

บทที่ 2

ทฤษฎี และสรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

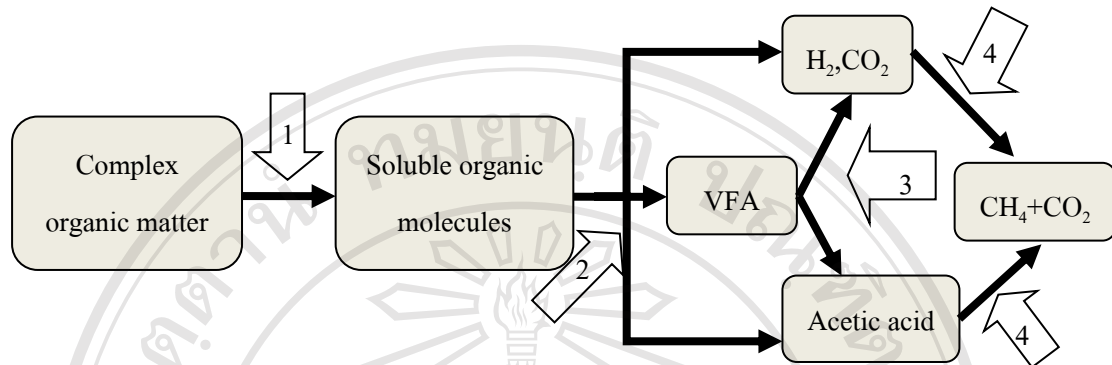
2.1 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพเกิดจากการหมักย่อยของเสียโดยจุลินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ ของเสียเหล่านี้ได้แก่ ของเสียจากการปศุสัตว์หรือของเสียจากภาคอุตสาหกรรมเกษตร เช่น มูลสัตว์ เศษซากพืช ผักและผลไม้ ปัจจุบันประเทศไทยอาจยังมีการกำจัดของเสียที่ไม่ถูกวิธีและมีการใช้ประโยชน์จากของเสียเหล่านี้น้อยมาก หากมีการปล่อยทิ้งของเสียดังกล่าวลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ อาจทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม แม่น้ำลำธารเน่าเสีย ในขณะที่การแก้ปัญหาน้ำเสียมักจะเป็นการแก้ที่ปลายเหตุ นิยมบำบัดโดยใช้วิธีการเติมอากาศซึ่งเป็นวิธีที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจึงทำให้สิ้นเปลือง ดังนั้นการนำของเสียจากภาคการเกษตรไปบำบัดด้วยกระบวนการหมักย่อยแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งทำให้ได้ก๊าซชีวภาพเป็นพลังงาน และมีประโยชน์ในการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น ลดกลิ่นเหม็น ลดภาวะโลกร้อน และยังได้ปุ๋ยชีวภาพไปใช้ในการเกษตรอีกด้วย สำหรับก๊าซชีวภาพที่ผ่านกระบวนการหมักย่อยแบบไม่ใช้อากาศจากของเสียภาคการเกษตร จะมีความเข้มข้นขององค์ประกอบแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ความเข้มข้นขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (Electrigaz Technologies, 2008)

องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ	ความเข้มข้นในก๊าซชีวภาพ
ก๊าซมีเทน	50 – 80 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	20 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ก๊าซแอมโมเนีย	0 – 300 ล้านต่อล้านส่วน
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	50 – 5000 ล้านต่อล้านส่วน
ก๊าซไนโตรเจน	1 – 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ก๊าซออกซิเจน	< 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ความชื้น	อิมตัว 2 – 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ก๊าซชีวภาพเกิดจากจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน หลักการของกระบวนการนี้คือ การย่อยสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ โดยแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังแสดงตามแผนผังในรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูป 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (สุบัตจิต นิมรัตน์, 2548)

จากรูปที่ 2.1 สามารถแสดงรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สารอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่ (เศษพืชเนื้อสัตว์ มูลสัตว์) ที่มีองค์ประกอบสำคัญคือ คาร์โบไฮเดรต ไขมันและโปรตีนจะถูกแบคทีเรียย่อยสลายโดยปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์ (extracellular enzyme) เพื่อช่วยละลายโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ซับซ้อนให้เล็กลงกลายเป็น โมเลกุลเชิงเดี่ยว (monomer) เช่น การย่อยสลายแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคส การย่อยสลายไขมันเป็นกรดไขมัน และการย่อยโปรตีนเป็นกรดอะมิโน ในการย่อยสลายโดยใช้แบคทีเรียหลายชนิดร่วมกันพบว่าให้ได้ผลดีมากกว่าการย่อยสลายโดยแบคทีเรียชนิดเดียว

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการแอซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) การย่อยสลายในขั้นตอนนี้ จะใช้สารที่ได้จากการย่อยสลายในขั้นตอนแรกเป็นสารตั้งต้น จากนั้นแบคทีเรียประเภทสร้างกรดจะเปลี่ยนสารอาหารดังกล่าวให้เป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) ปกติจะพบว่าสัดส่วนของกรดอะซิติกมีค่าสูงสุดและเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในขั้นตอนนี้ด้วยแบคทีเรียสร้างกรดซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตสูง และทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี เป็นผลสืบเนื่องมาจากการอยู่ร่วมกันของแบคทีเรียหลายสปีชีส์ (Species)

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) ซึ่งเป็นผลจากแบคทีเรียที่สร้างมีเทน ต้องการสารอาหารโดยเฉพาะสูง สารอาหารที่แบคทีเรียสร้างแล้วสามารถนำไปใช้ประโยชน์

ได้ ประกอบด้วย กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก และไฮโดรเจน แต่ไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนอะตอมเกินกว่า 2 อะตอม เช่น กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก เป็นสารอาหารในการผลิตก๊าซมีเทนโดยตรงได้ ดังนั้นในกรณีที่กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) ที่สร้างขึ้น ยังอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม แบคทีเรียสร้างมีเทนจะไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบ เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการดำรงชีพของแบคทีเรีย จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการย่อยสลายกรดอินทรีย์เหล่านั้นให้มีอะตอมของคาร์บอนที่ลดลงเพื่อให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินต่อไปได้ แบคทีเรียกลุ่มหนึ่งที่สามารถย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอมให้เป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีคาร์บอนอะตอม 1 ถึง 2 อะตอม และเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญ

ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการเมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis) ซึ่งแบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทน (Methane Forming Bacteria) จะเปลี่ยนกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรดไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยก๊าซมีเทนเกิดได้ 2 แบบ แบบแรกเกิดจากการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนนี้จะมีปริมาณเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ ส่วนอีกแบบหนึ่งเกิดจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนที่ความดันและอุณหภูมิปกติ

ก๊าซมีเทนมีน้ำหนักเบากว่าอากาศและอยู่ในสถานะก๊าซ ถ้าหากต้องการให้ก๊าซชีวภาพเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลว ต้องใช้ความดันประมาณ 200 บาร์และมีอุณหภูมิล้นตัวเป็นของเหลวอยู่ที่ -161 องศาเซลเซียส ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเฉื่อยไม่ติดไฟ ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพโดยการนำไปเป็นเชื้อเพลิงจึงขึ้นอยู่กับก๊าซมีเทนอย่างเดียวเท่านั้น คุณสมบัติอื่นๆของก๊าซชีวภาพ แสดงในตารางที่ 2.2

ตาราง 2.2 ชนิดของก๊าซและคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ
0 องศาเซลเซียส (สมบูรณ์ ศิริพรมงคลชัย, 2546)

ชนิดของก๊าซ/ คุณสมบัติ	CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S	Gas mixture CH ₄ 60% +CO ₂ 40%	Gas mixture CH ₄ 65% + CO ₂ 34% + other 1%
ค่าความร้อน (เมกกะจูล/ม ³)	35.64	-	10.8	22.68	21.6	24.48
สัดส่วนติดไฟ (เปอร์เซ็นต์ โดยอากาศ)	5-15	-	4-80	4-45	6-12	7.7-23
อุณหภูมิติดไฟ (°ซ)	650-750	-	585	-	650-750	650-750
ความดัน เปลี่ยนสถานะ (บาร์)	47	75	13	89	75-89	75-89
อุณหภูมิเปลี่ยน สถานะ (°ซ)	-82.5	31.0	-240	100	-82.5	-82.5
ความหนาแน่น (ก./ล.)	0.72	1.98	0.09	1.54	1.2	1.15
ความจุความร้อน (กก./ม. ³ /°ซ.)	1.6	1.6	1.3	1.4	1.6	1.6

