดุจชีวัน, ม.ป.ป.)

1) กรดไขมันในสัตว์ (ยกเว้นปลา) มีความอิ่มตัวสูงและมีโคเลสเตอรอล ส่วนในพืช (ยกเว้นน้ำมันมะพร้าว) มีความอิ่มตัวต่ำและไม่มีโคเลสเตอรอล

2) พันธะคู่ในกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะอยู่ในคอนฟิกุเรชันแบบซิส ถ้ามีตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไป จะเป็นแบบนอนคอน จูเกต (nonconjugated double bond, -CH=CH-CH2-CH=CH-) ซึ่งมีหมู่เมธิลีน (CH2) คั่นกลาง

3) กรดไขมันไม่อิ่มตัวมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่ากรดไขมันอิ่มตัว จุดหลอมเหลวของกรดไขมันสูงขึ้นเมื่อความยาว โซ่เพิ่มขึ้น

4) กรดไขมันอิ่มตัวมีเฉพาะพันธะเดี่ยวที่มีการหมุนเสรี (freedom of rotation) ทำให้มีโครง รูปแบบซิกแซก ในแนวตรง ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่ที่หมุนไม่ได้ทำให้สายโซ่แข็งแกร่ง คอนฟิกุเรชันแบบซิสของพันธะ คู่ทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนงอและหดสั้นลง คอนฟิกุเลชัน แบบทรานส์มีโครงรูปเหมือนกรดไขมันอิ่มตัว และ คอนฟิกุเรชันแบบซิสเสถียรน้อยกว่าแบบทรานส์ ถ้าให้ความร้อน และมีตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถเปลี่ยนเป็นแบบทรานส์ได้

5) กรดไขมันที่มีสายโซ่ยาว C16 - C18 ไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่เกลือโซเดียมและเกลือโปแทสเซียมของมัน เรียกว่า สบู่ สามารถสร้างไมเซลล์ (micelle) ในน้ำได้ด้วยแรงไฮโดรโฟบิก (hydro phobic force)

6) กรดไขมันไม่สามารถดูดแสงในช่วง visible light และ near ultraviolet light แต่ถ้าใช้โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และให้ความร้อนกับกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 พันธะ สามารถเปลี่ยนพันธะ คู่ให้เป็นแบบคอนจูเกต (conjugated double bond,-CH=CH-CH=CH-) ซึ่งสามารถดูดแสงได้ใน ช่วงคลื่นแสง 230 - 260 นาโนเมตร จึงใช้เป็นวิธีหาปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากกว่า 1 พันธะได้

7) ฮาโลเจน (halogen) เช่น ไอโอดีน หรือคลอรีน สามารถเติมลงในพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวได้ จึงใช้วิธีนี้หาจำนวนพันธะคู่ในกรดไขมัน หรือลิพิดได้

8) กรดไขมันในสิ่งมีชีวิตจะอยู่ในรูปเอสเตอร์ (ester) หรือ เอไมด์ (amide) และกรดไขมันอิสระมีค่า pKa ประมาณ 4.85 จึงสามารถแตกตัวได้ที่ physiological pH และพบปริมาณน้อยในพลาสมา สามารถจับกับ โปรตีนอัลบูมินได้

แหล่งที่มาของกรดไขมัน

กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่ใช้เป็นอาหารเสริมสุขภาพซึ่งมีจำหน่ายตามท้องตลาดส่วนใหญ่นั้นจะได้จากการสกัดจากต่อมหมวกไต และตับของปลาซาร์ดีน ซึ่งคิดเป็นปริมาณเพียง 0.2 เปอร์เซ็นต์ จากน้ำหนักทั้งหมดเท่านั้น ทำให้นักวิจัยในปัจจุบันพยายามค้นหาแหล่งที่สามารถผลิตกรดไขมันไม่อิ่มตัว เพิ่มเติมจากเดิม โดยจากการศึกษาพบว่า สิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวจำพวก โปรโตซัวอะมีบา จุลสาหร่าย ตลอดจนจุลินทรีย์ต่างๆ ล้วนแล้วแต่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัว เป็นองค์ประกอบของเซลล์ทั้งสิ้น โดยจะมีปริมาณมากหรือน้อยแตกต่างกันไปตามชนิดและแหล่งที่อยู่ของจุลินทรีย์นั้นๆ โดยโปรโตซัวจากทะเล เช่น *Thraustochytrium* sp., *Schizochytrium* sp. และ *Crypthecodinium* sp.,จุลสาหร่าย เช่น *Phaeodactylum* sp., *Monodus* sp. เชื้อรา เช่น *Mortierella* sp. สิ่งมีชีวิตเหล่านี้ล้วนเป็นแหล่งที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัว เป็นจำนวนมาก จากการค้นพบดังกล่าวทำให้มีแนวความคิดที่จะใช้จุลินทรีย์เหล่านี้ในการผลิตกรดไขมันไม่อิ่มตัว เช่นเดียวกับการผลิตโปรตีนจากเซลล์เดี่ยว (single cell protein) โดยการผลิตนี้จะเรียกว่า การผลิตไขมันจากเซลล์เดี่ยว (single cell oil) โดยการผลิตที่มีการศึกษาในช่วงแรก จะเป็นการผลิตไขมันโกโก้ (cocoa butter) จากยีสต์ *Rhodosporidium toruloides* และ *Cryptococcus curvatus* ซึ่งได้ผลดีเป็นที่น่าพอใจ แต่ในภายหลังราคาไขมันโกโก้ตกต่ำทำให้การผลิตดังกล่าวไม่คุ้มทุน ดังนั้นการผลิตด้วยวิธีดังกล่าวจำเป็นจะต้องเลือกผลิตกรดไขมันชนิดที่มีราคาสูงจึงจะคุ้มทุนอาทิ เช่น ARA (Arachidonic), DHA (Docosahexaenoic) และ EPA (Eicosapentaenoic) ซึ่งกำลังเป็นที่ต้องการของตลาดอย่างมาก

