บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาหร่ายสไปรูไลนา (Spirulina spp.)

สาหร่ายสไปรูไลนา จัดเป็นสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว (Blue green algae) ชนิดหนึ่ง นิยมเรียกว่าสาหร่ายเกลียวทอง เนื่องจากมีรูปร่างบิดเป็นเกลียวคล้ายเกลียวของลวดสปริง จัดได้ว่ามีขนาดค่อนข้างใหญ่คือ ใหญ่กว่าสาหร่าย Chlorella ประมาณ 100 เท่า มีความยาวประมาณ 50-500 ไมครอน และมีความกว้างประมาณ 3-8 ไมครอน (Becker, 1978) ปัจจุบันสาหร่ายสไปรูไลนาได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง

2.1.1 การจัดอนุกรมวิธานของสาหร่ายสไปรูไลนา

สาหร่ายสไปรูไลนาชนิด Spirulina platensis มีการจัดอนุกรมวิธานดังนี้ (Bold and Wynne, 1985)

Kingdom	:	Monera
Division	:	Cyanophyta (Myxophyta)
Class	:	Cyanophyceae
Family	:	Ocillatoriaceae
Genus	:	Spirulina
Species	:	Spirulina platensis

2.1.2 ลักษณะทั่วไปของสาหร่ายสไปรูไลนา

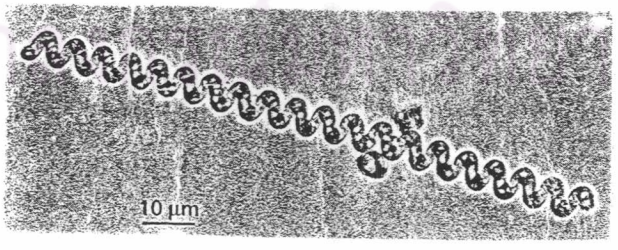
สาหร่ายเกลียวทองประกอบด้วยเซลล์ที่เรียงตัวต่อกันเป็นสายบิดเป็นเกลียวคล้ายลวดสปริงแต่ไม่แตกแขนงเรียกว่า ไตรโคม (trichome) มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตลอดสาย ปลายทั้งสองข้างโค้งมน เคลื่อนที่ได้ (วุฒิพร พรหมขุนทอง และ สมบัติ สิริพันธุ์วราภรณ์, 2529) โดยทั่วไปความกว้างของเกลียว (helix) ประมาณ 4 - 8 ไมโครเมตร ระยะห่างระหว่างเกลียว (pitch) ประมาณ 60 ไมโครเมตร มีความยาวของไตรโครม (length) ประมาณ 300 - 500 ไมโครเมตร (Ciferri, 1983 ; Venkatamaran, 1983 ; สุชาติ อิงธรรมจิตร์, 2529) อย่างไรก็ดีสาหร่ายเกลียวทองชนิดเดียวกันเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมต่างกันขนาดและรูปร่างก็อาจแตกต่างกันด้วย เช่น สาหร่ายที่เจริญ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อยู่ในระบบน้ำหมุนเวียนตลอดเวลาสีจะเข้มกว่าและมีขนาดไตรโครมสั้นกว่าสาหร่ายที่เจริญในระบบน้ำที่ไม่หมุนเวียน (Ciferri, 1983) ผนังเซลล์ของสาหร่ายประกอบด้วยสารมิวโคโพลีเมอร์ เพคติน และโพลีแซคคาไรด์ ไม่พบสารประกอบพวกเซลลูโลสและไม่มีเมือกหุ้ม มีกรดนิวคลีอิกอยู่เป็นกลุ่มในไซโตพลาสซึม ภายในจะมีไทลาคอยด์เป็นที่เกาะของคลอโรฟิลล์เอและรงควัตถุอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีแกสแวคคิวโอลทำให้สาหร่ายเกลียวทองมีการลอยตัวได้ดี และสาหร่ายมีสารปฏิชีวนะบางชนิดที่สามารถต่อต้านแบคทีเรียได้ (สุมนทิพย์ บุนนาค, 2529)

สาหร่ายสไปรูไลนา (รูปที่1)จัดเป็นจุลินทรีย์พวกโปรคาริโอท (Procaryote) ไม่มีนิวเคลียร์เมมเบรน (Nuclear membrane) สารพันธุกรรมจึงกระจายอยู่ทั่วไปในเซลล์ ในสาหร่ายสไปรูไลนาขนาดเล็กสังเกตเห็นผนังกั้นเซลล์ได้ยาก เนื่องจากไม่มีแกสแวคคิวโอล (gas vacuole) จึงทำให้เห็นไซโทพลาสซึมเป็นเนื้อเดียว สำหรับสายพันธุ์ขนาดใหญ่พบว่ามีแกสแวคคิวโออยู่ในไซโทพลาสซึม จึงสามารถมองเห็นผนังกั้นเซลล์ได้อย่างชัดเจนนอกจากนี้แกสแวคคิวโอยังทำให้เซลสาหร่ายมีน้ำหนักเบา จึงมักพบสาหร่ายชนิดนี้แขวนลอยอยู่ในน้ำ นอกจากนี้ภายในไซโทพลาสซึมของสาหร่ายสไปรูไลนายังประกอบด้วยไทลาคอยด์ (Thylakoid) ซึ่งเป็นที่ยึดเกาะของคลอโรฟิล-เอและรงควัตถุชนิดอื่นๆ สาหร่ายสไปรูไลนาเคลื่อนที่โดยการหมุนรอบแกนของเซลล์ ไม่มีเซลล์สืบพันธุ์ จึงเจริญเติบโตได้โดยการแบ่งเซลล์เท่านั้น

แหล่งที่อยู่อาศัยของสาหร่ายประเภทนี้ กระจายอยู่ทั่วๆไปในดิน ป่าชายเลน น้ำกร่อย น้ำจืด น้ำเค็มและน้ำพุ นอกจากนี้ยังสามารถลอยในทะเลสาบที่มีความเป็นด่างสูง (pH > 9.0) และเป็นสาหร่ายที่ชอบอุณหภูมิสูง (Thermophile) อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 35 - 40 องศาเซลเซียส (คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2540)



รูปที่ 1 ภาพแสดงลักษณะรูปร่างของสาหร่ายสไปรูไลนา (Graham, 2000)

2.1.3 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระบบปิด (Close system) ซึ่งเรียกว่า “Batch culture” คือ การนำสาหร่ายมาใส่ในอาหารใหม่ สาหร่ายจะมีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์ แล้วอัตราการเจริญเติบโตจะลดลงจนกลายเป็นศูนย์ในที่สุด เนื่องจากความเข้มข้นของของเสียที่ปล่อยออกมา หรือเนื่องจากภาวะการขาดแคลนอาหาร หรือความหนาแน่นของสาหร่ายที่สูงจนเกินไป ซึ่งการเจริญเติบโตของสาหร่ายสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ช่วง ดังต่อไปนี้

Lag phase เป็นช่วงที่สาหร่ายมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ ระยะนี้ไม่มีการเพิ่มจำนวนเซลล์

Acceleration phase ระยะนี้มวลสาหร่ายมีการเปลี่ยนแปลงเป็นลำดับดังนี้ RNA มีปริมาณเพิ่มขึ้น ต่อมาโปรตีนและน้ำหนักแห้งจะเพิ่มขึ้นมาตามลำดับและขั้นสุดท้ายจึงมีการเพิ่มจำนวนเซลล์

Logarithmic phase ช่วงนี้สาหร่ายมีการแบ่งเซลล์ และเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว มีอัตราเมตาบอลิซึมสูงสุด และเป็นอัตราเจริญที่เพิ่มขึ้นคงที่

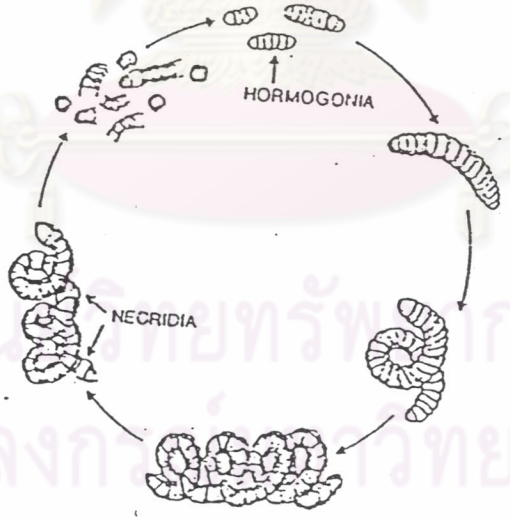
Deceleration phase สาหร่ายเริ่มมีอัตราการเจริญเติบโตลดลง เนื่องจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการบังแสงซึ่งกันและกัน ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง มีผลให้อัตราการเจริญเติบโตลดลงด้วย

Stationary phase ระยะดังกล่าวมวลหรือจำนวนสาหร่ายมีปริมาณคงที่ แต่องค์ประกอบบางอย่างในเซลล์มีการเปลี่ยนแปลง ช่วงการเจริญนี้จะเกิดการขาดแคลนแร่ธาตุสำคัญหรือความเข้มข้นของเสียที่มากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด - ด่าง รวมถึงการบังแสงที่เกิดจากความหนาแน่นของสาหร่ายที่สูงขึ้น ปัจจัยเหล่านี้ทำให้สาหร่ายเกิดภาวะขาดแคลน และใช้อาหารที่สะสมไว้ภายในเซลล์

Death phase ในระยะสุดท้าย มวลสาหร่ายจะเริ่มลดลง เนื่องจากอัตราส่วนของการหายใจต่อการสังเคราะห์แสงเพิ่มขึ้น จนมีค่ามากกว่าหนึ่ง หรือเนื่องจากมีการตายของเซลล์สาหร่าย

วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูไลนาเมื่อเลี้ยงในสภาวะห้องปฏิบัติการจะมีระยะเวลาสั้นประมาณ 1 วัน และใช้เวลาประมาณ 3 - 5 วัน เมื่อเลี้ยงในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) สูงสุด คือ 0.3 ต่อวันภายใต้สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ และ 0.2 ต่อวัน ภายในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ มีประสิทธิภาพในการดูดพลังงานแสงประมาณร้อยละ 3 - 4.5% นอกจากนี้สาหร่ายสไปรูไลนามักลอยตัวขึ้นมาบริเวณผิวน้ำ เนื่องจากภายในเซลล์มีแกสแวคคิวโอล ดังนั้นจึงทำให้ง่ายต่อการเก็บเกี่ยว (พรทิภา ตั้งใจตรง, 2533)

