



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

✧ การลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่าย ✧

ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

Carbon Dioxide Mitigation by Microalgae from Biogas

โดย

ศิราภรณ์ ชื่นบาล และ คณะ

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

2557

รหัสโครงการวิจัย มจ.1-56-034



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง การลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่ายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ
Carbon Dioxide mitigation by Microalgae from Biogas

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2556
จำนวน 120,000 บาท

หัวหน้าโครงการ นางศิริภรณ์ ชื่นบาล
ผู้ร่วมโครงการ นาย ฐปน ชื่นบาล
 นางสาวรุ่งทิพย์ กาวารี

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

29/09/57

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	
สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ค
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
บทนำ	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
การตรวจเอกสาร	5
วิธีการดำเนินการวิจัย	35
ผลการวิจัยและวิจารณ์	46
สรุปผลการวิจัย	77
บรรณานุกรม	80
ภาพผนวก	85

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1	การนำก๊าซชีวภาพไปใช้งานกับการปรับปรุงคุณภาพก๊าซ
ตารางที่ 2	ชนิดของจุลสาหร่ายที่มีความทนทานต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณสูง
ตารางที่ 3	ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย <i>Spirulina</i> sp. ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm และ 0.3 vvm
ตารางที่ 4	ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp. ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm และ 0.3 vvm
ตารางที่ 5	ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp. MJU ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm และ 0.3 vvm
ตารางที่ 6	ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย <i>Scenedesmus</i> sp. ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm และ 0.3 vvm
ตารางที่ 7	ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย <i>Scenedesmus obliquus</i> TISTR 8522 ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm และ 0.3 vvm
ตารางที่ 8	ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายทั้ง 5 ชนิด ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm
ตารางที่ 9	ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายทั้ง 5 ชนิดที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.3 vvm
ตารางที่ 10	การเจริญและผลผลิตของสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp. MJU เมื่อได้รับก๊าซชีวภาพ
ตารางที่ 11	ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพและการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซมีเทน

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1	วัฏจักรคาร์บอน	6
ภาพที่ 2	ขั้นตอนของการดูดซับ ขนส่งและการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	11
ภาพที่ 3	ระบบการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายรวมกับระบบอื่น ๆ เพื่อให้เกิดประโยชน์ แบบครบวงจร	12
ภาพที่ 4	กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน	15
ภาพที่ 5	ประโยชน์ของจุลสาหร่าย	30
ภาพที่ 6	วิธีการเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อเพิ่มปริมาณ	39
ภาพที่ 7	การเลี้ยงห้วเชื้อจุลสาหร่ายเริ่มต้น	39
ภาพที่ 8	การเลี้ยงห้วเชื้อจุลสาหร่ายเพื่อเพิ่มปริมาณ	40
ภาพที่ 9	แผนภาพวิธีการเลี้ยงจุลสาหร่ายและการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใน ชุดการทดลองและชุดควบคุม	42
ภาพที่ 10	ชุดการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพของจุลสาหร่ายในการลดปริมาณ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องปฏิบัติการ	43
ภาพที่ 11	ผงซีเหล็กที่ใช้กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	44
ภาพที่ 12	ชุดกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยผงซีเหล็ก	45
ภาพที่ 13	ชุดการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพของจุลสาหร่ายในการลดปริมาณ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	46
ภาพที่ 14	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อความเป็นกรด่างของ สาหร่าย <i>Spirulina</i> sp.	48
ภาพที่ 15	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อชีวมวลของสาหร่าย <i>Spirulina</i> sp.	48
ภาพที่ 16	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการดูดกลืนคลีนแสง (OD) ของสาหร่าย <i>Spirulina</i> sp.	49
ภาพที่ 17	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโต จำเพาะ (specific growth rate) ของสาหร่าย <i>Spirulina</i> sp.	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 18	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อความเป็นกรดด่างของสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp.	52
ภาพที่ 19	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อชีวมวลของสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp.	52
ภาพที่ 20	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (OD) ของสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp.	53
ภาพที่ 21	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp.	53
ภาพที่ 22	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อความเป็นกรดด่างของสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp. MJU	56
ภาพที่ 23	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อชีวมวลของสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp. MJU	57
ภาพที่ 24	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (OD) ของสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp. MJU	58
ภาพที่ 25	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของสาหร่าย <i>Chlorella</i> sp. MJU	58
ภาพที่ 26	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อความเป็นกรดด่างของสาหร่าย <i>Scenedesmus</i> sp.	61
ภาพที่ 27	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อชีวมวลของสาหร่าย <i>Scenedesmus</i> sp.	62
ภาพที่ 28	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (OD) ของสาหร่าย <i>Scenedesmus</i> sp.	62
ภาพที่ 29	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของสาหร่าย <i>Scenedesmus</i> sp.	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 30	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อความเป็นกรดค้างของ สาหร่าย <i>Scenedesmus obliquus</i> TISTR 8522	65
ภาพที่ 31	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อชีวมวลของสาหร่าย <i>Scenedesmus obliquus</i> TISTR 8522	66
ภาพที่ 32	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการดูดกลืนคลีนแสง (OD)ของสาหร่าย <i>Scenedesmus obliquus</i> TISTR 8522	66
ภาพที่ 33	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโต จำเพาะ (specific growth rate) ของสาหร่าย <i>Scenedesmus obliquus</i> TISTR 8522	67
ภาพที่ 34	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1vvm ที่มีต่อ ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของของสาหร่าย ทั้ง 5 ชนิด	79
ภาพที่ 35	ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3vvm ที่มีต่อ ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของของสาหร่าย ทั้ง 5 ชนิด	70

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความร่วมมือและความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายด้วยกัน ข้าพเจ้าขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ และนักศึกษาทุกท่านในห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายครรชิต เงินคำคง และนางสาวรุ่งตะวัน ปันทะวงศ์ ผู้ช่วยนักวิจัย และข้าพเจ้าขอขอบคุณผู้อุเคราะห์หัวเชื้อสาหร่ายดังต่อไปนี้ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ขอขอบคุณสำนักวิจัยและส่งเสริมการเกษตร ที่สนับสนุนงบประมาณ ประจำปี 2556 สำหรับการวิจัยในครั้งนี้

ศิราภรณ์ ชื่นบาล

การลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่ายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

Carbon Dioxide Mitigation by Microalgae from Biogas

ศิริภรณ์ ชื่นบาล ฐปน ชื่นบาล และ รุ่งทิพย์ กาวารี

Siraporn cheunbarn, Tapana cheunbarn and Rungthip kawaree

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ. เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกจุลสาหร่าย ที่ให้ผลผลิตสูง สามารถลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้ การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายจำนวน 5 ชนิด ได้แก่ *Spirulina* sp., *Chlorella* sp., *Chlorella* sp. MJU, *Scenedesmus* sp. และ *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 10 ลิตร เติมน้ำคาร์บอนไดออกไซด์ (99%) ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm ศึกษาการเจริญของสาหร่ายและประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราการเติมน้ำคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm นั้นสาหร่ายทั้ง 5 ชนิดสามารถเจริญได้ดีกว่าที่อัตราการเติมน้ำคาร์บอนไดออกไซด์ 0.3 vvm โดยพบว่า *Chlorella* sp. MJU มีการเจริญสูงที่สุด โดยมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะที่ 0.84 ต่อวันและมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 92.96 ± 1.58 % หลังจากนั้นเมื่อนำสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU ไปประยุกต์ใช้ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า เมื่อนำก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศจากมูลสุกรในระดับห้องปฏิบัติการ ที่กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้วมาผ่านระบบถังปฏิกรณ์เลี้ยงสาหร่าย ที่อัตราการเติมน้ำ 0.1 vvm พบว่าหลังจากการทดลอง 7 วันสาหร่ายมีผลผลิต 620 mg/L สามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพได้เฉลี่ย 91.54 ± 2.33 % และสามารถทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นจากเดิมเฉลี่ย 45.93 ± 1.44 % เป็น 66.19 ± 1.34 %

คำสำคัญ: คาร์บอนไดออกไซด์ จุลสาหร่าย ก๊าซชีวภาพ

Abstract

The objective of this research was to select the microalgae that could be mitigated carbon dioxide with high production and it could be applies to capture carbon dioxide in biogas system. In this study, five microalgae *Spirulina* sp. *Chlorella* sp. *Chlorella* sp. MJU *Scenedesmus* sp. and *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522 were cultivated in 10 liter of bioreactor. Carbon dioxide (99%) was feeding at 0.1 vvm and 0.3 vvm. The growth and carbon dioxide capture efficiency of algae were investigated. From the study, all algae could be growth better at 0.1 vvm carbon dioxide feeding than at 0.3 vvm. *Chlorella* sp. MJU showed the highest growth with the specific growth rate at 0.84 d^{-1} with 92.96 ± 1.58 % carbon dioxide capture efficiency. After that, *Chlorella* sp. MJU was applied to mitigation carbon dioxide from biogas system. Desulfurized biogas produced from the anaerobic digestion of lab-scale swine wastewater was introduced to algae bioreactor at 0.1 vvm. After 7 days of experiments, a yield of 620 mg/L could be achieved, 91.54 ± 2.33 % of carbon dioxide in desulfurized biogas could be captured and the methane concentration in effluent biogas increased from 45.93 ± 1.44 % up to 66.14 ± 1.34 %.

Key word: carbon dioxide, microalgae, biogas

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในชั้นบรรยากาศของโลกยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลต่อภาวะโลกร้อน (global warming) หรือภาวะภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (climate change) ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ของโลกเราในปัจจุบัน สืบเกิดได้จากอุณหภูมิของโลกที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ สาเหตุหลักของปัญหานี้มาจากก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gases) โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ การเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวมีสาเหตุสำคัญมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เชื้อเพลิงเหล่านี้นิยมใช้เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในการคมนาคมขนส่ง และโรงงานอุตสาหกรรม โดยทั่วไปก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้จะประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 10 - 20% มีความเข้มข้นมากกว่าในบรรยากาศถึง 500 เท่า โดยทั่วโลกมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศมากถึง 68% ปัจจุบันเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ (Ho *et al.*, 2011)

จากความสำคัญของปัญหานี้จึงมีการศึกษาวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งเน้นในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ประโยชน์ผ่านกระบวนการต่าง ๆ อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์แสงของจุลสาหร่าย (microalgae) ถือเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากจุลสาหร่ายมีการเติบโตโดยใช้แสงเป็นพลังงาน และใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์แสง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารอาหารหลักเพื่อการเติบโตและสร้างชีวมวล (biomass) เป็นวิธีที่ช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสามารถนำชีวมวลของจุลสาหร่ายไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อีกด้วย เนื่องจากพบว่าชีวมวลของจุลสาหร่ายมีคุณค่าทางทางโภชนาการ และมีสารเคมีที่มีมูลค่าสูงสามารถนำไปสกัดเพื่อนำไปใช้ได้ ในอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์น้ำ อุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอาง และทางการแพทย์ นอกจากนี้ยังสามารถนำเซลล์ที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์แล้วกลับไปใช้เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถนำกลับไปใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายได้ใหม่ (Demirbas, 2010)

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยจุลสาหร่ายหลายชนิด เช่น *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* และ *Spirulina maxima* (Chan, 2011) การวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาชนิดของจุลสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูง รวมทั้งผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการเติบโตของจุลสาหร่ายและความสามารถของจุลสาหร่ายในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเพิ่มประสิทธิภาพของก๊าซชีวภาพที่ได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาชนิดของจุลสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพ ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และให้ผลผลิตที่ดี
2. เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลสาหร่ายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้วางแผนการเพิ่มประสิทธิภาพในการหมักก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร และได้ก๊าซที่มีคุณภาพดี
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ ทำให้โรงงานสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดมลพิษได้เป็นจำนวนมาก และยังเป็น การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญอีกด้วย

ขอบเขตของงานวิจัย

1. เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็ก
2. จุลสาหร่ายที่ใช้มี 5 สายพันธุ์ ดังนี้ *Spirulina* sp. *Chlorella* sp. *Chlorella* sp. MJU *Scenedesmus* sp. และ *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522
3. ใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กที่สร้างขึ้นจากการหมักมูลสุกร

การตรวจเอกสาร

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

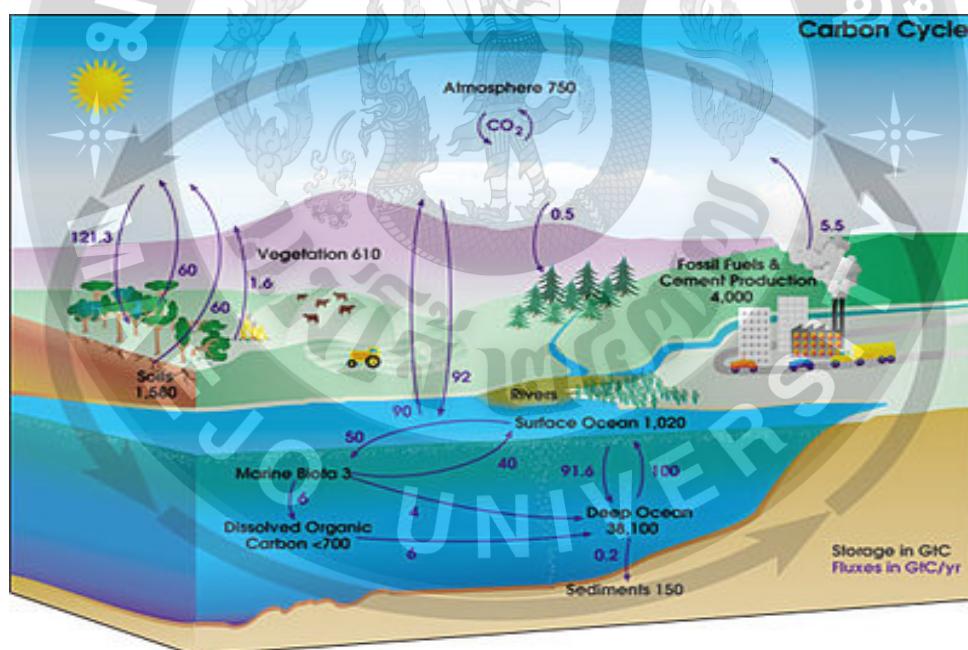
ภาวะโลกร้อน (global warming) หรือ ภาวะภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง (climate change) เป็นปัญหาใหญ่ของโลกเราในปัจจุบัน สืบเกิดได้จากอุณหภูมิของโลกที่สูงขึ้นเรื่อยๆ สาเหตุหลักของปัญหานี้มาจากก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gases)

ปรากฏการณ์เรือนกระจกมีความสำคัญกับโลกเพราะก๊าซจำพวกคาร์บอนไดออกไซด์หรือมีเทนจะกักเก็บความร้อนบางส่วนไว้ในโลกไม่ให้สะท้อนกลับสู่บรรยากาศทั้งหมด มิฉะนั้นโลกจะกลายเป็นแบบดวงจันทร์ ที่ตอนกลางคืนหนาวจัดและตอนกลางวันร้อนจัดเพราะไม่มีบรรยากาศกรองพลังงานจากดวงอาทิตย์ ซึ่งการทำให้โลกอุ่นขึ้นเช่นนี้คล้ายกับหลักการของเรือนกระจกที่ใช้ปลูกพืช จึงเรียกว่า ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) แต่การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของ CO₂ ที่ออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม รถยนต์ หรือการกระทำใดๆ ที่เผาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้ระดับปริมาณ CO₂ ในปัจจุบันสูงเกิน 300 ppm (300 ส่วนในล้านส่วน) เป็นครั้งแรกในรอบกว่า 6 แสนปี (วิฑูรย์, 2555)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 44.01 มีจุดเดือดที่ -78.5 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นที่ 0 องศาเซลเซียสเท่ากับ 1.997 ละลายได้ในน้ำปกติเป็นก๊าซที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่กัดกร่อนแต่สามารถทำปฏิกิริยากับออกไซด์ โลหะและไฮดรอกไซด์ ได้ผลผลิตเป็นคาร์บอนเนตและไบคาร์บอนเนต ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เป็นก๊าซที่มีอยู่ในธรรมชาติประมาณร้อยละ 0.03 โคนปริมาตรบริเวณเหนือมหาสมุทรในเขตเมืองมีปริมาณเพิ่มเป็นประมาณร้อยละ 0.06 และลมหายใจออกของมนุษย์มีก๊าซประมาณร้อยละ 5.6 (ประยูร, 2555)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สามารถเข้าสู่ร่างกายทางลมหายใจจะเกิดอาการพิษเฉียบพลันได้ ในกรณีที่ก๊าซแทนที่ออกซิเจนในบริเวณที่จำกัดทำให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการหายใจถ้าสูดดมเข้าสู่ร่างกายในปริมาณสูงมาก ร่างกายจะสนองโดยเริ่มจากการหายใจถี่มากกว่าเดิมหายใจติดขัด หายใจลำบาก จนถึงอาการขาดออกซิเจน คือปวดศีรษะ วิงเวียน ความดันสูง อัตราการเต้นของหัวใจสูงขึ้น ถ้าความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 12 หรือมากกว่าจะหมดสติภายใน 1-2 นาที ซึ่งมักพบกรณีทำงานในที่อับอากาศ เช่น ไซโลถังหมัก บ่อลึก เป็นต้น (จำรูญ, 2555)

วัฏจักรคาร์บอนเป็นวัฏจักรชีวธรณีเคมี ซึ่งคาร์บอนถูกแลกเปลี่ยนระหว่างสิ่งมีชีวิต พื้นดิน น้ำ และบรรยากาศของโลกคาร์บอนเป็นธาตุสำคัญธาตุหนึ่งของสิ่งมีชีวิต เป็นองค์ประกอบประมาณ 50%ของเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตและในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช การหมุนเวียนของคาร์บอนในระบบนิเวศเป็นการหมุนเวียนของคาร์บอนในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและการหายใจ เริ่มจากพืชตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศมาสังเคราะห์เป็นสารอินทรีย์ คาร์บอนจากบรรยากาศจึงเคลื่อนย้ายเข้าสู่พืช เกิดขึ้นได้ทั้งบนบกและในน้ำ ในการสังเคราะห์ด้วยแสงพืชจะเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานเคมี บางส่วนถูกใช้ไป บางส่วนถูกเก็บสะสมในรูปคาร์โบไฮเดรต ซึ่งจะถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร คาร์บอนเหล่านี้จะกลับสู่บรรยากาศโดยการหายใจ และการย่อยสลายหลังจากสิ่งมีชีวิตตายลงไป การย่อยสลายนี้อาจจะได้คาร์บอนในรูปคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซมีเทนกลับคืนสู่บรรยากาศ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วัฏจักรคาร์บอน

ที่มา: วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี(2556)

ภาวะโลกร้อนกับสถานการณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จิรพล (2556) ได้กล่าวไว้ว่าการใช้พลังงานการบริโภคการเดินทางการผลิตทั้งภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม รวมทั้งการปนเปื้อนต่อแหล่งน้ำ ทรัพยากรดิน และอากาศได้ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณการไหลเวียนของสารประกอบคาร์บอนมอนนอกไซด์ในระบบนิเวศ โดยเฉพาะการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ชั้นบรรยากาศและการลดขีดความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลับสู่การสะสมในระบบนิเวศนอกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว กิจกรรมต่างๆข้างต้นยังปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์มีเทนออกไซด์ของไนโตรเจนและก๊าซมีเทนรวมทั้งฝุ่นละออง ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศเป็นเหตุให้มีการสะสมของก๊าซเหล่านี้เป็นปริมาณมาก ติดต่อกันจนเกิดภาวะเรือนกระจกที่มีการกักเก็บความร้อนที่ผิวโลก เพิ่มขึ้นตามลำดับเกิดการเปลี่ยนแปลงภาวะอากาศและอุณหภูมิเฉลี่ยทั่วโลกสูงขึ้น โดยเฉพาะนับแต่ภายหลังที่มีการปฏิวัติอุตสาหกรรมที่ผ่านมาการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสองทศวรรษล่าสุด ที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นจาก 278 ส่วนในล้านส่วนในช่วงก่อนการปฏิวัติอุตสาหกรรม เป็น 380 ส่วนในล้านส่วน ในปี 2004 เป็นผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยทั่วโลกสูงขึ้น 0.7 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาเดียวกัน

การเปลี่ยนแปลงภาวะอากาศได้เกิดขึ้นให้สัมผัสได้ด้วยหลากหลายลักษณะชาวแคนาดาได้พบว่ามีน้ำแข็งที่ขั้วโลกเหนือลดลงเมืองและชุมชนหนาแน่นในแถบลาตินอเมริกา และเอเชียใต้ต้องประสบพายุฝนและภาวะน้ำท่วมรุนแรงชาวยุโรปพบว่าธารน้ำแข็งที่คงอยู่หลายพื้นที่เริ่มละลายและหกดาวมีไฟฟ้าเกิดขึ้นบ่อยครั้ง และเกิดคลื่นอากาศร้อนจากการศึกษาวงปีปะการังและฟองอากาศในชั้นน้ำแข็งของนักวิทยาศาสตร์พบว่าการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างที่ยืนยันการเปลี่ยนแปลงภาวะอากาศในหลายทศวรรษที่ผ่านมาและยังพบว่าโลกได้ประสบภาวะอากาศร้อนอย่างที่ไม่เคยเป็นมาก่อนในช่วงเวลาเป็นล้านปีปีที่อากาศร้อนเป็นประวัติศาสตร์สามปีเกิดขึ้นนับแต่ปี 1989 เป็นต้นมาและภาวะอากาศร้อนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วก็เกิดขึ้นในช่วงสามทศวรรษที่ผ่านมา นี่เองซึ่งนักวิทยาศาสตร์ด้านภาวะอากาศได้รายงานต่อสหประชาชาติว่ามนุษย์ได้ประสบกับภาวะอากาศร้อนที่เกิดจากกิจกรรมการผลิต และการบริโภคของตนเองถ้าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังคงเกิดขึ้นต่อไปด้วยอัตราที่เพิ่มมากขึ้นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างไม่อาจหลีกเลี่ยงได้จะส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศทั่วโลกสูงขึ้น 2 ถึง 5 องศาเซลเซียสแสดงถึงภาวะอากาศร้อนขึ้นจะเกิดขึ้นอย่างแน่นอนแต่ระดับของผลกระทบต่อระบบนิเวศต่างๆ อาจจะแตกต่างกัน นับแต่การละลายของน้ำแข็งอุณหภูมิของน้ำทะเลที่สูงขึ้นการ

กลายเป็นไอที่เพิ่มมากขึ้นการเปลี่ยนแปลงต่อภาวะทางการเกษตร และการแพร่ระบาดของโรคหลายชนิดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลต่อการละลายของน้ำแข็งที่ขั้วโลกเหนือ และขั้วโลกใต้และจะทำให้ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น ในเวลาอันใกล้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากถึง 7 พันล้านตันถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ ขณะที่ป่าไม้และทะเลสามารถดูดซับก๊าซกลับคืนมาได้เพียงครึ่งหนึ่งเท่านั้นที่เหลือก็จะสะสมในชั้นบรรยากาศ และทำให้ปริมาณก๊าซนี้ในชั้นบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณการสะสมได้เพิ่มขึ้นสองเท่า ของปริมาณที่เคยเกิดขึ้นนับแต่ปี 2001 เป็นต้นมาแสดงถึงขีดความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของธรรมชาติได้ถึงขีดจำกัดแล้ว

แนวทางในการแก้ไขปัญหาและการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Wang *et al.*, 2008)

นอกจากการลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อเป็นการลดพลังงานและลดการปล่อยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่บรรยากาศแล้ว ยังมีวิธีทางเคมีและทางชีววิทยาซึ่งในปัจจุบันพบว่าสามารถลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ผลดีดังนี้

1. Chemical reaction-base approaches

1.1 การดูดซับ(capture)

ในขบวนการนี้เป็นการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยอาศัยหลักการของ carbonation/de-carbonation reaction โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของโลหะในรูปของแข็ง (solid metal oxide, MO) และให้ผลผลิตเป็น metal carbonate (MCO_3) ซึ่งปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ 1



และเมื่อถึงจุดอิ่มตัว metal carbonate สามารถเปลี่ยนกลับไปเป็น MO และ CO_2 โดยการให้ความร้อน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2 จะเห็นได้ว่าด้วยขบวนการเคมีนี้จะสามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากควันที่เกิดจากการเผาไหม้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ โดยปูนขาวหรือแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นสารเคมีที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับในขบวนการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ผลดี เนื่องจากมีราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย



อีกขบวนการหนึ่งที่สามารถแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซต่าง ๆ ที่ผสมกันอยู่คือ การชะล้างด้วยสารละลายเอมีน ซึ่งสารที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือ monoethanolamine โดยทำการบรรจุลงในคอลัมน์และผ่านควันท่เกิดจากการเผาไหม้จากโรงงานอุตสาหกรรมลงไป ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซับไว้โดย monoethanolamine ที่เป็นตัวดูดซับนั้น สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยขบวนการ reverse reaction ในขณะที่น้ำที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกนำไปผ่านการควบแน่นเพื่อทำให้น้ำแยกออกจากคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้งหนึ่ง โดยขบวนการนี้แสดงได้โดยสมการที่ 3 และ 4 ดังนี้



ในขั้นตอนของการดูดซับด้วยสารเคมีเหล่านี้เมื่อนำไปใช้ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมียุทธในการดูดซับ 3 วิธีด้วยกัน ขึ้นกับลักษณะและขบวนการของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภท

1) Post combustion capture เป็นการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายหลังจากขบวนการเผาไหม้แล้วเสร็จ นิยมใช้ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินหรือโรงงานอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่

2) Pre combustion capture เป็นการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนขบวนการเผาไหม้จะเกิดขึ้น นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในโรงงานผลิตปิโตรเลียมและโรงงานผลิตก๊าซเชื้อเพลิงบางชนิด เช่น H_2 และ CH_4 รวมถึงโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า จากหลักการที่ว่าเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เหล่านี้บางส่วนจะถูกออกซิไดส์ไปเป็นก๊าซ เช่น CO และเมื่อมีน้ำเป็นองค์ประกอบก็จะสามารถทำปฏิกิริยากลายเป็น CO_2 และ H_2 ซึ่ง CO_2 ที่เกิดขึ้นนี้สามารถถูกกำจัดให้หมดไปก่อนเข้าสู่ขบวนการเผาไหม้ ในขณะที่ H_2 สามารถนำกลับไปใช้เป็นพลังงานได้

3) Oxy-fuel combustion เป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยใช้ออกซิเจนแทนอากาศทั่วไปเพื่อเป็นการกำจัดอุณหภูมิของเปลวไฟให้อยู่ในระดับปรกติตลอดช่วงการเผาไหม้ โดยมีการค่อย ๆ ปลดปล่อยอากาศที่อุณหภูมิต่ำเข้าไปในการเผา ซึ่งไอที่เกิดจากการขบวนการนี้หลัก ๆ ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ หลังจากนั้นจะถูกทำให้ควบแน่นด้วยความเย็น

ผลจากการนี้จะทำให้ได้น้ำที่มีส่วนผสมของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ ซึ่งมีความง่ายต่อการขนส่งและการเก็บกักในที่ปลอดภัย ขบวนการที่ใช้ oxy-fuel combustion ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้มักใช้ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า

1.2 การขนส่ง (transportation)

หลังจากขั้นตอนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว จะต้องมีการขนส่งเมื่อนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ขนส่งไปสู่สถานเก็บกัก การใช้ท่อส่งก๊าซจึงเป็นวิธีที่นิยม ซึ่งในสหรัฐอเมริกา มีท่อส่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยาวถึง 5,800 กิโลเมตร เพื่อนำไปกักเก็บในที่เก็บเหมาะสมและปลอดภัยทั้งต่อสุขภาพชีวิตของคนและสิ่งแวดล้อม

1.3 สถานที่เก็บกัก (sequestration)

สถานที่ใช้ในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะต้องเป็นพื้นที่ที่มีความปลอดภัยสูงเพราะต้องเก็บกักอย่างถาวรเป็นระยะเวลานาน ซึ่งในปัจจุบันมีด้วยกัน 3 รูปแบบดังนี้

1.3.1 Geological storage เป็นการใช้ใต้ดินเป็นแหล่งกักเก็บ โดยการอัดฉีดผ่านท่อส่งสู่ใต้ดิน มักใช้สถานที่ทิ้งร้างและไม่ได้ใช้ประโยชน์ เช่น บ่อน้ำมัน บ่อก๊าซ เหมืองเก่า ที่สามารถเป็นที่เก็บกักโดยบริเวณนั้นต้องมีความเหมาะสมทางกายภาพ ซึ่งจะทำให้มีความปลอดภัยสูง โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่สามารถแพร่กระจายขึ้นมาได้ โดยสามารถเก็บกักได้นานถึง 1000 ปี ในปี ค.ศ. 2009 พบว่าสหรัฐอเมริกามีพื้นที่ประมาณ 16,000 ตารางกิโลเมตร บนภูเขาที่ถูกใช้เป็นแหล่งกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

วิธีการเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใต้ดินนี้อาจมีผลกระทบอย่างรุนแรงได้ในกรณีที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมาก เนื่องจากมีความดันสูงทำให้ก๊าซเหล่านี้พุ่งขึ้นจากรอยแยกของพื้นดิน ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพประชากร

1.3.2 Ocean storage เป็นการใช้มหาสมุทรเป็นแหล่งเก็บกัก โดยอาศัยเรือหรือการต่อท่ออัดฉีดไปสู่มวลของน้ำทะเลที่ความลึก 1,000 – 3,000 เมตร โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายผสมกับน้ำทะเลและถ้าอัดฉีดลงไปในพื้นที่ลึกมากกว่า 3,000 เมตร ภายใต้ความดันบรรยากาศสูง ๆ จะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในรูปของเหลวที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ และจมตัวลงสู่ก้นทะเล ซึ่งจะเป็นการยืดเวลาที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายออกมาในทะเล และขึ้นสู่บรรยากาศซึ่งอาจใช้เวลาถึง 1000 ปี

วิธีการกักเก็บในทะเลนี้พบว่าปฏิกิริยาต่าง ๆ ในทะเลที่เกิดจากผลของการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นยังไม่เป็นที่เข้าใจมากนัก แต่ผลกระทบก็อาจเกิดขึ้นได้ถ้ามีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากจนเกินไป เพราะจะทำให้เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำและ

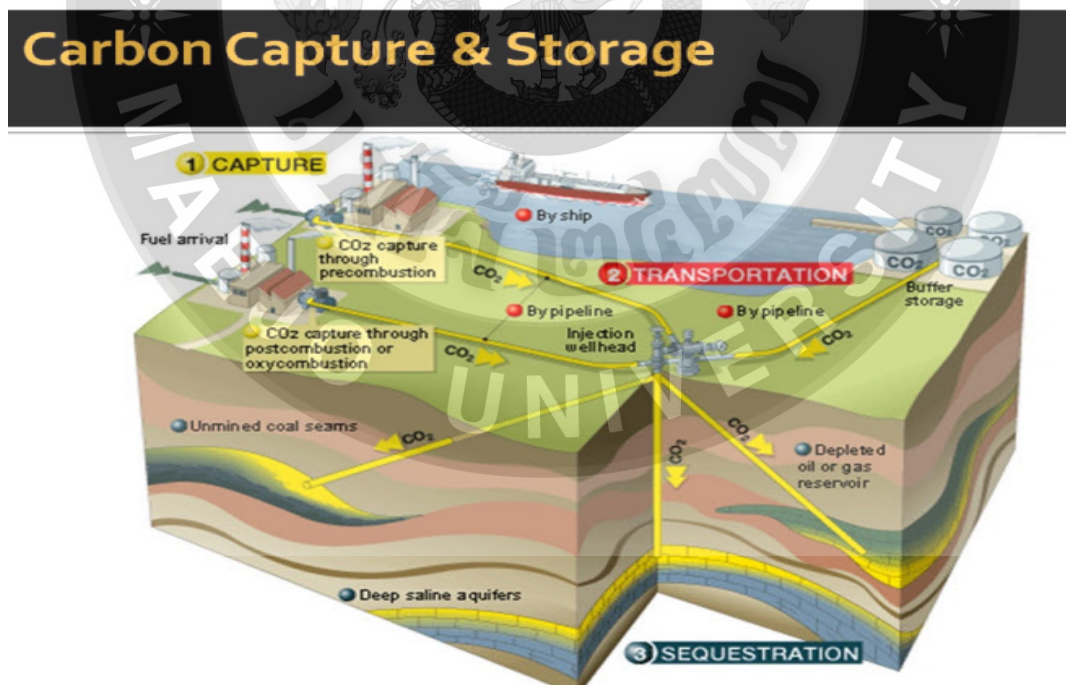
เมื่อมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปริมาณมาก ๆ ก็อาจเกิดการแลกเปลี่ยนกับบรรยากาศได้ เนื่องจากวัฏจักรของคาร์บอน นอกจากนี้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีมากเกินไปอาจทำให้ปริมาณความเป็นกรดของน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดกรดคาร์บอนิก

1.3.3 Mineral storage เป็นการให้อุณหภูมิเพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของโลหะทำให้เกิดเป็นคาร์บอเนตที่คงตัว โดยขบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติมาเป็นเวลาช้านาน โดยจะเกิดขึ้นในบริเวณผิวหน้าของหินปูน ดังสมการที่ 5



ปฏิกิริยาจะเกิดเร็วขึ้นเมื่อถูกเร่งโดยการใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นและที่ความดันสูง แต่อย่างไรก็ตามขบวนการนี้จำเป็นต้องมีการใช้พลังงานค่อนข้างมากเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา ทำให้ต้องมีการลงทุนที่ค่อนข้างสูง

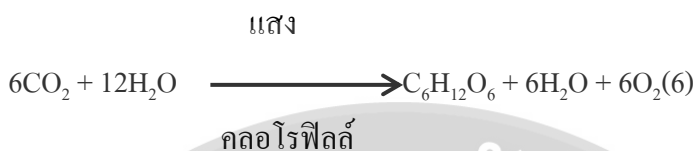
ขั้นตอนของการดูดซับ ขนส่งและการกักเก็บนี้แสดงได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนของการดูดซับ ขนส่งและการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
ที่มา: วิชาการคอตคอม (2556)

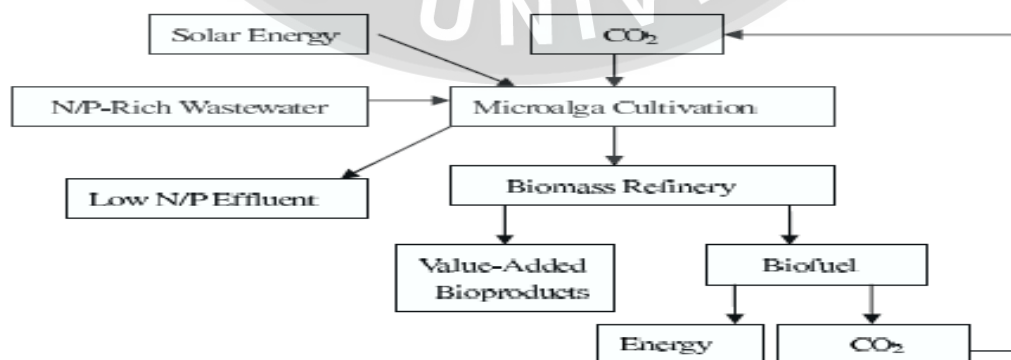
2. Biological CO₂ mitigation

เป็นการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อาศัยขบวนการสังเคราะห์แสงเป็นสำคัญ โดยอาศัยแสงจากดวงอาทิตย์เพื่อเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นน้ำตาลซึ่งเป็นสารที่ใช้พลังงาน ดังสมการที่ 6



ขบวนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศด้วยวิธีนี้สามารถใช้กับพืชและสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ถึงแม้ว่าความเป็นไปได้ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยพืชที่ใช้ในการเกษตรโดยทั่วไปนั้นมีเพียง 3-6% ของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องมาจากอัตราการเจริญของพืชบกนั้นเป็นไปอย่างช้า ๆ ในขณะที่พืชน้ำโดยเฉพาะจุลสาหร่ายซึ่งเป็นกลุ่มของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก มีทั้งเซลล์เดียวและหลายเซลล์นั้นมีอัตราการเจริญสูงกว่ามาก จึงมีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยขบวนการสังเคราะห์แสงได้มากกว่าพืชบนไม่ว่าจะเป็นป่าไม้ พืชทางการเกษตรหรือแม้แต่พืชน้ำอื่น ๆ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้จุลสาหร่ายเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีประโยชน์อย่างมาก

นอกจากนี้ยังพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับได้นี้ยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในหลายรูปแบบอย่างครบวงจร โดยจุลสาหร่ายที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในรูปแบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นแหล่งเชื้อเพลิง อาหาร หรือผลผลิตอื่น ๆ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ระบบการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายรวมกับระบบอื่น ๆ เพื่อให้เกิดประโยชน์แบบครบวงจร
ที่มา: Wanget al. (2008)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการดูดซับด้วยจุลสาหร่ายนี้จะถูกเปลี่ยนรูปให้ไปอยู่เป็นพลังงานเคมีด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสง จึงไม่ทำให้เกิดปัญหาในการหาบริเวณที่จะเป็นที่ยึดกักเก็บเหมือนในการดูดซับทางเคมีใน chemical reaction-base approaches จึงไม่มีการปนเปื้อนออกสู่ภายนอกและเป็นการแก้ปัญหาแบบยั่งยืน โดยสามารถใช้แหล่งคาร์บอนได้ทั้งจากโรงงานผลิตไฟฟ้าหรือระบบบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะในโตรเจนและฟอสฟอรัสซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ eutrophication ทำให้ระบบนิเวศของแหล่งน้ำเสื่อมโทรม

ทฤษฎีก๊าซชีวภาพ

1. นิยามและความหมายของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพคือก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการหมักย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน โดยทั่วไปจะหมายถึง ก๊าซมีเทน ที่เกิดจากการหมักของสารอินทรีย์ โดยกระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในหลุมขยะ กองมูลสัตว์ และก้นบ่อแหล่งน้ำนิ่ง กล่าวคือเมื่อไหร่ก็ตามที่มีสารอินทรีย์หมักกันเป็นเวลานานก็อาจเกิดก๊าซชีวภาพ แต่นี่เป็นเพียงแค่หลักการทางทฤษฎี องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแก๊สมีเทน (CH_4) ประมาณ 50-70 % และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30-40 % ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซชนิดอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N) และไอน้ำ(ขจรศักดิ์, 2556)

2. คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถผลิตขึ้นใช้เองได้อย่างต่อเนื่อง สมำเสมอ จะสามารถชดเชยหรือทดแทนการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ กับอุปกรณ์ที่ต้องการความร้อนจากเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี เช่น ทดแทนการใช้ก๊าซหุงต้ม (LPG) ในครัวเรือน เครื่องสูบลูกศร เครื่องอบแห้ง หม้อต้มไอน้ำ ระบบทำความเย็นแบบดูดซึม รวมถึงการใช้ในรูปแบบของแสงสว่างกับตะเกียงหรือใช้กับเครื่องยนต์สำหรับสูบน้ำหรือผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ภายในฟาร์ม (จินตนา และคณะ, 2556)

จากการรวบรวมข้อมูลของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2556) สามารถสรุปข้อมูลได้ว่าคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ (ที่ 0°C ความดัน 1 บรรยากาศ) คือ

- ปริมาณ CH_4	65-70	%
- ปริมาณ CO_2	30-35	%
- ปริมาณ H_2S	1,000	ppm

- ค่าความร้อนทางต่ำ	24.48	MJ/m ³
- ความเร็วเปลวไฟ :	25	cm/s
- อัตรา A/F ในทางทฤษฎี :	6.19	m ³ a/m ³ g
- อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ :	650	°C
- ค่าความจุความร้อน (Cp) :	1.6	kJ/m ³ -°C
- ความหนาแน่น :	1.15	kg/m ³

ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าความร้อนเทียบเท่า : ทดแทน

ก๊าซหุงต้ม (LPG)	0.46	กิโลกรัม
น้ำมันเบนซิน	0.67	ลิตร
น้ำมันดีเซล	0.60	ลิตร
ฟืนไม้	1.50	กิโลกรัม
ไฟฟ้า	1.20	กิโลวัตต์-ชั่วโมง

3. หลักการและกลไกในการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ เป็นกระบวนการบำบัดแบบชีวภาพในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน โดยจุลินทรีย์ที่มีความสามารถใช้อะไรบอนด์ไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen) หรือออกซิเจนอิสระ ซึ่งเรียกว่า ก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ดังสมการที่ 7 (อนุรักษ์ และคณะ, 2556)



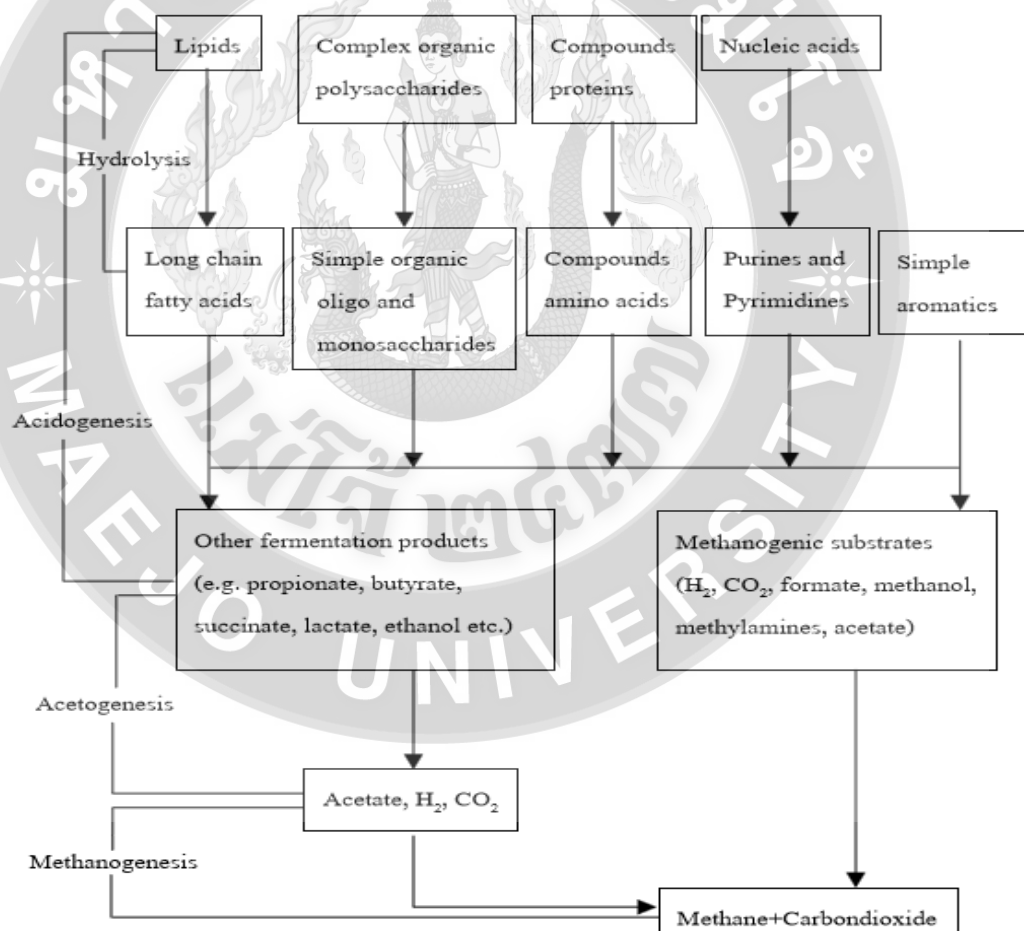
กระบวนการนี้แบคทีเรียจะไม่ใช้ออกซิเจนอิสระ ทำให้มีความต้องการพลังงานและการผลิตกากตะกอน (sludge production) น้อยกว่าระบบบำบัดแบบใช้อากาศ รวมทั้งสามารถรองรับภาระบรรทุสารอินทรีย์ได้มากกว่าแบบใช้อากาศ ช่วยให้พลังงานกลับคืนในรูปของก๊าซมีเทนซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงและแหล่งพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตาม ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศมีข้อเสียบางประการ คือ แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนมีความคงทนต่ำ และมีอัตราการเจริญเติบโตช้า ต้องใช้เวลาเริ่มเดินระบบ (start up) นานและมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่าแบบใช้อากาศ จำเป็นต้องมีระบบบำบัดเพิ่มเติม เพื่อกำจัดของแข็งและสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง (effluent) โดยทั่วไปจะใช้ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศเป็นระบบบำบัดเบื้องต้นสำหรับน้ำ

เสียที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ๆ ก่อนที่จะส่งไปบำบัดเพิ่มเติมด้วยระบบแบบใช้อากาศ เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งได้ตามมาตรฐานก่อนที่จะระบายทิ้งลงสู่แหล่งรองรับน้ำทิ้งต่อไป

4. ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2556) ได้กล่าวไว้ว่า กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซชีวภาพ ได้คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์หลักดังสมการที่ 7

สามารถแบ่งขั้นตอนของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

ที่มา: กิตติภัทร และคณะ (2555)

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

เป็นขั้นตอนแรกซึ่งสารประกอบเชิงซ้อน (complex organic compound) ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จะถูกย่อยสลายทำให้เป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่าย ๆ ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กที่ละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน กรดไขมัน โดยอาศัยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากแบคทีเรียพวก hydrolytic organisms ทำให้แตกตัวมีขนาดโมเลกุลเล็กลง ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้ช้าโดยเฉพาะถ้ามีไขมันหรือสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่อยู่มาก และในขั้นตอนนี้ยังไม่มีการลดปริมาณของค่าซีโอดีของน้ำเสียลง

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการสร้างกรด (acidogenesis)

เป็นขั้นตอนเปลี่ยน hydrolysis product ให้เป็นกรดไขมันและแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ในขั้นตอนนี้สารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่ถูกสร้างขึ้นมาในครั้งแรก จะถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานของแบคทีเรียโดยกระบวนการหมัก (organisms) ผลของปฏิกิริยาของกระบวนการหมักมีทั้งอยู่ในรูปออกซิไดซ์ และรีดิวซ์ ในรูปออกซิไดซ์ส่วนใหญ่จะเป็นกรดที่ระเหยง่าย (volatile acid) เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) แบคทีเรียกลุ่มนี้เติบโตได้รวดเร็วมี minimum doubling time ประมาณ 30 นาที ส่วนผลของปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวซ์มีอยู่หลายอย่างขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและตัวรับอิเล็กตรอน เช่น เมทานอล (methanol) เอทานอล (ethanol) โพรพานอล (propanol) บิวทานอล (butanol) หรือ กรดแลคติก (lactic) เป็นต้น นอกจากนี้แบคทีเรียจำพวก acetogenic bacteria ยังสามารถสร้างกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนได้จากการกระเจิงง่ายที่มีขนาดใหญ่กว่ากรดอะซิติก หรือผลปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวซ์ตัวอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาตอนแรก การย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนนี้สามารถเกิดได้ 2 ที่คือ

1) การย่อยสลายภายนอกเซลล์

การย่อยสลายภายนอกเซลล์นี้จะเกี่ยวข้องกับแบคทีเรียพวก fermentative bacteria ซึ่งจะปล่อยเอนไซม์ออกจากเซลล์ เพื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเกิดลิควิฟแฟรคชันกับสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้อยู่ในรูปที่เซลล์ของแบคทีเรียสามารถนำไปใช้ได้

2) การย่อยสลายภายในเซลล์

สารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่ผ่านการย่อยภายนอกเซลล์มาแล้ว จะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียเพื่อทำการย่อยสลายภายในเซลล์ ซึ่งผลสุดท้ายจะได้กรดระเหยง่ายโมเลกุลต่ำ

การย่อยสลายในขั้นตอนที่ทำให้เกิดกรดนี้ จะไม่มีการลดภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสีย นอกจากมีการสร้างไฮโดรเจน เนื่องจากอิเล็กตรอนในสารอินทรีย์จะถูกส่งให้กับสารอินทรีย์ที่ยัง

เหลืออยู่ในน้ำเสีย แต่เมื่อมีการสร้างไฮโดรเจน อิเล็กตรอนจะถูกส่งให้กับไฮโดรเจนไอออน เปลี่ยนเป็นก๊าซออกจากระบบ ทำให้สภาวะออกซิเดชันลดลง ซึ่งเป็นการลดการสะสมอินทรีย์ ดังสมการที่ 8



ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสร้างมีเทน (methanogenesis)

ขั้นตอนนี้แบคทีเรียที่สร้างมีเทน (methane producing bacteria) จะทำหน้าที่ย่อยสลายผลผลิตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการย่อยสลายภายในเซลล์ ซึ่งได้แก่ กรดอินทรีย์ คาร์บอนไดออกไซด์ และอื่นๆ การย่อยสลายในขั้นตอนนี้จะเป็นการลดการสะสมอินทรีย์ และได้ก๊าซมีเทนขึ้น

กลไกการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ ส่วนใหญ่จะมาจากปฏิกิริยาชีวเคมีของการย่อยสลายกรดอะซิติก ดังสมการที่ 9



นอกจากนี้ยังมีก๊าซมีเทนเกิดจากปฏิกิริยาชีวเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 10



ในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ พลังงานที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ประมาณ 90% จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซมีเทน หรือประมาณได้ว่า 1 กิโลกรัมของชีโอดีที่ถูกกำจัดจะให้ก๊าซมีเทน 0.31 – 0.44 ลูกบาศก์เมตร โดยมีสัดส่วนมีเทนในรูปก๊าซชีวภาพประมาณ 60-75 %

อาริยา (2546) กล่าวว่าก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนี้ไม่ละลายน้ำ จึงสามารถที่จะเก็บแล้วนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงที่เป็นประโยชน์ได้ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนจะออกไปในรูปของก๊าซและบางส่วนก็ละลายน้ำแล้วทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนในระบบเกิดเป็นไบคาร์บอเนตไอออน ผลจากการหมุนเวียนคาร์บอนไดออกไซด์นี้ทำให้มีผลต่อองค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบ เช่น พีเอชความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารอาหาร เป็นต้น อัตราการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยไปเป็นก๊าซมีเทน จะเป็นตัวจำกัดการเพิ่มอัตราการป้อน

สารอินทรีย์ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยจะทำให้พีเอช ลดต่ำลง และเกิดระบบล้นเหลวได้ แต่การกวนผสมก็เป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการที่จะช่วยรักษาความสมดุลในการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยต่างๆ ไปเป็นก๊าซมีเทน

การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ (biogas purification)

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549) ได้กล่าวไว้ว่าก๊าซชีวภาพ จัดเป็นพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) ประเภทหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ ประโยชน์ไม่ว่าจะนำไปใช้งานรูปของพลังงานความร้อนการเปลี่ยนเป็นพลังงานกลหรือพลังงาน ไฟฟ้าทั้งนี้ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรมปศุสัตว์และเกษตรอุตสาหกรรมจึงมีของ เสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตจำนวนมากซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สามารถนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ ได้เป็นอย่างดีและเมื่อเราเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์ เมตรพบว่ามีค่าความร้อนเทียบเท่ากับ

ก๊าซแอลพีจี	0.46 กิโลกรัม
น้ำมันเบนซิน	0.67 ลิตร
น้ำมันดีเซล	0.60 ลิตร
น้ำมันเตา	0.55 ลิตร
ไม้ฟืน	1.50 กิโลกรัม
ไฟฟ้า	1.20 กิโลวัตต์ - ชั่วโมง (หน่วย)

ปริมาณความร้อนที่ได้จากก๊าซชีวภาพจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซ มีเทนที่เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งทั่วไปก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะมีปริมาณก๊าซมีเทน (CH_4) ร้อยละ 60 – 65 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 33 -38 ที่เหลือเป็นไอน้ำก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) อยู่ร้อยละ 2 ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของก๊าซ ชีวภาพก่อนไปใช้งานจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนที่สูงขึ้นอีกทั้งป้องกันความ เสียหายแก่เครื่องยนตร์ผลิตกระแสไฟฟ้าหรืออุปกรณ์เผาไหม้ต่างจากสิ่งปะปนมากับก๊าซชีวภาพ ได้แก่ไอน้ำและ H_2S

Zhao *et al.*, (2010) ได้กล่าวว่าในการปรับปรุงก๊าซชีวภาพนั้นจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำก๊าซชีวภาพไปใช้งานเป็นหลักโดยก๊าซที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มก๊าซชีวภาพที่มีพลังงานปานกลาง (medium BTU gases) กลุ่มนี้จะกำจัดน้ำและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้ในเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าและกลุ่มก๊าซชีวภาพที่มีพลังงานสูง (high BTU gases) ซึ่งมีการกำจัด CO₂ ร่วมด้วยเพื่อเพิ่มค่าความร้อน (heating value) ให้สูงขึ้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติสามารถบีบอัดก๊าซด้วยความดันสูงบรรจุถึงนำไปใช้กับรถยนต์ได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้งานกับการปรับปรุงคุณภาพก๊าซ

Application	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O
Gas heater (Boiler)	1000 ppm	No	No
CHP	1000 ppm	No	Avoid Condensation
Vehicle Fuel	Yes	Yes	Yes

ที่มา: Zhao *et al.*, (2010)

การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพสามารถแบ่งตามชนิดของสิ่งปนเปื้อนมากับก๊าซชีวภาพที่ถูกกำจัดออกได้ดังนี้ (Zhao *et al.*, 2010)

1. การกำจัดน้ำ (removal of water, dehydration)

โดยปกติก๊าซชีวภาพมักมีความชื้นอยู่สูงเกือบถึงจุดอิ่มตัวเมื่อไหลผ่านท่อส่งก๊าซจากบ่อหมักถึงจุดใช้งานซึ่งมักมีระยะห่างกันมากจึงเกิดการควบแน่นกลั่นตัวเป็นหยดน้ำสะสมในเส้นท่อเป็นอุปสรรคต่อการนำก๊าซไปใช้งานการแก้ไขโดยทั่วไปมักจะติดตั้งชุดดักน้ำแบบท่อบัพตัวยูหรือบอลวาล์วที่ตำแหน่งต่ำสุดของเส้นท่อเพื่อระบายน้ำในท่อเป็นช่วงๆบ่อยครั้งที่จุดใช้งานยังพบว่ามีความชื้นสะสมอยู่ในท่อจึงนิยมติดตั้งชุดถังไซโคลนหรือชุดอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อกำจัดน้ำออกจากก๊าซชีวภาพให้มากที่สุด

2. การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (desulphurization)

ปริมาณ H₂S ในก๊าซชีวภาพจะมีความเข้มข้นมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายปกติจะมีอยู่น้อยมากเพียงร้อยละ 1 เท่านั้นแต่หาก H₂S นี้ทำปฏิกิริยากับ

น้ำหรือไอน้ำที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพจะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid, H_2SO_4) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดสามารถกัดกร่อนวัสดุที่เป็นโลหะต่างๆ ได้การนำก๊าซชีวภาพไปเผาไหม้ให้ความร้อนโดยตรงอาจไม่มีความจำเป็นต้องกำจัด H_2S แต่หากนำไปใช้กับเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า จำเป็นต้องกำจัดก๊าซดังกล่าวซึ่งโดยทั่วไปเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากต่างประเทศหรือเครื่องยนต์ดัดแปลงขนาดใหญ่สามารถใช้งานได้กับก๊าซชีวภาพที่มีความเข้มข้นของ H_2S ไม่เกิน 200 ส่วนในล้านส่วน (200 ppm)

วิธีการกำจัด H_2S แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือแบบวิธีทางเคมี (chemical sorption process) ได้แก่การใช้ก้อนเหล็ก (iron oxide pellets method) การใช้ผงถ่านคาร์บอน (activated carbon method) การดูดซับด้วยน้ำ (water scrubbing method) การดูดซับด้วยสารละลายต่างเช่นปูนขาว โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โซดาไฟ) เป็นต้นและแบบวิธีทางชีวภาพ (biological process) เช่นการเติมอากาศ (air dosing method) ระบบถังกรองชีวภาพ (bio-filter) เป็นต้นซึ่งจากการศึกษาพบว่าการกำจัด H_2S ด้วยวิธีทางชีวภาพมีความเหมาะสมมากกว่าวิธีทางเคมีหากพิจารณาในแง่ของประสิทธิภาพระยะยาวค่าใช้จ่ายพลังงานที่ใช้และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมทั้งนี้ในประเทศไทยนิยมใช้วิธีทางเคมีด้วยการดูดซับ H_2S ด้วยสารละลายต่างซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและง่าย

3. การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide removal, de-carbonize)

วัตถุประสงค์หลักของการกำจัด CO_2 เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CH_4 ในก๊าซชีวภาพเป็นผลให้มีค่าความร้อน (heating value) สูงขึ้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติที่เรียกว่าไบโอมีเทน (biomethane) วิธีการกำจัด CO_2 ได้แก่วิธี water scrubbing วิธี pressure swing adsorption (PSA) วิธี cryogenic separation และวิธี membrane separation และการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับเลี้ยงจุลสาหร่ายซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่กำจัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อทำให้ก๊าซชีวภาพมีคุณภาพดีขึ้น