ปัจจุบันมีการนำจุลสาหร่ายต่างๆ อาทิ เช่น *Nitzchia* sp., *Nannochloropsis* sp., *Navicula* sp., *Phaeodactylum* sp. และ *Porphyridium* sp. มาใช้ในการผลิต EPA โดยอาศัยเทคโนโลยีการหมัก แต่ปัญหาที่พบ คือ EPA ที่ได้จากการผลิตโดยใช้จุลสาหร่ายจะไม่อยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ จึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้ และปริมาณสาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยงจะมีปริมาณไม่สูงเมื่อเทียบกับจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงแบบที่มีการให้แสงสว่าง (photobioreactor) ยังมีต้นทุนที่สูงกว่าการเพาะเลี้ยงด้วยเทคโนโลยีการหมักทั่วไป ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนมาใช้สาหร่ายที่สร้างอาหารเองไม่ได้ (heterotrophs) คือใช้แหล่งคาร์บอนจากสารอาหารแทนการสังเคราะห์แสง พบว่าได้ผลดีกว่า นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคโนโลยีในการตัดต่อพันธุ์กรรมกับสาหร่ายกลุ่มดังกล่าวเพื่อให้มีการผลิต PUFA ในปริมาณที่สูงขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามการผลิต ARA, DHA และ EPA เพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ทะเล และสัตว์น้ำ จะใช้โปรโตซัวจากทะเล อาทิ เช่น *Schizochytrium* sp. และ *Crypthecodinium* sp. เป็นแหล่งในการผลิต PUFA เป็นหลัก ส่วนการผลิต GLA จะนิยมใช้ เชื้อรา *Mortierella* sp., *Mucor* sp. และ *Cunninghamella* sp. เป็นหลัก เพราะมีปริมาณ GLA สูงถึง15 - 25 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามการผลิต PUFA จากแบคทีเรียนั้นไม่ค่อยเป็นที่นิยมเนื่องจากองค์ประกอบของผนังเซลล์ของแบคทีเรียนั้น มีปริมาณของ PUFA ต่ำมาก แม้จะมีรายงานว่าผนังเซลล์ของแบคทีเรียจากทะเลบางชนิดมีปริมาณกรดไขมันสูงถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ก็ตามแต่ ก็ไม่เป็นที่น่าสนใจในแง่ของการผลิตทางการค้าเท่าใดนัก ที่เป็นเช่นนี้ เพราะการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียดังกล่าว ต้องการสภาพที่จำเพาะสูงๆ นั่นเอง อย่างไรก็ตามการผลิต PUFA จากแบคทีเรียยังคงเป็นที่ต้องการของนักวิจัยอย่างมาก เพราะการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียมีต้นทุนที่ต่ำง่าย และรวดเร็ว ดังนั้นจึงเป็นการท้าทายอย่างยิ่งที่จะหาแบคทีเรียที่มีศักยภาพสูงในการผลิต PUFA เพื่อใช้ในการผลิต ARA, DHA และ EPA

อัยรา (2549) กล่าวว่าจากการศึกษาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตชนิด set yoghurt ที่ทดลองผลิตจากกระบวนการหมักด้วยแบคทีเรียกรดแล็กติกที่ผลิต CLA ได้สูง (*Lactobacillus acidophilus* TISTR1338 และ *Lactococcus lactis* TISTR1401) ร่วมกับจุลินทรีย์โยเกิร์ตทางการค้า ด้านปริมาณ CLA สมบัติทางเคมี และลักษณะทางกายภาพของโยเกิร์ต ลักษณะโครงสร้างภายในของ set yoghurt รวมถึงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส พบว่าการผสมแบคทีเรียกรดแล็กติกสายพันธุ์ *Lb. acidophilus* TISTR1338 หรือ *Lc. lactis* TISTR1401 หรือทั้ง 2 สายพันธุ์ ที่สร้าง CLA ร่วมกับกล้าเชื้อจุลินทรีย์โยเกิร์ตทางการค้า YC380 (*Lb. delbreuckii* subsp. *bulgaricus* และ *Streptococcus thermophilus*) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตที่มีปริมาณ CLA เพิ่มมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยโยเกิร์ตที่ใช้กล้าเชื้อ YC-380 ร่วมกับ TISTR1338, YC380 ร่วมกับ TISTR1401 และ YC380

ร่วมกับแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ มีปริมาณ CLA เพิ่มมากขึ้นคิดเป็นร้อยละ 26, 23 และ 30 ตามลำดับ

