

บทที่ 4

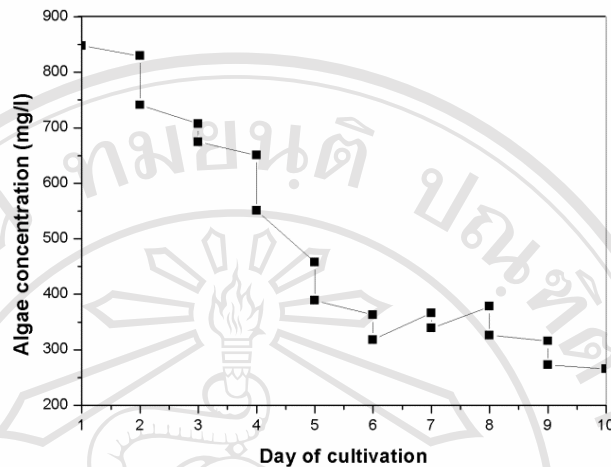
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การดำเนินงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการศึกษาหาผลกระทบของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพดิบที่มีต่อ *Chlorella* sp. ที่อยู่ในระบบ กำหนดอัตราการจ่ายก๊าซ 0.05 วิวี่เอ็ม ที่ SRT 8 วัน ให้ก๊าซชีวภาพแก่ระบบวันละ 8 ชั่วโมงโดยไม่มีการเติมอากาศเข้าไปในระบบใดๆ ทั้งสิ้น และเดินระบบต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 7 วัน และส่วนที่สองเดินระบบโดยใช้ก๊าซชีวภาพที่ผ่านการกรองก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เพื่อหาความสามารถในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ *Chlorella* sp. และหาอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. ที่ SRT 8 วัน มีการเปรียบเทียบการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. โดยแปรผันอัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพจำนวน 4 ค่า คือ 0.050, 0.035, 0.020 และ 0.005 วิวี่เอ็ม และเดินระบบโดยจ่ายก๊าซชีวภาพครั้งละ 1 ชั่วโมง สลับด้วยอากาศ 30 นาทีต่อรอบ และเดินระบบ 3 รอบต่อวัน จากนั้นบันทึกผลการทดลองที่สภาวะสมดุล นอกจากนั้นได้เดินระบบโดยใช้สารอาหารเปล่าที่ไม่มี *Chlorella* sp. ในสภาวะเดียวกันกับการทดลองที่ใช้ *Chlorella* sp. เพื่อหาประสิทธิภาพสุทธิ (net efficiency) ที่ได้จาก *Chlorella* sp. โดยทุกการทดลองที่ใช้ *Chlorella* sp. จะใช้ *Chlorella* sp. ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ไม่น้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองแสดงได้ตามลำดับดังต่อไปนี้

4.1 ผลกระทบของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพดิบที่มีต่อ *Chlorella* sp.

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ก๊าซชีวภาพที่ได้รับการกรองไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพจนเหลือน้อยกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน แต่ก่อนเริ่มเก็บข้อมูล ได้นำก๊าซชีวภาพดิบที่ไม่ผ่านการกรองไฮโดรเจนซัลไฟด์มาปล่อยเข้าสู่ระบบที่อัตราการจ่ายก๊าซ 0.05 วิวี่เอ็ม โดยก๊าซดิบที่นำมาใช้นี้มีค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบของก๊าซมีเทน 63.71 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25.06 เปอร์เซ็นต์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่า 761.59 ล้านต่อล้านส่วน โดยเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 9 วัน ซึ่งผลความเข้มข้นของ *Chlorella* sp. และค่าของแอมโมเนียและไนโตรเจนในระบบของ

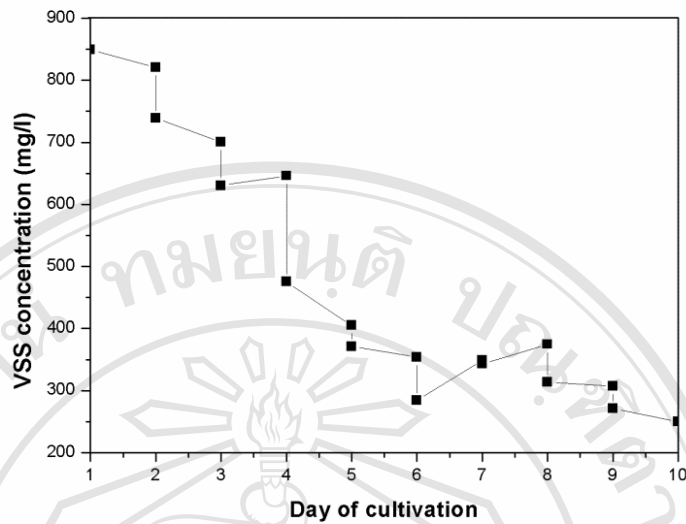
การศึกษานี้ แสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ ส่วนรายละเอียดนั้นได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.



รูป 4.1 ความเข้มข้น *Chlorella* sp. เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพดิบที่อัตราการจ่ายก๊าซ 0.05 วิวีเอ็ม

จากผลที่ได้ดังรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของ *Chlorella* sp. ลดลงอย่างต่อเนื่องและเมื่อรวมกับผลของการนำ *Chlorella* sp. ออกจากระบบวันละ 1 ลิตร ยิ่งทำให้ความเข้มข้นในระบบลดลงรวดเร็วยิ่งขึ้น ในระยะเวลา 9 วัน ความเข้มข้นของ *Chlorella* sp. ลดลงจาก 850 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เนื่องจาก *Chlorella* sp. ในระบบไม่มีการเจริญเติบโต เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของ Kao *et al.*, (2012b) ที่ได้ผลการทดลองโดยใช้ก๊าซชีวภาพที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่า 100 ส่วนในล้านส่วนที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.3 วิวีเอ็ม พบว่า *Chlorella* sp. ในระบบยังสามารถเติบโตได้ดีในช่วงเวลา 7 วันของการทดลอง แต่หากใช้ก๊าซชีวภาพที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ 200 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นของ *Chlorella* sp. ในระบบลดลงเรื่อยๆ ตลอดระยะเวลา 7 วันของการทดลอง ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์หากเข้าสู่ระบบในปริมาณมากเกินไป 200 ส่วนในล้านส่วน อาจสร้างความเป็นพิษให้แก่ *Chlorella* sp. นับว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน

ในการทดลองนี้ได้ทำการหาค่าของแข็งแขวนลอยระเหยได้ (Volatile Suspended Solid) จากการหาความเข้มข้นของ *Chlorella* sp. จากข้อมูลในรูปที่ 4.1 สามารถแสดงค่าของแข็งแขวนลอยระเหยที่ได้ ดังรูปที่ 4.2



รูป 4.2 ค่าของแข็งแขวนลอยระเหยได้ในโฟโตไบโอรีแอक्टर
เมื่อเดินระบบด้วยก๊าซชีวภาพดิบที่อัตราการไหล 0.05 ลิตร/วินาที

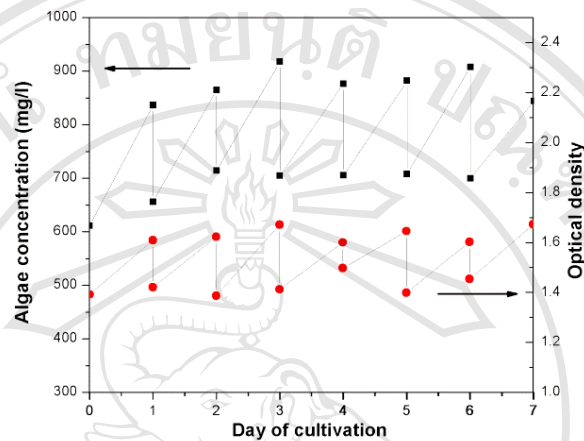
จากข้อมูลแสดงในรูปที่ 4.2 ของแข็งแขวนลอยระเหยได้คิดเป็น 96.5 เปอร์เซ็นต์ของของแข็งระเหยได้ในระบบที่แสดงข้อมูลไว้ในรูปที่ 4.1 แต่ในทางทฤษฎี ชีวมวลในระบบจัดเป็นสารอินทรีย์ที่ถือเป็นของแข็งแขวนลอยระเหยได้ทั้งหมด ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนได้บ้างจากสิ่งเจือปนในโฟโตไบโอรีแอक्टरเพราะเป็นระบบที่ไม่ได้ควบคุมการติดเชื้อ

4.2 การศึกษาความสามารถในการลดคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ก๊าซชีวภาพที่ผ่านการลดไฮโดรเจนซัลไฟด์

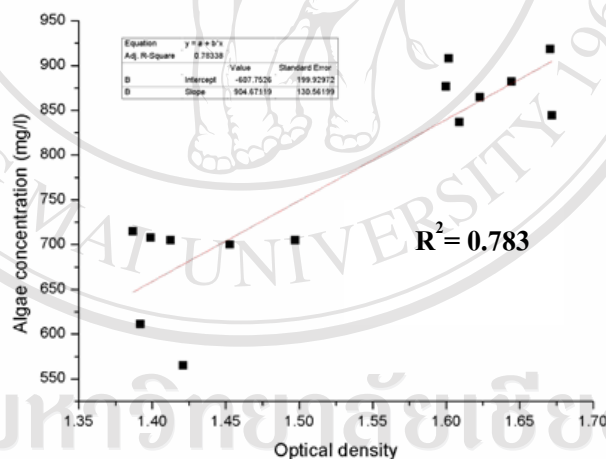
4.2.1 อัตราการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp.

ในการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. นั้น การเริ่มต้นเดินระบบความเข้มข้น *Chlorella* sp. ที่นำมาใช้มีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับการรักษาค่า SRT 8 วันนั้น *Chlorella* sp. ในระบบได้ถูกนำออกก่อนการเดินระบบวันละ 1 ลิตรจากนั้นจึงเดินระบบอย่างต่อเนื่องจนกว่าอัตราการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. จะเข้าสู่สภาวะสมดุลติดต่อกัน 7 วัน ซึ่งหมายถึง *Chlorella* sp. ที่เจริญเติบโตจากการเดินระบบในแต่ละวันมีค่าใกล้เคียงกับปริมาตร *Chlorella* sp. ที่นำออก

อัตราการเจริญเติบโตในสภาวะสมดุล 7 วัน แสดงผลเป็นน้ำหนักแห้ง ความทึบแสง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งกับความทึบแสงที่แสดงค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) ในรูปที่ 4.3 – 4.6 สอดคล้องกับอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่ 0.050 วิวี่เอ็ม, 0.035 วิวี่เอ็ม, 0.020 วิวี่เอ็ม และ 0.005 วิวี่เอ็ม ตามลำดับ ส่วนรายละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.