วงจรชีวิตของสาหร่ายเกลียวทองดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2 เริ่มจาก trichome ที่เจริญเติบโตเต็มที่จะขาดเป็นท่อนๆ เรียกแต่ละท่อนนี้ว่า hormogonium และแต่ละท่อนที่ขาดออกไปสามารถเจริญเติบโตเป็นสายใหม่ได้ การขาดออกเป็นท่อนนั้นเกิดจากการสร้างเซลล์พิเศษเรียกว่า necridia ซึ่งเวลาต่อมาจะย่อยสลายไปทำให้เกิดการขาดเป็นท่อนที่บริเวณนี้ เซลล์ที่อยู่ติดกับ necridia ทั้งสองด้านจะมีผนังเซลล์โค้งนูนและบาง ระหว่างเกิดขบวนการนี้ของเหลวภายในเซลล์จะมีความเข้มข้นน้อยลง เซลล์จึงมีสีซีด ในกรณีที่สภาพแวดล้อมไม่เหมาะสม hormogonium อาจไม่เจริญเติบโตแต่จะพักตัวจนกว่าสภาพแวดล้อมเหมาะสมจึงเจริญเติบโตโดยการเพิ่มจำนวนเซลล์ด้วยการแบ่งเซลล์ ซึ่งเกิดขณะที่ของเหลวภายในเซลล์เข้มขึ้น เซลล์สาหร่ายขณะนี้จึงมีสีเขียวสดใส ด้วยกระบวนการดังกล่าว trichome สาหร่ายจะยาวขึ้นและมีรูปร่างบิดเป็นเกลียว การที่เซลล์สาหร่ายขาดเป็นท่อนๆบริเวณ nitridia หรือการที่เซลล์สาหร่ายขาดจากกันเองทำให้สาหร่ายชนิดนี้เพิ่มจำนวนและมีแพร่กระจายอยู่ทั่วไป (Ciferri, 1983)



รูปที่2 วงจรชีวิตของสาหร่ายสไปรูไลนา (Ciferri, 1983)

2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนา

ปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการเจริญของสาหร่ายสไปรูไลนามีดังนี้ คือ

2.2.1 แสง

สาหร่ายสไปรูไลนาต้องการแสงสว่างในการสังเคราะห์แสง สาหร่ายสไปรูไลนาจัดเป็น photoautotrophic algae แม้ว่าจะสามารถเจริญแบบ heterotrophy ซึ่งเป็นการเจริญในความมืดสามารถใช้อินทรียสาร เช่น กลูโคส หรือ กรดแอซิติกได้ พลังงานซึ่งช่วยในการสังเคราะห์แสงเป็นพลังงานซึ่งได้จากแสงในช่วงที่เราสามารถมองเห็นได้ (visible light) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 - 700 นาโนเมตร และแสงในช่วงที่เป็นรังสีความร้อน (infrared) ความยาวคลื่นของแสงมีความจำเพาะต่อรงควัตถุแต่ละชนิด สาหร่ายสไปรูไลนาประกอบด้วยรงควัตถุหลายชนิดแต่ที่พบในปริมาณมาก คือ คลอโรฟิลด์ เบตาแคโรทินอยด์ ไฟโคไซยานิน และไฟโคอิริทริน รงควัตถุเหล่านี้จะถูกกระตุ้นโดยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน พลังงานแสงที่ได้รับทั้งหมดจากรงควัตถุต่างๆจะถูกถ่ายทอดไปยังโมเลกุลของคลอโรฟิลด์ โดยที่คลอโรฟิลด์เป็นรงควัตถุสีเขียวที่ดูดกลืนแสงสีแดง (Fox, 1983) รงควัตถุเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงานของโฟตอนและส่งไปยังศูนย์กลางของการเกิดปฏิกิริยา จากนั้นสาหร่ายจะใช้พลังงานนี้แบ่งแยก เชื่อมและจัดระเบียบโมเลกุล อะตอม จนถึงอนุภาคเพื่อให้ได้สารใหม่ ดังสมการ

$$2H_2O + CO_2 \xrightarrow[\text{รงควัตถุ}]{\text{แสง}} CH_2O + O_2 + H_2O$$

แม้ว่าแสงจะจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย แต่สาหร่ายเองก็มีความสามารถในการทนทานต่อแสงได้จำกัด การได้รับแสงในปริมาณมากเกินไปจะทำให้รงควัตถุถูกทำลาย สาหร่ายจะมีสีซีดและตายในที่สุด เป็นผลมาจากปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชั่น (photooxidation) หรือ โฟโตไลซิส (photolysis) ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดหลังจากช่วง lag phase

ความเข้มแสงซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาที่เลี้ยงในบริเวณกลางแจ้งที่มีอุณหภูมิสูง สาหร่ายจะเจริญเติบโตได้ดีในช่วงความเข้มแสง 20,000 - 30,000 ลักซ์ ส่วนการเลี้ยงในห้องปฏิบัติการใช้ความเข้มแสงเพียง 8,000 - 10,000 ลักซ์ (Ciferri, 1983)

2.2.2 ความเป็นกรด – ด่าง

ค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายอาหารมีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของสาหร่ายสไปรูไลนา นอกจากนี้ความเป็นกรด - ด่างยังมีบทบาทต่อการละลายของเกลือ และสารประกอบเชิงซ้อนชนิดต่างๆในน้ำซึ่งอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษ หรือยับยั้งการเจริญของสิ่งมีชีวิต ขณะเดียวกันยังส่งผลต่อการละลายของสารประกอบโลหะ โดยเป็นสาเหตุให้สารประกอบโลหะบางชนิดตกตะกอน ดังนั้นสาหร่ายจึงอาจขาดธาตุโลหะที่จำเป็นบางตัวได้ (Richmond, 1986)

ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายอาหารจะมีค่าเท่าใดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและปริมาณของสารที่ทำหน้าที่เป็นสารกันกระทบ (buffer) ในอาหาร ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในอาหาร อุณหภูมิตลอดจนกิจกรรมทางเมตาบอลิซึม (metabolism) ของสาหร่ายอีกด้วย (Venkataraman, 1983)

ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา Ciferri (1983) รายงานว่าสาหร่ายสไปรูไลนาเจริญได้ดีในช่วงความเป็นกรด - ด่างระหว่าง 8.0 - 11.0 แต่ถ้าค่าความเป็นกรด - ด่างลดลงใกล้เคียง 7.0 หรือสูงถึง 11.3 จะพบว่ามีการเจริญของสาหร่ายลดลงซึ่งสอดคล้องกันกับการศึกษาของ Richmond (1986) ซึ่งพบว่าการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาในบ่อกลางแจ้งพบว่าถ้าความเป็นกรด - ด่างเท่ากับ 10.3 จะไม่มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย แต่ถ้าความเป็นกรด - ด่างสูงถึง 11 จะยับยั้งการเจริญเติบโตอย่างรุนแรง

สำหรับค่าความเป็นกรด – ด่างที่เหมาะสม Fox (1983) รายงานว่าค่าความเป็นกรด – ด่างเริ่มต้นของอาหารที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาอยู่ในช่วง 7.8 - 8.5 ขึ้นกับสารอาหารที่ใช้ สำหรับความเป็นกรด - ด่างที่ใช้ในการเจริญอยู่ระหว่าง 8.5 - 9.5 เนื่องจากสาหร่ายสไปรูไลนาสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไปได้ แต่ถ้าในสารละลายอาหารมีสารกันกระทบ (buffer) น้อย ความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะเป็นอันตรายต่อสาหร่าย ในสูตรอาหารของ Zarrouk การเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ในปริมาณ 16.8 กรัมต่อลิตร จะทำหน้าที่เป็นสารกันกระทบที่ดีของอาหาร ซึ่งโดยทั่วไปความเป็นกรด - ด่างที่เหมาะสมในการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาเท่ากับ 8.3 ถึง 10.5

2.2.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยมีผลต่อส่วนประกอบของโครงสร้างเซลล์ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อกลไกการควบคุมกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolic regulatory mechanisms) ความจำเพาะของปฏิกิริยาของเอนไซม์ (specificity of enzyme reactions) และส่วนประกอบของเซลล์ (cell composition) นอกจากนี้อุณหภูมิยังส่งผลต่ออัตราการทำปฏิกิริยาของเซลล์ โดยขึ้นกับการได้รับพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาของเซลล์นั่นเอง ดังนั้นการเลี้ยงสาหร่ายในช่วงอุณหภูมิที่พอเหมาะ จึงนับว่ามีความจำเป็นเพื่อทำให้ได้ผลผลิตมากขึ้น มีการศึกษาพบว่าเมื่อเลี้ยงสาหร่ายที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 - 15 องศาเซลเซียส สาหร่ายจะไม่สามารถเจริญได้ (Richmond, 1986)

สาหร่ายเกลียวทองเป็นสาหร่ายที่ชอบอุณหภูมิค่อนข้างสูง (Thermophilic algae) สาหร่ายสไปรูไลนาสามารถเจริญได้ดีในสภาพอากาศแบบกึ่งร้อน มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปี 28 - 34 องศาเซลเซียส ในการเลี้ยงกลางแจ้งอุณหภูมิที่พอเหมาะในเวลากลางวัน คือ 40 องศาเซลเซียส และเวลากลางคืน คือ 25 องศาเซลเซียส ในห้องปฏิบัติการพบว่าสาหร่ายที่ถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงไม่มีการเจริญ แต่จะมีการเจริญเกิดขึ้นถ้านำสาหร่ายกลับมาเลี้ยงที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส จะเกิดการหักของสายสาหร่าย และถ้านำมาเลี้ยงในอุณหภูมิสูงถึง 50 องศาเซลเซียส แม้ในระยะเวลาสั้นๆเพียง 10 นาทีก็ทำให้สาหร่ายตายได้ อย่างไรก็ตามพบว่าอุณหภูมิสัมพันธ์กับความเข้มแสงด้วย เช่น ที่ความเข้มแสง 23,000 ลักซ์ อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 30 - 35 องศาเซลเซียส แต่ถ้าความเข้มแสงลดลงเหลือ 8,000 ลักซ์ อุณหภูมิที่พอเหมาะจะอยู่ในช่วง 25 - 30 องศาเซลเซียส (Ciferri, 1983)

2.2.4 ความเค็ม

เนื่องจากการตอบสนองต่อความเค็มในอาหารที่ต่างกัน ทำให้สามารถแยกสาหร่ายออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ สาหร่ายที่ทนต่อความเค็ม (Halotolerent algae) และสาหร่ายที่ชอบความเค็ม (Halophillic algae) สาหร่ายที่ทนต่อความเค็มจะมีกลไกการตอบสนอง (Respond mechanism) ซึ่งทำให้มีการปรับตัวจนสามารถเจริญเติบโตในอาหารที่มีความเค็มสูงได้ ในขณะที่สาหร่ายที่ชอบความเค็มต้องการเกลือในปริมาณที่พอเหมาะเท่านั้น จึงสามารถเจริญเติบโตได้ และสาหร่ายที่ทนความเค็มสูงนั้นมีปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อเซลล์มากกว่าสาหร่ายที่ทนความเค็มต่ำ ดังนั้นสาหร่ายพวกแรกจึงมีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงกว่า (เพ็ญจันทร์ วงศ์ทวีสุข, 2535)

ความเค็มมีผลต่อการปรับตัวของสาหร่ายต่อระดับ Osmotic potential ของสารอาหาร การปรับตัวดังกล่าวเป็นกระบวนการที่มีสองขั้นตอน คือ ขั้นแรกจะมีการลดกิจกรรมของการสังเคราะห์แสงโดยไม่มีผลต่อกิจกรรมการหายใจ ขั้นที่สองซึ่งต้องผ่านขั้นตอนแรกแล้วพบว่ากิจกรรมการสังเคราะห์แสงจะเพิ่มขึ้น พร้อมกับการเพิ่มของกิจกรรมการหายใจและมีความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้น เพื่อใช้ในการปรับสมดุลของโซเดียมอิออน (Na^+) และโปตัสเซียมอิออน (K^+) และอาจมีการสังเคราะห์โมเลกุลซึ่งมีความจำเป็นต่อการปรับสมดุลดังกล่าว (Richmond, 1986)