สาหร่าย (algae)

สาหร่ายตรงกับภาษาอังกฤษว่า “algae” ซึ่งมาจากภาษาละตินคือ “alga” และภาษากรีกว่า phykos มีลักษณะคล้ายพืชแต่ไม่มีส่วนที่เป็นรากลำต้นและใบที่แท้จริงมีขนาดตั้งแต่เล็กมากมีเซลล์เดียวไปจนถึงขนาดใหญ่ ซึ่งประกอบด้วยเซลล์จำนวนมากอาจเป็นเส้นสาย หรือมีลักษณะคล้ายพืชชั้นสูงชนิดและสายพันธุ์ของสาหร่ายจะสามารถแบ่งตามรูปร่างลักษณะภายนอกหรือคุณสมบัติซึ่งจะพบว่ามีตั้งแต่ สาหร่ายสีเขียว เหี่ยวแกมน้ำเงิน น้ำตาล และสีแดงสาหร่ายสามารถสืบพันธุ์ทั้ง

แบบอาศัยเพศ และไม่อาศัยเพศแหล่งที่อยู่ของสาหร่ายมีต่าง ๆ กันส่วนใหญ่อยู่ในน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็มสาหร่ายเป็นส่วนหนึ่งของต้นทางห่วงโซ่อาหารระบบนิเวศน์เป็นตัวรักษาสมดุลทางธรรมชาติและเป็นแหล่งของสารอาหารมากมายคือแร่ธาตุวิตามินหลายชนิดนอกจากเป็นอาหารคน เช่นสาหร่ายอบกรอบแล้วยังใช้เป็นอาหารสัตว์เป็นปุ๋ยและเป็นยา(ผกาดี และ พนิดา, 2553)

1. วิวัฒนาการของสาหร่าย

จากการศึกษาทางธรณีวิทยา (geological time table) พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae) เป็นสิ่งมีชีวิตพวกแรกที่เกิดขึ้นในโลกนับตั้งแต่ยุคพรีแคมเบรียน (precambrian) ซึ่งเป็นระยะเวลามากกว่า 4,500 ล้านปีด้านสาหร่ายสีเขียวพบในยุคแคมเบรียน (cambrian) ซึ่งเป็นระยะเวลา 600 ล้านปีมาแล้ว และพบว่าสาหร่ายสีเขียวนั้นวิวัฒนาการไปเป็นพืชบก (Land plants) ในยุคซิลูเรียน (Silurian) ประมาณ 440 ล้านปี มาแล้วจากนั้นวิวัฒนาการของสาหร่ายก็เกิดขึ้นมากมายทั้งสาหร่ายสีแดงสาหร่ายสีน้ำตาลสาหร่ายได้ถูกจัดไว้ในอาณาจักรต่างๆ เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจัดไว้ในอาณาจักรโมเนอร่าไดอะตอม (diatoms) และยูกลีโนยด์ (euglenoids) จัดอยู่ในอาณาจักรโพรติสตา ส่วนสาหร่ายสีเขียว (green algae) สาหร่ายสีน้ำตาล (brown algae) สาหร่ายไฟ (stoneworts) และสาหร่ายสีแดง (red algae) จัดอยู่ในอาณาจักรพืช (kingdom plantae) สาหร่ายบางกลุ่มมีลักษณะคล้ายพืชเช่นสาหร่ายสีเขียวสาหร่ายไฟสาหร่ายสีน้ำตาลและสาหร่ายสีแดงแต่ลักษณะของสาหร่ายจะแตกต่างจากพืชกล่าวคือสาหร่ายบางชนิดประกอบด้วยเซลล์พาราไคม่า (parenchyma) มองดูคล้ายรากลำต้นและใบรวมเรียกว่าทาลัส (thallus) อย่างไรก็ตามกลุ่มเซลล์ดังกล่าวยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเนื้อเยื่อ (tissue) หรืออวัยวะ (organ) ที่แท้จริงและสาหร่ายไม่มีระบบท่อลำเลียง (vascular system) เหมือนในพืช สาหร่ายบางกลุ่มมีโครงสร้างเซลล์คล้ายแบคทีเรียเช่นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีลักษณะคล้ายกับแบคทีเรียสามารถสังเคราะห์แสงได้ (photosynthetic bacteria) มีลักษณะแตกต่างกันคือสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีคลอโรฟิลล์เอ (chlorophyll a) สำหรับใช้ในการสังเคราะห์แสงซึ่งได้ออกซิเจนออกมาส่วนแบคทีเรียที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ใช้คลอโรแบียมคลอโรฟิลล์ (chlorobium chlorophyllIII) ในการสังเคราะห์แสงและไม่ได้ออกซิเจนออกมาสาหร่ายบางกลุ่มมีลักษณะคล้ายสัตว์คือมีหนวดที่ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้เช่นพวกยูกลีโนยด์และไดโนแฟลกเจลเลตเป็นต้น(ผกาดี และพนิดา, 2553)

2. การจัดหมวดหมู่ของสาหร่าย (classification)

Hossain *et al.* (2008) ได้กล่าวไว้ว่าสาหร่ายได้มีการจัดจำแนกออกเป็นหมวดหมู่โดยพิจารณาจากลักษณะสำคัญต่างๆ เช่น รงควัตถุ (pigment) อาหารที่สะสมภายในเซลล์ (stored food) องค์ประกอบของผนังเซลล์ (cell wall) หรือที่อยู่อาศัย (habitat) นอกจากนี้ยังจำแนกได้ตามขนาด (size) ของสาหร่าย โดยทั่วไปสาหร่ายจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

2.1 สาหร่ายขนาดใหญ่ (macroalgae)

สาหร่ายประเภทนี้จัดเป็นสาหร่ายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าโดยไม่ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ เช่น สาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Spirogyra* หรือสาหร่ายไก่อและสาหร่ายน้ำตาลสายพันธุ์ *Macrocystis* ส่วนใหญ่จะเป็นพวกสาหร่ายทะเลใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงมากกว่าสาหร่ายขนาดเล็ก

2.2 สาหร่ายขนาดเล็ก (microalgae)

สาหร่ายประเภทนี้จัดเป็นสาหร่ายที่มีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า สาหร่ายชนิดนี้เส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 2 ไมโครเมตร เช่น สาหร่าย *Spirulina* sp. และ *Chlorella* sp. สาหร่ายขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงเหมือนกับพืชสามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว ใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงน้อย สามารถเจริญเติบโตได้ดีทั้งในน้ำกร่อย น้ำเค็ม และมีวงจรชีวิต (generation time) สั้น นอกจากนี้ข้อดีของสาหร่ายขนาดเล็กในด้านของพลังงานคือ ปริมาณน้ำมันที่ได้ต่อพื้นที่ในการเพาะเลี้ยงมากกว่าพวกพืชน้ำมัน (oilseed crops) และชีวมวลของสาหร่ายขนาดเล็ก 1 กิโลกรัมสามารถใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 1.8 กิโลกรัม และให้ออกซิเจนออกมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงเหมือนพืช นั่นคือสามารถใช้พลังงานจากแสงเป็นแหล่งพลังงานใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน และนอกจากนี้สารอินทรีย์ต่างๆ สามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานโดยสาหร่ายขนาดเล็ก

3. ลักษณะของสาหร่ายที่แตกต่างจากพืชทั่วไป

สาหร่ายจัดเป็นพืชชั้นต่ำ เพราะมีคลอโรพลาสต์จึงสร้างอาหารเองได้ แต่มีความแตกต่างจากพืชในดิวิชันอื่นๆ ดังต่อไปนี้

3.1 สาหร่ายอาจจะประกอบไปด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียว หรืออยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (colony) มีบางชนิดที่ประกอบด้วยเซลล์พวกวาเลนไคมา (parenchyma) มองดูคล้ายราก ลำต้น และใบ ซึ่งรวมเรียกว่า ทัลลัส เช่น สาหร่ายสีเขียวบางชนิด สาหร่ายสีน้ำตาล และสาหร่ายสีแดง

อย่างไรก็ตามกลุ่มเซลล์ดังกล่าวยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง(differentiation)ไปเป็นเนื้อเยื่อ(tissue)หรืออวัยวะ

3.2 สาหร่ายไม่มีระบบท่อลำเลียง (vascular system) แต่สาหร่ายที่มีท่ลึกลับบางชนิดจะมีเซลล์ที่คล้ายคลึงกับเนื้อเยื่อชนิดโฟลเอ็ม (phloem) และเนื้อเยื่อเมอริสเทม (meristematic tissue) แต่ยังไม่มีการมีไซเลม (xylem)

เซลล์สืบพันธุ์ของสาหร่ายประกอบด้วย เซลล์เพียงเซลล์เดียวโดยไม่มีชั้นของเซลล์อื่นๆมาห่อหุ้มด้วยพวกที่ประกอบด้วยเซลล์เดียวเซลล์ทำหน้าที่เป็นแกมมิตอไมต์ในพวกที่อยู่เป็นกลุ่มก็จะมีเซลล์เพียง 1 เซลล์ทำหน้าที่สร้างแกมมิตอไมต์ในสาหร่ายบางชนิด เช่น สาหร่ายสีน้ำตาล สาหร่ายสีแดง และสาหร่ายไฟที่อวัยวะสร้างแกมมิตอไมต์หลายเซลล์ส่วนไซโกท (zygote) ของสาหร่ายยังไม่มีการพัฒนาเป็นเอ็มบริโอ (embryo)

4. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย (จกกล, 2552)

4.1 ธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง

4.1.1 ธาตุอาหารหลัก (macronutrient) หมายถึง ธาตุอาหารที่สาหร่ายสามารถนำไปใช้ในการสร้างโครงสร้าง เช่น ใช้ในการสร้างผนังเซลล์เยื่อเซลล์ สารสีโปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ธาตุอาหารหลักที่สาหร่ายใช้ในการเจริญเติบโตค่อนข้างมากได้แก่คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม ซัลเฟอร์ และโพแทสเซียม

1) คาร์บอนที่สาหร่ายนำไปใช้ได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1.1) อนินทรีย์คาร์บอนสาหร่ายจะใช้ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งละลายน้ำหรือในรูปของเกลือคาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต การที่คาร์บอนจะอยู่ในรูปใดนั้นขึ้นอยู่กับระดับของค่าพีเอชในน้ำ เช่นค่าพีเอชเท่ากับ 5 คาร์บอนจะอยู่ในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7-9 คาร์บอนจะอยู่ในรูปของเกลือไบคาร์บอเนตและค่าพีเอช สูงกว่า 9.5 คาร์บอนจะอยู่ในรูปของเกลือคาร์บอเนต

1.2) อินทรีย์คาร์บอนสาหร่ายจะใช้ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ซึ่งจะช่วยให้การเจริญเติบโต ได้แก่ น้ำตาลชนิดต่าง ๆ เช่น ซูโครส กลูโคส และกาแลคโตส

2) ไนโตรเจนมีความสำคัญรองลงมาจากคาร์บอนปริมาณสาหร่ายจะมีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบประมาณ 7-10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ยกเว้นไดอะตอมซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนน้อยกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่น เนื่องจากซิลิกาเป็นธาตุอาหารที่สำคัญของผนังเซลล์ได

อะตอมสาหร่าย สีเขียวแกมน้ำเงินที่มี heterocyst จะมีความสามารถใช้ตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้โดยทั่วไปสาหร่ายสามารถไนโตรเจนในรูปของ $\text{NH}_3\text{-N}$ ในไนโตรเจนที่แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1) อนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท

โดยปกติแล้วแอมโมเนียจะถูกสาหร่ายนำไปใช้ก่อนไนเตรท ส่วนไนไตรท์สาหร่ายต้องการในปริมาณที่น้อยหรืออาจจะไม่ใช้เลย สำหรับไนเตรทนั้นถ้าสาหร่ายนำไปใช้ดูดซึมเข้าสู่เซลล์แล้วต้องเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียก่อนจึงนำไปใช้ได้ถ้าในน้ำมีทั้งแอมโมเนียและไนเตรทสาหร่ายจะเลือกดูดซึมแอมโมเนียก่อนเพราะจะได้ไม่ต้องเสียพลังงานในการเปลี่ยนไนเตรทให้แอมโมเนีย ดังนั้นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายทะเลแอมโมเนียจึงเป็นแหล่งไนโตรเจนของสาหร่าย

2.2) อินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ ยูเรียเอไมด์กลูตามีนและแอสพารา

จีนซึ่งจัดว่าเป็นแหล่งไนโตรเจนชนิดดี ส่วนสารอินทรีย์ไนโตรเจนชนิดอื่นกรดอะมิโนโดยเฉพาะกรดไกลซีน เซรีนอะลามีนกรดกลูตามิกและกรดแอสพาร์ตินิกนั้นสาหร่ายต้องการใช้เพื่อการเติบโตซึ่งจะแตกต่างกันตามชนิดของสาหร่ายไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์พันธุกรรมของสาหร่ายโดยเป็นองค์ประกอบของนิวคลีโอไทด์ (nucleotide) กรดอะมิโนและสารสีบางชนิด เช่นคลอโรฟิลล์ ถ้าสาหร่ายขาดไนโตรเจนจะมีผลต่อการสังเคราะห์แสง และปริมาณสารสีของเซลล์รวมทั้งทำให้กิจกรรมของเอนไซม์บางชนิดลดลง

3) ฟอสฟอรัส เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อกระบวนการต่างๆของเซลล์โดยเฉพาะกระบวนการถ่ายเทพลังงานและกระบวนการสร้างกรดนิวคลีอิกแม้ว่าในแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีปริมาณสารอินทรีย์ฟอสฟอรัสสูงกว่าอนินทรีย์ฟอสฟอรัส สาหร่ายต้องการใช้สารอนินทรีย์ฟอสฟอรัสมากกว่าโดยสาหร่ายต้องการใช้จะอยู่ในรูปออร์โธฟอสเฟต (orthophosphate) ซึ่งสาหร่ายสามารถนำไปใช้ได้โดยตรง ความต้องการฟอสฟอรัสของสาหร่ายแต่ละชนิดไม่เท่ากันสาหร่ายสีเขียวจะมีความต้องการฟอสฟอรัสมากกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่น ถ้าสาหร่ายขาดฟอสฟอรัสจะมีผลเสียต่อการเจริญเติบโตทำให้ปริมาณสารสีชนิดคลอโรฟิลล์เอ อาร์เอ็นเอ และดีเอ็นเอลดลงแต่แบ่งหรือคาร์โบไฮเดรตกลับเพิ่มขึ้นมีผลทำให้รูปร่างของเซลล์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

4) ซัลเฟอร์เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อสาหร่ายทุกชนิดซัลเฟอร์ในเซลล์สาหร่ายมีหลายรูปแบบเช่น ในรูปกรดอะมิโน วิตามินบี กรดแพนโทเทนิกกรดลิโพอิก และอื่นๆ ซัลเฟอร์ที่สาหร่ายใช้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารอนินทรีย์ได้แก่เกลือของโลหะคือซัลเฟตแต่ถ้าเป็นสถานะที่ขาดออกซิเจน เช่น ในบริเวณแหล่งน้ำปิดหรือพื้นที่ที่ตื้นน้ำ จะใช้ในรูปของซัลไฟด์

5) แคลเซียมเป็นธาตุอาหารที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการสร้างเกล็ดและโครงสร้างของสาหร่ายโดยเฉพาะสาหร่ายน้ำเค็มหรือมีบทบาทสำคัญในการสร้างผนังของเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้โดยปกติแล้วธรรมชาติจะมีปริมาณแคลเซียมเพียงพอที่สาหร่ายจะนำไปใช้ได้ นอกจากนี้สาหร่ายบางประเภทมีความต้องการแคลเซียมเพื่อใช้ในการสร้างโครงสร้างภายนอก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องดูดซึมแคลเซียมจากน้ำทะเลค่อนข้างมาก

6) โซเดียมและโพแทสเซียม โซเดียมเป็นธาตุอาหารที่สาหร่ายบางชนิดต้องการ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินต้องการโซเดียมในปริมาณมากกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นที่อยู่ในน้ำจืดเป็นธาตุอาหารที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการกิจกรรมของเอนไซม์หลายชนิดเป็นตัวควบคุมการทำงานของหน้าที่ต่าง ๆ ของเซลล์ สำหรับโพแทสเซียมนั้นจัดว่าเป็นธาตุอาหารที่เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์หลายชนิดและยังจำเป็นสำหรับการสังเคราะห์แสงถ้าสาหร่ายขาดโพแทสเซียมจะทำให้การสังเคราะห์แสงลดลงและการหายใจเพิ่มขึ้น สาหร่ายใช้โซเดียมทดแทนโพแทสเซียมในกรณีที่แหล่งน้ำขาดธาตุโพแทสเซียม

7) แมกนีเซียม เป็นธาตุอาหารที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมโดยสาหร่ายจะนำไปใช้ในการสร้างคลอโรฟิลล์ซึ่งแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบของนิวคลีอัสในคลอโรฟิลล์

4.2 ธาตุอาหารรอง(micronutrient)หมายถึง ธาตุอาหารที่สาหร่ายสามารถนำไปใช้เป็นตัวช่วย กระตุ้นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์ ซึ่งสาหร่ายจะต้องการธาตุอาหารประเภทนี้ในปริมาณน้อยโดยปกติธาตุอาหารรองจะแบ่งออกเป็น 2กลุ่มย่อยคือ

4.2.1 ธาตุอาหารรองอนินทรีย์ (inorganic micronutrients) ธาตุอาหารรองอนินทรีย์ที่สาหร่ายส่วนมากต้องการใช้ ได้แก่ เหล็ก แมกนีเซีย สังกะสี ทองแดง โคบอลต์ โบรอน โซเดียม และซิลิกา

1) เหล็ก เป็นธาตุอาหารที่ช่วยในการดูดซึมไนโตรเจน รวมไปถึงกระบวนการสังเคราะห์แสง คือ ช่วยสร้างคลอโรฟิลล์เอ และซีไฟโคไซยานินมีความจำเป็นต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ในน้ำทะเลมีเหล็กอยู่มากเกินไปสำหรับความต้องการของสาหร่ายแต่อาจจะขาดแคลนได้ เนื่องจากเหล็กเมื่อถูกชะล้างลงสู่น้ำทะเลแล้วส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ สารตัวนี้มีลักษณะเป็นคอลลอยด์คล้ายวุ้นใสๆ และจับกับสารอินทรีย์อื่นจมลงสู่พื้นทะเล ถ้าสาหร่ายขาดเหล็กจะทำให้เมตาบอลิซึมต่ำลงส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลงด้วย

2) โบรอน เป็นธาตุอาหารที่สาหร่ายบางชนิดต้องการใช้ ได้แก่ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและไดอะตอม โดยเฉพาะไดอะตอมน้ำเค็ม

3) แมงกานีส ทองแดงและสังกะสีเป็นธาตุอาหารที่เป็นองค์ประกอบสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายรวมทั้งเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นของเอนไซม์อีกหลายชนิดถ้าขาดจะทำให้การสังเคราะห์แสงลดลงและการหายใจเพิ่มขึ้น ธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิดนี้ถ้ามีมากเกินไปสาหร่ายจะตาย

4) โมลิบดีนัมวานาเดียมโคบอลต์โมลิบดีนัมมีบทบาทสำคัญในการตรึงไนโตรเจนของสาหร่าย สีเขียวแกมน้ำเงิน นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ที่ช่วยในการสังเคราะห์ วานาเดียมเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายบางชนิด

5) ซิลิกา เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นที่สุดของไดอะตอมเพื่อใช้ในการสร้างผนังเซลล์ส่วนสาหร่าย ชนิดอื่นไม่จำเป็นมากนักปริมาณของซิลิกาในแหล่งน้ำธรรมชาติแตกต่างกันตามฤดูกาล ในขณะที่ไดอะตอมเกิดขึ้นจำนวนมากหรือเกิดการบูมปริมาณของซิลิกาในน้ำจะลดลงถ้าไดอะตอมขาดซิลิกาจะทำให้ผนังเซลล์บางลง

6) เซเลเนียม บทบาทของธาตุอาหารชนิดนี้ยังไม่เด่นชัดแต่มีข้อสังเกตจากการทดลองว่าถ้าปริมาณเซเลเนียมเพิ่มขึ้นจะมีสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเพิ่มขึ้น และไดอะตอมจะลดปริมาณลง

4.2.2 ธาตุอาหารรองอินทรีย์ (organic micronutrient) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อย ดังนี้

1) คาร์โบไฮเดรต ได้แก่ น้ำตาลชนิดต่าง ๆ เช่น เดกโตรสปกติจะให้ความเข้มข้น 0.2 - 0.5 เปอร์เซ็นต์ ในการเลี้ยงสาหร่ายจะมีการเติมน้ำตาลในอาหารเลี้ยงสาหร่ายหลังจากการนิ่งมาเชื้อแล้วมีฉะนั้นน้ำตาลจะสลายตัว

2) เกลืออินทรีย์หรือสารประกอบที่มีเกลืออินทรีย์ได้แก่ เกลือแอมิโน เช่น โซเดียมแอมิโนเตท โพแทสเซียมแอมิโนเตท ความเข้มข้นที่ใช้ 0.1-0.5 เปอร์เซ็นต์

3) วิตามิน ได้แก่ วิตามินบี 3 ชนิดคือ บี 1 และบีรวมควรเติมในอาหารเลี้ยงสาหร่ายหลังจากผ่านการนิ่งมาเชื้อแล้ว ได้แก่ อาหารที่ช่วยการเจริญเติบโตของสาหร่าย เช่น แอดีนิน (adenine) ไคเนติน(kinetin) ทั้ง 2 ชนิดที่นิยมใช้ คือ กรดจิบเบอเรลลิกละลายในน้ำได้ดี และกรดอินคอลลีสมบัตินละลายได้ดีเล็กน้อยในน้ำร้อนและสลายตัวง่ายเมื่อถูกแสงสว่าง

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการดูดซึมธาตุอาหารของจุลสาหร่าย

1. ปัจจัยทางกายภาพ

ปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายได้แก่

1.1 แสงมีอิทธิพลทางอ้อมต่ออัตราการดูดซึมธาตุอาหารโดยผ่านทาง การสังเคราะห์แสง สาหร่ายแต่ละชนิดความเหมาะสมของปริมาณแสงจะแตกต่างกัน

1.2 อุณหภูมิมีผลต่อการดูดซึมธาตุอาหารและกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิสูงจะทำให้กระบวนการเมตาบอลิซึมสูงขึ้นส่งผลให้การดูดซึมธาตุอาหารของสาหร่ายเพิ่มขึ้นด้วย ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะจำกัดการเจริญเติบโตของสาหร่าย

1.3 การเคลื่อนตัวของน้ำ มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย พบว่าสาหร่ายที่เลี้ยงอยู่ในน้ำที่เคลื่อนไหวตลอดเวลา มีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าสาหร่ายที่อยู่ในน้ำนิ่ง เนื่องจากไออนสามารถผ่านและแพร่ผ่านเข้าสู่เซลล์ได้แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุอาหารด้วย

2. ปัจจัยทางเคมี ปัจจัยทางเคมีที่มีผลต่อการดูดซึมธาตุอาหารของสาหร่าย คือ ความเข้มข้นของธาตุอาหาร กล่าวคือถ้าสาหร่ายอยู่ในน้ำที่มีความเข้มข้นของธาตุอาหารสูงๆจะทำให้อัตราการดูดซึมธาตุอาหารมีมากขึ้น

3. ปัจจัยทางชีวภาพ ปัจจัยทางชีวภาพที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายได้แก่

3.1 อายุของทลัสสาหร่าย สาหร่ายที่ยังอ่อนหรืออายุน้อยจะสามารถดูดซึมธาตุอาหารได้ดีกว่าสาหร่ายที่มีอายุมาก

3.2 สภาพของสาหร่าย สาหร่ายที่อยู่ในบริเวณที่มีธาตุอาหารแตกต่างกันพบว่าสาหร่ายอยู่ในบริเวณที่มีธาตุอาหารปริมาณมากเมื่อนำมาเลี้ยงใหม่เพื่อศึกษาการดูดซึมธาตุอาหารพบว่าจะมีอัตราการดูดซึมน้อยกว่าสาหร่ายที่อยู่ในบริเวณที่มีธาตุอาหารปริมาณน้อย

การใช้ประโยชน์จากจุลสาหร่าย

ยุวดี พิรพรพิศาล (2556) ได้กล่าวไว้ว่าสาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่เราสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้านดังนี้

1. ใช้เป็นอาหารมนุษย์มนุษย์รู้จักนำสาหร่ายมาใช้เป็นอาหารนานนับพันปีแล้วเช่น ชาวจีนญี่ปุ่นใช้สาหร่ายสีน้ำตาล (*laminaria*) และสาหร่ายสีแดง (*porphyra*) หรือที่เรียกว่าจี๋ฉ่ายมาทำอาหารพวกแกงจืดญี่ปุ่นผสม *Chlorella* sp. ลงในชาซูบะผลไม้บะหมี่และไอศกรีม

2. ใช้เป็นอาหารสัตว์สาหร่ายสามารถนำไปเลี้ยงสัตว์กระเพาะเดี่ยวเช่นหอยและสัตว์ปีกได้เป็นอย่างดีนอกจากนี้สาหร่ายยังเป็นอาหารที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำวัยอ่อนที่กินพืชเป็นอาหารเช่นปลากุ้งและแพลงตอนสัตว์เช่นไรแดงไรน้ำเค็มในประเทศญี่ปุ่นใช้สาหร่ายเกลียวทองเลี้ยงปลาไหลปลาเทราท์กุ้งปลาคาร์พเป็นต้น

3. ใช้ในการกำจัดน้ำเสียการใช้สาหร่ายในการกำจัดน้ำเสียร่วมกับแบคทีเรียจะมีหลักการที่แบคทีเรียจะทำการย่อยสารประกอบอินทรีย์ต่างๆที่มีอยู่ได้แก่โปรตีนคาร์โบไฮเดรตไขมันให้เป็นสารประกอบอนินทรีย์เช่นแอมโมเนียมไนเตรดคาร์บอนไดออกไซด์และเกลือแร่ต่างในสภาพการเกิดที่มีอากาศ (*aerobic*) หรือไม่มีอากาศ (*anaerobic*) จากนั้นสาหร่ายจะใช้สารประกอบเหล่านี้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมต่างๆสำหรับสาหร่ายที่ได้จากระบบกำจัดน้ำเสียนี้อาจนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ปศุสัตว์หรือใช้ในการทำก๊าซชีวภาพได้

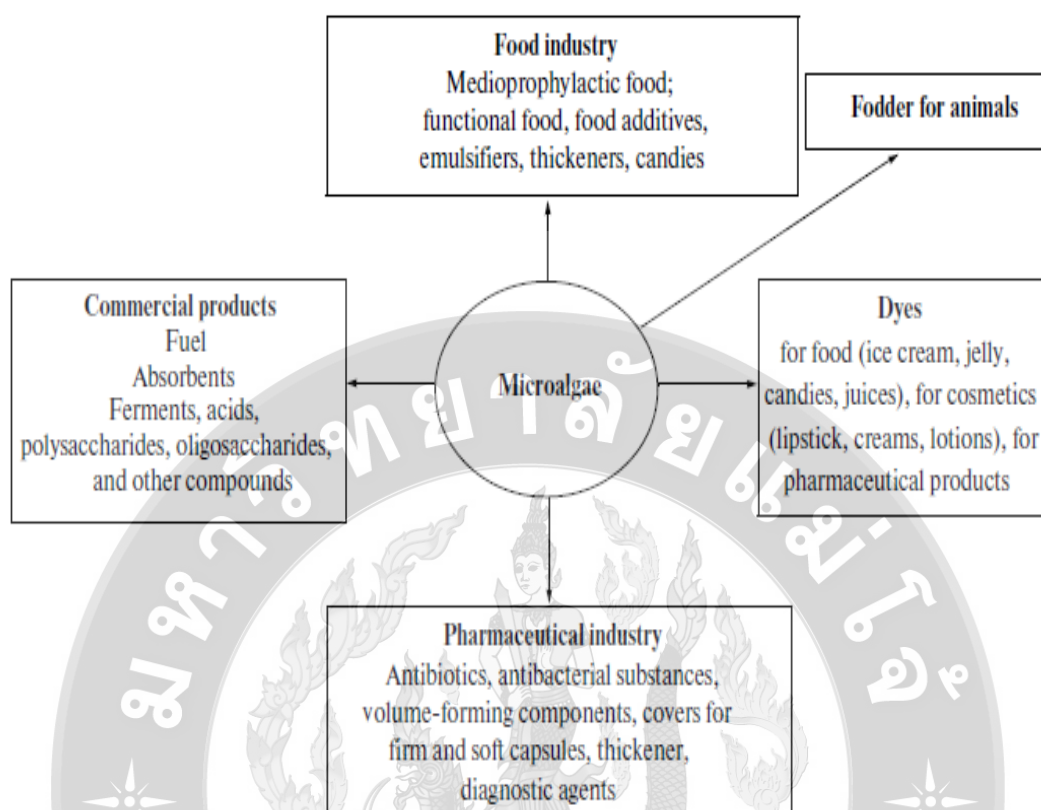
4. ใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวรู้จักกันแพร่หลายในแง่ของการใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพการวิจัยของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยพบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในนาข้าวบางชนิดสามารถตรึงไนโตรเจนในอากาศ ให้เป็นสารประกอบไนโตรเจน เช่น แอมโมเนียมทำให้ข้าวเจริญเติบโตส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ *Anabaena* sp. และ *Nostoc* sp. พันธุ์ที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยพบในประเทศและให้ผลผลิตดีมีชื่อว่า *Anabaena siamensis*

5. ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางสาหร่ายประกอบด้วยสารเคมีบางชนิดที่ช่วยในการรักษาผิวหนังเช่นแผ่น *kanembu* ที่อยู่รอบทะเลสาบได้ใช้สาหร่ายเกลียวทองรักษาโรคผิวหนังบางชนิดการศึกษาในประเทศญี่ปุ่นพบว่าเครื่องสำอางที่ผสมสาหร่ายและสารสกัดจากสาหร่ายเกลียวทองช่วยให้ผิวพรรณดีขึ้นและลดริ้วรอยในประเทศไทยก็ได้มีบริษัทหลายแห่งที่ใช้สาหร่ายเกลียวทองเป็นเครื่องสำอางในรูปครีมบำรุง

6. ใช้ในอุตสาหกรรมยานักวิทยาศาสตร์และนายแพทย์หลายท่านได้ทดลองใช้สาหร่ายเกลียวทองในการป้องกันและรักษาโรคต่างๆ เช่น โรคเบาหวาน โรคกระเพาะอาหาร ทั้งยังช่วยลดความเครียดและความไม่สมดุลในร่างกาย ประเทศฝรั่งเศสทดลองใช้ยาที่ผสมสาหร่ายเกลียวทองทาแผลทำให้แผลแห้งเร็วขึ้น ชาติแมกนีเซียมในคลอโรฟิลล์ยังมีบทบาทอย่างสำคัญในการรักษาบาดแผล มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อป้องกันการเกิดของแบคทีเรียและช่วยสร้างเซลล์ขึ้นมาใหม่ด้วยคลอโรฟิลล์ในสาหร่ายมีโครงสร้างเหมือนสารสีแดงในเลือด (hemo-globin) นักวิทยาศาสตร์จึงแนะนำให้ใช้คลอโรฟิลล์รักษาโรคโลหิตจาง นอกจากนี้สาหร่ายบางชนิดสารปฏิชีวนะซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวงการแพทย์ได้แก่ cyanophycin หรือ marinamycin ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคต่างๆ ได้ สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว *Scytonema* No.11 เป็นสาหร่ายที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยแยกได้จากดินนา จังหวัดพิษณุโลกพบว่าสามารถผลิตสารปฏิชีวนะ *Cyanobacterin* ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นทั้ง algicide และ bactericide ที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายและแบคทีเรียบางชนิดได้

7. ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ สาหร่ายสีแดงพวก gelidium และ gracilaria สามารถนำไปสกัดทำเป็นวุ้นเพื่อนำไปใช้ในการประกอบอาหารและเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

จะเห็นได้ว่าประโยชน์ของสาหร่ายนั้นมีมากมาย ซึ่งสาหร่ายมีความสำคัญต่อมนุษยชาติในด้านต่างๆ ทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและการนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ประโยชน์ของจุลสาหร่าย

ที่มา:Varfolomeev and Wassermanc(2011)

ประโยชน์ของจุลสาหร่ายในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จุลสาหร่ายนั้นมีอยู่มากมายหลายชนิดและสามารถพบได้ทั่วไปในทุกสภาพแวดล้อม โดยได้มีการนำเอาจุลสาหร่ายหลายชนิดมาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะการนำมาผลิตเป็นอาหารและพัฒนาเป็นแหล่งพลังงาน เนื่องจากจุลสาหร่ายมีปริมาณสารอาหารที่สำคัญหลายชนิดเมื่อเทียบกับแหล่งอาหารชนิดอื่นๆ ปัจจุบันมีการนำจุลสาหร่ายมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง มีการผลิตสาหร่ายชนิดนี้เป็นอุตสาหกรรมในหลายแห่งทั่วโลก ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจะมีทั้งผลิตภัณฑ์ในรูปอาหารเสริมเพื่อสุขภาพมนุษย์ และที่สำคัญจุลสาหร่ายนั้นทำหน้าที่ในฐานะผู้ผลิตในระบบนิเวศ ซึ่งเป็นการช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากกระบวนการสังเคราะห์แสงได้เป็นอย่างดี ในปัจจุบันการเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างต่อเนื่องนั้น มีสาเหตุสำคัญมาจากการเผา

ไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และแก๊สธรรมชาติ เชื้อเพลิงเหล่านี้นิยมใช้เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในการคมนาคมขนส่งและโรงงานอุตสาหกรรม โดยทั่วไปก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้จะประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 10-20% ซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าในบรรยากาศถึง 500 เท่า ซึ่งทั่วโลกมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศมากถึง 68% ซึ่งปัจจุบันเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ (Hoet *et al.*, 2011)

นอกจากนี้สาหร่ายยังช่วยลดก๊าซเรือนกระจก โดยในกระบวนการสังเคราะห์แสงสาหร่ายจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นวัตถุดิบ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีผลให้อุณหภูมิของโลกร้อนขึ้น ซึ่งพบว่ามีสาหร่ายหลายชนิดที่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง ๆ ได้นั้น มีอยู่ด้วยกันหลายสายพันธุ์ ดังแสดงในตาราง 2 และสาหร่ายยังช่วยเบาด่างปรกฏการณ์โลกร้อนเช่นเดียวกับพืชทั่วไป

ในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งเน้นในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ประโยชน์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของจุลสาหร่าย ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากจุลสาหร่ายมีการเติบโตโดยใช้แสงเป็นพลังงาน และใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์แสง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารอาหารหลักเพื่อการเติบโตและสร้างชีวมวล ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสามารถนำชีวมวลของจุลสาหร่ายไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถนำเซลล์ที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์แล้วกลับไปใช้เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถนำกลับไปใช้ในการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายได้ใหม่ (Ahmet *et al.*, 2012)

ตารางที่ 2 ชนิดของจุลสาหร่ายที่มีความทนทานต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณสูง

ชนิดของจุลสาหร่าย	ปริมาณสูงสุด CO ₂ (% V/V)
<i>Cyanidium caldarium</i>	100
<i>Scenedesmus</i> sp.	80
<i>Chlorococcum littorale</i>	60
<i>Synechococcus elongatus</i>	60
<i>Euglena gracilis</i>	45
<i>Chlorella</i> sp.	40
<i>Eudorina</i> spp.	20
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	15
<i>Nannochloris</i> sp.	15
<i>Chlamydomonas</i> sp.	15
<i>Tetraselmis</i> sp.	14

ที่มา: Salih (2011)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ho et al., (2010) ได้ศึกษาถึงจุลสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* CNW-N ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการผลิตไบโอดีเซล ผลการศึกษาพบว่า *Scenedesmus obliquus* CNW-N เจริญเติบโตเร็วที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 10% ในสถานะที่ขาดไนโตรเจน ซึ่งพบว่ามีปริมาณการผลิตชีวมวลอยู่ที่ 292.50 mg/L.d มีปริมาณการผลิตไขมัน 78.73 mg/L.d (38.9% ของปริมาณไขมันต่อน้ำหนักเซลล์แห้ง) และมีอัตราการใช้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 549.90 mg/L.d ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นว่าจุลสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* CNW-N ภายใต้สถานะที่ขาดไนโตรเจน สามารถผลิตกรดไขมัน (C16/C18) ถึง 89% ของกรดไขมันทั้งหมด ซึ่งเป็นที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซล

Chan (2011) ได้ทำการศึกษาการใช้จุลสาหร่ายในการบำบัดน้ำเสียและกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่าการใช้จุลสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* และ *Spirulina maxima* ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 100% และ 98% ตามลำดับ

Kao et al., (2012.a) ได้ศึกษาถึงความสามารถในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้จุลสาหร่าย *Chlorella* sp. ในการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการศึกษาพบว่าสามารถลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี และทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงขึ้นจากเดิม 70% เป็น 87% และมีอัตราการเติมก๊าซลงในสาหร่ายอยู่ที่ 0.05 vvm และ *Chlorella* sp. จะเจริญได้ดีต้องมีความเข้มข้นของปริมาณก๊าซอยู่ที่ H_2S มีค่าน้อยกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

กรรชิต และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของจุลสาหร่ายสไปรูลินา โดยทำการเลี้ยงจุลสาหร่ายสไปรูลินาด้วยอาหารสูตร Zarrouk's medium ในขวดคาร์บอนยี่ห้อ 8 ลิตร มีความเข้มข้นเริ่มแรก OD_{560} ที่ 0.8 ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเป็นเวลา 7 วัน โดยให้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ และให้อากาศด้วยเครื่องเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (99%) ที่อัตราการไหล 0.02 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการศึกษาพบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลผลิตที่ดีกว่าชุดควบคุม โดยมีค่าน้ำหนักแห้งสูงสุด 1,720 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า OD_{560} เท่ากับ 1.4 ในขณะที่ชุดควบคุมมีค่าลดลงตลอดการทดลอง นอกจากนี้พบว่าชุดการทดลองสามารถลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากที่สุด 93.53%

ธนนิช และคณะ (2556) ได้ศึกษาถึงงานการคัดเลือกสาหร่ายขนาดเล็กที่สามารถทนอุณหภูมิสูงกว่าปกติและสามารถทนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ความเข้มข้นสูง 100% (v/v) ด้วยอัตราการไหล 0.2 vvm ใน Jaworski's Medium จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์เดี่ยว 5 สายพันธุ์และสายพันธุ์ผสม 1 กลุ่มที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 6 วันพบว่าสายพันธุ์ที่สามารถเจริญคือ *Chlorella* sp. AARL GL049, *Chlorella* sp. AARL G012 และสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ผสมโดยมีน้ำหนักเซลล์แห้งเท่ากับ 0.0453 ± 0.0012 , 0.0343 ± 0.0012 และ 0.0152 ± 0.0029 g.L⁻¹ ตามลำดับผลการวิจัยมีแนวโน้มที่ดีที่จะนำสาหร่ายขนาดเล็กมาใช้ประโยชน์ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

สุนิสา และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาถึงการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายผสมขนาดเล็กเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และผลิตน้ำมันชีวภาพ โดยการให้อากาศปกติ (0.03% CO₂) การให้ 10% CO₂ และ 30% CO₂ พบว่าสาหร่ายเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในสถานะที่มีการให้ 30% CO₂ โดยมีน้ำหนักเซลล์แห้งสูงสุดในวันที่ 16 เท่ากับ 0.36 กรัมต่อลิตร สาหร่ายชนิดเด่นที่พบคือ *Dictyosphaerium* sp., *Monoraphidium* sp. และ *Scenedesmus* sp. เมื่อนำชีวมวลสาหร่ายมาหาปริมาณไขมันพบว่า มีปริมาณไขมันสูง 27.60% (w/w) จากการประเมินการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าในสถานะที่มีการให้ 30% CO₂ สาหร่ายมีความสามารถในการกักเก็บก๊าซดังกล่าวสูงที่สุดถึง 1.4054 g CO₂/g algae/L/d ซึ่งสูงกว่าการให้อากาศปกติถึง 2 เท่า ซึ่งสาหร่ายผสมขนาดเล็กมีศักยภาพในการนำมาเพาะเลี้ยงเพื่อลดปริมาณก๊าซ CO₂ และนำไปผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพได้

วิธีการดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. สารเคมี

1.1 สูตรอาหาร Jaworski's medium สำหรับเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. *Chlorella* sp.

MJU *Scenedesmus* sp. และ *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522

1.1.1 สูตรอาหาร Jaworski's medium โดยเตรียม Stock solution ของสารเคมีทั้งหมด 9 อย่างดังนี้

1. $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2.000 g
2. KH_2PO_4	1.240 g
3. $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	5.000 g
4. NaHCO_3	0.225 g
5. EDTA FeNa	0.225 g
6. EDTA Na_2	0.225 g
7. H_3BO_3	0.248 g
8. $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.139 g
9. $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.100 g
10. Cyanocobalamin (Vitamin B12)	0.004 g
11. Thiamine HCL (Vitamin B1)	0.004 g
12. Biotin	0.004 g
13. NaNO_3	8.000 g
14. $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	3.600 g

นำสารแต่ละชนิดละลายในน้ำกลั่นอย่างละ 100 ml หลังจากนั้นนำ stock solution ทั้ง 9 ชนิดมาอย่างละ 1 ml ใส่ใน volumetric flask (ที่มีน้ำกลั่นอยู่เล็กน้อย) แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตรปรับค่า pH ให้ได้ 7 – 8

1.2 สูตรอาหาร Zarrouk's medium สำหรับเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina* sp.

สูตรอาหาร Zarrouk's medium มีวิธีเตรียมสารดังนี้

1.2.1 สารละลาย stock มีส่วนประกอบของสารอยู่ 8 ชนิดคือ

1. NaHCO_3	16.8 g
2. K_2HPO_4	0.5 g
3. NaNO_3	2.5 g
4. K_2SO_4	1.0 g
5. NaCl	1.0 g
6. $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.2 g
7. $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.04 g
8. $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.2 g

ละลาย FeSO_4 stock ในน้ำกลั่น 50 ml และละลาย $\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1.6 g ในน้ำกลั่น 50 ml แล้วผสมสารละลายที่เตรียมทั้งสองอย่างเข้าด้วยกันนำไปใช้ในปริมาณ 5 ml/L

1.2.2 สารละลาย A5 ประกอบด้วยสาร 5 ชนิดคือ

1. H_3BO_3	2.85 g
2. $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.81 g
3. $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.22 g
4. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.08 g
5. MoO_3	0.015 g

ละลายสารทั้งหมดด้วยน้ำกลั่นผสมให้เข้ากันในขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask) โดยมีน้ำกลั่นอยู่เล็กน้อยหลังจากนั้นทำการปรับปริมาตรให้ได้ครบ 1 L

1.2.3 สารละลาย B6 ประกอบด้วยสาร 6 ชนิดคือ

1. NH_4VO_3	230.0 μg
2. $\text{K}_2\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	960.0 μg
3. $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	478.5 μg
4. $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	179.4 μg
5. $\text{Ti}_2(\text{SO}_4)_3$	400.0 μg
6. $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	439.8 μg

ละลายสารทั้งหมดด้วยน้ำกลั่นผสมให้เข้ากันในขวดปรับปริมาตร (volumetric flask) โดยมีน้ำกลั่นอยู่เล็กน้อยหลังจากนั้นทำการปรับปริมาตรให้ครบ 1 L ผสมสารละลายทั้ง 3 ข้อมเข้าด้วยกันในขวดปรับปริมาตร (volumetric flask) โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้

ละลายสารในข้อ 1.2.1 ทุกชนิดด้วยน้ำกลั่นและเติม FeSO_4 stock 5 ml

ดูดสารละลาย stock A5 1 ml

ดูดสารละลาย stock B6 1 ml

ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 L (ปรับค่า pH ให้ได้ 10 ± 0.5)

2. สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษาจำนวน 5 ชนิด ได้แก่ *Spirulina* sp. *Chlorella* sp. *Chlorella* sp. MJU *Scenedesmus* sp. และ *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522

2.1 สาหร่าย *Spirulina* sp. ได้มาจากภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

2.2 สาหร่าย *Chlorella* sp. ได้มาจากการสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (energy research and development institute-nakornping)

2.3 สาหร่าย *Chlorella* sp. MJU ได้มาจากการสาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

2.4 สาหร่าย *Scenedesmus* sp. ได้มาจากการภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

2.5 สาหร่าย *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522 ได้มาจากการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

3. เครื่องมือ

3.1 pH Meter; Sartorius : Professional Meter PP-50

3.2 Air pump; AP-10 YAMANO

3.3 Balance; Mettler Toledo PL3002

3.4 UV-Visible Spectrophotometer; HACH ModelDR/4000U

3.5 Light Meter Model; LX-73 Digicon

3.6 Biogas5000; Geotech : UK.

3.7 Perlistertic pump; Watson marlow Pumps Model 520SIR UK.

3.8 Oven; memmert UM500 Germany

3.9 ตู้ดูดความชื้น; Weifo DRY-300-2 Taiwan

3.10 หม้อนึ่งความดัน (Autoclave); Labtech LAC-5100S Koror

3.11 เครื่องเขย่า

วิธีดำเนินการวิจัย

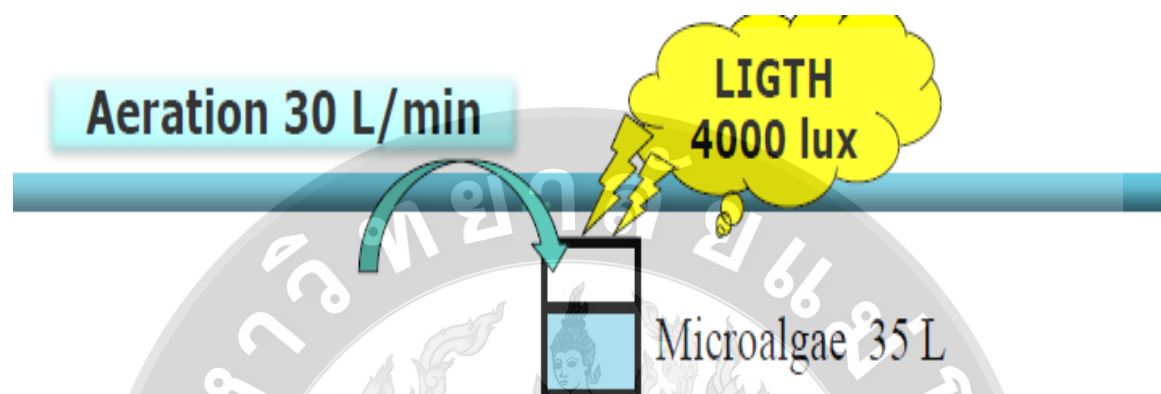
งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาชนิดของจุลสาหร่ายที่สามารถเจริญในสภาพที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง ๆ ได้ และมีประสิทธิภาพในลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี โดยทำการคัดเลือกจุลสาหร่ายที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการเพิ่มคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

การเตรียมหัวเชื้อจุลสาหร่าย

-คัดเลือกจุลสาหร่ายขนาดเล็กที่สัณยภาพและคุณค่าทางเศรษฐกิจ โดยทำการคัดเลือกจุลสาหร่ายที่เป็นที่นิยมโดยทั่วไปและเลี้ยงง่าย จำนวน 5 ชนิด ดังนี้ *Spirulina* sp. *Chlorella* sp. *Chlorella* sp. MJU *Scenedesmus* sp. และ *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522

-ทำการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่ายให้ได้ตามปริมาณที่ต้องการ โดยนำหัวเชื้อจุลสาหร่ายทั้ง 5 ชนิด มาเลี้ยงในอาหารเหลวเพื่อทำการเพิ่มปริมาณจุลสาหร่ายโดยใช้หัวเชื้อเริ่มต้นมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 0.8 จำนวน 2% โดยปริมาตรมาถ่ายลงถังขนาด 50 ลิตร ที่บรรจุอาหารเหลวปริมาตร 35ลิตร โดยให้แสงไฟจากหลอดไฟสีส้ม (warm white light) ค่าความเข้มแสงประมาณ 4,000 ลักซ์ (light meter model LX-73) โดยให้แสงตลอด 24 ชั่วโมง และให้อากาศจากเครื่องปั๊ม

อากาศที่อัตราการเติมอยู่ที่ 30 ลิตรต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเลี้ยงจุลสาหร่ายจนมีค่าการดูดกลืนแสง (optical density : OD) อยู่ในช่วง 0.4– 1 เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อตั้งต้นในการทดลองขั้นต่อไป ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงหัวเชื้อสาหร่ายแสดงดังภาพที่ 6-8



ภาพที่ 6 วิธีการเลี้ยงจุลสาหร่ายเพื่อเพิ่มปริมาณ



ภาพที่ 7 การเลี้ยงหัวเชื้อจุลสาหร่ายเริ่มต้น



ภาพที่ 8 การเลียงหัวเชื้อจุลสาหร่ายเพื่อเพิ่มปริมาณ

ขั้นตอนที่ 1 การทดลองประสิทธิภาพของจุลสาหร่ายแต่ละชนิดในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.1 นำหัวเชื้อจุลสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงไว้โดยมีค่าการดูดกลืนแสง (optical density : OD) อยู่ในช่วง 0.4– 1 มาทำการศึกษาโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ โดยทำการทดลองในถังปฏิกิริยาขนาด 10 ลิตร พื้นที่ทำการ 5 ลิตร ในชุดการทดลองที่ 1 หรือชุดควบคุม และเติมอากาศจากปั๊มเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง อัตรา 30 ลิตร/นาที ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นชุดการทดลองนั้นทำการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (99%) ที่อัตราการไหล 0.1 vvm ตลอดเวลาการทดลองโดยใช้เครื่อง peristaltic pump (WATSON MARLOW รุ่น 502S) ในการดูดจ่ายปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเวลา 16 วันโดยใช้แสงไฟจากหลอดไฟสีส้ม (warm white light) ค่าความเข้มแสงประมาณ 4,000 ลักซ์ (light meter model LX-73) ตลอด 24 ชั่วโมง และให้อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศที่อัตราการเติมอยู่ที่ 30 ลิตรต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 วันโดยทำการวิเคราะห์ดังนี้ (ภาพที่ 9 และ 10)

1.2 ศึกษาการเจริญของจุลสาหร่าย

1.2.1 การเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายในรูปของค่าการดูดกลืนแสง(OD) โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (HACH รุ่น DR/4000U) เพื่อดูแนวโน้มการเจริญเติบโตของจุลสาหร่าย โดยทำการตรวจวัดตัวอย่างทุก ๆ 2 วัน

1.2.2 การวิเคราะห์หาค่าเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายในรูปค่าน้ำหนักเซลล์แห้ง (cell dry weight) โดยทำการตรวจวัดตัวอย่างทุก ๆ 2 วัน โดยมีวิธีวิเคราะห์ดังนี้

1) โดยอบกระดาษกรอง GF/C 47 mm. (whatman) ในตู้อบอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักกระดาษกรองคงที่ นำไปวางให้เย็นในตู้ดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง (A)

2) กรองสาหร่ายปริมาตร 20 ml ผ่านกระดาษกรอง GF/C ที่อบแห้งแล้วจากข้อ 1) หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น

3) นำกระดาษกรอง GF/C ที่กรองสาหร่ายแล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง แล้วนำไปวางให้เย็นในตู้ดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง (B)

4) นำไปคำนวณหาน้ำหนัก

น้ำหนักกระดาษกรอง = A

น้ำหนักกระดาษกรอง + น้ำหนักจุลสาหร่าย = B

$$\text{น้ำหนักเซลล์จุลสาหร่ายแห้ง (mg/L)} = \frac{B - A \times 10^6}{\text{ปริมาตรจุลสาหร่ายที่นำมากรอง}}$$

1.2.3 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate)

$$\text{อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (วัน}^{-1}\text{)} = \frac{\ln(N/N_0)}{t}$$

N = ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย (จำนวนเซลล์/มล.)

N₀ = ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายวันแรก (จำนวนเซลล์/มล.)

t = เวลา (วัน)

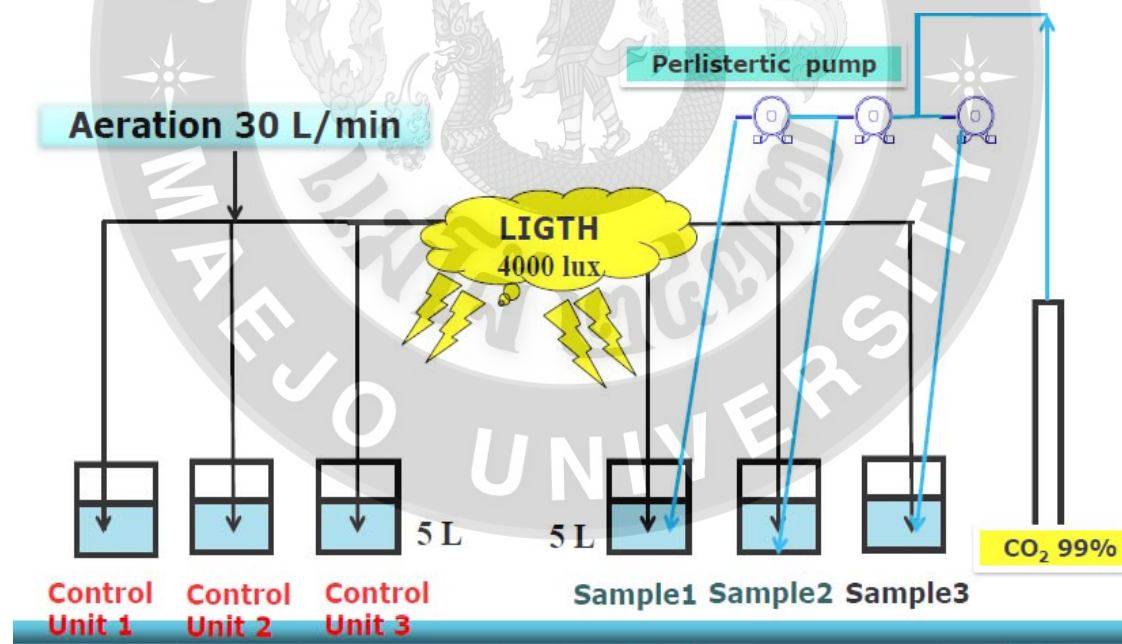
1.3 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) โดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter) โดยทำการตรวจวัดตัวอย่างทุก ๆ 2 วัน

1.4 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของจุลสาหร่าย

ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าสู่ชุดการทดลอง (influent of CO₂) และทำการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหลือจากการใช้ของจุลสาหร่ายที่ออกจากชุดการทดลอง (effluent of CO₂) โดยใช้เครื่อง Biogas5000 (ยี่ห้อ Geotech) ต่อเข้ากับชุดการทดลอง (ถังปฏิกิริยา) และทำการตรวจวัดทุกๆ 2 วันตลอดการทดลองในชุดการทดลอง แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของจุลสาหร่ายซึ่งคำนวณได้จากสมการ (Kao *et al.*, 2012.b)

$$\text{CO}_2 \text{ capture efficiency (\%)} = \frac{\text{Influent of CO}_2 - \text{Effluent of CO}_2}{\text{Influent of CO}_2} \times 100$$

1.5 ทำการทดลองซ้ำเดิมโดยเปลี่ยนชนิดของจุลสาหร่ายจนครบ 5 ชนิด และทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก 0.1 vvm เป็น 0.3 vvm



ภาพที่ 9 แผนภาพวิธีการเลี้ยงจุลสาหร่ายและการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชุดการทดลอง และชุดควบคุม



ภาพที่ 10 ชุดการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพของจุลสาหร่ายในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องปฏิบัติการ

ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพของจุลสาหร่ายในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

2.1 สร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยทำการหมักในถังหมักขนาด 200 ลิตร วันแรกเติม seed 100 ลิตร และมูลสุกร 20 ลิตร (ซึ่ง 800 กรัม ละลายน้ำ 20 ลิตร) เติมน้ำในถังหมัก และวันที่ 2 -5 เติมน้ำมูลสุกร 20 ลิตร ทุกวันจนครบ 5 วัน ทั้งนี้เป็นเวลา 1 สัปดาห์เพื่อให้เกิดก๊าซ และสร้างระบบเก็บก๊าซชีวภาพแบบแทนที่น้ำที่ประกอบด้วยถังบรรจุน้ำขนาด 200 ลิตร และถังบรรจุก๊าซขนาด 160 ลิตร ต่อท่อก๊าซจากถังหมักเข้าสู่ถังบรรจุก๊าซเพื่อให้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไหลมาเก็บยังถังเก็บหลังจากนั้นต่อจากถังเก็บเข้าสู่ชุดกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้เครื่อง Peristaltic pump (WATSON MARLOW รุ่น 502S) ที่อัตราการไหลที่เหมาะสมที่ได้จากตอนที่ 1

2.2 นำจุลสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเจริญได้ดีจากขั้นตอนที่ 1 มาทำการศึกษา โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในถังปฏิกริยาขนาด 10 ลิตร พื้นที่ทำการ 5 ลิตร ในชุดการทดลองที่ 1 หรือชุดควบคุม และเติมอากาศจากปั๊มเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง อัตราการไหล 30 ลิตรต่อนาที ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 2 นั้นทำการเติมก๊าซชีวภาพที่ได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยผ่านการ

กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยชุดกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่บรรจุผงซีเหล็ก (ภาพที่ 11 และ 12) โดยใช้เครื่อง Peristaltic pump (WATSON MARLOW รุ่น 502S) ที่อัตราการไหลที่เลือกไว้ เพื่อดึงก๊าซชีวภาพจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเข้าสู่ถังปฏิกิริยาที่เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย ทำการทดลองเป็นเวลา 16 วัน โดยให้แสงไฟจากหลอดไฟสีส้ม (warm white light) ค่าความเข้มแสงประมาณ 4,000 ลักซ์ (light meter model LX-73) ตลอด 24 ชั่วโมง และให้อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศที่อัตราการเติมอยู่ที่ 30 ลิตรต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง (ภาพที่ 13) ทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 2 วัน โดยทำการวิเคราะห์ดังนี้

2.2.1 โดยศึกษาถึงการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายในรูปของค่าการดูดกลืนแสง (OD) โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (HACH รุ่น DR/4000U) เพื่อดูแนวโน้มการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายและค่าน้ำหนักเซลล์แห้ง (cell dry weight)

2.2.2 วัดค่าความเป็นกรดด่าง โดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter) โดยทำการตรวจวัดตัวอย่างทุก ๆ 2 วัน

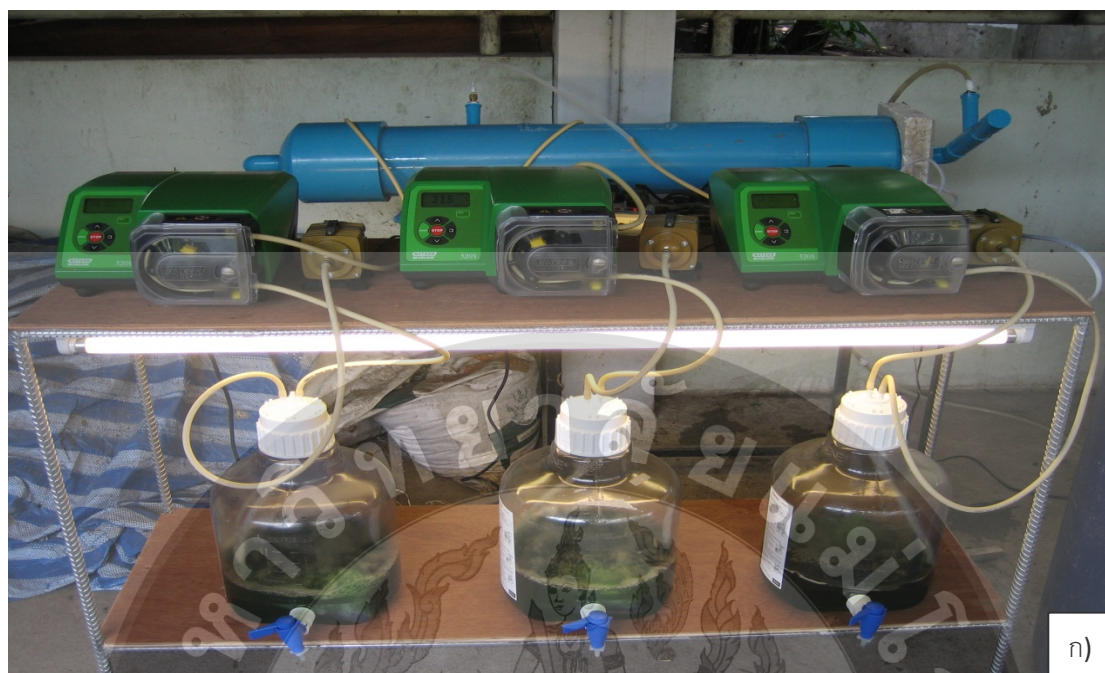
2.2.3 ศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยจุลสาหร่ายโดยทำการวัดปริมาณองค์ประกอบก๊าซชีวภาพก่อนเข้าสู่ชุดการทดลอง (influent of gas) และทำการวัดปริมาณองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ออกจากชุดการทดลอง (effluent of gas) โดยใช้เครื่อง Biogas5000 (ยี่ห้อ Geotech) ต่อเข้ากับชุดการทดลอง (ถังปฏิกิริยา) และทำการตรวจวัดทุกๆ 2 วัน ตลอดการทดลอง



ภาพที่ 11 ผงซีเหล็กที่ใช้กำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



ภาพที่ 12 ชุดกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยผงซีเหล็ก



ภาพที่ 13 ชุดการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพของจุลสาหร่ายในการลดปริมาณก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ก) ชุดทดลองถึงเพาะเลี้ยงสาหร่าย

ข) การต่อชุดทดลองถึงเพาะเลี้ยงสาหร่ายและระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

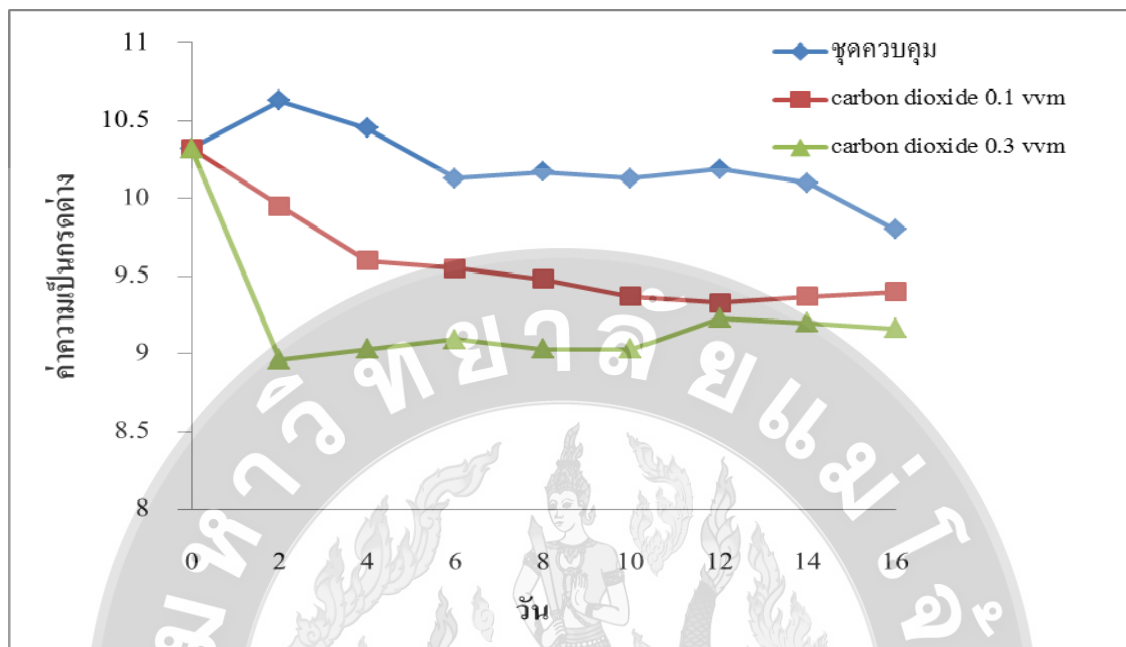
ผลการวิจัยและวิจารณ์

การศึกษาวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยจุลสาหร่ายนั้นได้ทำการศึกษาสาหร่าย จำนวน 5 ชนิด ได้แก่ *Spirulina* sp. *Chlorella* sp. *Chlorella* sp. MJU *Scenedesmus* sp. และ *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522 โดยในขั้นตอนแรกจะเป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพของสาหร่ายแต่ละชนิดในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และให้ผลผลิตที่ดี ขั้นตอนที่สองนั้นเป็นการเลือกสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากขั้นตอนแรกมาทำการศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่ายในการลดเพิ่มประสิทธิภาพก๊าซชีวภาพจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

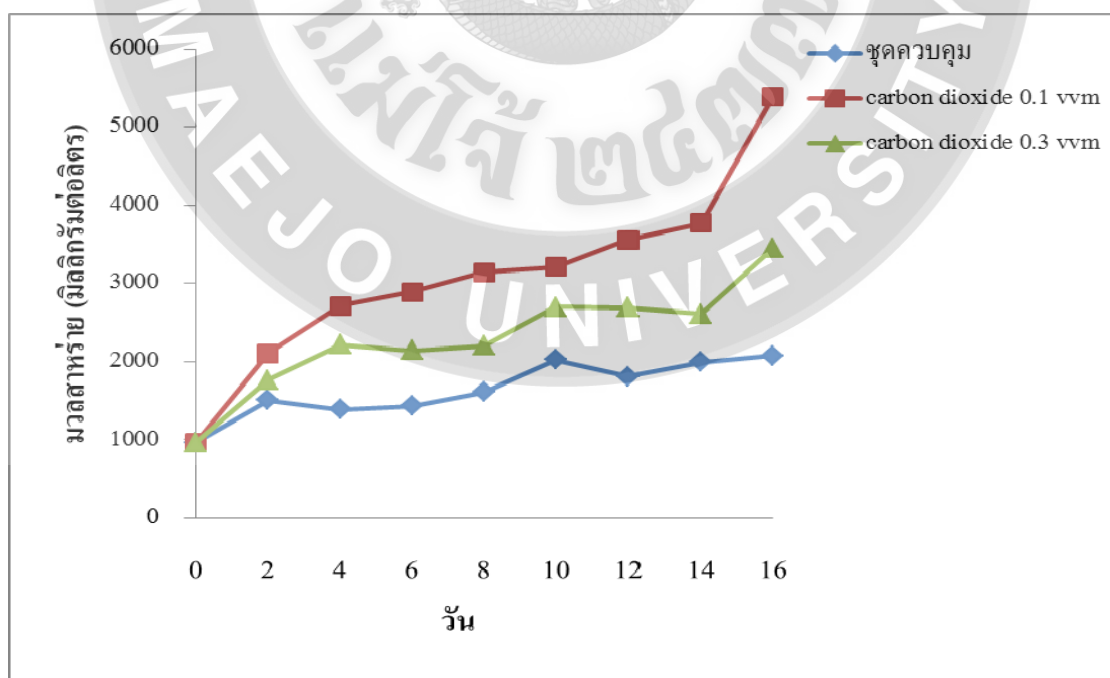
ประสิทธิภาพของจุลสาหร่าย (microalgae) แต่ละชนิดในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ให้ผลผลิตที่ดี

1. *Spirulina* sp.

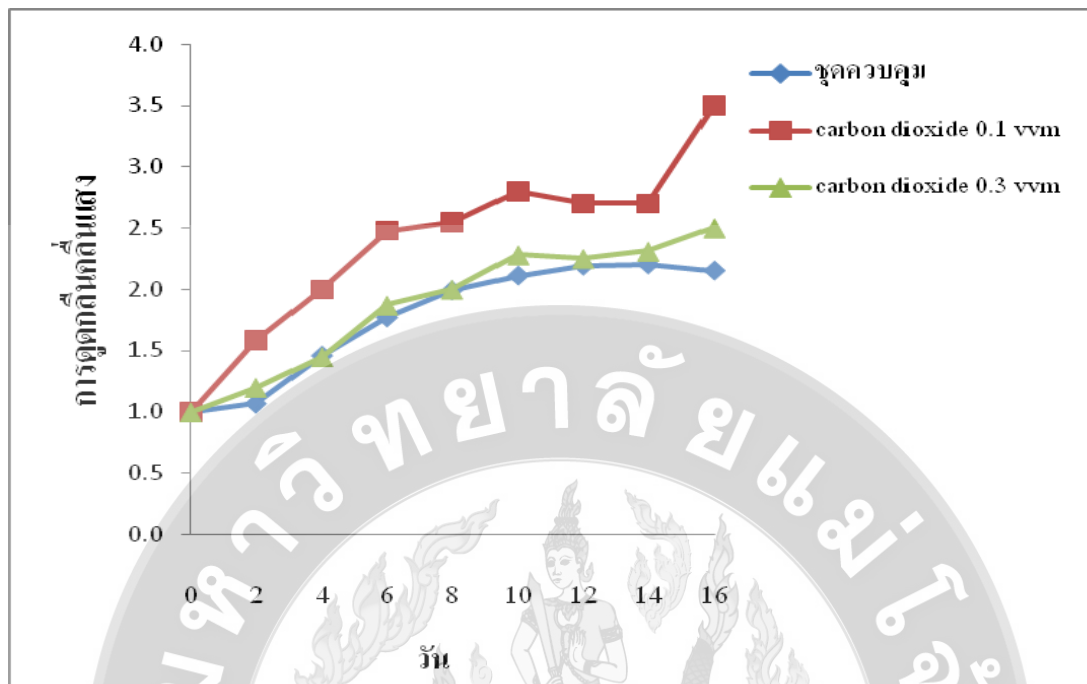
ผลของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm มีผลต่อค่าความเป็นกรดต่างของชุดการทดลอง จากภาพที่ 14 พบว่าชุดการทดลองที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm จะมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 9.33-9.95 ส่วนในชุดการทดลองที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm มีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 8.96-9.23 ส่วนชุดควบคุมมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 9.80-10.63



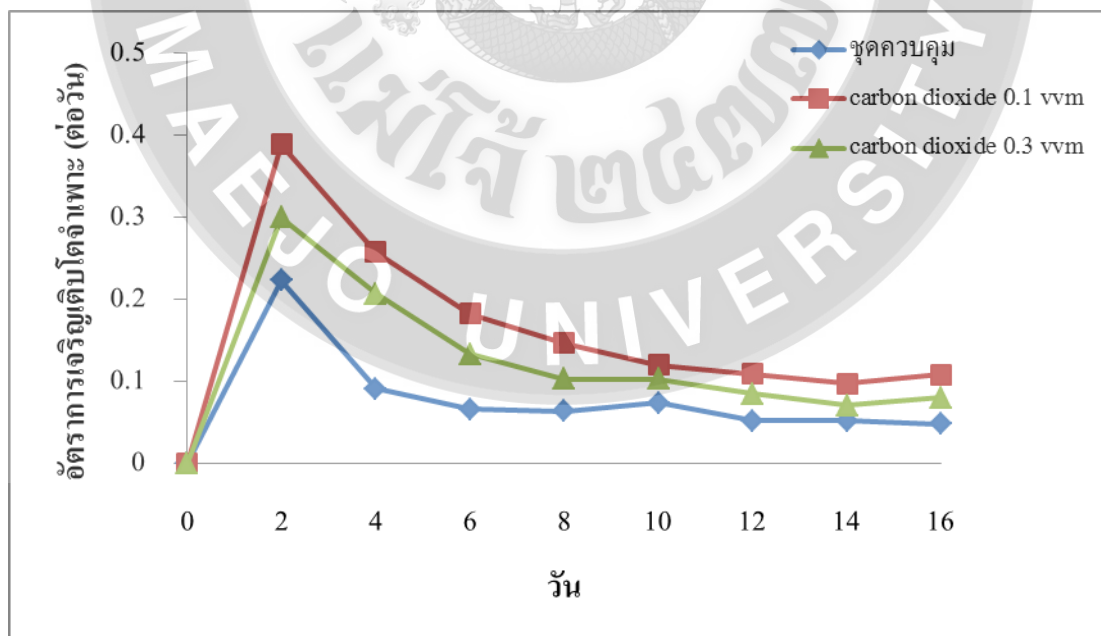
ภาพที่ 14 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อความเป็นกรดต่างของสาหร่าย *Spirulina* sp.



ภาพที่ 15 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อชีวมวลของสาหร่าย *Spirulina* sp.



ภาพที่ 16 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (OD) ของสาหร่าย *Spirulina* sp.



ภาพที่ 17 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของสาหร่าย *Spirulina* sp.

จากผลการทดลอง (ภาพที่ 14) พบว่าค่าความเป็นกรดต่าง มีผลต่อการเจริญเติบโต และชีวมวลของสาหร่าย โดยในชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีค่าเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและมีชีวมวลมากขึ้นในสถานะที่เป็นด่างหรือมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 9.33-9.95 ภายใต้การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สม่ำเสมอ ส่วนชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm ในวันแรก ๆ ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าลดต่ำมาก ๆ เป็นเพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เติมลงไปปริมาณที่มาก และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเป็นกรดคาร์บอนิก ซึ่งทำให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลงต่ำมาก หลังจากนั้นเมื่อสาหร่ายปรับตัวได้และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนได้ถูกใช้ไปในการสังเคราะห์แสงทำให้ค่าความเป็นกรดต่างค่อยๆ เพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 15 และ 16 พบว่าเมื่อมีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm พบว่าสาหร่ายมีชีวมวลมากกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm และชุดควบคุม โดยมีปริมาณชีวมวลสูงที่สุดถึง 5,390 มิลลิกรัมต่อลิตร 3,450 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 2,075 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีการดูดกลืนคลื่นแสง 3.5 2.5 และ 2.2 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มที่ชีวมวลจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อาจเกิดจากสาหร่าย *Spirulina* sp. เริ่มขยายตัวหรือการสร้างเซลล์ใหม่ และสาหร่ายได้นำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เติมลงไปแหล่งพลังงานแทนสารอาหารที่หมดไป นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย *Spirulina* sp. โดยที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.39 รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.30 และชุดควบคุมมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.22 (ภาพที่ 17)

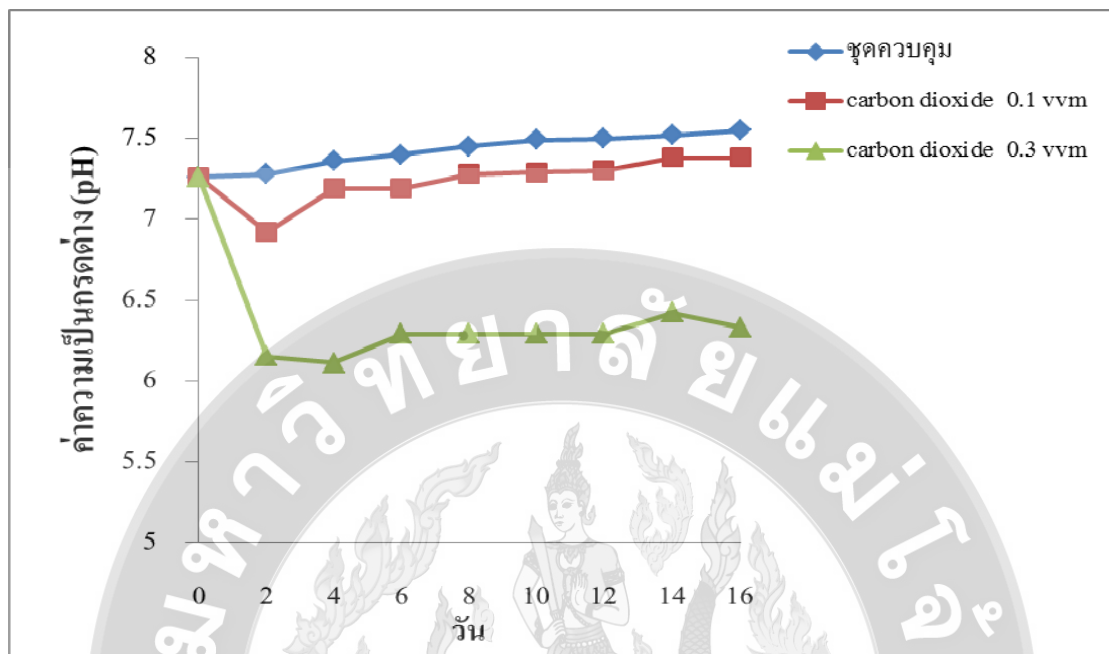
ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm และ 0.3 vvm

อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	0.1 vvm	0.3 vvm
ปริมาณก๊าซเข้า (%)	99	99
ปริมาณก๊าซออก (%)	4.90±0.10	8.47±0.06
ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	95.05±0.74	91.45±1.77

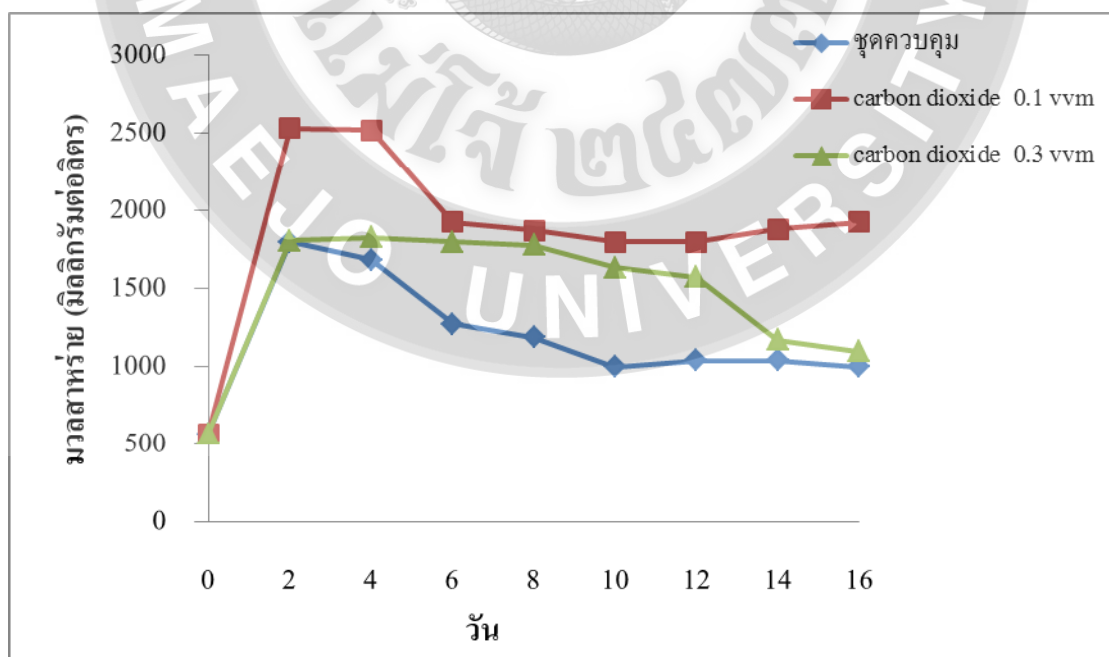
จากตารางที่ 3 พบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 95.05±0.74% และ 91.45±1.77% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับ Xianhai *et al.* (2012) รายงานว่า *Spirulina platensis* มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องมีอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดเวลาโดยมีอัตราการเติมอยู่ที่ 20 มิลลิเมตรต่อลิตรต่อวัน ซึ่งแสดงถึงสาหร่าย *Spirulina platensis* มีศักยภาพในการที่จะกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะต้องมีการประกอบต่างๆ กัน เช่น สายพันธุ์สาหร่าย ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ อุณหภูมิ ความเข้มของแสง รวมไปถึงองค์ประกอบของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

2. *Chlorella* sp.

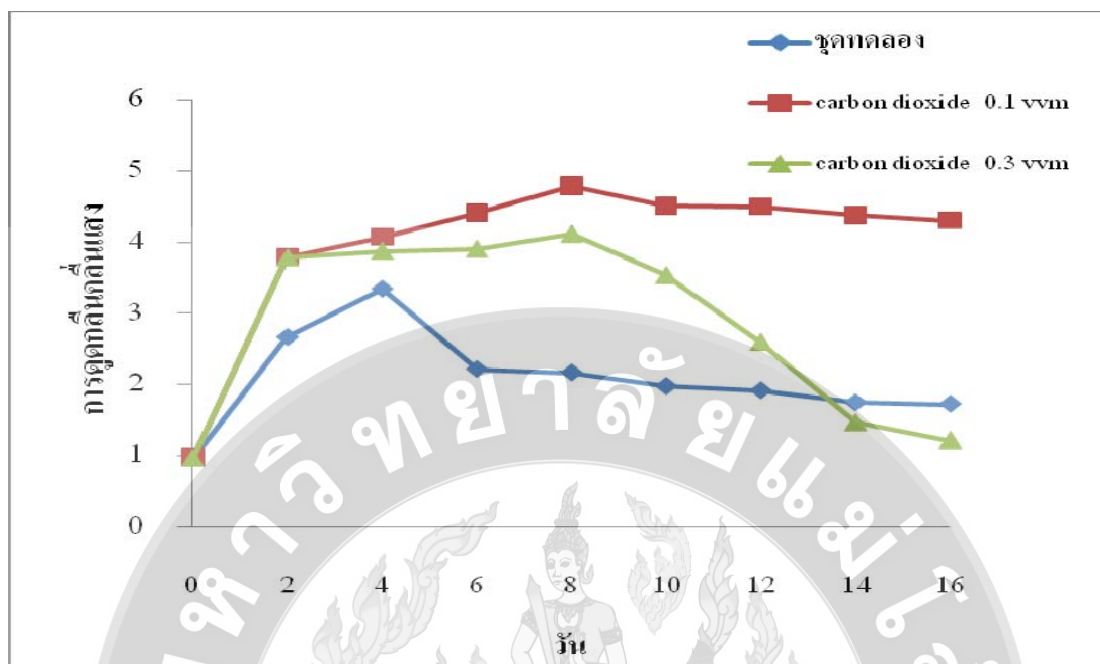
ผลของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm มีผลต่อค่าความเป็นกรดด่างของชุดการทดลอง จากภาพที่ 18 พบว่าชุดการทดลองที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm จะมีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ระหว่าง 6.92-7.38 ส่วนในชุดการทดลองที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm มีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ระหว่าง 6.11-7.26 ส่วนชุดควบคุมมีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง 7.26-7.55



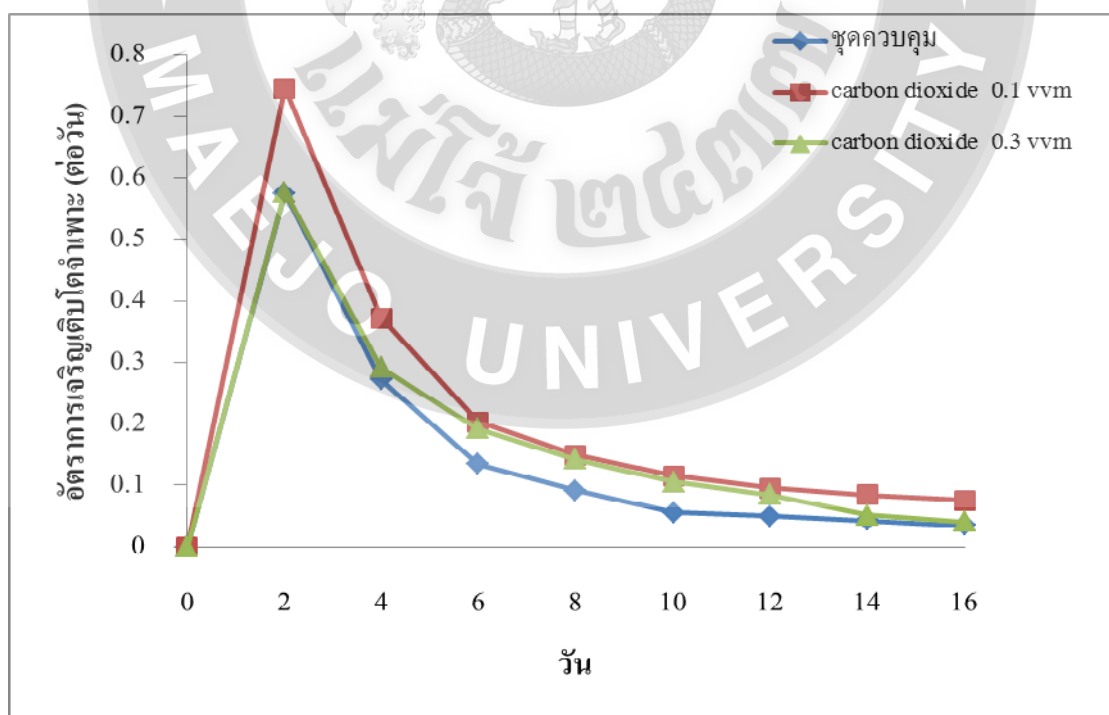
ภาพที่ 18 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อความเป็นกรดต่างของสาหร่าย *Chlorella* sp.



ภาพที่ 19 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อชีวมวลของสาหร่าย *Chlorella* sp.



ภาพที่ 20 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (OD) ของสาหร่าย *Chlorella* sp.



ภาพที่ 21 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของสาหร่าย *Chlorella* sp.