(ก)

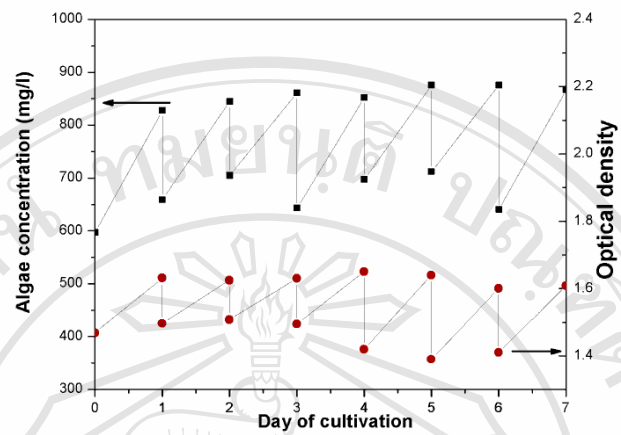


(ข)

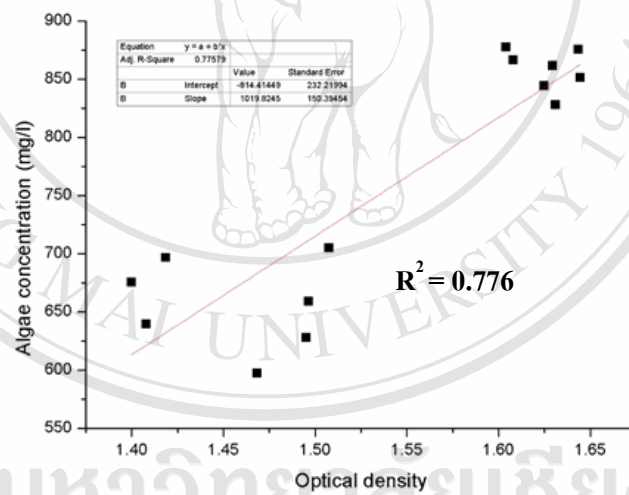
รูป 4.3 อัตราการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. ในสภาวะสมดุล 7 วัน และค่า R^2 เมื่ออัตราการไหลของก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.050 วิวี่เอ็ม

(ก) น้ำหนักแห้งและความทึบแสงในแต่ละวัน

(ข) ความสัมพันธ์เชิงเส้นของน้ำหนักแห้งกับความทึบแสง



(ก)

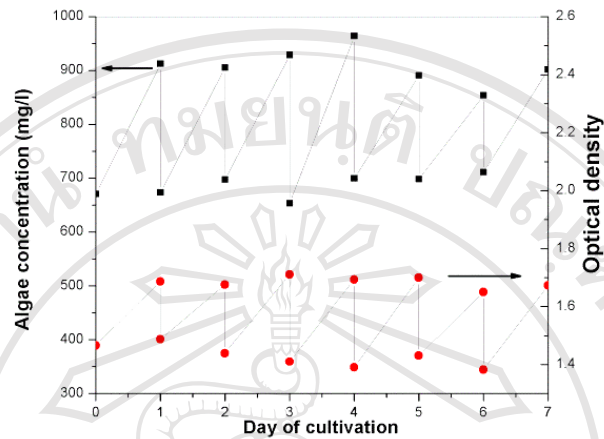


(ข)

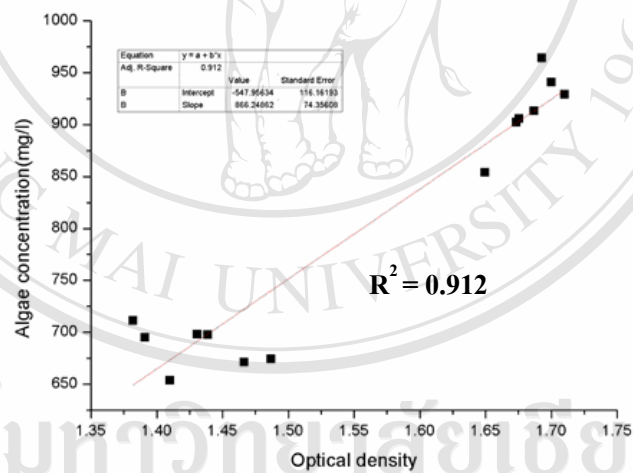
รูป 4.4 อัตราการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. ในสภาวะสมดุล 7 วัน และค่า R^2 เมื่อแปลค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.035 ลิ้วีเอ็ม

(ก) น้ำหนักแห้งและความทึบแสงในแต่ละวัน

(ข) ความสัมพันธ์เชิงเส้นของน้ำหนักแห้งกับความทึบแสง



(ก)

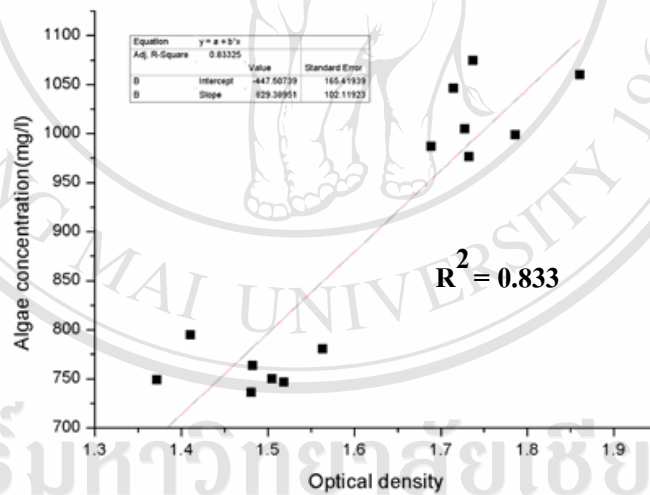
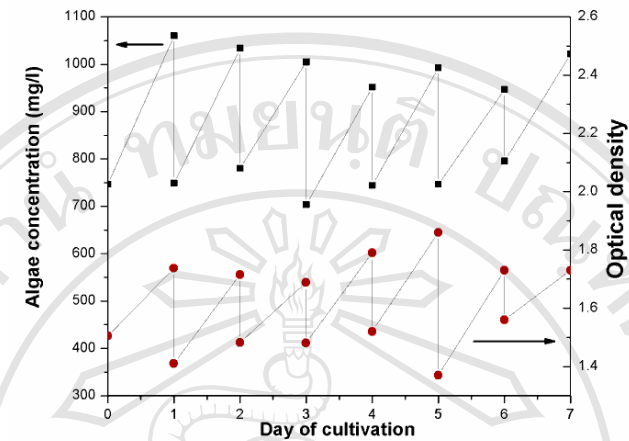
 $R^2 = 0.912$

(ข)

รูป 4.5 อัตราการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. ในสภาวะสมดุล 7 วัน และค่า R^2 เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.020 ลิ้วีเอ็ม

(ก) น้ำหนักแห้งและความทึบแสงในแต่ละวัน

(ข) ความสัมพันธ์เชิงเส้นของน้ำหนักแห้งกับความทึบแสง



รูป 4.6 อัตราการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. ในสภาวะสมดุล 7 วัน

และค่า R^2 เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.005 ลิวิเอ็ม

(ก) น้ำหนักแห้งและความทึบแสงในแต่ละวัน

(ข) ความสัมพันธ์เชิงเส้นของน้ำหนักแห้งกับความทึบแสง

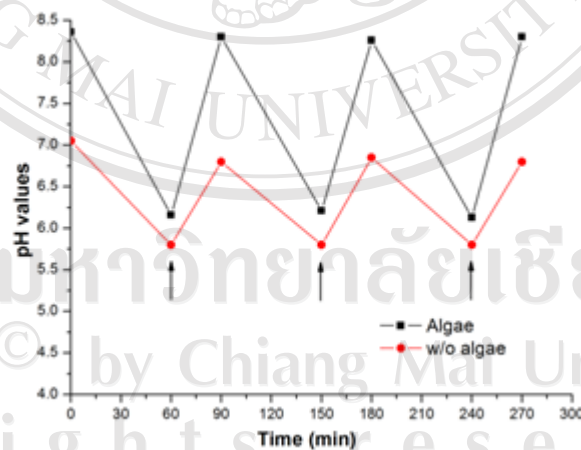
จากรูป 4.3 ที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพเป็น 0.050 วิวีเอ็ม ค่าความเข้มข้นของ *Chlorella* sp. เริ่มต้นในสภาวะสมดุลอยู่ที่ 611 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นจะเพิ่มขึ้นไปที่ 837 มิลลิกรัมต่อลิตรในวันแรก เมื่อนำ *Chlorella* sp. ออก 1 ลิตรความเข้มข้นเริ่มต้นในวันที่ 2 จะลดลงเหลือ 656 มิลลิกรัมต่อลิตรและเพิ่มขึ้นไปเป็น 865 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อสิ้นสุดการทดลองวันที่สอง การเพิ่มและการลดลงของความเข้มข้น *Chlorella* sp. มีลักษณะเหมือนฟันเลื่อยซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแต่ไม่เกินค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ สามารถวัดเป็นค่าความทึบแสง (Optical Density) ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตรได้อยู่ในช่วง 1.387 - 1.672 คิดค่า R^2 ได้เท่ากับ 0.783 และในการทดลองนี้อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยที่ได้มีค่าเป็น 0.190 กรัมต่อลิตรต่อวัน ส่วนในรูปที่ 4.4 อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพเป็น 0.035 วิวีเอ็ม ค่าความเข้มข้นของ *Chlorella* sp. เริ่มต้นในสภาวะสมดุลของการทดลองนี้อยู่ที่ 597 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นมีการเจริญเติบโตขึ้นไปอยู่ที่ 828 มิลลิกรัมต่อลิตรในวันแรก ความเข้มข้นเริ่มต้นในสภาวะสมดุลของการทดลองครั้งนี้มีค่าต่ำกว่าการทดลองที่ 0.050 วิวีเอ็มเล็กน้อย ค่าความทึบแสงที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตรของครั้งนี้มีค่าอยู่ในช่วง 1.40-1.65 คิดค่า R^2 ได้เท่ากับ 0.776 อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยที่ได้มีค่า 0.200 กรัมต่อลิตรต่อวัน สำหรับอัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.020 วิวีเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ *Chlorella* sp. ในสภาวะสมดุลอยู่ที่ 671 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นจะเจริญเติบโตขึ้นไปอยู่ที่ 913 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันแรก ค่าความทึบแสงที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตรของการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง 1.39-1.71 คิดค่า R^2 ได้เท่ากับ 0.912 และเมื่อรักษาสภาวะสมดุลได้ 7 วันสามารถคิดอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยได้เท่ากับ 0.229 กรัมต่อลิตรต่อวัน และที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.005 วิวีเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นของ *Chlorella* sp. เริ่มต้นในสภาวะสมดุลอยู่ที่ 750 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นจะเพิ่มขึ้นไปที่ 1,075 ในวันแรก และในวันถัดไปจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ค่าความทึบแสงที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตรของครั้งนี้มีค่าอยู่ในช่วง 1.372 - 1.861 คิดค่า R^2 ได้เท่ากับ 0.833 ซึ่งในการทดลองนี้อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยที่ได้มีค่า 0.260 กรัมต่อลิตรต่อวันซึ่งเป็นอัตราการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. ที่ดีที่สุดในการศึกษาครั้งนี้ และจากกราฟแสดงได้ว่า น้ำหนักแห้งกับความทึบแสงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นค่อนข้างดี โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.776 - 0.912

จากผลการศึกษาที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Kao *et al.*, (2012a) พบว่าที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.050 วิวีเอ็ม ได้อัตราการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. สูงสุดที่ 0.32 กรัมต่อลิตรต่อวันซึ่งมีค่าที่สูงกว่าผลที่ได้จากการศึกษานี้ สาเหตุที่ทำให้ผลที่ได้แตกต่างกันก็คือ วิธีการเลี้ยง Kao *et al.*, (2012a) เลี้ยงโดยไม่มีการนำ *Chlorella* sp. ออกจากระบบในแต่ละวัน

และความเข้มข้นของ *Chlorella* sp. ที่ Kao *et al.*, (2012a) ใช้มีความเข้มข้นสูงกว่าค่าความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองนี้ที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เทียบกับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมไปถึงอัตราการเจริญเติบโตในรายงานของ Kao *et al.*, (2012a) เป็นค่าสูงสุดที่ได้ แต่การศึกษานี้รายงานเป็นค่าเฉลี่ยตลอดการศึกษาในสภาวะสมดุล 7 วัน อย่างไรก็ตามการทดลองของ Kao *et al.*, (2012a) ยังให้ผลที่สอดคล้องกับการศึกษานี้ก็คือ หากเพิ่มอัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพมากขึ้น อัตราการเติบโตของ *Chlorella* sp. จะลดลง ที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.3 วิวีเอ็ม อัตราการเจริญเติบโตของ *Chlorella* sp. มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.30 กรัมต่อลิตรต่อวัน

4.2.2 ผลการแปรผันของค่าพีเอช

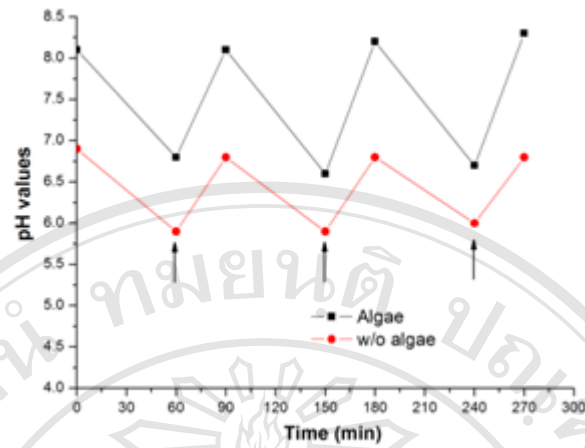
การศึกษากการแปรผันของค่าพีเอชนี้ ค่าพีเอชในสารอาหารได้ถูกปรับให้อยู่ในช่วง 6.8 - 7.0 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี แต่จากการทดลองพบว่าค่าพีเอชของ *Chlorella* sp. ที่เลี้ยงโดยใช้สารอาหารมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 8.3 ซึ่งสาเหตุที่สาหร่ายมีค่าพีเอชสูงกว่าสารอาหารเปล่าได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 2.7 สมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.4) ซึ่งค่าพีเอชที่แสดงในกราฟนี้เป็นค่าเฉลี่ยจากสภาวะสมดุล 7 วันในแต่ละการทดลอง ได้แสดงข้อมูลอยู่ในช่วงเวลา 1 วันในรูปแบบที่ 4.7 (ก) – 4.7 (ง)



