บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 สาหร่ายและชนิดของสาหร่าย

สาหร่าย หมายถึง พืชชั้นต่ำที่มีโครงสร้างอย่างง่าย อาจประกอบด้วยเซลล์เดียว หรือหลายเซลล์ แต่การจัดเรียงตัวของเซลล์จะไม่ซับซ้อน ไม่มีโครงสร้างของท่อลำเลียง ระบบราก ลำต้น หรือใบที่แท้ โครงสร้างของสาหร่ายโดยรวม จะเรียกว่าทัลลัส (Thallus) (เนติ เงินแพทย์. 2555)

สาหร่ายถูกจัดไว้ใน 2 อาณาจักร คือ อาณาจักรโมเนอรา (Kingdom Monera) และอาณาจักร โปรติสตา (Kingdom Protista) เกณฑ์และลักษณะในการจัดจำแนกมีหลายแบบ ได้แก่ ชนิดของรงควัตถุ (Pigment) อาหารสะสม การเคลื่อนไหว องค์ประกอบของผนังเซลล์ และรายละเอียดเฉพาะอย่าง เช่น รูปร่างลักษณะ การแบ่งเซลล์ การจัดเรียงของไทลาคอยด์ในพลาสติก และการแบ่งนิวเคลียส (เนติ เงินแพทย์. 2555) สาหร่ายมีรูปร่างลักษณะหลายแบบแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสาหร่าย เช่น มีลักษณะเป็นเซลล์เดียวรูปร่างกลม หรือยาวรีเป็นสายยาวที่เกิดจากการเรียงตัวต่อกันของเซลล์เดียว หรือมีรูปทรงอื่น ๆ เช่น รูปตาข่าย รูปดาว ซึ่งเกิดจากการรวมกลุ่มกันของเซลล์หลายเซลล์

การจัดกลุ่มของสาหร่าย มี 2 แบบ คือ การจัดกลุ่มโดยอาศัยลักษณะรูปร่าง และการจัดกลุ่มตามขนาดและแหล่งน้ำที่พบหรืออาศัยอยู่ของสาหร่าย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

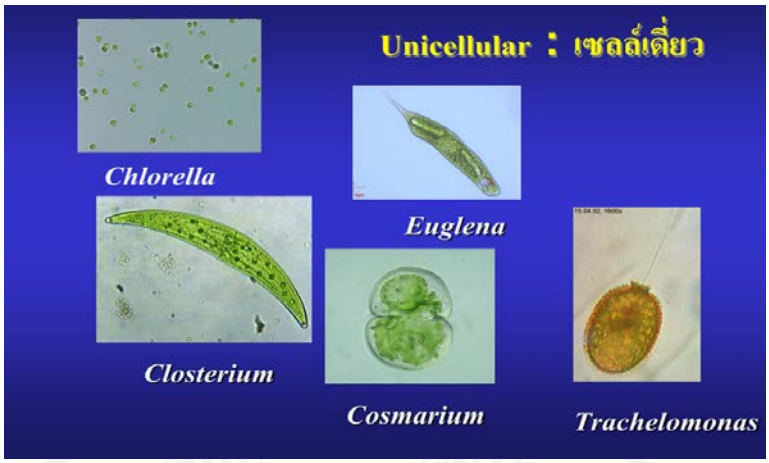
1) การจัดกลุ่มสาหร่ายโดยอาศัยลักษณะรูปร่าง สามารถแบ่งสาหร่ายออกเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้ (วันชัย พันธ์ทวี. 2546)

1.1) แบบเซลล์เดียว (Unicellular form) สาหร่ายที่อยู่ในกลุ่มนี้จะมีลักษณะเป็นเซลล์เดียวเคลื่อนที่ได้หรือไม่ได้ ส่วนใหญ่จะมีรูปร่างกลมรีหรือโค้งงอ ตัวอย่างสาหร่ายในกลุ่มนี้ได้แก่ *Chlorella*, *Chlamydomonas* เป็นต้น (ภาพที่ 1)

1.2) แบบกลุ่มเซลล์ (Colonial form) เกิดจากการรวมกลุ่มกันของเซลล์เดี่ยว ๆ ได้เป็นกลุ่มเซลล์ที่มีรูปร่างลักษณะเฉพาะ เช่น มีรูปร่างเป็นตาข่ายหรือร่างแห หรือเป็นกลุ่มเซลล์ที่มีรูปร่างทรงกลม การรวมกลุ่มกันของเซลล์เดี่ยวอาจรวมกันด้วยจำนวนที่แน่นอนหรือรวมกันด้วยจำนวนที่ไม่แน่นอน ตัวอย่างสาหร่ายในกลุ่มนี้ ได้แก่ *Coelastrum*, *Pediastrum*, *Scenedesmus* เป็นต้น (ภาพที่ 2)

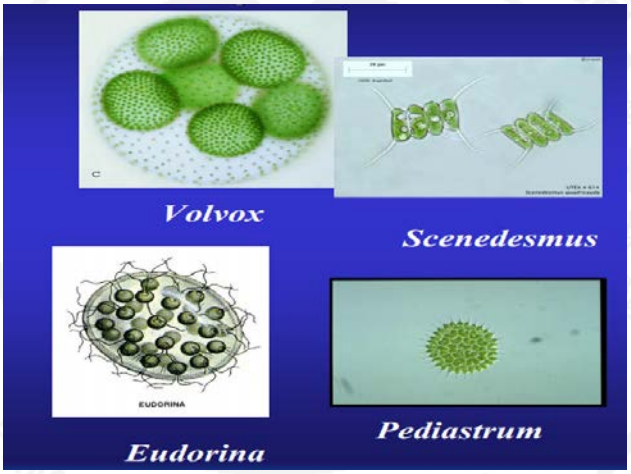
1.3) แบบเส้นสาย (Filamentous form หรือ Filament) สาหร่ายที่มีรูปร่างแบบนี้จะเกิดจากการเรียงต่อกันของเซลล์เดี่ยวๆ เกิดจากเซลล์มีการแบ่งตัวตามแนวขวางแล้วเซลล์ใหม่ที่ได้ไม่แยกออกจากกัน แต่ต่อกันเป็นเส้นสายยาว ซึ่งเส้นสายนี้อาจมีการแตกแขนงหรือไม่มีการแตกแขนงก็ได้ ตัวอย่างสาหร่ายในกลุ่มนี้ได้แก่ *Ulothrix*, *Oscillatoria* เป็นต้น (ภาพที่ 3)

ภาพที่ 1 สาหร่ายแบบเซลล์เดียว



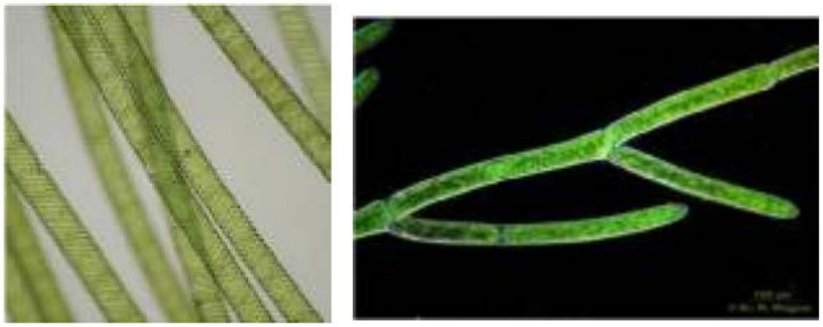
ที่มา: อภิญญา ปานโชติ. 2548 : 10.