GLA (γ -(gamma) - linolenic acid ; 18 : 3 ω 6) เป็นกรดไขมันที่มีประโยชน์ในทางเภสัชกรรม คือ จะช่วยลดปัญหาเรื่องโคเลสเตอรอล (ลด low density lipoprotein) ลดอาการปวดประจำเดือน (Pre - menstrual syndrome) และลดผื่นแพ้จากกรรมพันธุ์ (Atopic dermatitis/Eczema) GLA พบมากในพืชโดยเฉพาะ Evening primrose และในราบางชนิด แต่การผลิต GLA จาก *Spirulina* sp. จึงเป็นทางเลือกที่ดี (จงกล และคณะ, 2552; จงกล, 2552)

Cohen *et al*. (1993) รายงานไว้ว่า สภาวะการเลี้ยงเซลล์ของ *Spirulina* sp. ที่ทำให้ปริมาณ กรดไขมัน และ GLA สูงขึ้น ก็คือการเลี้ยงเซลล์ในความเข้มแสงที่ต่ำหรือ เลี้ยงเซลล์ที่ความหนาแน่นของเซลล์สูง ๆ ในการเลี้ยงแบบ batch และ semi - continuous culture ในขณะที่ความเค็มของอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีผลทำให้อัตราการเจริญลดลงนั้น ไม่ได้ช่วยเพิ่มปริมาณกรดไขมันแต่อย่างใด นอกจากนี้การลดอุณหภูมิของการเลี้ยงลงต่ำกว่าอุณหภูมิปกติ เช่น การเลี้ยงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะทำให้ปริมาณ GLA เพิ่มขึ้น (Siangdung *et al*.,1996)

การสังเคราะห์แสงและรงควัตถุสารสี (pigment) ของสาหร่าย *Oscillatoria* sp. (กาญจนภาชน์, 2527; นุชนรี, 2543; ลัดดา, 2544; ยุวดี, 2546)

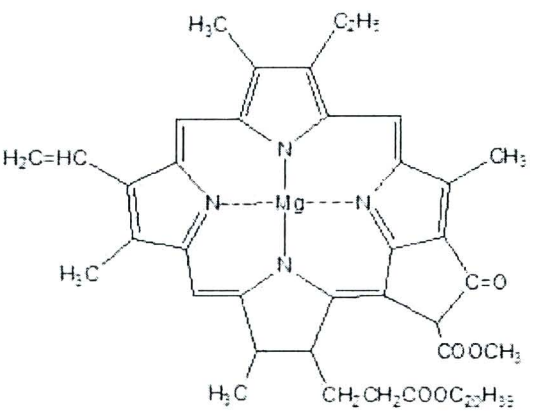
ในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินนี้ไม่มีคลอโรพาสต์ชัดเจน เพียงแต่มีไทลาคอยด์ ซึ่งจะอยู่เดี่ยวๆ ไม่มีเยื่อหุ้มบางๆ หุ้ม และไม่มีการจัดเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ จะพบเป็นอิสระทั่งไปในเซลล์ หรือบริเวณรอบๆ นอกของตัวเซลล์ จึงเรียกบริเวณที่มีรงควัตถุเหล่านี้ว่า โครโมพลาสซึม (chromoplasm) บริเวณไทลาคลอยด์นี้เป็นที่อยู่ของคลอโรฟิลล์เอ ส่วนในรงควัตถุอื่นๆ จะเกาะอยู่บนผิวของไทลาคลอยด์ในลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งเราเรียกว่า ไฟโคบิลิโซม

รงควัตถุทั้งหลายที่กล่าวมาแล้วจะไม่รวมกันเป็นพลาสติด (plastid) เหมือนพืชชั้นสูง เมื่อศึกษาดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน พบว่ามีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ อยู่แบบร่างแหกระจายอยู่ทั่วไป การที่สาหร่ายชนิดนี้มีทั้งคลอโรฟิลล์ และ ซี - ไฟโคไซยานิน จึงทำให้มองเห็นเป็นสีเขียวแกมน้ำเงิน ถ้าสาหร่ายชนิดไหนมี ซี - ไฟโคเออริทริน มากอาจจะมองเห็นเป็นสีแดงปนอยู่ด้วย สัดส่วนของรงควัตถุดังกล่าวมีต่างๆ กัน ซึ่งทำให้สาหร่ายชนิดนี้มีสีแตกต่างกันไป เช่น มีตั้งแต่สีเขียว (grass - green) ไปจนถึงดำหรือแดง และสีที่เป็นสีกึ่งกลางของสีเหล่านี้

สารสี (pigment) ที่ใช้กระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายกลุ่มนี้จะไม่มีการรวมตัวกันเป็นคลอโรพลาสต์ (chloroplast) แต่จะกระจายอยู่ทั่วไปในไซโตพลาสซึม ซึ่งสารสีที่พบประกอบด้วย

1 คลอโรฟิลล์

คลอโรฟิลล์ที่พบในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน คือ คลอโรฟิลล์ เอ ซึ่งจัดเป็นสารสีสำหรับการสังเคราะห์แสงเบื้องต้น คลอโรฟิลล์เป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดหนึ่งซึ่งไม่ละลายในน้ำ แต่จะละลายในตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น เมทานอล (methanol) โดยทั่วไปปริมาณคลอโรฟิลล์ที่พบในสาหร่าย มีประมาณ 0.5 - 1.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง แต่อาจเพิ่มได้ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ ในสภาพการเลี้ยงที่ให้แสอ่อนๆ