2.2 การทำความสะอาดและเพิ่มคุณภาพก๊าซชีวภาพ (Biogas cleaning and upgrading)

จากปฏิกิริยาในการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้มีส่วนประกอบไม่พึงประสงค์ปนเปื้อนมาด้วย ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของจักรกลที่นำก๊าซชีวภาพไปใช้ ทำให้เกิดการกัดกร่อนจักรกลเพิ่มขึ้น รวมไปถึงมีความเป็นพิษต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการทำความสะอาดก๊าซก่อนเข้าสู่ระบบ โดยก๊าซปนเปื้อนที่จำเป็นต้องกำจัด ได้แก่

1) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) เป็นก๊าซที่เป็นพิษ รู้จักกันในชื่อทั่วไปว่าก๊าซไข่เน่าเกิดจากแบคทีเรียย่อยสลายซัลไฟด์ในสารอนินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจนและกำมะถัน ซึ่งเป็นสาเหตุของการกัดกร่อนวัสดุอุปกรณ์ที่ทำจากโลหะ ดังนั้นการลดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพก่อนนำไปใช้ประโยชน์นั้นย่อมเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมและช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ใช้ก๊าซด้วย (Van Haren and Fleming, 2005) สำหรับค่าความเข้มข้นสูงสุดของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ยอมรับให้มีได้ในก๊าซชีวภาพสำหรับการใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.3

ตาราง 2.3 ค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ยอมรับได้ในการใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ (Electrigaz Technologies, 2008)

การนำไปใช้ประโยชน์	ค่าความเข้มข้นสูงสุดของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ล้านต่อล้านส่วน)
Boiler	1000
Electrical Generator (CHP)	500
Vehicle fuel	23
Grid Injection	4
Fuel Cell	1

2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพเน้นที่การจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นก๊าซเฉื่อย ทำให้สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพมีผลโดยตรงต่อกำลังงานต่อปริมาตรของก๊าซชีวภาพ โดยพบว่าถ้าหากมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เจือปนอยู่ในปริมาณสูงเกิน 45 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะทำให้เครื่องยนต์เดินไม่เรียบและเกิดความผิดปกติในการทำงาน

(Bari, 1996) สำหรับค่าความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ยอมให้มีในก๊าซชีวภาพสำหรับแต่ละประเทศที่กำหนดไว้ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตาราง 2.4 ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพที่ยอมรับได้
(Electrigaz Technologies, 2008)

สถานที่	ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
สวิตเซอร์แลนด์	6 เปอร์เซนต์
ฝรั่งเศส	2 เปอร์เซนต์
เยอรมนี	6 เปอร์เซนต์
บริติช-โคลัมเบีย	2 เปอร์เซนต์
สวีเดน	5 เปอร์เซนต์ (CO ₂ +O ₂ +N ₂)
รัฐมิชิแกน สหรัฐอเมริกา	2 เปอร์เซนต์
ประกาศกรมธุรกิจพลังงานประเทศไทย	18 เปอร์เซนต์

2.3 สาหร่าย

สาหร่าย (Algae) มีชื่อเรียกในภาษากรีกว่า Phykos สาหร่ายจัดเป็นสิ่งมีชีวิตชั้นต่ำในอาณาจักรโครมาลวีโอลาตา (Chromalveolata) เอกซ์ควาตา (Excavata) ไรซาเรีย (Rhizaria) มีลักษณะคล้ายพืช แต่ไม่มีรากลำต้น และใบที่แท้จริง สาหร่ายมีขนาดเล็กตั้งแต่เซลล์เดียวซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าไปจนถึงขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยเซลล์จำนวนมาก มีลักษณะเป็นเส้นสาขคล้ายมีราก ลำต้นและใบ เรียกว่า ทัลลัส (Thallus) สาหร่ายแบ่งชนิดต่างๆ ตามลักษณะสี เช่น สาหร่ายสีเขียว สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สาหร่ายสีน้ำตาล และสาหร่ายสีแดง สาหร่ายสืบพันธุ์ได้ทั้งแบบอาศัยเพศและแบบไม่อาศัยเพศ มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสภาพแวดล้อมของโลก และมีความสำคัญในการรักษาสมดุลทางธรรมชาติ เนื่องจากสาหร่ายเป็นต้นทางห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศน์สาหร่ายส่วนใหญ่มีคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ช่วยในการสังเคราะห์แสง ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายคล้ายกับพืชชั้นสูง คือ ใช้คลอโรฟิลล์เอ เป็นตัวรับพลังงานจากแสง (Antenna molecules) มีการปลดปล่อยก๊าซออกซิเจน ซึ่งต่างจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิตในกลุ่มแบคทีเรียสังเคราะห์แสง (Photosynthetic bacteria) สาหร่ายคลอเรลลา

(Chlorella) จัดอยู่ในกลุ่มสาหร่ายสีเขียว (Green algae) เรียกว่า คลอโรไฟตา (Chlorophyta) สาหร่ายในดิวิชันนี้มีสีเขียวเหมือนสีของหญ้าเพราะในคลอโรพลาสต์มี รังควัตถุคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บีจำนวนมาก สาหร่ายสีเขียวส่วนใหญ่มีไพรินอยด์ในคลอโรพลาสต์ ซึ่งเป็นศูนย์กลางของการสร้างแป้งในเซลล์ของสาหร่าย (จกกล, 2552)

2.3.1 โครงสร้างเซลล์ของสาหร่าย

เซลล์สาหร่ายประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ

ก. ผนังเซลล์ ผนังเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวมี 2 ชั้น ผนังชั้นในเป็นพวกเซลลูโลส ส่วนผนังชั้นนอกเป็นเพกติน

ข. รังควัตถุและคลอโรพลาสต์ รังควัตถุของสาหร่ายสีเขียวมี 2 ชนิด ประกอบด้วยคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี แคโรทีนอยด์ แอลฟา เบตา และแกมมาแคโรทีน

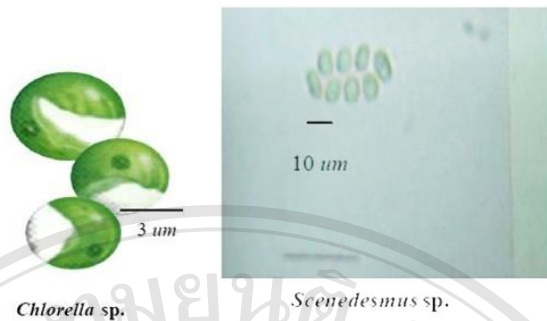
ค. อาหารสะสม อาหารที่สะสมในสาหร่ายสีเขียวมีอยู่ในรูปของแป้งซึ่งประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกติน โดยเก็บสะสมแป้งไว้ในไพรินอยด์ สำหรับสาหร่ายที่ไม่มีไพรินอยด์สะสมอาหารไว้ในรูปของน้ำมัน (oil)

2.3.2 การเคลื่อนไหวของสาหร่าย

สาหร่ายสีเขียวชนิดที่การเคลื่อนไหวได้ทั้งเซลล์ปกติหรือเซลล์สืบพันธุ์มักพบว่ามีออร์แกเนล (Organelle) ที่มีสี เรียกว่า สติกมาหรืออายสปอต ทำหน้าที่รับแสงแล้วส่งความรู้สึกต่อไปยังหนวด โดยหนวดของสาหร่ายสีเขียวส่วนมากมี 2 เส้นที่ยาวเท่ากัน (Isokontan) บางชนิดมีเพียง 1 เส้น บางชนิดมี 4 เส้น เช่น Carteria และบางชนิดมีมากเป็นกระจุกทางด้านบนของเซลล์ เช่น เซลล์สืบพันธุ์ของ Oedogonium ใน Order Zygnematales การเคลื่อนที่ของเซลล์สืบพันธุ์ไม่ได้อาศัยหนวด แต่มีการเคลื่อนที่แบบอะมีบา (amoeboid movement) รูปร่างลักษณะสาหร่ายสีเขียวมีลักษณะหลายแบบมีทั้งเซลล์เดี่ยว (Unicell) กลุ่มเซลล์เส้นสาย หลอดหรือท่อ (Siphonous form) และพัลลัส ซึ่งประกอบด้วยเซลล์พาราไคมา (Parenchymatous form)

2.3.3 การสืบพันธุ์ของ *Chlorella* sp.