ภาพที่ 2 สาหร่ายแบบกลุ่มเซลล์



ที่มา: อภิญญา ปานโชติ. 2548 : 11.

ภาพที่ 3 สาหร่ายแบบเส้นสาย



ที่มา: เนติ เงินแพทย์. 2555 : 6.

1.4) แบบหลอดหรือท่อ (Siphonous form) สาหร่ายกลุ่มนี้จะมีรูปร่างเป็นหลอดหรือท่อ ไม่มีผนังกั้น ภายในเซลล์เดียวกันมีหลายนิวเคลียส ตัวอย่างสาหร่ายในกลุ่มนี้ได้แก่ *Bryopsis* (ภาพที่ 4)

ภาพที่ 4 สาหร่ายแบบหลอดหรือท่อ

ที่มา: เนติ เงินแพทย์. 2555 : 7.

1.5) แบบพาเรนไคมา (Parenchymatous form) สาหร่ายกลุ่มนี้ทัลลัสประกอบด้วยเซลล์พาเรนไคมา ถ้าเซลล์พาเรนไคมามีการแบ่งเซลล์แบบ 2 ทิศทาง จะทำให้ทัลลัสมีลักษณะแบน แต่ถ้าเซลล์พาเรนไคมามีการแบ่งตัวมากกว่า 2 ทิศทาง จะทำให้ทัลลัสมีลักษณะเป็นท่อ ตัวอย่างสาหร่ายในกลุ่มนี้ได้แก่ *Enteromorpha*, *Ulv*a เป็นต้น (ภาพที่ 5)

ภาพที่ 5 สาหร่ายแบบพาเรนไคมา

ที่มา: เนติ เงินแพทย์. 2555 : 7.

2) การจัดกลุ่มของสาหร่ายตามขนาดและแหล่งน้ำที่พบหรืออาศัยอยู่ (อภิญญา ปานโชติ. 2548)

2.1) แบ่งตามขนาด ได้แก่

2.1.1) สาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) ประกอบด้วย เซลล์เพียงเซลล์เดียวหรือหลายเซลล์มีขนาดเล็กไม่เห็นได้ด้วยตาเปล่าต้องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ เช่น คลอเรลลา (*Chlorella*) คีโตเซอรอส (*Chaetoceros*)

2.1.2) สาหร่ายขนาดใหญ่ (Macroalgae) ประกอบด้วย เซลล์เดียวหรือหลายเซลล์เช่นกัน แต่มีขนาดใหญ่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น สาหร่ายทุ่น (*Sargassum*) สาหร่ายผมนาง (*Gracilaria*)

2.2) แบ่งตามแหล่งน้ำ ได้แก่

2.2.1) สาหร่ายน้ำจืด (Fresh- water algae) พบได้ในแหล่งน้ำจืดทั้งน้ำนิ่งและน้ำไหล

2.2.2) สาหร่ายทะเล (Seaweeds) ขึ้นได้ตั้งแต่ชายฝั่งที่น้ำสาดกระเซ็นถึงพบมากเขตน้ำขึ้นน้ำลง ไปจนถึงระดับที่แสงส่องถึง

2.3) แบ่งตามลักษณะการขึ้นในน้ำ

2.3.1) สาหร่ายพื้นท้องน้ำ (Benthic algae) พบขึ้นตามพื้นที่เป็นหิน ทรายหรือโคลน บางครั้งอาจหลุดจากที่หยุดเกาะลอยไปตามกระแสน้ำ

2.3.2) สาหร่ายอิงอาศัย (Epiphytic algae) พบอิงอาศัยบนพืช เช่น สาหร่ายทะเล และหญ้าทะเล

2.3.3) ล่องลอยในน้ำ (Planktonic algae) เป็นสาหร่ายขนาดเล็กที่ล่องลอยอยู่ในน้ำ ทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม

2.1.2 องค์ประกอบและหน้าที่ของสาหร่ายในระบบนิเวศ

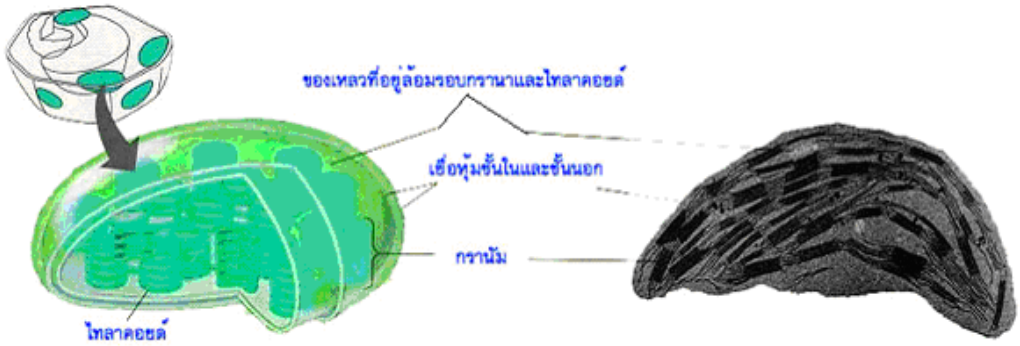
1) องค์ประกอบของเซลล์ของสาหร่าย

องค์ประกอบของเซลล์ของสาหร่ายที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง (ภาพที่ 6) ได้แก่ พลาสติด และรงควัตถุ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1) พลาสติด หรือโครมาโตฟอร์ (Chromatophore) พลาสติดเป็นโครงสร้างสำคัญที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง ภายในพลาสติดประกอบด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนแบบจานเรียกโครงสร้างนี้ว่า ไทลาคอยด์ (Thylakoids) ซึ่งไทลาคอยด์นี้ จะถูกล้อมรอบด้วยของเหลวที่เรียกว่า สโตรมา (Stroma) ภายในไทลาคอยด์จะประกอบด้วยรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง ดังนั้น ปฏิกิริยาการจับพลังงานแสงจึงเกิดขึ้นที่ไทลาคอยด์ ส่วนปฏิกิริยาการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดที่สโตรมา ไทลาคอยด์อาจอยู่เดี่ยว ๆ หรือจับกันเป็นกลุ่มขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย โดยพบว่าสาหร่ายในดิวิชั่น

Cyanophyta และ Rhodophyta ไทลาคอยด์ แต่ละอันจะอยู่อย่างอิสระไม่จับกับไทลาคอยด์อื่น ๆ ในขณะที่สาหร่ายในดิวิชั่นอื่น ๆ ไทลาคอยด์จะรวมตัวกันอยู่เป็นกลุ่มภายในพลาสติด โดยอาจจับกัน 2 หรือ 3 ไทลาคอยด์ขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย (Lee, R. E. 1989)

ภาพที่ 6 องค์ประกอบของเซลล์สาหร่าย



ที่มา: โรจน์รวี ชัยรัตน์. 2550 : ออนไลน์.