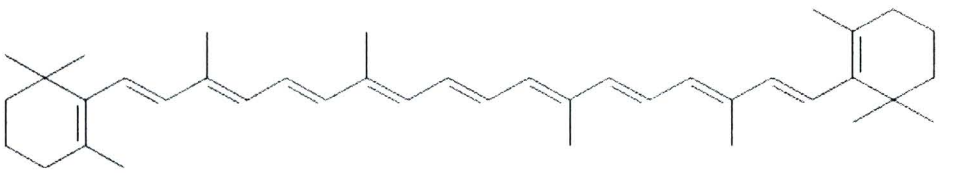
Chlorophyll a

ภาพ 6 โครงสร้างทางเคมีของ คลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll - *a*)
ที่มา: โครงสร้างเคมี. (2553ข)

2 แคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์ คือ สารสีที่มีสีแดง สีเหลือง และมีส่วนช่วยในการสังเคราะห์แสง โดยจะเป็นตัวถ่ายทอดพลังงานรังสีที่ดูดได้ไปยังคลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์จะพบในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น หัวแครอท มะเขือเทศสุก ใบไม้ที่ใกล้ร่วง ประกอบด้วย isoprene units ซึ่งในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สารสีแคโรทีนอยด์ จะประกอบด้วย ß - caroten, zeaxanthin, echinenone, canthaxathin, mutatochrome, antheraxanthin, ß - cryptoxanthin, myxozanthophyll, aphanizophyll และ oscillaxanthin ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.1 ß - Caroten เป็นรงควัตถุที่มีสีแดงส้ม เป็นสารที่นำไปใช้ในการสร้างวิตามินเอ ละลายได้ใน ethyl ether และ chloroform เป็นสารสีพวกไฮโดรคาร์บอนเท่านั้น

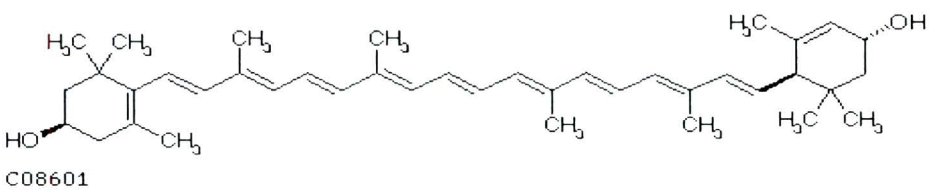


ภาพ 7 โครงสร้างทางเคมีของ ß - caroten
ที่มา: โครงสร้างเคมี. (2553ก)

Gisela *et al.* (2009) กล่าวว่าสาหร่าย *Oscillatoria* sp. MOF-06 มี carotenoid 6.04±0.44 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร Youji *et al.* (1995) กล่าวว่าสาหร่าย *Oscillatoria* sp. NKBG 091600 ที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารปรับปรุง BG - 11 พบว่ามี carotenoid เท่ากับ 4.6 มิลลิกรัมต่อกรัมโดยน้ำหนักแห้ง จงกล และคณะ (2545) กล่าวว่าปริมาณ total carotenoid ของ *Spirulina platensis* พบว่ามีปริมาณ total carotenoid 187.89 ไมโครกรัมต่อกรัมโดยน้ำหนักแห้ง เนื่องจากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีการสะสมรงควัตถุสารสีในเซลล์อยู่สูง

Mohan *et al.* (2010) กล่าวว่าสาหร่าย *Oscillatoria* sp. มีระดับ ß - carotene มีเท่ากับ 3.0064 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยน้ำหนักแห้ง จงกล และคณะ (2552) กล่าวว่าการวิเคราะห์ ß - carotene ของ *Spirulina platensis* พบว่ามีปริมาณ ß - carotene อยู่ระหว่าง 0.26 - 0.28 ไมโครกรัมต่อกรัมโดยน้ำหนักแห้ง มีปริมาณสูงสุดในสูตรอาหาร MZm

2.2 Xanthophylls เป็นรงควัตถุที่มีสีเหลืองหรือเหลืองแกมน้ำตาล ละลายได้ใน ethyl ether และ ethyl alcohol ไม่ละลายน้ำ เป็นสารอนุพันธุ์ของแคโรทีน ซึ่งจะมีกลุ่มของ epoxy, hydroxyl, ketonic, carboxylic, glycosidic, allenic หรือ acetylene เป็นสารประกอบ

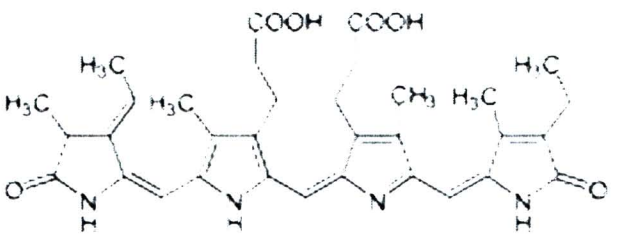


ภาพ 8 โครงสร้างทางเคมีของ xanthophylls
ที่มา: โครงสร้างเคมี. (2553ก)

3 ไฟโคบิลิน (phycobiline)