Chiu (1980) พบว่าสาหร่ายสไปรูไลนา (Spirulina platensis) ที่ใช้ในการทดลองสามารถเจริญในอาหารที่มีความเข้มข้นของเกลือโซเดียมคลอไรด์ในช่วงกว้าง แต่ช่วงที่เหมาะสมที่สุดคือ 0 - 0.5 กรัมต่อลิตร และพบว่าแม้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์จะสูงถึง 20 - 30 กรัมต่อลิตร สาหร่ายสไปรูไลนาก็ยังสามารถเติบโตได้

2.2.5 การกวน

การกวนมีผลต่อการเจริญของสาหร่ายสไปรูไลนา เนื่องจากการกวนทำให้เพิ่มการกระจายตัวของสาหร่ายให้ได้รับแสงสม่ำเสมอ ช่วยลดอัตราการตกตะกอนของสาหร่าย และทำให้สารอาหารกระจายอย่างทั่วถึง โดยเฉพาะช่วยกระจายคาร์บอนไดออกไซด์ให้สาหร่ายนำไปใช้อย่างเต็มที่ และการเลี้ยงในบ่อเลี้ยงขนาดใหญ่การกวนจะช่วยลดการแบ่งแยกชั้นน้ำอันเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal stratification)

อัตราการกวนขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มแสง ถ้าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายได้รับแสงที่มีความเข้มสูงโดยไม่มีการกวนจะเป็นสาเหตุให้เกิด photolysis หรือ photodestruction ได้ ดังนั้นในที่ที่มีความเข้มแสงสูงจะต้องมีอัตราการกวนสูงด้วย เนื่องจากสาหร่ายเมื่อได้รับแสงแล้วก็จะถูกบังด้วยสาหร่ายตัวอื่นอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการได้รับแสงมากเกินไปและทำให้สาหร่ายได้รับแสงอย่างทั่วถึง ในที่มีความเข้มแสงต่ำและมีอัตราการกวนต่ำจะทำให้การเจริญเป็นไปอย่างช้าๆแต่จะพบรงควัตถุมีปริมาณมากขึ้น ในการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาให้ได้ผลผลิตสูงสุดต้องควบคุมให้มีความเข้มแสงมากพอ แต่ไม่มากจนเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชั่นและควรควบคุมอัตราการกวนให้น้ำมีการเคลื่อนที่ประมาณ 20 - 25 ซ.ม.ต่อวินาที (Fox, 1983)

2.2.6 ความหนาแน่นเริ่มต้นของสาหร่าย

ความหนาแน่นเริ่มต้นที่พอเหมาะมีความสำคัญต่อการเลี้ยงสาหร่าย เนื่องจากปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นที่น้อยเกินไปอาจทำให้สาหร่ายตาย เนื่องจากได้รับปริมาณแสงมากเกินไปจนเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) ในทางกลับกันหากใช้ความหนาแน่นมากเกินไปจะทำให้มีการสูญเสียเนื่องจากอัตราการหายใจที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงจะลดลง เนื่องจากเกิดการบดบังแสงกันเองของเซลล์สาหร่าย ความหนาแน่นเริ่มต้นของสาหร่ายขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเข้มแสง ส่วนประกอบของอาหาร ความลึกของบ่อเลี้ยงเป็นต้น พบว่าหากใช้ความหนาแน่นเริ่มต้นของสาหร่ายสไปรูไลนาที่ 225 - 250 มิลลิกรัมน้ำหนักแห้งต่อลิตร จะช่วยลดระยะเวลาในการเลี้ยงให้น้อยลง (Ciferri, 1983)

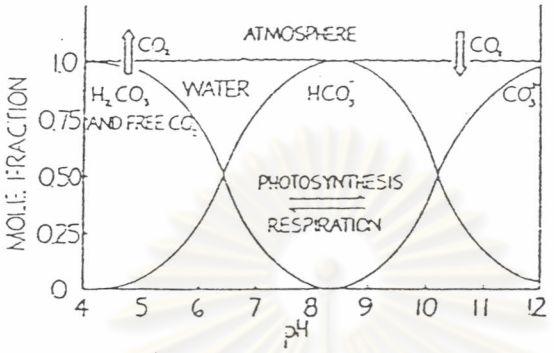
2.3 แหล่งอาหารของสาหร่ายสไปรูไลนา

สูตรอาหารสำหรับสาหร่ายสไปรูไลนา คือ สูตรอาหารของ Zarrouk ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิด ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่สาหร่ายทั่วไปต้องการใช้ในการเจริญเติบโต มีดังต่อไปนี้

2.3.1 ธาตุคาร์บอน

สาหร่ายทุกชนิดต้องการใช้ธาตุคาร์บอนในการสังเคราะห์แสง โดยแหล่งคาร์บอนในน้ำจะอยู่ในรูปต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนิก ไบคาร์บอเนต หรือ คาร์บอเนต ขึ้นกับค่าความเป็นกรด - ด่างของแหล่งน้ำจืดในแต่ละแห่ง โดยทั่วไปแหล่งน้ำจืดจะมีระบบบัฟเฟอร์ในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ - คาร์บอนิก - ไบคาร์บอเนต - คาร์บอเนต (CO_2 - H_2CO_3 - HCO_3^- - CO_3^{2-} System) ระบบบัฟเฟอร์นี้มีความสำคัญต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่าย เพื่อที่จะปรับสมดุลของความเป็นกรด - ด่าง โดยทั่วไประบบนี้จะสมดุลและจะพบคาร์บอนในรูป ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) มากที่สุด แต่ถ้าความเป็นกรด - ด่างสูงขึ้น จะพบในรูปคาร์บอเนตอิออน (CO_3^{2-}) มากขึ้น (Richmond, 1986)

Fox (1983) พบว่าค่าความเป็นกรด - ด่างของอาหารที่ใช้ในการเจริญที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 8.5 - 9.5 เมื่อใดก็ตามที่ค่าความเป็นกรด - ด่างสูงขึ้นถึง 10 แสดงว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มไม่เพียงพอ คาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มเป็นตัวจำกัดการเจริญของสาหร่าย การเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นการทำให้ค่าความเป็นกรด - ด่างต่ำลง และเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนที่ช่วยในการเจริญให้มากขึ้น



รูปที่3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอนที่สภาพความเป็นกรด-ด่างต่างกัน (Richmond, 1986)

2.3.2 ธาตุไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นอีกธาตุหนึ่งที่มีความสำคัญ สาหร่ายสามารถนำไนโตรเจนมาใช้ได้ทั้งในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เพื่อนำมาสร้างองค์ประกอบต่างๆที่สำคัญของเซลล์ เช่น โปรตีน กรดอะมิโน โคเอนไซม์ กรดนิวคลีอิก คลอโรฟิลล์ ธาตุไนโตรเจนจะมีความสำคัญรองจากคาร์บอน สาหร่ายสไปรูไลนาไม่สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ จึงใช้ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปไนไตรท ไนไตรท์ และแอมโมเนีย หรือสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ ยูเรีย กลูตามิน แอสพาราจิน และกรดอะมิโน เป็นต้น เมื่อสาหร่ายใช้ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียจะทำให้ค่าความเป็นกรด - ด่างลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่สาหร่ายเมื่อดูดซึมไนไตร์ทและไนเตรทจะนำไปรีดิวซ์ให้เป็นแอมโมเนียเสียก่อนแล้วจึงนำไปใช้งาน ซึ่งหากในอาหารมีไนโตรเจนทั้งแอมโมเนียและไนเตรท สาหร่ายสไปรูไลนาจะนำแอมโมเนียมาใช้จนหมดก่อนจึงนำไนเตรทมาใช้ต่อไป สาหร่ายสไปรูไลนาสะสมไนโตรเจนในรูปรงควัตถุไซยาโนไฟซินและไซโคไยานิน เป็นสำคัญ และปล่อยไนโตรเจนออกจากเซลล์ในรูปของโพลีเปปไทด์ และส่วนน้อยเป็นกรดอะมิโนอิสระ (สุมาลี ดุลยอนุกิจ, 2536)

2.3.4 ธาตุฟอสฟอรัส

ธาตุฟอสฟอรัสเป็นอีกธาตุหนึ่งที่มีบทบาทต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย โดยมีบทบาทในกระบวนการสร้างพลังงานและสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก เซลล์ของสาหร่ายจะใช้พลังงานที่อยู่ในรูปของอนินทรีย์สาร ได้แก่ ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (H_2PO^-) ไฮโดรเจนฟอสเฟต (HPO_4^{2-}) และฟอสเฟต (PO_4^{3-}) สำหรับฟอสเฟตในรูปสารอินทรีย์ สาหร่ายจะต้องย่อยด้วยเอนไซม์เสียก่อนจึงจะสามารถนำไปใช้งานได้ นอกจากนี้ แสง ความเป็นกรด-ด่าง หรือปริมาณอิออนต่างๆ เช่น โซเดียมอิออน (Na^+) โปแตสเซียมอิออน (K^+) หรือ แมกนีเซียมอิออน (Mg^{2+}) เป็นต้นสามารถกระตุ้นการใช้ฟอสฟอรัสได้

สาหร่ายสามารถเปลี่ยนฟอสเฟตให้อยู่ในรูปของออโธฟอสเฟต (orthophosphate) และ ATP ตามลำดับ และจะสะสมไว้ภายในเซลล์ ซึ่งถ้าสารละลายอาหารมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้สาหร่ายลดการเจริญเติบโตลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่ระยะคงที่ (stationary phase) และระยะลดจำนวน (decleration phase)

สาหร่ายเริ่มปล่อยฟอสฟอรัสออกจากเซลล์ เมื่อมีความหนาแน่นครึ่งหนึ่งของความหนาแน่นสูงสุด แต่จะปล่อยออกมาเพียงเล็กน้อยในขณะที่กำลังเจริญเติบโต และเริ่มปล่อยมากขึ้นหลังจากหยุดการเจริญเติบโตแล้ว อัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ดีที่สุดในการเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา คือ 5.5 ต่อ 1 (สุมาลี ดุลยอนุกิจ, 2536)

การขาดธาตุฟอสฟอรัสเป็นตัวการทำให้ส่วนประกอบของโปรตีน คลอโรฟิลล์เอ RNA และ DNA น้อยลง (Richmond, 1986) และมีผลต่อลักษณะรูปร่างของสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว เนื่องจากส่วนประกอบของเซลล์ที่เป็น polyphosphate หายไป (Jensen et al., 1974) นอกจากนี้ยังมีการสะสม granules ในเซลล์ที่ขาดธาตุฟอสฟอรัสอีกด้วย (Stevens et al., 1981)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 วิธีการเพาะเลี้ยงและขยายจำนวนสาหร่ายเกลียวทอง