1.2) รงควัตถุ โดยรงควัตถุที่พบในสาหร่ายแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) แคโรทีนอยด์ (Carotenoid) และไฟโคบิลิน (Phycobilin) สาหร่ายแต่ละชนิดอาจมีรงควัตถุชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียว หรืออาจมี ทั้ง 3 ชนิดอยู่ภายในเซลล์ ซึ่งรงควัตถุแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป ดังนี้ (วันชัย พันธ์ทวี. 2546)

1.2.1) คลอโรฟิลล์ เป็นรงควัตถุสีเขียวเป็นส่วนสำคัญในการสังเคราะห์แสง สามารถดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินได้มากที่สุด แล้วสะท้อนแสงสีเขียวออกมา คลอโรฟิลล์ แบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ คลอโรฟิลล์-เอ บี ซี และดี (Chlorophyll-a, b, c, d) สาหร่ายทุกสายพันธุ์จะพบคลอโรฟิลล์-เอ เป็นองค์ประกอบอยู่เสมอ ในขณะที่คลอโรฟิลล์อื่น ๆ จะพบในสาหร่ายแต่ละชั้น (Class) แตกต่างกันไป ซึ่งชนิดของคลอโรฟิลล์ที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์นี้ได้ถูกนำมาใช้ในการจัดจำแนกชั้นของสาหร่ายด้วย คลอโรฟิลล์-เอ ถือเป็นรงควัตถุหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง เพราะสามารถจับพลังงานแสงและนำไปใช้ได้ด้วยตัวเอง ส่วนคลอโรฟิลล์อื่น ๆ ถือเป็นคลอโรฟิลล์ช่วย คือจะจับพลังงานแสงแล้วส่งต่อให้คลอโรฟิลล์-เอ นำไปใช้อีกทอดหนึ่ง คลอโรฟิลล์ทั้งหมดจะไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์

1.2.2) แคโรทีนอยด์ จัดเป็นรงควัตถุประกอบ (Accessory pigment) จะจับพลังงานแสง แล้วส่งต่อให้คลอโรฟิลล์นำไปใช้ แคโรทีนอยด์จะจับพลังงานแสงช่วงแสงสีน้ำเงินและสีเขียว (ช่วงความยาวคลื่น 400-550 นาโนเมตร) แล้วสะท้อนแสงสีเหลือง สีส้ม หรือสีแดงออกมา ทำให้มองเห็นแคโรทีนอยด์เป็นสีเหลืองหรือสีส้ม แคโรทีนอยด์จะอยู่ที่เยื่อคลอโรพลาส์ติดกับคลอโรฟิลล์ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แคโรทีน (Carotene) และแซนโธฟิลล์ (Xanthophyll) ดังนี้

(1) แคโรทีน เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ที่ไม่มีอะตอมของออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล เป็นสารสีส้มแบ่งออกได้ 3 ชนิดคือ แอลฟา-แคโรทีน (α- carotene), เบต้า-แคโรทีน (β- carotene) และซิกมา-แคโรทีน (δ-carotene) ในสาหร่ายทุกชนิดจะพบเบต้า-แคโรทีนเป็นองค์ประกอบอยู่เสมอ

(2) แซนโธฟิลล์ เป็นสารอนุพันธ์ของแคโรทีนที่มีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล โดยออกซิเจนที่เพิ่มเข้ามาจะอยู่ในรูปของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) แซนโธฟิลล์มีหลายชนิด ได้แก่ ลูเทอีน (Lutein) ฟูโคแซนทิน (Fuxanthin) และมิกโซแซนโทฟิลล์ (Myxoxanthophyll) เป็นต้น

(3) ไฟโคบิลิน (Phycobilin) เป็นรงควัตถุที่มีสีน้ำเงิน และสีแดง จะอยู่ร่วมกับโปรตีนเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า ไฟโคบิลิโปรตีน (Phycobiliprotein) ถือเป็นรงควัตถุประกอบเช่นเดียวกับแคโรทีนอยด์ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ไฟโคอิริทริน (Phycoerythrin) และไฟโคไซยานิน (Phycocyanin) ไฟโคอิริทริน จะดูดจับพลังงานแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 570-580 นาโนเมตร ส่วนไฟโคไซยานิน จะดูดจับพลังงานแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 625-630 นาโนเมตร (Madigan, M.T., Martinkoand, J.M. and Parker, J. 2000)