Humm and Wicks (1980) กล่าวว่า ไฟโคบิลินจะอยู่กับโปรตีนทำให้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า "ไฟโคบิลินโปรตีน (phycobilineprotein)" โดยโมเลกุลมีโครงสร้างเป็นแบบ Tetrapyrolic structure และมีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบโครงสร้าง ละลายในน้ำได้ดี (สัมพันธ์, 2529) ไฟโคบิลินที่พบในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มี 3 ชนิด คือ C - phycocyanin, C - phycoerythrin และ allophycocyanin ไฟโคบิลินเป็นสารสีประกอบ (accessory pigment) เช่นเดียวกับแคโรทีนอด์ โดยจะทำหน้าที่ถ่ายทอดพลังงานรังสีที่ดูดซับมาได้ส่งให้คลอโรฟิลล์ เอ ซึ่ง phycoerythrin จะเป็นตัวรับแสงแล้วส่งต่อให้ phycocyanin แล้วจึงต่อไปยังคลอโรฟิลล์ เอ ในส่วนของ phycocyanin หน้าที่ที่สำคัญอีกประการ คือ เป็นแหล่งสะสมไนโตรเจนซึ่งจะให้จะธาตุไนโตรเจนแก่เซลล์สาหร่ายในยามที่ขาดธาตุอาหารไนโตรเจน และ phycocyanin จะมีปริมาณมากขึ้นเมื่อได้รับแสงปริมาณจำกัด

3.1 C - Phycocyanin เป็นรงควัตถุที่มีสีน้ำเงิน พบในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ละลายได้ดีในน้ำ



ภาพ 9 โครงสร้างทางเคมีของ C - phycocyanin
ที่มา: โครงสร้างเคมี. (2553ก)

Youji *et al.* (1995) กล่าวว่าสาหร่าย *Oscillatoria* sp. NKBG 091600 ที่เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารปรับปรุง BG - 11 พบว่ามี C - phycocyanin เท่ากับ 128.7 มิลลิกรัมต่อกรัมโดยน้ำหนักแห้ง จงกล และคณะ (2552) กล่าวว่าการวิเคราะห์ C - phycocyanin ของ *Spirulina platensis* พบว่ามีปริมาณ 8.27 - 17.77 ไมโครกรัมต่อกรัมโดยน้ำหนักแห้ง โดยมีปริมาณสูงสุดที่เลี้ยงในสูตรอาหารน้ำทิ้งจากโรงอาหาร (cafeteria water: Cw) Cw 100 เปอร์เซ็นต์

ธนิตชัย และศศิธร (ม.ป.ป.) กล่าวว่าเมื่อตรวจสอบปริมาณ C - phycocyanin บริสุทธิ์ด้วยเทคนิค HPLC ได้ลักษณะของโครมาโตแกรมของสารสกัด C - phycocyanin บริสุทธิ์จากสาหร่ายเกลียวทอง โดยจากผลการตรวจสอบปริมาณด้วยเทคนิค HPLC พบว่าปริมาณ C - phycocyanin ในสาหร่ายเกลียวทองผง ที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 160 และ 180 องศาเซลเซียส

นั้นไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ปริมาณ C - phycocyanin จากสาหร่ายเกลียวทองที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นั้นมีปริมาณน้อยกว่าจากสาหร่ายเกลียวทองที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

สินีนาฏ และศศิธร (ม.ป.ป.) จากการวิเคราะห์รงควัตถุ (C - phycocyanin) ของตัวอย่างสาหร่ายเกลียวทองที่ทำแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ พบว่าสาหร่ายเกลียวทองที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่แข็ง จะมีปริมาณ C - phycocyanin บริสุทธิ์ และชนิดหยาบ สูงสุด คือ 37.1 และ79.9 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

3.2 Allophycocyanin พบในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และสาหร่ายสีแดง ดูดแสงช่วงคลื่นที่ยาวกว่ารงควัตถุสีแดง

3.3 C - Phycoerythrin พบในสาหร่ายสีแดงทุกชนิด และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิด ดูดแสงสีเขียวเหลือง

กลุ่มของสารพิษที่ผลิตโดยสาหร่ายน้ำจืด

กลุ่มของสารพิษที่ผลิตโดยสาหร่ายน้ำจืด สามารถแบ่งตามการตรวจวิเคราะห์ทางชีวะ(bioassay) เพื่อให้ทราบถึงลักษณะความเป็นพิษได้ 2 กลุ่ม คือ

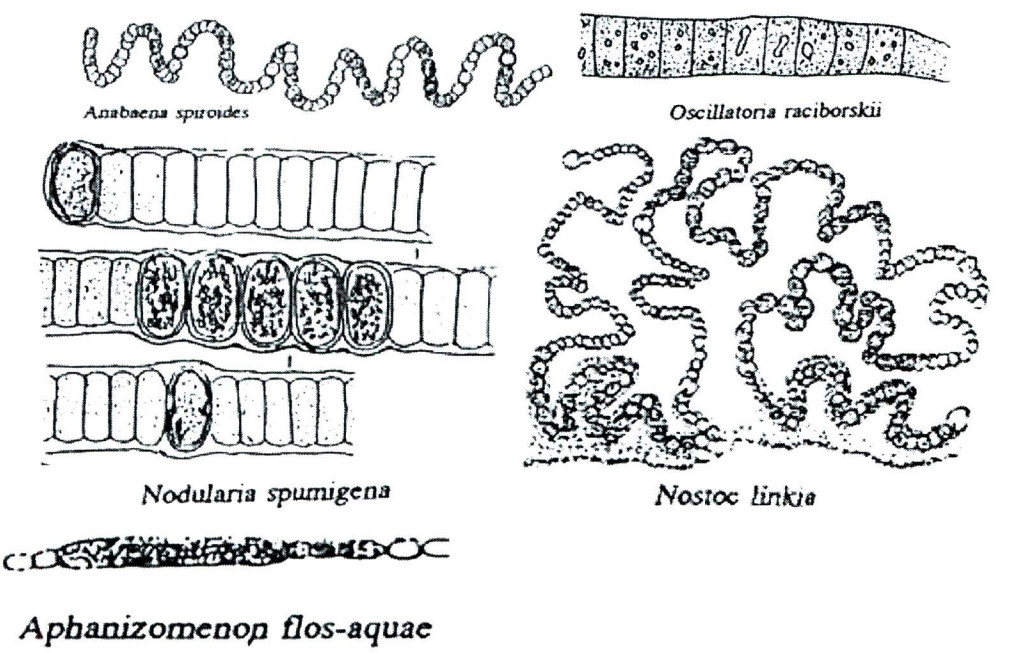
1 กลุ่มที่เป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxin) (อาภารัตน์, ม.ป.ป.)