สาหร่ายมีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศโดยการแบ่งเซลล์ การสร้างกลุ่มเซลล์ใหม่เกิดจากการแตกตัวของเซลล์เดิม ลักษณะเซลล์ของ *Chlorella* sp. อาจอยู่เดี่ยวๆ หรืออาจรวมกันเป็นกระจุก คลอโรพลาสต์รูปถ้วยดังรูปที่ 2.2 สืบพันธุ์จนได้จำนวนเซลล์ 4 หรือ 8 เซลล์ ซึ่งรวมอยู่ในผนังเซลล์ของเซลล์พ่อแม่ เป็นสาหร่ายที่พบได้ทั่วไป และอาศัยอยู่ร่วมกันแบบซิมไบโอซิส (Symbiosis) กับสัตว์ เช่น พารามีเซียม ไฮดรา ฟองน้ำ มีโปรตีนสูงถึง 55.5 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง)



รูป 2.2 สาหร่ายใน Order Chlorellales (Aquasearch, 1999)

2.3.4 ธาตุอาหาร และสิ่งแวดล้อมที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของสาหร่าย มีหลายชนิดแตกต่างกันไป ตามชนิดของสาหร่ายสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่ม 2 กลุ่มใหญ่ ดังนี้ (จกมล พรหมยะ และขจรเกียรติ แซ่ตัน, 2548)

ก.ธาตุอาหารหลัก (Macronutrient) หมายถึง ธาตุอาหารที่สาหร่ายสามารถนำไปใช้ในการสร้างโครงสร้าง เช่น ผนังเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ สารสี โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม ซัลเฟอร์และโพแทสเซียม มีรายละเอียดดังนี้

ก.1 คาร์บอน เป็นธาตุอาหารหลักของพืชและสิ่งมีชีวิต แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ อนินทรีย์คาร์บอน ซึ่งสามารถละลายน้ำได้อยู่ในรูปของเกลือคาร์บอเนต (pH สูงกว่า 9.5) ไบคาร์บอเนต (pH 7-9) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (pH 5) กลุ่มที่ 2 เป็นอินทรีย์คาร์บอน ได้แก่ น้ำตาลชนิดต่างๆ เช่น ซูโครส กลูโคส กาแลคโตส โดยทั่วไปแล้วสาหร่ายต้องการอินทรีย์คาร์บอนในสภาพไร้อากาศ (anaerobic condition) หรือในที่ที่ไม่มีแสงสว่าง

ก.2 ไนโตรเจน เป็นธาตุที่มีความจำเป็นและสำคัญรองจากคาร์บอนสำหรับสิ่งมีชีวิตทั้งหลายในสาหร่ายมีไนโตรเจนประมาณ 7 – 10 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อกระบวนการสร้างสารพันธุกรรมของสาหร่าย โดยเป็นองค์ประกอบของนิวคลีโอไทด์ (nucleotide) กรดอะมิโนและสารสีบางชนิด เช่น คลอโรฟิลล์ ถ้าสาหร่ายขาดไนโตรเจนย่อมมีผลต่อการสังเคราะห์แสงและปริมาณสารสีของเซลล์ รวมทั้งทำให้กิจกรรมของเอนไซม์บางชนิดลดลงด้วยธาตุไนโตรเจนที่สาหร่ายนำไปใช้แบ่งเป็นกลุ่มอนินทรีย์และกลุ่มอินทรีย์ กลุ่มอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย (ammonia) ไนไตรท์ (nitrite) และ ไนเตรท (nitrate) กลุ่มอินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ ยูเรีย (urea) เอไมด์ (amide) กลูตามีน (glutamine) และ แอสพาราจีน (asparagine) ตลอดจนสารอินทรีย์ไนโตรเจนชนิดอื่นๆ ได้แก่ กรดอะมิโน (ไกลซีน

เซรินอะลามีน กลูตามิก และแอสพาร์ติก) สาหร่ายต้องการใช้สารอินทรีย์เพื่อการเจริญเติบโตซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิดของสาหร่าย

ก.3 ฟอสฟอรัส เป็นธาตุอาหารสำคัญที่จำเป็นต่อกระบวนการต่างๆ ของเซลล์ โดยเฉพาะกระบวนการถ่ายเทพลังงานและการสร้างกรดนิวคลีอิก ในแหล่งน้ำธรรมชาติมีปริมาณสารอินทรีย์ฟอสฟอรัสสูงกว่าสารอนินทรีย์ฟอสฟอรัส แต่สาหร่ายต้องการใช้สารอนินทรีย์ฟอสฟอรัสมากกว่า เช่น ออร์โธฟอสเฟต (orthophosphate) ที่นำไปใช้ได้โดยตรง ความต้องการฟอสฟอรัสของสาหร่ายแต่ละชนิดจะต่างกัน เช่นสาหร่ายสีเขียวมีความต้องการฟอสฟอรัสมากกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ ถ้าสาหร่ายขาดฟอสฟอรัสจะมีผลต่อการเจริญเติบโตทำให้รูปร่างของเซลล์เปลี่ยนแปลง ทำให้ปริมาณสารสีชนิดคลอโรฟิลล์เอ อาร์เอ็นเอ และดีเอ็นเอลดลง ส่วนแป้งหรือคาร์โบไฮเดรตมีปริมาณเพิ่มขึ้น

ก.4 ซัลเฟอร์ เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับสาหร่ายทุกชนิด ซัลเฟอร์ที่อยู่ในเซลล์สาหร่ายมีหลายรูปแบบ เช่น ในรูปกรดอะมิโน วิตามินบี กรดแพนโทเทนิค กรดลิโปอิก เป็นต้น สาหร่ายส่วนใหญ่ใช้ซัลเฟอร์ในรูปของเกลือซัลเฟต แต่จะใช้ในรูปของซัลไฟด์ถ้าเป็นสภาวะที่ขาดออกซิเจน เช่น บริเวณแหล่งน้ำปิดหรือพื้นที่ท้องน้ำ

ก.5 แคลเซียม เป็นธาตุอาหารที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการสร้างเกล็ดและโครงสร้างของสาหร่าย ที่มีบทบาทสำคัญในการสร้างผนังของเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้ ในธรรมชาติจะมีแคลเซียมเพียงพอสำหรับสาหร่าย

ก.6 โซเดียม โพแทสเซียม โซเดียมเป็นธาตุอาหารที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์หลายชนิดซึ่งเป็นตัวควบคุมการทำหน้าที่ต่างๆ ของเซลล์เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับสาหร่ายบางชนิด เช่นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินต้องการโซเดียมในปริมาณมากกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นที่อยู่ในน้ำจืด สำหรับโพแทสเซียม เป็นธาตุอาหารที่เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์หลายชนิดที่มีผลต่อการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ถ้าขาดโพแทสเซียมจะทำให้การสังเคราะห์แสงลดลงและการหายใจเพิ่มขึ้น ในกรณีที่แหล่งน้ำขาดโพแทสเซียมสาหร่ายสามารถใช้โซเดียมทดแทนโพแทสเซียม

ก.7 แมกนีเซียมเป็นธาตุอาหารที่เป็นส่วนประกอบของนิวคลีอัสในคลอโรพลาสต์ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism)

ข.ธาตุอาหารรอง (Micronutrient) หมายถึง ธาตุอาหารที่สาหร่ายต้องการในปริมาณน้อย เป็นธาตุอาหารช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ กลุ่มอนินทรีย์และกลุ่มอินทรีย์

ข.1 ธาตุอาหารรองอนินทรีย์ (Inorganic Micronutrients) เป็นธาตุอาหารที่
สำหรับส่วนมากต้องการใช้ เช่น เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง โคบอลต์ โบรอน โซเดียม และซิลิกา

เหล็ก เป็นธาตุอาหารที่ช่วยในการดูดซึมไนโตรเจน และกระบวนการ
สังเคราะห์แสง คือ ช่วยสร้างคลอโรฟิลล์ เอ และซีไฟโคไซยานิน มีความจำเป็นต่อกระบวนการ
เมตาบอลิซึมของเซลล์ ถ้าสำหรับขาดเหล็กจะทำให้เมตาบอลิซึมต่ำลงส่งผลให้การเจริญเติบโต
ลดลงด้วย

โบรอน เป็นธาตุอาหารที่มีความต้องการสำหรับสำหรับบางชนิด ได้แก่
สำหรับสี่เขียวแกมน้ำเงิน และไคอะตอม โดยเฉพาะไคอะตอมน้ำเค็ม

แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี เป็นธาตุอาหารที่เป็นองค์ประกอบของ
เอนไซม์หลายชนิด มีความสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของสำหรับ หากขาดธาตุเหล่านี้
จะทำให้การสังเคราะห์แสงลดลงและการหายใจเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีมากเกินไปสำหรับจะตายได้

โมลิบดีนัม วานาเดียม โคบอลต์ โมลิบดีนัม เป็นส่วนประกอบของ
เอนไซม์ของสำหรับช่วยในการสังเคราะห์แสง ช่วยตรึงไนโตรเจนของสำหรับสี่เขียวแกมน้ำเงิน
สำหรับวานาเดียมเป็นธาตุอาหาร ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสำหรับบางชนิด

ซิลิกา เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นมากสำหรับไคอะตอม เพื่อใช้ในการสร้าง
ผนังเซลล์ แต่ไม่จำเป็นมากนักสำหรับสำหรับชนิดอื่นๆ

เซเลเนียม เป็นธาตุอาหารที่มีผลต่อการเจริญเติบโตในสำหรับบางชนิด
จากการทดลองพบว่า ถ้าปริมาณเซเลเนียมเพิ่มขึ้นปริมาณของสำหรับสี่เขียวแกมน้ำเงินเพิ่มขึ้น
และไคอะตอมลดปริมาณ

ข.2 ธาตุอาหารรองอินทรีย์ (Organic Micronutrient) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อย
ดังนี้

กลุ่มคาร์โบไฮเดรต ได้แก่ น้ำตาลชนิดต่างๆ เช่น เดกโตส ความเข้มข้นที่
ใช้ประมาณ 0.2–0.5 เปอร์เซ็นต์ ควรเติมน้ำตาลในอาหารเลี้ยงสำหรับหลังจากการนิ่งมาเชื้อแล้ว
เพราะน้ำตาลอาจสลายตัวไป

กลุ่มเกลืออินทรีย์หรือสารประกอบที่มีเกลืออินทรีย์ เช่น โซเดียมแอซิ-
เตต โพแทสเซียมแอซิเตต ความเข้มข้นที่ใช้ประมาณ 0.1 – 0.5 เปอร์เซ็นต์

กลุ่มวิตามิน กลุ่มวิตามินที่จำเป็นสำหรับสำหรับ เป็นวิตามินบี 3 ชนิด
คือ บี 1 บี 2 และบีรวม ซึ่งควรเติมในอาหารที่ใช้เลี้ยงสำหรับหลังจากผ่านการนิ่งมาเชื้อแล้ว ได้แก่
อาหารที่ช่วยการเจริญเติบโตของสำหรับ เช่น แอดีนิน (Adenin) ไคเนติน (Kinetin) ซึ่งละลายในน้ำ
ได้เล็กน้อย แต่ละลายได้ดีในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังมีอาหารเสริมอีก 2

ชนิดที่นิยมใช้ คือ กรดจิบเบอเรลลิก (Gibberellic acid) ละลายในน้ำได้ดีและกรดอินโด (Indoacid) มีสมบัติละลายได้เล็กน้อยในน้ำร้อนและละลายได้ง่าย เมื่อถูกแสงสว่าง

ผลจากความจำเป็นและความสำคัญของสารอาหารต่อการเจริญเติบโตอย่างสมบูรณ์ของสาหร่ายดังที่ได้กล่าวมา ถ้าหากสาหร่ายได้รับสารอาหารไม่ครบถ้วน เช่น ถ้าขาดธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ ซิลิกา แมกนีเซียม เหล็ก โพแทสเซียม และโมลิบดีนัม สีของเซลล์จะจางลงการสังเคราะห์แสงลดลง นอกจากนั้นการขาดธาตุบางชนิดจะทำให้เซลล์มีการสะสมอาหารเพิ่มขึ้นกว่าปกติเช่น สะสมแป้งหรือไขมันทำให้การสังเคราะห์กรดนิวคลีอิกและโปรตีนลดลง

2.4 สภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

นอกจากธาตุอาหารจะมีความสำคัญและจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายแล้ว สภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นอีกหลายอย่างยังมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้แก่ปัจจัยทางกายภาพ ปัจจัยทางเคมี และปัจจัยทางชีวภาพ ปัจจัยทางกายภาพ เช่นแสงมีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์แสงโดยตรง ส่งผลต่ออัตราการดูดซึม ธาตุอาหาร สภาพแวดล้อมมีผลทำให้ความเข้มข้นแสงเปลี่ยนแปลง เช่นความขุ่น ความลึกของระดับน้ำ และความหนาแน่นของสาหร่าย อุณหภูมิ มีผลต่อการดูดซึมธาตุอาหาร และกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นกระบวนการเมตาบอลิซึมจะสูงขึ้นส่งผลให้การดูดซึมธาตุอาหารของสาหร่าย เพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปการเจริญเติบโตของสาหร่ายจะช้าลงนอกจากนี้การเคลื่อนตัวของน้ำยังมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายในน้ำที่เคลื่อนไหลตลอดเวลา มีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าสาหร่าย ที่อยู่ในน้ำนิ่ง เนื่องจากไอออนสามารถผ่านและแพร่ผ่านเข้าสู่เซลล์ได้ดีกว่าปัจจัยทางเคมี เช่น ความเข้มข้นของธาตุอาหาร ซึ่งมีผลต่อการดูดซึมของสาหร่าย ถ้าความเข้มข้นของธาตุอาหารสูงอัตราการดูดซึมธาตุอาหารจะมีมากขึ้น แต่ถ้ามีความเข้มข้นมากเกินไปอัตราการดูดซึมของสาหร่ายจะลดลงหรือสาหร่ายอาจตายได้และปัจจัยทางชีวภาพ ได้แก่ อายุของเซลล์สาหร่าย สาหร่ายที่ยังอ่อนหรืออายุน้อย สามารถดูดซึมธาตุอาหารได้ดีกว่าสาหร่ายที่แก่หรือมีอายุมาก

2.5 สูตรอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่าย

สูตรอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่ายคลอเรลลา (*Chlorella* Medium) ซึ่งเป็นสาหร่ายเซลล์เดียวสกุลคลอเรลลาสามารถเจริญเติบโตได้ดีในอาหารหลายสูตร สูตรอาหารที่เลี้ยงคลอเรลลาได้ดีโดยมีส่วนประกอบของอาหารดังแสดงในตารางที่ 2.5

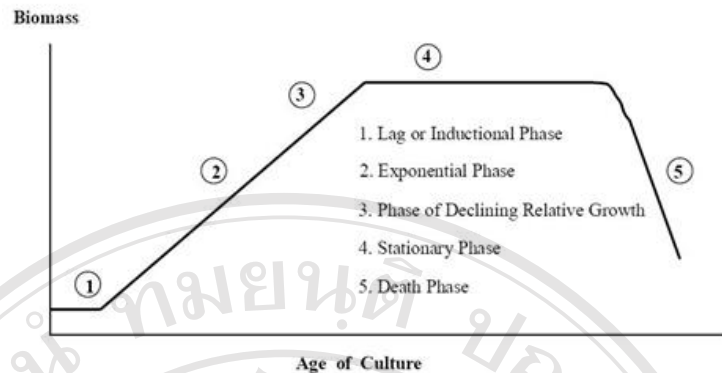
ตาราง 2.5 สูตรอาหารสำหรับสาหร่ายคลอเรลลาที่เหมาะสม (จกมล พรหมยะ, 2552)

สารอาหาร	น้ำหนัก (ก./ล.)
โพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3)	1.250
โมโนโพแทสเซียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (KH_2PO_4)	1.250
แมกนีเซียมซัลเฟต 7 - ไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	1.000
แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)	0.084
กรดบอริก (H_3BO_3)	0.014
เฟอร์รัสซัลเฟต 7 - ไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	0.050
ซิงค์ซัลเฟต 7 - ไฮเดรต ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	0.088
แมงกานีสคลอไรด์ 4 - ไฮเดรต ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	0.014
โมลิบดีนัมไดออกไซด์ (MoO_3)	0.007
คอปเปอร์ซัลเฟต 5 - ไฮเดรต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	0.016
โคบอลต์ไนเตรท 6 - ไฮเดรต [$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$]	0.005
อีดีทีเอ (EDTA)	0.500

2.6 ระยะของการเจริญเติบโตของสาหร่าย

ลักษณะการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก แสดงอยู่ในรูปที่ 2.3 แบ่งออกได้ 5 ระยะ คือ

- 1) ระยะปรับตัว (lag phase or inductional phase)
- 2) ระยะเอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential phase)
- 3) ระยะเฉื่อย (retardation phase or phase of declining relative growth)
- 4) ระยะคงที่ (stationary phase)
- 5) ระยะตาย (death phase)



รูป 2.3 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็ก (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2544)

ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ระยะเวลาปรับตัว (Lag or Inductional Phase) เป็นระยะที่เซลล์มีการปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมใหม่ เช่น แสง อุณหภูมิและธาตุอาหาร ระยะนี้สาหร่ายไม่มีการแบ่งเซลล์ เซลล์ที่ไม่สามารถปรับตัวได้จะตายลง การที่สาหร่ายจะผ่านระยะปรับตัวนี้เร็วมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเซลล์ และความอุดมสมบูรณ์ของอาหารที่ใช้ ถ้าสภาพทั้งสองอย่างเหมาะสมการเจริญเข้าสู่ระยะที่ 2 จะเร็วขึ้น

2) ระยะเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Phase) เป็นระยะที่สาหร่ายเจริญเติบโตและแพร่ขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว ความเร็วหรือช้าของระยะนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหารและสมบัติทางฟิสิกส์ เคมีของสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความเข้มแสง ช่วงแสงสว่างรวมทั้งผลผลิตนอกเซลล์ของสาหร่าย สภาพแวดล้อมของสิ่งแวดล้อม ลักษณะการเจริญเติบโตในระยะนี้เป็นแบบที่รวดเร็วในระยะแรกและค่อยๆ ช้าลง ตามลำดับ

3) ระยะถดถอย (Phase of Declining Relative Growth) เป็นช่วงที่เซลล์มีการเจริญเติบโตช้าลงเพราะขาดแคลนอาหาร เช่น ไนโตรเจน เหล็ก คาร์บอน หรือออกซิเจน เนื่องจากปริมาณเซลล์หนาแน่นเกินไป การเสียดสีของค่าพีเอชเพราะเกิดแอมโมเนียขึ้นมาก หรือแสงสว่างลดลงเนื่องจากเซลล์เกิดการบังกันเอง (auto-shading) วิธีแก้ไขให้การเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเป็นปกติโดยเติมธาตุอาหารที่ขาดแคลน ถ้ามีการตกตะกอนของเฟอริริกฟอสเฟตอาจแก้ไขได้โดยการเติมสารคีเลเตอร์เช่น เกลือไดโซเดียมอีดีทีเอลงไปแล้วละลายตะกอนเหล็ก ส่วนการป้องกันการขาดแคลนคาร์บอนและออกซิเจนได้โดยการเขย่าภาชนะตลอดเวลาหรือการพ่นอากาศ ซึ่งนอกจากจะเพิ่มคาร์บอนและออกซิเจนแล้วยังช่วยให้เกิดการผสมผสานมวลน้ำในภาชนะเลี้ยง ทำให้เซลล์สาหร่ายได้รับแสงสว่างอย่างทั่วถึงอีกด้วย

4) ระยะคงที่ (Stationary Phase) เป็นระยะที่การเจริญเติบโตของสาหร่ายหยุดนิ่งเนื่องจาก ทรัพยากรลดน้อยลงและเกิดสารพิษจากกระบวนการเมตาบอลิซึมหรือการสลายตัวของเซลล์ เพิ่มขึ้น

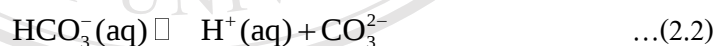
5) ระยะตาย (Death Phase) เป็นระยะที่เซลล์หยุดการเจริญเติบโตโดยสิ้นเชิง เนื่องจาก ทรัพยากรหมดลงเซลล์เริ่มตายและการตายจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและรวดเร็วขึ้น ดังนั้นความสำเร็จของการเพาะเลี้ยงเพื่ออนุบาลสาหร่ายจึงขึ้นอยู่กับความสามารถของผู้เลี้ยงที่ควบคุมการเลี้ยงให้มีกราฟ การเจริญเติบโตอยู่ในระยะเอ็กซ์โพเนนเชียลนานที่สุด

2.7 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น เกิดขึ้นได้ในระบบที่มีตัวกลาง ประกอบด้วยน้ำ ซึ่งในการทดลองนี้ได้มีการเปรียบเทียบระหว่างเดินระบบโดยใช้ *Chlorella* sp. เปรียบเทียบกับการเดินระบบโดยใช้น้ำสารอาหาร จึงต้องมีการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($K_L a$) สำหรับกลไกการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในน้ำ สามารถอธิบายได้ดังนี้ (วิไลลักษณ์, 2553) ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ (H_2O) เกิด การละลายเริ่มจากอยู่ในรูปของกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และกรดคาร์บอนิกสามารถแตกตัวเป็น อนุโมลไบคาร์บอเนต (H_2CO_3^*) ดังสมการ



จากนั้นอนุโมลไบคาร์บอเนตสามารถแตกตัวได้คาร์บอเนตดังสมการ



สำหรับอนุโมลไบคาร์บอเนตเมื่อรวมตัวกันได้ 2 โมเลกุล สามารถแตกตัวให้อนุโมลคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ดังสมการ



และเมื่ออนุโมลคาร์บอเนตสัมผัสน้ำสามารถแตกตัวได้อนุโมลไฮดรอกไซด์ ดังสมการ



ในกรณีที่มีสาหร่ายสีเขียวอยู่ในน้ำ สาหร่ายจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากสมการที่ (2.3) และ สมการที่ (2.4) ทำให้เหลือนุโมลคาร์บอเนตและอนุโมลไฮดรอกไซด์ไว้ จึงส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำ เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างการเดินระบบโดยใช้สาหร่ายกับการเดินระบบโดยใช้น้ำสารอาหารที่ไม่มี

สาหร่าย และปัจจัยที่ส่งผลถึงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 2.7.1 - 2.7.6 (Singh and Majumder, 2010)

2.7.1 Superficial gas velocity

Superficial gas velocity มีค่าแปรผันตรงกับค่า K_La เมื่อ ความเร็วตามพื้นผิวมากขึ้นจะส่งผลให้ K_La มากขึ้น เนื่องจากที่ความเร็วสูงฟองอากาศจะแตกตัวเป็นเม็ดเล็ก พื้นที่ผิวมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้น

2.7.2 แรงตึงผิว

แรงตึงผิวของตัวกลางมีค่าแปรผกผันกับค่า K_La ถ้าแรงตึงผิวสูงขึ้นค่าแรงต้านทานจะสูงขึ้นทำให้ค่า K_La ต่ำลง การใช้สารลดแรงตึงผิวสามารถเพิ่มการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้

2.7.3 ความหนืด

เมื่อความหนืดมีค่าต่ำลง แรงต้านทานก็จะยิ่งต่ำ ทำให้ค่า K_La สูงขึ้น

2.7.4 ขนาดฟองอากาศ

ขนาดของฟองอาจไม่ส่งผลได้ชัดเจนมากนัก แต่หากขนาดของฟองอากาศมีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับตัวกลางจะลดลงเมื่อเทียบกับฟองอากาศขนาดเล็กหลายฟองที่มีปริมาตรเท่ากัน จะส่งผลให้ค่า K_La ลดต่ำลงได้

2.7.5 Gas Hold Up

เมื่อค่า K_La เพิ่มขึ้น ค่า gas hold up ก็เพิ่มขึ้น ซึ่งตัวแปรอื่นก็จะส่งผลเหมือนกัน เช่น ถ้าความเร็วเพิ่มขึ้นหรือความตึงผิวลดลงค่า gas hold up ก็ย่อมมีค่าเพิ่มขึ้น

2.7.6 ผลของการเติมโซเดียมคลอไรด์ในระบบ

แม้ว่าการเติมโซเดียมคลอไรด์ในระบบจะทำให้การรวมตัวกันของฟองอากาศลดลง แต่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า K_La ซึ่งในการทดลองการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกวัดในน้ำเปล่าและน้ำที่เติมโซเดียมคลอไรด์ลงไป 2.85% เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง พบว่าการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเปล่าและน้ำเกลือได้ผลต่างกันน้อยมาก

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติพล กสิการ และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยง *Chlorella vulgaris* ในถังปฏิกรณ์ปริมาตร 1 ลิตร ซึ่งทำจากโถแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 12 นิ้ว ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 25 - 40 องศาเซลเซียส โดยทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้น 6 - 8

ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ทำการป้อนอัตราการไหลคงที่ 600 มิลลิลิตรต่อนาทีและควบคุมอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 10 - 50 มิลลิลิตรต่อนาทีซึ่งคิดเป็นสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 1.6 เปอร์เซ็นต์ - 7.7 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ให้แสงสว่างโดยใช้หลอดไฟ Warm white ความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ และมีการให้แสงสว่างตลอดเวลา ทำการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายเป็นเวลา 7 วัน โดยติดตามการเจริญเติบโต ด้วยการวัดค่าความดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ทุก 24 ชั่วโมง หลังจากทดลองในสภาวะต่างๆ กันแล้ว พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิ 29.6 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด - ด่าง เริ่มต้น 7.26 อัตราส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 16.18 มิลลิลิตรต่อนาทีคิดเป็นสัดส่วน 2.46 เปอร์เซ็นต์โดยสภาวะดังกล่าวให้การเติบโตจำเพาะเท่ากับ 0.389 ต่อวัน