2) หน้าที่ของสาหร่ายในระบบนิเวศ

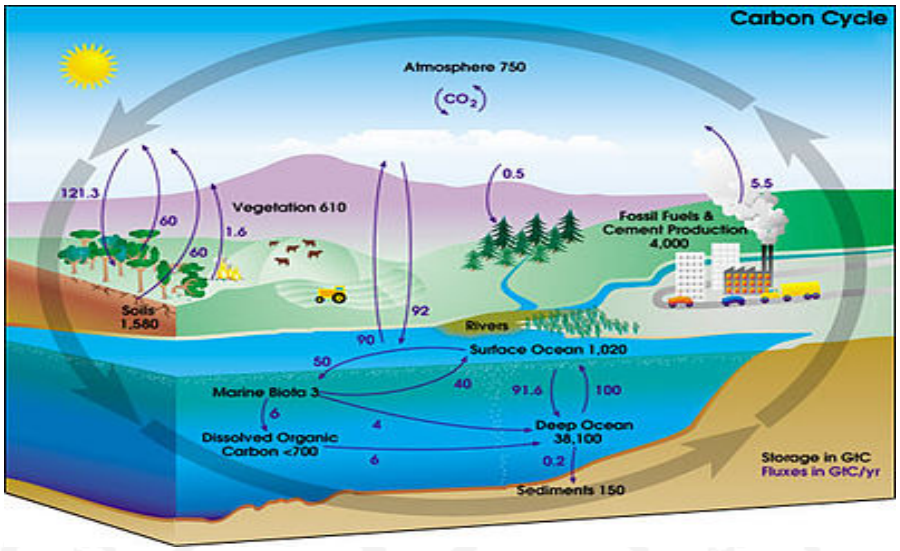
สาหร่ายมีหน้าที่ที่สำคัญในระบบนิเวศ โดยสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ซึ่งเป็นการหมุนเวียนคาร์บอนในระบบนิเวศตามวัฏจักรของคาร์บอน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศ ถูกนำเข้าสู่สิ่งมีชีวิตหรือออกจากสิ่งมีชีวิตคืนสู่บรรยากาศและน้ำ หมุนเวียนกันไปเช่นนี้ไม่มีที่สิ้นสุด โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในบรรยากาศและน้ำถูกนำเข้าสู่สิ่งมีชีวิต ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (CO_2) และถูกเปลี่ยนเป็นอินทรีย์สารที่มีพลังงานสะสมอยู่ ต่อมาอินทรีย์สารที่พืชสะสมไว้บางส่วนจะถูกถ่ายทอดไปยังผู้บริโภคในระบบต่าง ๆ โดยการกิน ซึ่งก๊าซ CO_2 ออกจากสิ่งมีชีวิต คืนสู่บรรยากาศและน้ำได้หลายทาง เช่น การหายใจของพืชและสัตว์ เพื่อให้ได้พลังงานออกมาใช้ ทำให้คาร์บอนที่อยู่ในรูปของอินทรีย์สาร ถูกปลดปล่อยออกมาเป็นอิสระในรูปของ CO_2 การย่อยสลายสิ่งขับถ่ายของสัตว์และซากพืชซากสัตว์ ทำให้คาร์บอนที่อยู่ในรูปของอาหาร ถูกปลดปล่อยออกมาเป็นอิสระในรูปของ CO_2 การเผาไหม้ของถ่านหิน น้ำมัน และคาร์บอเนต เกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์เป็นเวลานาน (ภาพที่ 7)

วัฏจักรของคาร์บอนสัมพันธ์กับวัฏจักรของน้ำ โดยความสมดุลของ CO_2 ในอากาศเกิดจากการแลกเปลี่ยนของ CO_2 ในอากาศกับน้ำ ถ้าในอากาศ CO_2 มากเกินไป ก็จะมีการละลายอยู่ในรูปของ H_2CO_3 (กรดคาร์บอนิก) ดังสมการต่อไปนี้

$$CO_2 + H_2O \longrightarrow H_2CO_3$$

ภาพที่ 7 วัฏจักรของคาร์บอน



ที่มา: Mackenzie, F.T. 1995 : ออนไลน์.

การหมุนเวียนของคาร์บอนในระบบนิเวศ แบ่งตามระยะเวลาที่ใช้ในการหมุนเวียนให้ครบรอบ คือ ระยะสั้น และระยะยาว ดังนี้

1) การหมุนเวียนระยะสั้น เป็นการหมุนเวียนของคาร์บอนในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงและการหายใจ เริ่มจากพืชตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศมาสังเคราะห์เป็นสารอินทรีย์ คาร์บอนจากบรรยากาศจึงเคลื่อนย้ายเข้าสู่พืช เกิดขึ้นได้ทั้งบนบกและในน้ำ ดังสมการ

$$6CO_2 + 6H_2O \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

ในการสังเคราะห์แสง พืชจะเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานเคมี บางส่วนถูกใช้ไป บางส่วนถูกเก็บสะสมในรูปคาร์โบไฮเดรต ซึ่งจะถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร คาร์บอนเหล่านี้จะกลับสู่บรรยากาศโดยการหายใจ และการย่อยสลายหลังจากสิ่งมีชีวิตตายลงไป การย่อยสลายนี้อาจจะได้คาร์บอนในรูปคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซมีเทน กลับคืนสู่บรรยากาศ

การย่อยสลายของจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้สองสภาวะ คือ สภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน ในสภาวะที่มีออกซิเจน คาร์บอนในสารอินทรีย์จะถูกปล่อยออกมาในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนในสภาวะไม่มีออกซิเจน คาร์บอนจะถูกปล่อยออกมาในรูปก๊าซมีเทน โดยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม Methanogen ก๊าซมีเทนจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์โดยแบคทีเรียกลุ่ม Methylotroph เช่น Methylomonas คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นรูปหนึ่งของคาร์บอนที่เกิดจาก

ปฏิกิริยาทางเคมีแสงของมีเทน หรือจากการเผาไหม้ของมวลชีวภาพ โดยปกติ คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นสารพิษต่อสิ่งมีชีวิต แต่ก็มีสิ่งมีชีวิตบางกลุ่มใช้คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแหล่งพลังงานได้ เช่น Pseudomonas carboxidoflava และ Pseudomonas carboxydohydrogena ซึ่งจะเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะที่มีออกซิเจน ส่วนในสภาวะไม่มีออกซิเจน Methanosarcina barkeri จะเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซมีเทน และ Clostridium thermoaceticum เปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นกรดน้ำส้ม

2) การหมุนเวียนระยะยาว เป็นการหมุนเวียนของคาร์บอนผ่านระบบโครงสร้างของโลกทั้งในแผ่นดิน มหาสมุทร และหินปูน องค์ประกอบสำคัญของหินปูน คือ แคลเซียมคาร์บอเนต หินปูนเป็นแหล่งสะสมคาร์บอนที่สำคัญของพื้นโลก การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศและการกัดเซาะจะชะแคลเซียม ซิลิกา และคาร์บอนออกจากหินปูน แสดงได้ดังสมการ

$$CaCO_3 + CO_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

$$CaSiO_3 + 2CO_2 + H_2O \longrightarrow 2HCO_3^- + SiO_2$$

สิ่งที่ได้จากการกัดเซาะจะลงสู่แม่น้ำและไปยังมหาสมุทร Ca^{2+} และ HCO_3^- บางส่วนจะถูกไปใช้ในการสร้างโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ เช่น เปลือกหอย บางส่วนกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กลับสู่บรรยากาศ เมื่อสิ่งมีชีวิตตาย จะถูกย่อยสลายได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำลึก ซึ่งจะกลับสู่บรรยากาศเมื่อน้ำในบริเวณนั้นม้วนตัวขึ้นมา (Mackenzie, F.T. 1995)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์แสงของพืช ได้แก่ ความเข้มแสง ปริมาณก๊าซ CO_2 ในอากาศ อุณหภูมิ น้ำและความชื้น และปัจจัยทางสรีรวิทยาของพืชเอง เช่น ความสมบูรณ์ของพืช ปริมาณธาตุอาหารที่พืชได้รับ ซึ่งใบพืชสามารถปรับตัวให้เหมาะสมกับสภาพปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ เช่น ในใบพืชที่อยู่ในที่ร่ม จะได้รับแสงน้อย จึงมีใบที่บางและสามารถสังเคราะห์แสงในสภาพแสงน้อยได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าใบพืชที่อยู่ในกลางแจ้ง และใบพืชบางชนิด เช่น ฝ้าย สามารถบิดหมุนเข้าหาแสงเพื่อให้รับแสงได้ดีขึ้น (รวี เสรษฐภักดี และคณะ. 2537)