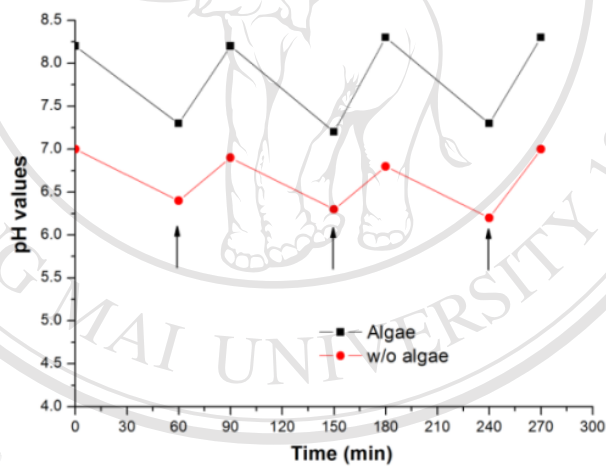
(ก)

รูป 4.7 การแปรผันของค่าพีเอช เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ

(ก) 0.050 วิวีเอ็ม (ข) 0.035 วิวีเอ็ม (ค) 0.020 วิวีเอ็ม (ง) 0.005 วิวีเอ็ม



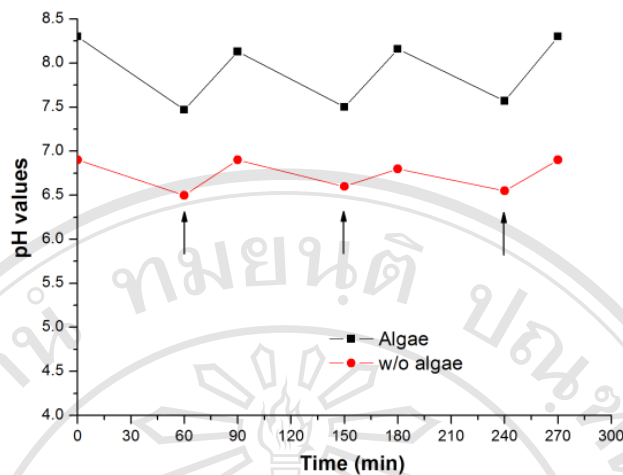
(ข)



(ค)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 All rights reserved

รูป 4.7 การแปรผันของค่าพีเอช เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ
 (ก) 0.050 ลิวิเอม (ข) 0.035 ลิวิเอม (ค) 0.020 ลิวิเอม (ง) 0.005 ลิวิเอม (ต่อ)



(ง)

รูป 4.7 การแปรผันของค่าพีเอช เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (ก) 0.050 วิวี่เอ็ม (ข) 0.035 วิวี่เอ็ม (ค) 0.020 วิวี่เอ็ม (ง) 0.005 วิวี่เอ็ม (ต่อ)

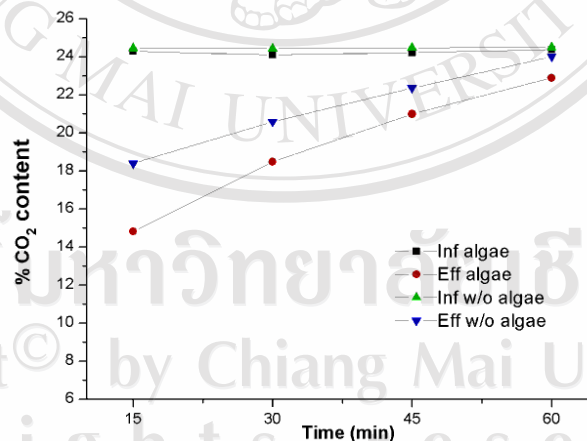
จากรูป 4.7 (ก) เป็นการแสดงค่าพีเอชเฉลี่ยจาก 3 รอบการทดลองของ 7 วันที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.050 วิวี่เอ็ม พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของ *Chlorella* sp. และสารอาหารได้ลดลงหลังจากให้ก๊าซชีวภาพเป็นเวลา 60 นาที โดยใน *Chlorella* sp. จะลดลงจาก 8.3 เหลือประมาณ 6.3 ส่วนในสารอาหารลดลงจากประมาณ 7.0 เหลือ 5.8 ซึ่งการลดลงของค่าพีเอชนี้เกิดจากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ และหลังจากนั้นสามารถปรับค่าพีเอชให้กลับคืนโดยการให้อากาศเข้าสู่ระบบที่อัตราการไหล 30 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งช่วงเวลาที่มีการให้อากาศ คือช่วงเวลาที่มิลูกศรชี้ที่ปรากฏในรูป ส่วนในรูปที่ 4.7 (ข) ซึ่งมีอัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพที่ 0.035 วิวี่เอ็มนั้น เมื่อเดินระบบโดยใช้ *Chlorella* sp. ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8.2 - 6.7 และในสารอาหารมีค่าอยู่ในช่วง 6.9 - 6.0 ซึ่งเป็นค่าแปรผันที่ต่ำกว่าการทดลองครั้งแรกที่ 0.050 วิวี่เอ็ม สำหรับในรูปที่ 4.7 (ค) นั้น มีอัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพที่ 0.020 วิวี่เอ็มค่าแปรผันของค่าพีเอชเมื่อใช้ *Chlorella* sp. มีค่าอยู่ในช่วง 8.2 - 7.3 ส่วนในสารอาหารมีค่าอยู่ในช่วง 6.9 - 6.3 และการแปรผันของค่าพีเอชที่อัตราการไหลต่ำที่สุด 0.005 วิวี่เอ็มดังรูปที่ 4.7 (ง) เมื่อใช้ *Chlorella* sp. มีค่าอยู่ในช่วง 8.3 - 7.5 และในสารอาหารมีค่าอยู่ในช่วง 6.8 - 6.5 ซึ่งนับเป็นการแปรผันค่าพีเอชที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองที่ใช้อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพที่สูงกว่า

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การจ่ายอากาศเข้าไปในระบบสามารถคืนค่าพีเอชได้อย่างมีประสิทธิภาพและสรุปได้ว่าการแปรผันของค่าพีเอชนั้นแปรผันตามปริมาณก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าสู่ระบบ และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kao *et al.*, (2012b) ซึ่งใช้อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.3 ลิตร/ชั่วโมง เป็นเวลา 30 นาที สลับด้วยอากาศ 30 นาที พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นในระบบมีค่า 8.7 หลังจากจ่ายก๊าซชีวภาพเข้าไปในระบบ 30 นาที ค่าพีเอชจะลดลงมาอยู่ที่ 6.5 และเมื่อเติมอากาศเข้าไปเป็นเวลา 30 นาที ค่าพีเอชจะกลับขึ้นไปอยู่ที่ 8.7 เท่าเดิม สรุปได้ว่าเมื่อจ่ายก๊าซชีวภาพให้กับระบบ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกจับในระบบได้ทำให้ค่าพีเอชลดลง อย่างไรก็ตาม ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำสามารถกำจัดออกไปได้ด้วยการเติมอากาศเข้าสู่ระบบซึ่งมีผลให้ค่าพีเอชปรับเพิ่มขึ้นได้

4.2.3 ความสามารถในการลดคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพ

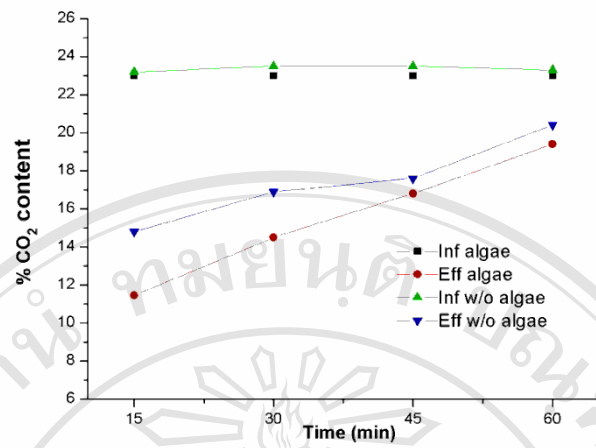
ในการวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพนั้น ได้ดำเนินการวัดทุก ๆ เวลา 15 นาที เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ต่อเนื่องและผลที่แสดงต่อไปนี้เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จาก 3 รอบการทดลองในแต่ละวันตลอดระยะเวลา 7 วันที่สภาวะสมดุลของ *Chlorella* sp. แสดงเป็นค่าเฉลี่ยในช่วง 1 ชั่วโมงของเวลาจ่ายก๊าซชีวภาพ ในการพิจารณาความสามารถในการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นการพิจารณาเป็นช่วงเวลา ไม่ได้พิจารณาเป็นค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมด เนื่องจากธรรมชาติการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non linear reduction) ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 (ก) – 4.8 (ง) ส่วนรายละเอียดนั้นได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง.



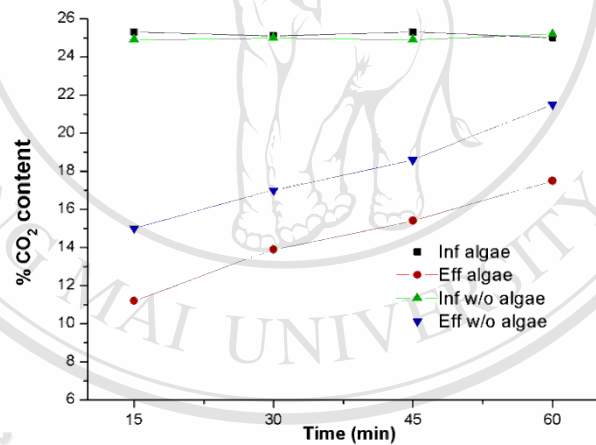
(ก)

รูป 4.8 เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดได้เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ

(ก) 0.050 ลิตร/ชั่วโมง (ข) 0.035 ลิตร/ชั่วโมง (ค) 0.020 ลิตร/ชั่วโมง (ง) 0.005 ลิตร/ชั่วโมง

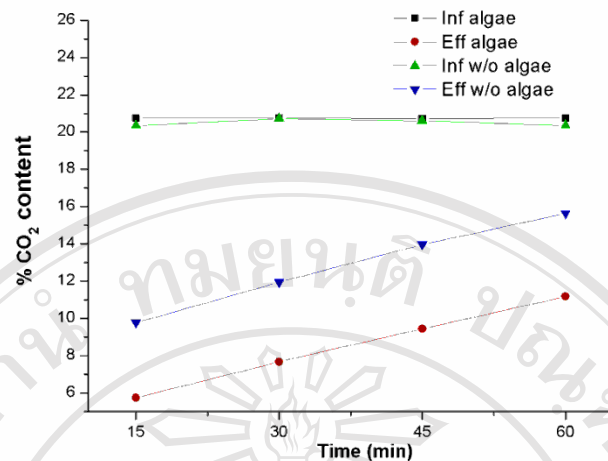


(ข)



(ค)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 รูป 4.8 เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดได้เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ
 (ก) 0.050 วิวีเอ็ม (ข) 0.035 วิวีเอ็ม (ค) 0.020 วิวีเอ็ม (ง) 0.005 วิวีเอ็ม (ต่อ)



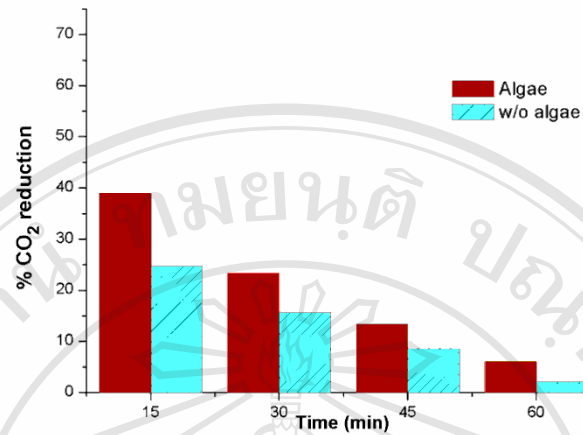
(ง)