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายเกลียวทองสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. การเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ (Indoor cultivation)
2. การเลี้ยงกลางแจ้ง (Outdoor cultivation)

1. การเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ สามารถทำได้โดยเลี้ยงเชื้อในอาหารวุ้น (agar media) หลังจากนั้นเขี่ยเชื้อมาเลี้ยงต่อในอาหารเหลว (liquid media) หรือเลี้ยงเชื้อในอาหารเหลวได้เลยโดยตรง สำหรับสูตรอาหารเหลวที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ CFTRI medium และ Zarrouk's medium

2. การเลี้ยงกลางแจ้ง สถานที่ควรอยู่ในบริเวณที่มีสภาพแวดล้อมเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายเกลียวทอง โดยปัจจัยที่จำกัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายชนิดนี้ได้แก่ ความเข้มของแสง ปริมาณน้ำฝน ความแรงของลมและอุณหภูมิ เป็นต้น (วุฒิพร พรหมขุนทอง, 2529)

นอกจากนี้วิธีเลี้ยงสาหร่ายยังสามารถแยกออกได้อีก 2 ประเภท ตามการเก็บเกี่ยว ดังนี้

1. Batch culture การเลี้ยงทุกครั้งจะเริ่มจากห้องปฏิบัติการจากจำนวนน้อยๆ จนกระทั่งมีจำนวนมากและเก็บเกี่ยวครั้งเดียวหมด วิธีนี้เป็นวิธีที่สะอาดที่สุด ส่วนมากมักใช้สารเคมีในการเลี้ยงสาหร่าย ผลผลิตที่ได้มักใช้เป็นอาหารของคน

2. Continuous culture การเลี้ยงเริ่มเหมือน Batch culture แต่จะเก็บเกี่ยวเพียงส่วนหนึ่งและปล่อยส่วนที่เหลือให้ทยอยกันเติบโตเรื่อยไปโดยไม่เริ่มต้นเลี้ยงใหม่ส่วนมากใช้เลี้ยงในน้ำเสีย (sewage based culture) เพราะควบคุมความสะอาดยาก วิธีนี้ผลผลิตถูกกว่าวิธีแรก ปัจจุบันใช้เป็นวิธีบำบัดน้ำเสียวิธีหนึ่ง สาหร่ายที่ได้อาจนำไปใช้เป็นปุ๋ยหรืออาหารสัตว์

2.5 คุณค่าทางอาหารของสาหร่ายสไปรูไลนา

คุณค่าทางอาหาร หรือองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายสไปรูไลนาเป็นปัจจัยที่สำคัญในการนำสาหร่ายมาใช้ประโยชน์ เช่น นำมาทำเป็นอาหารสัตว์ อาหารมนุษย์ อาหารเสริมสุขภาพ หรือนำไปสกัดสารบางอย่างเพื่อใช้เป็นยารักษาโรค ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายสไปรูไลนาจะแปรผันตามสายพันธุ์ สภาพแวดล้อมที่สาหร่ายเจริญอยู่ ได้แก่ แสง อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง และอาหาร (Switzer, 1982) นอกจากนี้วิธีวิเคราะห์ที่แตกต่างกันก็ให้ผลการวิเคราะห์ที่ต่างกันด้วย

การใช้สาหร่ายสไปรูไลนาเพื่อใช้เป็นอาหารมีมานานแล้ว โดยพบว่าในประเทศชาด (Chad) ในประเทศแอฟริกา ประชาชนนิยมนำสาหร่ายสไปรูไลนาจากทะเลสาบชาดมาตากแห้งใช้รับประทาน หรือในประเทศแม็กซิโก (Mexico) มีการนำสาหร่ายสไปรูไลนามาปรุงอาหารและใส่ในขนมปัง กล่าวกันว่าจะทำให้ขนมปังมีรสชาติคล้ายใส่ชีส (Fogg, 1978) ต่อมามีการนำสาหร่ายสไปรูไลนามาวิเคราะห์คุณค่าทางอาหารพบว่าประกอบด้วยโปรตีนสูงถึง 63 - 68% ของน้ำหนักแห้งซึ่งมากกว่าโปรตีนในไข่และเนื้อวัวถึง 3.5 เท่า และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดอะมิโนก็พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่สมดุลทั้งในแง่ปริมาณและคุณภาพ มีปริมาณของวิตามินและแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายหลายชนิด นอกจากนี้ยังพบว่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์ ไฟโคไซยานิน และคาโรทีนอยด์ในปริมาณที่สูง โดยเฉพาะคาโรทีนอยด์ซึ่งเป็นแหล่งของสารเร่งสีในสัตว์ สัตว์ไม่สามารถสังเคราะห์ขึ้นเองแต่ต้องได้รับจากอาหารที่กินเข้าไป ปัจจุบันจึงมีการใช้สาหร่ายสไปรูไลนาแห้งผสมในอาหารเพื่อเร่งสีปลาให้เข้มขึ้น และผลผลิตของสาหร่ายเกลียวทองเมื่อเปรียบเทียบกับพืชเศรษฐกิจอื่นๆแล้วมีผลผลิตต่อเนื้อที่ต่อปีสูงมาก (วุฒิพร พรหมขุนทอง, 2529)

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าสาหร่ายสไปรูไลนาประกอบด้วยสารอาหารที่มีคุณค่าหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรตีน ซึ่งพบในปริมาณมากถึงร้อยละ 71 และเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพ เนื่องจากประกอบด้วยกรดอะมิโนทั้งชนิดที่ร่างกายสังเคราะห์ได้ และชนิดที่ร่างกายสังเคราะห์ไม่ได้ แต่ถ้าเปรียบเทียบสาหร่ายสไปรูไลนากับอาหารโปรตีนมาตราฐาน เช่น นม หรือ ไข่ จะพบว่ามี methionine cystine และ lysine น้อยกว่า อย่างไรก็ตามนักวิทยาศาสตร์หลายท่านสรุปว่า สาหร่ายชนิดนี้ยังมีโปรตีนที่มีคุณภาพสูงกว่าพืชทุกชนิด รวมทั้งพืชตระกูลถั่ว (Switzer, 1980)

ตารางที่1 องค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายสไปรูไลนา (Hills, 1980)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ
Moisture	7.0 %
Ash	9.0 %
Protiens	71.0 %
Crude fiber	0.9 %
Xanthophylls	1.80 กรัม / กิโลกรัม
Carotene	1.90 กรัม / กิโลกรัม
Chlorophyll-a	7.60 กรัม / กิโลกรัม
Total organic nitrogen	13.35 %
Nitrogen from protiens	11.36 %
Crude protiens (%N * 6.25)	71.0 %
Essential amino acids	
Isoleucine	4.13 %
Leucine	5.80 %
Lysine	4.00 %
Methionine	2.17 %
Phenylalanine	3.95 %
Threonine	4.17 %
Tryptohan	1.13 %
Valine	6.00 %
Nonessential amino acids	
Alanine	5.82 %
Arginine	5.98 %
Aspartic acid	6.43 %
Cystine	0.67 %
Glutamic acid	8.94 %
Glycine	3.46 %
Histidine	1.08 %
Proline	2.97 %
Serine	4.00 %
Tyrosine	4.60 %

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 (ต่อ)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ
Vitamins	
Biotin (H)	0.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
Cyanocobalamin (B12)	0.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
d-Ca-Pantothenate	11 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
Folic acid	0.5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
Inositol	350 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
Nicotinic acid (PP)	118 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
Pyridoxine (B6)	112 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
Riboflavin (B2)	40 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
Thiamine (B1)	5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
Tocopherol (E)	190 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
Nucleic acids	
Ribonucleic acid (RNA)	3.50 %
RNA = N X 2.18	
Deoxyribonucleic acid (DNA)	1.00 %
DNA = N X 2.63	
Carotenoids	4,000 มิลลิกรัม/กิโลกรัม
X – Carotene	Traces
B – Carotene	1,700 มิลลิกรัม / ลิตร
Xantophylis	1,000 มิลลิกรัม / ลิตร
Cryptoxanthin	556 มิลลิกรัม / ลิตร
Echinenone	439 มิลลิกรัม / ลิตร
Zeaxanthin	316 มิลลิกรัม / ลิตร
Luthein and Euglenanone	289 มิลลิกรัม / ลิตร
Chlorophyll – a	7,600 มิลลิกรัม / ลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบกรดอะมิโนของสาหร่าย Spirulina spp. และอาหารโปรตีนอื่นๆ กับค่ามาตราฐาน FAO (กรัม/100 กรัมโปรตีน)

กรดอะมิโน	Spirulina spp.	ไข่	ถั่วเหลือง	ปลาป่น	ค่ามาตราฐาน FAO
Isoleucine	6.0	6.6	4.6	0.4	4.2
Leucine	8.5	8.8	7.3	7.7	4.8
Phenylalanine	5.0	5.8	4.0	5.1	2.8
Tyrosine	4.0	-	2.9	2.7	-
Threonine	4.6	5.0	4.2	4.0	3.3
Tryptophan	1.4	1.7	1.2	1.5	1.1
Valine	6.5	7.4	5.2	5.0	2.8
Arginine	6.5	6.6	5.0	7.7	2.0
Histidine	1.8	2.4	2.0	2.4	2.4
Lysine	4.6	6.6	7.0	6.5	4.2
Cystine	0.4	-	1.0	1.4	-
Methionine	1.4	3.1	2.6	1.4	1.7

ที่มา : สุชาติ (2529)

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบคุณค่าทางอาหาร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักสาหร่ายแห้ง 100 กรัม (Nakamura, 1982)

ชนิดของอาหาร	โปรตีน	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรต	เถ้า
Spirulina spp.	64 – 72	7	12	5
Chlorella spp.	40 – 50	10 – 30	10 – 25	6 – 10
ถั่วเหลือง	39	19	36	6
ข้าวไม่ขัดสี	9	3	81	7
ข้าวขัดสี	7.5	1	91	1
ข้าวสาลี	11	2	85	2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่ายสไปรูไลนาประกอบด้วยวิตามินและเกลือแร่หลายชนิด โดยประกอบด้วยวิตามินเอ ที่ได้จากเม็ดสีคาโรทีนอยด์ วิตามินบี ซึ่งพบวิตามินบีหลายชนิดแต่ชนิดที่มีความสำคัญได้แก่ วิตามินบี 12 ซึ่งพบมากในเนื้อสัตว์ ดังนั้นสำหรับผู้บริโภคอาหารมังสวิรัต การรับประทานสาหร่ายสไปรูไลนาน่าจะช่วยชดเชยวิตามินบี 12 ที่ขาดหายไปได้ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 4 ตารางแสดงปริมาณวิตามินและแร่ธาตุของสาหร่าย Spirulina spp. แห้ง 1 กิโลกรัม (Hill, 1980)

วิตามิน	มิลลิกรัม	แร่ธาตุ	มิลลิกรัม
Biotin	0.4	Ca	1,315
Vitamin B	2.0	P	8,924
Ca – panthothenate	11.0	Fe	580
Folic acid	0.5	Na	412
Inositol	350.0	Cl	4,400
Nicotinin	118.0	Mg	1,915
Pyridoxine	3.0	Mn	25
Riboflavine	40.0	Zn	39
Thiamine	55.0	K	15,400
Vitamin E	190.0	อื่นๆ	57.000