สารพิษในกลุ่มนี้จะไม่ก่อให้เกิดพิษจนถึงแก่ความตายในสัตว์ แต่จะแสดงความสามารถอย่างกว้างขวางในการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย แบคทีเรีย รา และเซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (culture mammalian cell line) การค้นพบสารพิษในกลุ่มนี้เกิดจากการค้นหาเภสัชภัณฑ์ชนิดใหม่ๆ สารออกฤทธิ์ทางการเกษตร เอนไซม์ สารปฏิชีวนะ และสารต้านมะเร็ง เป็นต้น มหาวิทยาลัยแห่งฮาวาย (University of Hawaii) ได้รายงานว่าจะสามารถพบสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวที่สร้างสารออกฤทธิ์ในกลุ่มนี้ได้ร้อยละ 7 ของตัวอย่างของสาหร่ายที่สุ่มเก็บจากธรรมชาติ

สารออกฤทธิ์ต่อเซลล์ที่มีการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีแล้ว ได้แก่ acutiphycins, indolcarbazoles, mirabilene isonitriles, paracyclophanes, scytophycins, tentazoles, tolytoxin, toyocamycin และ tubercidin ซึ่งสารเหล่านี้ส่วนใหญ่จะถูกสร้างโดยสาหร่ายใน Order Nostocales และ Stigonematales ซึ่งจะพบมากในน้ำจืด และบนบก

2 กลุ่มที่เป็นพิษต่อสัตว์ (biotoxin) (อาภารัตน์, ม.ป.ป.)

สารพิษจากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในกลุ่มนี้เป็นแหล่งใหญ่ของสารพิษที่พบในธรรมชาติ ผลิตโดยสาหร่ายที่ลอยอยู่บริเวณพื้นผิวน้ำ (planktonic algae) ในสกุล *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Microckystic* sp., *Nodulari* sp., *Nostoc* sp. และ *Oscillatoria* sp. ซึ่งสารพิษจากสาหร่ายเหล่านี้ได้ถูกแยกและศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีไปบ้างแล้ว ส่วนสาหร่ายในสกุล *Coelosphaerium* sp., *Cylindrosper mopsis*, *Fischerella*, *Gloeotrichia*, *Gomphosphaeria* sp., *Hapalosiphon* sp., *Microcoleus* sp., *Schizothrix* sp., *Scytonema* sp., *Symploca* sp., *Tolypothrix* sp. และ *Trichodesmium* sp. ก็พบว่ามีความเป็นพิษแต่ยังไม่มีการศึกษาในรายละเอียดโดยการแยกสารพิษออกมาศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีแต่อย่างไร



ภาพ 10 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในกลุ่มที่เป็นพิษต่อสัตว์ (biotoxin)
ที่มา: อาภารัตน์ (ม.ป.ป.)

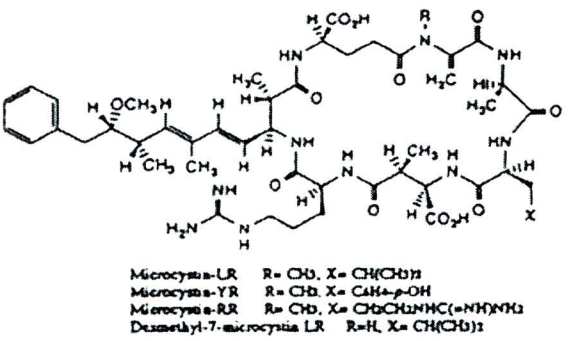
สารพิษในกลุ่มนี้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากพบว่าเป็นสาเหตุการป่วยและการตายของสัตว์ในหลายพื้นที่ทั่วโลกตั้งแต่ปลายศตวรรษที่ 19 อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานว่าสารพิษนี้เป็นสาเหตุการตายของมนุษย์เหมือนที่พบในกรณีของ paralytic shellfish poison (PSP) ที่เกิดจากการบริโภคหอยซึ่งกรองเอาสาหร่ายที่ผลิตสารพิษเป็นอาหาร แต่จากการที่พบว่าสารกลุ่มนี้มีพิษร้ายแรงต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจึงเป็นสิ่งชี้นำว่ามนุษย์เองก็คงจะมีความ