จากภาพที่ 19 และ 20 เมื่อมีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm พบว่าสาหร่ายมีชีวมวลมากกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm และชุดควบคุม โดยมีปริมาณชีวมวลมากที่สุดถึง 2,533 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมา มีชีวมวลอยู่ที่ 1,827 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1,800 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าการดูดกลืนคลีนแสง 4.79 4.12 และ 3.35 ตามลำดับ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย *Chlorella* sp. โดยที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.75 ต่อวัน รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.58 ต่อวัน ส่วนชุดควบคุมมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.57 ต่อวัน (ภาพที่ 21)

ผลของการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลที่แตกต่างกัน พบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีชีวมวลมากกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm และชุดควบคุม และส่วนชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm แนวโน้มที่ชีวมวลจะลดลงเรื่อยๆ อาจเกิดจากสาหร่าย *Chlorella* sp. ตายลงซึ่งอาจเกิดจากการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากเกินไป ส่วนชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีชีวมวลมากและมีอัตราการเจริญเติบโตดีที่สุด อาจเกิดจากสาหร่าย *Chlorella* sp. เริ่มขยายตัวหรือการสร้างเซลล์ใหม่ และสาหร่ายได้นำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เติมลงไปแหล่งพลังงานแทนสารอาหารที่หมดไป Lam et al. (2012) ได้ทำการศึกษาถึงอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ว่าสาหร่ายขนาดเล็กสามารถใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อการเจริญเติบโต ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 1-15 เมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะจะเห็นว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm และชุดควบคุม พบว่าชุดควบคุมมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะที่ใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm อาจเป็นเพราะว่าการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากเกินไปทำให้สาหร่ายไม่สามารถปรับตัวได้ ซึ่งจากรายงานวิจัยของ ทรายทอง (2545) ที่ทำการศึกษการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ในปฏิกรณ์ชีวภาพแสงแบบ Baffled Bubble Photobioreactor (BBP) ขนาด 20 ลิตร พบว่าการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 20% อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สาหร่ายไม่มีการเติบโตเพิ่มขึ้นจากวันแรกที่ทำการเพาะเลี้ยง ซึ่ง

ผู้วิจัยได้ให้ความเห็นไว้ว่าอาจเกิดการยับยั้งการเติบโต เนื่องจากสาหร่ายได้รับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาก แต่เมื่อเวลานานไปการลดลงของสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตนั้นถือได้ว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญ เนื่องจากสารอาหารจะลดน้อยลงตามการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย

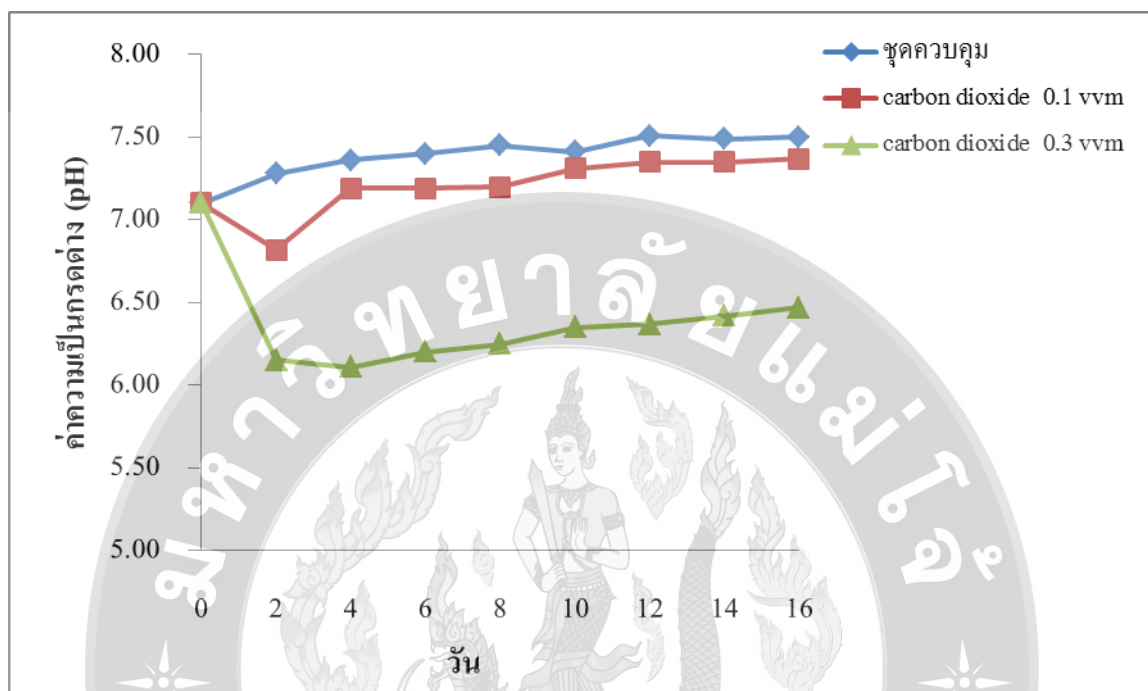
ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp. ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm และ 0.3 vvm

อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	0.1 vvm	0.3 vvm
ปริมาณก๊าซเข้า (%)	99	99
ปริมาณก๊าซออก (%)	7.43±0.21	11.63±0.32
ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	92.50±1.53	88.31±2.08

จากตารางที่ 4 พบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 92.50±1.53% และ 88.31±2.08% ตามลำดับ

3. *Chlorella* sp. MJU

ผลของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm มีผลต่อค่าความเป็นกรดต่างของชุดการทดลอง จากภาพที่ 22 พบว่าชุดการทดลองที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm จะมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.82-7.37 ส่วนในชุดการทดลองที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm มีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.11-7.10 ส่วนชุดควบคุมมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 7.10-7.51



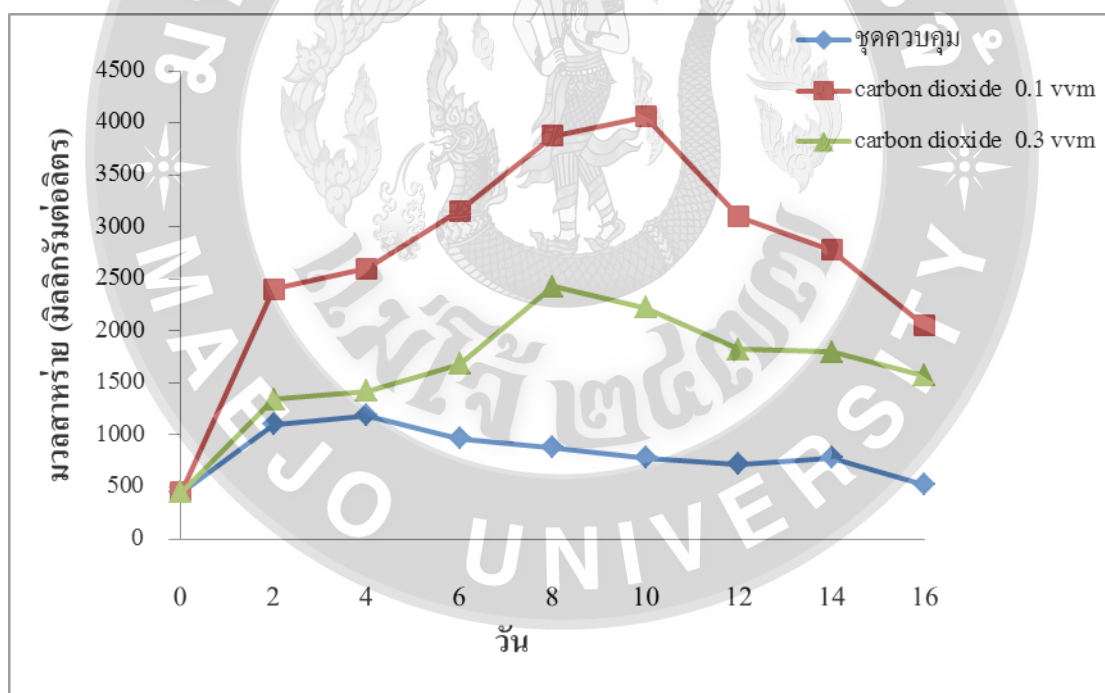
ภาพที่ 22 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อความเป็นกรดต่างของสาหร่าย

Chlorella sp. MJU

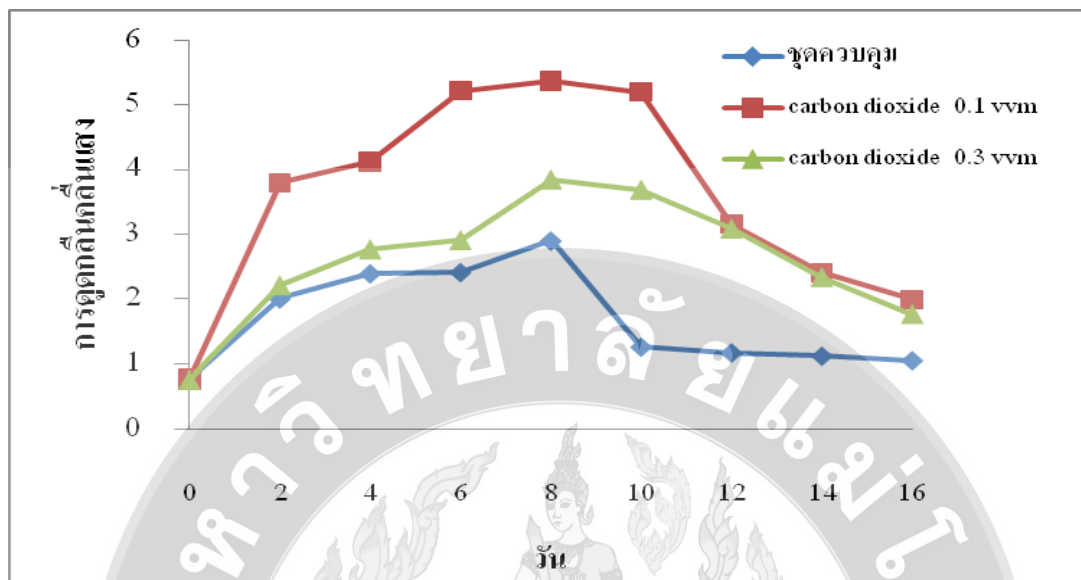
จากภาพที่ 22 พบว่าค่าความเป็นกรดต่างซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตและชีวมวลของสาหร่าย ในชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีค่าเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและมีชีวมวลมากขึ้นในสถานะที่มีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.82-7.37 ภายใต้การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สม่ำเสมอ ส่วนชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm ในวันแรกๆ เนื่องจากกรดคาร์บอนิกที่เกิดขึ้นซึ่งทำให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลงต่ำมาก หลังจากนั้นเมื่อสาหร่ายปรับตัวได้และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนได้ถูกใช้ไปในการสังเคราะห์แสงทำให้ค่าความเป็นกรดต่างค่อยๆเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าชุดควบคุม

จากรายงานวิจัยของ กิตติพล และคณะ (2555) พบว่าค่าความเป็นกรดต่างมีผลต่อชีวมวลของสาหร่าย และอัตราการเจริญเติบโต ซึ่งพบว่าค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมของ *Chlorella vulgaris* จะอยู่ในช่วง 7-8 และจะให้ชีวมวลมาก และมีอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คือ 16.18 มิลลิลิตรต่อนาที่ หรือสัดส่วนโดยปริมาตรของก๊าซ

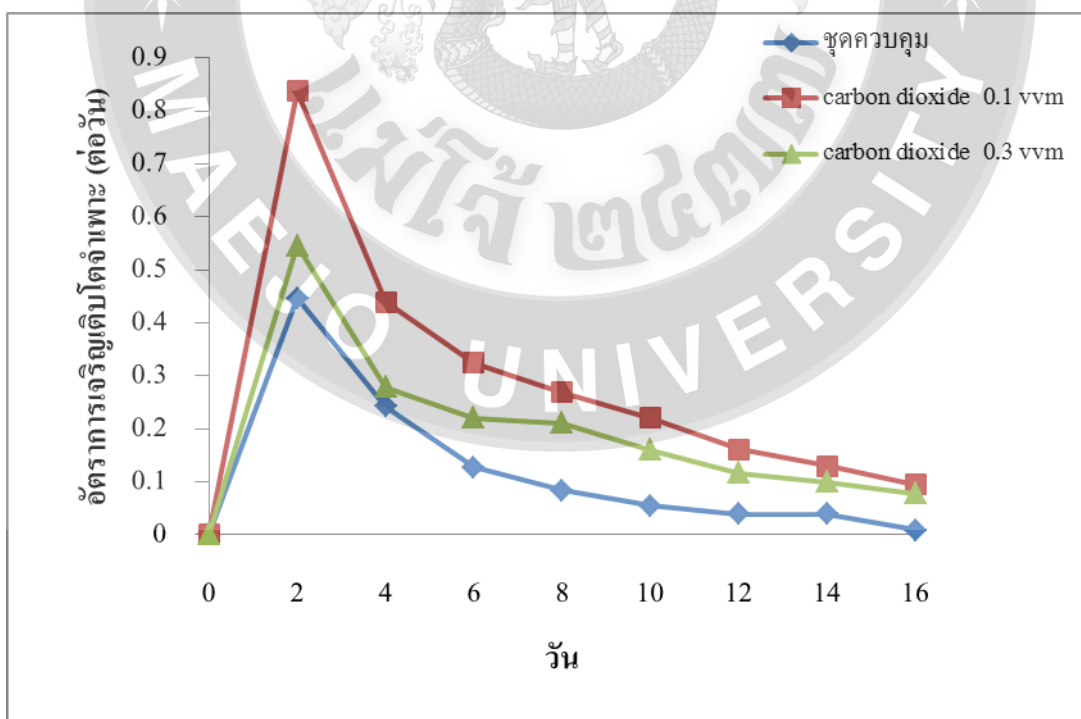
คาร์บอนไดออกไซด์คือ 2.46% ส่วนฤทธิ์รัตน วิศาลสุวรรณกร (2548) พบว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. K3 สามารถเติบโตได้เมื่อให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 10-20% เป็นแหล่งคาร์บอนในการเพาะเลี้ยง โดยภาวะที่มีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด คือการให้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 10% จะมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับ 2.48 จากการศึกษาของ Yue และ Chen (2005) ได้ทำการศึกษาถึงการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. ZY-1 ที่ได้จากการคัดแยกในสภาวะที่มีการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับความเข้มข้น 0-70% พบว่าสาหร่ายมีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดที่ 5.722 กรัมต่อลิตร เมื่อทำการเพาะเลี้ยงในสภาวะที่มีการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 10% และยังพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นมากกว่านี้สาหร่ายจะมีอัตราการเจริญเติบโตลดลงตามลำดับ



ภาพที่ 23 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อชีวมวลของสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU



ภาพที่ 24 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการดูดกลืนแสง (OD) ของสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU



ภาพที่ 25 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU

จากภาพที่ 23 และ 24 เมื่อมีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm พบว่าสาหร่ายมีชีวมวลมากกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm และชุดควบคุม โดยมีปริมาณชีวมวลมากที่สุดถึง 4,060 มิลลิกรัมต่อลิตร 2,427 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1,187 มิลลิกรัมต่อลิตร ลิตร และมีค่าการดูดกลืนคลีนแสง 5.37 3.84 และ 2.90 ตามลำดับ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU โดยที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.84 ต่อวัน รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.55 ต่อวัน และชุดควบคุมมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.45 ต่อวัน (ภาพที่ 25)

ผลของการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลที่แตกต่างกัน พบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีชีวมวลมากกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm และชุดควบคุม

จากการทดลองจะพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดด่างของสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU กับชีวมวล ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU มีอัตราการเจริญเติบโตมากจะทำให้ค่าความเป็นกรดด่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าภาวะที่สาหร่าย *Chlorella* sp. MJU มีอัตราการเติบโตช้ากว่า ทั้งนี้เป็นผลมาจากการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในการสังเคราะห์แสงและการเจริญเติบโตนั่นเอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลที่ 0.1 vvm กับ 0.3 vvm พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการเจริญเติบโต จากค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.84 ต่อวัน ซึ่งส่งผลให้สาหร่าย *Chlorella* sp. MJU มีการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในการเจริญเติบโตได้มาก

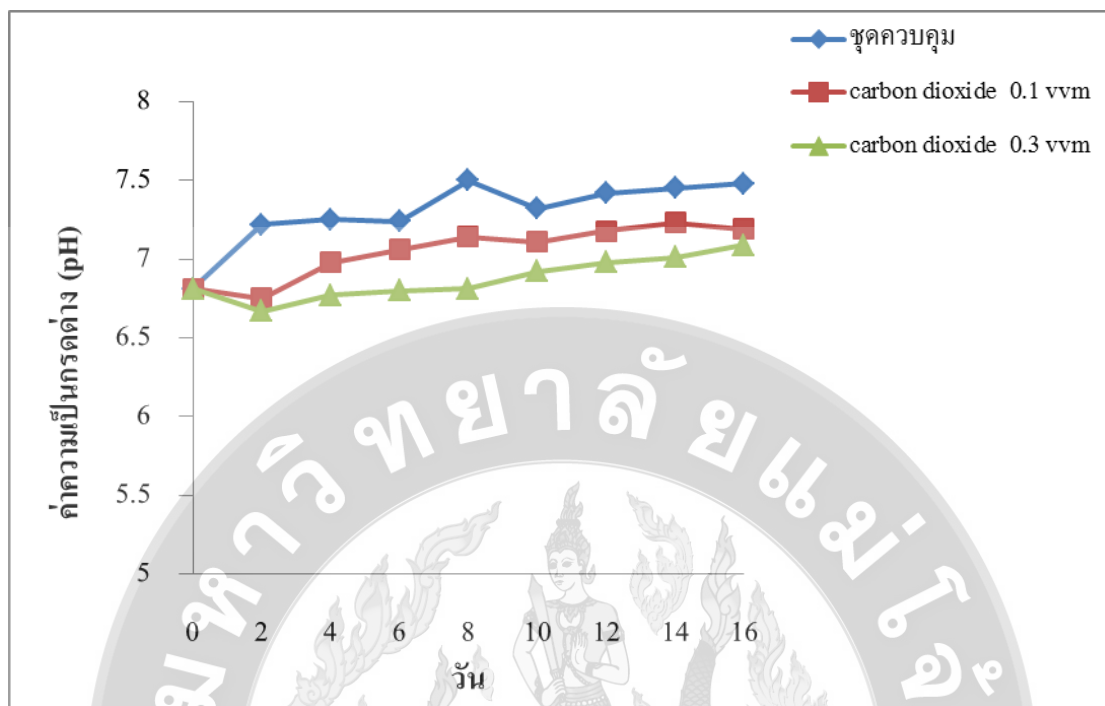
ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm และ 0.3 vvm

อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	0.1 vvm	0.3 vvm
ปริมาณก๊าซเข้า (%)	99	99
ปริมาณก๊าซออก (%)	6.97±0.21	10.17±0.06
ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	92.96±1.58	89.73±1.42

จากตารางที่ 5 พบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 92.96±1.58% และ 89.73±1.42% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Chan (2011) ได้ทำการศึกษาการใช้จุลสาหร่ายในการบำบัดน้ำเสียและกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตก๊าซชีวภาพผลการศึกษาพบว่าการใช้จุลสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* และ *Spirulina maxima* ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 100% และ 98% ตามลำดับ

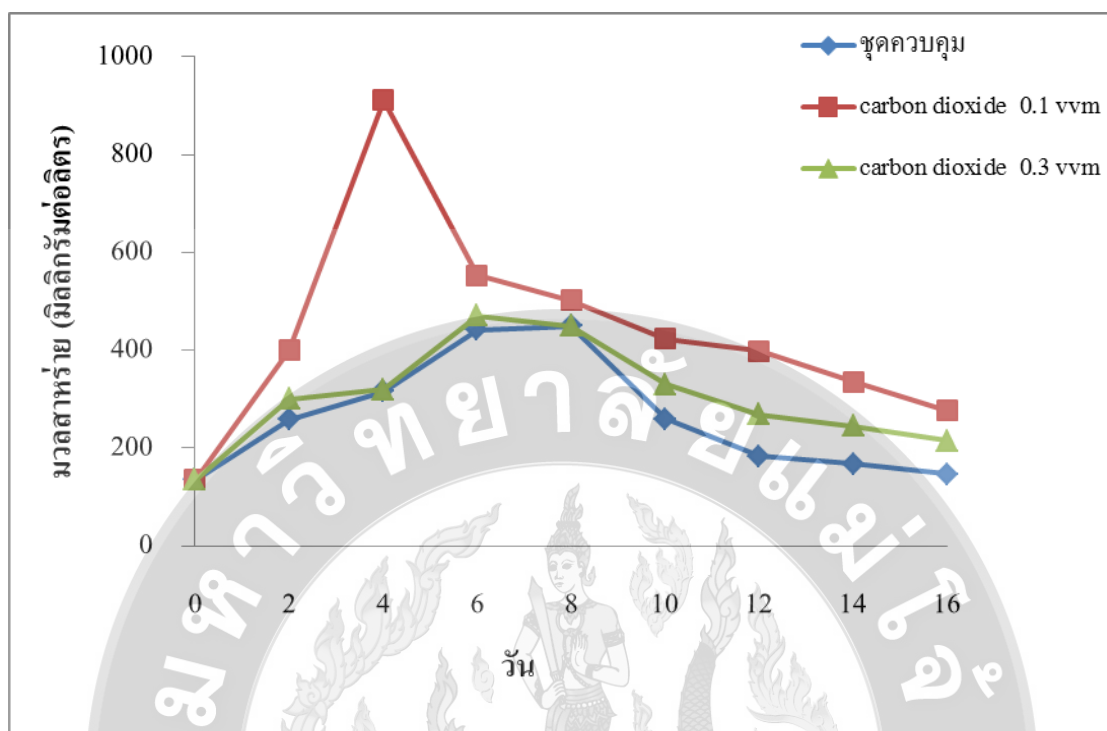
4. *Scenedesmus* sp.

ผลของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm มีผลต่อค่าความเป็นกรดต่างของชุดการทดลอง จากภาพที่ 26 พบว่าชุดการทดลองที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm จะมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.75-7.23 ส่วนในชุดการทดลองที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm มีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.67-7.09 ส่วนชุดควบคุมมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 6.81-7.48

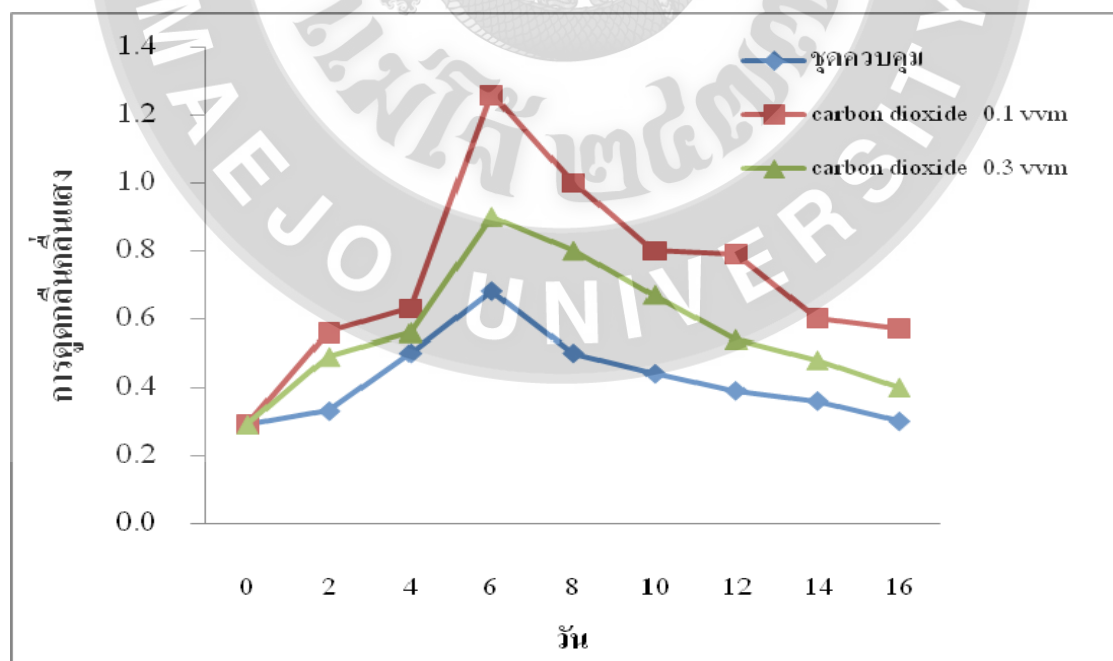


ภาพที่ 26 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อความเป็นกรดด่างของสาหร่าย *Scenedesmus* sp.

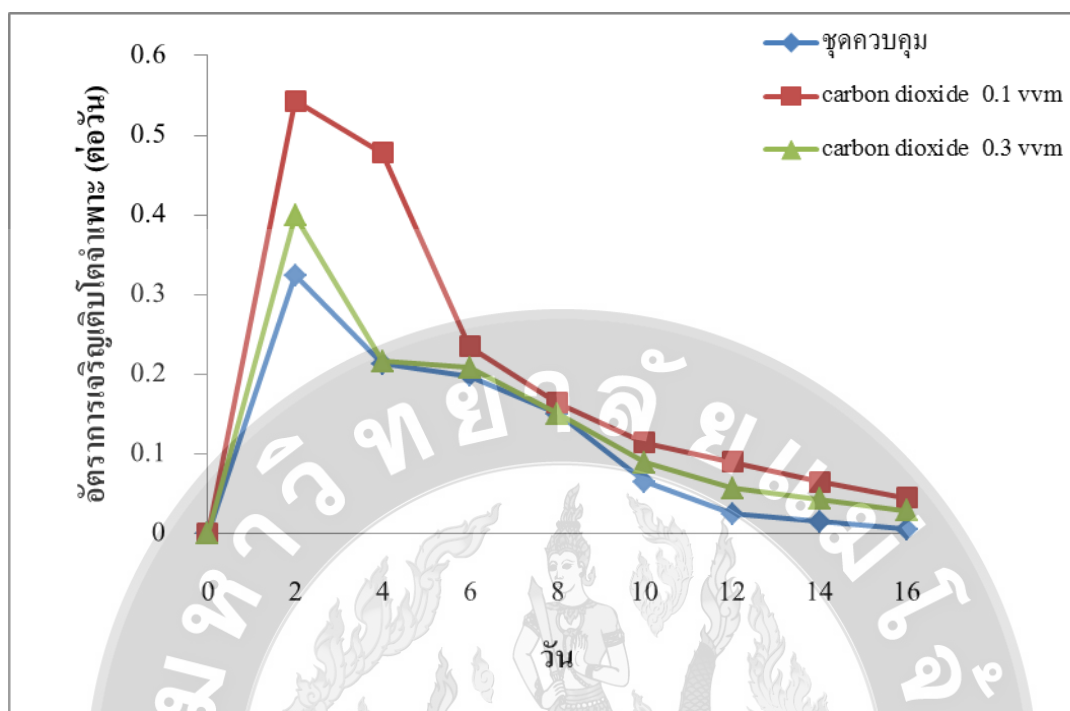
จากภาพที่ 26 พบว่าค่าความเป็นกรดด่างซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตและชีวมวลของสาหร่าย ในชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการใช้ 0.1 vvm มีค่าเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและมีชีวมวลมากขึ้นในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ระหว่าง 6.75-7.23 ภายใต้การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สม่ำเสมอ ส่วนชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการใช้ 0.3 vvm ในวันแรก ๆ ค่าความเป็นกรดด่างมีค่าลดต่ำมาก ๆ เป็นเพราะกรดคาร์บอนิกที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เติมลงไปปริมาณที่มาก หลังจากนั้นเมื่อสาหร่ายปรับตัวได้และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนได้ถูกใช้ไปในการสังเคราะห์แสงทำให้ค่าความเป็นกรดด่างค่อย ๆ เพิ่มขึ้นซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตจะละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเลี้ยงซึ่งจะสอดคล้องกับกระบวนการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายที่ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อิสระจะมีค่าลดลงและค่าอัลคาลินี้จะเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 27 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อชีวมวลของสาหร่าย *Scenedesmus* sp.



ภาพที่ 28 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (OD) ของสาหร่าย *Scenedesmus* sp.



ภาพที่ 29 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของสาหร่าย *Scenedesmus* sp.