จากองค์ประกอบทางเคมีและคุณค่าทางอาหารดังกล่าว ทำให้มีการนำสาหร่ายสไปรูไลนาไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสาหร่ายชนิดนี้มีคุณค่าทางอาหารสูง กล่าวคือ ประกอบด้วยโปรตีนที่มีกรดอะมิโนที่จำเป็นครบ รวมถึงไขมัน คาร์โบไฮเดรต วิตามิน และแร่ธาตุอื่นๆเป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 1, 2 และ3 ก่อให้เกิดการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมในหลายประเทศ เช่น ประเทศไทย ญี่ปุ่น ไต้หวัน สหรัฐอเมริกา และอิสราเอล เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายสไปรูไลนา

ปัจจุบันมีการนำสาหร่ายสไปรูไลนามาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางซึ่งสามารถแบ่งการใช้งาน แสดงดังรูปที่ 4 ดังนี้

2.6.1 ใช้เป็นอาหารของมนุษย์

สาหร่ายสไปรูไลนาถูกนำมาใช้เป็นอาหารของมนุษย์ตั้งแต่ศตวรรษที่ 1 ชาวแอสเทคส์ (Aztecs) ที่อาศัยอยู่ในประเทศแม็กซิโกใช้สาหร่ายเกลียวทองจากทะเลสาบมาเป็นอาหารที่เรียกว่า Tecuitlatl (Ventakamaran, 1983) ชนเผ่ามายา (Maya) ใช้สาหร่ายสไปรูไลนาทำอาหารพวกเค้กหรือซุป (Nakamura, 1982) ในประเทศสหรัฐอเมริกามีการนำสาหร่ายสไปรูไลนามาผลิตเป็นอาหารของมนุษย์โดยบริษัท Sosatexcoco ร่วมกับองค์การพัฒนาอุตสาหกรรมแห่งสหประชาชาติและสถาบันผลิตอาหารแห่งชาติของประเทศแม็กซิโก ผลิตเป็นอุตสาหกรรมสาหร่ายอัดเม็ด นำมาทำเป็นส่วนผสมของขนมปังกรอบและขนมหวานต่างๆ (Hoddy, 1983) ประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศญี่ปุ่นรับประทานสาหร่ายนี้ในรูปเม็ดหรือผง (นฤมล ศุภจรรยา, 2529) ชนเผ่าคาเนบู (Kanebou) ที่อาศัยอยู่แถบทะเลทรายซาฮาราทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของทะเลสาบชาด นำสาหร่ายเกลียวทองมาตากแห้งเรียกว่า Dihe ซึ่งนำมาใช้ในการทำซอสสำหรับปรุงอาหารหรือคลุกข้าว (Ciferrri and Tiboni, 1985) ในแถบเอเชียจีนได้นำสาหร่ายเกลียวทองมาทำเป็นอาหารโดยเรียกว่า " Lan " ซึ่งเก็บเกี่ยวจากทะเลสาบน้ำจืดและแหล่งอื่นๆ ชาวอินโดนีเซียเรียกว่า " Ke – Klap " โดยตากแห้งแล้วนำมาประกอบอาหาร (Hoddy, 1983) ในประเทศอินเดียใช้สาหร่ายเกลียวทองเป็นอาหารโปรตีน สำหรับประทศไทยชาวญี่ปุ่นมาตั้งโรงงานผลิตสาหร่ายสไปรูไลนาในนามบริษัทสยามแอลจี จำกัด ทำการผลิตสาหร่ายสไปรูไลนาผงแล้วส่งไปแปรรูปที่ประเทศญี่ปุ่น (สุมนทิพย์ บุนนาค, 2529) สถาบันประมงน้ำจืดแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากองค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) ได้ทำการพัฒนาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เป็นแหล่งโปรตีนแหล่งใหม่และใช้พื้นที่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเนื่องจากมีสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสม ประกอบกับประชาชนในพื้นที่แถบนี้มีการขาดแคลนอาหารโปรตีน (ชื่นจิตร ชื่นกระมล, 2530) ในประเทศเวียตนามมีการทดสอบคุณค่าทางอาหารในมนุษย์ปรากฏว่าอาหารเสริมที่ทำจากสาหร่ายสไปรูไลนาชื่อ Linavina สามารถช่วยรักษาโรคที่เกี่ยวกับตับได้ ส่วน Lina ช่วยแก้ปัญหาสภาวะการขาดสารอาหารในมนุษย์ และในอาหารเสริมทั้งสองชนิดมีสาร lactogil ซึ่งช่วยกระตุ้นการไหลของน้ำนมมารดา

2.6.2 ใช้ในทางการแพทย์

สาหร่ายสไปรูไลนาเป็นสาหร่ายที่มีสารอาหารครบถ้วนและมีคุณภาพสูง ส่งผลให้สาหร่ายสไปรูไลนามีประสิทธิภาพเป็นทั้งอาหารและยาที่ให้ผลในการป้องกัน ควบคุมและรักษาโรคต่างๆได้ เช่น โรคเบาหวาน โรคกระเพาะอาหาร โรคตับ โรคตา โรคริดสีดวงทวาร โรคโลหิตจาง โรคความดันโลหิตสูง และแม้แต่โรคมะเร็ง เนื่องจากสาหร่ายสไปรูไลนามีผนังเซลล์ที่ไม่ใช่เซลลูโลสทำให้ย่อยง่าย จึงเหมาะสมกับผู้ป่วยที่เพิ่งฟื้นไข้และคนชรา การรับประทานสาหร่ายสไปรูไลนาจะสามารถตัดปัญหาเรื่องไขมันสะสมซึ่งทำให้อ้วนเพราะว่าสาหร่ายสไปรูไลนามีคลอเรสเตอรอลน้อย และส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว (สุชาติ อิงธรรมจิตร์, 2529) ในผู้ที่ป่วยเป็นโรคความดันโลหิตสูงต้องการสารโคลีน (Choline) เพื่อช่วยลดความดันโลหิตให้ต่ำลงถึงแม้ว่าสาหร่ายสไปรูไลนาจะมีสารโคลีนในปริมาณน้อยแต่ก็มี คลอโรฟิล เซอรีน และเมทไทโอนีนมาก สารเหล่านี้มีคุณสมบัติที่จะช่วยชักนำให้ร่างกายผลิตสารโคลีนขึ้นมาได้ ถ้ารับประทานสาหร่ายสไปรูไลนาสม่ำเสมอภายในสองสัปดาห์ความดันโลหิตจะลดลง 20 - 30 มิลลิเมตร (สมบูรณ์ ผู้พัฒน์, 2529)

ในประเทศเม็กซิโกให้นักกีฬารับประทานสาหร่ายสไปรูไลนานาน 30 - 40 วัน พบว่าทำให้กล้ามเนื้อหดตัวดีขึ้น และได้ทดลองในเด็กทารกซึ่งขาดอาหารในประเทศแม็กซิโกโดยใช้สาหร่ายสไปรูไลนาร้อยละ 50 ผสมลงในอาหารสำเร็จรูปปรากฏว่าช่วยให้ทารกมีน้ำหนักตัวเพิ่มขึ้น (สุชาติ อิงธรรมจิตร์, 2529)

2.6.3 ใช้เป็นอาหารสัตว์

การใช้สาหร่ายเกลียวทองเป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์มีการทดลองกันอย่างแพร่หลาย การใช้สาหร่ายเกลียวทองเป็นส่วนผสมอาหารสัตว์จะทำให้สัตว์มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ในสัตว์ปีกพวกเป็ดไก่จะช่วยทำให้ไข่ดกและไข่แดงมีสีเข้มน่ารับประทานเนื่องจากเบตาแคโรทีนจะเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ ซึ่งทำให้ไข่แดงและเนื้อสัตว์มีสีเข้มขึ้น (Ventakamaran, 1983)

ในการทดลองกับปลา Nakamura (1982) พบว่าสาหร่ายเกลียวทองในรูปแช่แข็งและเป็นผงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการอนุบาลลูกปลามากเนื่องจากมีขนาดเล็กและย่อยง่าย พบว่าส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตสูงขึ้น ปลาเจริญถึงระยะเจริญพันธุ์เร็วขึ้น เช่นเดียวกันกับการทดลองของ ปิยะพงศ์ โชติพันธุ์ (2527) ซึ่งทดลองผสมสาหร่ายเกลียวทองลงในอาหารเนื้อปลาสดให้ผลต่อการเจริญเติบโตของลูกปลากระพงขาวได้ดีกว่าการเลี้ยงด้วยอาหารเนื้อปลาสดเพียงอย่างเดียว และมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อในปลากระพงขาวดีกว่าการให้เนื้อปลาสดเพียงอย่างเดียวประมาณ72 % และมีอัตราการรอดตายสูงกว่า

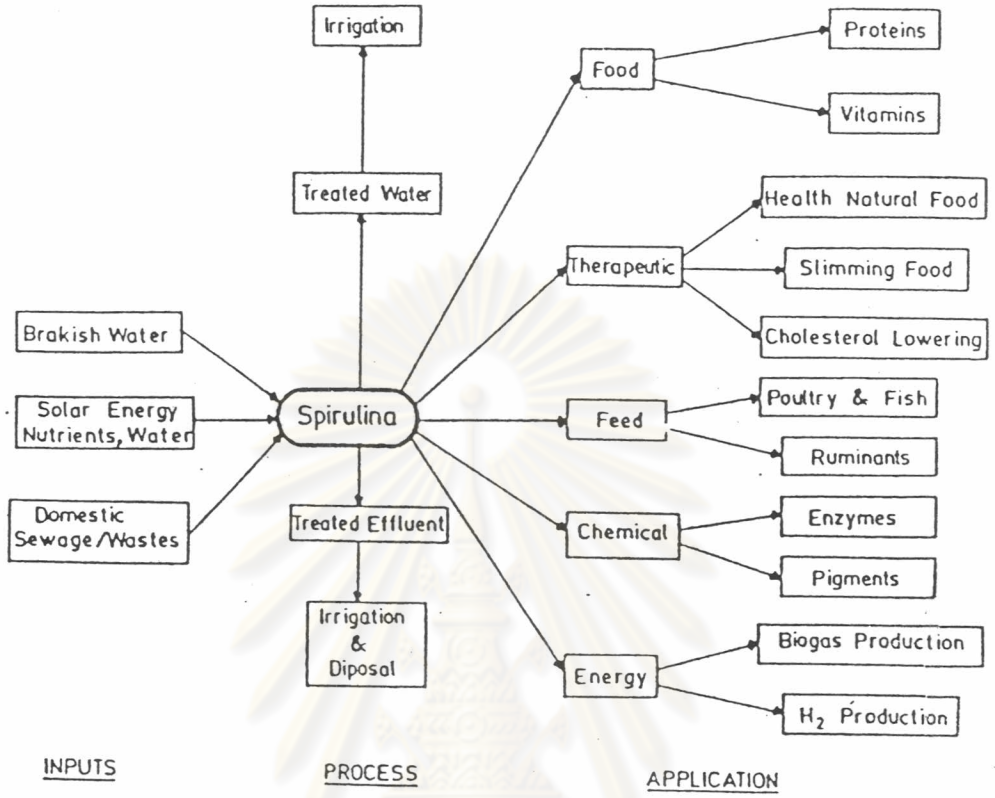
การศึกษาอัตราการรอดตาย เจียมจิตร์ บุญสม (2530) ทดลองใช้สาหร่ายเกลียวทองเลี้ยงลูกปลาที่ระยะ yolk sac เพิ่งเริ่มยุบ พบว่าลูกปลาที่เลี้ยงด้วยไข่แดงต้มสุกผสมสาหร่ายเกลียวทองมีอัตราการอยู่รอดสูงถึงร้อยละ 90 ในขณะที่ลูกปลาที่เลี้ยงด้วยไข่แดงต้มสุกเพียงอย่างเดียวมีอัตราการอยู่รอดร้อยละ 60