รูป 4.8 เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (ก) 0.050 ลิวิเอ็ม (ข) 0.035 ลิวิเอ็ม (ค) 0.020 ลิวิเอ็ม (ง) 0.005 ลิวิเอ็ม (ต่อ)

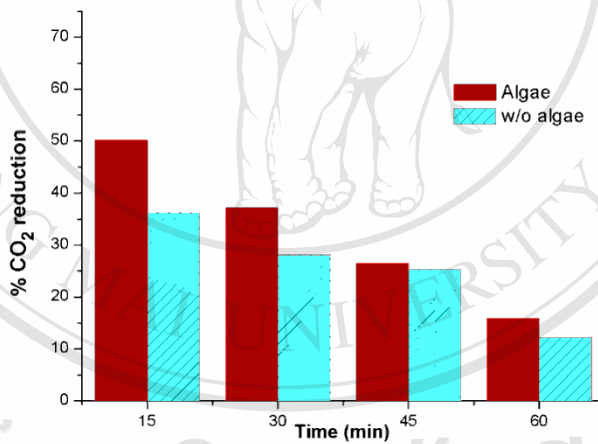
จากรูปที่ 4.8 (ก) เมื่อเดินระบบด้วย *Chlorella* sp. ที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.050 ลิวิเอ็มด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพที่เข้าระบบมีค่าเฉลี่ย 24.22 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และที่เวลา 15 นาทีของการวัดองค์ประกอบจะเป็นจุดที่สามารถลดคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากที่สุด คือสามารถลดลงมาได้เหลือ 14.68 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและเมื่อเดินระบบโดยใช้สารอาหาร คาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากค่าเฉลี่ยขาเข้า 24.37 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 18.68 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หลังจากนั้นประสิทธิภาพของระบบจะลดลงโดยค่าของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงเมื่อตรวจวัดที่เวลา 60 นาทีค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เดินระบบโดยใช้ *Chlorella* sp. จะมีค่าอยู่ที่ 23.16 เปอร์เซ็นต์และสำหรับสารอาหารมีค่า 24.0 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าที่วัดได้จากการเดินระบบโดยใช้สารอาหารนั้น คาร์บอนไดออกไซด์ออกจากระบบมีค่าใกล้เคียงคาร์บอนไดออกไซด์เข้าระบบ ซึ่งกล่าวได้ว่าการเดินระบบโดยใช้ *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องจากการคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงนั้นเกิดจากการนำไปใช้ของ *Chlorella* sp. และมีการกลายน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกันดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.4) แต่สำหรับในสารอาหารก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงนั้นเกิดจากการกลายน้ำเพียงอย่างเดียว ซึ่งประสิทธิภาพที่ได้แปรผันตรงกับค่าพีเอช กล่าวคือเมื่อค่าพีเอชในระบบลดลง ประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าลดลงเช่นกันและอุณหภูมิเฉลี่ยในการทดลองด้วย *Chlorella* sp. มีค่าเท่ากับ 34.16 องศาเซลเซียส และ 32.78 องศาเซลเซียสเมื่อเดินระบบด้วย

สารอาหาร ส่วนที่อัตราการใช้ 0.035 วิวีเอ็ม แสดงในรูปที่ 4.8 (ข) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าระบบมีค่าเฉลี่ยประมาณ 23.01 เปอร์เซ็นต์เมื่อเดินระบบด้วย *Chlorella* sp. ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบมีค่าลดลงมาอยู่ที่ 11.45 เปอร์เซ็นต์, 14.49 เปอร์เซ็นต์, 16.85 เปอร์เซ็นต์และ 19.40 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนการเดินระบบด้วยสารอาหารซึ่งมีค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าระบบเท่ากับ 23.44 เปอร์เซ็นต์นั้นพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที มีค่าอยู่ที่ 14.67 เปอร์เซ็นต์, 16.87 เปอร์เซ็นต์, 17.58 เปอร์เซ็นต์และ 20.43 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และอุณหภูมิเฉลี่ยในการทดลองด้วย *Chlorella* sp. มีค่า 32.91 องศาเซลเซียส และ 33.33 องศาเซลเซียสเมื่อเดินระบบด้วยสารอาหาร ในการทดลองที่อัตราการใช้ก๊าซชีวภาพ 0.020 วิวีเอ็มตามรูปที่ 4.8 (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าระบบจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 25.18 เปอร์เซ็นต์เมื่อเดินระบบด้วย *Chlorella* sp. ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบมีค่าลดลงมาอยู่ที่ 11.19 เปอร์เซ็นต์, 13.90 เปอร์เซ็นต์, 15.42 เปอร์เซ็นต์และ 17.53 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งได้ผลดีกว่าการเดินระบบด้วยสารอาหารคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้ามีค่าเฉลี่ย 25.01 เปอร์เซ็นต์และเมื่อออกจากระบบจะมีค่าอยู่ที่ 15.05 เปอร์เซ็นต์, 17.07 เปอร์เซ็นต์, 18.22 เปอร์เซ็นต์และ 21.55 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับและอุณหภูมิเฉลี่ยในการทดลองด้วย *Chlorella* sp. มีค่า 29.49 องศาเซลเซียส และ 27.93 องศาเซลเซียสเมื่อเดินระบบด้วยสารอาหาร ที่อัตราการใช้ 0.005 วิวีเอ็มที่แสดงตามรูปที่ 4.8 (ง) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าระบบจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 20.68 เปอร์เซ็นต์เมื่อเดินระบบด้วย *Chlorella* sp. ที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบลดลงมาอยู่ที่ 5.66 เปอร์เซ็นต์, 7.68 เปอร์เซ็นต์, 9.45 เปอร์เซ็นต์และ 11.18 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งดีกว่าการเดินระบบด้วยสารอาหารซึ่งจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าระบบเฉลี่ยเท่ากับ 20.51 เปอร์เซ็นต์ และออกจากระบบมีค่าเท่ากับ 10.1 เปอร์เซ็นต์, 11.95 เปอร์เซ็นต์, 13.97 เปอร์เซ็นต์และ 15.63 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับและอุณหภูมิเฉลี่ยในการทดลองด้วย *Chlorella* sp. มีค่า 32.77 องศาเซลเซียส และ 33.0 องศาเซลเซียสเมื่อเดินระบบด้วยสารอาหาร

จากข้อมูลในรูปที่ 4.8 สามารถแสดงได้ว่า ที่อัตราการใช้ก๊าซชีวภาพน้อยระบบจะสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้นและเมื่อจ่ายก๊าซนานขึ้นประสิทธิภาพจะลดลงเนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำมากขึ้น ทำให้ค่าพีเอชลดลงจึงต้องมีการเติมอากาศเพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำให้ออกไปกับอากาศ และจากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพในแต่ละอัตราการใช้ก๊าซชีวภาพและคำนวณประสิทธิภาพสุทธิของ *Chlorella* sp. ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) – 4.9 (ง)



(ก)

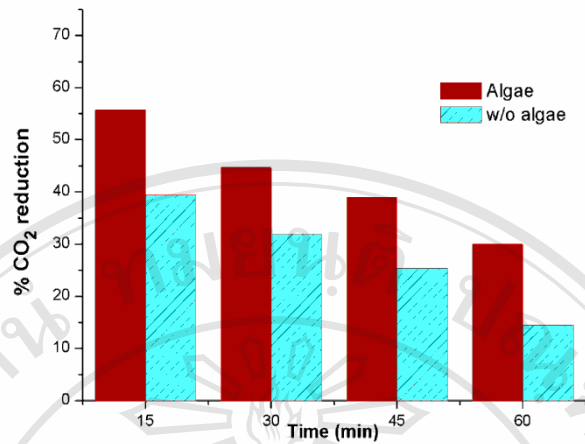


(ข)

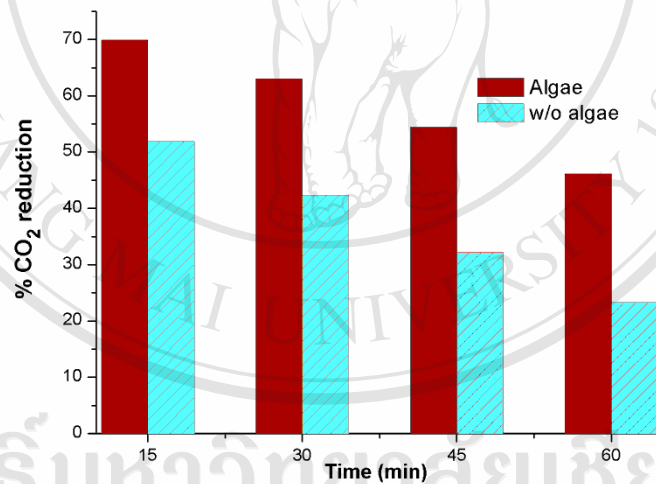
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

รูป 4.9 เปอร์เซนต์ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อแปรค่าอัตราการใช้ของก๊าซชีวภาพ
(ก) 0.050 วีวีเอ็ม (ข) 0.035 วีวีเอ็ม (ค) 0.020 วีวีเอ็ม (ง) 0.005 วีวีเอ็ม



(ก)



(ง)

รูป 4.9 เปอร์เซ็นต์ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (ก) 0.050 ลิ้วีเอ็ม (ข) 0.035 ลิ้วีเอ็ม (ค) 0.020 ลิ้วีเอ็ม (ง) 0.005 ลิ้วีเอ็ม (ต่อ)

ข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.9 เป็นค่าที่คำนวณจากข้อมูลในรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในรูปที่ 4.9 (ก) อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.050 ลิ้วีเอ็ม ณ เวลา 15 นาทีแรกของการทดลอง *Chlorella* sp. จะลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปได้ 39.36 เปอร์เซ็นต์แต่หากเดินระบบโดยใช้

สารอาหารจะลดลงได้ 23.33 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิสำหรับ *Chlorella* sp. เท่ากับ 16.03 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 30 นาที *Chlorella* sp. ลดได้ 24.13 เปอร์เซ็นต์สารอาหารลดได้ 15.76 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิของ *Chlorella* sp. เท่ากับ 8.37 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 45 นาที *Chlorella* sp. ลดได้ 13.45 เปอร์เซ็นต์สารอาหารลดได้ 5.05 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิของ *Chlorella* sp. เท่ากับ 4.80 เปอร์เซ็นต์ และที่เวลา 60 นาที *Chlorella* sp. ลดได้ 6.07 เปอร์เซ็นต์ สารอาหารลดได้ 2.04 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิของ *Chlorella* sp. เท่ากับ 3.01 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลองนี้มีค่าลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น สำหรับค่าภาระบรรทุกคาร์บอน (Carbon Loading Rate) ที่เข้าสู่ระบบคิดเทียบกับค่าเฉลี่ยชีวมวลของ *Chlorella* sp. ที่อยู่ในระบบมีค่าเท่ากับ 5.0191 ต่อวัน

จากรูปที่ 4.9 (ข) อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.035 ลิตร/ลิตรที่เวลา 15 นาที *Chlorella* sp. จะจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปได้ 50.23 เปอร์เซ็นต์และสารอาหารจะกำจัดไปได้ 37.75 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิของ *Chlorella* sp. ได้ 12.48 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 30 นาที *Chlorella* sp. ลดได้ 37.11 เปอร์เซ็นต์ในสารอาหารลดได้ 28.17 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 8.94 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 45 นาที *Chlorella* sp. ลดได้ 26.53 เปอร์เซ็นต์สารอาหารลดได้ 25.26 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 1.27 เปอร์เซ็นต์ และที่เวลา 60 นาที *Chlorella* sp. ลดได้ 15.95 เปอร์เซ็นต์สารอาหารลดได้ 12.25 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 3.70 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพสุทธิมีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นและสำหรับค่าภาระบรรทุกคาร์บอนที่เข้าสู่ระบบของการทดลองนี้คิดเทียบกับค่าเฉลี่ยชีวมวลของ *Chlorella* sp. ที่อยู่ในระบบมีค่า 3.4202 ต่อวัน