ทนทานต่อพิษต่ำเช่นเดียวกับในสัตว์เลี้ยงลูก ด้วยนมอื่นๆ อย่างไรก็ตามยังไม่พบว่ามีการตกค้างของสารพิษจากสาหร่ายน้ำจืดในห่วงโซ่อาหารของมนุษย์ จากการที่น้ำในแหล่งน้ำต่างๆ มีคุณภาพลดลงเรื่อยๆ ประกอบกับมีปัญหาการเจริญเติบโตของสาหร่ายอย่างรวดเร็วบ่อยครั้งขึ้น ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศในกลุ่มสแกนดิเนเวียและ อีกหลายประเทศในยุโรป รวมทั้งประเทศญี่ปุ่น จึงได้ทำการศึกษาและพบว่า การเกิดการเจริญอย่างรวดเร็วของสาหร่ายในแหล่งน้ำ จะมีโอกาสเป็นสาหร่ายที่สร้างสารพิษถึงร้อยละ 40 และมีแนวโน้มว่าจะมีปัญหานี้เพิ่มขึ้นทั้งในแง่ของจำนวนครั้งที่เกิด ความกว้างขวางของพื้นที่ และระยะเวลาที่เกิด

ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาทจะพบอย่างกว้างขวางในทวีปอเมริกาเหนือ สหราชอาณาจักร กลุ่มสแกนดิเนเวีย และประเทศออสเตรเลีย แต่สารพิษต่อตับที่สร้างโดยสาหร่ายสามารถพบได้ในทุกพื้นที่ทั่วโลกโดยพบว่าก่อให้เกิดความเป็นพิษในโค กระบือ แกะ ม้า สุกร เป็ด ตลอดจนสัตว์ปีก และสัตว์เลี้ยงในบ้าน ส่วนในห้องทดลองมีการศึกษาความเป็นพิษของสารกลุ่มนี้ในหนูขาว หนูถีบจักร หนูตะเภา กระต่าย และสุกร อาการแสดงออกซึ่งความเป็นพิษ ได้แก่ อ่อนเพลีย หมดความอยากอาหาร เยื่อบุต่างๆ มีสีซีด อาเจียน หนาวสั่น และท้องร่วง การตายจะเกิดขึ้นหลังจากได้รับสารพิษ 23 ชั่วโมง ถึง 23 วัน ส่วนใหญ่จะเกิดจากเลือดออก ในตับ (intrahepatic haemorrhage) และการช็อกเนื่องจากขาดเลือดไป หล่อเลี้ยง (hypovolaemic shock) ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อเซลล์ตับ (hepatocyte) ได้รับสารพิษจะเกิดการหดตัว (shrink) ทำให้เซลล์ที่เกาะกันแน่นแยกออก และเกิดการแยกของ sinusoidal capillaries ทำให้เกิดโลหิตคั่ง ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์ตับและ นำมาซึ่งอาการช็อกในที่สุด สาหร่ายที่ผลิตสารพิษในกลุ่มนี้ที่มีการศึกษาโครงสร้างทางเคมีแล้ว ได้แก่ สาหร่ายในสกุล *Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Nodularia* sp., *Oscillatoria* sp. และ *Nostoc* sp. ส่วนที่มีการผลิตสารพิษแต่ยังไม่มีการศึกษาโครงสร้างทางเคมี ได้แก่ *Cylindrospermopsis* sp., *Aphanizominon* sp., *Gloeotrichia* sp. และ *Coelosphaerium* sp. สารพิษที่พบส่วนใหญ่จะมีสูตรโครงสร้างเป็นวงแหวนเปปไทด์ (cyclic peptide) ที่พบแล้วมีอย่างน้อย 53 ชนิด ชนิดที่พบมากและมีความสำคัญ ได้แก่

2.1 สารพิษในกลุ่มไมโครซิสติน (microcystins, MCYST) มีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบ 7 ชนิด (heptapeptide) สารพิษ ชนิดนี้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกจากสาหร่าย *Microcystis aeruginosa* สายพันธุ์ NRC1 สาหร่ายในสกุลนี้ สามารถผลิตสารพิษได้มากกว่า 1 ชนิด สารพิษในกลุ่มไมโครซิสตินนอกจากจะเป็นพิษต่อตับแล้วยังพบว่าเป็นตัวเร่งให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง จากการติดตามศึกษาถึงผลการได้รับน้ำดื่มจาก แหล่งที่มีการปนเปื้อนของไมโครซิสตินเป็นระยะเวลานานของ Academy of Science ในจังหวัด Wuhan และ Shanghai Medical University ในประเทศจีนพบว่าผู้บริโภคมีอัตราการเกิดมะเร็งในตับสูงเป็นพิเศษ นอกจากนี้ไมโครซิสตินยัง

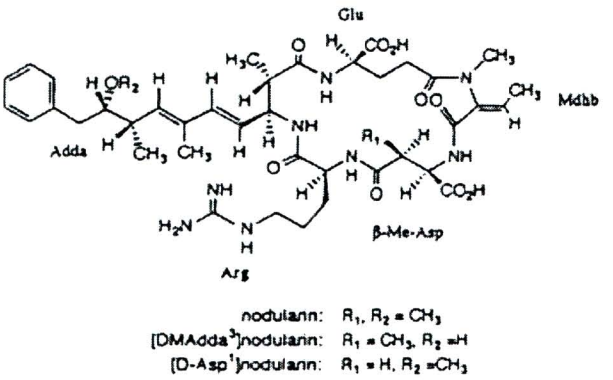
สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โปรตีนฟอสฟาเทส PP1 และ PP2A (protein phosphatase PP1 and PP2A) ซึ่งมีความสำคัญต่อการควบคุมเมทาบอลิซึมต่างๆ เช่น เมทาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต การแบ่งเซลล์ และการยืดหดตัวของกล้ามเนื้อ



ภาพ 11 สารพิษกลุ่ม Microcystin
ที่มา: อาภารัตน์ (ม.ป.ป.)