สำหรับการทดลองในกุ้งกุลาดำ ณรงค์ศักดิ์ พ่วงลาภ (2533) ทดลองเลี้ยงกุ้งกุลาดำขนาดน้ำหนักเฉลี่ย 0.05 กรัม พบว่ากุ้งที่เลี้ยงด้วยอาหารที่มีสาหร่ายเกลียวทอง 10 % มีการเจริญเติบโตดีที่สุด การศึกษาอัตราการรอดตาย ประสิทธิภาพของโปรตีน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อพบว่า กุ้งที่เลี้ยงด้วยอาหารที่มีส่วนผสมของสาหร่ายเกลียวทองทุกระดับจะดีกว่ากุ้งที่เลี้ยงด้วยอาหารที่ไม่มีส่วนผสมของสาหร่ายเกลียวทอง และปริมาณคาโรทีนอยด์ในกุ้งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสาหร่ายเกลียวทองที่ผสมในอาหารและระยะเวลาในการเลี้ยง แสดงให้เห็นว่าคุณค่าทางอาหารของสาหร่ายเกลียวทองมีเพียงพอต่อความต้องการของกุ้งกุลาดำ

สำหรับการศึกษาถึงผลของการได้รับรงควัตถุของสาหร่ายสไปรูไลนา บานชื่น ชลสวัสดิ์ (2532) ทดลองใช้สาหร่ายสไปรูไลนาผสมกับอาหารเลี้ยงปลาดุกอุยพบว่าหากผสมสาหร่ายสดในปริมาณมากกว่าร้อยละ 5 ขึ้นไป จะมีผลทำให้เนื้อปลามีสีเข้มขึ้นตามปริมาณของสาหร่ายที่ใส่และระยะเวลาที่เลี้ยง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดลองของมะลิ บุณยรัตนผลิน (2529) ศึกษาผลของรงควัตถุแคโรทีนอยด์จากแหล่งต่างๆต่อการเปลี่ยนสีของปลาแฟนซีคาร์พ พบว่าปลาที่ได้กินอาหารเสริมจากสาหร่ายเกลียวทองมีสีเข้มกว่าปลาที่ไม่ได้กิน

ในการทดลองกับสัตว์ปีก โอภาส วิชชุไตรภพ (2533) ได้ทดลองนำสาหร่ายเกลียวทองมาผสมเป็นอาหารเสริมสำหรับนกกระทาพันธุ์ญี่ปุ่น (Coturnix coturnix japonica) พบว่าสามารถใส่สาหร่ายได้สูงถึงร้อยละ 15 ของน้ำหนักอาหาร โดยไม่เกิดผลเสียต่อการเจริญเติบโต การวางไข่และทำให้ไข่ที่ได้มีสีเข้ม

จะเห็นได้ว่ามีการใช้สาหร่ายเกลียวทอง (Spirulina platensis) เป็นอาหารเสริมในสัตว์หลายชนิด โดยมีจุดประสงค์ทั้งในแง่ของการเพิ่มการเจริญเติบโตและในการปรับปรุงผลผลิต เช่น เนื้อและไข่ เป็นต้น



รูปที่4 การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายเกลียวทองในด้านต่างๆ (Venkataraman, 1983)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.4 ใช้แก้ไขปัญหามลภาวะเป็นพิษทางน้ำ

การเจริญของสาหร่ายในแหล่งน้ำทั่วไปสามารถเป็นตัวบ่งบอกถึงมลภาวะของแหล่งน้ำได้ มลภาวะทางน้ำนั้นอาจเกิดจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งรวมถึงโลหะหนักบางชนิดด้วย ในกรณีที่แหล่งน้ำมีมลภาวะอันเนื่องมาจากสารอินทรีย์ การเจริญของสาหร่ายจะเป็นไปได้ด้วยดี เนื่องจากสาหร่ายสามารถใช้สารอาหารสำหรับการเจริญได้ แต่ถ้าแหล่งน้ำมีมลภาวะอันเนื่องจากโลหะหนัก การเจริญของสาหร่ายในแหล่งน้ำนั้นจะลดลง อย่างไรก็ตามสาหร่ายหลายชนิดมีกลไกป้องกันพิษจากโลหะหนักได้ ส่วนใหญ่โลหะหนักจะถูกดูดซับไว้ที่ผนังเซลล์ของสาหร่าย เนื่องจากผนังเซลล์ของสาหร่ายประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิด ที่สำคัญคือ โปรตีน และ โพลีแซคคาไรด์ ซึ่งจะทำหน้าที่จับกับอิออนของโลหะหนักได้ กลไกการดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นได้เร็วมาก กล่าวคือ ในสาหร่าย Chlorella vulgaris มีการดูดซับแคดเมียมเข้าสู่ภาวะสมดุลภายใน 10 นาที นอกจากนั้นสาหร่ายยังช่วยกำจัดสารที่เกิดจาก Aerobic process ซึ่งได้แก่ nitrates, phosphate, sulfates, carbondioxide (ธีรพล คังคะเกตุ, 2531) โดยสามารถลด phosphate ได้ถึง 83 - 92 % (Palmer, 1977) นอกจากนี้สาหร่ายสามารถผลิตออกซิเจนให้แก่แหล่งน้ำและยังมีส่วนช่วยในการฟอกตัวของแหล่งน้ำ (Self purification) ซึ่งเป็นการช่วยบำบัดน้ำเสียอีกทางหนึ่ง

Soong (1980) ได้ทดลองเลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาโดยใช้น้ำทิ้งจากการหมักมูลสัตว์ พบว่าการเติม NaCl ลงไปจะช่วยป้องกันการระเหยของ NH_3 จากน้ำทิ้งได้ และการเติม $NaHCO_3$ เล็กน้อยจะทำให้การเจริญของสาหร่ายสไปรูไลนาในน้ำทิ้งดีกว่าในอาหารสังเคราะห์

Chaudhari และคณะ (1980) ใช้น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน (domestic raw sewage) ซึ่งมี BOD 350 ppm เลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนาพบว่าการเติม $NaHCO_3$ 2 g $NaNO_3$ 8 g และ $MgSO_4$ 0.1 g ในน้ำทิ้ง 1 ลิตร จะทำให้สาหร่ายเจริญได้ดีที่สุด โดยได้ปริมาณ 500 ถึง 600 mg/l ในเวลา 10 - 15 วัน

Kosaric และคณะ (1974) ทดลองใช้น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนซึ่งผ่านกระบวนการบำบัดขั้นที่สองแล้ว (secondary effluent) เลี้ยงสาหร่ายสไปรูไลนา โดยน้ำทิ้งมีค่า BOD 10 - 13 ppm nitrogen 40.8 ppm, phosphorus 4.8 ppm โดยใช้สาหร่ายเริ่มต้นทดลอง 0.5 g ต่อปริมาตร 10 ลิตร ปรับ pH โดยใช้ $NaHCO_3$ 1 g/l พบว่าในเวลา 8 วัน nitrogen ถูกกำจัดเกือบ 100 % และ phosphorus ถูกกำจัด 64 %

2.7 โลหะหนัก

Van Nostrand's Scientific Encyclopedia (1976) ได้ให้ความหมายของคำว่า "โลหะหนัก" ว่า เป็นโลหะที่มีสมบัติเหมือนกับโลหะอื่นทั่วไปในการนำไฟฟ้า นำความร้อน มีความวาว ความเหนียว การสะท้อนแสง มีค่าเลขออกซิเดชั่นได้หลายค่า สามารถรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ได้สารประกอบใหม่ที่มีความเสถียรกว่าเดิม และสะสมในสิ่งมีชีวิตได้โดยกระบวนการทางชีวภาพถ่ายทอดตามห่วงโซ่อาหาร ทำให้เกิดพิษของโลหะหนักขึ้นได้

โลหะหนักเป็นสารอนินทรีย์ที่มีความคงทนในธรรมชาติ สลายตัวได้ยาก โลหะหนักหลายชนิด เช่น ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม และแมงกานีส ล้วนเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอย่างร้ายแรง ในแหล่งน้ำหรือในดินตะกอนโดยทั่วไปจะมีปริมาณโลหะหนักมากน้อยแตกต่างกันไป การรับและสะสมโลหะหนักของสิ่งมีชีวิตนั้นถ้ามีปริมาณเกินระดับหนึ่งก็อาจเกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ทันที ถึงแม้ว่ามีโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมในระดับต่ำก็อาจเกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้ เนื่องจากโลหะหนักบางชนิดมีพิษมาก และสามารถถ่ายทอดไปตามขั้นตอนของห่วงโซ่อาหาร โดยที่ความเข้มข้นจะสูงขึ้นเรื่อยๆ

2.7.1 แมงกานีส

แมงกานีสเป็นโลหะที่ไม่พบเป็นอิสระในธรรมชาติ แต่จะอยู่รวมกับแร่อื่นๆ มีปรากฏอยู่ทั่วไปในธรรมชาติทั้งในดิน หิน น้ำและในสิ่งมีชีวิต โดยส่วนใหญ่มักจะพบในรูปของสารประกอบ ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ ซัลไฟด์ คาร์บอเนต และซิลิเกต สารประกอบแมงกานีสที่มีเปอร์เซนต์แมงกานีสสูงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมได้แก่

1. ไพโรลูไซท์ หรือ แมงกานีสออกไซด์ (Pyrolusite or manganese dioxide, MnO_2) เป็นรูปของสารประกอบที่มีมากที่สุดเพราะมีความคงตัว
2. แมงกาไนท์ (manganite, MnOOH)
3. ฮอสแมนไนท์ (hausmannite, Mn_3O_4)
4. โรโดโครไซท์ (rhodochrosite)
5. ไวโลมีเทน (psilomelane, ($4MnO_2$) (MnBaK)0.NH_2O)

สำหรับความเข้มข้นของแมงกานีสที่พบในดินมีค่าประมาณ 500 - 900 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในน้ำทะเลอยู่ในช่วง 0.1 - 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ในน้ำผิวดินจะมีแมงกานีสอยู่ราว 1 - 500 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่บริเวณที่มีแมงกานีสปรากฏอยู่ในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติมาก ความเข้มข้นของแมงกานีสย่อมจะมากเพิ่มขึ้นด้วย ในน้ำดื่มมีแมงกานีสอยู่ราว 5 - 25 ไมโครกรัมต่อลิตร (WHO, 1981) แมงกานีสเป็นโลหะที่พบเสมอในแหล่งน้ำธรรมชาติทั้งในน้ำผิวดินและน้ำบาดาล ใน

reducing condition แมงกานีสจะอยู่ในรูปของสารละลาย และในรูป oxidizing condition จะอยู่ในรูปตะกอน ดังนั้นน้ำประปาที่มีแมงกานีสสูงกว่า 0.1 ppm จะมองเห็นตะกอนสีน้ำตาลลอยเข้มอยู่ทำให้น้ำมีลักษณะไม่น่าดื่ม