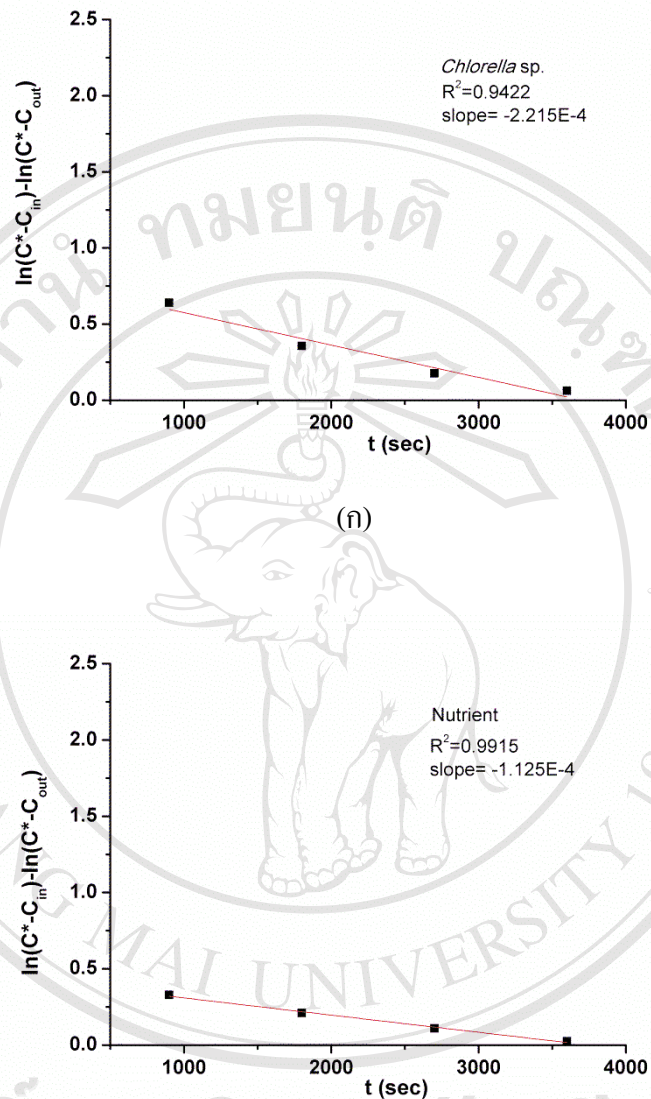
ที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.020 ลิตร/ลิตร ดังรูปที่ 4.9 (ค) ที่เวลา 15 นาที *Chlorella* sp. จะกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปได้ 55.72 เปอร์เซ็นต์และในสารอาหารจะกำจัดไปได้ 39.44 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิของ *Chlorella* sp. ได้ 16.28 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 30 นาที *Chlorella* sp. ลดได้ 44.74 เปอร์เซ็นต์สารอาหารลดได้ 31.96 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 12.78 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 45 นาที *Chlorella* sp. ลดได้ 38.93 เปอร์เซ็นต์ ในสารอาหารลดได้ 25.54 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 13.39 เปอร์เซ็นต์ และที่เวลา 60 นาที *Chlorella* sp. ลดได้ 30.09 เปอร์เซ็นต์ ในสารอาหารลดได้ 14.48 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 15.61 เปอร์เซ็นต์ แสดงได้ว่าประสิทธิภาพสุทธิของการทดลองนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และสำหรับค่าภาระบรรทุกคาร์บอนที่เข้าสู่ระบบของการทดลองนี้คิดเทียบกับค่าเฉลี่ยชีวมวล *Chlorella* sp. ที่อยู่ในระบบมีค่าเท่ากับ 2.0416 ต่อวัน

ที่อัตราการถ่ายก๊าซต่ำสุด 0.005 วีวีเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ง) ที่เวลา 15 นาที *Chlorella* sp. จะกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปได้ 72.70 เปอร์เซ็นต์และสารอาหารกำจัดไปได้ 50.49 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิของ *Chlorella* sp. ได้ 22.21 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 30 นาที ใน *Chlorella* sp. ลดได้ 62.99 เปอร์เซ็นต์ ในสารอาหารลดได้ 42.31 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 20.68 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 45 นาทีใน *Chlorella* sp. ลดได้ 54.44 เปอร์เซ็นต์ส่วนในสารอาหารลดได้ 32.03. เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 22.41 เปอร์เซ็นต์ และที่เวลา 60 นาที *Chlorella* sp. ลดได้ 46.13 เปอร์เซ็นต์ส่วนในสารอาหารลดได้ 23.43 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 22.7 เปอร์เซ็นต์ สำหรับประสิทธิภาพสุทธิของการทดลองนี้มีค่อนข้างคงที่ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น สำหรับค่าการะบรทุกคาร์บอนที่เข้าสู่ระบบของการทดลองนี้คิดเทียบกับค่าเฉลี่ยชีวมวล *Chlorella* sp. ที่อยู่ในระบบมีค่า 0.3752 ต่อวัน

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัยของ Kao *et al.*, (2012a) พบว่าที่ 0.050 วีวีเอ็ม สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 86.3 เปอร์เซ็นต์ การได้ผลที่ต่างกันนี้คาดว่ามาจากความเข้มข้นของ *Chlorella* sp. ที่สามารถทำให้ได้มีค่าแตกต่างกัน แต่จากการทดลองของ Kao *et al.*, (2012a) พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกันคือ ยิ่งอัตราการถ่ายก๊าซชีวภาพมากขึ้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีการละลายน้ำมากขึ้น ประสิทธิภาพการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเร็วกว่าที่อัตราการถ่ายก๊าซชีวภาพต่ำ โดยที่อัตราการถ่ายก๊าซชีวภาพ 0.3 วีวีเอ็ม ประสิทธิภาพลดลงจาก 86.3 เปอร์เซ็นต์มาอยู่ที่ 73.7 เปอร์เซ็นต์

4.2.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในการทดลองได้ศึกษาความสามารถในการถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Liquid phase mass transfer coefficient coefficient, $K_L a \text{ s}^{-1}$) ในระบบที่มี *Chlorella* sp. และระบบที่มีแต่สารอาหาร ที่อัตราการผ่านก๊าซจำนวน 5 ค่า คือ 0.050 วีวีเอ็ม, 0.035 วีวีเอ็ม, 0.020 วีวีเอ็ม และ 0.005 วีวีเอ็ม และแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(C^*-C_{in})-\ln(C^*-C_{out})$ กับเวลา ที่อัตราการผ่านก๊าซค่าต่าง ๆ กันไว้ในรูปที่ 4.10 – 4.13 ดังนี้



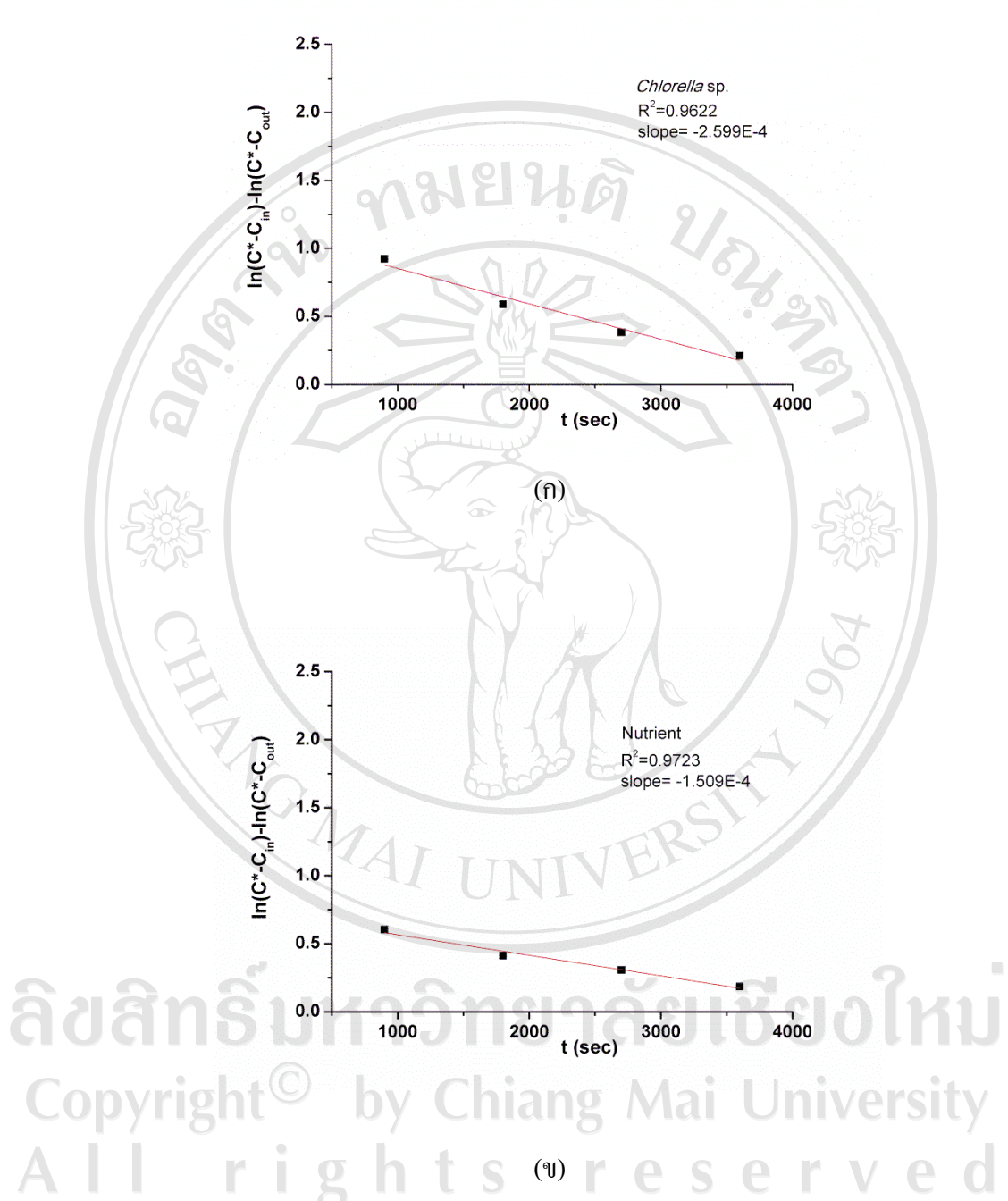
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูป 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(C^*-C_{in}) - \ln(C^*-C_{out})$ กับเวลา

ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.050 ลิ้วีเอ็ม

(ก) ระบบที่มี *Chlorella* sp.

(ข) ระบบที่มีแต่สารอาหาร

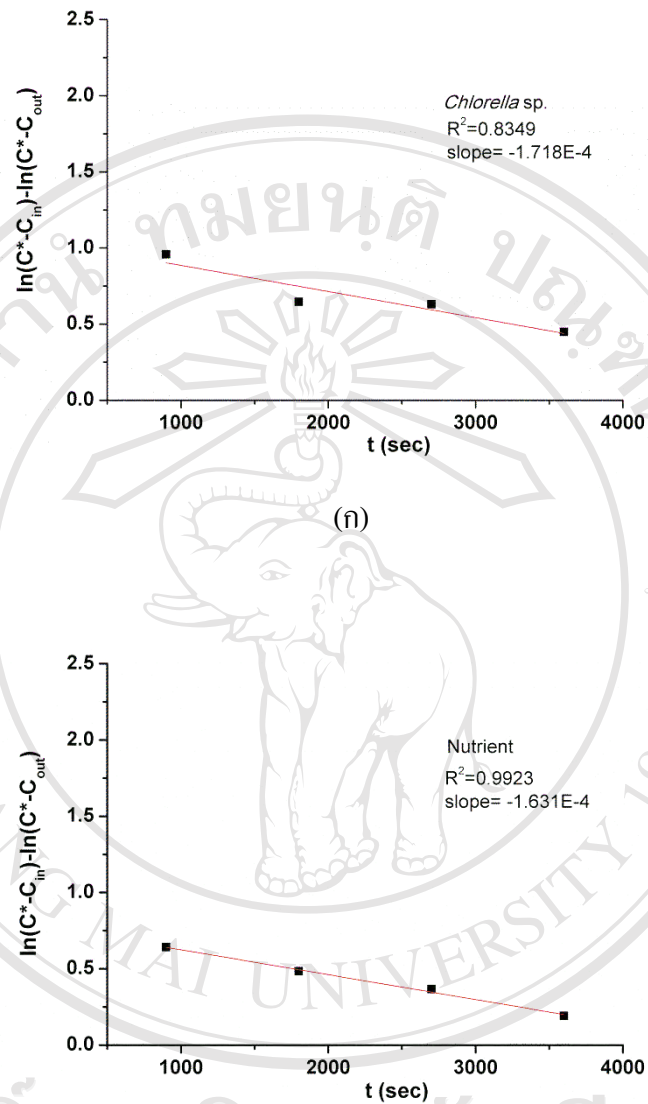


รูป 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(C^*-C_{in}) - \ln(C^*-C_{out})$ กับเวลา

ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.035 ลิ้วีเอ็ม

(ก) ระบบที่มี *Chlorella* sp.