นอกจากนี้ สาหร่ายซึ่งดำรงชีวิตแบบออโตโทรฟิค (Autotrophic organism) ยังมีความสำคัญในระบบนิเวศ โดยการผลิตออกซิเจนให้แก่ระบบนิเวศทั้งบนบกและในน้ำ ซึ่งโดยประมาณ 50% ของออกซิเจนในน้ำ เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยสาหร่าย นอกจากนี้ สาหร่ายยังเป็นผู้ผลิต (Producer) และเป็นส่วนหนึ่งของห่วงโซ่อาหารขั้นต้นของสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยเป็นอาหารของตัวอ่อนแมลง กุ้ง หรือปลา เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลผลิต (Productivity) จากทะเล แม่น้ำ ลำคลอง และทะเลสาบทั่วไป จะมีมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณแพลงก์ตอนพืชที่อยู่ในแหล่งน้ำนั้น ๆ

โดยหากมีแพลงก์ตอนพืชมากก็มักจะมีสิ่งมีชีวิตในน้ำ เช่น ปู กุ้ง ปลา มากตามไปด้วย (ประยูร เอ็นมาก. 2553)

2.1.3 สาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae)

สาหร่ายขนาดเล็กเป็นพืชชั้นต่ำชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากพืชชั้นสูงทั่วไป คือ มีโครงสร้างเซลล์เพียงเซลล์เดียวหรือหลายเซลล์ มีขนาดเล็กไม่เห็นได้ด้วยตาเปล่า มีความต้องการปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและสารอาหารต่าง ๆ ที่ไม่ซับซ้อน มีกลไกการสังเคราะห์แสงเช่นเดียวกับพืชชั้นสูง ทำให้สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้เร็ว และสามารถผลิตลิพิดได้ในปริมาณสูง โดยสายพันธุ์ของสาหร่ายขนาดเล็ก ได้แก่ คลอเรลลา (*Chlorella*) คีโตเซอรอส (*Chaetoceros*) เป็นต้น

ในการเพาะเลี้ยงเพื่อเพิ่มผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็ก มีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องสรุปได้ดังนี้

1) อาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง

อาหารที่ใช้ในการเลี้ยงสาหร่าย มี 2 ชนิด คือ อาหารเหลว (Liquid media) อาหารแข็งหรืออาหารวุ้น (Solid or agar media) นอกจากนี้ ยังมีอาหารลักษณะอื่น ๆ ได้แก่ อาหารกึ่งแข็งกึ่งเหลว อาหารที่ใช้เพาะเชื้อสาหร่ายแล้วเห็นความแตกต่างของเชื้อ อาหารที่คัดเลือกชนิดสาหร่าย อาหารที่ส่งเสริมหรือเกื้อหนุนให้สาหร่ายบางชนิด อาหารที่นำมาจากธรรมชาติโดยไม่รู้สัดส่วนที่แน่นอน และอาหารสังเคราะห์ที่ทราบชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่แน่นอน (เนติ เงินแพทย์. 2555)

ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1.1) ธาตุอาหารหลัก (Macronutrient) ประกอบด้วย ธาตุอาหารที่สาหร่ายต้องการใช้ในปริมาณมากเพื่อการเจริญเติบโต ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ โซเดียม โปแตสเซียม แมกนีเซียมและแคลเซียม

1.2) ธาตุอาหารรอง (Micronutrient หรือ Trace metals) ประกอบด้วยธาตุอาหารที่สาหร่ายต้องการใช้ในปริมาณค่อนข้างน้อย ซึ่งเมื่อเติมลงในอาหารจะช่วยให้สาหร่ายเจริญเติบโตดีขึ้น แต่ถ้าไม่มีการเติมลงไปในอาหาร การเจริญเติบโตของสาหร่ายจะช้าลงกว่าเล็กน้อย โดยปกติสูตรอาหารที่ดีและเหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายควรประกอบด้วยธาตุอาหารทั้ง 2 ประเภท

2) การเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก

หลังจากที่สาหร่ายขนาดเล็กมีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์แล้ว อัตราการเจริญเติบโตจะลดลงและกลายเป็นศูนย์ในที่สุด เนื่องจากความเข้มข้นของของเสียที่ปล่อยออกมา หรือเนื่องจากภาวะการขาดแคลนอาหาร หรือความหนาแน่นของมวลสาหร่ายที่สูงเกินไป ซึ่งการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก สามารถแบ่งออกเป็น 6 ช่วง ดังต่อไปนี้ (สุจยา ฤทธิศร. 2551)

2.1) Lag phase เป็นช่วงที่สาหร่ายมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ ระยะนี้ไม่มีการเพิ่มจำนวนเซลล์

2.2) Acceleration phase ระยะนี้มวลสาหร่ายมีการเปลี่ยนแปลงเป็นลำดับขั้น ดังนี้ RNA มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ต่อมาโปรตีนและน้ำหนักแห้งจะเพิ่มมากขึ้นมาตามลำดับ และขั้นสุดท้ายจึงมีการเพิ่มจำนวนเซลล์

2.3) Logarithmic phase ช่วงนี้สาหร่ายมีการแบ่งเซลล์และเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว มีอัตราเมตร

2.4) Deceleration phase สาหร่ายเริ่มมีอัตราการเจริญเติบโตลดลง เนื่องจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการบังแสงซึ่งกันและกัน ทำให้อัตราการสังเคราะห์ลดลง มีผลให้การเจริญเติบโตลดลงด้วย

2.5) Stationary phase ระยะนี้มวลหรือจำนวนสาหร่ายมีปริมาณคงที่ แต่องค์ประกอบในเซลล์บางอย่างมีการเปลี่ยนแปลง ช่วงการเจริญนี้จะเกิดการขาดแคลนแร่ธาตุที่สำคัญหรือมีความเข้มข้นของของเสียมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง รวมถึงการแบ่งแสงที่เกิดจากความหนาแน่นของสาหร่ายที่เพิ่มมากขึ้น ปัจจัยเหล่านี้ทำให้สาหร่ายเกิดภาวะขาดแคลน และใช้อาหารที่สะสมไว้ในเซลล์