ในอาหารทั่วไปจะมีแมงกานีสเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย โดยปกติจะมีต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบมากในข้าว ผลนัท และหอยต่างๆ และอาจพบมากกว่า 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เช่น ในใบชาแห้งพบ 780 - 930 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและในน้ำชา 1.4 - 3.6 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.7.2 คุณสมบัติของแมงกานีสบริสุทธิ์

แมงกานีสบริสุทธิ์มีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

1. เป็นโลหะสีขาวหรือเทา คล้ายเหล็กมากแต่เปราะกว่า ว่องไวต่อปฏิกริยาเคมี เมื่อทิ้งไว้ในอากาศจะทำปฏิกริยากับออกซิเจนกลายเป็นแมงกานีสออกไซด์มีสีดำ
2. น้ำหนักอะตอม 54.94
3. ความหนาแน่น 7.34 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
4. จุดหลอมเหลว 1,244 องศาเซลเซียส
5. จุดเดือด 1,962 องศาเซลเซียส
6. สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์ต่างๆ

2.7.3 การนำแมงกานีสมาใช้ประโยชน์

ในสมัยก่อนมีการใช้แมงกานีสใส่ในการหลอมแก้วเพื่อให้แก้วใสขึ้น และยังใช้เป็นสีดำในการทำเครื่องเคลือบดินเผา ต่อมาได้มีการนำแมงกานีสผสมในการทำเหล็กกล้าพบว่าทำให้เหล็กกล้ามีความเหนียวและแข็งขึ้น อุปกรณ์และเครื่องจักรต่างๆที่ทำจากเหล็กกล้านี้จะทนต่อการรับน้ำหนักได้มากกว่า ทนต่ออุณหภูมิและความดันสูงได้ดี นอกจากนั้นยังทนต่อสภาพการกัดกร่อนของกรดและด่างได้อีกด้วย แมงกานีสจึงเป็นแร่ที่มีความสำคัญต่อการอุตสาหกรรมมาก สำหรับการนำแมงกานีสมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท ได้แก่

1. การใช้แมงกานีสในทางโลหะกรรม (metallurgical uses) จะใช้แร่ที่มีเปอร์เซนต์ของแมงกานีสค่อนข้างต่ำ ได้แก่ เฟอร์โรแมงกานีส (ferromanganese) สไปเจไลซัน (spigeleison) และซิลิโคแมงกานีส (silicomananese) เป็นต้น โดยนำมาใช้ประโยชน์ในการทำโลหะผสม เช่น ใช้เป็นส่วนผสมในการทำเหล็กกล้า (steel) หรือ เหล็กหล่อ (cast iron) เพื่อทำให้คุณสมบัติบางประการดีขึ้น เช่น เพิ่มความแข็ง ความเหนียว หรือทนต่อการกัดกร่อนของกรดและด่าง นอกจากนี้ยังมีใช้ผสมในลวดเชื่อมเป็นตัว electrode coating

2. การใช้แมงกานีสในทางอโลหะกรรม (non - metallurgical uses) ส่วนใหญ่จะใช้แร่ที่มีเปอร์เซนต์ของแมงกานีสสูง เช่น ไพโรลูไซท์ (pyrolusite) อุตสาหกรรมที่ใช้แมงกานีสในทางอโลหะกรรม ได้แก่

2.1 อุตสาหกรรมการผลิตถ่านไฟฉาย ส่วนมากใช้แร่แมงกานีสไดออกไซด์โดยใช้เป็นตัวดีโพลาไรเซอร์ (depolarizer) แร่นี้จะมีแมงกานีสเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า 72 % มีเหล็กปนไม่เกิน 2.5 % และไม่มีโลหะอย่างอื่นเจือปน เนื้อแร่ด้านไม่มีรูปผลึก

2.2 อุตสาหกรรมเคมีบางประเภท เช่น การทำด่างทับทิม หรือ การทำสารเคมีที่ใช้ฟอกหนัง เป็นต้น

2.3 อุตสาหกรรมการผลิตวัสดุภัณฑ์เคมี ซึ่งจำเป็นต้องใช้แมงกานีสเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ การทำสีย้อม สีทาบ้าน ทำปุ๋ยสังเคราะห์ ผสมให้เกิดสีในเครื่องเคลือบเซรามิกและผสมในการทำอิฐ จะทำให้อิฐมีความร้อนสูง

2.7.4 ความจำเป็นของแมงกานีสต่อร่างกาย

แมงกานีสเป็นแร่ธาตุที่มีความจำเป็นต่อร่างกายทั้งคนและสัตว์ โดยจะมีส่วนช่วยในการสร้างกระดูกและเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน การเจริญเติบโตของร่างกาย และทำหน้าที่สำคัญทางชีวเคมี โดยแมงกานีสจะทำหน้าที่คล้ายกับตัวเร่งปฏิกริยาของกลูโคซามีนเซริน (glucosamineserine) ในการสังเคราะห์มิวโคโพลีแซคคาไรด์ (mucopolysaccharides) ของกระดูกอ่อน

มนุษย์ต้องการแมงกานีสเพื่อให้เกิดความสมดุลของร่างกาย โดยในผู้ใหญ่ต้องการประมาณ 2 - 3 มิลลิกรัมต่อวัน (WHO, 1981) และในเด็กควรได้รับประมาณ 1.25 มิลลิกรัมต่อวัน (Engel et al, 1967)

ในกรณีที่ร่างกายขาดแมงกานีส จะเกิดความผิดปกติโดยส่งผลให้การเจริญเติบโตของกระดูกและโครงสร้างผิดปกติ การเจริญเติบโตของหูชั้นในไม่สมบูรณ์ และทำให้ตับอ่อนผิดปกติ ซึ่งความผิดปกติต่างๆเหล่านี้มักพบในเด็กในระยะที่กำลังเจริญเติบโต นอกจากนั้นยังมีผลต่อระบบสืบพันธุ์และการทำงานของสมองอีกด้วย

2.7.5 ความต้องการแมงกานีสในสัตว์

แมงกานีสเป็นธาตุที่สัตว์ต้องการเช่นเดียวกับธาตุอื่นๆดังตารางที่ 2 มีเก็บในส่วนของ ตับ กระดูก กล้ามเนื้อและผิวหนัง มีหน้าที่ช่วยให้สัตว์เจริญเติบโตดี และมีความสามารถในการสืบพันธุ์สูง เช่น เป็นสัด ตกไข่ ตามปกติ มีส่วนช่วยป้องกันไม่ให้เกิดโรคกระดูกเปราะเนื่องจากแมงกานีสเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์ ซึ่งช่วยในการสร้างกระดูกแมงกานีสเป็นธาตุที่ช่วยให้การสืบพันธุ์ของสัตว์เป็นปกติ โดยทั่วไปแล้วธาตุแมงกานีสเป็นธาตุที่ช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในขบวนการเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน

ตารางที่ 5 ปริมาณธาตุต่างๆที่สัตว์ต้องการ Williamson (1977)

Macro-elements	(%)	Trace-elements	(ppm)
แคลเซียม	1.50	เหล็ก	20 - 80
ฟอสฟอรัส	1.00	สังกะสี	10 - 50
โปแตสเซียม	0.20	ทองแดง	1 - 5
โซเดียม	0.16	แมงกานีส	0.2 - 0.5
คลอรีน	0.11	ไอโอดีน	0.3 - 0.6
กำมะถัน	0.15	โคบอลท์	0.02 - 0.1
แมกนีเซียม	0.04	โมลิบดินั่ม	1 - 4

สัตว์ปีกต้องการธาตุแมงกานีสมากกว่าสัตว์เลี้ยงชนิดอื่น และสัตว์ที่ได้รับแมงกานีสมากเกินไปอาจเกิดความเป็นพิษได้

1. อาหารไก่ควรมีแมงกานีส 55 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม
2. อาหารสุกรควรมีธาตุแมงกานีส 20 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม
3. อาหารโคควรมีธาตุแมงกานีส 10-20 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7.6 อาการขาดธาตุแมงกานีส

สัตว์ที่ขาดธาตุแมงกานีสมักมีประสิทธิภาพการสืบพันธุ์ต่ำ เป็นสัดช้า การตกไข่ผิดปกติ ลูกสัตว์แรกคลอดอ่อนแอ ในสัตว์เพศผู้บางครั้งจะเป็นหมัน การเจริญของเต้านมและการผลิตน้ำนมผิดปกติ เกิดโรคเอ็นเคลื่อน (slipped tendon) ในไก่ที่กำลังเจริญเติบโตจะมีกระดูกรูปร่างผิดปกติ ไข่มีการฟักออกต่ำ

2.7.7 ความเป็นพิษของแมงกานีส

แมงกานีสอยู่ในรูปสารประกอบที่พบอยู่ในธรรมชาติ แต่มนุษย์มีการนำแมงกานีสในธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ จึงทำให้แมงกานีสกระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ เช่น แพร่กระจายสู่บรรยากาศ โดยการปลดปล่อยของโรงงานอุตสาหกรรมที่นำแมงกานีสมาใช้ประโยชน์ ส่วนปริมาณแมงกานีสในแหล่งน้ำธรรมชาติจะเพิ่มความเข้มข้นได้จากการที่ฝนตกชะล้างเอาแมงกานีสในบรรยากาศและจากกิจกรรมบางอย่างของมนุษย์ลงในแหล่งน้ำและดูดซับอยู่ในดินตะกอนซึ่งจะอยู่ในรูปของแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ซึ่งไม่ว่าแมงกานีสจะละลายในน้ำหรือถูกดูดซับอยู่ในดินตะกอนก็สามารถถูกดูดซับโดยพืชหรือสัตว์อีกทอดหนึ่งและถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร

ถึงแม้ว่าแมงกานีสจะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อพืช สัตว์และมนุษย์ แต่ถ้าได้รับเข้าไปมากเกินขีดจำกัดก็อาจเกิดความเป็นพิษของแมงกานีสขึ้นได้ เช่น ในพืชแมงกานีสจะไปทำลายฮอร์โมนออกซิน (auxin) เช่นใน Japanese morning glory เป็นต้น

สำหรับในสัตว์และมนุษย์ความเป็นพิษของแมงกานีสจะคล้ายคลึงกัน โดยทั่วไปมนุษย์มีความต้องการแมงกานีสในระดับวันละ 2 - 3 มิลลิกรัมในผู้ใหญ่และ 1.25 มิลลิกรัมในเด็ก โดยปกติจะได้รับจากอาหารถึงวันละ 2 - 9 มิลลิกรัม ส่วนที่เกินความต้องการสามารถขับออกทางอุจจาระแต่จะขับออกทางปัสสาวะเป็นส่วนน้อย