(ข) ระบบที่มีแต่สารอาหาร

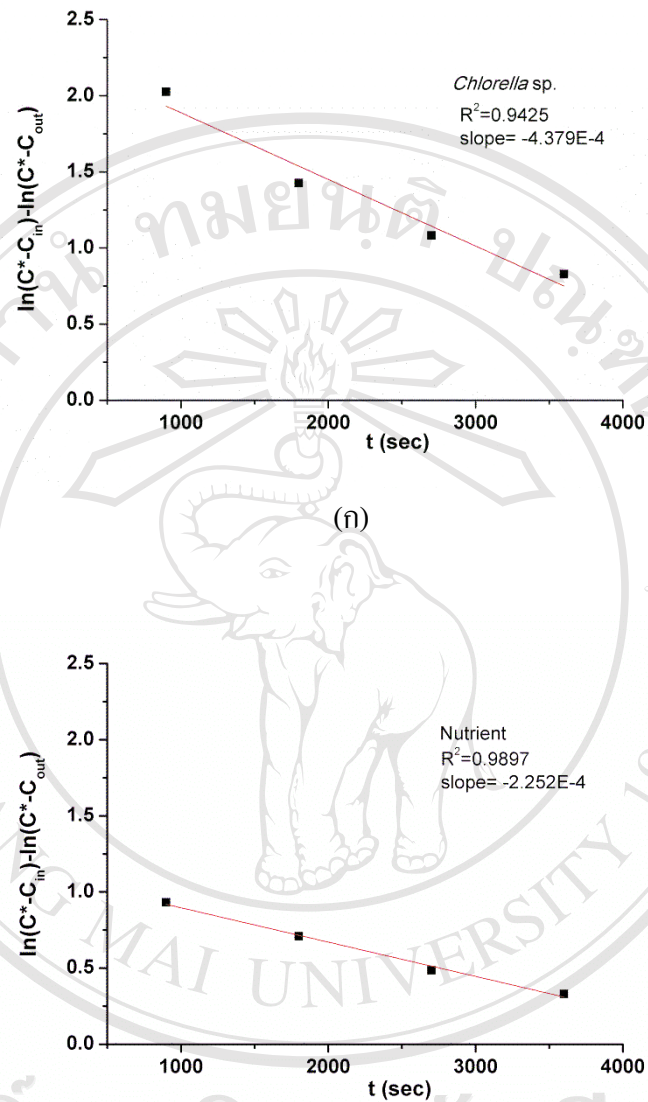


รูป 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(C^*-C_{in}) - \ln(C^*-C_{out})$ กับเวลา

ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.020 ลิ้วีเอ็ม

(ก) ระบบที่มี *Chlorella* sp.

(ข) ระบบที่มีแต่สารอาหาร



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

รูป 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(C^*-C_{in}) - \ln(C^*-C_{out})$ กับเวลา
 ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.005 ลิวิเอี่ยม

(ก) ระบบที่มี *Chlorella sp.*

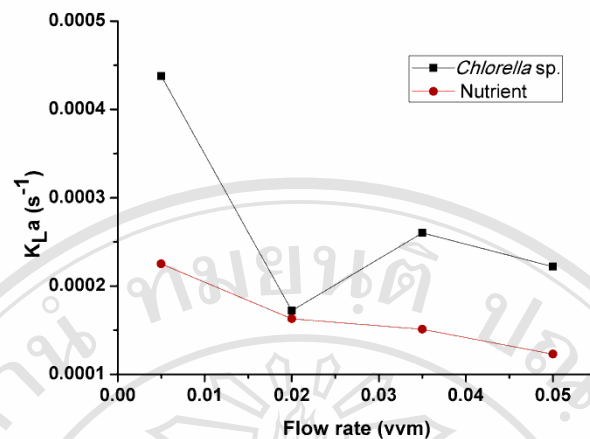
(ข) ระบบที่มีแต่สารอาหาร

จากรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.13 ภาพที่แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(C^*-C_{in})-\ln(C^*-C_{out})$ กับเวลา สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือค่า K_La ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว จากข้อมูลกราฟในรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.13 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการไหลของก๊าซ กรณีที่ระบบมี *Chlorella* sp กับกรณีที่ระบบมีแต่สารอาหารได้ดังตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการไหลของก๊าซ กรณีที่ระบบมี *Chlorella* sp. กับกรณีที่ระบบมีแต่สารอาหาร

อัตราการไหลของก๊าซ (vvm)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (s^{-1})	
	ระบบมี <i>Chlorella</i> sp.	ระบบมีแต่สารอาหาร
0.005	4.379×10^{-4}	2.252×10^{-4}
0.020	1.718×10^{-4}	1.631×10^{-4}
0.035	2.599×10^{-4}	1.509×10^{-4}
0.050	2.215×10^{-4}	1.125×10^{-4}

จากข้อมูลในตารางข้างต้นนี้นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับอัตราการไหลของก๊าซได้ดังรูปที่ 4.14



รูป 4.14 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
ในระบบที่มี *Chlorella* sp. และระบบที่มีแต่สารอาหาร เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซ

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.14 พบว่า ในระบบที่มี *Chlorella* sp. มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่าสูงกว่าในระบบที่มีแต่สารอาหาร ที่อัตราการไหลของก๊าซ 0.050 vvm ระบบที่มี *Chlorella* sp. และระบบที่มีแต่สารอาหาร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 2.215×10^{-4} วินาที⁻¹ และ 1.125×10^{-4} วินาที⁻¹ ตามลำดับ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซมากขึ้นระบบทั้งสองมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

จากข้อมูลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้จากทบทวนวรรณกรรมจากหลากหลายงานวิจัย ซึ่งตารางเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างขึ้นกับของเหลวในรีแอกเตอร์และรายละเอียดของรีแอกเตอร์ ส่วนผลการทดลองในงานวิจัยนี้สังเกตได้ว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อใช้ *Chlorella* sp. มีค่าสูงกว่าสารอาหารเปล่า ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การลดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหัวข้อ 4.2.3 แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ระหว่างอัตราการไหลพบว่ามีความผันผวนค่อนข้างมาก และคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีซึ่งกล่าวว่า ที่อัตราการไหลสูง Superficial Velocity ก็จะมีค่าสูงซึ่งความปั่นป่วนระหว่างก๊าซกับของเหลวในระบบจะมีค่าสูง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล (Singh and Majumder, 2010) ส่วนค่า K_{La} ที่คำนวณได้มีแนวโน้มลดลงที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพสูงซึ่ง

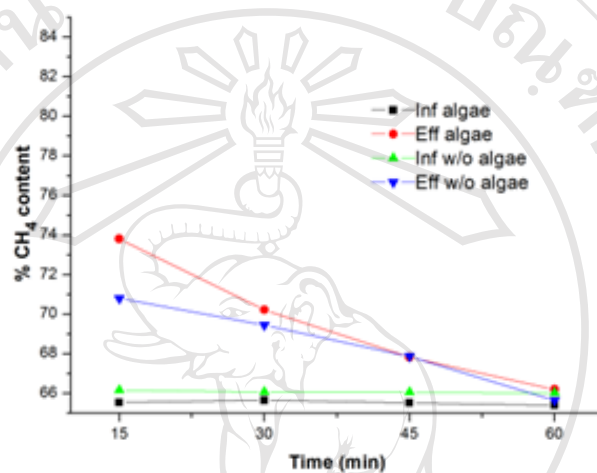
ต่างจากผลของงานวิจัยอื่นที่ค่า K_{La} จะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหล สาเหตุนี้เป็นเพราะว่าหัวจ่ายก๊าซที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่สามารถควบคุมขนาดของฟองอากาศให้คงที่ได้ ขนาดของฟองจะแปรผันกับอัตราการจ่ายก๊าซ ที่อัตราการจ่ายก๊าซสูงทำให้ฟองก๊าซมีขนาดใหญ่ขึ้นและเป็นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟองก๊าซกับของเหลวในระบบลดลง ซึ่งขนาดของฟองอากาศที่อัตราการไหลต่ำจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มิลลิเมตรและที่อัตราการไหลสูงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองจะใหญ่ได้ถึง 20 มิลลิเมตร และอุณหภูมิก็เช่นเดียวกันซึ่งในการคำนวณนี้ใช้ค่าคงที่ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แต่การทดลองนี้ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิของรีแอกเตอร์ทำให้อุณหภูมิของรีแอกเตอร์มีการแปรผันตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมโดยรอบตลอดเวลาที่ทำการเดินระบบซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 33 องศาเซลเซียส สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น สามารถดูได้จากภาคผนวก จ.2

ตาราง 4.2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น

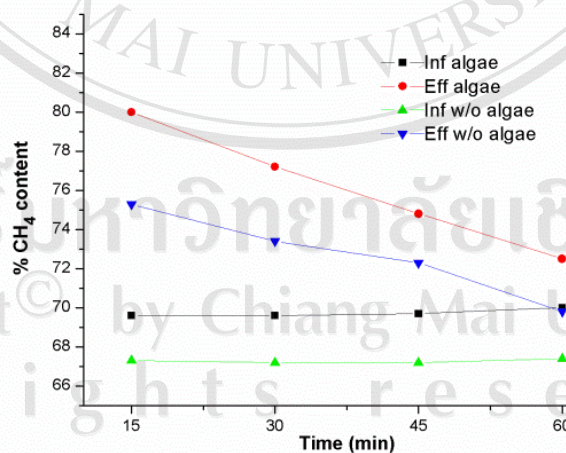
งานวิจัย	ประเภทรีแอกเตอร์	ตัวกลาง	อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	Superficial Velocity	K_{La} (Algae)	K_{La} (w/o algae.)
Tokumura <i>et al.</i>	Bubble column	Tap, distilled, sea water	1 - 4	0.022 - 0.088	-	0.00950 - 0.00266
Al-Mashhadani <i>et al.</i>	airlift	Tap water	110 - 300	0.530 - 1.590	-	0.00120 - 0.00150
ค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้	airlift	Algae / without algae	0.04	0.042	0.00044	0.00022
			0.16	0.167	0.00017	0.00016
			0.28	0.294	0.00026	0.00015
			0.40	0.420	0.00022	0.00011

4.2.5 ความสามารถในการเพิ่มก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ

จากการทดลองเมื่อระบบสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จึงทำให้องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงเปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนในระบบ เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ ได้ดังรูปที่ 4.15 (ก) – 4.15 (ง) ส่วนรายละเอียดนั้นได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง.