Bari (1996) ในก๊าซชีวภาพมีส่วนประกอบหลักคือ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพแทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าประสิทธิภาพเครื่องยนต์จะต่ำลง สาเหตุเพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผสมอยู่ จึงได้ศึกษาทดลองหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง โดยมีส่วนผสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ กันตั้งแต่ 0 - 42 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำไปทดแทนน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ดังนี้ 15 เปอร์เซ็นต์ 30 เปอร์เซ็นต์, 50 เปอร์เซ็นต์ และ 75 เปอร์เซ็นต์ การทดลองนี้ได้ใช้เครื่องยนต์ดีเซล 2 สูบ 2 จังหวะ อัดอากาศแบบธรรมชาติ กำลังสูงสุด 16.8 กิโลวัตต์ ที่ 1,500 รอบต่อนาที ผลจากการทดลองพบว่า ที่อัตราการทดแทนน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้น อัตราการไหลน้ำมันดีเซลลดลง โดยที่ส่วนผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น มีผลต่ออัตราการไหลน้ำมันดีเซลน้อยมาก ยกเว้นที่อัตราทดแทน 75 เปอร์เซ็นต์อัตราการไหลน้ำมันดีเซลจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับอัตราการไหลก๊าซชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าเพิ่มขึ้นรวดเร็วเมื่อการทดแทนน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของพลังงานจำเพาะจากการเบรก (Brake specific fuel consumption, BSFC) พบว่า เมื่อการทดแทนน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้นการสิ้นเปลืองพลังงานต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมงจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากประมาณ 225 กรัมต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมงไปเป็น 325 กรัมต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมงเมื่อการทดแทนน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 15 เปอร์เซ็นต์ไปเป็น 75 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับโดยอัตราส่วนผสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในก๊าซชีวภาพนั้นไม่มีผลต่อค่า BSFC แต่อย่างใด

Chiu *et al.*, (2009) ได้ทำการศึกษาทดลองการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. NTCU-2, โดยหาอัตราการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบคู่กับการหาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย ในการทดลองนี้ใช้ถังปฏิกริยา 3 แบบ คือ 1. bubble column สูง 650 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ทำจากแก้ว 2. centric tube airlift หลอดภายนอกมีขนาดเท่ากับ bubble column แต่มีหลอดขนาดเล็กซ่อนอยู่ภายในทำจากอะคริลิกสูง 600 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร และ

3. porous centric tube airlift มีลักษณะเหมือนกับ centric tube airlift แต่มีตัวกลางช่วงสร้างความปั่นป่วน ซึ่งปริมาตรการใช้งานของทั้ง 3 แบบจะมีค่าเท่ากันคือ 4 ลิตร ความเข้มข้นของชีวมวลขณะเริ่มต้นนั้นมีค่าเท่ากับ 1 กรัมต่อลิตร อัตราการถ่ายอากาศผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่า 0.25 วีวีเอ็ม ซึ่งจะหยุดเมื่อความเข้มข้นของชีวมวลเท่ากับ 5 กรัมต่อลิตร ผลการศึกษาทดลองอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายและประสิทธิภาพการกำจัดในถังปฏิกรณ์แบบที่ 3 (porous tube) มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยวัดค่าความเข้มข้นชีวมวลสูงสุด (max biomass concentration) ได้ 3.461 กรัมต่อลิตร อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (max specific growth rate) เป็น 0.252 (μ /วัน) ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 removal efficiency) เท่ากับ 35 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นผลการทดลองแปรผันอัตราการถ่ายอากาศในถังปฏิกรณ์ Porous tube เพื่อเปรียบเทียบการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับความเข้มข้นของชีวมวลต่างๆ กันนั้น Chiu และคณะได้ใช้อัตราการถ่ายอากาศเป็น 3 ค่าที่อัตราการถ่ายอากาศ 0.125 วีวีเอ็ม, 0.25 วีวีเอ็ม และ 0.5 วีวีเอ็ม ชีวมวลที่ใช้ถูกเพาะเลี้ยงขึ้นต้นในภาชนะเพาะเลี้ยงแล้วนำไปแยกเป็นความเข้มข้นต่างกันโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง ซึ่งในการทดลองนี้ได้เริ่มที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน 5 ค่า 1.03, 2.06, 3.09, 4.12 และ 5.15 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบนี้พบว่า ทุกการทดลองที่อัตราการถ่ายอากาศต่ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของชีวมวล โดยที่อัตราการถ่ายอากาศ 0.125 วีวีเอ็มนั้นจะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพต่ำสุด และที่อัตราการถ่ายอากาศ 0.5 วีวีเอ็มจะมีการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 53 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่ความเข้มข้นของชีวมวล 5.15 กรัมต่อลิตร จากนั้นได้ทำการทดลองหาความสามารถในการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. ที่ SRT ต่างๆ กัน ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุด ทุกการทดลองความเข้มข้นชีวมวลเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองที่ 1 จะนำสาหร่ายออก 1 ใน 4 ของปริมาตรทุกๆ 2 วัน คิดเป็น SRT 8 วัน การทดลองที่ 2 นำสาหร่ายออก 1 ใน 3 ของปริมาตร ทุกๆ 3 วัน คิดเป็น SRT ประมาณ 9 วัน และการทดลองที่ 3 นำสาหร่ายออก 1 ใน 2 ของปริมาตร ทุกๆ 8 วัน คิดเป็น SRT เท่ากับ 16 วัน สำหรับผลการทดลองนั้นชุดการทดลองที่ 1 ให้ค่าการเจริญเติบโตเท่ากับ 0.61 กรัมต่อลิตรต่อวัน ชุดการทดลองที่ 2 ให้ค่าการเจริญเติบโตเท่ากับ 0.53 กรัมต่อลิตรต่อวัน ชุดการทดลองที่ 3 ให้ค่าการเจริญเติบโตเท่ากับ 0.51 กรัมต่อลิตรต่อวัน

Kao *et al.*, (2012a) ได้ทำการศึกษาการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพด้วย *Chlorella* sp. หัวเชื้อ *Chlorella* sp. MB9 ที่นำมาเลี้ยงในน้ำทะเลสังเคราะห์ก่อนจะนำมาบรรจุในถัง

*วีวีเอ็ม (vvm) หมายถึง สัดส่วนปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรถังปฏิกรณ์ในหนึ่งนาที

ปฏิกิริยาที่ใช้เป็นชนิด Bubble Column แบบตั้งกลางแจ้งทำจากอะคริลิกโพลีเมอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 300 เซนติเมตร ปริมาตรใช้งาน 50 ลิตร ใช้ก๊าซชีวภาพที่มีอัตราส่วนก๊าซมีเทน 69 ± 1 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 20 ± 1 เปอร์เซ็นต์ และได้ทำการ desulfurized ให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ในระดับต่ำกว่า 50 ล้านต่อล้านส่วนอัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพแบ่งเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.3 วิวีเอ็ม จ่ายก๊าซชีวภาพเข้าระบบครั้งละ 30 นาที ตามด้วยอากาศอีก 30 นาทีต่อรอบ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 9.00 - 17.00 ในแต่ละวัน ผลจากการทดลองพบว่า ปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าเป็น 20.3 ± 1.1 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้จาก 3.2 ± 0.6 เปอร์เซ็นต์ที่ 0.05 วิวีเอ็ม เพิ่มไปเป็น 5.3 ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ที่ 0.3 วิวีเอ็ม ขึ้นอยู่กับอัตราการจ่ายก๊าซ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 86.3 ± 1.9 เปอร์เซ็นต์ ที่ 0.05 วิวีเอ็ม ไปเป็น 73.7 ± 1.3 เปอร์เซ็นต์ ที่ 0.3 วิวีเอ็ม สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของก๊าซชีวภาพ ที่ปริมาตรของก๊าซมีเทนขาเข้า 69.4 ± 0.9 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองสามารถเพิ่มปริมาตรก๊าซมีเทนเป็น 91.1 ± 1.0 เปอร์เซ็นต์ ที่ 0.05 วิวีเอ็ม แล้วลดลงเป็น 85.5 ± 1.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ 0.3 วิวีเอ็ม เมื่ออัตราการจ่ายก๊าซเพิ่มขึ้น หรือคิดเป็นเพิ่มขึ้น 69.3 ± 4.7 เปอร์เซ็นต์ ที่ 0.05 วิวีเอ็ม แล้วมีค่าลดลงเป็น 52.1 ± 4.2 เปอร์เซ็นต์ ที่ 0.3 วิวีเอ็ม หรือเมื่ออัตราการจ่ายก๊าซเพิ่มขึ้น สำหรับผลการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่ให้ก๊าซชีวภาพที่อัตราการไหลต่างๆ กัน ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.0 กรัมต่อลิตรที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 5 วัน พบว่าที่วิธีการจ่ายก๊าซชีวภาพแบบหยุดเป็นพักๆ อัตราการไหลที่น้อยที่สุดที่ 0.05 วิวีเอ็ม ให้ความเข้มข้นสาหร่ายดีที่สุด ที่ 2.3 กรัมต่อลิตร ณ วันสิ้นสุด อัตราการไหล 0.1, 0.2 และ 0.3 วิวีเอ็ม ให้ความเข้มข้น ณ วันสิ้นสุดลดลงลงมาถึง 2, 1.9 และ 1.7 กรัมต่อลิตรตามลำดับ คิดเป็นอัตราการเจริญเติบโตที่ 0.324, 0.321, 0.308 และ 0.301 กรัมต่อลิตรต่อวัน และวิธีการจ่ายก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 8 ชั่วโมงก็ให้ผลที่มีนัยสำคัญไม่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลน้อยที่สุดจะให้อัตราการเติบโตสูงสุด คิดเป็นอัตราการเจริญเติบโตที่ 0.310, 0.292, 0.276 และ 0.243 กรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ

Kao *et al.*, (2012b) ทดสอบการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โฟโตไบโอรีแอคเตอร์ กลางแจ้งขนาด 40 ลิตร ทดสอบที่สภาวะแสงในช่วงวันที่มีแดดมาก (Sunny Day) ความเข้มแสงมีค่าประมาณ 1,500 มิลลิโมล ต่อตารางเมตร ต่อวินาที เปรียบเทียบกับวันที่มีเมฆ (Cloudy Day) ความเข้มแสงมีค่าประมาณ 800 มิลลิโมล ต่อตารางเมตร ที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.1 และ 0.3 วิวีเอ็ม ปล่อก๊าซ 30 นาที สลับกับอากาศ 30 นาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน ผลที่ได้คือในวันที่มีแดดจัด ให้ผลการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่า ที่ 0.1 วิวีเอ็ม ซึ่งลดได้สูงสุด 80 เปอร์เซ็นต์ ที่ 0.3 วิวีเอ็ม ลดได้สูงสุด 74 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในวันที่มีเมฆ อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.1 วิวีเอ็ม ลดได้สูงสุด 72 เปอร์เซ็นต์ ที่ 0.3 วิวีเอ็ม ลดได้สูงสุด 55 เปอร์เซ็นต์

Kumar *et al.*, (2010) ได้ทบทวนวรรณกรรมจากนักวิจัยหลายคน เกี่ยวกับความทนทานของสาหร่ายต่อสภาพแวดล้อมเช่น อุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของสาหร่ายชนิดต่างๆ เช่น *Chlorella* sp. จะสามารถยังคงเจริญเติบโตได้แม้อุณหภูมิสูงถึง 45 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สาหร่าย *Cyanidium caldarium* สามารถทนต่ออุณหภูมิได้สูงถึง 60 องศาเซลเซียส และสามารถทนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แสงสว่างก็เป็นส่วนประกอบสำคัญในการเจริญเติบโตของสาหร่าย จากผลงานวิจัยพบว่า ความเข้มของแสงที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 30 - 45 วัตต์ต่อตารางเมตรของพื้นที่ผิวและนอกจากการเลือกใช้น้ำและชนิดของหลอดไฟแล้ว การออกแบบถังปฏิกรณ์โฟโตไบโอรีแอคเตอร์ อาจเป็นส่วนสำคัญยิ่งเช่นกัน หากออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่เกินไป แสงสว่างจะต้องเข้าไปได้ไม่ทั่วถึง จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคพิเศษในการให้แสงสว่าง เช่น การติดตั้งหลอดไฟเข้าไปภายในถังปฏิกรณ์ และการทดลองภายนอกอาคารบางการทดลองได้ติดตั้งเลนส์รวมแสงไว้ที่ด้านบนของถังปฏิกรณ์เพื่อให้แสงอาทิตย์มีความเข้มมากพอที่จะให้แสงสว่างทะลุเข้าไปถึงภายในถัง

Morais, Costa., (2007) ได้ศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina* sp. และ *S. obliquus* โดยใช้ถังปฏิกรณ์ PhotoBioreactor แบบ bubble column 3 ถัง ต่ออนุกรมกัน ปริมาตรทำงานจริงถังละ 1.8 ลิตร ปริมาตรทำงานรวม 5.4 ลิตร การให้แสงสว่างแก่สาหร่ายใช้หลอดไฟขนาด 40 วัตต์ ความเข้มแสง 3,200 ลักซ์ตั้งเวลาเปิดปิดทุก 12 ชั่วโมง เป็นเวลา 21 วัน จากนั้นตรวจวัดอัตราการเจริญเติบโต และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทุก 24 ชั่วโมง การถ่ายอากาศนั้นจะเริ่มที่ถังแรก โดยอัตราการถ่ายเท่ากับ 0.3 วีวีเอ็ม เป็นเวลา 15 นาที ทุกๆ 2 ชั่วโมง โดยการถ่ายอากาศนั้นจะทำในช่วง 12 ชั่วโมงที่ให้แสงสว่าง ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะเท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์ และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสาหร่ายเริ่มต้นเท่ากับ 0.15 กรัมต่อลิตรใช้เวลาการทดลองทั้งหมด 21 วัน ผลการทดลองพบว่าการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด ที่อัตราการจ่ายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์สาหร่าย *Spirulina* sp. ทั้ง 3 ถังเจริญเติบโตขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยความเข้มข้นของสาหร่ายเริ่มต้นเริ่มจาก 0.15 กรัมต่อลิตรและในวันที่ 21 ของการทดลองพบว่ามีค่าความเข้มข้นของสาหร่ายในถังที่ 1, 2 และ 3 เป็น 3.4, 2.3 และ 2.6 กรัมต่อลิตรตามลำดับ สำหรับสาหร่าย *S. obliquus* เริ่มจาก 0.15 กรัมต่อลิตร ผลการวัดในวันที่ 21 ของการทดลองพบว่าถังที่ 1, ถังที่ 2 และถังที่ 3 มีความเข้มข้นของสาหร่ายเป็น 1.5, 1.7 และ 1.3 กรัมต่อลิตร สำหรับผลการศึกษาที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 12 เปอร์เซ็นต์ยังคงพบว่าการเจริญเติบโตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตลอดทั้ง 21 วัน โดยความเข้มข้นของสาหร่ายที่

วัดได้มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยยกเว้นในสาหร่าย *S.obliquus* จะมีความเข้มข้นของสาหร่ายในถังแรกเพิ่มเป็น 1.8 กรัมต่อลิตรในขณะที่ถังที่ 2 และถังที่ 3 กลับมีค่าลดลงเป็น 1.2 กรัมต่อลิตรและ 0.8 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ส่วนที่สองเป็นการวัดอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร *Spirullina* sp. สามารถตรึงก๊าซได้เฉลี่ย 33 เปอร์เซ็นต์ *S.obliquus* สามารถตรึงก๊าซได้เฉลี่ย 13 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 12 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร *Spirullina* sp. จะสามารถตรึงก๊าซได้เฉลี่ย 16 เปอร์เซ็นต์ *S.obliquus* สามารถตรึงก๊าซได้เฉลี่ย 8 เปอร์เซ็นต์