แมงกานีสสามารถเข้าสู่ร่างกายได้สามทางด้วยกัน คือ

1. ทางจมูก โดยการสูดหายใจเอาฝุ่น หรือไอของแมงกานีสเข้าสู่ปอดและกระจายไปสู่ระบบต่างๆของร่างกายจนถึงถุงลมปอด ซึ่งนับเป็นทางเข้าที่สำคัญมากที่สุดก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ
2. ทางปาก โดยการรับประทานอาหารที่มีแมงกานีสปะปนอยู่
3. ทางผิวหนัง เป็นทางที่มีโอกาสเข้าสู่ร่างกายได้น้อยที่สุด ส่วนใหญ่มักเกิดกับผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับแมงกานีสโดยตรง

เมื่อแมงกานีสเข้าสู่ร่างกายแล้วจะแพร่กระจายไปสะสม ตามอวัยวะต่างๆของร่างกาย ความเข้มข้นที่จะเกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์นั้นจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของอวัยวะ และเนื้อเยื่อที่แมงกานีสไปสะสมอยู่ อาการแพ้แมงกานีสที่พบมีดังนี้ คือ

1. การแพ้พิษเฉียบพลัน ซึ่งเกิดจากการหายใจเอาฝุ่นแมงกานีสที่มีความเข้มข้นสูงๆเข้าไป ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดกล้ามเนื้อ ซึ่งจะปรากฏอาการหลังจากที่รับเข้าไปหลายชั่วโมง และจะเป็นปกติภายใน 1 - 2 วัน

2. การแพ้พิษเรื้อรัง เกิดกับผู้ที่เกี่ยวข้องสัมผัสกับแมงกานีสโดยตรง ได้รับช้าๆอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ซึ่งจะมีผลต่อระบบประสาทส่วนกลางและปอด จนถึงการเป็นอัมพาตของร่างกาย

2.8 การกำจัดโลหะหนักโดยจุลินทรีย์

สิ่งมีชีวิตทั้งหลายรวมทั้งมนุษย์มีคุณสมบัติร่วมกันประการหนึ่ง คือ ความสามารถที่จะสะสมสารต่างๆจากสิ่งแวดล้อมไว้ในตัว โดยไม่คำนึงว่าสารนั้นจะมีพิษหรือไม่ (Rose, 1976 Horitsu, et al., 1979, Khummongkol, 1982) คุณสมบัติข้อนี้เห็นได้ชัดในจุลินทรีย์ เช่น สาหร่ายเซลล์เดียวที่เจริญในสารละลายที่มีโลหะหนักเจือจางมากๆ สามารถสะสมโลหะหนักนั้นได้สูงเป็นพันๆเท่าของความเข้มข้นโลหะในสารละลาย (Shumate II, Stranberg และ Parrott, 1981, Macaskie et al., 1987) จึงมีการนำเอาจุลินทรีย์มาใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลาย

N. Rangsayatorn (2001) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สาหร่าย Spirulina platensis ในการสะสมแคดเมียมที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 100 mg/l ในน้ำเสีย พบว่า การสะสมแคดเมียมของสาหร่ายสไปรูไลนาไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของสารละลายแต่ขึ้นกับค่าความเป็นกรด - ด่าง (ค่า pH) ค่า pH ที่เหมาะสมคือ 7 การสะสมแคดเมียมจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว คือ 78 % ของการสะสมจะเสร็จสมบูรณ์ภายใน 5 นาที สามารถสะสมแคดเมียมได้สูงสุด 98.04 mg/g น้ำหนักแห้ง

Pissopa (1990) ศึกษาการสะสมตะกั่วและสังกะสีโดยสาหร่าย Spirulina platensis พบว่าสาหร่ายสามารถสะสมตะกั่วได้อย่างรวดเร็วใน 10 นาทีแรก หลังจากนั้นการสะสมจะเพิ่มขึ้นช้าลง โดยมีอัตราการสะสมตะกั่วและสังกะสีคือ 15.6 ug/hr.mg น้ำหนักแห้ง และสามารถสะสมสังกะสีได้สูงสุด 19 ug/mg น้ำหนักแห้ง ภายใน 5 ชั่วโมง การสะสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH มากกว่า 6

2.8.1 กรรมวิธีในการดูดซับโลหะหนักออกจากสารละลายโดยจุลินทรีย์

ในการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยจุลินทรีย์ จำเป็นต้องทราบถึงกรรมวิธีในการดูดซับโลหะหนักออกจากสารละลายของจุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ Saccharomyces cerevisiae จะดูดซับยูเรเนียมไว้ที่ผนังเซลล์ (Stranberg et al., 1981) จุลินทรีย์บางชนิดจะดูดซับโลหะจากสารละลายโดยการดูดซับโลหะเข้าไปสะสมไว้ภายในเซลล์ เช่น Pseudomonas aeruginosa (Stranberg et al., 1981) ส่วนจุลินทรีย์บางชนิดสามารถสะสมโลหะไว้ได้ทั้งที่ผนังเซลล์และดูดซับโลหะเข้าไปสะสมไว้ภายในเซลล์ เช่น Chlorella vulgaris จะสะสมแคดเมียมไว้ที่ผิวเซลล์และภายในเซลล์ (Khummongkol, 1982) จุลินทรีย์บางชนิดดูดซับโลหะหนักจากสารละลายโดยการผลิตสารเมตาบอไลต์แล้วขับออกมานอกเซลล์ (extracellular microbial metabolite) เพื่อสร้างเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักซึ่งจะทำให้ปริมาณโลหะหนักในสารละลายลดลงได้ เช่น แบคทีเรีย Zoogloea ramigera จะผลิตสารโพลีแซกคาไรด์ (Polysaccharide) แล้วขับออกนอกเซลล์ซึ่งสามารถดูดซับโลหะหนักจากสารละลายได้ ซึ่งกระบวนการนี้จะเสร็จสิ้นภายในเวลา 15 นาที (Norberg and Eugars, 1982)

สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว (Cyanobacteria) เป็นจุลินทรีย์อีกชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการสะสมโลหะ เช่น สาหร่าย Spirulina platensis สามารถสะสมปรอทและตะกั่วเมื่อเลี้ยงในน้ำที่ปนเปื้อนได้ (Slotton et al., 1989) สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวมีกลไกการดูดซับโลหะหนักโดยการนำพาสารแบบพาสซีฟ (Passive transport) ดูดซับโลหะเข้าไปสะสมไว้ภายในเซลล์และโดยการสร้างสารโพลีแซกคาไรด์ (Polysaccharide) แล้วขับออกนอกเซลล์เพื่อสร้างเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนัก (Gardea-Torresdey et al., 1990) สารประกอบที่ขับออกมานอกเซลล์นี้ยังไม่ทราบองค์ประกอบที่แน่นอนและยังไม่สามารถแยกออกมาได้ แต่ Vaara (1982) ได้ทำการศึกษาและเสนอว่าอาจเป็นสารประกอบจำพวก Acidic Polysaccharide ซึ่งยังไม่สามารถบอกกลไกการดูดซับที่แน่นอนได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8.2 กระบวนการสะสมโลหะโดยจุลินทรีย์

กระบวนการนำพาสาร (Solute - transport process) (Heinz, 1987; Rose, 1976)

มีวิธีหลักอยู่ 4 วิธี คือ

2.8.2.1 การนำพาสารแบบพาสซีฟ (Passive transport) เป็นการนำพาสารโดยไม่ต้องอาศัยพลังงานแต่อย่างใด โมเลกุลของสารจะผ่านเยื่อเมมเบรนโดยอาศัยแรงขับดัน (conjugate driving force) เช่น แรงขับดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าความเข้มข้นของสาร (concentration difference) หรือ ความแตกต่างของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเคมี (electrochemical potential gradient) ของสารถูกละลาย (Solute) และการนำพาของสารจะสิ้นสุดเมื่อถึงจุดสมดุลย์ โดยที่ความแตกต่างของแรงขับดันทั้งสองด้านของเยื่อเมมเบรนเป็นศูนย์

2.8.2.2 การนำพาสารแบบการแพร่ฟาซิลิเตต (facilitated diffusion) เป็นการนำพาสารโดยอาศัยตัวพาหะจำเพาะ (specific carrier) ซึ่งเป็นสารมหโมเลกุล (macro molecule) อยู่ที่เยื่อเมมเบรนจะทำหน้าที่คอยจับกับโมเลกุลของสารถูกละลาย เพื่อนำพาสารให้เคลื่อนที่ผ่านเยื่อเมมเบรนไปได้โดยอาศัยแรงขับดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของค่าความเข้มข้นของสารถูกละลายระหว่างเยื่อเมมเบรน โดยที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึมมาเกี่ยวข้องเช่นกัน ส่วนตัวพาหะที่นำพาสาร (membrane - bound carrier) ในกระบวนการแพร่ฟาซิลิเตตนี้จะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารเพียงเท่านั้น โดยไม่มีผลต่อสมดุลสุดท้ายที่จะเกิดขึ้นแต่อย่างใด

2.8.2.3 การนำพาสารแบบแอกทีฟ (Active transport) เป็นการนำพาสารโดยอาศัยตัวพาหะจำเพาะเช่นกัน แต่มีข้อแตกต่างคือต้องอาศัยพลังงานมาเกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นแรงขับดัน (nonconjugate driving force) โดยโมเลกุลของสารถูกละลายจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างที่มีการนำพาสารจากข้างหนึ่งของเยื่อเมมเบรนไปอีกข้างหนึ่ง ในกรณีนี้การเคลื่อนที่ของสารถูกละลายเนื่องจากต้องอาศัยแรงขับดันจากภายนอก จะมีผลทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ตรงข้ามกับการเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเคมี โดยที่สารจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง การเคลื่อนที่ของสารละลายเนื่องจากแรงขับจำเป็นต้องมีพลังงานมาควบคู่ (couple) ซึ่งได้จากกระบวนการที่มีการเปลี่ยนพลังงานออกมาโดยทั่วไป เรียกว่ากระบวนการขับ (drive process) การนำพาสารทางชีวภาพแบบกระบวนการแอกทีฟนี้ ส่วนมากมีการนำเอาพลังงานจำนวนมากนี้มาจากกระบวนการเมตาบอลิซึม ซึ่งได้แก่พลังงานควบคู่จากการหายใจหรือการหมัก แต่การนำเอาพลังงานควบคู่มาใช้นั้นไม่ได้เกิดจากการนำเอาพลังงานควบคู่มาใช้โดยตรง เช่น จากกระบวนการใช้ออกซิเจน (oxygen – consuming) หรือจากปฏิกิริยาไกโคไลติก (glycolytic) ตามลำดับ แต่จะมีขั้นตอนมัธยันตร์ (intermediate steps) อย่างมากมายที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านของพลังงาน ปฏิกิริยาหรือกระบวนการที่ให้พลังงานควบคู่เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารถูกละลาย โดยทั่วไปจะได้จากแหล่งพลังงานฟอสเฟต (energy - rich phosphate) ซึ่งเป็นแหล่งที่ให้พลังงานของกระบวนการเมตาบอลิซึม