2.6) Death phase ในระยะสุดท้ายมวลสาหร่ายจะเริ่มลดลง เนื่องจากอัตราส่วนของการหายใจต่อการสังเคราะห์แสงเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่าหนึ่ง หรือเนื่องจากมีการตายของเซลล์สาหร่าย

3) วิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก

วิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก แบ่งออกได้ 3 รูปแบบ คือ

3.1) การเพาะเลี้ยงแบบเก็บเกี่ยวครั้งเดียว (Batch culture)

3.2) การเพาะเลี้ยงแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous culture)

3.3) การเพาะเลี้ยงแบบต่อเนื่อง (Continuous culture)

ทั้งนี้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายทั้ง 3 รูปแบบ มีความเชื่อมโยงกันเนื่องจากสรีรวิทยาการเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กในสภาพแวดล้อมทั้งทางกายภาพและเคมี ไม่มีความแตกต่างกัน และการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบต่อเนื่อง ก็ต้องการข้อมูลเบื้องต้น โดยเฉพาะอัตราการเติบโตจำเพาะมาจากการเลี้ยงแบบเก็บเกี่ยวครั้งเดียว เพื่อใช้ในการจัดสภาวะการเลี้ยงและอัตราการเจือจางที่เหมาะสม จึงจะทำให้การเพาะเลี้ยงได้ผลตามเป้าหมายที่วางไว้

4) ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็ก

4.1) ปัจจัยทางฟิสิกส์ ได้แก่

4.1.1) แสงสว่าง (Illumination) แหล่งที่มาของแสง เช่น แสงอาทิตย์และหลอดฟลูออเรสเซนต์ ความเข้มของแสงที่เหมาะสม คือ ห้องปฏิบัติการเท่ากับ 3,000-5,000 ลักซ์ ส่วนบ่อเพาะขยายเท่ากับ 10,000-70,000 ลักซ์ ช่วงเวลาการให้แสงควรเป็น 12 ชั่วโมงสว่างต่อ 12 ชั่วโมงมืด

4.1.2) อุณหภูมิ (Temperature) ของน้ำและอากาศที่เหมาะสม คือ 28-30 องศาเซลเซียส

4.1.3) ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) สาหร่ายแต่ละชนิดต้องการ pH ต่างกัน เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ชอบ pH 6.5-7.5 และสาหร่ายสีเขียว ชอบ pH 5.5-6.5 แต่โดยทั่วไปสาหร่ายเจริญเติบโตดีในน้ำที่มีสภาพเป็นด่างอ่อน ๆ

4.1.4) ความเค็ม (Salinity) มีความสำคัญต่อสาหร่ายทะเล สาหร่ายแต่ละชนิดชอบความเค็มแตกต่างกัน เช่น *Chaetoceros* อยู่ในช่วง 28-32 ppt, *Thalassiosira* อยู่ในช่วง 25 ppt และ *Dunaliella* ทนความเค็มสูง ๆ ได้ดี เป็นต้น

4.2) ปัจจัยทางเคมี ได้แก่ อาหารหรือธาตุอาหาร ซึ่งจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มธาตุอาหารหลัก (Macronutrient) และกลุ่มธาตุอาหารรอง (Micronutrient)

2.1.4 การใช้ประโยชน์สาหร่ายขนาดเล็กในรูปแบบต่าง ๆ

สาหร่ายโดยเฉพาะสาหร่ายขนาดเล็กมีความสำคัญในระบบนิเวศและเกี่ยวข้องกับมนุษย์โดยการนำสาหร่ายมาประโยชน์ด้านต่าง ๆ ในปัจจุบัน สรุปได้ดังนี้

1) ใช้เป็นอาหารของมนุษย์

ชาวชนบทในภาคเหนือและภาคอีสานของประเทศมีการนำสาหร่ายสีเขียว ที่เรียกว่า เทาน้ำ หรือ เทา (Spirogyra) และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่เรียกว่า ดอกหิน (Nostoc) มาทำเป็นอาหาร ในขณะที่ประเทศญี่ปุ่นนิยมนำสาหร่าย Porphyra หรือนอริ ซึ่งเป็นสาหร่ายสีแดงมารับประทาน จนปัจจุบันนี้ความนิยมในการบริโภคสาหร่ายนี้ได้แพร่หลายไปในหลายประเทศ จนต้องมีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายนี้ เพื่อเป็นการค้าในประเทศญี่ปุ่นและจีน (วันชัย พันธ์ทวี. 2546)

2) ใช้เป็นอาหารของสัตว์น้ำวัยอ่อน

ในระบบนิเวศน์ตามธรรมชาติสาหร่าย จัดเป็นผู้ผลิตเริ่มต้นของห่วงโซ่อาหาร เมื่อมีการนำสัตว์น้ำเหล่านี้มาเพาะเลี้ยงในเชิงการค้า จึงส่งผลให้มีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อเป็นอาหารของสัตว์น้ำด้วย เช่น อาหารของลูกปลา อาหารของลูกกุ้ง อาหารของสัตว์ปีก เป็นต้น

3) ใช้ผลิตพลังงานทดแทน

สาหร่ายขนาดเล็กสามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานมีหลายประการด้วยกัน เริ่มจากเซลล์ของสาหร่ายเหล่านี้มีกรดไขมันค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับพืชอื่น ๆ โดยทั่วไปจะมีราว 20% แต่บางชนิดอาจมีถึง 60-70% ถ้าสามารถเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเหล่านี้ได้เป็นปริมาณมาก ๆ แล้วนำมาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า เอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ในที่สุดจะได้ไบโอดีเซล

4) ใช้ในการดูดซับก๊าซเรือนกระจก

โดยสาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) ดำรงชีวิตอยู่ได้ด้วยการสังเคราะห์แสงโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นวัตถุดิบ ผลลัพธ์ที่ได้ คือ น้ำตาลซึ่งเป็นอาหารของพืชและก๊าซ

ออกซิเจน สาหร่ายเหล่านี้ช่วยลดก๊าซเรือนกระจก เพราะดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ให้ก๊าซออกซิเจนแก่แหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

5) ใช้ในการกำจัดน้ำเสีย

การใช้สาหร่ายในการกำจัดน้ำเสียร่วมกับแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียจะทำการย่อยสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน ให้เป็นสารประกอบอนินทรีย์ เช่น แอมโมเนียม ไนเตรต คาร์บอนไดออกไซด์ และเกลือแร่ต่างๆ ในสภาพการเกิดที่มีอากาศ (Aerobic) หรือไม่มีอากาศ (Anaerobic) จากนั้นสาหร่ายจะใช้สารประกอบเหล่านี้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมต่าง ๆ