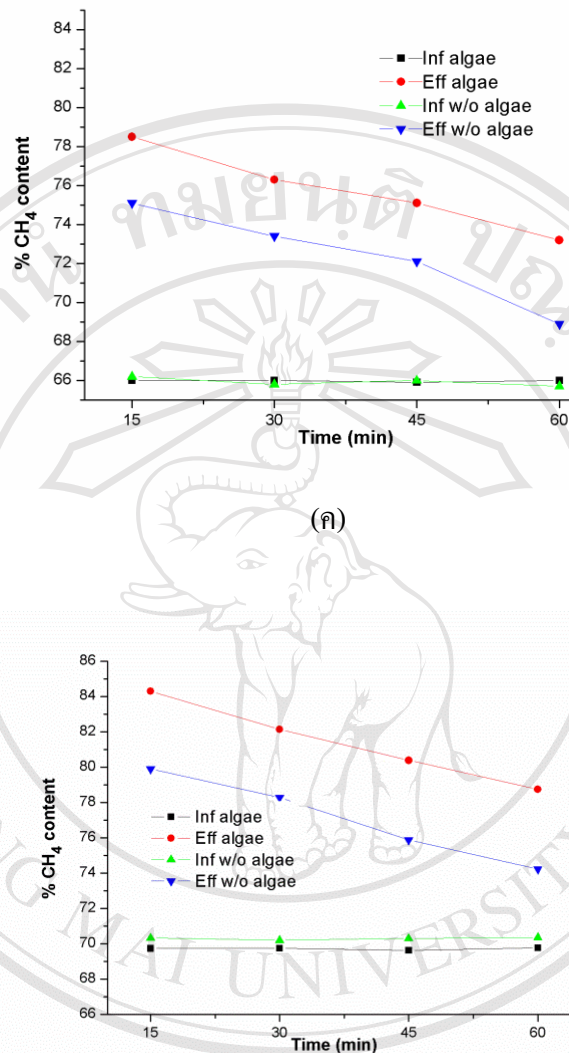
(ก)



(ข)

รูป 4.15 เปอร์เซนต์ของก๊าซมีเทนในระบบ เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ

(ก) 0.050 วิวีเอ็ม (ข) 0.035 วิวีเอ็ม (ค) 0.020 วิวีเอ็ม (ง) 0.005 วิวีเอ็ม



รูป 4.15 เปอร์เซนต์ของก๊าซมีเทนในระบบ เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ (ก) 0.050 วิวีเอ็ม (ข) 0.035 วิวีเอ็ม (ค) 0.020 วิวีเอ็ม (ง) 0.005 วิวีเอ็ม (ต่อ)

จากรูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพของการเพิ่มก๊าซมีเทน มีค่าแปรผันตรงกับค่าพีเอช และประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือในช่วงเวลาเริ่มต้น เปอร์เซนต์ของก๊าซมีเทนจะสามารถเพิ่มได้สูงสุด ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพดีที่สุด จากรูป 4.15 (ก) อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.050 วิวีเอ็ม ที่เวลา 15 นาที เมื่อเดินระบบโดยใช้ *Chlorella* sp. สามารถเพิ่มก๊าซมีเทนได้

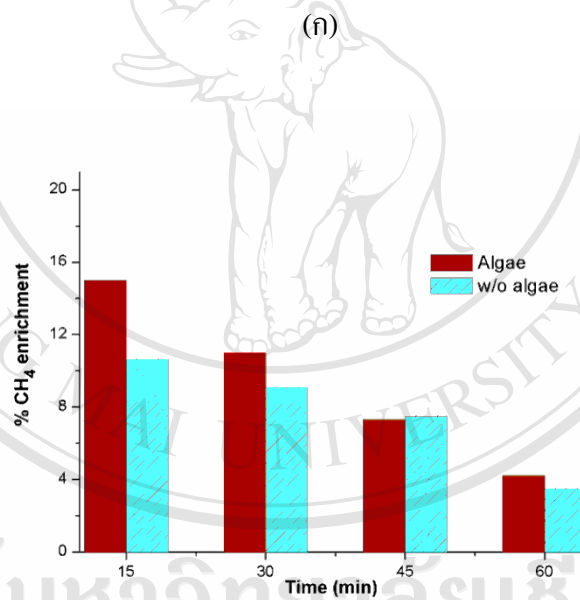
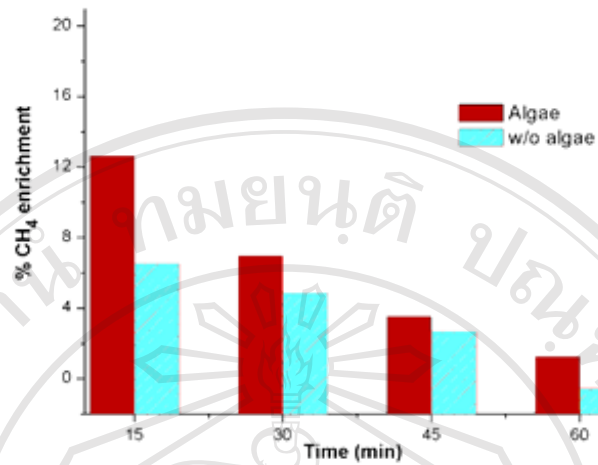
จากค่าเฉลี่ยเข้าระบบ 65.53 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็น 73.75 เปอร์เซ็นต์และในสารอาหารจะเพิ่มได้จากก๊าซมีเทนเข้าระบบที่ 66.08 เปอร์เซ็นต์เป็น 70.87 เปอร์เซ็นต์ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ *Chlorella* sp. ให้ผลดีกว่า

ที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.035 วีวีเอ็มแสดงไว้ในรูปที่ 4.15 (ข) ที่เวลา 15 นาทีเมื่อเดินระบบด้วย *Chlorella* sp. สามารถเพิ่มก๊าซมีเทนได้จากค่าเฉลี่ยของก๊าซมีเทนที่เข้าระบบเท่ากับ 69.61 เปอร์เซ็นต์เป็น 80.00 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และที่เวลา 30, 45 และ 60 นาทีจะมีค่าเพิ่มเป็น 77.20 เปอร์เซ็นต์, 74.78 เปอร์เซ็นต์และ 72.52 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ขณะที่เดินระบบด้วยสารอาหารที่เวลา 15 นาทีสามารถเพิ่มจากก๊าซมีเทนขาเข้า 67.25 เปอร์เซ็นต์ไปยัง 75.28 เปอร์เซ็นต์ค่าก๊าซมีเทนออกกระบบที่เวลา 30, 45 และ 60 นาทีมีค่าเป็น 73.37 เปอร์เซ็นต์, 72.25 เปอร์เซ็นต์และ 69.75 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

การทดลองที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.020 วีวีเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ค) ที่เวลา 15 นาที เมื่อเดินระบบด้วย *Chlorella* sp. สามารถเพิ่มก๊าซมีเทนได้จากค่าเฉลี่ยของก๊าซมีเทนเข้าระบบเท่ากับ 65.98 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรไปยัง 78.50 เปอร์เซ็นต์และที่เวลา 30, 45 และ 60 นาทีจะได้ 76.32 เปอร์เซ็นต์, 75.13 เปอร์เซ็นต์และ 73.19 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนผลของการเดินระบบด้วยสารอาหารสามารถเพิ่มได้จากค่าเฉลี่ยของก๊าซมีเทนเข้าระบบจาก 65.93 เปอร์เซ็นต์เป็น 75.13 เปอร์เซ็นต์, 73.38 เปอร์เซ็นต์, 71.97 เปอร์เซ็นต์และ 68.90 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

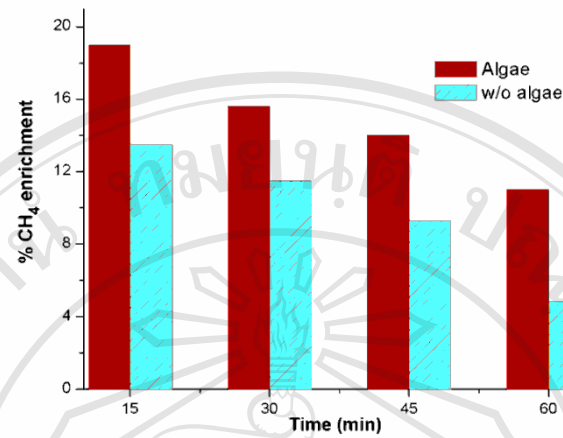
ที่อัตราการไหล 0.005 วีวีเอ็ม ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.15 (ง) ที่เวลา 15 นาทีการเดินระบบด้วย *Chlorella* sp. สามารถเพิ่มก๊าซมีเทนได้จากค่าเฉลี่ยของก๊าซมีเทนที่เข้าระบบ 69.76 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ไปยัง 84.12 เปอร์เซ็นต์และเมื่อเดินระบบด้วยสารอาหารสามารถเพิ่มปริมาณของก๊าซได้ จากก๊าซมีเทนขาเข้าซึ่งมีค่าเฉลี่ย 70.29 เปอร์เซ็นต์ เป็น 79.95 เปอร์เซ็นต์และประสิทธิภาพจะลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการลดลงของค่าพีเอชเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ที่เวลา 30, 45 และ 60 นาที สัดส่วนของก๊าซมีเทนขาออกในก๊าซชีวภาพเมื่อใช้ *Chlorella* sp. มีค่าเท่ากับ 82.14 เปอร์เซ็นต์, 80.38 เปอร์เซ็นต์และ 78.74 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อใช้สารอาหารพบว่ามีส่วนของก๊าซมีเทนขาออกเป็น 80.27 เปอร์เซ็นต์, 78.28 เปอร์เซ็นต์, 75.87 เปอร์เซ็นต์และ 74.22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองทั้งหมดที่แสดงในรูปที่ 4.15 นั้น ประสิทธิภาพของการเดินระบบโดยการใช้ *Chlorella* sp. หรือระบบที่ใช้สารอาหารเปล่านั้นตาม ความสามารถในการเพิ่มก๊าซมีเทนจะลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับผลของการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และผลของค่าพีเอชเมื่อเวลาเปลี่ยนไปและข้อมูลที่ได้สามารถคำนวณเป็นประสิทธิภาพที่ได้จากระบบและคำนวณประสิทธิภาพสุทธิได้ข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.16

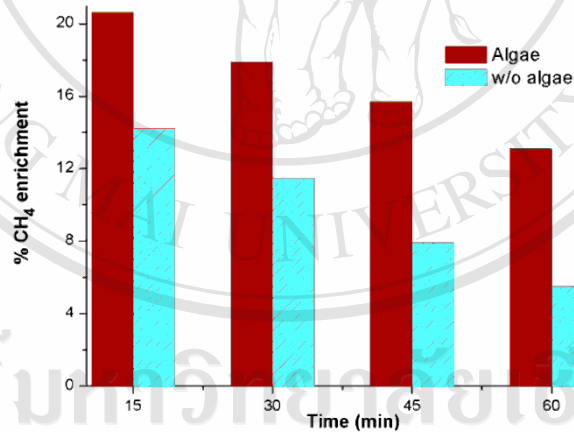


รูป 4.16 เปรอร์เซ็นต์เปรียบเทียบความสามารถในการทำให้ก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น
เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ

(ก) 0.050 วิวีเอ็ม (ข) 0.035 วิวีเอ็ม (ค) 0.020 วิวีเอ็ม (ง) 0.005 วิวีเอ็ม



(ก)



(ง)

รูป 4.16 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบความสามารถในการทำให้ก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น

เมื่อแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ

(ก) 0.050 วิวีเอ็ม (ข) 0.035 วิวีเอ็ม (ค) 0.020 วิวีเอ็ม (ง) 0.005 วิวีเอ็ม (ต่อ)

จากรูปที่ 4.16 (ก) อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.050 วิวีเอ็ม ที่เวลา 15 นาทีของการทดลอง เมื่อเดินระบบด้วย *Chlorella* sp. ทำให้เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 12.53 เปอร์เซ็นต์

สำหรับในสารอาหารเปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 6.86 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 5.67 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 30 นาทีเมื่อเดินระบบด้วย *Chlorella* sp. เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 6.90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสารอาหารเพิ่มขึ้น 5.12 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 1.78 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 45 นาทีเมื่อเดินระบบด้วย *Chlorella* sp. เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 3.28 เปอร์เซ็นต์ส่วนในสารอาหารเพิ่มขึ้น 2.75 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 0.53 เปอร์เซ็นต์ และที่เวลา 60 นาทีเมื่อเดินระบบด้วย *Chlorella* sp. เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 1.12 เปอร์เซ็นต์แต่ในสารอาหารลดลงไป 0.56 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 1.68 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเปอร์เซ็นต์ที่หายไป 0.56 เปอร์เซ็นต์ นั้นเป็นเพราะการละลายในน้ำของก๊าซมีเทนบางส่วน

จากข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 4.16 (ข) เมื่อใช้อัตราการจ่ายก๊าซ 0.035 ลิวิเอ็ม ที่เวลา 15 นาทีแรกของการเดินระบบด้วย *Chlorella* sp. ทำให้เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 14.97 เปอร์เซ็นต์และเมื่อเดินระบบโดยใช้สารอาหารจะทำให้ก๊าซเพิ่มขึ้น 12.33 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 2.64 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 30 นาที *Chlorella* sp. ทำให้เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 10.92 เปอร์เซ็นต์ ในสารอาหารเพิ่มขึ้น 9.15 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 1.77 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 45 นาที *Chlorella* sp. ทำให้เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 7.24 เปอร์เซ็นต์ ในสารอาหารเพิ่มขึ้น 8.02 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ -0.78 เปอร์เซ็นต์ และที่เวลา 60 นาที *Chlorella* sp. ทำได้ 4.21 เปอร์เซ็นต์ส่วนในสารอาหารทำได้ 3.96 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 0.25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพสุทธินี้มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ สำหรับค่าเฉลี่ยที่เวลา 45 นาทีของการวัดปริมาณก๊าซมีเทนโดยเดินระบบด้วยสารอาหารพบว่าระบบสามารถเพิ่มก๊าซมีเทนสูงกว่าการเดินระบบโดยใช้ *Chlorella* sp. เล็กน้อยนั้น เป็นความคลาดเคลื่อนซึ่งอาจเนื่องมาจากสัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในการทดลองทั้งสองวิธีมีค่าที่แตกต่างกันตามช่วงเวลา