จากภาพที่ 27 และ 28 เมื่อมีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm พบว่าสาหร่ายมีชีวมวลมากกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm และชุดควบคุม โดยมีปริมาณชีวมวลมากที่สุดถึง 912 มิลลิกรัมต่อลิตร 470 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าการดูดกลืนคลื่นแสง 1.26 0.9 และ 0.68 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของ สาหร่าย *Scenedesmus* sp. โดยที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.54 ต่อวัน รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.40 ต่อวัน และชุดควบคุมมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.32 ต่อวัน (ภาพที่ 29)

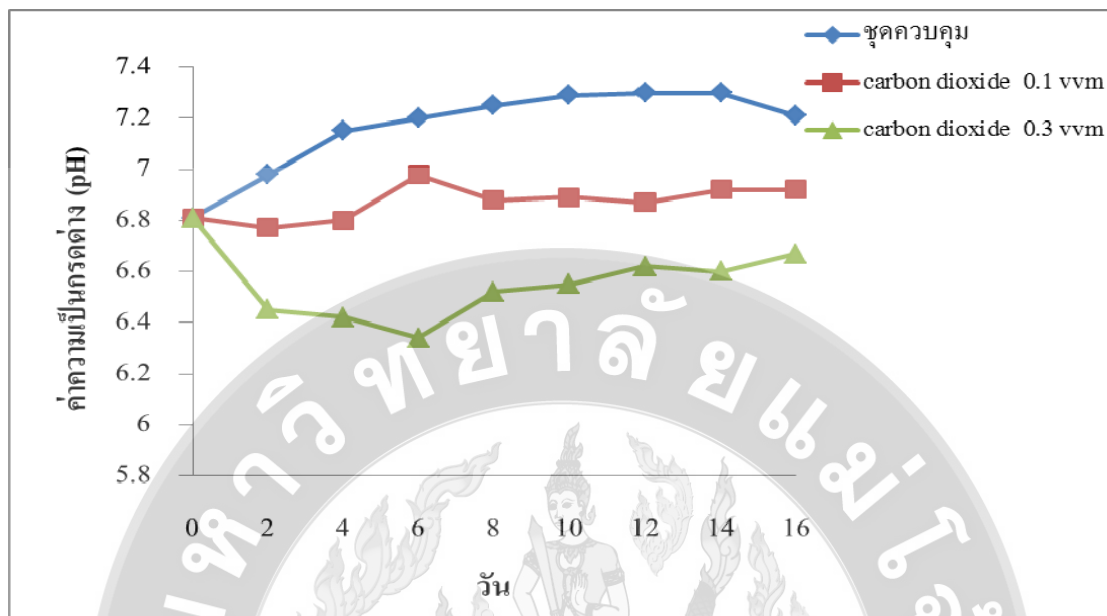
ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Scenedesmus* sp. ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm และ 0.3 vvm

อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	0.1 vvm	0.3 vvm
ปริมาณก๊าซเข้า (%)	99	99
ปริมาณก๊าซออก (%)	10.53±1.03	14.87±0.75
ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	89.36±2.08	84.98±2.82

จากตารางที่ 6 พบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 89.36±2.08% และ 84.98±2.82% ตามลำดับ

5. *Scenedesmus Obliquus* TISTR 8522

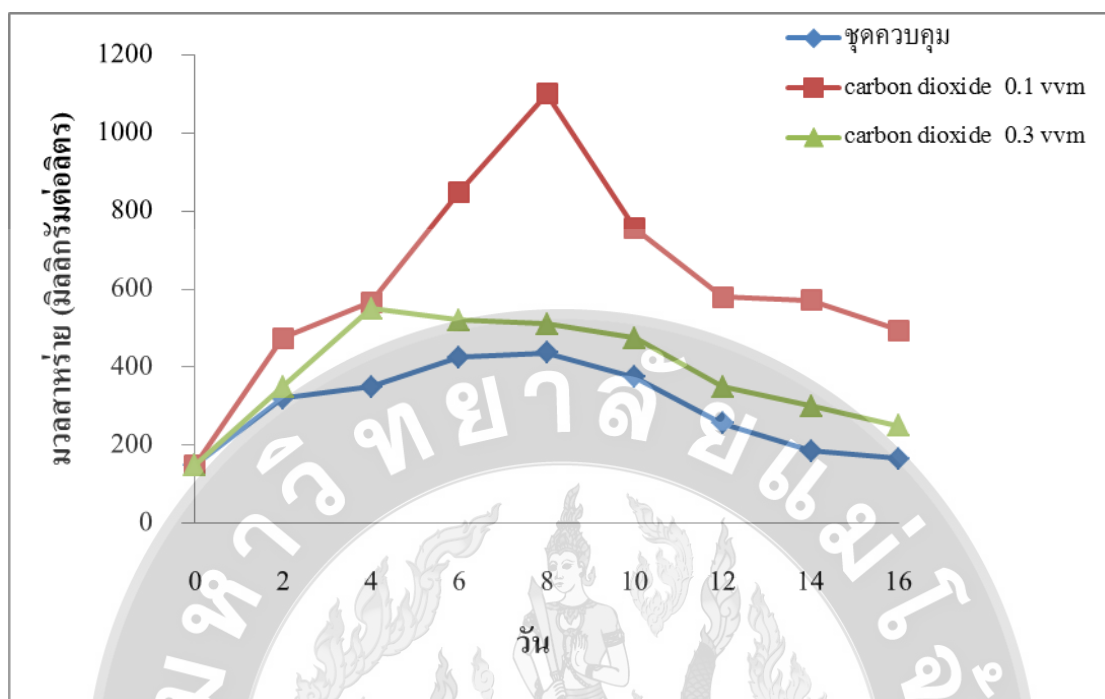
ผลของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm มีผลต่อค่าความเป็นกรดต่างของชุดการทดลอง จากภาพที่ 30 พบว่าชุดการทดลองที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm จะมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.80-6.98 ส่วนในชุดการทดลองที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm มีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.34-6.81 ส่วนชุดควบคุมมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 6.81-7.30



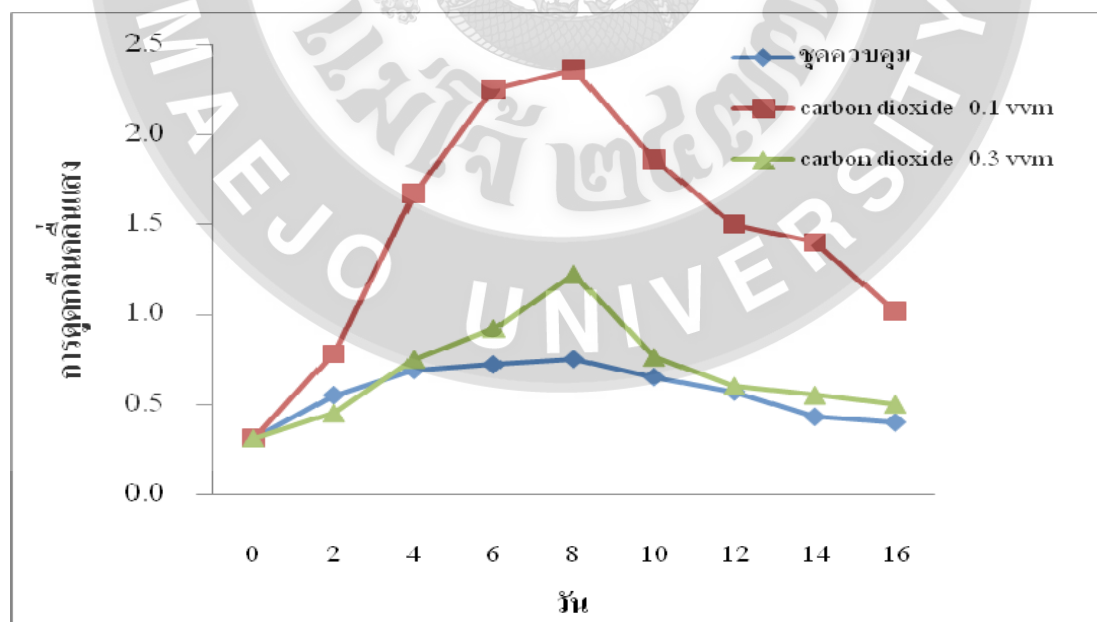
ภาพที่ 30 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อความเป็นกรดต่างของสาหร่าย

Scenedesmus obliquus TISTR 8522

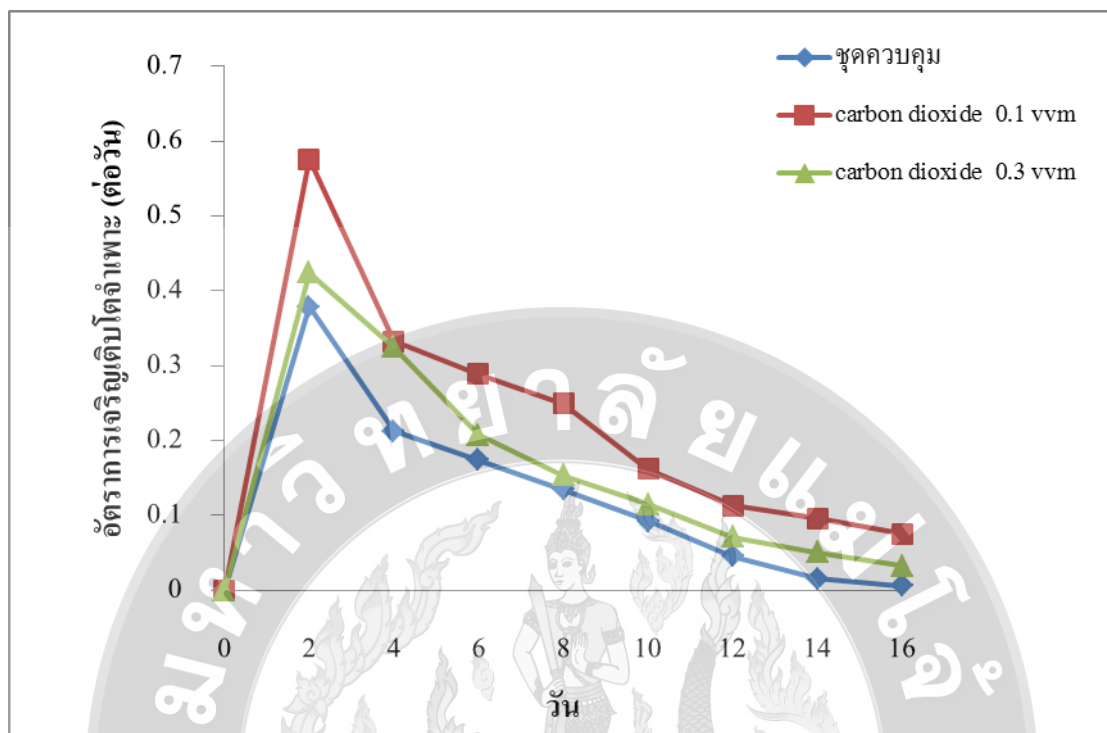
จากภาพที่ 30 พบว่าค่าความเป็นกรดต่างซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตและชีวมวลของสาหร่าย ในชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีค่าเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและมีชีวมวลมากขึ้นในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.80-6.98 ภายใต้การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Morais และ Costa (2007) ซึ่งพบว่าสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* เจริญเติบโตได้ดีและมีชีวมวลมากๆ จะมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 5.33-7.08 ภายใต้การเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 12% ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าชุดควบคุมนั้นมี ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.81-7.30 จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ไม่ดีเท่าที่ควร ถึงแม้ว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.34-6.81 ซึ่งเป็นค่าที่ดูจะเหมาะสม แต่จากการศึกษาของผกามาศ (2552) พบว่าค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของสาหร่ายอยู่ในช่วง 6.5-8.5 ดังนั้นความเป็นกรดต่างที่ต่ำเกินไปเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากเกินไปจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ สาหร่าย *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522 เจริญได้ไม่ดีเท่าที่ควร



ภาพที่ 31 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อชีวมวลของสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522



ภาพที่ 32 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าการดูดกลืนแสง (OD) ของสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522



ภาพที่ 33 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522

จากภาพที่ 31 และ 32 เมื่อมีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm พบว่าสาหร่ายมีชีวมวลมากกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm และชุดควบคุม โดยมีปริมาณชีวมวลมากที่สุดถึง 1,100 มิลลิกรัมต่อลิตร 550 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 437 มิลลิกรัมต่อลิตร ลิตร และมีการดูดกลืนคลอโรฟิลล์แสง 2.36 1.22 และ 0.75 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522 โดยที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.58 ต่อวัน รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.42 ต่อวัน และชุดควบคุมมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.38 ต่อวัน (ภาพที่ 33) ซึ่งจากรายงานวิจัยของ Ho *et al.* (2010) พบว่าสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* CNW-N N เจริญเติบโตได้เร็วที่มีอัตราการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 10% ในสภาวะที่ขาดไนโตรเจน ซึ่งพบว่ามีปริมาณการผลิตชีวมวลอยู่ที่ 292.50 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และยังพบว่า มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่

ผลของการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลที่แตกต่างกัน พบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีชีวมวลมากกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm และชุดควบคุม และทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มที่ชีวมวลจะลดลงเรื่อย ๆ

ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522 ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm และ 0.3 vvm

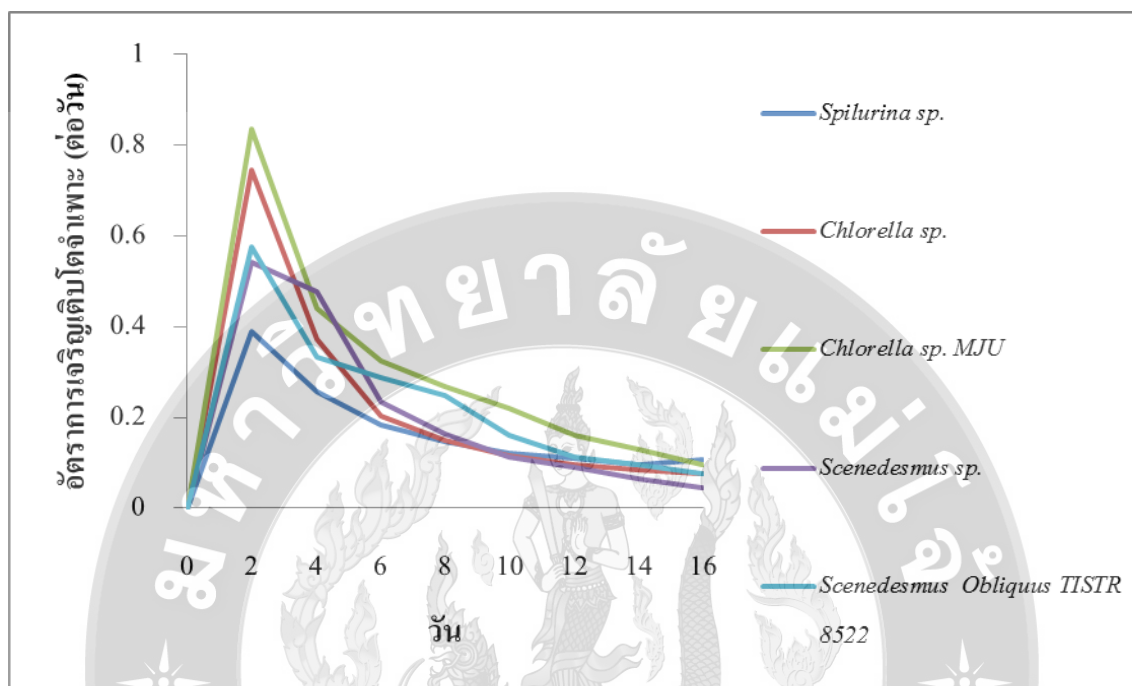
อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	0.1 vvm	0.3 vvm
ปริมาณก๊าซเข้า (%)	99	99
ปริมาณก๊าซออก (%)	7.63±0.21	9.07±1.42
ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	92.29±0.90	90.84±0.85

จากตารางที่ 7 พบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 92.29±0.90% และ 90.84±0.85% ตามลำดับ

ชนิดของสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

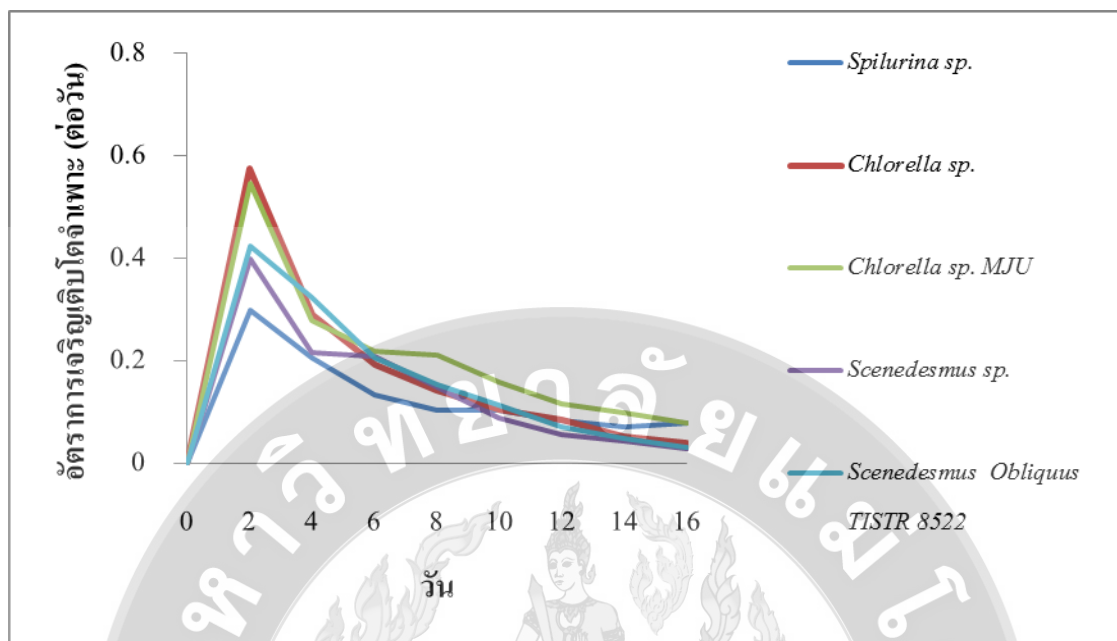
การคัดเลือกสาหร่ายจำนวน 5 ชนิด ได้แก่ *Spirulina* sp. *Chlorella* sp. *Chlorella* sp. MJU *Scenedesmus* sp. และ *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522 ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการคัดเลือกมาจำนวน 1 ชนิด โดยพิจารณาจากค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitap version 17 และวิเคราะห์ความแตกต่างในแนวนอน (Tukey simultaneous)

1. อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate)



ภาพที่ 34 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของของสาหร่ายทั้ง 5 ชนิด

จากการศึกษาการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm พบว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงที่สุดอยู่ที่ 0.84 ต่อวัน รองลงมาเป็นสาหร่าย *Chlorella* sp. มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่ 0.75 ต่อวัน *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522 มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่ 0.58 ต่อวัน *Scenedesmus* sp. มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่ 0.54 และ *Spilurina* sp. มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่ 0.39 ต่อวัน ตามลำดับ (ภาพที่ 34)



ภาพที่ 35 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm ที่มีต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของสาหร่ายทั้ง 5 ชนิด

จากการศึกษาการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm พบว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดอยู่ที่ 0.58 ต่อวัน รองลงมาเป็นสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดอยู่ที่ 0.55 ต่อวัน *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522 มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดอยู่ที่ 0.42 ต่อวัน *Scenedesmus* sp. มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดอยู่ที่ 0.40 และ *Spilurina* sp. มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดอยู่ที่ 0.30 ต่อวัน ตามลำดับ (ภาพ 35) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ซึ่งจากการทดลองพบว่าอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะที่ดีกว่าอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.3 vvm

2. ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายทั้ง 5 ชนิด ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm

อัตราการเติมก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์	สาหร่าย				
	<i>Spirulina</i> sp.	<i>Chlorella</i> sp.	<i>Chlorella</i> sp. MJU	<i>Senedesmus</i> sp.	<i>S. obliquus</i> TISTR 8522
ปริมาณก๊าซเข้า (%)	99	99	99	99	99
ปริมาณก๊าซออก (%)	4.90±0.10	7.43±0.21	6.97±0.21	10.53±1.03	7.63±0.21
ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	95.05±0.10 ^a	92.50±1.53 ^c	92.96±1.58 ^b	89.36±2.08 ^d	92.29±0.90 ^c
อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ต่อวัน)	0.39 ^c	0.75 ^b	0.84 ^a	0.54 ^d	0.58 ^c

* ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรเดียวกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติในระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อนำข้อมูลอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ได้จากการศึกษาของสาหร่ายทั้ง 5 ชนิด ที่มีอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm ไปวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของลักษณะการเจริญเติบโตจำเพาะพบว่าสาหร่ายแต่ละชนิดมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($p>0.05$) โดยสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.84 ต่อวัน และเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายทั้ง 5 ชนิด พบว่าสาหร่าย *Spirulina* sp. มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุดโดยมีค่าเฉลี่ย 95.05±0.10% รองลงมาได้แก่ *Chlorella* sp. MJU *Chlorella* sp. *S. obliquus* TISTR 8522 และ *Senedesmus* sp. โดยมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 92.96±1.58% 92.50±1.53% 92.29±0.90% และ 89.36±2.08% ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ได้จากการศึกษาของสาหร่ายทั้ง 5 ชนิด ไปวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. ไม่มีความแตกต่างจากสาหร่าย *S. obliquus* TISTR 8522 ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 9 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดของสาหร่ายทั้ง 5 ชนิด ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.3 vvm

อัตราการเติมก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์	สาหร่าย				
	<i>Spirulina</i> sp.	<i>Chlorella</i> sp.	<i>Chlorella</i> sp. MJU	<i>Senedesmus</i> sp.	<i>S. obliquus</i> TISTR 8522
ปริมาณก๊าซเข้า (%)	99	99	99	99	99
ปริมาณก๊าซออก (%)	8.47±0.06	11.63±0.32	10.17±0.06	14.87±0.75	9.07±1.42
ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (%)	91.45±1.77 ^a	88.31±2.08 ^d	89.73±1.42 ^c	84.98±2.82 ^c	90.84±0.85 ^b
อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ต่อวัน)	0.30 ^d	0.58 ^a	0.55 ^b	0.40 ^c	0.42 ^c

* ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรเดียวกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติในระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อนำข้อมูลอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ได้จากการศึกษาของสาหร่ายทั้ง 5 ชนิด ที่มีอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.3 vvm ไปวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของลักษณะการเจริญเติบโตพบว่า สาหร่ายทั้ง 5 ชนิดมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p > 0.05$) โดยที่สาหร่าย *Chlorella* sp. มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.58 ต่อวัน เมื่อนำข้อมูลพบว่าประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายทั้ง 5 ชนิด พบว่า *Spirulina* sp. มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย 91.45±1.77% รองลงมาเป็นสาหร่าย *Scenedesmu obliquus* TISTR 8522 *Chlorella* sp. MJU *Chlorella* sp. และ *Senedesmus* sp. โดยมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เฉลี่ย $90.84 \pm 0.85\%$ $89.73 \pm 1.42\%$ $88.31 \pm 2.08\%$ และ $84.98 \pm 2.82\%$ ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าสาหร่าย ทั้ง 5 ชนิดมีประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 9

จากผลการทดลองที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ สาหร่ายทั้ง 5 ชนิดพบว่า ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm นั้นสาหร่ายมีอัตราการเจริญเติบโตที่ดีกว่าและมีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.3 vvm ยกเว้น ใน *Chlorella* sp. ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มเข้าไปในระบบนั้น นอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงแล้ว ยังมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่างของระบบอีกด้วย ซึ่งค่าความเป็นกรดด่างนี้เป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะค่าความเป็นกรดด่างที่ต่ำจนเกินไปจะมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย (Stevenson, 2012) จากการศึกษาของผกาดีและคณะ (2553) พบว่าค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของสาหร่ายจะอยู่ในช่วง 6.5-8.5 ในขณะที่สิรินภา (2553) พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจะเจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีสภาพเป็นกลางถึงเป็นด่าง ดังนั้นเมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าไปในระบบมากจนเกินไปจึงทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของน้ำลดลงเนื่องจากกรดคาร์บอนิกที่เกิดขึ้น ทำให้สาหร่ายต้องหยุดชะงักการเจริญเติบโตและต้องใช้เวลาในการปรับตัว ทำให้พบว่า ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm ทำให้สาหร่ายทั้ง 5 ชนิดมีอัตราการเจริญเติบโตที่ดีกว่าที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.3 vvm รวมไปถึงประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า เมื่อพิจารณาถึงชนิดของสาหร่ายพบว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU มีการเจริญได้ดีที่สุด โดยมีอัตราการเจริญเติบโตเฉพาะ 0.84 ต่อวัน ที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm รองลงมาคือ *Chlorella* sp. มีอัตราการเจริญเติบโตเฉพาะ 0.75 ต่อวัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า *Spirulina* sp. นั้น มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ ที่อัตราการไหล 0.1 vvm สามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ $95 \pm 0.10\%$ รองลงมาได้แก่ *Chlorella* sp. MJU สามารถกำจัดกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ $92 \pm 1.58\%$

จากผลการทดลองที่กล่าวมา ในการคัดเลือกสาหร่ายเพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรนั้น จึงได้คัดเลือกสาหร่าย *Chlorella* sp.MJU ที่อัตราการการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.1 vvm ทั้งนี้เนื่องจาก *Chlorella* sp.MJU สามารถเจริญได้ดีและมีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูง อีกทั้งเป็นสาหร่ายที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ มีโปรตีนสูง และสามารถนำไปทำเป็นอาหารสัตว์ได้ อาหารที่ใช้เลี้ยงมีราคาไม่แพง ในขณะที่สาหร่าย พบว่า *Spirulina* sp. นั้นถึงแม้ว่าจะมีมีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูง แต่การเจริญน้อย อีกทั้งการเพาะเลี้ยงทำได้ยากกว่าเนื่องจากเจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีราคาแพงและต้องปรับค่ากรด่างให้สูง

ประสิทธิภาพของจุลสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

เมื่อนำสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU ที่คัดเลือกจากการทดลองที่ผ่านมา ว่าเป็นสาหร่ายที่สามารถเจริญได้ดีและมีประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูง ไปประยุกต์ใช้ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า เมื่อนำก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศจากมูลสุกรในระดับห้องปฏิบัติการ หลังจากทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกไปแล้ว มาผ่านระบบถังปฏิกริยาชีวภาพของสาหร่าย ที่อัตราการไหล 0.1 vvm เป็นเวลาทั้งสิ้น 14 วัน ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 10 การเจริญและผลผลิตของสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU เมื่อได้รับก๊าซชีวภาพ

วันที่เก็บตัวอย่าง	พารามิเตอร์				
	OD ₅₆₀	pH	Biomass (mg/L)	U _{max} (day ⁻¹)	Biomass yield (mg/L)
วันแรก	0.66	7.05	650	-	-
วันที่ 7	4.91	6.78	4,037	0.26	620
วันที่ 14	3.64	6.54	2,400	0.09	100

ผลจากการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรดต่างของระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายอยู่ในช่วง 5.54- 7.05 ค่าการดูดกลืนคลีนแสง (OD_{560}) ชีวมวล อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการผลิตชีวมวลของสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU จะมีค่าสูงสุดในวันที่ 7 โดยมีค่าอยู่ที่ 4.91, 4,037 มิลลิกรัมต่อลิตร, 0.26 ต่อวัน และ 620 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 11 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพและการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซมีเทน

วันที่เก็บตัวอย่าง	วันที่ 1	วันที่ 7	วันที่ 14
ปริมาณก๊าซ CO_2 เข้า (%)	14.50	18.52	7.91
ปริมาณก๊าซ CO_2 ออก (%)	0.24±0.08	1.57±0.43	1.08±0.13
ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	98.34±0.56	91.54±2.33	86.30±1.59
ปริมาณก๊าซ CH_4 เข้า (%)	39.50	55.96	26.33
ปริมาณก๊าซ CH_4 ออก (%)	45.93±1.44	66.19±1.34	37.28±1.90

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อให้ก๊าซชีวภาพแก่สาหร่าย ในวันแรกสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU จะมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำมีน้อย ทำให้ผลต่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างน้ำกับอากาศมีค่าสูง จึงเป็นสาเหตุให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายลงไปในน้ำได้มาก แต่เมื่อถึงสมดุลแล้วการละลายจะน้อยลง ทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปล่อยออกสู่อากาศได้มากขึ้น จากผลการทดลองพบว่าในวันที่ 1, 7 และ 14 ของการทดลอง ระบบมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 98.34±0.56%, 91.54±2.33% และ 86.30±1.59% ตามลำดับ และมีปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นมาก

ที่สุดในวันที่ 7 รองลงมาเป็นที่ 1 และวันที่ 14 เหลือเท่ากับ $66.19 \pm 1.34\%$, $45.93 \pm 1.44\%$ และ $37.28 \pm 1.90\%$ ตามลำดับ (ตารางที่ 11) จากรายงานวิจัยของ Alison chan (2011) ได้ทำการศึกษาการใช้จุลสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่าการใช้จุลสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 98% ส่วน Kao *et al.*, (2012) ได้ศึกษาถึงความสามารถในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้จุลสาหร่าย *Chlorella* sp. ในการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการศึกษาพบว่าสามารถลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี และทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงขึ้นจากเดิม 70% เป็น 87% และมีอัตราการการไหลอยู่ที่ 0.05 vvm

สรุปผลการวิจัย

ประสิทธิภาพของจุลสาหร่าย (microalgae) แต่ละชนิดในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ให้ผลผลิตที่ดี

1. *Spirulina* sp.

จากการศึกษาถึงผลของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm และหาค่าความเข้มข้นพบว่ามีความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 9.33-9.95, 8.96-9.23 และ 9.80-10.63 ตามลำดับ โดยมีปริมาณชีวมวลสูงที่สุดถึง 5,390 มิลลิกรัมต่อลิตร 3,450 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 2,075 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.39 ต่อวัน, 0.30 ต่อวัน และ 0.22 ต่อวัน ตามลำดับ และยังพบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย $95.05 \pm 0.74\%$ และ $91.45 \pm 1.77\%$ ตามลำดับ

2. *Chlorella* sp.

จากการศึกษาถึงผลของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm และหาค่าความเข้มข้นพบว่ามีความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.92-7.38, 6.11-7.26 และ 7.26-7.55 ตามลำดับ โดยมีปริมาณชีวมวลสูงที่สุดถึง 2,533 มิลลิกรัมต่อลิตร 1,827 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1,800 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.75 ต่อวัน, 0.58 ต่อวัน และ 0.57 ต่อวัน ตามลำดับ และยังพบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย $92.50 \pm 1.53\%$ และ $88.31 \pm 2.08\%$ ตามลำดับ

3. *Chlorella* sp. MJU

จากการศึกษาถึงผลของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm และหาค่าความเข้มข้นพบว่ามีความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.82-7.37, 6.11-7.10 และ 7.10-7.51 ตามลำดับ โดยมีปริมาณชีวมวลสูงที่สุดถึง 4,060 มิลลิกรัมต่อลิตร 2,427 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1,187 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.84 ต่อวัน, 0.55 ต่อวัน และ 0.45 ต่อวัน ตามลำดับ และยังพบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย $92.96 \pm 1.58\%$ และ $89.73 \pm 1.42\%$ ตามลำดับ

4. *Scenedesmus* sp.

จากการศึกษาถึงผลของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm และหาค่าความเข้มข้นพบว่ามีความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.75-7.23, 6.67-7.09 และ 6.81-7.48 ตามลำดับ โดยมีปริมาณชีวมวลสูงที่สุดถึง 912 มิลลิกรัมต่อลิตร 470 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.54 ต่อวัน, 0.40 ต่อวัน และ 0.32 ต่อวัน ตามลำดับ และยังพบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย $89.36 \pm 2.08\%$ และ $84.98 \pm 2.82\%$ ตามลำดับ

5. *Scenedesmus Obliquus* TISTR 8522

จากการศึกษาถึงผลของการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm และหาค่าความเข้มข้นพบว่ามีความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.80-6.98, 6.34-6.81 และ 6.81-7.30 ตามลำดับ โดยมีปริมาณชีวมวลสูงที่สุดถึง 1,100 มิลลิกรัมต่อลิตร 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 437 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดที่ 0.58 ต่อวัน, 0.42 ต่อวัน และ 0.38 ต่อวัน ตามลำดับ และยังพบว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.1 vvm และ 0.3 vvm ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย $92.29 \pm 0.90\%$ และ $90.84 \pm 0.85\%$ ตามลำดับ

ประสิทธิภาพของจุลสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

จากการศึกษาถึงประสิทธิภาพของจุลสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ที่อัตราการไหล 0.1 vvm พบว่าค่าความเป็นกรดต่างของระบบเพาะเลี้ยงสาหร่ายอยู่ในช่วง 5.54- 7.05 โดยสาหร่าย *Chlorella* sp. MJU มีค่าดูดกลืนคลอรีนแสง อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการผลิตชีวมวลค่าสูงสุดในวันที่ 7 ของการทดลอง โดยจะมีค่าอยู่ที่ 4.91 4,037 มิลลิกรัมต่อลิตร 0.26 ต่อวัน และ 620 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ $91.54 \pm 2.33\%$ และ สามารถทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นจากเดิมเฉลี่ย $45.93 \pm 1.44\%$ เป็น $66.19 \pm 1.34\%$

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองประสิทธิภาพของจุลสาหร่ายในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยมีอัตราการไหล 0.1 vvm ในการดูดก๊าซชีวภาพจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเข้าสู่ถังปฏิกิริยาที่เพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย ควรมีการเพิ่มอัตราการไหลที่ 0.05 vvm และ 0.2 vvm เพื่อประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของจุลสาหร่าย



บรรณานุกรม

กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน. 2549. การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเบื้องต้น.

กิตติภัทร มณีวรรณ ธนกฤต สุกใส และพลาการ ยะโส. 2555. การเกิดแก๊สชีวภาพจากการหมักย่อยสลายเศษก้าน และใบไม้หลายชนิด. ปรินิพนธ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาพืช เชิงใหม่. 57 น.

กิตติพล กสิการ วัชร เวียงแก้ว ศิริวรรณ ศรีสนัตร์ และชนาธิป สามารณ. 2555. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยง *Chlorella vulgaris* ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกเตอร์IAL. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. ปีที่ 40 ฉบับที่ 1.

ขจรศักดิ์ นกร้อ. 2556. ผลของน้ำยาล้างจานต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารอินทรีย์. (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา <http://kruvijai.files.wordpress.com/2010/11/7-eng-khajornsak.pdf> (9 กันยายน 2556).

ครรชิต เงินคำคง ศิราภรณ์ ชื่นบาล และฐปน ชื่นบาล. 2556. ผลของการบ่มไดออกไซด์ต่อผลผลิตจุลินทรีย์ *Spirulina* sp. น.90-96. ในการประชุมวิชาการ สาหร่ายและแพลงก์ตอนแห่งชาติ ครั้งที่ 6. เชียงใหม่.

จกมล พรหมยะ. 2552. การเพาะเลี้ยงสาหร่าย. คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

จินตนา จิตต์ภักดิ์พิมพ์ใจ นามศรีวรกฤษ สุวจิตตานนท์ บุญส่ง ศิปเจริญกุล และวิไลรังสาทอง. 2556. การผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบ 2 ขั้นตอนโดยใช้เศษสับปะรดเหลือทิ้งจากการแปรรูป. (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา <http://www.nrru.ac.th/grad/UserFiles/File/Proceeding/B/B-05.pdf> (3 กันยายน 2556).

จำรูญ ขาสมุทร. 2555. อนามัยสิ่งแวดล้อม เรื่อง มลพิษทางอากาศ โลกร้อน และการจัดการ. พิมพ์ครั้งที่ 1. หจก. เชียงใหม่แสงศิลป์. กองทุนเผยแพร่วิชาการด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข. 106 น.

จิรพล สินธุนาวา. 2556. ภาวะโลกร้อนกับทางออกของการแก้ไขปัญหา. สมาคมพัฒนาคุณภาพสิ่งแวดล้อม(ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา http://www.adeg.or.th/web/news/news_green. (3 กันยายน 2556).

- ธรณิษ เมืองมูล สมพร จันทร จีรพร เพกเกาะ ชยากรภูมาศและยุวดี พิรพรพิศาล. 2556. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กที่อุณหภูมิสูงเพื่อลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์. น.49-58. ใน การประชุมวิชาการ สาหร่ายและแพลงก์ตอนแห่งชาติ ครั้งที่ 6. เชียงใหม่.
- ธราดล ภิรมย์ชาติ. 2545. การออกแบบและทดสอบถังเลี้ยงสาหร่าย **Baffled Bobble Photobioreactor** เพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 150 น.
- ฤทัยรัตน์ วิศาลสุวรรณกร. 2548. ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเติบโตของสาหร่าย *Chlorella* sp. โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนเมื่อเพาะเลี้ยงในปฏิกรณ์ชีวภาพแสง. ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 136 น.
- ประยูร วงศ์จันทร์. 2555. วิทยาการสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1 . โรงพิมพ์เดือนตุลา. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยสารคาม. 366 น.
- ผกาดี แก้วกันเนตร พรเทพ ถนนแก้ว และตาสิตา ยุอมรพิทักษ์. 2553. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กในระบบปิด/ระบบเปิดเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือกในการผลิตพลังงานทดแทนไบโอดีเซลที่ยั่งยืน. รายงานวิจัย. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. 107 น.
- ผกาดี แก้วกันเนตร และพนิดา รัตนพลที. 2552. ศักยภาพการผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่ายขนาดเล็ก.วารสารศูนย์บริการวิชาการ. 16(1): 9-13.
- ยุวดี พิรพรพิศาล. 2556. สาหร่ายน้ำจืดในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 2. โชตนาพรินท์ จำกัด เชียงใหม่. 434 น.
- ยุวดี พิรพรพิศาล และฉมาภรณ์ นิवासบุตร. 2546. คู่มือปฏิบัติการสาหร่ายวิทยา. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 110 น.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2556. วัฏจักรคาร์บอน.(ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา <http://th.wikipedia.org/wiki/3> กันยายน 2556).
- วิชาการดอทคอม. 2556. โครงการผลิตจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อนใต้ดิน. (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา <http://vcharkarn.com/vnews/153945> (3 กันยายน 2556).
- วิฑูรย์ ปัญญากุล. 2555. การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ. มุลนิธิสายใย. ไทยยูเนี่ยนกราฟฟิกส์. 233 น.

- ศิริณา พงษ์พีระ. 2553. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเส้นขนมจีนโดยใช้สไปรูลีนา (*Spirulina* sp.) และคลอเรลลา (*Chlorella* sp.). วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2556. เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ และการนำไปใช้ประโยชน์. (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา http://biogas.erdia.or.th/biogasTech_sub_adv.php (3 กันยายน 2556)
- สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2556. โครงการศึกษาเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ. (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา <http://mix-waste.erdia.or.th/> (3 กันยายน 2556).
- สุนิสา บุญมา ศุภรินทร์ ไชยกลางเมือง สุรพล ไชวงค์ษา จีรพร เพกเกาะ ชยากร ภูมาส และชวดี พิรพพิศาล. 2556. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายผสมขนาดเล็กเพื่อลดปริมาณก๊าซแอมโมเนียไดออกไซด์และผลิตน้ำมันชีวภาพ. น. 16. ในการประชุมวิชาการ สาหร่ายและแพลงก์ตอนแห่งชาติ ครั้งที่ 6. เชียงใหม่.
- อนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล ธนวัฒน์ คำนวณกุลและสมจินตนา ลิ้มสุข. 2556. การเพิ่มมูลค่าของเสียด้วยเทคโนโลยีสะอาด: กรณีศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะเศษอาหารและของเหลือทิ้ง. (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา [http://www.research.kmutnb.ac.th/attach/pdf/news_104_TISTR_May21_2011\[1\]anuran.pdf](http://www.research.kmutnb.ac.th/attach/pdf/news_104_TISTR_May21_2011[1]anuran.pdf) (3 กันยายน 2556).
- อารียา วิรัชวรกุล. 2546. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 173 น.
- Ahn, J., H. Kwon, L. Soo Young, C. Han-Gu, P. Youn-Il, L. Jang Ryol and J. Won-Joong. 2012. Shorth Communication Anew Arctic Chlorella species for biodiesel production. *Bioresource Technology*. 125: 340-343.
- Chan, A. 2011. Use of microalgae in wastewater treatment to remove contaminants and purify biogas. Ph.D.vThe University of Guelph, Canada. 136p.
- Demirbas, A. 2010. Use of algae as biofuel sources. *Energy Conversion and Management*. 51: 2738-2749.

- Greque de Morais, M. and Alberto viera Costa, J. 2007. Biofixation of Carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactors. **Biotechnology**. 129: 439-445.
- Greque de Morais, M. and Alberto viera Costa, J. 2007. Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors. **Biotechnol Lett**. 29: 1349-1352.
- Hossain, S., S. Aishah, N. B. Amru, C. Partha and N. Mohd. 2008. Biodiesel Fuel Production from Algae as Renewable Energy. **American Journal of Biochemistry and Biotechnology**. 4 (3):250-254.
- Ho, S., C. Chun-Yen, L. Duu-Jong and C. Jo-Shu. 2011. Research review paper : Perspectives on microalgae CO₂-emission mitigation systems – A review. **Biotechnology Advances**. 29: 189 -198.
- Ho, S., C. Chun-Yen and C. Jo-Shu. 2010. *Scenedesmus obliquus* CNW-N as a potential candidate for CO₂ mitigation and biodiesel production. **Bioresource Technology**. 101: 8725-8730.
- Kao, C., C. Sheng-Yi, H. Tzu-Ting, D. Le, H. Ling-Kang and L. Chih-Sheng. 2012a. Ability of a mutant strain of microalgae *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide capture for biogas upgrading. **Applied Energy**. 39: 76-183.
- Kao, C., C., Sheng-Yi, H. Tzu-Ting, D. Le, W. Guan-Hua, T. Ching-Ping, C. Chiun-Hsun and L. Chih-Sheng. 2012b. A mutant strain of microalgae *Chlorella* sp. for the carbon dioxide capture from biogas. **Biomass and Bioenergy**. 36: 32-140.
- Lam, M. K., Lee, K. T. and Mohamed, A. R. 2012. Current status and challenges on microalgae-Based carbon capture. **Greenhouse Gas Control**. 10: 456-469.
- Michael L., S and F. Kargri. 1992. **Bioprocess Engineering**. Pentice-Hall, Inc. Engle Wood Cliffs, New Jersey. USA. 479 p.
- Salih, F. M. 2011. Microalgae Tolerance to High Concentrations of Carbon Dioxide: A review. **Environmental Protection**. 2: 648-654.

- Shih-Hsin Ho, C. Wen-Ming and C. Jo-Shu. 2010. *Scenedesmus obliquus* CNW-N as a potential Candidate for CO₂ mitigation and biodiesel production. **Bioresource Technology**. 101: 8725-8730.
- Stevenson, R. J., Bennett, B. J., Jordan, D.N. and French, R.D. 2012. Phosphorus regulates stream injury by filamentous green algae, Do, and pH with thresholds in responses. **Hydrobiologia**. 695: 25-42.
- Varfolomeev, S. D. and Wasserman L. A. 2011. Microalgae as Source of Biofuel Food and Medicine. **Applied Biochemistry and Microbiology**. 47(9): 789-807.
- Wang, B., L. Yanqun, W. Nan, and L. Christopher Q. 2008. MINI-REVIEW CO₂ biomitigation using microalgae. **Appl Microbiol Biotechnol**. 79: 707-718.
- Xinahai, Z., M.K. Danquah, S. Zhang, X. Zhang, M. Wu, X. Dong Chen, I. Ng, K. Jing and Y. Lu. 2012. Autotrophic cultivation of *Spirulina platensis* for CO₂ fixation and phycocyanin production. **Chemical Engineering**. 183: 192-197.
- Yue, L. and Chen, W. 2005. Isolation and determination of cultural characteristics of new highly CO₂ tolerant fresh water microalgae. **Energy Conversion and Management**. 46(11-12): 1868-1876.
- Zhao, Q., E. Leonhardt, C. MacConnell, C. Frear and S. Chen. 2010. pp. 1-24. Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion. **CSANR Research Report 2010 – 001**.



ภาคผนวก

อนุกรมวิธานของสาหร่ายที่ใช้ในการทดลอง

1. *Chlorella* sp.

สาหร่าย *Chlorella* sp. เป็นสาหร่ายสีเขียวที่มีชื่อมาจากภาษากรีกคือคำว่า chloros ซึ่งแปลว่าสีเขียวและจากภาษาละติน ella ซึ่งแปลว่าเล็กสาหร่ายชนิดนี้มีลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยวที่มีขนาดเล็กโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-10 μm ไม่มี Flagella รูปร่างกลมหรือรีผนังค่อนข้างบางมีรงควัตถุที่ช่วยสังเคราะห์แสงคือคลอโรฟิลล์ A และ B โดยจะอยู่ในคลอโรพลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นเป็นรูปถ้วยหรือเป็นแผ่นอยู่ริมเซลล์สืบพันธุ์โดยไม่อาศัยเพศโดยการสร้างออโตสปอร์ (Auto Spore) มีจำนวน 4, 8 หรือ 16 สาหร่ายชนิดนี้พบทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม

อนุกรมวิธานของสาหร่ายคลอเรลลา

Kingdom : Plantae

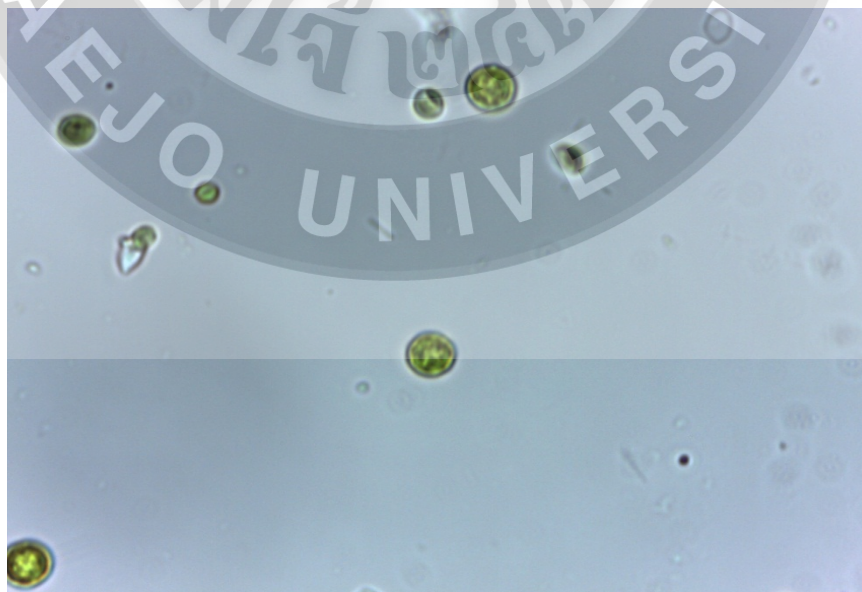
Division: Chlorophyta

Class: Trebouxiophyceae

Order: Chlorellales

Family: Chlorellaceae

Genues: *Chlorella*



ภาพที่ 1 สาหร่าย *Chlorella* sp.

2. *Chlorella* sp. MJU

สาหร่าย *Chlorella* sp. เป็นสาหร่ายสีเขียวที่มีชื่อมาจากภาษากรีกคือคำว่า chloros ซึ่งแปลว่าสีเขียวและจากภาษาละติน ella ซึ่งแปลว่าเล็กสาหร่ายชนิดนี้มีลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยวที่มีขนาดเล็กโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-10 μm ไม่มี Flagella รูปร่างกลมหรือรีผนังค่อนข้างบางมีรงควัตถุที่ช่วยสังเคราะห์แสงคือคลอโรฟิลล์ A และ B โดยจะอยู่ในคลอโรพลาสต์ซึ่งมีลักษณะเป็นเป็นรูปถ้วยหรือเป็นแผ่นอยู่ริมเซลล์สืบพันธุ์โดยไม่อาศัยเพศโดยการสร้างออโตสปอร์ (Auto Spore) มีจำนวน 4,8 หรือ 16 สาหร่ายชนิดนี้พบทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม

อนุกรมวิธานของสาหร่ายคลอเรลลา

Kingdom: Plantae

Division: Chlorophyta

Class: Trebouxiophyceae

Order: Chlorellales

Family: Chlorellaceae

Genues: *Chlorella*



ภาพที่ 2 สาหร่าย *Chlorella* sp. MJU

3. *Scenedesmus* sp.

สาหร่าย *Scenedesmus* เป็นหนึ่งในจำพวกสาหร่ายน้ำจืดที่ประกอบไปด้วยหลายร้อยชื่อสายพันธุ์เซลล์ของ *Scenedesmus* มีลักษณะสำคัญเป็นกลุ่มเซลล์แบนอาจพบมีลักษณะบิดเบี้ยวบ้าง เซลล์อยู่รวม 2-4-8 เซลล์ อาจพบ 16-32 เซลล์ ส่วนมากมักพบเป็นทวีคูณของ 2 เซลล์ มีลักษณะโค้งรูปไข่แบนหรือรูปไข่ หรือทรงกระบอก การเรียงตัวอาจเป็น 1 หรือ 2 โดยใช้ด้านข้างเซลล์เชื่อมกัน ผนังเซลล์เรียบหรือมีลักษณะคล้ายเม็ดเล็ก ๆ ติดอยู่ด้านข้างพบลักษณะที่เป็นสัน เป็นฟันหรือหนามเล็ก ๆ

อนุกรมวิธานของสาหร่าย *Scenedesmus*

Kingdom: Plantae

Division: Chlorophyta

Class: Chlorophyceae

Order: Chlorococcales

Family: Scenedesmaceae

Genues: *Scenedesmus*



ภาพที่ 3 สาหร่าย *Scenedesmus* sp.

4. *Scenedesmus Obliquus* TISTR 8522

สาหร่าย *Scenedesmus* เป็นหนึ่งในจำพวกสาหร่ายน้ำจืดที่ประกอบไปด้วยหลายร้อยชื่อสายพันธุ์ เซลล์ของ *Scenedesmus* มีลักษณะสำคัญเป็นกลุ่มเซลล์แบนอาจพบมีลักษณะบิดเบี้ยวบ้าง เซลล์อยู่รวม 2-4-8 เซลล์ อาจพบ 16-32 เซลล์ ส่วนมากมักพบเป็นทวีคูณของ 2 เซลล์ มีลักษณะโค้งรูปไข่แบนหรือรูปไข่ หรือทรงกระบอก การเรียงตัวอาจเป็น 1 หรือ 2 โดยใช้ด้านข้างเซลล์เชื่อมกัน ผนังเซลล์เรียบหรือมีลักษณะคล้ายเม็ดเล็ก ๆ ติดอยู่ด้านข้างพบลักษณะที่เป็นสัน เป็นฟันหรือหนามเล็ก ๆ

อนุกรมวิธานของสาหร่าย *Scenedesmus*

Kingdom: Plantae

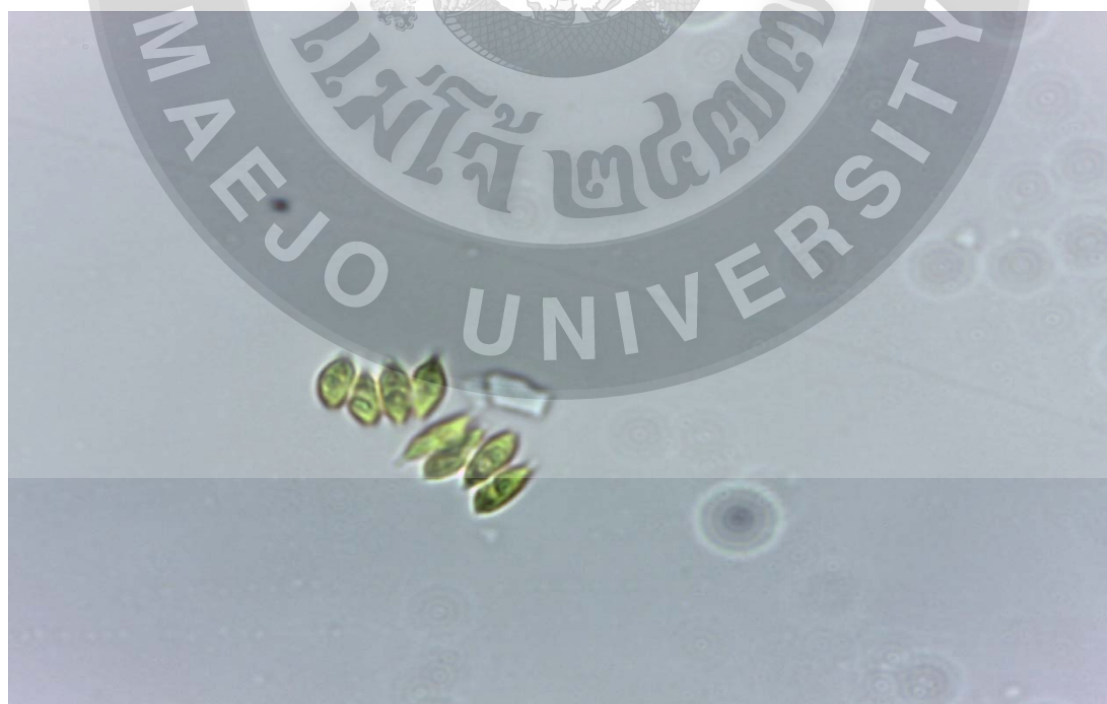
Division: Chlorophyta

Class: Chlorophyceae

Order: Chlorococcales

Family: Scenedesmaceae

Genues: *Scenedesmus*



ภาพที่ 4 สาหร่าย *Scenedesmus obliquus* TISTR 8522

5. *Spirulina* sp.

สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina*) มีหมายความว่า “เกลียว” เนื่องจากมีเส้นสาย (filament) ที่ขดบิดกันเป็นเกลียวสาหร่ายชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae หรือ Cyanobacterium) เป็นสิ่งมีชีวิตประเภทโปรแคริโอต (prokaryote) คือไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส

อนุกรมวิธานของสาหร่าย *Spirulina*

Kingdom: Monera

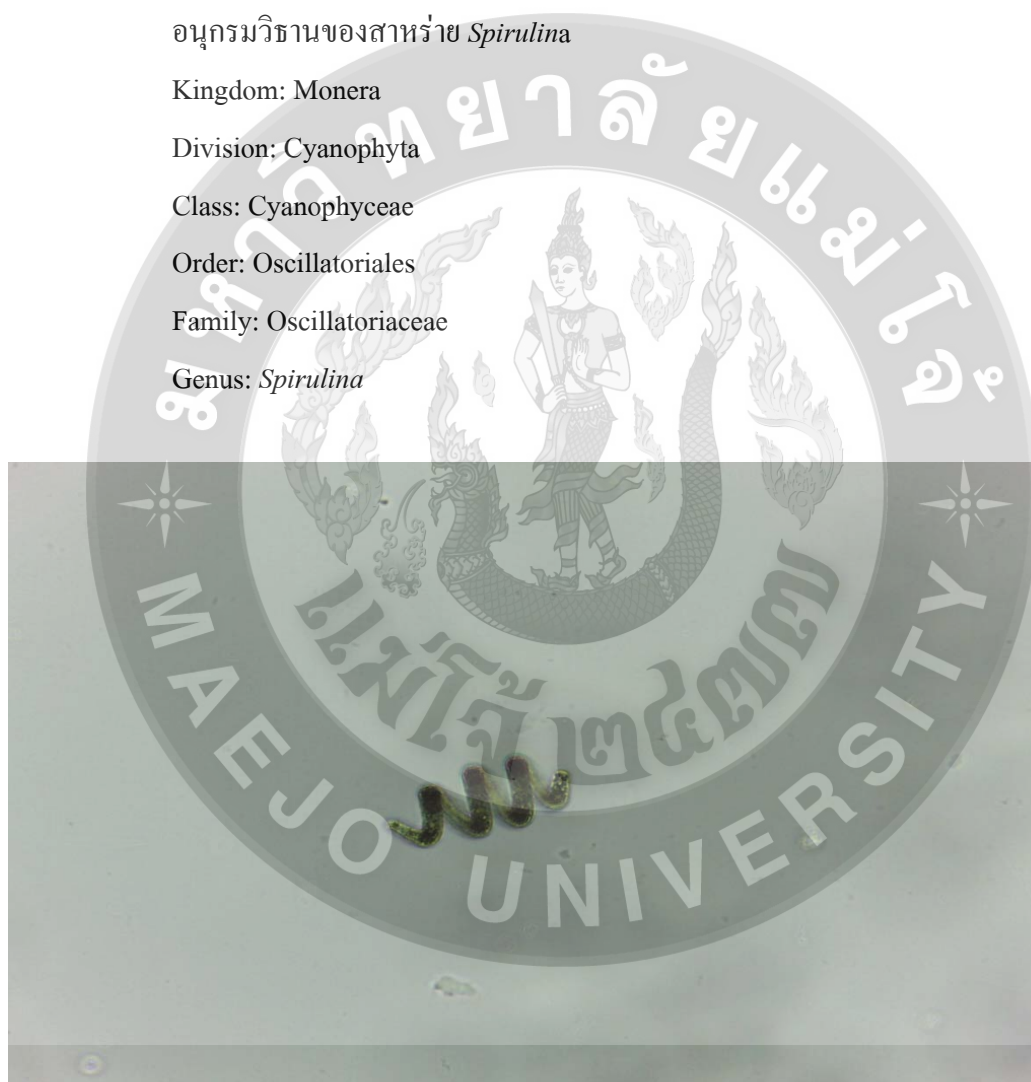
Division: Cyanophyta

Class: Cyanophyceae

Order: Oscillatoriales

Family: Oscillatoriaceae

Genus: *Spirulina*



ภาพที่ 5 สาหร่าย *Spirulina* sp.