6) ใช้ในทางการเกษตร

ในทางการเกษตร มีการใช้สาหร่ายเพื่อผลิตเป็นปุ๋ยชีวภาพ (Biofertilizers) เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช โดยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่สามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนจากอากาศแล้วเปลี่ยนเป็นสารประกอบไนโตรเจนอื่น ๆ ที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ เช่น Nostoc, Anabaena, Scytonema เป็นต้น นอกจากนี้ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิดมีเมือกหนาหุ้มเซลล์จึงเหมาะที่จะใช้เป็นวัสดุในการปรับปรุงคุณภาพดิน และดูดเก็บความชื้นให้แก่พืช

7) ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

สาหร่ายประกอบด้วยสารเคมีบางชนิดที่ช่วยในการรักษาผิวหนัง ชนเผ่า Kanembu ที่อยู่รอบทะเลสาบชาด ได้ใช้สาหร่ายเกลียวทองรักษาโรคผิวหนังบางชนิด การศึกษาในประเทศญี่ปุ่นพบว่า เครื่องสำอางที่ผสมสาหร่ายและสารสกัดจากสาหร่ายเกลียวทอง ช่วยให้ผิวพรรณดีขึ้นและลดริ้วรอย ส่วนในประเทศไทยก็ได้มีบริษัทหลายแห่งที่ใช้สาหร่ายเกลียวทองเป็นเครื่องสำอางในรูปครีมบำรุงผิว

8) ใช้ในอุตสาหกรรมยา

นักวิทยาศาสตร์และนายแพทย์หลายท่านได้ทดลองใช้สาหร่ายเกลียวทองในการป้องกันและรักษาโรคต่าง ๆ เช่น โรคเบาหวาน โรคกระเพาะ อีกทั้งยังช่วยลดความเครียดและความไม่สมดุลในร่างกาย ในประเทศฝรั่งเศสได้ทดลองใช้ยาที่ผสมสาหร่ายเกลียวทองทาแผล ทำให้แผลแห้งเร็วขึ้น ธาตุแมกนีเซียมในคลอโรฟิลล์ยังมีบทบาทอย่างสำคัญในการรักษาบาดแผล มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อป้องกันการเกิดของแบคทีเรียและช่วยสร้างเซลล์ขึ้นมาใหม่ด้วย คลอโรฟิลล์ในสาหร่ายมีโครงสร้างเหมือนสารสีแดงในเลือด (Hemo-globin) นักวิทยาศาสตร์จึงแนะนำให้ใช้คลอโรฟิลล์รักษาโรคโลหิตจาง นอกจากนี้สาหร่ายบางชนิดสารปฏิชีวนะซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวงการแพทย์ ได้แก่ Cyanophycin หรือ Marinamycin ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคต่าง ๆ ได้ สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว Scytonema No.11 เป็นสาหร่ายที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

แห่งประเทศไทย แยกได้จากดินนาจังหวัดพิษณุโลก พบว่า สามารถผลิตสารปฏิชีวนะ Cyanobacterin ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นทั้ง Algicide และ Bacteriocide ที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายและแบคทีเรียบางชนิดได้

9) ใช้ดูดซับขจัดสีย้อมในอุตสาหกรรม

สาหร่ายน้ำจืดสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ เพื่อขจัดสีย้อมจากสารละลายและเป็นประโยชน์ต่อการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก และการประยุกต์ใช้สาหร่ายขนาดเล็กเพื่อการใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะการนำมาใช้บำบัดน้ำเสีย สามารถสรุปข้อมูลที่สำคัญเพื่อใช้สำหรับการกำหนดกรอบแนวคิดการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วย ชนิดของสาหร่ายขนาดเล็กที่มีการนำมาใช้ทดลองบำบัดน้ำเสีย สภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง ปริมาณผลผลิต ชีวมวล และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายขนาดเล็ก รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปข้อมูลจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในครั้งนี้

ชนิดของสาหร่ายขนาดเล็ก	สภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง			ปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็ก	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายขนาดเล็ก (ร้อยละ)			ที่มา
					สารอินทรีย์	สารอาหาร		
	อาหารที่ใช้เพาะเลี้ยง	ปริมาณแสงสว่าง (ลักซ์)	อุณหภูมิ (^{o}C)		ซีโอดี	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	
Chlorella sp., *Haematococcus* sp., *Aphanothece saxicola*	สูตร Allen`s, BG-11 NSIII	-	-	*Chlorella* sp. ผลิตแคโรทีนอยด์สูงสุด 1,613.68 µg/ml, Aphanotheca saxicola ผลิตโปรตีนได้ 799.62 µg/ml	-	-	-	พัชรี หลุ่งหม่าน, นฤมล อัศวเกศมณี และเสาวนิตย์ ชอบบุญ (2551)
Haematococcus pluvialis	Basal Medium	30 $\mu Em^{-2}s^{-1}$	20	ได้จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น $3.6x10^{5}$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร	-	-	-	ณัฏฐวี ธรรมเจษฎา (2543)
ไซยาโนแบคทีเรียทุกสกุล	สูตร BG-11	150 เทียบกับ 300 ไมโครโมลโฟตอนต่อตารางเมตรต่อวินาที	25	ดูดซับตะกั่วได้ 82.56 ± 6.70 มิลลิกรัมต่อกรัม	กำจัดตะกั่วในน้ำเสีย	-	-	สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ (2552)
Spirulina platensis	$NaHCO_3$ 8.5 g/l K_2HPO_4 0.5g/l $NaNO_3$ 1.5 g/l และปุ๋ย NPK 16:16:16	ในห้องปฏิบัติการ / กลางแจ้ง	-	-	86.03	52.74	52.55	สุจยา ฤทธิศร (2551)