จากข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 4.16 (ค) เมื่อใช้อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.020 ลิวิเอ็ม ที่เวลา 15 นาทีแรกของการเดินระบบ *Chlorella* sp. ทำให้เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 18.98 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเดินระบบด้วยสารอาหารทำได้ 13.53 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 5.45 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 30 นาที *Chlorella* sp. ทำได้ 15.61 เปอร์เซ็นต์ส่วนสารอาหารทำได้ 11.47 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 4.14 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 45 นาที *Chlorella* sp. ทำได้ 13.97 เปอร์เซ็นต์ ในสารอาหารทำได้ 9.05 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 4.92 เปอร์เซ็นต์ และที่เวลา 60 นาที *Chlorella* sp. ทำให้เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นได้ 10.87 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสารอาหารทำให้เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นได้เพียง 4.84 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 6.03 เปอร์เซ็นต์

การทดลองที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพ 0.005 วิวี่เอ็มได้แสดงดังรูปที่ 4.16 (ง) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราการจ่ายก๊าซค่าอื่น ๆ โดยที่เวลา 15 นาทีแรกของการเดินระบบ *Chlorella* sp. ทำให้เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 20.58 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเดินระบบโดยใช้สารอาหารทำได้ 13.83 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 6.75 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 30 นาที *Chlorella* sp. ทำได้ 17.94 เปอร์เซ็นต์ ในสารอาหารทำได้ 11.51 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 6.43 เปอร์เซ็นต์ สำหรับที่เวลา 45 นาที *Chlorella* sp. ทำได้ 15.48 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสารอาหารทำได้ 7.84 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 7.64 เปอร์เซ็นต์ และที่เวลา 60 นาที *Chlorella* sp. ทำได้ 13.10 เปอร์เซ็นต์ ในสารอาหารทำได้ 5.55 เปอร์เซ็นต์คิดเป็นประสิทธิภาพสุทธิ 7.55 เปอร์เซ็นต์

4.2.6 เปรียบเทียบผลการทดลองของการศึกษาความสามารถในการลดคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ก๊าซชีวภาพที่ผ่านการลดไฮโดรเจนซัลไฟด์ เทียบกับงานวิจัยอ้างอิง

จากผลการทดลองในการศึกษารั้งนี้ สามารถนำผลที่น่าสนใจมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้ในการค้นคว้าอ้างอิง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษานี้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้ โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Kao *et al.*, (2012a) และ Kao *et al.*, (2012b) ซึ่งใช้ก๊าซชีวภาพในการเดินระบบ และได้ใช้ *Chlorella* sp. เหมือนกัน พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งผลการทดลองอาจได้ประสิทธิภาพแตกต่างกันไปบ้าง จากรูปแบบการเดินระบบซึ่งการรายงานของ Kao *et al.*, (2012a) และ Kao *et al.*, (2012b) เป็นการเลี้ยง *Chlorella* sp. ลักษณะต่อเนื่อง ไม่มีการนำสาหร่ายออกเพื่อรักษาค่า SRT ที่จะทำให้การเติบโตให้อยู่ในช่วง log-phase ตลอดเวลา รวมถึงขนาดของโฟโตไบโอรีแอक्टरและสภาพแวดล้อมในแต่ละภูมิภาคที่เดินระบบจากรายงานของ Kao *et al.*, (2012b) โดยใช้แสงอาทิตย์ในการทดลอง ได้ผลว่าความสามารถในการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ *Chlorella* sp. นั้นแปรผันกับความเข้มแสงซึ่งแปรผันตามสภาพภูมิอากาศ แต่ในการทดลองนี้ได้ใช้แสงสว่างจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ การแปรผันเนื่องจากความเข้มของแสงจึงไม่มีผลในการทดลองนี้ และ *Chlorella* sp. สามารถลดและทนต่อสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนสูงสุดถึง 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรได้ นับเป็นข้อได้เปรียบที่สาหร่ายชนิดนี้สามารถนำมาใช้ในการเดินระบบที่ใช้ก๊าซชีวภาพได้ ทั้งนี้ *Chlorella* sp. สามารถทนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยสาหร่ายชนิดอื่นอีกหลายชนิดไม่สามารถทนต่อสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่อนข้างสูงในก๊าซชีวภาพได้

ตาราง 4.3 สรุปผล เปรียบเทียบผลการวิจัยกับงานวิจัยอ้างอิง

ที่มา	ชนิดสาหร่าย	ชนิดและปริมาตรของ reactor (ลิตร)	ก๊าซที่ใช้	ความเข้มข้นของ CO ₂ โดยปริมาตร	อัตราการการไหล	ประสิทธิภาพการกำจัด CO ₂ (โดยปริมาตร)	อัตราการเติบโตของ สาหร่ายสูงสุด (ก./ล. ว ⁻¹)
Morais, Costa., (2007)	<i>Spirulina</i> sp.	Three 1.8 litre bubble columns in series	Air+CO ₂	6 % และ 12 %	0.3	33 % และ 16 %	0.22 ² และ 0.18 ³
	<i>S. obliquus</i>			6 % และ 12 %	0.3	13 % และ 8 %	0.10 ^{1,2} และ 0.14 ¹
Kao <i>et al.</i> , (2012a)	<i>Chlorella</i> sp. MB9	50 litres bubble column	Biogas	20 %	0.05	86.3 %	0.310*
					0.3	73.7 %	0.243*
Kao <i>et al.</i> , (2012b)	<i>Chlorella</i> sp. MM-2	40 litres bubble column	Biogas	20 %	0.1	80 % สำหรับ Sunny Day 72 % สำหรับ Cloudy Day	-
					0.3	74 % สำหรับ Sunny Day 55 % สำหรับ Cloudy Day	
Chiu <i>et al.</i> , (2009)	<i>Chlorella</i> sp. NTCU-2	4 litres bubble column	Air+CO ₂	5 %	0.25	24 เปอร์เซ็นต์	-
		4 litres centric tube airlift		5 %	0.25	23 เปอร์เซ็นต์	-
		4 litres porous centric tube airlift		5%	0.25	35 เปอร์เซ็นต์	-
ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้	<i>Chlorella</i> sp.	8 litres airlift	Biogas	20 - 25 %	0.050	39.36 % ⁴	0.190
					0.035	50.23 % ⁴	0.200
					0.020	55.72 % ⁴	0.229
					0.005	72.27 % ⁴	0.260

หมายเหตุ 1 หมายถึงถึงปฏิกิริยาหมายเลข 1 จากการทดลองโดยต่ออนุกรมทั้งหมด 3 ถึง
2 หมายถึงถึงถึงปฏิกิริยาหมายเลข 2 จากการทดลองโดยต่ออนุกรมทั้งหมด 3 ถึง

3 หมายถึงถึงถึงปฏิกิริยาหมายเลข 3 จากการทดลองโดยต่ออนุกรมทั้งหมด 3 ถึง
4 หมายถึงถึงค่าสูงสุดที่ได้จากการทดลองนั้นๆ
* หมายถึงจ่ายก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่อง

4.3 การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

ระบบนี้เป็นระบบที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการทดลองการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ *Chlorella* sp. ในโฟโตไบโอรีแอคเตอร์โดยเฉพาะ ซึ่งสามารถคำนวณค่าใช้จ่ายโดยประมาณในการจัดสร้างและเดินระบบ เพื่อสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการขยาย ปรับปรุง และพัฒนาระบบนี้ต่อไปในอนาคตซึ่งสามารถคาดการณ์กรณีเพิ่มระยะเวลาเดินระบบและขยายระบบได้ดังต่อไปนี้

(ก) กรณีเดินระบบต่อเนื่อง 24 ชั่วโมงต่อวัน จ่ายก๊าซชีวภาพ 0.05 วิวี่เอ็ม มีค่าเท่ากับ 0.4 ลิตรต่อนาฬิกา ในเวลา 24 ชั่วโมง มีการจ่ายก๊าซชีวภาพ 16 ชั่วโมง คิดเป็นปริมาตร 384 ลิตรต่อวัน ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (ค่าไฟฟ้า) 25 บาทต่อวัน ก๊าซชีวภาพที่ออกจากระบบจะมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนโดยประมาณเท่ากับ 69.43 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และมีสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 19.27 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งจากสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ เมื่อนำไปเทียบกับตารางที่ 2.4 “ความเข้มข้นสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพที่ยอมรับได้” จะยังไม่สามารถนำก๊าซชีวภาพที่ได้ไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการลดระยะเวลาจ่ายก๊าซชีวภาพจาก 1 ชั่วโมง เหลือ 30 นาที ซึ่งผลก๊าซที่เวลา 30 นาที จะมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเท่ากับ 71.95 เปอร์เซ็นต์ และมีสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเหลือเท่ากับ 15.41 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นปริมาณที่ผ่านมาตรฐานคือ 18 เปอร์เซ็นต์ ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานประเทศไทย และหากคิดที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพต่ำสุดซึ่งจะได้ประสิทธิภาพสูงสุดหากจ่ายก๊าซชีวภาพ 30 นาทีต่อรอบ สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากระบบจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 6.68 เปอร์เซ็นต์ซึ่งใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของสวีเดนเซอร์แลนด์และเยอรมันที่ 6 เปอร์เซ็นต์ หากปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบอีกเพียงเล็กน้อยก็จะสามารถผ่านมาตรฐานของทั้ง 2 ประเทศได้

(ข) หากต้องการขยายปริมาตรของระบบขึ้นเป็น 10 เท่า และเดินระบบต่อเนื่อง 24 ชั่วโมงสามารถประมาณการค่าใช้จ่ายได้ดังนี้

ค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบและอุปกรณ์ต่างๆ 239,000.- บาท (แบ่งเป็นค่าโฟโตไบโอรีแอคเตอร์พร้อมปั๊มสุญญากาศและชุดลดไฮโดรเจนซัลไฟด์ลักษณะเดียวกับที่ใช้ในการทดลองนี้ ชุดละ 23,900.-บาท)

ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (ค่าไฟฟ้า) 250 บาทต่อวันจ่ายก๊าซชีวภาพเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สลับด้วยอากาศ 30 นาทีต่อรอบ ที่อัตราการจ่ายก๊าซสูงสุด 0.4 ลิตรต่อนาฬิกา จะสามารถลดองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพจนเหลือ 19.27 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และได้ปริมาตรเท่ากับ 3,840 ลิตรต่อวัน หรือที่อัตราการจ่ายก๊าซชีวภาพต่ำสุด 0.04 ลิตรต่อนาฬิกา

จ่ายก๊าซ 1 ชั่วโมงต่อรอบ จะสามารถลดองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพจนเหลือ 8.41 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และได้เป็นปริมาตรเท่ากับ 384 ลิตรต่อวัน

(ค) การนำ *Chlorella* sp. ไปใช้ประโยชน์ เมื่อคิดจากอัตราการเติบโตสูงสุดที่ 0.260 กรัมต่อลิตรต่อวัน โดยน้ำหนักแห้ง ในระบบขนาด 8 ลิตร หมายความว่าในแต่ละวันจะมีชีวมวลของ *Chlorella* sp. เติบโตขึ้นในระบบเท่ากับ 2.08 กรัม และอ้างอิงจากการทดลองของ Kao *et al.*, (2012a) สัดส่วนไขมันใน *Chlorella* sp. มีค่า 22.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง หรือสามารถสกัดไขมันจากระบบนี้ได้เป็น 0.48 กรัมต่อวัน ซึ่งไขมันส่วนนี้มีคุณสมบัติพอที่จะนำไปผลิตเป็นพลังงานทางเลือกอย่างไบโอดีเซลได้ ทำให้การทดลองนี้นอกจากลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพได้แล้วยังได้ประโยชน์จากไขมันใน *Chlorella* sp. อีกด้วย