สารพิษในกลุ่มไมโครซิสตินทุกตัวจะมีค่าความเป็นพิษ $LD_{50\ i.p.}$ ในหนูระหว่าง 60 - 70 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ยกเว้น MCYSTRR, demethylated toxin DASP และ DHA จะมีค่าความเป็นพิษในหนู $LD_{50\ i.p.}$ ระหว่าง 200 - 250 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ความเป็นพิษของไมโครซิสตินสามารถแก้ไขได้โดยการใช้สารเคมีบางชนิด เช่น cyclosporine A, rifampin และ silymarin ซึ่งจะให้ผลยับยั้งพิษได้เป็นอย่างดีเมื่อ ได้รับสารแก้พิษเหล่านี้ก่อนหรือพร้อมกับการได้รับ สารพิษ ในปัจจุบันยังไม่ทราบว่ากระบวนการต้านสารพิษเกิดขึ้นได้อย่างไร แต่คาดว่ามีความเกี่ยวพันกับการยับยั้งการดูดซึมสารพิษเข้าสู่เซลล์ตับ

2.2 สารพิษในกลุ่มโนดูลาริน (nodularin, NODLN) สารพิษในกลุ่มนี้มีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบ 5 ชนิด (pentapeptide) และมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกันเป็นอย่างมากทั้งๆ ที่สร้างจาก สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ชนิดเดียวกัน คือ *Nodularin spumigena* โนดูลาริน นอกจากจะมีพิษต่อเซลล์ตับแล้ว ผลการทดลองยังพบว่าเป็นสาร ส่งเสริมการเกิดมะเร็งด้วย



ภาพ 12 สารพิษในกลุ่ม Nodularin
ที่มา: อาภารัตน์ (ม.ป.ป.)

3 สารพิษที่ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท (อาภารัตน์, ม.ป.ป.)

มีการพบสารพิษในกลุ่มนี้มากพอควร แต่ที่ทำการศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างทางเคมีแล้ว มี 4 ชนิดคือ

3.1 อนาทอกซิน - เอ (anatoxin - a, antxa) สารพิษชนิดนี้ถูกผลิตโดยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Anabaena flosaquae*, *A. spiroides*, *A. circinalis*, *Aphenizomenom* sp. และ *Oscillatoria rubescens* เป็นสารประกอบประเภทอัลคาลอย์ (alkaliod) มีชื่อทางเคมีว่า 2 acetyl 9 azabicyclo (421) non 2 ene สัตว์ที่ได้รับ สารพิษชนิดนี้จากธรรมชาติจะมีการเดินโซเซ กล้ามเนื้อเกร็งเป็นมัด หายใจหอบ ชักกระตุก ในสัตว์ปีกจะมีอาการ หดเกร็งของกล้ามเนื้อ ทำให้ท้องแอ่นขึ้น

3.2 อนาทอกซินเอ (เอส) (anatoxina (s)) ผลิตโดยสาหร่ายในสกุล *Anabaena* sp. เป็นสารประกอบ organic phosphate โดยเป็น Nhydroxyguanidine methyl phosphate ester มีคุณสมบัติออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท เห็นได้ชัดโดยทำให้เกิดน้ำลายฟูมปากในหนูทดลอง จึงได้รับการตั้งชื่อเป็น anatoxina (s) (s=salivation, การหลั่งน้ำลาย) อาการเป็นพิษเกิดขึ้น เนื่องจากการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ acetylcholinesterase จึงเป็นผลให้ acetylcholine ไม่ถูกทำลาย ก่อให้เกิดการกระตุ้นการหดตัวของกล้ามเนื้อมากเกินไป สุกรและเป็ดที่ได้รับสารนี้ในห้องทดลองจะมีอาการน้ำลายฟูมปาก (hypersalivation) มีน้ำมูกไหลตลอดเวลา กล้ามเนื้อกระตุกและท้องร่วง

3.3 แซกซิทอกซินและนีโอแซกซิทอกซิน (saxitoxin STX and neosaxitoxin, NEOSTX) สารพิษในกลุ่มนี้โดยส่วนใหญ่จะพบใน dinoflagellate หรือ ในหอยที่กรอง dinoflagellate เป็นอาหาร และก่อให้เกิดอาการ paralytic sheilfish poison (PSP) สาหร่ายน้ำจืดที่สร้างสารพิษในกลุ่มนี้ได้แก่ สาหร่ายในสกุล *Anabaena* sp. และ *Aphanizamenon* sp. สารพิษทั้งสองตัวนี้สามารถออกฤทธิ์อย่างรวดเร็ว ต่อระบบประสาทโดยการปิดกั้น sodium channel โดยไม่มีผลกระทบต่อการแพร่ของโพแทสเซียม