Ong *et al.*, (2010) ได้ทำการศึกษาลักษณะนิสัยของ *Chlorella* sp. 3 ประเภท ได้แก่ Wild Type ซึ่งเป็นสายพันธุ์ปกติ ส่วนสายพันธุ์ M7 และ M15 เป็นสายพันธุ์ที่กลายพันธุ์ดัดแปลง ที่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ดีขึ้น โดยใช้ถังปฏิกรณ์โฟโตไบโอรีแอक्टरที่ใช้เป็นแบบกลางแจ้งขนาด 40 ลิตร วางกลางแจ้งโดยใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งให้แสงสว่าง การวางกลางแจ้งทำให้ควบคุมสภาพแวดล้อมโดยเฉพาะเรื่องของอุณหภูมิได้ยาก ทำให้มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายโดยตรง การหาเชื้อกลายพันธุ์ที่ทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิได้ดีจึงมีความน่าสนใจยิ่งขึ้น อากาศที่ใช้เลี้ยงนั้นถูกผสมด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราการไหลของก๊าซ 0.25 ลิตรต่อวินาที ระยะเวลาทำการทดลอง 8 วัน การหาอัตราการเจริญเติบโตนั้นจะนำสาหร่ายออกครึ่งหนึ่งของปริมาตร เมื่อความเข้มข้นขึ้นถึง 1 กรัมต่อลิตรจากนั้นจะเติมสารอาหารตัวกลางเข้าไปแทนที่ จากผลการทดลองพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. ชนิด Wild Type นั้นมีอัตราการเจริญเติบโตดีที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และจะลดลงเรื่อยๆ ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่วนพวกกลายพันธุ์ M7 และ M15 จะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดที่ 30 องศาเซลเซียส และเริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนผลความเข้มข้นของชีวมวลที่ 25 องศาเซลเซียสของสาหร่ายชนิด Wild Type ที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.4 กรัมต่อลิตรจะเจริญเติบโตได้ดี มีความเข้มข้นเฉลี่ย 0.8 กรัมต่อลิตรต่อวัน ส่วนสาหร่าย M7 และ M15 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นมากกว่าก็จะมีผลความเข้มข้นสูงสุดในแต่ละวันประมาณ 2 เท่าเช่นกัน ส่วนผลการทดลองของ Ong ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสาหร่ายทั้ง 3 แบบ อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน คือประมาณ 0.4 กรัมต่อลิตรซึ่ง Wild Type จะมีความเข้มข้นในแต่ละวันลดลงอย่างมีนัยสำคัญจนกระทั่งวันที่ 8 ซึ่งเป็นวันสิ้นสุดการทดลองจะเหลือความเข้มข้นสูงในวันนั้นเพียง 0.15 กรัมต่อลิตรเท่านั้น ขณะเดียวกันสาหร่าย M7 และ M15 จะมีความเข้มข้นอย่างต่อเนื่องในวันที่ 1-4 และความเข้มข้นจะคงที่ในวันที่ 5-8 ซึ่งผลสรุปที่ได้ก็คือ *Chlorella* sp. สายพันธุ์ดัดแปลง M7 และ M15 สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีกว่าสายพันธุ์หลัก จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในด้านปฏิกรณ์ชีวกลางแจ้งมากกว่า รวมทั้งยังช่วยให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างถังปฏิกรณ์ต่ำลง

Ugwu *et al.*, (2007) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบถึงปฏิกิริยา photobioreactors ที่ใช้สำหรับเลี้ยงสาหร่าย 3 ประเภท เพื่อหาประเภทที่เหมาะสม และสามารถให้สาหร่ายมีอัตราการเจริญเติบโตได้ดีที่สุด ซึ่งรูปแบบของการเพาะเลี้ยงสาหร่ายนั้น ทำได้ในตั้งแต่ใน pond vertical - column photobioreactors Flat - plate photobioreactors และ tubular photobioreactors ซึ่งข้อดีของ vertical-column photobioreactors จะเป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เพราะสามารถให้อัตราการเจริญเติบโตสูงโดยมีการกวนผสมระหว่างอากาศกับชีวมวลได้ดี ป้องกันการปนเปื้อนของชีวมวลภายในได้ดี ใช้พลังงานต่ำและทำความสะอาดระบบได้ง่าย ส่วนข้อเสียที่ได้นั้นได้แก่ พื้นที่รับแสงน้อยต้องใช้วัสดุและโครงสร้างที่ซับซ้อน รวมทั้งต้องใช้ความละเอียดสูง vertical - column photobioreactors แบ่งได้ 3 ประเภทตามการใช้งาน ได้แก่ 1) bubble column 2) draft tube air lift ประกอบด้วยกระบอกขนาดเล็กซ้อนอยู่ภายใน เพื่อให้อากาศที่ปล่อยขึ้นไหลขึ้น (riser) และ 3) split cylinder ประกอบด้วยแผ่นกั้นเพื่อแบ่งแท่งทรงกระบอกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกมีหัวจ่ายอากาศเพื่อให้อากาศที่กวนกับน้ำ และชีวมวลแล้วไหลขึ้น อีกฝั่งจะเป็นขาลง โดยสรุปแล้วการที่จะขยายปริมาณของปฏิกิริยา ควรทำการขยายโดยใช้พื้นที่ให้น้อยที่สุด เพราะจะทำให้มีพื้นที่ที่โดนแสงสว่างได้มาก และเป็นการเพิ่มอัตราการโอนถ่ายมวลได้สูงจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

รายละเอียดในการทดลองนี้จะแตกต่างจากงานวิจัยที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมของ Kao *et al.* (2012a) และ Kao *et al.* (2012b) ตรงที่งานวิจัยทั้งสองใช้แสงธรรมชาติ และเดินระบบ 8 ชั่วโมงต่อวัน ถ่ายภาพชีวภาพ 30 นาทีสลับด้วยอากาศ 30 นาที แต่ในงานวิจัยนี้ได้ให้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์วันละ 4 ชั่วโมงครึ่งปรับความเข้มแสงให้คงที่ ลดอัตราการถ่ายภาพให้ต่ำกว่าของ Kao *et al.* (2012a) จาก 0.05 - 0.3 วิวีเอ็ม เหลือ 0.005 - 0.05 วิวีเอ็ม แต่เพิ่มระยะเวลาการถ่ายภาพเป็น 1 ชั่วโมง สลับด้วยอากาศ 30 นาที รวมไปถึงการเลี้ยง *Chlorella* sp. ซึ่ง Kao *et al.* (2012a) และ Kao *et al.* (2012b) ได้เริ่มทำการทดลองจากความเข้มข้นของสาหร่ายประมาณ 1 กรัมต่อลิตร และไปสิ้นสุดที่ความเข้มข้นประมาณ 2.4 กรัมต่อลิตรจึงหยุดการทดลองซึ่งไม่มีความต่อเนื่องในการเดินระบบ แต่ในการทดลองนี้จะกำหนดค่า SRT ที่ 8 วัน เพื่อรักษาความเข้มข้นให้อยู่ในช่วงการเติบโตของ log - phase และใช้ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้นที่ไม่น้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นเดินระบบอย่างต่อเนื่องจนกว่าความเข้มข้นของ *Chlorella* sp. จะมีค่าเข้าสู่สภาวะสมดุล

ตาราง 2.6 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวกับการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับ

ที่มา	ชนิดสาหร่าย	ชนิดและปริมาตรของ reactor(ล.)	ก๊าซที่ใช้	ความเข้มข้นของ CO ₂ โดยปริมาตร	อัตราการไหล (วีวีเอ็ม)	ประสิทธิภาพการกำจัด CO ₂ (โดยปริมาตร)	อัตราการเติบโตของ สาหร่ายสูงสุด(ก./ล. ว ⁻¹)
Morais, Costa., (2007)	<i>Spirullina</i> sp.	Three 1.8 litre bubble columns in series	Air + CO ₂	6 % และ 12%	0.3	33%และ 16 %	0.22 ² และ 0.18 ³
	<i>S. obliquus</i>			6 % และ 12%	0.3	13 % และ 8 %	0.10 ^{1,2} และ 0.14 ¹
Kao <i>et al.</i> , (2012a)	<i>Chlorella</i> sp. MB9	50 litres bubble column	Biogas	20 %	0.05	86.3 %	0.310*
					0.3	73.7 %	0.243*
Kao <i>et al.</i> , (2012b)	<i>Chlorella</i> sp. MM-2	40 litres bubble column	Biogas	20 %	0.1	80 %สำหรับ Sunny Day 72 %สำหรับ Cloudy Day	-
					0.3	74 %สำหรับ Sunny Day 55%สำหรับ Cloudy Day	
Chiu <i>et al.</i> , (2009)	<i>Chlorella</i> sp. NTCU-2	4 litres bubble column	Air + CO ₂	5 %	0.25	24 %	-
		4 litres centric tube airlift		5 %	0.25	23 %	-
		4 litres porous centric tube airlift		5 %	0.25	35 %	-

หมายเหตุ 1 หมายถึงถึงปฏิกิริยาหมายเลข 1 จากการทดลองโดยต่อนุกรมทั้งหมด 3 ถึง

2 หมายถึงถึงปฏิกิริยาหมายเลข 2 จากการทดลองโดยต่อนุกรมทั้งหมด 3 ถึง

3 หมายถึงถึงปฏิกิริยาหมายเลข 3 จากการทดลองโดยต่อนุกรมทั้งหมด 3 ถึง

* หมายถึงจ่ายก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่อง