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดของสาหร่ายขนาดเล็ก	สภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง			ปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็ก	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายขนาดเล็ก (ร้อยละ)			ที่มา
					สารอินทรีย์	สารอาหาร		
	อาหารที่ใช้เพาะเลี้ยง	ปริมาณแสงสว่าง (ลักซ์)	อุณหภูมิ (^{o}C)		ซีโอดี	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	
Spirulina platensis	น้ำทิ้งจากบ่อหมักก๊าซชีวภาพมูลสุกร	กลางแจ้ง		Biomass 0.05-0.32 g/l	90.90	99.90	58.38	จงกล พรมยะ (2543)
Spirulina platensis	น้ำเสียจากบ่อบำบัดหอพักนักศึกษา ม.แม่โจ้	ตามธรรมชาติ	28.10 ± 1.52	Biomass 1.03± 0.08 g/l (น้ำหนักแห้ง)	เพิ่มขึ้น 23.36%, 31.88%, 10.45%	ลดลง 48.44%, 53.51%, 68.48%	ลดลง 36.07%, 50.00%, 39.22%	จงกล พรมยะ, เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน และสุฤทธิ์ สมบูรณ์ชัย (2544)
Spirulina platensis	Zarrouk	ห้องปฏิบัติการ/กลางแจ้ง		1083x10^{2} เซลล์/มิลลิลิตร และ 1007x10^{2} เซลล์/มิลลิลิตร	บำบัด BOD ได้ 89.58 และ 66.67	-	-	สมเกียรติ สุวรรณคีรี (2542)
Chlorella sp.	สูตร N-8 กับ NKP สูตร 15-15-15	4,000 ลักซ์		84,132 เซลล์/ลูกบาศก์มิลลิเมตร	-	-	-	วาสนา ทับทองดี และวิชชุดา ภักดีเจริญ (2545)
Spirulina platensis	Zarrouk	กลางแจ้ง	26.06, 26.13, 26.13	-	54.86	74.57	68.35	กรรณิการ์ ดิษยวงศ์ (2538)

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดของสาหร่ายขนาดเล็ก	สภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง			ปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็ก	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายขนาดเล็ก (ร้อยละ)			ที่มา
					สารอินทรีย์	สารอาหาร		
	อาหารที่ใช้เพาะเลี้ยง	ปริมาณแสงสว่าง (ลักซ์)	อุณหภูมิ (°C)		ซีโอดี	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	
Spirulina sp.	Zarrouk	หลอดเดย์ไลท์ 40 วัตต์	ห้องปฏิบัติการ	อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 0.285 วัน$^{-1}$	-	-	-	ไพรินทร์ กปิลานนท์ และคณะ (2538)
Chlorella sp.	สูตร NS III	ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์	30	สัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตเท่ากับ 1.90±0.29 ต่อวัน	-	-	-	สมรลักษณ์ แจ่มแจ้ง (2542)
Scenedesmus sp., Chlorella sp., Algal isolate	สูตรพื้นฐาน	15 กิโลลักซ์	30	7.90, 7.42 และ 3.77 กรัมต่อลิตร	-	-	-	สมฤทัย สิงหสุวรรณ และคณะ (2552)
Chlorell sp., Chlorell protothecoides	สูตรเบซอล	15 กิโลลักซ์	30	อัตราการผลิตไขมันเชิงปริมาตรเท่ากับ 2.75 และ 3.21 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง	-	-	-	สมฤทัย สิงหสุวรรณ (2553)
Chlorella vulgaris	Bold`s Basal	ตามธรรมชาติ	ตามธรรมชาติ	2.125x10^{8} เซลล์ต่อมิลลิลิตร	-	-	-	พนิดา รัตนพลที (2552)
Chlorella vulgaris	น้ำจากระบบ C.C.C.	-	-	ปริมาณเซลล์สูงสุดที่ 124 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร	-	-	-	วีระยุทธ รักษาศักดิ์ และคณะ (2555)

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดของสาหร่ายขนาดเล็ก	สภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง			ปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็ก	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายขนาดเล็ก (ร้อยละ)			ที่มา
	อาหารที่ใช้เพาะเลี้ยง	ปริมาณแสงสว่าง (ลักซ์)	อุณหภูมิ (^{o}C)		สารอินทรีย์	สารอาหาร		
					ซีโอดี	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	
Spirulina spp.	น้ำเสียจากโรงงานผักดอง	2,200	ห้องปฏิบัติการ	-	ลดค่าBOD ได้เท่ากับร้อยละ 92.16	ร้อยละ 76.18	ร้อยละ 53.79	วิไลรัตน์ เจริญใหม่รุ่งเรือง (2541)
Spirulina platensis	อาหารสูตร Zarrouk น้ำเสียกระบวนหมักดองผัก	-	ห้องปฏิบัติการทดลองกลางแจ้ง	ผลผลิตสาหร่าย 2.41×10^{5} เซลล์ต่อมิลลิลิตร	ลดค่า COD ร้อยละ 88.20 ลดค่า BOD ร้อยละ 82.46	65.38	65.81	รอยพิมพ์ อินต๊ะยศ (2549)
สาหร่ายขนาดเล็กสีเขียวสายพันธุ์ Botryococcus 4 ไอโซเลต	modified Chu 13	33 µmol. photon. $m^{-2}s^{-1}$	25	อัตราการเจริญเติบโตเร็วที่สุด 0.223 ต่อวัน	-	สายพันธุ์ TRG ลดไนเตรตได้ร้อยละ 82	-	เบญจมาส เชียรศิลป์ และจิตตรา ยี่แสง (2554)
Spirulina platensis	อาหารซารุกค์เติมน้ำทิ้ง 5 ระดับ	2,200	25±1	-	-	จาก 19.20 mg/L ลดลงเป็น 11.75 mg/L	จาก 79.10 mg/L ลดลงเป็น 21.50 mg/L	ศิรินภา พงษ์พีระ และสุมนทิพย์ บุนนาค (2552)

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดของสาหร่ายขนาดเล็ก	สภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง			ปริมาณผลผลิตชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็ก	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของสาหร่ายขนาดเล็ก (ร้อยละ)			ที่มา
	อาหารที่ใช้เพาะเลี้ยง	ปริมาณแสงสว่าง (ลักซ์)	อุณหภูมิ (^{o}C)		สารอินทรีย์	สารอาหาร		
					ซีโอดี	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	
Phormidium sp. *Spirulina platensis*	สูตรBG-11 สูตร Zarrouk	1,100	25	-	ลดค่าCOD ร้อยละ 92.8 ลดค่า BOD ร้อยละ 92.8	-	-	สามารถ พึ่งเจริญ (2550)
Chlorophyceae และ *Cyanobacteria*	น้ำทิ้งจากถังปฏิกรณ์เมมเบรนแบบไร้อากาศ	159 ± 39, 209 ± 43 และ 143 ± 30 μE $m^{-2}s^{-1}$	28–32	ผลผลิตชีวมวล 234 $mgl^{-1}d^{-1}$	-	67.2% (NH_4^+-N)	97.8% (PO_4^{3-}-P)	Ruiz-Martinez, A. et al. (2012)
Neochloris oleoabundans, *Chlorella vulgaris,* *Scenedesmus obliquus*	BG-11 ของเสียจากการเกษตรและปศุสัตว์	200 μmol $m^{-2}s^{-1}$	25 ± 2	ผลผลิตชีวมวล 0.15 g L^{-1}	-	99.9% 99.9% 92.4%	96.4% 95.7% 94.4%	Franchino, M. et al. (2013)

2.3 กรอบแนวคิดการวิจัย

แผนภูมิที่ 1 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย