การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพแบบสองขั้นตอนโดยการดูดซึมด้วยสารละลายด่างและการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด (*Ceratophyllum demersum* L.)

Two-Stage Biogas Upgrading by Alkali Absorption and Hornwort (*Ceratophyllum demersum* L.) Cultivation

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ทิวะ รัตนยา
Thiwa Rattanaya

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Applied Chemistry
Prince of Songkla University
2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพแบบสองขั้นตอนโดยการดูดซึมด้วยสารละลายด่างและการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด (*Ceratophyllum demersum* L.)

Two-Stage Biogas Upgrading by Alkali Absorption and Hornwort (*Ceratophyllum demersum* L.) Cultivation

ทิวะ รัตนยา
Thiwa Rattanaya

Prince of Songkla University
Pattani Campus

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Applied Chemistry
Prince of Songkla University
2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพแบบสองขั้นตอนโดยการดูดซึมด้วยสารละลายด่างและการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด (*Ceratophyllum demersum* L.)

ผู้เขียน นายทิวะ รัตนยา

สาขาวิชา เคมีประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....

(ดร.รัตนา จริยาบูรณ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....

(ดร.ประวิทย์ คงจันทร์)

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลธี ชีวะเศรษฐธรรม)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงศ์ โอทอง)

.....กรรมการ

(ดร.รัตนา จริยาบูรณ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลธี ชีวะเศรษฐธรรม)

.....กรรมการ

(ดร.จุฑารัตน์ ทะสะระ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.จรัญ บุญกาญจน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

Prince of Songkla University Pattani Campus

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ .....
(ดร.รัตนา จริยาบูรณ์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....
(นายทิวะ รัตนยา)
นักศึกษา

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายทิวะ รัตนยา)

นักศึกษา

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพแบบสองขั้นตอนโดยการดูดซึมด้วยสารละลายด่างและการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด (*Ceratophyllum demersum* L.)
ผู้เขียน นายทิวะ รัตนยา
สาขาวิชา เคมีประยุกต์
ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพโดยการดูดซึมทางเคมีในระบบคอลัมน์บรรจุด้วยสารละลายด่างที่เตรียมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มเพื่อลดปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ ให้อยู่ในรูปของ คาร์บอเนต ไบคาร์บอเนตและซัลไฟด์ สามารถนำไปใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดซึ่งเป็นแหล่งชีวมวลต่อไปได้ ผลการทดลองพบว่าสารละลายเถ้าที่เตรียมจากการใช้เถ้าปาล์มละลายในน้ำที่ 0.7 กิโลกรัมต่อลิตร มีค่า pH ท่ากับ 10.9 และค่าสภาพความเป็นด่างมากกว่า 6,000 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ธาตุที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นได้แก่ โพแทสเซียม คลอรีน แมกนีเซียม และโซเดียม การกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพด้วยคอลัมน์บรรจุขนาดความสูง 2 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นทั้ง กรณีที่ใช้น้ำเสียจากบ่อบ่มและน้ำเสียจากบ่อบ่มละลายเถ้าปาล์มที่อัตราการไหลของสารละลาย 210 ลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำเสียจากบ่อบ่มและน้ำเสียจากบ่อบ่มละลายเถ้าปาล์มเท่ากับร้อยละ 33 และ 53 ตามลำดับ สำหรับการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้ได้ร้อยละ 100 ต้องใช้อัตราการไหลของน้ำเสียจากบ่อบ่มอย่างน้อย 210 ลิตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ใช้อัตราการไหลของสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มเพียง 90 ลิตรต่อชั่วโมง ดังนั้นการใช้น้ำเสียจากบ่อบ่มละลายเถ้าปาล์มให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้น้ำเสียจากบ่อบ่มเพียงอย่างเดียว ในการออกแบบถังตกจมเถ้าปาล์ม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเถ้าปาล์มแขวนลอยลดลงตามอัตราการไหลล้นที่เพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึงร้อยละ 99 ที่อัตราการไหลล้น 13,029 ลิตรต่อวันต่อลูกบาศก์เมตร อัตราการตกจมของเถ้าปาล์มมีค่าสูงทำให้อัตราการผลิตสารละลายด่างเถ้าปาล์มสูงขึ้นด้วย สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด โดยใช้น้ำเสียเจือจางที่ความเข้มข้นของซีโอดีเริ่มต้นที่เท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อใช้น้ำหนักสาหร่ายพุงชะโดเริ่มต้น 50 กรัมต่อน้ำเสีย 30 ลิตร เพาะเลี้ยงเป็นเวลาสามสัปดาห์มีอัตราการเติบโตจำเพาะร้อยละ 3.51 ต่อวัน ค่าซีโอดี ปริมาณไนเตรทและปริมาณฟอสเฟตลดลงร้อยละ 76 76 และ 53 ตามลำดับ

Thesis Title Two-Stage Biogas Upgrading by Alkali Absorption and Hornwort (*Ceratophyllum demersum* L.) Cultivation
Author Mr. Thiwa Rattanaya
Major Program Applied Chemistry
Academic Year 2015

ABSTRACT

Chemical absorption in packed column by an alkali solution to improve the quality of biogas was prepared from palm ash with maturation pond effluent. This was purposed to reduce the amount of carbon dioxide and hydrogen sulfide gas in biogas and convert them to carbonate, bicarbonate and sulfide form. The new compounds that formed can be utilized to cultivate hornwort as a source of biomass. The result showed that the solution with pH of 10.9 and alkalinity of more than 6,000 milligram of calcium carbonate per liter was obtained from the preparation of palm ash to water at 0.7 kilogram per liter. The main soluble elements were chlorine, potassium, magnesium and sodium. Removal of carbon dioxide and hydrogen sulfide gas in biogas using 2 meter height and 10 centimeter diameter of packed column was shown that the flow rate of solution increases removal efficiency for both types of absorbents, the sole maturation pond effluent and maturation effluent pond with dissolved ash. At flow rate of 210 Liter per hour, carbon dioxide removal efficiency was 33% and 53%, for the sole maturation pond effluent and maturation pond effluent with dissolved palm ash, respectively. To approach a hundred percent of hydrogen sulfide removal efficiency, maturation pond effluent have to be used at least 120 Liter per hour while for maturation pond effluent with dissolved palm ash can be used only 90 Liter per hour. Therefore, the usage of maturation pond effluent with dissolved palm ash could potentially enhancing alkalinity as well as carbon dioxide and hydrogen sulfide removal efficiency, compared with an individual utilization of maturation pond effluent. In the designing of palm ash settling tank, the effective removal of suspensions can be increased by decreasing overflow rate. The effective removal is 99% at flow rate of 13,029 million liters per day per cubic meter. The high sinking of ash palm is possible to produce alkaline ash at high rate. Cultivation of hornwort by using diluted packed column effluent at initial COD concentration of 600 milligram per liter. The initial weight of hornwort was 50 grams per 30 liters water, the specific growth rate was 3.51 % per day. The COD, NO_3^- and PO_4^{3-} dropped about 76, 76% and 53%, respectively in three weeks of culture time.

Prince of Songkla University Pattani Campus

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความร่วมมือ การช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ และกำลังใจจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.รัตนา จริยาบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ดร.ประวิทย์ คงจันทร์ และ ผศ.ดร.ชลธี ชีวะเศรษฐธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ค่อยให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ดูแล ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทปาล์มพัฒนาชายแดนใต้ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าไปเก็บตัวอย่างเถ้าปาล์มจากหม้อต้มไอน้ำและน้ำบ่อบ่มจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและให้ข้อมูลในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัทปาล์มพัฒนาไบโอแก๊ส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าไปทำการทดลองกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ และให้ข้อมูลในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) สนับสนุนการวิจัยที่ได้อุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการค้นคว้าวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาสงขลานครินทร์ ประจำปี 2558 ที่ได้อุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แผนกวิชาเคมี แผนกวิชาเทคโนโลยีการประมง ศูนย์เครื่องมือกลางคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หน่วยวิจัยการแปรรูปชีวมวลเพื่อพลังงานและเคมีภัณฑ์ รวมถึงบุคลากรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณแม่สุดา บุญญานุรักษ์ ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา

ทิวะ รัตนยา

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (5)

ABSTRACT (6)

กิตติกรรมประกาศ (7)

สารบัญ (8)

สารบัญตาราง (10)

สารบัญรูป (13)

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5
2.1.1 แก๊สชีวภาพ 5
2.1.2 การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพ 7
2.1.2 คาร์บอนไดออกไซด์ 9
2.1.3 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 10
2.1.5 การดูดซึมแก๊ส 10
2.1.6 กลไกการดูดซึม 11
2.1.7 เถ้าปาล์ม 12
2.1.8 การตกจม 13
2.1.9 สาหร่ายพุงชะโดและปัจจัยในการเจริญเติบโตของสาหร่ายพุงชะโด 14
2.1.10 สังเคราะห์แสงและการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของพืช 15
2.1.11 ธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองของพืชน้ำ 15
2.1.12 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการดูดซึมธาตุอาหารของพืชน้ำ 18
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 18

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 23

3.1 ศึกษาการเตรียมสารละลายด่างจากเถ้าปาล์ม 24

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.2 ศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม 27
3.3 ศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด 28

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล 30

3.1 ผลศึกษาการเตรียมสารละลายด่างจากเถ้าปาล์ม 30
3.2 ผลศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม 37
3.3 ผลศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด 44

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 55

บรรณานุกรม 57

ภาคผนวก 63

ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ 64
ภาคผนวก ข ข้อมูล 72

ประวัติผู้เขียน 88

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	Biogas utilization technologies and gas processing requirements	7
ตารางที่ 2.2	ปัญหาที่พบจากการใช้แก๊สชีวภาพที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ	8
ตารางที่ 2.3	ผลได้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จาก POME	20
ตารางที่ 2.4	องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ผลิตจากกระบวนการหมัก	21
ตารางที่ 2.5	คุณลักษณะของ น้ำเสียจากบ่อหมัก POME	22
ตารางที่ 4.1	การกระจายขนาดอนุภาค	30
ตารางที่ 4.2	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มมันโดยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF)	31
ตารางที่ 4.3	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสียจากบ่อบ่มและเถ้าปาล์มละลายในน้ำเสียจากบ่อบ่ม	33
ตารางที่ 4.4	สภาวะในศึกษาการกำจัด CO_2 และ H_2S ด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม	39
ตารางที่ 4.5	ค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียจากบ่อบ่มละลายเถ้าปาล์ม โดยใช้อัตราส่วน 0.3 กิโลกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร	40
ตารางที่ 4.6	ค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียจากบ่อบ่มละลายด่างเถ้าปาล์ม	42
ตารางที่ 4.7	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์กับงานวิจัยอื่น	44
ตารางที่ 4.8	ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด	48
ตารางที่ 4.9	ปริมาณไนเตรทในของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์	52
ตารางที่ 4.10	ปริมาณฟอสเฟตของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์	53
ตารางที่ 4.11	สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ เมื่ออยู่ในสภาวะมีออกซิเจนกับไม่มีออกซิเจน	53
ตารางที่ 4.12	ค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์	54
ตารางที่ ก.1	การประมาณความเข้มข้นของ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-)	63
ตารางที่ ข.1	อัตราส่วนระหว่างเถ้าปาล์มกับน้ำต่อค่า pH และร้อยละการละลาย	71
ตารางที่ ข.2	อัตราส่วนระหว่างเถ้าปาล์มกับน้ำต่อค่าสภาพความเป็นด่าง	72

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ข.3	ปริมาณ SS ที่เวลาตกจมและความลึกต่างๆ	73
ตารางที่ ข.4	%SS removed และ %SS remaining กับเวลาที่ความลึก 45 เซนติเมตร	74
ตารางที่ ข.5	%SS removed และ %SS remaining กับเวลาที่ความลึก 90 เซนติเมตร	74
ตารางที่ ข.6	%SS removed กับเวลาที่ความลึกต่างๆ	75
ตารางที่ ข.7	%SS removed กับ Vs	75
ตารางที่ ข.8	Vs กับ Overflow rate	76
ตารางที่ ข.9	อัตราการไหลของสารละลายต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลแก๊ส 10 ลิตรต่อนาที	76
ตารางที่ ข.10	อัตราการไหลของสารละลายต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลแก๊ส 5 ลิตรต่อนาที โดยใช้น้ำเสียจากบ่อบ่ม	77
ตารางที่ ข.11	อัตราการไหลของสารละลายต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลแก๊ส 5 ลิตรต่อนาที โดยใช้น้ำเสียจากบ่อบ่มละลายเถ้าปาล์ม 0.3 กิโลกรัม	77
ตารางที่ ข.12	อัตราการไหลของสารละลายต่อค่าสภาพเป็นด่าง	78
ตารางที่ ข.13	ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดต่ออัตราการเติบโตเฉพาะ เมื่อ T1 T2 และ T3 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโด เท่ากับ 50 75 และ 100 กรัม ตามลำดับ	78
ตารางที่ ข.14	ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดต่อค่า pH และการเปลี่ยนแปลงของ COD เมื่อ T1 T2 และ T3 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโด เท่ากับ 50 75 และ 100 กรัม ตามลำดับ	79
ตารางที่ ข.15	ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดต่ออัตราการเติบโตเฉพาะ เมื่อใช้น้ำในการเพาะเลี้ยงที่แตกต่างกัน	79
ตารางที่ ข.16	ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดต่อค่า pH เมื่อใช้น้ำในการเพาะเลี้ยงที่แตกต่างกัน	80
ตารางที่ ข.17	ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดต่อการเปลี่ยนแปลงของ COD เมื่อใช้น้ำในการเพาะเลี้ยงที่แตกต่างกัน	80
ตารางที่ ข.18	ความเข้มข้นไนเตรทมาตรฐานต่อค่าการดูดกลืนแสง	81
ตารางที่ ข.19	ปริมาณไนเตรทของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์ T1 T2 และ T3 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโด เท่ากับ 50 75 และ 100 กรัม ตามลำดับ	82
ตารางที่ ข.20	ปริมาณไนเตรทของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์	83

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ข.21	ความเข้มข้นฟอสเฟตมาตรฐานต่อค่าการดูดกลืนแสง	84
ตารางที่ ข.22	ปริมาณฟอสเฟตของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์ T1 T2 และ T3 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโด เท่ากับ 50 75 และ 100 กรัม ตามลำดับ	85
ตารางที่ ข.23	ปริมาณฟอสเฟตของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์	86

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ	6
รูปที่ 2.2	ผังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพชีวภาพโดยรวม	9
รูปที่ 2.3	Two films theory	12
รูปที่ 2.4	การตกจมแบบรวมกลุ่ม	14
รูปที่ 3.1	การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพแบบสองขั้นตอนโดยการดูดซึมด้วยสารละลายด่างและการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด	23
รูปที่ 3.2	จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อบ่ม	25
รูปที่ 3.3	Testing cylinder สำหรับศึกษาอัตราการตกจม	26
รูปที่ 3.4	ระบบการดูดซึมแบบคอลัมน์บรรจุ	27
รูปที่ 4.1	เถ้าปาล์ม	30
รูปที่ 4.2	ค่าสภาพความเป็นด่างที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่าง ๆ	32
รูปที่ 4.3	ค่า pH และค่าการละลายของเถ้าปาล์มที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่าง ๆ	32
รูปที่ 4.4	การศึกษาอัตราการไหลล้นของน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดของเถ้าปาล์มแขวนลอย	34
รูปที่ 4.5	ค่า %SS removed เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ที่ความลึก 45 และ 90 เซนติเมตร	34
รูปที่ 4.6	ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับเวลาที่ %SS removed ต่าง ๆ	35
รูปที่ 4.7	ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง %SS removal กับเวลา	35
รูปที่ 4.8	ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง %SS removal กับอัตราการไหลล้น	36
รูปที่ 4.9	ส่วนด้านบนสุดของคอลัมน์หลังจากการทดลองการตกจม	37
รูปที่ 4.10	ปริมาณของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสเข้าและออกจากระบบดูดซึมที่อัตราการไหลของของเหลวต่างกัน (อัตราการไหลของแก๊สสังเคราะห์ = 5 ลิตรต่อนาที อัตราส่วนเถ้า 0.03 กิโลกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร)	38
รูปที่ 4.11	ระบบกระบวนการดูดซึมสำหรับทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ ณ บริษัทปาล์มพัฒนา ไบโอแก๊สจำกัด	39
รูปที่ 4.12	ปริมาณของมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในกระแสเข้าและออกจากระบบดูดซึมที่อัตราการไหลของของเหลวต่างกัน (อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ = 5 ลิตรต่อนาที) (a) น้ำเสียบ่อบ่ม (b) น้ำเสียบ่อบ่มละลายเถ้าปาล์ม อัตราส่วน 0.3 กิโลกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร	40

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13	ปริมาณของมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในกระแสเข้าและออกจากระบบดูดซึมที่อัตราส่วนของเถ้าปาล์มต่อน้ำเสียจากบ่อบ่มต่างกัน (อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ = 5 ลิตรต่อนาที) (a) ที่อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับ 60 ลิตรต่อชั่วโมง (b) ที่อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับ 120 ลิตรต่อ	41
รูปที่ 4.14	อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายพุงชะโดในน้ำเสีย 30 ลิตร ที่น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโดที่แตกต่างกัน เมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงผ่านไป 21 วัน	45
รูปที่ 4.15	ค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดที่น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโดที่แตกต่างกัน	45
รูปที่ 4.16	ค่า COD ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดที่น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโดที่แตกต่างกัน	46
รูปที่ 4.17	ลักษณะทางกายภาพของน้ำในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด	47
รูปที่ 4.18	การจัดเรียงลำต้นของสาหร่ายพุงชะโด	47
รูปที่ 4.19	ภาพถ่ายของสาหร่ายพุงชะโดด้วยกล้องจุลทรรศน์	48
รูปที่ 4.20	อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายพุงชะโดในน้ำเสีย 30 ลิตร ที่น้ำเสียชนิดต่างๆ เมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงผ่านไป 21 วัน	49
รูปที่ 4.21	ลักษณะของสาหร่ายพุงชะโดโดยระยะเวลาเพาะเลี้ยง 1 สัปดาห์	49
รูปที่ 4.22	ลักษณะของสาหร่ายพุงชะโดในสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มที่ระยะเวลาการเพาะเลี้ยง 3 สัปดาห์	50
รูปที่ 4.23	ค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของสาหร่ายพุงชะโดในน้ำเสีย 30 ลิตร ที่น้ำเสียชนิดต่าง ๆ	51
รูปที่ 4.24	ค่า COD ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของสาหร่ายพุงชะโดในน้ำเสีย 30 ลิตร ที่น้ำเสียชนิดต่าง ๆ	51
รูปที่ ก.1	แก๊สมิเตอร์	69
รูปที่ ข.1	กราฟสารละลายมาตรฐานไนเตรท	81
รูปที่ ข.2	กราฟสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต	84

Prince of Songkla University Pattani Campus

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบันและยิ่งทวีความสำคัญมากขึ้นเมื่อโลกยิ่งพัฒนา มนุษย์สามารถนำพลังงานต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์เพื่อก่อให้เกิดสิ่งที่อำนวยความสะดวกต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ แหล่งพลังงานหลักที่มนุษย์ใช้คือ แก๊สธรรมชาติ น้ำมันดิบและถ่านหินที่เหลือน้อยลงและมีราคาสูง ดังนั้นจึงต้องมีแหล่งพลังงานทางเลือกมาทดแทนพลังงานดังกล่าว แก๊สชีวภาพ (Biogas) จัดเป็นพลังงานที่น่าสนใจและมีความสำคัญมากในปัจจุบัน ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดและมีคุณสมบัติบางประการคล้ายกับแก๊สธรรมชาติ แก๊สชีวภาพได้จากการหมักและย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ เช่น มูลสัตว์ ของเสียจากชุมชน ภาคเกษตรและภาคอุตสาหกรรม เช่น โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โรงงานน้ำมันปาล์ม โรงงานผลิตน้ำตาลทราย เป็นต้น ซึ่งในประเทศไทยนับว่ามีของเสียเหล่านี้อยู่มาก ปัจจุบันพบว่ามีการปล่อยทิ้งของเสียดังกล่าวบางส่วนลงสู่แม่น้ำ ลำคลองสาธารณะ ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม การบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่ใช้วิธีการเติมอากาศ ซึ่งต้องใช้พลังงานไฟฟ้าทำให้ต้องสิ้นเปลืองพลังงานในการบำบัด ดังนั้นการผลิตแก๊สชีวภาพ จึงมีประโยชน์ในการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดการปล่อยน้ำเสียลงสู่แม่น้ำสาธารณะ ลดกลิ่นเหม็น ได้ปุ๋ยชีวภาพไปใช้ในการเกษตร ได้พลังงานทดแทนและยังช่วยลดภาวะโลกร้อนได้ แก๊สชีวภาพใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาหุงต้มในครัวเรือน เชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ เชื้อเพลิงในการอบแห้ง เป็นต้น และเพื่อผลิตพลังงานกลหรือไฟฟ้า เช่น ใช้กับชุดเครื่องยนต์สันดาปภายใน ต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) หรือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า

การผลิตน้ำมันปาล์มดิบเป็นอุตสาหกรรมหลักของภาคใต้ของประเทศไทยซึ่งผลิตน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (Palm Oil Mill Effluent, POME) เป็นจำนวนมาก ปริมาณน้ำเสียที่ผลิตได้ต่อหนึ่งตันทะลายปาล์มสดประมาณ 13 ลูกบาศก์เมตร มีค่า BOD COD และของแข็งแขวนลอยประมาณ 2,500-35,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 45,000-70,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและ 5,000-54,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Lam and Lee, 2011) นอกจากสารอินทรีย์ ปริมาณไขมันและปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงแล้ว น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มยังมีแร่ธาตุต่าง ๆ ที่สำคัญ เช่น โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) และแคลเซียม (Ca) เป็นต้น ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเป็นวิธีการที่เหมาะสำหรับและสามารถกำจัดสารสารอินทรีย์ได้สูงถึงประมาณร้อยละ 90-95 (Chan *et al.*, 2010) แก๊สชีวภาพที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจะประกอบด้วยแก๊สมีเทน (CH_4) ประมาณร้อยละ 50-70 ยังประกอบไปด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณร้อยละ 30-50 ที่เหลือเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) 10-2,000 ppm แอมโมเนียและไอน้ำอีกเล็กน้อย (Hosseini and Wahid, 2015)

การทำความสะอาดแก๊สชีวภาพโดยกำจัดสิ่งปนเปื้อนอื่นที่ไม่ใช่เชื้อเพลิงเป็นการเพิ่มคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงและลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งในกรณีที่ต้องการนำแก๊สชีวภาพบรรจุถังอัดความดัน นอกจากนี้จำเป็นต้องกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนนำแก๊สชีวภาพไปใช้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนต่อเครื่องมืออุปกรณ์ที่เป็นโลหะ การกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น เทคนิคการดูดซึม (Absorption) เทคนิคการดูดซับ (Adsorption) เทคนิคไครโอเจนิค (Cryogenics) และเทคนิคการเลือกผ่านโดยใช้เมมเบรน (Membrane) การเลือกเทคโนโลยีการแยกขึ้นอยู่กับลักษณะและความเข้มข้นของแก๊สที่ปล่อยออกมา (Witoon, 2011) การดูดซึมทางเคมีเป็นวิธีที่แพร่หลายสำหรับใช้บำบัดแก๊สที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตเนื่องจากเป็นวิธีที่ดำเนินง่ายและสามารถกำจัดแก๊สที่ความเข้มข้นสูงๆได้ ชนิดของหอดูดซึมที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ คอลัมน์บรรจุ (Packed column) คอลัมน์แบบเพลท (Plate column) คอลัมน์สเปรย์ (Spray column) เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นแก๊สกรด สารดูดซึมทางเคมีที่มีคุณสมบัติเป็นเบสจะทำให้อัตราการเคลื่อนย้ายมวลคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์จากเฟสแก๊สชีวภาพไปอยู่ในเฟสของเหลวสูงขึ้น สารดูดซึมสำหรับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ สารละลายที่มีอนุพันธ์ของหมู่เอมีน แอมโมเนีย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งการใช้กระบวนการดูดซึมทางเคมีสามารถกำจัดแก๊สทั้งสองในระดับความเข้มข้นและอัตราการไหลสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Mondal *et al*., 2012)

โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มใช้เส้นใยปาล์มและกะลาปาล์มเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มไอน้ำเพื่อใช้ในการนึ่งปาล์มและสกัดน้ำมัน การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้ทำให้เกิดเถ้าปาล์มที่เป็นของเสียจำนวนมาก มีการประยุกต์ใช้เถ้าปาล์มเป็นส่วนผสมของคอนกรีตและอิฐมวลเบาเพื่อเป็นวัสดุผสมลดต้นทุน (Al-mulali *et al*., 2015) ใช้ในการเกษตรเช่น การปรับปรุงคุณภาพดินกรดและเป็นแหล่งธาตุอาหารแก่พืชแต่เป็นการนำไปใช้ประโยชน์ในปริมาณน้อยจึงเหลือเถ้าปาล์มที่ไม่ใช้ประโยชน์จำนวนมากกว่า 1 ตันต่อวัน เถ้าปาล์มมีองค์ประกอบหลักเป็นออกไซด์ของโพแทสเซียมซึ่งละลายน้ำเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีสมบัติเป็นด่างแก่ ทำให้น้ำเถ้าที่ชะออกมาก่อปัญหาดินเค็ม ดังนั้นการนำสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มใช้เป็นสารดูดซึมสำหรับกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในกระแสแก๊ส จะทำให้เถ้าปาล์มมีความเสถียร ป้องกันการเกิดดินเค็มได้ และเนื่องจากในสารละลายด่างจากเถ้ามีองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ เช่น ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม สังกะสี เหล็ก เป็นต้น (Aronsson and Ekelund, 2006) รวมถึงไบคาร์บอเนตที่ได้หลังจากดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นจึงนำสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มหลังจากดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืชหรือปรับปรุงดินได้ (Aronsson and Ekelund, 2006) ซึ่งเป็นการกำจัดของเสียคือเถ้าปาล์ม เป็นการดำเนินการที่สนับสนุนมาตรฐานระบบการจัดการสิ่งแวดล้อม (ISO 14001*)* การใช้น้ำเสียจากบ่อบ่มซึ่งเป็นบ่อรับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพของโรงสกัดน้ำมันปาล์ม มาเตรียมเป็นสารละลายด่างโดยใช้เถ้าปาล์มเพื่อกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นการลดการใช้น้ำประปาและลดปริมาณการปล่อยน้ำเสีย สาหร่ายพุงชะโด ซึ่งเป็นวัชพืชน้ำที่เจริญเติบโตได้ดีในน้ำเสีย (Dierberg *et al*., 2002) เป็นชีวมวลที่เจริญเติบโตและเก็บเกี่ยวง่าย สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นไม้ประดับในตู้ปลาหรืออาหารสัตว์น้ำ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพโดยการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยสารละลายด่างที่มีต้นทุนต่ำซึ่งเตรียมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม ในขณะที่กระบวนการดูดซึมมีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูง น้ำเสียจากบ่อบ่มที่มีไนโตรเจนสูงและมี COD อยู่ประมาณ 1,000-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการดูดซึมเป็นน้ำที่มีคาร์บอเนตสูง สามารถใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดเพื่อบำบัดน้ำเสีย ซึ่งไม่เพียงแต่เป็นการนำเอาของเหลือใช้ไปใช้ประโยชน์และการบำบัดน้ำเสีย แต่ยังเป็นส่วนหนึ่งของการผลิตพลังงานสะอาดที่หมุนเวียนได้ ลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สู่บรรยากาศสาเหตุหนึ่งของภาวะโลกร้อน แนวคิดนี้จึงอยู่ภายใต้หลักการเชิงทฤษฎีประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco-Efficiency)

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 ศึกษาวิธีการเตรียมสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม

1.2.2 ศึกษาการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพด้วยสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม

1.2.3 เพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดเพื่อการบำบัดน้ำเสียในขั้นตอนสุดท้ายก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เตรียมสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มของหม้อต้มไอน้ำและน้ำเสียจากระบบบำบัดด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของโรงงานหีบน้ำมันปาล์ม โดยทำการทดลองเพื่อหาปริมาณของเถ้าเริ่มต้นที่สามารถเตรียมสารละลายด่างที่มีค่า pH สูงสุด วิธีทั้งหมดในการเตรียมสารละลายด่างนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของความสะดวกและคุ้มค่าต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

1.3.2 ศึกษาการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพโดยใช้แก๊สชีวภาพที่เตรียมขึ้นคือแก๊สผสม CO_2:CH_4 ที่ 50 : 50 ใช้หอดูดซึมประเภทคอลัมน์บรรจุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 2.0 เมตร

1.3.3 ศึกษาการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพโดยใช้แก๊สชีวภาพจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพของบริษัท ปาล์มพัฒนาไบโอแก๊ส จำกัด

1.3.4 ศึกษาผลของสภาวะดำเนินการต่อประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรจนซัลไฟด์โดยแปรค่า อัตราการไหลของของเหลว ความเข้มข้นของสารละลายด่างและชนิดของสารละลายดูดซึม

1.3.6 ศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดโดยใช้น้ำเสียที่ออกจากระบบทำความสะอาดแก๊สชีวภาพโดยใช้อ่างน้ำปริมาตร 30 ลิตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้วิธีการเตรียมสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ

Prince of Songkla University Pattani Campus

1.3.2 ได้องค์ความรู้ในการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพ ทำให้ได้แก๊สชีวภาพที่มีค่าความร้อนต่อหน่วยสูงขึ้นและเป็นการยืดอายุของระบบท่อและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพ นอกจากนี้ยังเป็นการลดมลพิษอากาศอีกด้วย

1.3.3 สามารถบำบัดน้ำเสียให้ได้น้ำทิ้งที่ผ่านมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ชีวมวลสาหร่ายพุงชะโดสำหรับนำไปผลิตเป็นพลังงาน เช่น แก๊สชีวภาพ ไบโอเอทานอลหรือไบโอบิวทานอล

1.4.4 เป็นการนำของเสียคือเถ้าปาล์มไปใช้ประโยชน์และเหลือกากเถ้าที่ไม่ละลายน้ำที่มีความเสถียร ลดการเกิดปัญหาดินเค็มในบริเวณทิ้งเถ้า

1.4.5 เป็นการลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ ด้วยการหมุนเวียนกลับไปใช้ประโยชน์ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย ทำให้ช่วยลดแก๊สเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของภาวะโลกร้อน

Prince of Songkla University
Pattani Campus

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 แก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพ คือแก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane producing bacteria) บางครั้งอาจจะมีแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต ในกรณีที่มีซัลเฟต โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างจากโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็ก หลังจากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นแก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยมีแก๊สอื่นอื่น ๆ เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือแก๊สไข่เน่าที่มีกลิ่นเหม็น และแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น เมื่อสารอินทรีย์เข้าสู่ขั้นตอนการย่อยสลายแบบสภาวะไร้อากาศจะผ่านกระบวนการต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมี แบ่งเป็น 3 ขั้นดังนี้

1. ไฮโดรลิซิส (Hydrolysis) : สารอินทรีย์ (เศษพืชผัก เนื้อสัตว์) มีองค์ประกอบสำคัญคือ คาร์โบไฮเดรต ไขมันและโปรตีน แบคทีเรียจะปล่อยเอ็นไซม์เอกซ์ตราเซลลูลาร์ (Extra cellular enzyme) มาช่วยละลายโครงสร้างโมเลกุลอันซับซ้อนให้แตกลงเป็นโมเลกุลเชิงเดี่ยว (Monomer) เช่น การย่อยสลายแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคส การย่อยสลายไขมันเป็นกรดไขมันและการย่อยโปรตีนเป็นกรดอะมิโน

2. อะซิโดเจนีซีส (Acidogenesis) : สารประกอบอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำซึ่งถูกสร้างโดยกระบวนการไฮโดรไลซีส จะถูกแบคทีเรียที่ดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีอากาศ (Facultative bacteria) ใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงานโดยในช่วงแรกของการย่อยสลายขั้นตอนนี้ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ที่มีอะตอมของคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) ซึ่งชนิดของแบคทีเรียจะถูกเรียกแตกต่างกันไปตามชนิดของสารอินทรีย์นั้น ๆ ขั้นตอนต่อมากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้นจะถูกแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจนนิค (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็น อะซิเตต ฟอร์เมต แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการผลิตแก๊สมีเทน

3. เมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis) : กรดอะซิติกและอื่นๆ รวมถึงคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนบางส่วน จะเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนเป็นมีเทนโดยเมทาโนเจน (Methanogen) สารตั้งต้นของขั้นตอนนี้เป็นผลผลิตที่ได้มาจากขั้นตอนการผลิตกรดโดยสารตั้งต้นที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ กรดอะซิติกและแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปฏิกิริยาดังสมการ (1) (2) และ (3)

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2 \quad (1)$$

$$2CH_3CH_2OH + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2CH_3COOH \quad (2)$$

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (3)$$

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ (Breure and Andel, 1987)

แก๊สชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบขั้นตอนเดียวจะมีองค์ประกอบหลักเป็นมีเทน (50-70%) และคาร์บอนไดออกไซด์ (30-50 %) (Aggarangsi *et al*., 2013) สำหรับแก๊สชีวภาพที่ได้ปรับปรุงกระบวนการเป็นกระบวนการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอนจะได้แก๊สผสมระหว่างมีเทน 51-61% คาร์บอนไดออกไซด์ 34-40% และไฮโดรเจน 5-11% แก๊สผสมนี้เรียกว่า ไฮเทน

(Cavinato *et al*., 2012) นอกจากนี้ในแก๊สชีวภาพซึ่งผลิตจาก POME ยังมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ประมาณ 1500-3000 ppm (Lam and Lee, 2011) อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุดที่มีได้ในแก๊สชีวภาพต่อการนำไปใช้งานประเภทต่าง ๆ ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 Biogas utilization technologies and gas processing requirements

Technology	Recommended Gas Processing Requirements
Heating (Boilers)	H_2S < 1000 ppm, 0.8-2.5 kPa pressure, remove condensate (kitchen stoves: H_2S < 10 ppm)
Internal Combustion Engines	H_2S < 100 ppm, 0.8-2.5 kPar pressure, remove condensate, remove siloxanes (Otto cycle engines more susceptible to H_2S than diesel engines)
Microturbines	H_2S tolerant to 70,000 ppm, > 350 BTU/scf, 520 kPa pressure, remove condensate, remove siloxanes
Fuel Cells	PEM: CO < 10 ppm, remove H_2S PAFC: H_2S < 20 ppm, CO < 10 ppm, Halogens < 4 ppm MCFC: H_2S < 10 ppm in fuel (H_2S < 0.5 ppm to stack), Halogens < 1 ppm SOFC: H_2S < 1 ppm, Halogens < 1 ppm
Stirling Engines	Similar to boilers for H_2S, 1-14 kPa pressure
Natural Gas Upgrade	H_2S < 4 ppm, CH_4 > 95%, CO_2 < 2 % volume, H_2O < ($1x10^{-4}$) kg/MMscf, remove siloxanes and particulates, > 3000 kPa pressure

Source: Zicari, M., 2003

2.1.2 การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพ (สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2553)
คุณสมบัติทั่วไปของแก๊สชีวภาพที่นำมาใช้งาน มีดังนี้

ค่าความร้อนประมาณ	21	MJ/m^3 (ที่ปริมาณมีเทน 60 %)
ความเร็วเปลวไฟ	25	Cm/s
อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ	650	^oC
อุณหภูมิจุดติดไฟ (CH_4)	600	^oC
ค่าความจุความร้อน	1.6	kJ/m^3 - ^oC
ความหนาแน่น (pressure, P)	1.15	kg/m^3

Prince of Songkla University Pattani Campus

จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบหลักของแก๊สชีวภาพที่ใช้สำหรับการเป็นเชื้อเพลิงคือ แก๊สมีเทน ส่วนองค์ประกอบอื่นที่ผสมอยู่ในแก๊สชีวภาพนั้นล้วนเป็นสิ่งเจือปนที่ไม่พึงประสงค์ซึ่งจะส่งผลเสียต่อการใช้งาน ปัญหาที่พบเมื่อมีการใช้แก๊สชีวภาพที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปัญหาที่พบจากการใช้แก๊สชีวภาพที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ

ลักษณะการใช้งาน	ปัญหาที่พบ
เป็นเชื้อเพลิงที่หัวเผาสำหรับหม้อต้มไอน้ำ	- การจุดเตาไม่ติด - การระเบิดในห้องเผาไหม้ขณะจุดเตาหรือขณะเดินเครื่อง - เปลวไฟกระพือและดับในขณะเร่งไฟ - การระเบิดที่ปล้องไอเสีย - การเกิดความร้อนเฉพาะจุดที่ผิวสัมผัสไฟในห้องเผาไหม้ - กำลังการผลิตของหม้อต้มไอน้ำไม่ได้ตามข้อกำหนด
เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน	- เครื่องยนต์สตาร์ทติดยาก - เครื่องยนต์ไม่มีกำลัง - น้ำมันเครื่องสกปรกมากและอายุการใช้งานสั้น - ห้องเผาไหม้สกปรก - ปล่องไอเสียร้อนจัด - วาล์วไอเสียไหม้และอายุการใช้งานสั้น - การเดินเครื่องไม่ต่อเนื่อง - การซ่อมบำรุงบ่อย

สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาเหล่านี้ล้วนมาจากสิ่งปนเปื้อนที่เป็นองค์ประกอบในแก๊สชีวภาพทั้งสิ้น เช่น

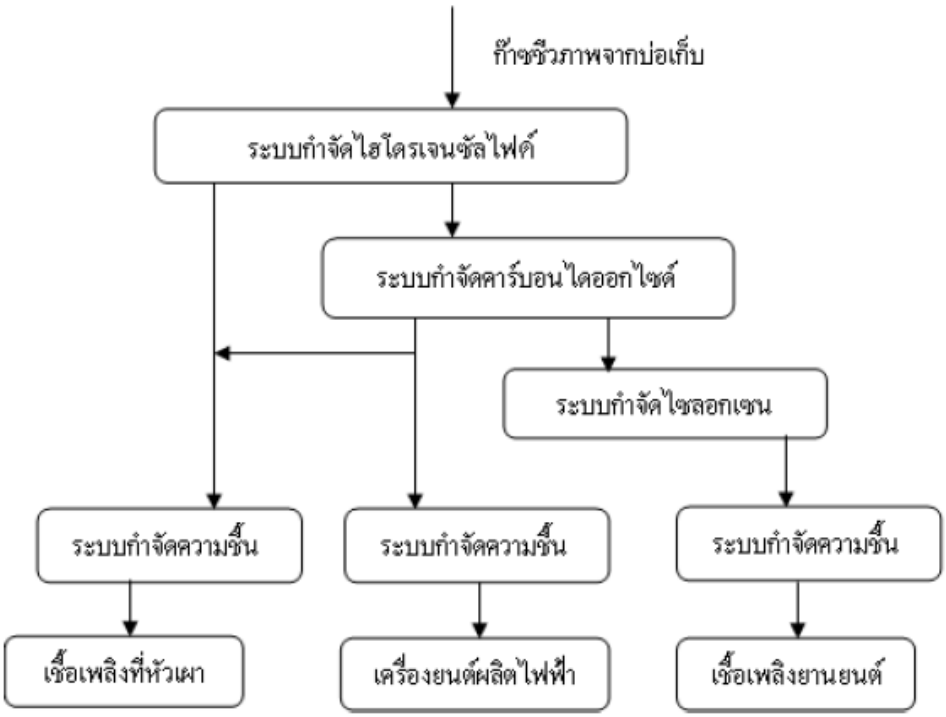
คาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพลดลงจนด้อยคุณภาพ ทำให้ติดไฟยากและลุกไหม้ช้าลงจนเป็นเหตุให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด เป็นแก๊สที่รับความร้อนจากการเผาไหม้และนำพาความร้อนไปทางปล่องไอเสีย เมื่อรวมกับน้ำหรือความชื้นจะเกิดเป็นกรดคาร์บอนิคที่มีฤทธิ์กัดกร่อนวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นโลหะ สัมผัสกับแก๊สชีวภาพ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อรวมตัวกับน้ำหรือความชื้นจะเกิดเป็นกรดไฮโดรซัลฟูริคที่มีฤทธิ์กัดกร่อนอย่างรุนแรงต่อวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สัมผัสกับแก๊สชีวภาพ เมื่อมีการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์จะเกิดเป็นเมือกเกาะติด

ความชื้น เกิดการสะสมของน้ำในท่อที่ตกท้องช้างหรือจุดต่ำสุดของท่อส่งแก๊ส ทำให้เกิดการปิดกั้นการไหลของแก๊สชีวภาพ เกิดเมือก ตะกอนโฟม ทำให้อุปกรณ์ความปลอดภัยอุดตัน

Prince of Songkla University Pattani Campus

ดังนั้นเพื่อให้การนำแก๊สชีวภาพไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพและควบคุมคุณภาพของแก๊สชีวภาพอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้เหมาะกับทุกการใช้งาน ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ผังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพชีวภาพโดยรวม
(สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2553)

2.1.2 คาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2) เป็นแก๊สในบรรยากาศ เกิดขึ้นได้หลายลักษณะ เช่น ภูเขาไฟระเบิด การหายใจของสิ่งมีชีวิต หรือการเผาไหม้ของสารประกอบอินทรีย์ แก๊สนี้เป็นวัตถุดิบสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เพื่อใช้คาร์บอนและออกซิเจนในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พืชจะปล่อยแก๊สออกซิเจนออกมาสู่บรรยากาศ ทำให้สัตว์ได้ใช้ออกซิเจนนี้ในการหายใจ การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของพืชเป็นการลดปรากฏการณ์เรือนกระจกได้

คาร์บอนไดออกไซด์ละลายได้ในน้ำได้ดังสมการที่ (4)

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \qquad (4)$$

การใช้สารละลายด่างจากเถ้าทำให้สารละลายมีสภาวะเป็นด่าง H_2CO_3 แตกตัวเป็น HCO^-_3 หรือ ดังสมการที่ (5) และ (6) ซึ่งมีอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าสมการ (4)

$$H_2CO_3 + OH^- \leftrightarrow HCO^-_3 + H_2O \quad (5)$$

$$H_2CO_3 + 2OH^- \leftrightarrow CO^{2-}_3 + 2H_2O \quad (6)$$

ดังนั้น OH^- ที่มีอยู่ในสารละลายด่างจะดูดซึม CO_2 มากขึ้นกว่าการใช้น้ำ

2.1.3 ไฮโดรเจนซัลไฟด์

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide, H_2S) หรือแก๊สไข่เน่าเป็นแก๊สที่มีกลิ่น พบได้ในแก๊สธรรมชาติและแก๊สชีวภาพ เป็นต้น ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบซัลเฟอร์ในซับสเตรท ไฮโดรเจนซัลไฟด์มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน หากสูดดมจะระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ และสามารถกัดกร่อนโลหะได้ ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพก่อนนำไปใช้ วิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพคือการดูดซึมทางเคมี ปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำและการทำปฏิกิริยาในสภาวะด่างแสดงดังสมการ (7) และ (9) (Kolthoff *et al*., 1963) ซึ่งสมการ (9) เป็นสมการที่เกิดขึ้นเร็ว ดังนั้นการใช้สารละลายด่างในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำให้ต้องการหอดูดซึมขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพการกำจัดมากขึ้น

$$H_2S \leftrightarrow H^+ + HS^- \quad (7)$$

$$HS^- \leftrightarrow H^+ + S^{2-} \quad (8)$$

$$H_2S + OH^- \leftrightarrow H^+ + HS^- \quad (9)$$

2.1.5 การดูดซึมแก๊ส (วราวุธ เสือดี**,** 2549)

การดูดซึมแก๊ส (Gas Absorption) เป็นกระบวนการซึ่งเกิดการถ่ายเทมวลระหว่างเฟสแก๊สกับเฟสของเหลวเมื่อเฟสทั้งสองสัมผัสกัน การดูดกลืนแก๊สด้วยของเหลวจะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณแก๊สในของเหลวน้อยกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดสมดุลทางเคมีหรือการละลายที่อิ่มตัว ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นจริงกับความเข้มข้นขณะสมดุลทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนของการดูดกลืน อัตราการดูดกลืนขึ้นอยู่กับสมบัติของของสารดูดกลืน (ของเหลวหรือสารละลาย) และสารถูกดูดกลืน (แก๊สหรือไอ) เช่น ค่าการละลาย หรือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของแก๊สและของเหลว เช่น การแพร ความหนืด ความหนาแน่น และสภาวะของการดำเนิน เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สและของเหลว มีการนำการดูดซึมแก๊สไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ได้แก่ การกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สธรรมชาติ การกำจัดไอระเหยของตัวทำละลายในกระบวนการผลิตต่าง ๆ เป็นต้น

คอลัมน์บรรจุ (Packed column) เป็นระบบดูดกลืนแบบพื้นฐานที่นำมาใช้สำหรับการดูดกลืนแก๊สในระบบคอลัมน์บรรจุ จะสเปรยของเหลวที่เป็นสารดูดกลืนเหนือชั้นของตัวกลาง (Packing materials) ซึ่งทำหน้าที่ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสำหรับให้แก๊สและของเหลวสัมผัสกันอย่างต่อเนื่อง กระแสอากาศปนเปื้อนเข้ามาทางด้านล่างของหอ จะไหลขึ้นสู่ชั้นของตัวกลาง ตัวกลางที่ดีต้องมีพื้นที่ผิวมากแต่ไม่ทำให้เกิดความดันลดสูง มีความคงทน วัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวกลางมีรูปร่างหลากหลาย เดิมตัวกลางทำจากหินหรือกระเบื้อง แต่ปัจจุบันมักทำจากพลาสติกทนความร้อนที่มี

Prince of Songkla University Pattani Campus

ความหนาแน่นสูง (โพลีเอทิลีน และโพลีโพรพีลีน) ในทางทฤษฎีการดูดซึมวิธีนี้จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดถ้าสามารถกระจายสารดูดกลืนให้ทั่วหอดูดกลืนให้มากที่สุดเพื่อให้กระแสอากาศสัมผัสกับของเหลวที่เป็นตัวดูดกลืนให้มากที่สุดโดยกระบวนการทั้งหมดเกิดในคอลัมน ขนาดที่มีความสูงเพียงพอต่อการใช้งาน สภาวะของแก๊สที่นำเข้า (เช่น อัตราการไหล สวนประกอบของแก๊สและอุณหภูมิ) และสภาวะของของเหลวที่ป้อนเข้านั้นมักเป็นค่าที่ทราบก่อนแล้วจึงคำนวณหาขนาดของหอดูดซึม ในงานวิจัยนี้เลือกใช้หอดูดซึมชนิดคอลัมน์บรรจุด้วยเหตุผลต่าง ๆ ตามที่ระบุไว้ข้างบน

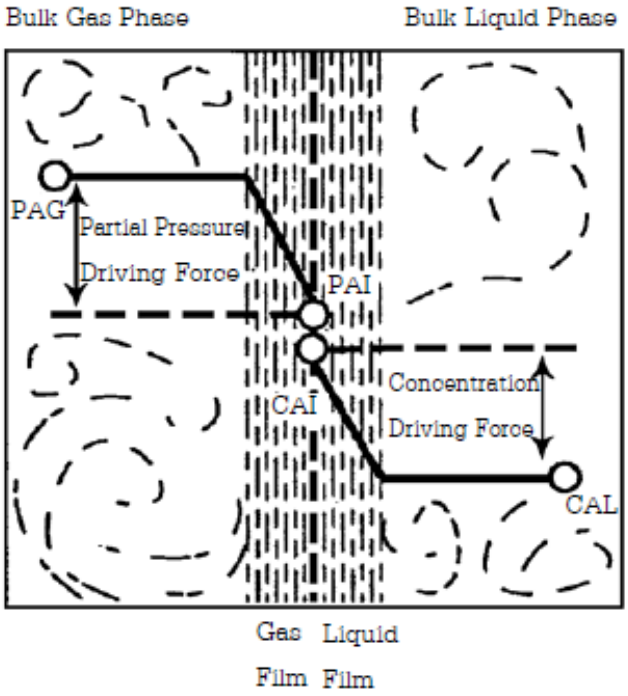
<u>ข้อจำกัดของการดูดซึมแก๊สโดยใช้คอลัมน์บรรจุ</u>

1. เพื่อให้การกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยวิธีการดูดซึมด้วยสารละลายในคอลัมน์บรรจุ มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การเพิ่ม Retention time โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวให้มากขึ้นเป็นวิธีการที่ดีวิธีหนึ่ง แต่จะทำให้ความดันลด (Pressure drop) ในคอลัมน์มากขึ้น จึงต้องคำนวณความดันลดที่ยอมรับได้ ซึ่งขนาดกำลังของเครื่องอัดแก๊สที่จะเข้าสู่คอลัมน์บรรจุนั่นเอง
2. การใช้นอซเซิลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเปิดเล็กในการสเปรย์ของเหลว จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมดีขึ้น แต่อาจเกิดปัญหาการอุดตันได้
3. อาจเกิดปัญหาการอุดตันในชั้นตัวกลางบรรจุเป็นสาเหตุให้เกิดความดันลดเพิ่มขึ้น หรือการท่วมในคอลัมน์ ประสิทธิภาพการดูดซึมลดลง ดังนั้นของเหลวที่ใช้ควรจะไม่มีตะกอน อย่างไรก็ตามสามารถทำการล้างกลับ (Back wash) หรือจะทำการนำออกมาล้างนอกคอลัมน์แล้วบรรจุเข้าไปใหม่ได้
4. อาจมีไอน้ำหลุดติดไปกับแก๊สขาออก ดังนั้นอาจต้องมีกระบวนการกำจัดน้ำออกจากแก๊ส ซึ่งวิธีที่ง่ายที่สุดคือ การใช้ Water trap

2.1.6 กลไกการดูดซึม

การดูดซึมเป็นการเคลื่อนย้ายมวลขององค์ประกอบ A หรือไอที่เป็นสารมลพิษออกจากกระแสแก๊สไปสู่ตัวทำละลาย แบบจำลองที่ใช้สำหรับอธิบายกลไกของกระบวนการดูดซึมคือ ทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น (two films theory) แบบจำลองนี้ อธิบายเกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายมวลที่มีอยู่ในสถานะแก๊สและของเหลวบริเวณระหว่างผิวสัมผัสของ 2 ส่วนดังรูปที่ 2.3 คือ ส่วนของแก๊สและของเหลว

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 2.3 Two films theory
(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

ทฤษฎีนี้สมมติว่าส่วนของแก๊สและของเหลวมีการผสมอย่างสมบูรณ์ ทำให้ผิวของส่วนที่เป็นแก๊สและของเหลวเกิดการสัมผัสกันและมีการถ่ายโอนมวลสารของสิ่งที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวโดยการแพร่กระจายของโมเลกุลทะลุผ่านเยื่อที่กั้นระหว่างแก๊สกับของเหลวจนกระทั่งเข้าสู่จุดสมดุล จากรูปที่ 2.3 เมื่อการแพร่กระจายของมวลโมเลกุลของสารเข้าสู่จุดสมดุลแล้ว ความดันย่อยของสาร A ในสถานะแก๊สจะเปลี่ยนจาก PAG เป็น PAI ที่ผิวระหว่างเนื้อเยื่อทั้ง 2 ในทำนองเดียวกันความเข้มข้นของมวลสารในสถานะของเหลวจะเปลี่ยนจาก CAI เป็น CAL

เมื่อ PAG คือ ความดันย่อยของสาร A ในสถานะแก๊สเริ่มต้น
PAI คือ ความดันย่อยของสาร A ในสถานะแก๊สเข้าสู่สมดุล
CAI คือ ความเข้มข้นของสาร A ในสถานะของเหลวเริ่มต้น
CAL คือ ความเข้มข้นของสาร A ในสถานะของเหลวเข้าสู่สมดุล

2.1.7 เถ้าปาล์ม

ในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบมีขั้นตอนที่ต้องใช้ไอน้ำคือ การนึ่งปาล์มและการสกัดน้ำมัน โดยใช้เส้นใยหรือทะลายปาล์มเปล่าเป็นเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส (Yin *et al*., 2008) เถ้าจากการเผาไหม้เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ สัดส่วนของโลหะออกไซด์ขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยหรือทะลายปาล์มเปล่าที่ใช้เนื่องจากแต่ละส่วนมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ต่างกัน (Lahijani *et al*., 2013) โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของโพแทสเซียม

Madhiyanon *et al*., (2012) รายงานองค์ประกอบของเถ้าจากทะลายปาล์มเปล่าดังนี้ K_2O (55.48%), SiO_2 (12.12%), CaO (9.65%), P_2O_5 (3.58%), MgO (1.90%), Al_2O_3 (0.26%), Na_2O (0.09%) นอกจากนี้ Yin *et al*. (2008) รายงานว่าจากการวิเคราะห์เถ้าจากทะลายปาล์มเปล่าพบองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ตะกั่ว นิกเกิล น้อยกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่น้อยไม่เป็นพิษ

เมื่อนำเถ้าละลายน้ำจะทำให้ได้สารละลายที่มีค่า pH มากกว่า 10 สารประกอบ K_2O และ Na_2O จะกลายเป็น KOH และ NaOH ซึ่งเป็นด่างแก่; P_2O_5 เปลี่ยนเป็น H_3PO_4; CaO และ MgO ละลายน้ำได้เล็กน้อย; ในขณะที่มีออกไซด์บางตัวไม่ละลายน้ำเช่น SiO_2 และ Al_2O_3 ดังนั้นจึงเป็นแนวคิดที่ดีในการนำเถ้าปาล์มเตรียมสารละลายด่างเพื่อไปกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์

2.1.8 การตกจม (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2537)

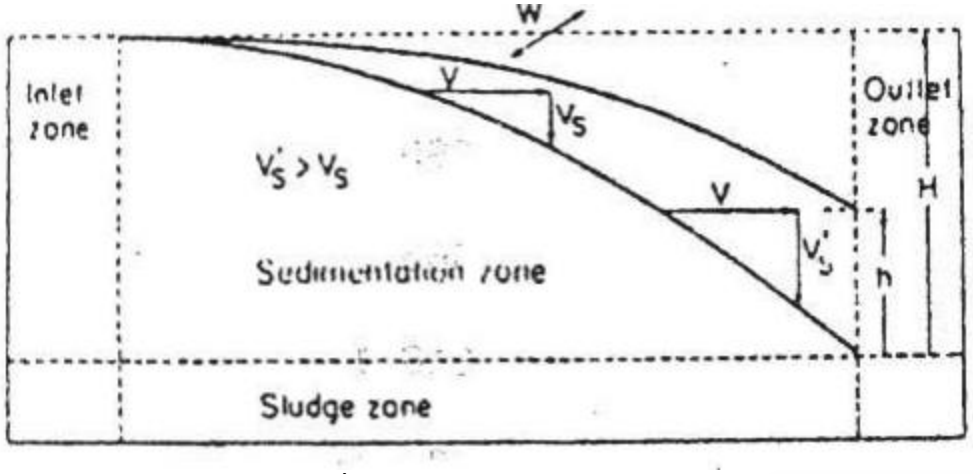
การตกจม (Sedimentation) เป็นการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว โดยการตกจมของอนุภาคของแข็งตามแรงดึงดูดโลก หรือแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางผ่านของเหลวไปรวมกันอยู่ที่ก้นภาชนะที่ใช้ในการตกจมอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะตกได้เร็วและดีกว่าอนุภาคขนาดเล็ก สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆจะต้องผ่านการรวมตะกอน (Flocculation) ก่อน ซึ่งทฤษฎีที่ได้รับการยอมรับในการอธิบายปัจจัยและกระบวนการตกจมคือ กฎของสโตกส์ (Stokes' law) ความเร็วในการตกจมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ความหนาแน่นของของเหลว ความหนืดของของเหลว และขนาดของอนุภาคของแข็ง

1. การตกตะกอนแบบอิสระ (Discrete settling, Free settling) การตกประเภทนี้อนุภาคจะไม่มีการรวมตัวกับอนุภาคอื่นในการตกจม แต่จะเป็นอิสระต่อกัน เช่น ทราย ซึ่งมีขนาด รูปร่าง ความถ่วงจำเพาะ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการตกจม ความเร็วในการตกจม จึงไม่เปลี่ยนแปลง สามารถคำนวณได้ตามทฤษฎีโดยตรง

2. การตกจมแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) เกิดขึ้นเมื่อความเร็วในการตกจมของอนุภาคเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเกาะรวมตัวของกลุมอนุภาค แผนภาพแสดงค่าความเร็วในการตกจมแบบนี้แสดงในรูปที่ 2.4 จะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วในลักษณะเส้นโค้ง แต่ถ้าเป็นการตกจมแบบอิสระเส้นนี้จะเป็นเส้นตรง

3. การตกจมแบบแยกชั้น (Zone settling) การตกตะกอนแบบนี้จะเห็นเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของตะกอนข้นกับส่วนของน้ำใส เมื่อเวลาการตกจมผ่านไป ความสูงของตะกอนข้นจะลดลงและคงที่เมื่อการตกจมสิ้นสุด

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 2.4 การตกจมแบบรวมกลุ่ม

2.1.9 สาหร่ายพุงชะโดและปัจจัยในการเจริญเติบโตของสาหร่ายพุงชะโด

สาหร่ายพุงชะโดหรือสาหร่ายห่างม้า เป็นพรรณไม้ใต้น้ำ ใบเลี้ยงคู่ (Submerged plant) มีอายุหลายปี ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Ceratophyllum demersum* L. ชื่อสามัญคือ Coontail, Hornwort ลำต้นเป็นสายกลมเรียวยาว ไม่มีราก ตามข้อมีใบออกมาโดยรอบเป็นชั้น แตกกิ่งก้านมากจนดูเป็นกลุ่มใหญ่ใต้ผิวน้ำ ลอยตัวอย่างอิสระ ใบเป็นเส้นคล้ายเส้นด้าย ขอบใบจักหยาบ ปลายใบแตกเป็น 2 แฉก ดอกเป็นดอกเดี่ยวแยกเพศ เกิดที่ซอกโคนใบ ดอกตัวผู้เห็นได้ชัด มีเกสรตัวผู้สีขาวอยู่เป็นกระจุก ไม่มีกลีบดอก ไม่มีก้านดอก ส่วนดอกตัวเมียจะเห็นชัดเจนเมื่อติดผลแล้ว ผลเป็นรูปไข่ สีดำมีหนามยื่นยาว 3 อัน สาหร่ายพุงชะโดเป็นวัชพืชที่ชอบขึ้นในที่ตื้นพบได้ทั่วไปตามแหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น ทะเลสาบ บ่อน้ำ บ่อปลา หรือบ่อบำบัดน้ำเสีย จะกระจายอยู่ในเขตอุ่นและร้อน ในประเทศไทยจะพบมากบริเวณภาคใต้ ตลอดทั้งปี (ช่อทิพย์, 2531) จากการสำรวจเบื้องต้นพบสาหร่ายไปบริเวณคูน้ำรอบสวนสาธารณะ สวนสมเด็จพระศรีนครินทร์ จังหวัดปัตตานี ซึ่งคูน้ำดังกล่าวมีขนาดประมาณกว้าง 3 เมตร ลึก 1 เมตร ยาว 2 กิโลเมตร

พืชน้ำกำลังได้รับความสนใจในฐานะชีวมวลน้ำเพื่อการผลิตพลังงาน ที่ให้พลังงานมากกว่าชีวมวลบกถึง 6-12 เท่า เนื่องจากส่วนประกอบภายในโครงสร้างของสาหร่ายที่ประกอบด้วยเซลลูโลสในปริมาณที่ไม่สูงเกินและมีลิกนินน้อย ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่า Koyama *et al.*, (2014) รายงานปริมาณลิกนินในสาหร่ายพุงชะโดที่พบในประเทศญี่ปุ่นเท่ากับร้อยละ 15 ของสาหร่ายพุงชะโดแห้ง และมีศักยภาพในการหมักเพื่อเปลี่ยนเป็นมีเทนร้อยละ 60 ดังนั้น การนำสาหร่ายพุงชะโดที่ไม่ได้เป็นพืชอาหารหลักและเจริญเติบโตเร็วมาเป็นซับสเตรทเดี่ยวหรือร่วมกับน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพโดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ

จากการสืบค้นข้อมูลพบว่าสาหร่ายพุงชะโดบำบัดน้ำเสียได้เนื่องจากความสามารถในการตรึงไนโตรเจน Ammonium (NH_4^+) และ Nitrate (NO_3^-) สามารถกำจัดฟอสฟอรัส ไฮโดรคาร์บอนและกำจัดโลหะ (Cu Cr Fe Mn Cd Pb As) กำจัดสีและเพิ่มออกซิเจนในน้ำได้ (Rai *et al.*, 1995; Dierberg *et al.*, 2002; Khang *et al.*, 2012; Mishra *et al.*, 2008; Rama Devi and Prasad,

1998; Keskinkan *et_al*.,2004) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการนำสาหร่ายพุงชะโดบำบัดน้ำเสียจากการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายพุงชะโดคือ แสง น้ำที่มีค่าสภาพความเป็นด่างสูงและธาตุอาหารรองที่ต้องการในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ ซิลิกา แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม เหล็ก แมงกานีส กำมะถัน สังกะสี ทองแดงและโคบอลต์ เป็นต้น ดังนั้นน้ำเสียซึ่งมีปริมาณคาร์บอเนตและไนโตรเจนสูงที่ได้จากสารละลายด่างระหว่างน้ำเสียจากบ่อบ่มและเถ้าปาล์มที่ผ่านการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากระบบทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ จึงน่าจะมีศักยภาพในการนำไปเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดและบำบัดน้ำเสียด้วย

2.1.10 สังเคราะห์แสงและการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของพืช

การสังเคราะห์แสงของพืชและสาหร่ายจะใช้พลังงานจากแสงในช่วงความยาวคลื่นที่เรียกว่า Photosynthetic active radiation (PAR) ซึ่งมีความยาวคลื่นระหว่าง 400-700 นาโนเมตร พลังงานที่ได้จากแสงจะนำไปใช้ในขั้นตอนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 fixation reaction) กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชและสาหร่าย เป็นกระบวนการทางชีวภาพที่สามารถลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ซึ่งพืชและสาหร่ายจะใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แร่ธาตุต่าง ๆ และน้ำ เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการนี้ เมื่อพืชหรือสาหร่ายมีการสังเคราะห์แสงจะมีการปลดปล่อยออกซิเจนออกมาภายนอกเซลล์ ซึ่งแตกต่างจากการสังเคราะห์แสงของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง (Photosynthetic bacteria) ที่จะใช้สารประกอบอินทรีย์หรือสารประกอบอนินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่น้ำ (สรวิศ, 2543 ; ฤทัยรัตน์, 2548)

2.1.11 ธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองของพืชน้ำ

ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของพืชน้ำมีหลายชนิด ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิดของพืชน้ำแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 2 กลุ่มคือ

1 ธาตุอาหารหลัก (Macronutrient) หมายถึงธาตุอาหารที่พืชน้ำสามารถนำไปใช้ในการสร้างโครงสร้าง เช่นใช้ในการสร้างผนังเซลล์เยื่อหุ้มเซลล์ สารสี โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ธาตุอาหารที่พืชต้องใช้มาก ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม ซัลเฟอร์และโพแทสเซียม

1.1 คาร์บอนที่พืชน้ำนำไปใช้ได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1.1.1 อนินทรีย์คาร์บอน โดยพืชน้ำจะใช้ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งละลายน้ำได้หรือในรูปของเกลือคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต การที่คาร์บอนจะอยู่ในรูปใดขึ้นอยู่กับระดับของ pH ในน้ำ 5 อยู่ในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ pH 7–9 อยู่ในรูปของเกลือไบคาร์บอเนต pH สูงกว่า 9.5 อยู่ในรูปของเกลือคาร์บอเนต

1.1.2 อินทรีย์คาร์บอน โดยพืชน้ำจะใช้ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ซึ่งจะช่วยในการเจริญเติบโต ได้แก่ น้ำตาลชนิดต่าง ๆ เช่น ซูโครส กลูโคส กาแลคโตส ความต้องการชนิดและปริมาณของสารประกอบคาร์บอนจะแตกต่างกันตามชนิดของพืชน้ำ

1.2 ไนโตรเจน มีความสำคัญรองจากคาร์บอนในแง่ของปริมาณไนโตรเจนในพืชน้ำมีประมาณ 7–10% ของน้ำหนักแห้ง

Prince of Songkla University Pattani Campus

1.2.1 อนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย (Ammonia) ไนไตรท (Nitrite) และไนเตรท (Nitrate) แอมโมเนียจะถูกพืชน้ำนำไปใช้ก่อนไนเตรทส่วนไนไตรท์ พืชน้ำต้องการในปริมาณที่น้อยหรืออาจจะไม่ใช้เลย สำหรับไนเตรทนั้นถ้าพืชน้ำนำไปใช้เมื่อดูดซึมเข้าสู่เซลล์แล้วต้องเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียก่อนจึงจะนำไปใช้ได้ ถ้าในน้ำมีทั้งแอมโมเนียและไนเตรทพืชน้ำจะเลือกดูดซึมแอมโมเนียก่อนเพราะจะได้ไม่ต้องเสียพลังงานในการเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นแอมโมเนีย

1.2.2 อินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ ยูเรีย (Urea) เอไมด์ (Amide) กลูทามีน (Glutamine) และแอสพาราจีน (Asparagine) ซึ่งจัดว่าเป็นแหล่งไนโตรเจนชนิดดีส่วนสารอินทรีย์ไนโตรเจนชนิดอื่น ได้แก่ กรดอะมิโน (โดยเฉพาะกรดไกลซีนเซรีนอะลามีน กรดกลูทามิคและกรดแอสพาร์ติค) พืชน้ำต้องการใช้เพื่อการเติบโตซึ่งแตกต่างกันตามชนิดไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อกระบวนการสร้างสารพันธุกรรมของพืชน้ำโดยเป็นองค์ประกอบของนิวคลีโอไทด์ (Nucleotide) กรดอะมิโนและสารสีบางชนิดเช่นคลอโรฟิลล์ ถ้าพืชน้ำขาดไนโตรเจนจะมีผลต่อการสังเคราะห์แสงและปริมาณสารสีของเซลล์รวมทั้งทำให้กิจกรรมของเอนไซม์บางชนิดลดลง

1.3 ฟอสฟอรัส เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อกระบวนการต่าง ๆ ของเซลล์โดยเฉพาะกระบวนการถ่ายเทพลังงานและกระบวนการสร้างกรดนิวคลีอิคแม้ว่าในแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีปริมาณสารอินทรีย์ฟอสฟอรัสสูงกว่าอนินทรีย์ฟอสฟอรัส แต่พืชน้ำต้องการใช้อนินทรีย์ฟอสฟอรัสมากกว่า โดยพืชน้ำต้องการใช้จะอยู่ในรูปออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) ซึ่งพืชน้ำสามารถนำไปใช้ได้โดยตรง ความต้องการฟอสฟอรัสของพืชน้ำแต่ละชนิดไม่เท่ากัน พืชน้ำสีเขียวจะมีความต้องการฟอสฟอรัสมากกว่าพืชน้ำกลุ่มอื่น ถ้าพืชน้ำขาดฟอสฟอรัสจะมีผลเสียต่อการเจริญเติบโตทำให้ปริมาณสารสีชนิดคลอโรฟิลล์เออาร์เอ็นเอและดีเอ็นเอลดลง แต่แป้งหรือคาร์โบไฮเดรตกลับเพิ่มขึ้นมีผลทำให้รูปร่างของเซลล์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

1.4 ซัลเฟอร์ เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชน้ำทุกชนิด ซัลเฟอร์ในเซลล์พืชน้ำมีหลายรูปแบบ เช่น ในรูปกรดอะมิโน วิตามินบี กรดแพนโทเธนิค กรดลิโพอิค ฯลฯ ซัลเฟอร์ที่พืชน้ำส่วนใหญ่ใช้อยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ ได้แก่ เกลือของโลหะคือซัลเฟต แต่ถ้าเป็นสภาวะที่ขาดออกซิเจนเช่นในบริเวณแหล่งน้ำปิดหรือพื้นท้องน้ำจะใช้ในรูปของซัลไฟด์

1.5 แคลเซียม เป็นธาตุอาหารที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการสร้างเกล็ดและโครงสร้างของพืชน้ำโดยเฉพาะพืชน้ำน้ำเค็มหรือมีบทบาทสำคัญในการสร้างผนังของเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้ ในธรรมชาติมีแคลเซียมเพียงพอที่พืชน้ำจะนำไปใช้ได้ นอกจากพืชน้ำที่ต้องการแคลเซียมเพื่อใช้ในการสร้างโครงสร้างภายนอก เช่น *Halimeda* มีความจำเป็นต้องดูดซึมแคลเซียมจากน้ำทะเลค่อนข้างมาก

1.6 โซเดียม โพแทสเซียม โซเดียมเป็นธาตุอาหารที่พืชน้ำบางชนิดต้องการ เป็นธาตุอาหารที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของเอนไซม์หลายชนิดเป็นตัวควบคุมการทำหน้าที่ต่าง ๆ ของเซลล์ สำหรับโพแทสเซียมเป็นธาตุอาหารที่เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์หลายชนิดและยังจำเป็นสำหรับการสังเคราะห์แสง ถ้าขาดโพแทสเซียมจะทำให้การสังเคราะห์แสงลดลงและการหายใจเพิ่มขึ้น พืชน้ำสามารถใช้โซเดียมทดแทนโพแทสเซียมในกรณีที่แหล่งน้ำขาดธาตุอาหารโพแทสเซียมหายใจเพิ่มขึ้น

1.7 แมกนีเซียม เป็นธาตุอาหารที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) โดยพืชน้ำจะนำไปใช้ในการสร้างคลอโรฟิลล์ซึ่งแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบของนิวเคลียสในคลอโรฟิลล์

2 ธาตุอาหารรอง (Micronutrient) หมายถึงธาตุอาหารที่พืชน้ำสามารถนำไปใช้เป็นตัวช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์ซึ่งพืชน้ำต้องการในปริมาณน้อยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อยคือ

2.1 ธาตุอาหารรองอนินทรีย์ (Inorganic micronutrients) ธาตุอาหารรองอนินทรีย์ที่พืชน้ำส่วนมากต้องการใช้ ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง โคบอลล์ โบรอน โซเดียม

2.1.1 เหล็ก เป็นธาตุอาหารที่ช่วยในการดูดซึมไนโตรเจนและกระบวนการสังเคราะห์แสงคือช่วยสร้างคลอโรฟิลล์เอและซี–ไฟโคไซยานิน มีความจำเป็นต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ในน้ำทะเลจะมีเหล็กอยู่มากเกินพอสำหรับความต้องการของพืชน้ำแต่อาจจะขาดแคลนได้เนื่องจากเหล็กเมื่อถูกชะล้างลงสู่น้ำทะเลแล้วส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ (Ferric hydroxide) สารตัวนี้มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) คล้ายวุ้นใส ๆ และจับกับสารอินทรีย์อื่นจมลงสู่พื้นทะเลถ้าพืชน้ำขาดเหล็กจะทำให้เมตาบอลิซึมต่ำลงส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลงด้วย

2.1.2 โบรอน เป็นธาตุอาหารที่พืชน้ำบางชนิดต้องการใช้

2.1.3 แมงกานีส ทองแดงและสังกะสี เป็นธาตุอาหารที่เป็นองค์ประกอบสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำรวมทั้งเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นของเอนไซม์อีกหลายชนิดถ้าขาดจะทำให้การสังเคราะห์แสงลดลง และการหายใจเพิ่มขึ้นธาตุอาหารทั้ง 3 ชนิดนี้ถ้ามีมากเกินไปพืชน้ำจะตาย

2.1.4 โมลิบดินัม วานาเดียม โคบอลท์ โมลิบดินัมมีบทบาทสำคัญในการเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ที่ช่วยในการสังเคราะห์แสง วานาเดียมเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำบางชนิด

2.2 ธาตุอาหารรองอินทรีย์ (Organic micronutrient) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อยดังนี้

2.2.1 คาร์โบไฮเดรท ได้แก่ น้ำตาลชนิดต่าง ๆ เช่น เดกโตสความเข้มข้นที่ใช้ 0.2–0.5 เปอร์เซ็นต์ควรเติมน้ำตาลในอาหารเลี้ยงพืชน้ำหลังจากการนึ่งฆ่าเชื้อแล้วมิฉะนั้นน้ำตาลจะสลายตัว

2.2.2 เกลืออินทรีย์หรือสารประกอบที่มีเกลืออินทรีย์ ได้แก่ เกลือแอซิเตท เช่น โซเดียมแอซิเตท โพแทสเซียมแอซิเตท ความเข้มข้นที่ใช้ 0.1–0.5 เปอร์เซ็นต์

2.2.3 วิตามิน ได้แก่ วิตามินบี 3 ชนิดคือ บี 1 บี 2 และบีรวม ควรเติมในอาหารเลี้ยงพืชน้ำหลังจากทีผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้ว ได้แก่ อาหารที่ช่วยการเจริญเติบโตของพืชน้ำ เช่น แอดีนิน (Adenin) และไคเนติน (Kinetin) ซึ่งทั้ง 2 ชนิดนี้ละลายในน้ำได้เล็กน้อยแต่ละลายได้ดีในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต อาหารเสริมอีก 2 ชนิดที่นิยมใช้คือ กรดจิบเบอเรลลิก (Gibbe-rellic acid) ละลายในน้ำได้ดีและกรดอินดอล (Indo acid) มีสมบัติละลายได้เล็กน้อยในน้ำร้อนและสลายตัวง่ายเมื่อถูกแสงสว่างลักษณะของพืชน้ำที่ขาดธาตุอาหาร ลักษณะการขาดธาตุอาหารของพืชน้ำสรุปได้ 3 ประการดังนี้

2.2.3.1 ปริมาณสารสีสำหรับใช้ในการสังเคราะห์แสงลดลง เช่น ถ้าขาดธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ ซิลิกา แมกนีเซียม เหล็ก โพแทสเซียมและโมลิบดินัมสีของเซลล์จะจางลง

2.2.3.2 เซลล์มีการสะสมอาหารเพิ่มขึ้นกว่าปกติ เช่น สะสมแป้งหรือไขมันจะเกิดขึ้นเมื่อพืชน้ำขาดธาตุอาหารบางชนิดหรือหลายชนิด

2.2.3.3 เซลล์มีการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิคและโปรตีนลดลง ซึ่งเป็นผลต่อเนื่องจากการที่เซลล์มีการสะสมแป้งหรือไขมันเพิ่มขึ้น (จงกล และขจรเกียรติ์, 2548)

2.1.12 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการดูดซึมธาตุอาหารของพืชน้ำ

1 ปัจจัยทางกายภาพประกอบด้วย

1.1 แสงมีอิทธิพลทางอ้อมต่ออัตราการดูดซึมธาตุอาหารโดยผ่านทางการสังเคราะห์แสงพืชน้ำแต่ละชนิดความเหมาะสมของปริมาณแสงจะแตกต่างกัน

1.2 อุณหภูมิมีผลต่อการดูดซึมธาตุอาหารและกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิสูงจะทำให้กระบวนการเมตาบอลิซึมสูงขึ้นส่งผลให้การดูดซึมธาตุอาหารของพืชน้ำเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะจำกัดการเจริญเติบโตของพืชน้ำ

1.3 ค่า pH พืชน้ำแต่ละชนิดสามารถเติบโตได้ที่ระดับ pH ต่างกัน

1.4 การเคลื่อนตัวของน้ำมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำ พบว่าพืชน้ำที่เลี้ยงอยู่ในน้ำที่เคลื่อนไหวตลอดเวลามีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าพืชน้ำที่อยู่ในน้ำนิ่งเนื่องจากไอออนสามารถผ่านและแพร่ผ่านเข้าสู่เซลล์ได้ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุอาหารด้วย

2 ปัจจัยทางเคมีที่มีผลต่อการดูดซึมธาตุอาหารของพืชน้ำคือ ความเข้มข้นของธาตุอาหาร กล่าวคือ ถ้าพืชน้ำอยู่ในน้ำที่มีความเข้มข้นของธาตุอาหารสูง ๆ จะทำให้อัตราการดูดซึมธาตุอาหารมีมากขึ้น

3 ปัจจัยทางชีวภาพแบ่งออกได้เป็น

3.1 อายุของทัลลัสพืชน้ำพืชน้ำที่ยังอ่อนหรืออายุน้อยจะสามารถดูดซึมธาตุอาหารได้ดีกว่าพืชน้ำที่มีอายุมาก

3.2 สภาพของพืชน้ำที่อยู่ในบริเวณที่มีธาตุอาหารแตกต่างกันพบว่าพืชน้ำอยู่ในบริเวณที่มีธาตุอาหารปริมาณมากเมื่อนำมาเลี้ยงใหม่เพื่อศึกษาการดูดซึมธาตุอาหารพบว่าพืชน้ำดังกล่าวจะมีอัตราการดูดซึมน้อยกว่าพืชน้ำที่อยู่ในบริเวณที่มีธาตุอาหารปริมาณน้อย (จงกล และขจรเกียรติ์, 2548)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้กระบวนการดูดซึมทางเคมี

Gao *et al*. (2002) ได้ศึกษาการใช้ Wet scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide, H_2S) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์/โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOCl/NaOH) เป็นตัวออกซิไดซ์ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยวิธีการดังกล่าวสูงถึง ร้อยละ 95 ขึ้นอยู่กับสภาวะการดำเนินการและสภาวะแวดล้อม นอกจากนั้น

Prince of Songkla University Pattani Campus

ยังพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ Wet scrubber ร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีค่าใกล้เคียงกับการบำบัดโดยวิธีการกรองชีวภาพ แต่มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า

Diao *et al*. (2004) ได้ศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยการสครับด้วยแอมโมเนียใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบกึ่งต่อเนื่องและสภาวะการกำจัดแตกต่างกัน จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่อนข้างคงที่ประมาณ 95-99% เมื่อแก๊สกระแสเข้ามีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 10-14% ตามลำดับ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสารละลายแอมโมเนียมีศักยภาพสูงในการสครับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยอัตราการดูดซึมอันรวดเร็ว ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับแอมโมเนีย ได้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตเป็นผลิตภัณฑ์หลัก

Mahmoudkhani *et al*. (2009) ได้ทำการศึกษาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศโดยใช้หอบรรจุตัวอย่างสูง 6.5 เมตร ขณะปฏิบัติการมีความดันลดเกิดขึ้น 27 พาสคาล อากาศไหลเข้าในตัวกลางกรองด้วยอัตราเร็ว 0.7 เมตรต่อวินาที ในลักษณะไหลสวนทางกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซึม ใช้กระบวนการใหม่สำหรับการกำจัดคาร์บอเนตไอออนจากสารละลายด่างโดยใช้สารประกอบไททาเนต กระบวนการไททาเนตช่วยลดค่าความร้อนที่ต้องใช้ในกระบวนการดูดซึมประมาณ 50% ในงานวิจัยนี้จึงได้แสดงถึงการออกแบบกระบวนการทางเคมีเพื่อรองรับการทดสอบการตกตะกอนของวัฏจักรไททาเนต

Tippayawong and Thanompongchart (2010) ได้ทำการศึกษาวิธีการสำหรับการสครับแก๊สชีวภาพและการทำให้มีเทนมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยได้ทำการศึกษาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายในคอลัมน์บรรจุ สารละลายที่ใช้คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และโมโนเอทาโนลามีน (MEA) ตัวทำละลายเหลวจะหมุนเวียนผ่านคอลัมน์และสัมผัสกับแก๊สชีวภาพในทิศทางที่มีการไหลแบบสวนทางกัน ผลการศึกษาพบว่าสารละลายที่ใช้มีประสิทธิภาพในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสูง (ประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 90%) ทำให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีแก๊สมีเทนเข้มข้นขึ้น ส่วนไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกกำจัดให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ เมื่อใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการดูดซึมจะอิ่มตัวในเวลาประมาณ 50 นาที แต่เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโมโนเอทาโนลามีน จะใช้เวลาประมาณ 100 นาที

Yincheng *et al*. (2011) ศึกษาเปรียบเทียบการดูดซึมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายแอมโมเนีย และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ Spray column พบว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีประสิทธิภาพในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าสารละลายแอมโมเนีย โดยเมื่อต้องการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้ได้ประมาณ 90% ต้องใช้อัตราส่วนโมลของสารละลายแอมโมเนียต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 9.68 ซึ่งสูงกว่าอัตราส่วนโมลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเท่ากับ 4.43

Zeng *et al*. (2013) ในงานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยสารละลายแอมโมเนียในคอลัมน์บรรจุที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร ความสูง 0.6 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.1 เมตร ใช้ตัวกลางชนิด Raschig ring ที่ทำจากเซรามิก มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.6 มิลลิเมตร Void fraction ของ Packing layer 0.64 ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร Specific surface area ทั้งหมด 570 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร โดยทำการทดลองหาอัตราการดูด

ซึมทั้งหมดและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร (K_Ga_V) อัตราการดูดซึมจะขึ้นกับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ (20-55 องศาเซลเซียส) อัตราการไหลของแก๊ส (10-28 ลิตรต่อนาที) อัตราการไหลของของเหลว (8-24 ลิตรต่อชั่วโมง) ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (1.16-8.81 กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร) และความความดันส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (5-15 กิโลพาสคาล) จากผลการทดลองพบว่า อัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้น อัตราการดูดซึมก็เพิ่มขึ้นด้วย ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นก็ทำให้อัตราการดูดซึมทั้งหมดเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ค่า K_Ga_V ซึ่งคำนวณได้จากความชันของเส้นตรงจากกราฟระหว่างอัตราการดูดซึมทั้งหมดกับความดันย่อยของแก๊สที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างกัน

จากการสืบค้นข้อมูลสารละลายด่างที่นิยมใช้ในกระบวนการดูดซึมทางเคมีได้แก่ NaOH, MEA และ NH_3 เป็นต้น แต่ยังไม่พบงานวิจัยที่ใช้สารละลายด่างเถ้า แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเถ้ามีปริมาณของ K_2O สูง ละลายน้ำแล้วได้ KOH ซึ่งเป็นด่างแก่จึงน่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงเช่นเดียวกัน

การผลิตแก๊สชีวภาพหรือแก๊สไฮโดรเจนจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

POME ซึ่งถูกจัดเป็นซับสเตรทที่มีศักยภาพสูงทั้งในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทน ดังนั้นจึงมีการศึกษาปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนที่ได้จากการหมักน้ำเสียขาออกโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME) โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ป้อนต่อเนื่องชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลได้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนขึ้นกับแหล่ง/เชื้อจุลินทรีย์ เครื่องปฏิกรณ์และสภาวะดำเนินการ จากการสืบค้นข้อมูลพบว่า รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหมัก POME แบบสองขั้นตอนยังมีน้อยและนักวิจัยส่วนใหญ่ไม่มีรายงานผลการวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพแยกตามความเข้มข้นของแก๊สแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ผลได้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จาก POME

ผู้วิจัย	แหล่ง/เชื้อจุลินทรีย์	เครื่องปฏิกรณ์ (อุณหภูมิ)	ผลได้ไฮโดรเจน	ผลได้มีเทน
(Badiei *et al*., 2011)	Mixed microflora	ASBR (37°C)	340 mL/gCOD	-
(Mamimin *et al*., 2012)	*Thermoanaerobactrium rich* sludge	CSTR (60°C)	4.2 L/L POME	-
(Fang *et al*., 2011)	Cow manure	UASB (55°C)	-	436 mL/gVS_{added}
(Fang *et al*., 2011)	Cow manure	EGSB (55°C)	-	438 mL/gVS_{added}
(Najafpour *et al*., 2006)	Anaerobic granular sludge	UASFF (38°C)	-	346 mL/gCOD

ASBR: Anaerobic Sequencing Batch Reactor

CSTR: Continuous Stirred Tank Reactor, EGSB: Expanded Granular Sludge Blanket Reactor, UASB: Up-flow Anaerobic Sludge Blanket Reactor, UASFF: Up-flow Anaerobic Sludge Fixed Film Reactor

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ผลิตจากกระบวนการหมัก

ผู้วิจัย	%CH_4	%H_2	%CO_2	H_2S (ppm)
(Fang *et al*., 2011)	55-73	-	27-45	No data
(Sidik *et al*., 2013)	44	-	56	No data
(Poh and Chong, 2010)	65-70	-	21-26	280-670
(Wong *et al.,* 2013)	30-40	7-14	50-60	No data

การเลี้ยงพืชน้ำโดยใช้น้ำเสีย

Aronsson and Ekelund (2006) ศึกษาการนำสารละลายด่างจากเถ้าไม้จาก Jämtlamell, Östersund ประเทศสวีเดนไปเลี้ยงมอส *Fontinalis antipyretica* Hedw เตรียมสารละลายด่างที่ความเข้มข้นของเถ้าเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร วัดค่า pH ได้ 11.3 วิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าที่ละลายน้ำที่ความเข้มข้นนี้ พบโพแทสเซียม แคลเซียม ซิลิคอน อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โซเดียม สังกะสี ทองแดง ในปริมาณ ความเข้มข้นระดับ ppb และประกอบด้วยโพแทสเซียมสูงสุดที่ความเข้มข้น 207 ppm จากการทดลองพบว่าการนำสารละลายด่างที่เตรียมขึ้นที่ความเข้มข้นของเถ้าเท่ากับ 5-10 กรัมต่อลิตร *Fontinalis antipyretica* Hedw สามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าการทดลองที่เลี้ยงในชุดควบคุมและพบว่าหลังจากปรับค่า pH ของสารละลายที่ได้จากการละลายเถ้าไม้เป็น 7.5 แล้วนำไปเลี้ยงมอสน้ำจืดชนิด *Fontinalis antipyretica* Hedw พบว่า Secondary brance เจริญเติบโตขึ้น 20 มิลลิเมตรภายใน 9 สัปดาห์

Fulke *et al.,* (2010) ได้ศึกษาระบบการเลี้ยงสาหร่ายระดับจุลภาคเพื่อการผลิตเป็นไบโอดีเซลและลดคาร์บอนไดออกไซด์ไปพร้อมกัน จากการศึกษาพบว่า *Chlorella sp.* มีอัตราการเจริญเติบโตสูงเมื่อเทียบกับ *Chlamydomonas sp*. และ *Synnecococcus sp.* ที่ระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน (0.03% 3% 10% และ 5%) ผลผลิตลิปิดคือ 23 20 และ 27.3 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ค่าความร้อนของ *Chlorella sp.* พบว่ามีค่า 29 กิโลจูลต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าความร้อนที่สูงสำหรับสาหร่ายระดับจุลภาคในน้ำจืด ดังนั้น *Chlorella sp.* จึงนับเป็นพืชที่มีศักยภาพในการใช้ผลิตเป็นพลังงานทางเลือก

จากการสืบค้นข้อมูลยังไม่พบการนำน้ำเสียจากบ่อหมัก POME ไปเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด อย่างไรก็ตามจากคุณลักษณะของน้ำเสียจากบ่อหมัก POME ดังแสดงในตารางที่ 2.5 รวมถึงปริมาณธาตุอาหารอื่น ๆ เช่น เหล็ก สังกะสี ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียม (Habib *et al*., 1997) การดูดซึมเอาคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้อยู่ในน้ำเสียก่อนนำไปเลี้ยงสาหร่ายจะทำให้มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าในการเลี้ยงสูงกว่าการปล่อยให้สาหร่ายใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ซึ่งมีอยู่เพียงประมาณ 360 ppm (Brennan and Owende, 2010)

ตารางที่ 2.5 คุณลักษณะของ น้ำเสียจากบ่อหมัก POME

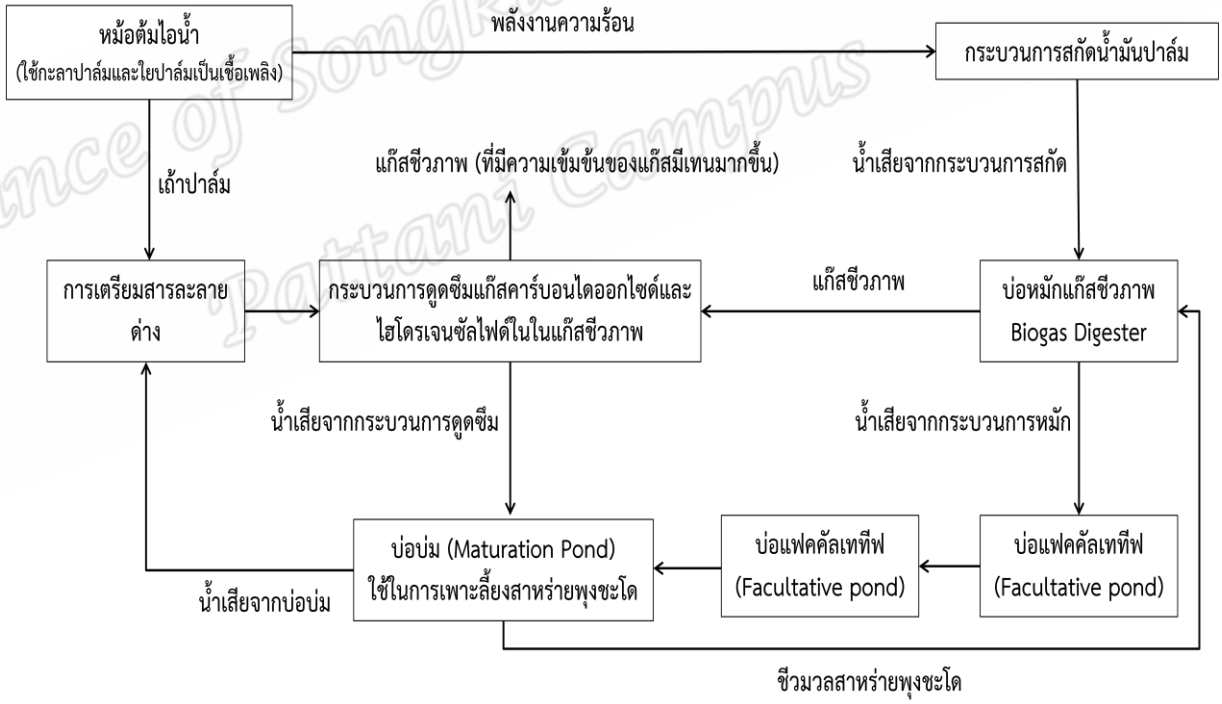
พารามิเตอร์	ปริมาณ (mg/L)
Oil and grease	10–430
BOD	110–1800
COD	340–19,680
Total solid	6090–18,400
Suspended solid	760–14,850
Volatile solid	2680–14,570
Total nitrogen	320–1070
Ammonia nitrogen	60–300

Prince of Songkla University
Pattani Campus

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

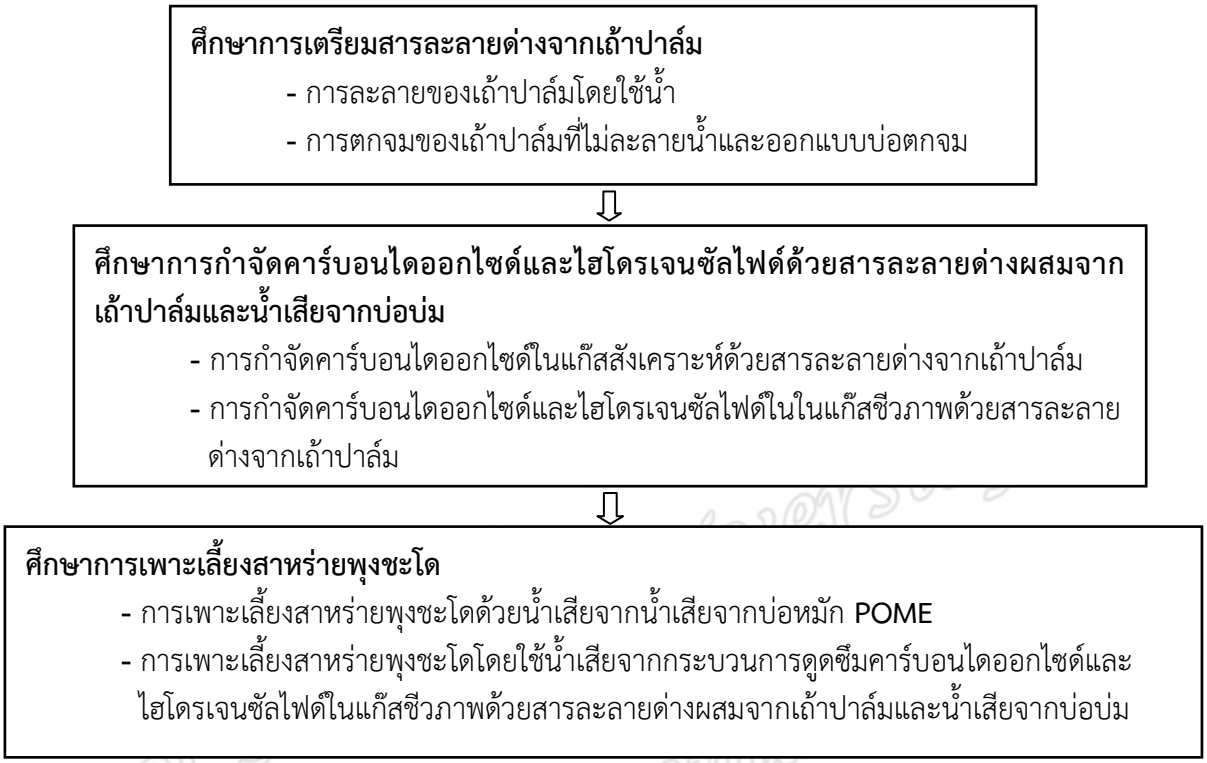
ในวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพที่ได้จากการหมัก POME ซึ่งเป็นน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม โดยการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายด่างสามารถเตรียมได้จากเถ้าปาล์มที่ได้จากการเผาเส้นใยปาล์มกับกะลาปาล์มเพื่อให้พลังงานความร้อนในการผลิตไอน้ำเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม และน้ำเสียจากบ่อบ่มจากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการดูดซึมทางเคมีเพื่อให้ได้แก๊สชีวภาพที่มีความเข้มข้นของแก๊สมีเทนที่สูงขึ้น น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการดูดซึม มีคาร์บอเนตสูง ไนโตรเจนสูง และมี COD อยู่ประมาณ 1,000-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดเพื่อบำบัดน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการดังกล่าว ชีวมวลสาหร่ายพุงชะโดที่ได้สามารถใช้เป็นซับสเตรทร่วมกับ POME ในการผลิตแก๊สชีวภาพต่อไป ดังรูปที่ 3.1 แสดงการปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพแบบสองขั้นตอนโดยการดูดซึมด้วยสารละลายด่างและการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด



รูปที่ 3.1 การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพแบบสองขั้นตอนโดยการดูดซึมด้วยสารละลายด่างและการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด

Prince of Songkla University Pattani Campus

การดำเนินวิจัยเป็นไปตามแผนผังที่แสดงลำดับการทดลอง ดังนี้



3.1 ศึกษาการเตรียมสารละลายด่างจากเถ้าปาล์ม

การเตรียมสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มเป็นการทดลองเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการหาปริมาณเถ้าปาล์มเริ่มต้น ที่เหมาะสมในการเตรียมสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มน้ำมันสำหรับกระบวนการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อไป ซึ่งโดยมีขั้นตอนดังนี้

3.1.1 การเก็บตัวอย่าง

1) เก็บเถ้าปาล์มจากเตาต้มไอน้ำจากบริษัท ปาล์มพัฒนาชายแดนใต้ จำกัด
2) ร่อนเพื่อคัดขนาดของเถ้าโดยใช้ตะแกรงร่อนอุตสาหกรรมที่มีตะแกรง 2 แผ่น คือ mesh 10 (2 มิลลิเมตร) และ mesh 20 (0.841 มิลลิเมตร) และใช้เถ้าขนาดเล็กกว่า mesh 10 ในการทดลองต่อไป
3) วิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในเถ้าปาล์ม ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF)
4) เก็บตัวอย่างเถ้าปาล์มเดือนละ 1 ครั้ง เป็นเวลา 3 เดือน

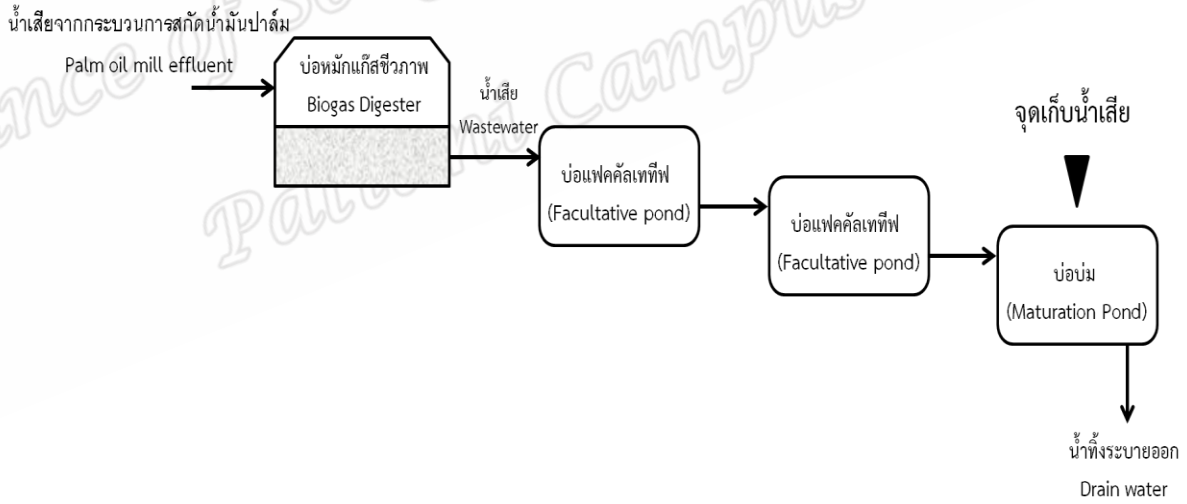
3.1.2 การละลายของเถ้าปาล์มมันโดยใช้น้ำ

1) ชั่งเถ้าปาล์มจำนวน 15 ตัวอย่างคือที่น้ำหนัก 1 2 3 4 5 6 8 10 12 14 16 20 30 50 และ 70 กรัม ใส่บีกเกอร์
2) วัด pH ของน้ำประปา

3) แล้วตวงน้ำประปาลงไป 100 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์
4) ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 30 นาที กรองด้วยตัวกรองลดความดันกระดาษกรอง GF/C
5) ส่วนที่เป็นตะกอนนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปหาค่าการละลายของเถ้าปาล์ม ดังสมการที่ 10 ส่วนที่กรองได้ นำไปวัดค่า pH และค่าสภาพความเป็นด่าง
6) เลือกสารละลายที่มีค่า pH สูงสุดและมีค่าการละลายของเถ้าปาล์มมาก ไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่ละลาย เช่น โพแทสเซียม โซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม เป็นต้น ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES)

$$\text{Dissolved ash (\%)} = \frac{\text{Weight of dissolved ash (g)}}{\text{Initial weight of ash (g)}} \times 100 \quad (10)$$

ใช้น้ำเสียจากบ่อบ่ม (Maturation pond effluent) ของระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท ปาล์มพัฒนาไบโอแก๊ส จำกัด อำเภอหนองจิก จังหวัดปัตตานี ซึ่งจุดเก็บตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.2 ในเตรียมสารละลายด่างเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำประปา



รูปที่ 3.2 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อบ่ม

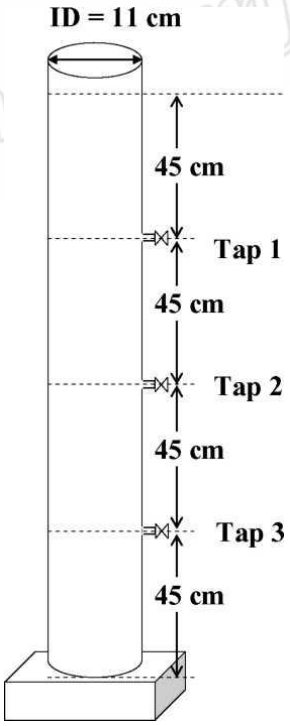
3.1.3 การตกจมของเถ้าปาล์มที่ไม่ละลายน้ำและออกแบบบ่อตกจม

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ร้อยละการกำจัดของแข็งแขวนลอย (% Suspended solid (SS) removal) กับอัตราการไหลล้น (Overflow rate) ที่เวลาตกจมต่าง ๆ ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบระบบบ่อตกจม โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1) เตรียมสารละลายด่างเถ้าปาล์มในถังประมาณ 25 ลิตร และกวนตัวอย่างน้ำเพื่อให้มีการกระจายของ SS สม่ำเสมอ เก็บตัวอย่างน้ำประมาณ 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อวัดความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยเริ่มต้น (SS_0) และวัดค่าความขุ่น

Prince of Songkla University Pattani Campus

2) เทตัวอย่างน้ำลงในคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จนถึงความสูงอ้างอิง
3) เก็บตัวอย่างน้ำประมาณ 40 ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อวัดค่าความขุ่นที่ความสูงต่าง ๆ ที่วัดจากเส้นอ้างอิงลงมา เท่ากับ 45 90 และ 135 เซนติเมตร ตามลำดับทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4) ทดลองเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยและค่าความขุ่น
5) นำผลที่ได้จากข้อ 3 มาคำนวณ %SS remaining และ %SS removed
6) นำข้อมูล %SS removed ที่ความสูงต่าง ๆ พล็อตกับเวลา
7) จากข้อ 6 พล็อตกราฟใหม่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับเวลาตกจม ที่ %SS removed ต่าง ๆ
8) กำหนดความสูงหนึ่งสำหรับถังตกจม อ่านค่า %SS removed และเวลาตกจม แล้วนำมาคำนวณ Settling velocity (VS) ต่าง ๆ
9) คำนวณ %SS removed สำหรับเวลาตกจมหนึ่ง ๆ
พล็อตกราฟระหว่าง %SS removed กับเวลาตกจมที่ได้จากข้อ 9
10) จาก VS ที่เวลาตกจมต่าง ๆ นำมาคำนวณค่า Overflow rate แล้วพล็อตระหว่าง %SS removed กับ Overflow rate
11) นำข้อมูลข้างต้นมาคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์และความสูงสำหรับใช้ออกแบบระบบบ่อตกจมสำหรับรองรับสารละลายด่างเถ้าปาล์มในอัตราการไหลต่าง ๆ



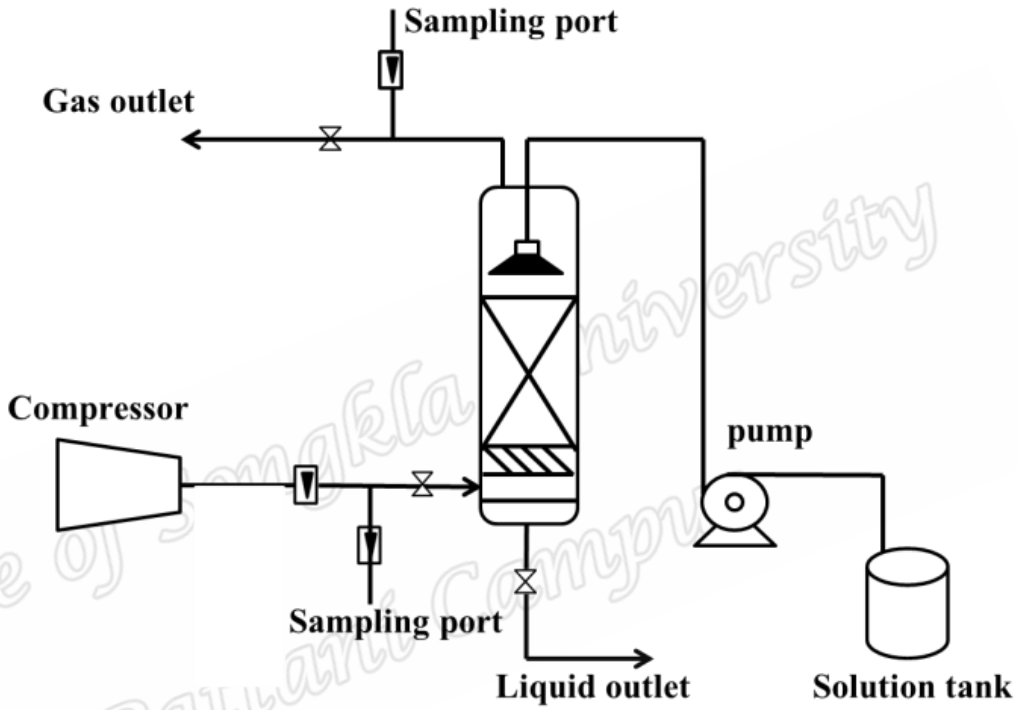
รูปที่ 3.3 Testing cylinder สำหรับศึกษาอัตราการตกจม

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.2 ศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม

3.2.1 ระบบคอลัมน์แบบบรรจุ

สร้างระบบคอลัมน์บรรจุ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อให้สามารถดำเนินการทดลองและเก็บตัวอย่างแก๊สและสารละลายด่าง



รูปที่ 3.4 ระบบการดูดซึมแบบคอลัมน์บรรจุ

รายละเอียดของระบบ

- คอลัมน์ : วัสดุ Acrylic เส้นผ่านศูนย์กลางภายในคอลัมน์ 10 เซนติเมตร และความสูงของคอลัมน์ 2 เมตร
- ตัวกลาง : วัสดุ PVC แบบ Raschig ring เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร และความสูงของ Packing layer 1.4 เมตร
- ถังแก๊สผสม CH_4:CO_2 ที่ 50:50
- ปั๊มน้ำ
- ถังพลาสติกขนาด 100 ลิตร
- โรตามิเตอร์ วัดอัตราการไหลของแก๊สและสารละลาย

3.2.2 การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สสังเคราะห์ด้วยสารละลายด่างจากเถ้าปาล์ม

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบระบบดูดซึมแก๊สที่สร้างขึ้นในหัวข้อ 3.2.1 การทดลองเริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลายด่างโดยละลายเถ้าปาล์มในน้ำประปา ตามอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองที่ 3.1.2 และรอจนสารแขวนลอยตกจมสู่ก้นภาชนะที่เตรียม ตักสารละลายด่างที่ได้ใส่ถังสารละลายโดยใช้ผ้ากรองสารแขวนลอย ก็จะสารละลายสำหรับการทดลอง ซึ่งดำเนินการต่อไปนี้

1) ป้อนสารละลายด่างจากถังเข้าด้านบนของคอลัมน์โดยใช้ปั๊ม โดยมีผ้าสำหรับกรองสารแขวนลอย วัดอัตราการไหลของสารละลายด้วยโรตามิเตอร์
2) ป้อนแก๊สผสมสังเคราะห์ CH_4:CO_2 ที่อัตราส่วน 50 : 50 วัดอัตราการไหลของแก๊สด้วยโรตามิเตอร์
3) วัดความดันลดในคอลัมน์ด้วยมานอมิเตอร์
4) เก็บตัวอย่างแก๊สทั้งขาเข้าและขาออกโดยใช้เข็มฉีดยา เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Gas chromatography-Thermal conductivity detector
5) เก็บตัวอย่างสารละลายที่ผ่านกระบวนการดูดซึมเพื่อวัดค่า pH และค่าสภาพความเป็นด่าง
6) ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้แก่ อัตราการไหลของสารละลาย 50 100 และ 150 ลิตรต่อชั่วโมง
7) คำนวณ CO_2 Removal efficiency

2.2.3 การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในในแก๊สชีวภาพด้วยสารละลายด่างจากเถ้าปาล์ม

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2.2.2 แต่ในการทดลองใช้แก๊สชีวภาพจากบ่อหมักแก๊สของบริษัท ปาล์มพัฒนาไบโอแก๊ส จำกัด อำเภอหนองจิก จังหวัดปัตตานี

3.3 ศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด

การกำจัดสารประกอบคาร์บอเนตรวมถึงสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากกระบวนการดูดซึมทางเคมีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพโดยใช้สารละลายด่างที่เตรียมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสีย โดยนำไปเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.3.1 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดด้วยน้ำเสียจากน้ำเสียจากบ่อหมัก POME

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าน้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโดที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายพุงชะโด เพื่อการใช้ปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารพิษต่างในน้ำเสีย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) เก็บตัวอย่างสาหร่ายพุงชะโดจากคูระบายน้ำของสวนสมเด็จพระศรีนครินทร์ จังหวัดปัตตานี
2) เพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดในอ่างขนาด 30 ลิตร โดยใช้น้ำเสียจากน้ำเสียจากบ่อหมัก POME 0.5% เก็บสารละลายเริ่มต้นเพื่อวิเคราะห์ค่า COD Alkalinity Phosphate

Prince of Songkla University Pattani Campus

Nitrate และ pH ชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโด 50 75 และ 100 กรัม และมีชุดควบคุมเป็นชุดที่มีเฉพาะน้ำเสียไม่มีสาหร่าย

3) สังเกตการเกิดกิ่งก้านใหม่ และชั่งน้ำหนักของสาหร่ายพุงชะโด ทุก ๆ 7 วัน เป็นเวลา 4 สัปดาห์ โดยมีการใช้กระเบื้องแผ่นใสเพื่อป้องกันน้ำเข้า
4) วัดอุณหภูมิของน้ำและความเข้มแสงด้วย Light meter ทุกวัน วันละ 2 ครั้ง คือเวลา 9.00 น. และ 15.00 น.
5) เก็บตัวอย่างน้ำทุกวันเพื่อวัดค่า pH
6) เก็บตัวอย่างน้ำ ทุก ๆ 7 วัน เพื่อวิเคราะห์ค่า COD สภาพความเป็นด่าง ไนเตรท ฟอสเฟตและ pH
7) ทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ และใช้เทคนิค Completely randomized design (CRD) ในการวางอ่างน้ำสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด

3.3.2 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม

ทำการทดลองตามขั้นตอนในหัวข้อ 2.4.1 โดยใช้น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายเป็น 50 กรัมต่อน้ำ 30 ลิตร เพาะเลี้ยงสาหร่ายในน้ำเสียจากระบบทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ น้ำเสียจากบ่อบ่มและสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม

Prince of Songkla University Pattani Campus

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพด้วยสารละลายด่าง และการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการดูดซึมด้วยการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด ซึ่งมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

3.1 ผลศึกษาการเตรียมสารละลายด่างจากเถ้าปาล์ม

3.1.1 ตัวอย่างเถ้าปาล์ม

เถ้าปาล์มเป็นผลพลอยได้จากการใช้ใยปาล์มและกะลาปาล์มเพื่อเผาเป็นเชื้อเพลิงแก่หม้อต้มไอน้ำในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เถ้าปาล์มที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเถ้าหนัก สีลักษณะเป็นผง สีเทา แสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่อนำเถ้าปาล์มมาร่อนผ่านตะแกรงมีการกระจายขนาดอนุภาคดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเถ้าปาล์มที่มีขนาดเล็กกว่า mesh 10 (2 มิลลิเมตร) ซึ่งใช้ในการทดลองขั้นต่อไปมีประมาณ 64.5% อย่างไรก็ตามการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าปาล์มอาจแตกต่างจากผลการทดลองในงานวิจัยนี้เนื่องจากการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าปาล์มนั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้ อุณหภูมิ เวลา และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ใช้ (Madhiyanon *et al.*, 2012)

a) ค้างบน mesh 10

b) ลอดผ่าน mesh 10

รูปที่ 4.1 เถ้าปาล์ม

ตารางที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาค

Particle size	Mesh No.		
	Over mesh 10	Between mesh 10-20	Under mesh 20
	>2 mm	0.841-2 mm	<0.841
Weight fraction (%)	35.5	24.21	40.29

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์ม ซึ่งพบว่าองค์ประกอบทางเคมีที่มากที่สุด คือ ซิลิคอนออกไซด์เท่ากับ 50% ตามด้วยแคลเซียมออกไซด์ โพแทสเซียมออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 14.9 13.0 6.8% ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Madhiyanon *et al.*, 2012 และ Lahijani *et al*., 2013 ซึ่งรายงานว่าพบองค์ประกอบหลักในเถ้าปาล์มเป็นออกไซด์ของซิลิกอน โพแทสเซียมและแคลเซียม ซึ่งสารเคมีบางตัวที่มีความสามารถละลายน้ำแล้วเพิ่มความเป็นด่างแก่น้ำให้เพิ่มขึ้น ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม และฟอสฟอรัส ดังนั้นไม่สามารถนำเถ้าปาล์มไปทิ้งได้เพราะจะทำให้เกิดปัญหาดินเค็ม การนำเถ้าปาล์มมาประยุกต์ใช้ในการเตรียมสารละลายด่าง ทำให้เถ้าลดฤทธิ์เป็นกลางสามารถนำไปทิ้งหรือนำไปใช้ต่อเป็นส่วนผสมของคอนกรีตและอิฐมวลเบาได้

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันโดยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

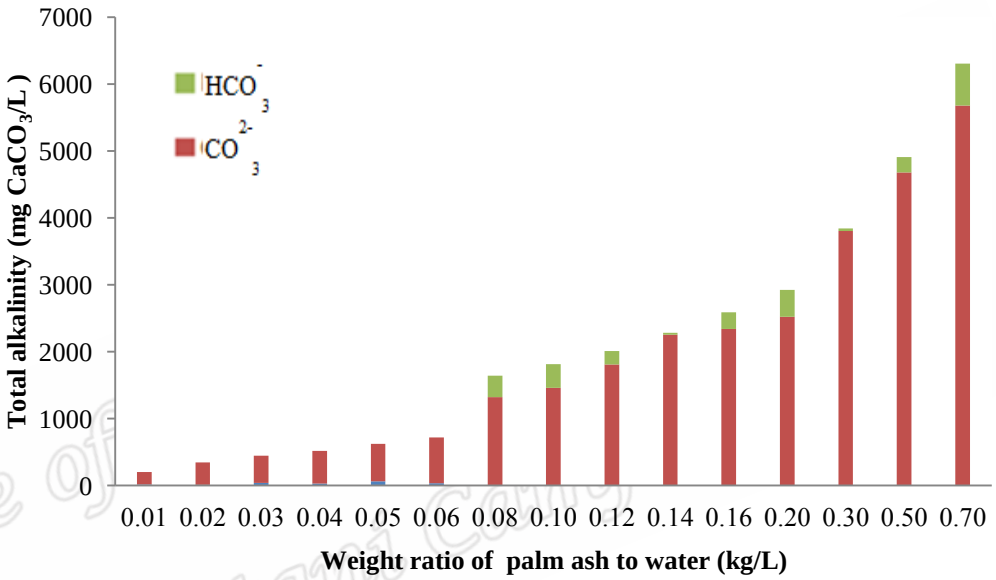
Chemical	Composition (%)
Silicon oxide (SiO_2)	50.305
Aluminum oxide (Al_2O_3)	0.871
Ferric oxide (Fe_2O_3)	1.793
Calcium oxide (CaO)	14.900
Magnesium oxide (MgO)	6.813
Sodium oxide (Na_2O)	-
Potassium oxide (K_2O)	13.092
Phosphorus oxide (P_2O_5)	4.804
Sulfur oxide (SO_3)	0.807
Manganese oxide (MnO_2)	0.311
LOI (Lack of interest)	2.30

3.1.2 การละลายของเถ้าปาล์มโดยใช้น้ำประปา

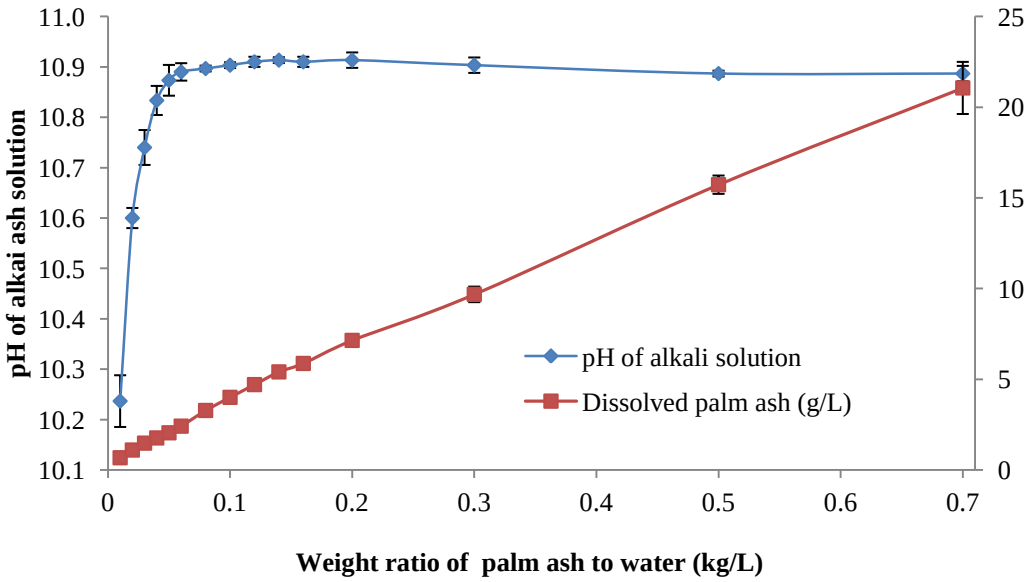
เมื่อละลายเถ้าปาล์มลงในน้ำ 100 มิลลิลิตร โดยแปรน้ำหนักของเถ้าปาล์มหรืออัตราส่วนระหว่างเถ้าปาล์มต่อน้ำ โดยอยู่ระหว่าง 0.01-0.7 กิโลกรัมต่อลิตร พบว่าค่าสภาพความเป็นด่างเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนระหว่างเถ้าปาล์มต่อน้ำ ค่าสภาพความเป็นด่างที่พบประกอบด้วยสภาพด่างเนื่องจากคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของคาร์บอเนต ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟการกระจายของอนุมูลคาร์บอเนตกับค่า pH คือถ้า pH น้อยกว่าหรือเท่ากับ 8.3 ค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดจะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต ซึ่งบางครั้งอาจจะเรียกว่าสภาพความเป็นด่างธรรมชาติ ถ้า pH มากกว่า 8.3 ค่าสภาพความเป็นด่างจะหมดจะขึ้นอยู่กับ

Prince of Songkla University Pattani Campus

คาร์บอเนต ซึ่งค่าสภาพความเป็นด่างมีผลต่อการละลายและการทำปฏิกิริยาของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ (นิพนธ์และคณิตา, 2550) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราส่วนมากขึ้นจะมีส่วนที่ละลายเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นแต่ค่า pH เริ่มคงที่ตั้งแต่อัตราส่วนของเถ้าปาล์มต่อน้ำที่ 0.05 ซึ่งมีค่า pH ประมาณ 11 (รูปที่ 4.3) ค่า pH ที่คงที่ในขณะที่ค่าสภาพความเป็นด่างเพิ่มขึ้นเพราะความจุของบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของสารละลายเถ้าปาล์ม ดังนั้นการเลือกใช้อัตราส่วนในการเตรียมสารละลายด่างนี้จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของความสะดวกและคุ้มค่าต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงตามวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.2 ค่าสภาพความเป็นด่างที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 ค่า pH และค่าการละลายของเถ้าปาล์มที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ น้ำเสียจากบ่อบ่มและน้ำเสียจากบ่อบ่มที่มีเถ้าปาล์มละลายอยู่ พบว่าโพแทสเซียมมีการละลายมากที่สุด จากในน้ำเสียที่มีอยู่เดิมเพียง 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า เป็น 6,600 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เพิ่มขึ้น ตามด้วย คลอรีน แมกนีเซียม และโซเดียม ในทางกลับกัน ซิลิกา เหล็กและกำมะถัน มีค่าลดลงเพราะเมื่อเตรียมเป็นสารละลายด่างเถ้าปาล์มแล้ว ค่า pH ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการละลายลดลงและเกิดตะกอนเกลือตะกอนไฮดรอกไซด์ของสารนั้น ๆ จึงเป็นการบำบัดน้ำเสียไปด้วย

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำเสียจากบ่อบ่มและเถ้าปาล์มละลายในน้ำเสียจากบ่อบ่ม

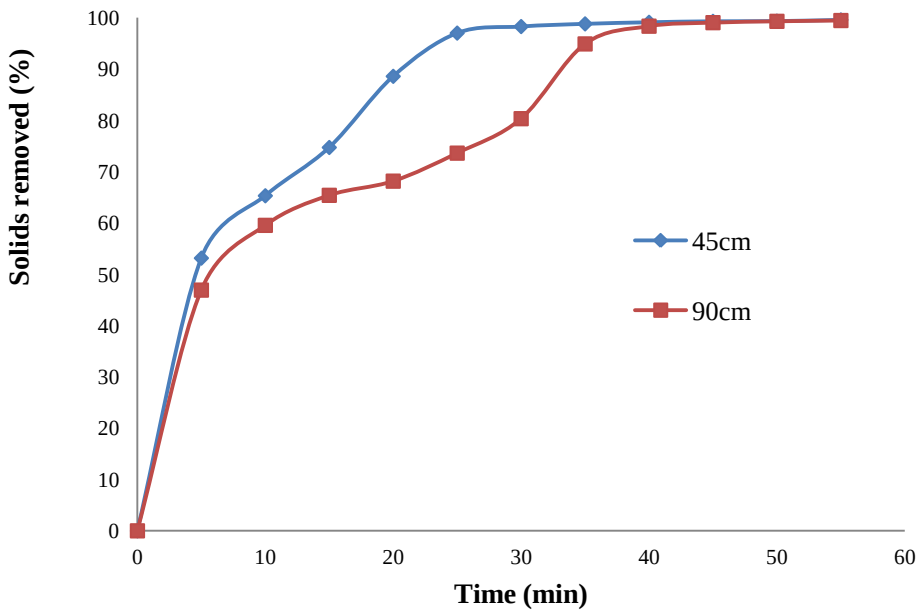
Elements	Element composition (mg/L)	
	Maturation pond effluent	Maturation pond effluent with dissolved palm ash
Si	24.60	14.80
Al	0.06	0.12
Fe	1.33	1.14
Ca	97.20	25.60
Mg	466.60	527.40
Na	61.80	97.20
K	1959.40	6624.00
P	4.69	5.24
S	26.00	19.00
Mn	0.22	0.26
Cl	1650.00	3150.00
Cu	0.02	0.39
Sr	0.30	0.12

3.1.3 การตกจมของเถ้าปาล์มที่ไม่ละลายน้ำและออกแบบบ่อตกจม

ศึกษาอัตราการไหลล้นของน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดของเถ้าปาล์มแขวนลอย เป็นการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดของแข็งแขวนลอย (%Suspended solid (SS) removal) กับอัตราการไหลล้น (Overflow rate) ที่เวลาตกตะกอนต่างๆ ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบระบบบ่อตกจม โดยที่ความลึก 45 90 และ 135 เซนติเมตร ระบบที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 10 ซึ่งพบว่า ที่ 135 เซนติเมตร ไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากส่วนที่ไม่ละลายสูงกว่าจุดที่เก็บตัวอย่าง ทำให้ได้ผลแค่ 2 จุด แสดงผลดังรูปที่ 4.4

Prince of Songkla University Pattani Campus

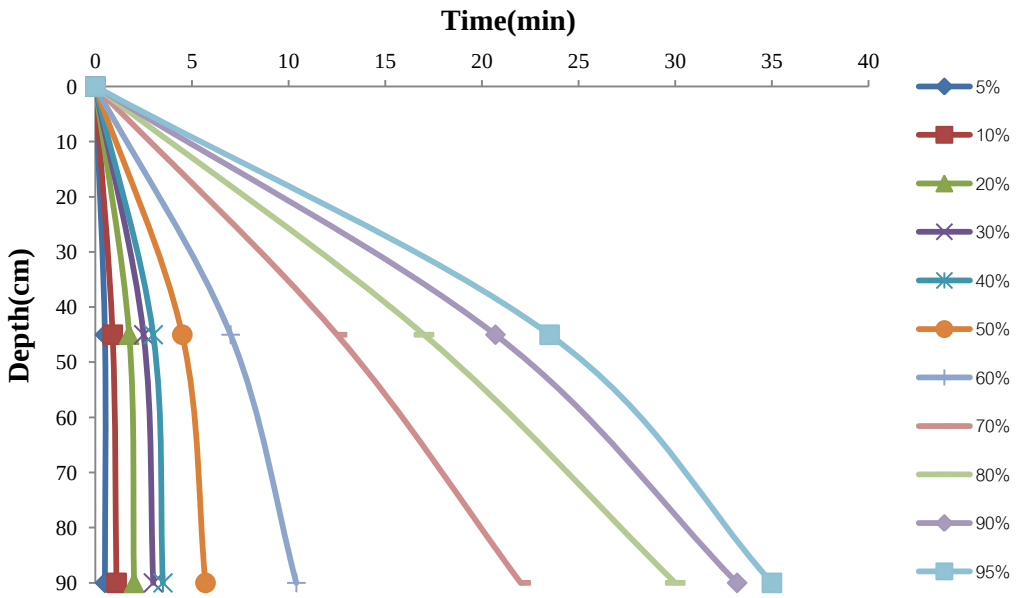
รูปที่ 4.4 การศึกษาอัตราการไหลล้นของน้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดของเถ้าปาล์มแขวนลอย



รูปที่ 4.5 ค่า %SS removed เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ที่ความลึก 45 และ 90 เซนติเมตร

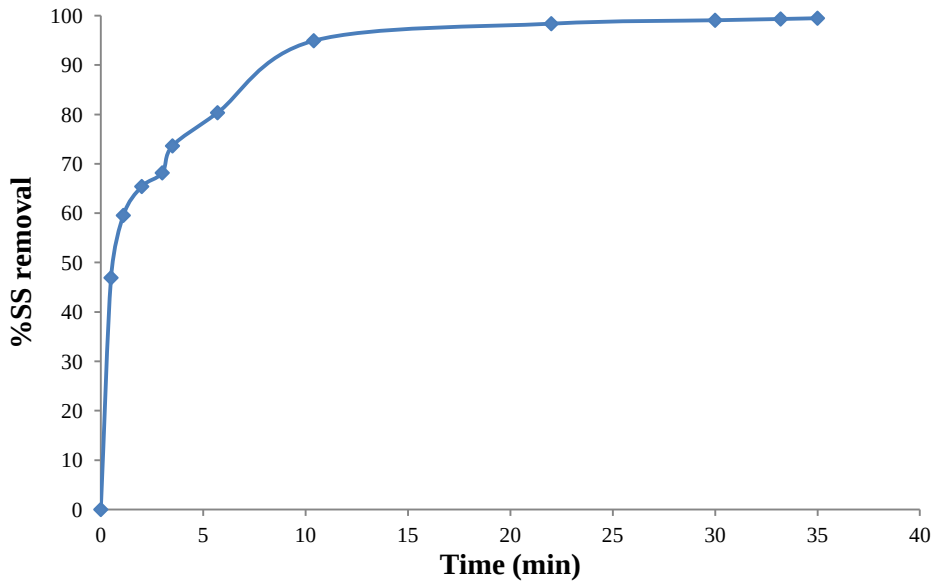
Prince of Songkla University Pattani Campus

จากข้อมูลในรูปที่ 4.5 ทำให้ทราบค่า %SS removed ที่ต้องการ คือ 5-95% ของแต่ละความลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.6



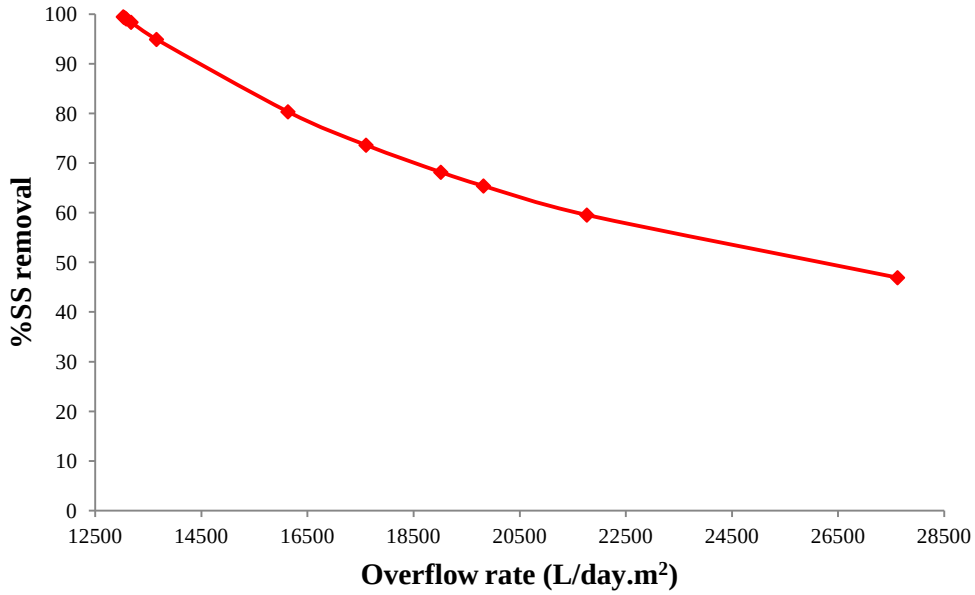
รูปที่ 4.6 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับเวลาที่ %SS removed ต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 เวลาตรงกับ 5 10 30 40 50 และ 95% ที่แยกออกมาของความลึก 45 กับ 90 เซนติเมตรและคำนวณค่าความเร็วตกจม Vs ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ นำข้อมูลมาสร้างกราฟซึ่งพล็อตระหว่าง %SS ที่ถูกแยกออกมาอย่างแท้จริง %SS removal กับเวลาที่อยู่ในคอลัมน์ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ค่าคามสัมพันธ์ระหว่าง %SS removal กับเวลา

รูปที่ 4.8 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเถ้าปาล์มแขวนลอยลดลงตามอัตราการไหลล้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากที่อัตราการไหลล้นที่เพิ่มขึ้นทำให้เถ้าปาล์มแขวนลอยมีเวลาเพื่อตกสู่ด้านล่างถังไม่เพียงพอทำให้ไหลล้นออกไปด้วย จากการทดลองพบว่าได้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด 99.46% ที่อัตราการไหลล้น 13,029 ลิตรต่อวันต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งค่านี้นำไปใช้ในการออกแบบขนาดบ่อตกจมและอัตราการป้อนสารละลายเถ้าปาล์มได้ จากอัตราการไหลล้นที่สูงสุด ทำให้ยืนยันได้ว่าเถ้าปาล์มที่ใช้เป็นเถ้าที่มีอัตราการตกจมสูง ทำให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงเพราะไม่ต้องใช้บ่อตกจมขนาดใหญ่แต่สามารถเตรียมสารละลายด่างเถ้าปาล์มได้ที่อัตราการการผลิตสูง



รูปที่ 4.8 %SS removal กับอัตราการไหลล้น

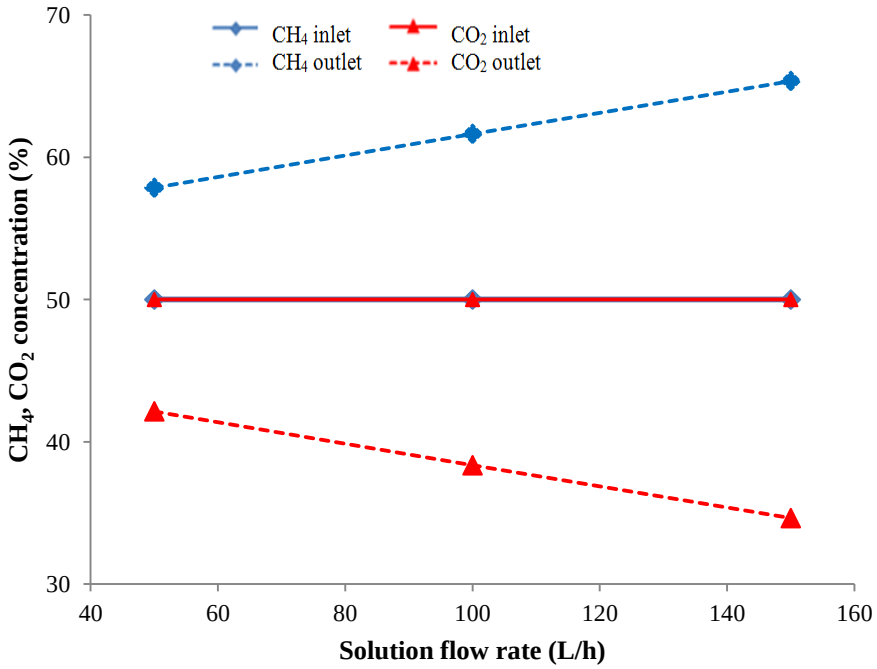
นอกจากนี้ สังเกตได้ว่ามีกากตะกอนของเถ้าปาล์ม ที่มีมวลขนาดเล็ก เบาและไม่สามารถละลายน้ำได้แขวนลอยอยู่ด้านบนของคอลัมน์ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ดังนั้นการนำไปประยุกต์ใช้จริงต้องมีการทำทางน้ำล้นเพื่อแยกเถ้าปาล์มแขวนลอยและสารละลายด่าง

รูปที่ 4.9 ส่วนด้านบนสุดของคอลัมน์หลังจากการทดลอง

3.2 ผลศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม

3.2.1 การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สสังเคราะห์ ด้วยสารละลายด่างจากเถ้าปาล์ม

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเป็นการทดสอบระบบการดูดซึมทางเคมีโดยใช้คอลัมน์บรรจุและเป็นการทดลองเบื้องต้นก่อนทดลองการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพในขั้นต่อไป การทดลองในขั้นตอนนี้พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของมีเทนเพิ่มขึ้นและปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในรูปที่ 4.10 เนื่องจากอัตราการไหลของสารละลายที่เพิ่มขึ้น จะเพิ่มมวลของสารละลายต่อการดูดซึมมวลคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสแก๊สสังเคราะห์และสามารถเพิ่มแรงขับเคลื่อนในการถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์จากกระแสแก๊สไปยังกระแสของสารละลายจึงเป็นเพิ่มโอกาสในการสัมผัสและเพิ่มโอกาสการเกิดปฏิกิริยา โดยที่อัตราการไหลของสารละลาย 150 ลิตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 31%



รูปที่ 4.10 ปริมาณของมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสเข้าและออกจากระบบดูดซึมที่อัตราการไหลของของเหลวต่างกัน (อัตราการไหลของแก๊สสังเคราะห์ = 10 ลิตรต่อนาที อัตราส่วนเถ้า 0.03 กิโลกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร)

3.2.2 การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในในแก๊สชีวภาพด้วยสารละลายด่างจากเถ้าปาล์ม

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพด้วยสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มดำเนินการโดยใช้แก๊สชีวภาพจากบ่อหมักแก๊สในสถานที่จริง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งใช้สภาวะในการทดลองดังตารางที่ 4.5

รูปที่ 4.11 ระบบกระบวนการดูดซึมสำหรับทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ ณ บริษัท ปาล์มพัฒนา ไบโอแก๊สจำกัด

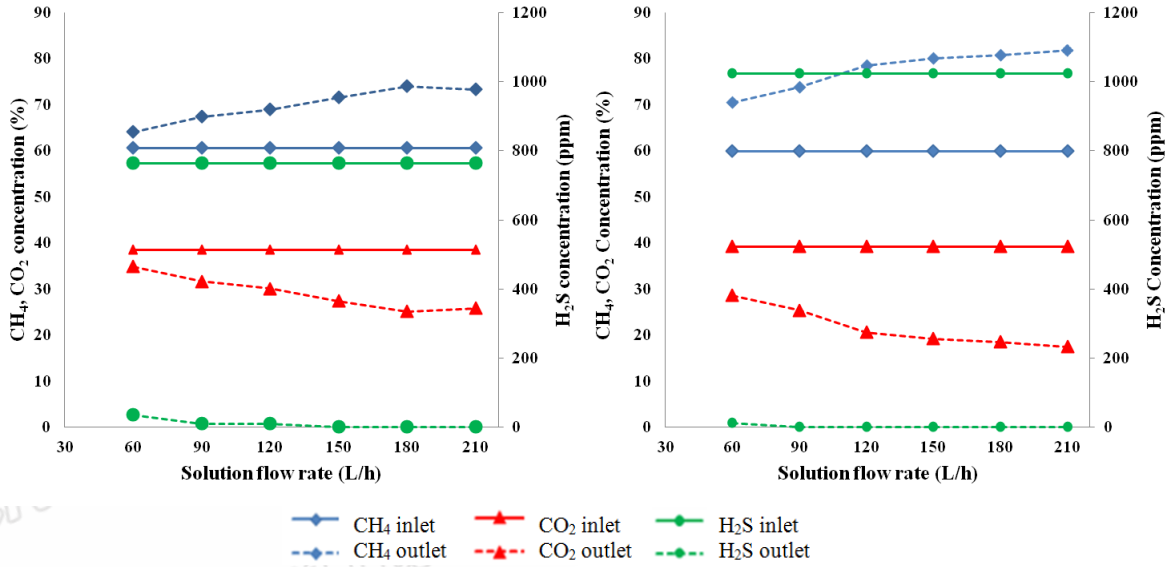
ตารางที่ 4.4 สภาวะในศึกษาการกำจัด CO_2 และ H_2S ด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม

Parameter	Conditions
Weight ratio of ash to liquid (kg/L)	0.3-0.7
Concentration of biogas	35-39% CO_2, 800-1200 ppm H_2S, 55-60% CH_4
Flow rate of gas (L/min)	5
Flow rate of solution (L/h)	60-210

โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำเสียบ่อบ่มและน้ำเสียบ่อบ่มละลายเถ้าปาล์ม ที่ใช้อัตราส่วน 0.3-0.7 กิโลกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร โดยแปรอัตราการไหลของของเหลวระหว่าง 60-210 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊ส 5 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.12 กราฟทั้งสองมีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่แตกต่างเนื่องจากระบบจริงไม่สามารถควบคุมปริมาณที่ป้อนสู่ระบบได้ แต่อย่างไรก็ตามไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกกำจัดได้หมดทั้งสองกรณีที่ใช้น้ำเสียบ่อบ่มและน้ำเสียบ่อบ่มละลายเถ้าปาล์ม โดยการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้ได้ 100% ต้องใช้อัตราการไหลของน้ำเสียจากบ่อบ่มอย่างน้อย 210 ลิตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ใช้อัตราการไหลของสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มเพียง 90 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัด

เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของสารที่มีความสามารถจับกับคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการไหล ใช้น้ำเสียบ่อบ่มและน้ำเสียบ่อบ่มละลายเถ้าปาล์มที่อัตราการไหลของของเหลวสูงสุด 210 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 33% และ 53% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้อัตราการไหลของของเหลว 120-210 ลิตรต่อชั่วโมง ทำค่าสภาพด่างในรูปของคาร์บอเนตในตอนต้นนั้นเปลี่ยนไปในรูปของไบคาร์บอเนตได้หมด ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ดังนั้นได้ว่าการละลายเถ้าปาล์มลงไปจะทำให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น เพราะมีการเพิ่มปริมาณของสารเคมีที่ได้กล่าวมาข้างต้น



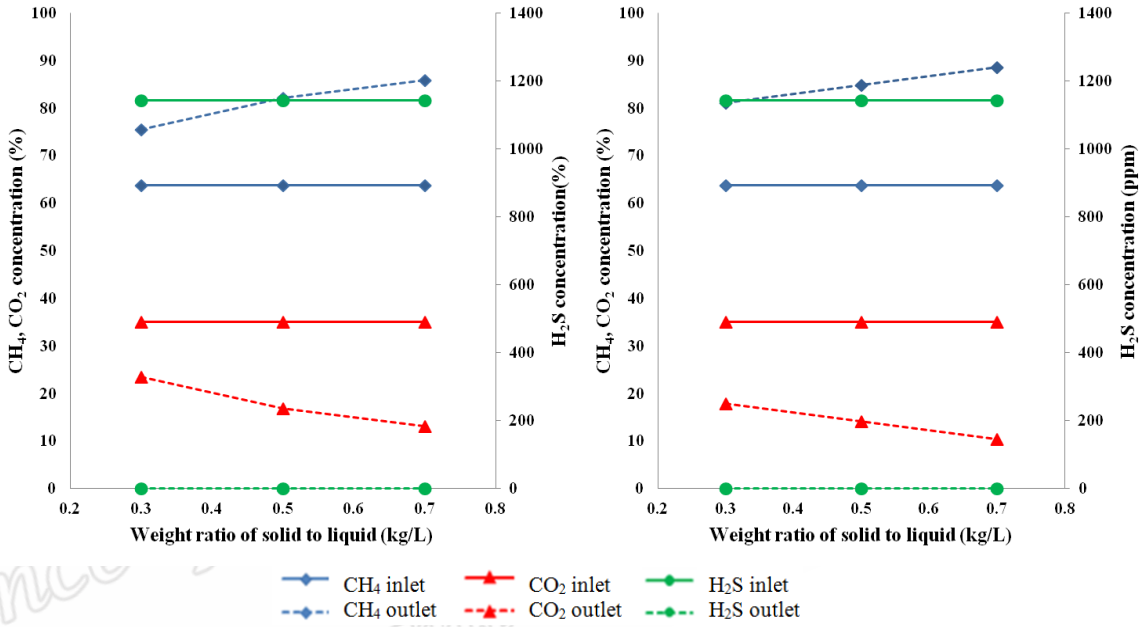
(a) Maturation pond effluent (b) Maturation pond effluent + ash 0.3 kg/L

รูปที่ 4.12 ปริมาณของมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในกระแสเข้าและออกจากระบบดูดซึมที่อัตราการไหลของของเหลวต่างกัน (อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ = 5 ลิตรต่อนาที) (a) น้ำเสียบ่อบ่ม (b) น้ำเสียบ่อบ่มละลายเถ้าปาล์ม อัตราส่วน 0.3 กิโลกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

ตารางที่ 4.5 ค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียจากบ่อบ่มละลายเถ้าปาล์ม โดยใช้อัตราส่วน 0.3 กิโลกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

Conditions	pH	Total alkalinity (mg/L $CaCO_3$)	Approximated concentration (mg/L $CaCO_3$)		
			OH^-	CO^{2-}_3	HCO^-_3
Initial	9.3	5480	-	1880	3600
120 L/h	8.2	5480	-	-	5480

จากผลการทดลองดังกล่าว จึงเลือกอัตราการไหลของของเหลวที่ 120 ลิตรต่อชั่วโมงเป็นอัตราการไหลสูงสุดในการทดลองต่อไป โดยแปรอัตราส่วนของเถ้าปาล์ม 0.3-0.7 ต่อน้ำ 1 ลิตร ผลการทดลองพบว่า ที่ทุกสภาวะสามารถกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 100% และ ที่อัตราส่วนของเถ้าปาล์ม 0.7 ต่อน้ำ 1 ลิตร มีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ 63% ที่อัตราการไหลของของเหลว 60 ลิตรต่อชั่วโมงและ 70% ที่อัตราการไหลของของเหลว 120 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.13



(a) Solution flow rate 60 L/h (b) Solution flow rate 120 L/h

รูปที่ 4.13 ปริมาณของมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในกระแสเข้าและออกจากระบบดูดซึมที่อัตราส่วนของเถ้าปาล์มต่อน้ำเสียจากบ่อบ่มต่างกัน (อัตราการไหลของแก๊สชีวภาพ = 5 ลิตรต่อนาที) (a) ที่อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับ 60 ลิตรต่อชั่วโมง (b) ที่อัตราการไหลของของเหลวเท่ากับ 120 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียจากบ่อบ่มละลายด่างเถ้าปาล์ม พบว่าที่อัตราการไหลของของเหลวและอัตราส่วนเถ้าปาล์มต่อน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำเสียที่ออกจากระบบยังมีสภาพความเป็นด่างในรูปของคาร์บอเนตเหลืออยู่ซึ่งสามารถหมุนเวียนสารละลายกลับมาใช้ใหม่ได้

ตารางที่ 4.6 ค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำเสียจากบ่อบ่มละลายด่างเถ้าปาล์ม

Weight ratio of palm ash to water	Inlet/Outlet solution at different flow rate	pH	Total alkalinity (mg/L $CaCO_3$)	Approximated concentration (mg $CaCO_3$/L)		
				OH^-	CO^{2-}_3	HCO^-_3
0.3	Inlet	8.92	6,620	-	1,680	4,940
	60 L/h	7.79	6,620	-	-	6,620
	120 L/h	8.1	6,620	-	-	6,620
0.5	Inlet	9.23	7,480	-	3,040	4,440
	60 L/h	8.3	7,480	-	-	7,480
	120 L/h	8.58	7,480	-	960	6,520
0.7	Inlet	9.26	7,520	-	4,040	3,480
	60 L/h	8.53	7,520	-	760	6,760
	120 L/h	8.70	7,520	-	1,560	5,960

กระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่อิงตามทฤษฎีเยื่อ 2 ชั้น การถ่ายโอนมวลคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ไปยังผิวหน้าของของเหลวจะถ่ายโอนมวลต่อไปยังเฟสของเหลว ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลและสมดุลมวล (McCabe & Smith, 1967; Perry, 1973) แสดงสมการ (11)

$$(Y_1-Y_2) = \frac{L}{G}(X_2-X_1) \qquad (11)$$

เมื่อ

G = อัตราการไหลของแก๊ส

L = อัตราการไหลของของเหลว

X_1 = เศษส่วนโมลของตัวละลายเริ่มต้น

X_2 = เศษส่วนโมลของตัวละลายสุดท้าย

Y_1 = เศษส่วนโมลของตัวละลายในแก๊สเริ่มต้น

Y_2 = เศษส่วนโมลของตัวละลายในแก๊สสุดท้าย

ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดหรือการเพิ่มการถ่ายโอนมวลจากเฟสแก๊สไปยังเฟสของเหลวนั้น สามารถทำได้โดยการเพิ่ม L/G ratio ได้อีกทางหนึ่ง อย่างไรก็ตามการเพิ่ม L/G ratio จะทำให้เกิดความดันลดตกคร่อมระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งต้องใช้พัดลมดูดแก๊สกำลังสูงขึ้นนั้นเอง

นอกจากนี้ The overall height of the gas film transfer unit (H_{OG}) เป็นอีกค่าหนึ่งที่ใช้บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการดูดซึมได้ ค่า H_{OG} ยิ่งน้อยแสดงว่าประสิทธิภาพการดูดซึมยิ่งดี H_{OG} เป็นฟังก์ชันอยู่กับค่า ความสูงของชั้นตัวกลางและ the overall number gas transfer unit (N_{OG}) ดังสมการ (12) (Rafson and Harold, 1998)

$$H_{OG} = h/N_{OG} \quad (12)$$

เมื่อ h คือ ความสูงของชั้นตัวกลาง และ $N_{OG} = ln\left(\frac{[concentration]_{inlet}}{[concentration]_{outlet}}\right)$

ค่า H_{OG} ยิ่งต่ำ แสดงว่า ประสิทธิภาพยิ่งสูงเพราะไม่จำเป็นต้องใช้ความสูงของชั้นตัวกลางในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ความดันลดที่เกิดขึ้นในระบบก็จะต่ำลง ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่า H_{OG} ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ซึ่งพบว่าค่า H_{OG} ของคาร์บอนไดออกไซด์จากงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่างานวิจัยอื่น ทั้งนี้สามารถลดค่า H_{OG} ได้โดยการลดอัตราการไหลของแก๊สขาเข้า ลดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย การเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายส่งผลต่อค่า L/G ratio ให้สูงขึ้น จะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้ ค่า L/G ratio ยังน้อยกว่างานวิจัยอื่น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากราคาของสารละลายดูดซึมที่ใช้การใช้สารละลายเถ้าปาล์มไม่มีค่าใช้จ่ายในเรื่องนี้ สำหรับการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้นในงานวิจัยนี้สามารถกำจัดออกจากแก๊สชีวภาพได้ทั้งหมด

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์กับงานวิจัยอื่น

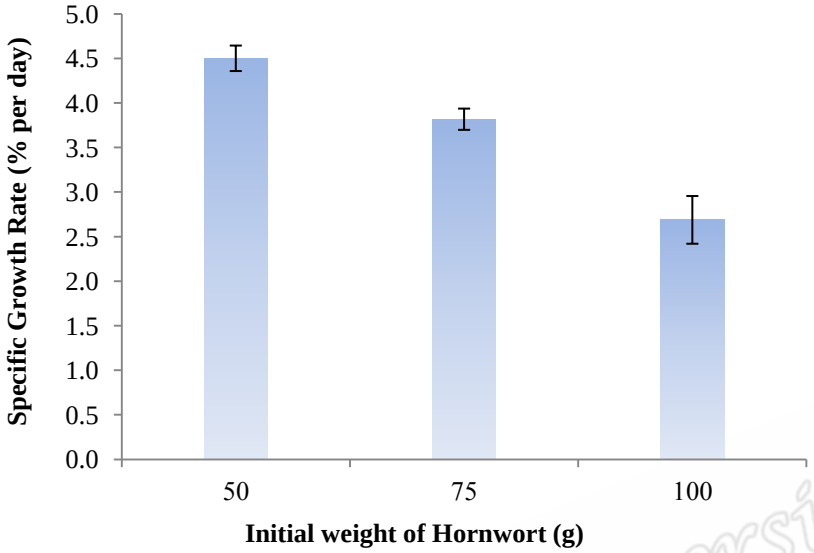
Reference	Absorbents	L/G ratio (L/m^3)	Concentration		Packed bed height (m)	H_{OG} (m)
			Inlet	Outlet		
CO_2						
Zeng *et al*., 2013	Aqueous NH_3 4.54M (77 g/l)	400	15.0%	0.6%	0.6	0.19
Tippayawong *et al*., 2010	NaOH0.1 M (4 g/L)	1,000	46.8%	3.2%	0.7	0.26
	$Ca(OH)_2$0.1 M (0.7 g/L)	1,000	46.8%	4.0%	0.7	0.28
	MEA 0.1 M (6.1 g/L)	1,000	46.8%	1.3%	0.7	0.20
This work	Ash solution (30 g/L)	200	35%	10%	1.4	0.89
H_2S						
Tippayawong *et al*., 2010	NaOH0.1 M (4 g/L)	1,000	2,150 ppm	0	0.7	
	$Ca(OH)_2$0.1 M (0.7 g/L)	1,000	2,150 ppm	0	0.7	
	MEA 0.1 M (6.1 g/L)	1,000	2,150 ppm	0	0.7	
Kasikamphaiboon *et al*., 2013	3.0 M (180 g/L)	80	200 ppm	140 ppm	0.7	0.51
This work	Ash solution (30 g/L)	200	1150 ppm	0	1.4	

3.3 ผลศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด

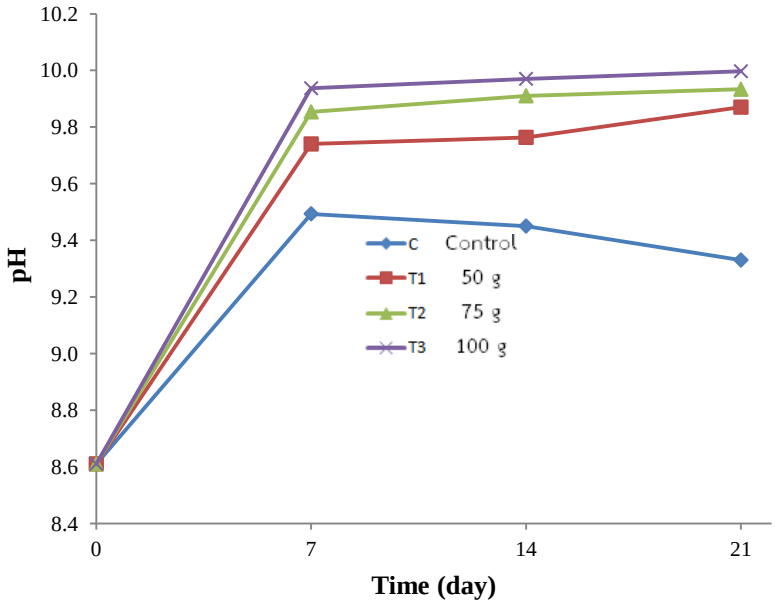
3.3.1 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดด้วยน้ำเสียจากน้ำเสียจากบ่อหมัก POME

จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดในระบบเปิดอิงแบบธรรมชาติ ไม่สามารถควบคุมความเข้มแสงที่สาหร่ายพุงชะโดได้รับและอุณหภูมิของน้ำในแต่ละวันได้ โดยความเข้มแสงเฉลี่ยในช่วงกลางวันเท่ากับ 20,000-30,000 ลักซ์ พื้นที่ผิวรับแสงเท่ากับ 2,525 ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิในช่วงกลางวัน 29-30 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดเป็นเวลา 3 สัปดาห์ พบว่าเมื่อชั่งน้ำหนักสุดท้ายแล้วนำมาคำนวณอัตราการเจริญเติบโตเฉพาะ พบว่าที่น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโด 50 กรัม มีอัตราการเจริญเติบโตที่ดีที่สุด มีค่าเท่า 4.5% ต่อวัน และที่ 100 กรัม มีอัตราการเจริญเติบโตน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ค่า pH ของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดมีค่า pH ที่สูงขึ้นในทุก ๆ ชุดตัวอย่างเนื่องจากพืชใช้คาร์บอนในการสังเคราะห์แสงในตอนกลางวันทำให้ค่า pH สูงขึ้น และในชุดควบคุมมีค่า pH สูงขึ้นใน 1 อาทิตย์แรก หลังจากนั้นค่า pH ค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง คาดว่ามีการเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบของการเพาะเลี้ยง เกิดการสร้างกรดของจุลินทรีย์เหล่านั้น ดังแสดงรูปที่ 4.15

Prince of Songkla University Pattani Campus



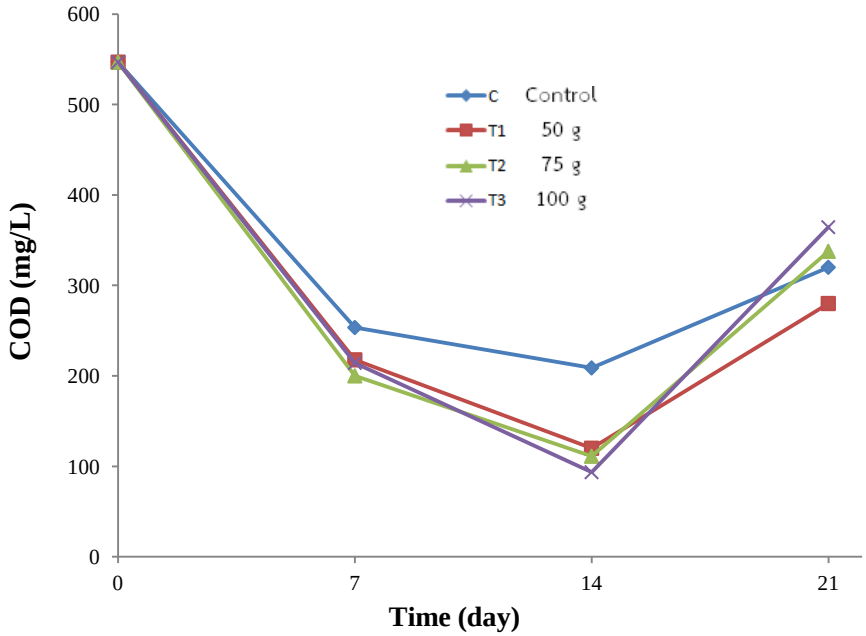
รูปที่ 4.14 อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายพุงชะโดในน้ำเสีย 30 ลิตร ที่น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโดที่แตกต่างกัน เมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงผ่านไป 21 วัน



รูปที่ 4.15 ค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดที่น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโดที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.16 พบว่า ในช่วง 1 สัปดาห์แรก COD ลดลงและมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อหลังสัปดาห์ที่ 2 ค่า COD มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเน่าเปื่อยของสาหร่ายพุงชะโดเพราะสารอาหารโมเลกุลเล็กจะถูกนำสาหร่ายพุงชะโดนำไปใช้ได้ง่ายกว่าโมเลกุลใหญ่ เมื่อสารอาหารโมเลกุลเล็กเหลือน้อยและไม่

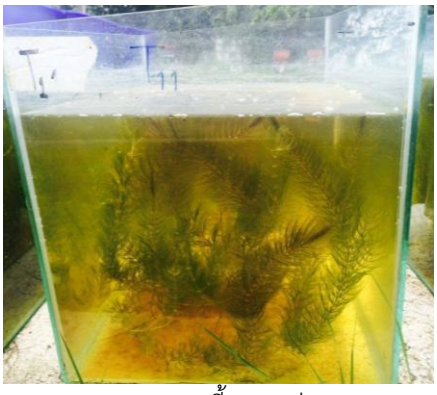
เพียงพอต่อการเจริญเติบโต ทำให้เซลล์บางส่วนขาดสารอาหารและเน่าเปื่อยในที่สุด มวลของสาหร่ายพุงชะโดต่อพื้นที่มีผลต่อการสังเคราะห์แสงเช่นกัน ยิ่งมีมวลมาก การสังเคราะห์จะน้อยเนื่องจากมวลและการกระจายมวลของสาหร่ายพุงชะโดจะปิดกั้นแสงที่ส่งผ่าน ดังนั้นน้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโด 50 กรัม เหมาะแก่การเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพต่อไป ประสิทธิภาพในการกำจัด COD เท่ากับ 80% สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Sawanya (2003) ซึ่งศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากบ่อแก๊สชีวภาพของฟาร์มสุกรโดยใช้สาหร่ายพุงชะโด ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าสาหร่ายพุงชะโดสามารถลดปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทกับฟอสเฟตได้ 76% และ 100%



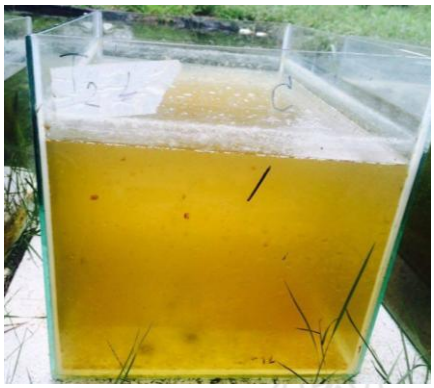
รูปที่ 4.16 ค่า COD ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดที่น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโดที่แตกต่างกัน

น้ำเสียหลังการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดมีสีใสขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับสีของน้ำเริ่มต้นที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดและมีตะกอนที่ก้นของภาชนะ ส่วนในชุดควบคุมเกิดการเน่าเสีย เนื่องจากมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งสาหร่ายสามารถกำจัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรม โดยการดูดซับสีเหล่านั้นภายใต้สภาวะที่มีแสงโดยเปลี่ยนโมเลกุล ที่มีสีเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี (Dilek *et al,* 1999) เช่น เดียวกับสาหร่ายช่อพริกไทย (Caulerpa lentillifera) ที่มีความสามารถดูดซับสีพื้นฐานจากอุตสาหกรรมฟอกสีย้อมได้ โดยสมดุลของการดูดซับเป็นไปตามทั้งโมเดลของ Langumuir และ Freundlich (พิมล, 2549) นอกจากนี้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและกลุ่มสาหร่ายสีเขียวมี ประสิทธิภาพกำจัดสีของโรงงานผลิตสุราที่ใช้วัตถุดิบเป็นกากน้ำตาล โดยมีปัจจัยทั้งทางด้านปริมาณความเข้มข้นของสารอาหาร ปริมาณความเข้มแสง ปริมาณความเข้มข้นของเซลล์เริ่มต้น

รวมทั้งค่าความเป็นกรดด่างและเมื่อนำปฏิกิริยาเฟนตันและโอโซนมาบำบัดร่วมกับการใช้สาหร่ายทั้งสองสายพันธ์ พบว่าสาหร่ายทั้งสองสามารถกำจัดสีได้เพิ่มขึ้น (ชื่นจิต, 2542)



a) ชุดการทดลองเลี้ยงสาหร่าย

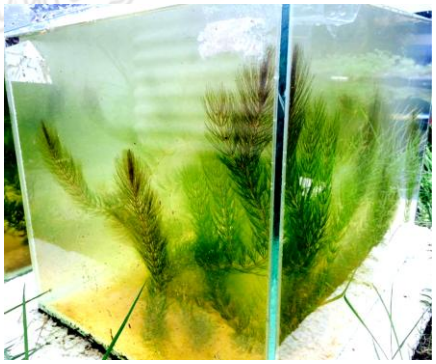


b) ชุดควบคุม (ไม่มีสาหร่าย)

รูปที่ 4.17 ลักษณะทางกายภาพของน้ำในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด

ในช่วงแรกสาหร่ายพุงชะโดจะลอยอยู่เหนือน้ำและมีการเน่าเปื่อยของลำต้นบางส่วน เนื่องจากการชั่งน้ำหนักอาจจะทำให้ลำต้นมีการบอบช้ำ แต่เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าสาหร่ายพุงชะโด มีการปรับตัวจมลงใต้น้ำ โดยส่วนยอดพุ่งขึ้นบน ต้านทานแรงโน้มถ่วงและมีการแตกยอดใหม่ ซึ่งคาดว่าอยู่ในระยะ Lag phase และกำลังเข้าสู่ระยะ Logarithm phase ดังแสดงในรูปที่ 4.18

a) ลักษณะของสาหร่ายพุงชะโด 1 สัปดาห์แรก

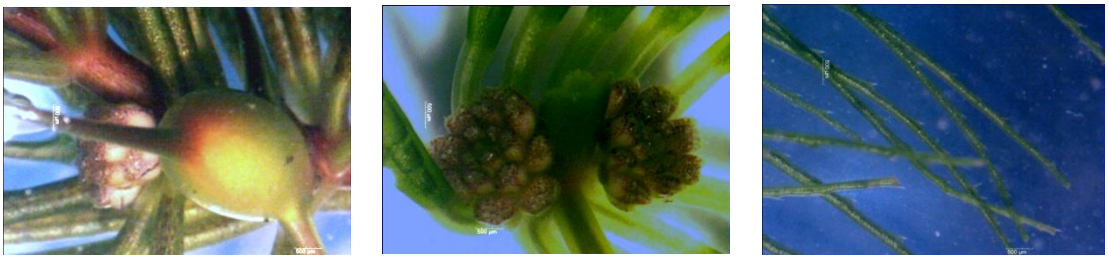


b) ลักษณะของสาหร่ายพุงชะโด 3 สัปดาห์

รูปที่ 4.18 การจัดเรียงลำต้นของสาหร่ายพุงชะโด

จากการถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ของสาหร่ายพุงชะโดในรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่า ผลมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีหนามเป็นแฉกแยกกันสามแฉก ดอกสามารถแยกเพศ (ในภาพยังไม่ระบุได้ว่าเพศใด) ส่วนปลาย ใบ รอบ ๆ ใบจะมีหนาม

Prince of Songkla University Pattani Campus



a) ลักษณะผลของสาหร่ายพุงชะโด b) ลักษณะดอกของสาหร่ายพุงชะโด c) ลักษณะปลายใบของสาหร่ายพุงชะโด

รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายของสาหร่ายพุงชะโดด้วยกล้องจุลทรรศน์

3.3.2 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดโดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม

จากการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดในระบบเปิดอิงแบบธรรมชาติ ไม่สามารถควบคุมความเข้มแสงที่สาหร่ายพุงชะโดได้รับและอุณหภูมิของน้ำในแต่ละวันได้ โดยความเข้มแสงเฉลี่ยในช่วงกลางวันเท่ากับ 20,000-102,000 ลักซ์ พื้นที่ผิวรับแสงเท่ากับ 2,525 ลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิในช่วงกลางวัน 29-31 องศาเซลเซียส โดยน้ำเสียทั้งหมดมีค่า COD ที่สูงมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.8

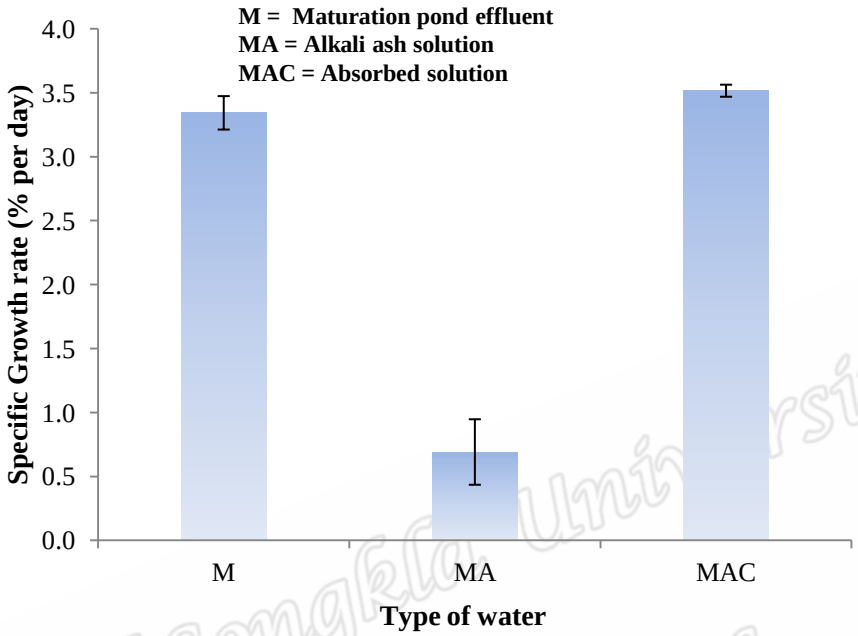
ตารางที่ 4.8 ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด

Parameters	Palm oil mill effluent	Maturation pond effluent	Alkali ash solution	Absorbed solution
COD (mg/L)	78,290	8,000	8,800	6,000
pH	4.14	8.3	9.3	8.3
Total alkalinity (mg $CaCO_3$/L)	-	5,080	6,240	5,480
NO_3^- (mg/L)	-	9.95±0.08	14.3±0.16	10±0.37
PO_4^{3-} (mg/L)	-	21.02±0.08	21.1±0.12	20±0.14

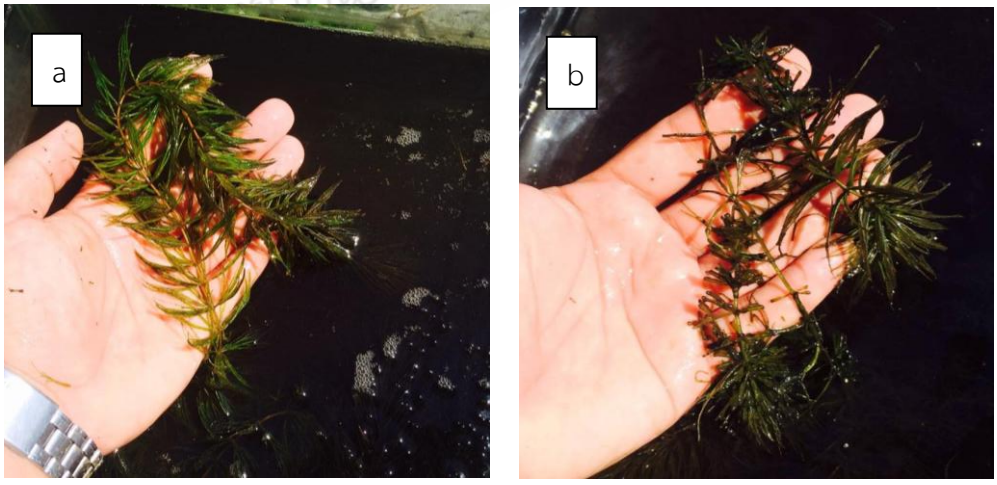
ดังนั้นต้องเจือจางให้ COD อยู่ในค่าที่เหมาะสม อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายพุงชะโดแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าการใช้น้ำเสียจากระบบทำความสะอาดแก๊สชีวภาพด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มมีการเจริญเติบโตที่ดีที่สุดเนื่องจากมีสารอาหารจากการละลายของเถ้าปาล์มและมีสารประกอบไบคาร์บอเนตจากการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีอัตราการเจริญเติบโตเฉพาะที่ 3.51% ต่อวัน และสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม มีอัตราการเจริญเติบโตเฉพาะน้อยที่สุด 0.69% ต่อวัน เนื่องจากค่า pH เริ่มต้นของสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มสูงเกินไป จึงเป็นผลให้สาหร่ายพุงชะโดมีการเน่าเสียในช่วงสัปดาห์แรก ดังแสดงรูปที่ 4.21 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไป สาหร่ายพุงชะโดมีการปรับตัวกับสภาพของ

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มได้ เกิดการงอกของกิ่งก้านสาขาใหม่ แสดงในรูปที่ 4.22 จากผลการทดลองจึงกล่าวได้ว่าสาหร่ายพุงชะโดสามารถเติบโตได้ในช่วง pH ที่กว้าง



รูปที่ 4.20 อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายพุงชะโดในน้ำเสีย 30 ลิตร ที่น้ำเสียชนิดต่าง ๆ เมื่อเวลาการเพาะเลี้ยงผ่านไป 21 วัน



a) เพาะเลี้ยงในน้ำเสียจากระบบทำความสะอาดแก๊สชีวภาพด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม

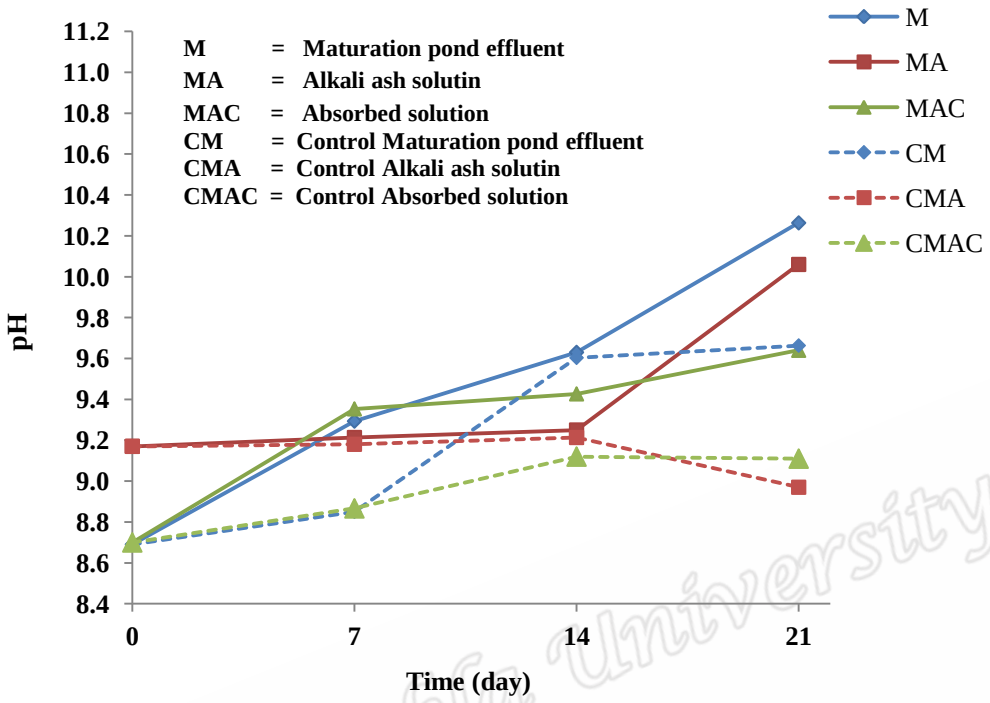
b) เพาะเลี้ยงในสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม

รูปที่ 4.21 ลักษณะของสาหร่ายพุงชะโดโดยระยะเวลาเพาะเลี้ยง 1 สัปดาห์

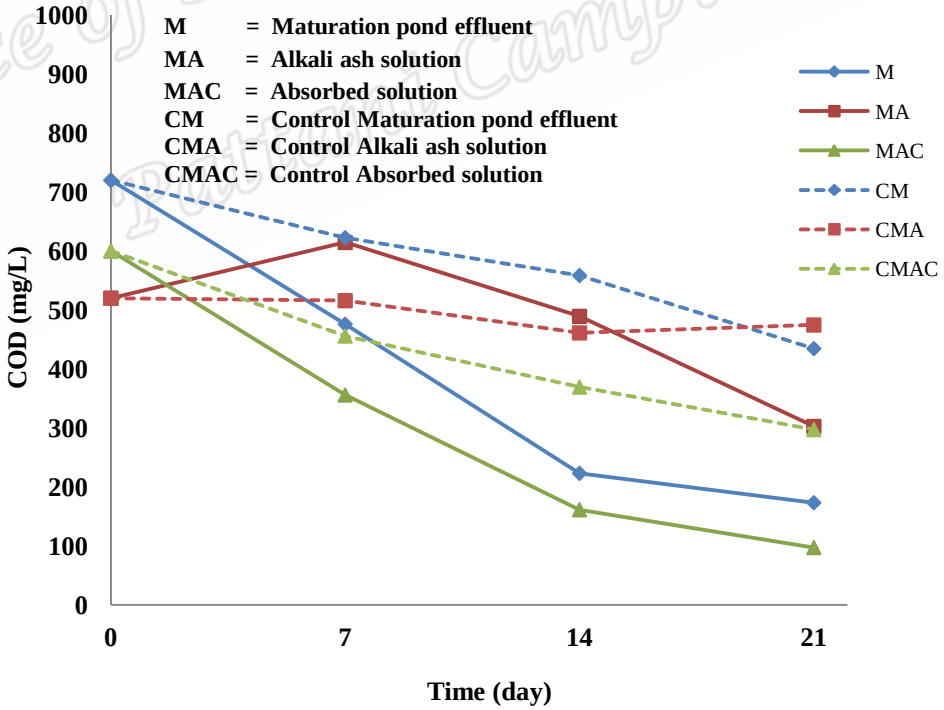
Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.22 ลักษณะของสาหร่ายพุงชะโดในสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มที่ระยะเวลาการเพาะเลี้ยง 3 สัปดาห์

รูปที่ 4.23 แสดงค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด พบว่าค่า pH ของน้ำเสียจากบ่อบ่มกับน้ำเสียจากระบบทำความสะอาดแก๊สชีวภาพด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม ที่มีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ การหายใจและการสังเคราะห์แสงเป็นสาเหตุให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกลางวัน พืชน้ำใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสง ส่วนการหายใจ พืชน้ำจะปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่น้ำ อย่างไรก็ตามอัตราการใช้คาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า ค่า pH ของน้ำจึงสูงขึ้น ค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปยังขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นด่างทั้งหมดและอัตราการสังเคราะห์อัตราการหายใจของพืชน้ำอีกด้วย ส่วนในชุดควบคุมนั้น เมื่อผ่านไป 2 สัปดาห์ pH เริ่มมีค่าคงที่ เนื่องจากจุลินทรีย์ในชุดควบคุมย่อยสารอาหารและเกิดการผลิตกรดหลังกระบวนการย่อย ลักษณะทางกายภาพของน้ำในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เปลี่ยนจากสีน้ำตาลเข้มเป็นสีน้ำตาลอ่อนและใสขึ้น ส่วนชุดควบคุมเนื่องจากเกิดการย่อยสารอาหารของจุลินทรีย์ จึงทำให้เกิดฟองและแผ่นฟิล์มบนผิวหน้าของน้ำพร้อมกับส่งกลิ่นเหม็นเน่า สำหรับค่า pH ของสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม ชุดที่เพาะเลี้ยงสาหร่ายจะเห็นได้ว่าใน 2 สัปดาห์แรก pH ค่อนข้างจะคงที่และค่อยเพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 3 ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า COD (รูปที่ 4.24) ที่ลดลงในสัปดาห์ที่ 3 เช่นกัน แสดงให้เห็นว่า ค่า pH เริ่มต้น มีผลต่อการเจริญเติบโตเป็นอย่างมาก pH ที่สูงหรือต่ำเกินไปจะมีผลต่อการลำเลียงสารอาหารของพืชน้ำ



รูปที่ 4.23 ค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของสาหร่ายพุงชะโดในน้ำเสีย 30 ลิตร ที่น้ำเสียชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 4.24 ค่า COD ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของสาหร่ายพุงชะโดในน้ำเสีย 30 ลิตร ที่น้ำเสียชนิดต่าง ๆ

Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.24 แสดงค่า COD ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด จะเห็นได้ว่าน้ำเสียจากบ่อบ่มกับน้ำเสียจากระบบทำความสะอาดแก๊สชีวภาพด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มที่มีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด ค่า COD ลดลงเรื่อย ๆ มีประสิทธิภาพการกำจัด COD เท่ากับ 76% และ 84% ตามลำดับ เนื่องจากพืชนำสารอาหารไปใช้ในการสังเคราะห์แสงดังสมการ (13)

$$CO_2 + H_2O + PO_4^{3-} + NO_3^- \longrightarrow \text{Carbohydrate} + \text{protein} + O_2 \qquad (13)$$

จะเห็นได้ว่าไนเตรทและฟอสเฟตเป็นสารอาหารที่พืชสามารถนำไปใช้ ซึ่งตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 จะแสดงสารอาหารที่ลดหายไป พบว่า สาหร่ายพุงชะโดมีการดึงไนเตรทและฟอสเฟตไปใช้ 76.21% และ 52.95% ตามลำดับ ในน้ำเสียที่ผ่านระบบทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ ส่วนในชุดควบคุมปริมาณไนเตรทและฟอสเฟตลดลง 66.15% และ 7.02%

ตารางที่ 4.9 ปริมาณไนเตรทในของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์

Type of Wastewater	NO_3^- concentration (mg/L)		
	Initial	After 3 weeks of Hornwort cultivation	After 3 weeks of without Hornwort cultivation
Maturation pond effluent	0.685±0.006	0.289±0.057	0.358±0.019
Alkali ash solution	0.894±0.018	0.222±0.029	0.267±0.039
Absorbed solution	0.80±0.030	0.190±0.028	0.271±0.022

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 4.10 ปริมาณฟอสเฟตของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์

Type of Wastewater	PO_4^{3-} concentration (mg/L)		
	Initial	After 3 weeks of Hornwort cultivation	After 3 weeks of without Hornwort cultivation
Maturation pond effluent	1.446±0.006	0.088±0.003	0.763±0.033
Alkali ash solution	1.319±0.008	0.588±0.033	1.174±0.022
Absorbed solution	1.369±0.010	0.644±0.026	1.273±0.008

การสังเคราะห์แสงของพืชนี้ ทำให้เกิดปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นในน้ำ จึงทำให้เกิดการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ จึงสอดคล้องกับชุดควบคุมถึงแม้ไม่มีการสังเคราะห์แสง แต่มีออกซิเจนในอากาศที่สามารถละลายและเป็นตัวออกซิไดซ์ได้ จึงทำให้ค่า COD ลดลงเช่นกันดังสมการ (14) (15) (16) และ (17)

$$\{CH_2O\} + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O \quad (14)$$

$$NH_3\text{-}N + O_2 \longrightarrow NO_2^-\text{-}N + O_2 \longrightarrow NO_3^-\text{-}N \quad (15)$$

$$Fe^{2+} + O_2 + 10H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3(s) + 8H^+ \quad (16)$$

$$2SO_3^{2-} + O_2 \longrightarrow 2SO_4^{2-} \quad (17)$$

ในกรณีนี้ที่จะเกิดเฉพาะในเงื่อนไขที่มีออกซิเจนเพียงพอและมีจุลินทรียที่เหมาะสมที่เรียกว่าสภาวะที่มีออกซิเจน ในตารางที่ 4.11 สรุปสารประกอบที่เกิดขึ้น เมื่ออยู่ในสภาวะมีออกซิเจนกับไม่มีออกซิเจน (กุลยา, 2555)

ตารางที่ 4.11 สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ เมื่ออยู่ในสภาวะมีออกซิเจนกับไม่มีออกซิเจน

Elements	Aerobic condition (Oxidized form)	Anaerobic condition (Reduced form)
คาร์บอน	CO_2, H_2CO_3, HCO_3^-	CH_4
ซัลเฟอร์	SO_4^{2-}	H_2S
ไนโตรเจน	NO_3^-	NH_3, NH_4^+
เหล็ก	$Fe(OH)_3$	Fe^{2+}

Prince of Songkla University Pattani Campus

นอกจากนี้การหายไปของ COD ในน้ำจะขึ้นอยู่กับอัตราการดูดซับของพืชโดยจะถูกจำกัดด้วยอัตราการเจริญเติบโตและความเข้มข้นของสารอาหารในเนื้อเยื่อพืช ทั้งนี้ขีดความสามารถในการย่อย ดูดซับ และเก็บสารอาหารของพืชจะขึ้นอยู่กับการเจริญเติบโตของพืช ปริมาณเนื้อเยื่อที่ต้องการสารอาหารและความสามารถในการยืนต้นของพืช (มวลต่อพื้นที่ ไบคาร์บอเนตจะถูกนำไปใช้) นอกจากนี้เมื่อมีการสังเคราะห์แสงของพืช ทำให้ค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดลดลงดังแสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Sooknah และ Wilkie (2004) ที่ศึกษาการกำจัดสารอาหารด้วยการเพาะเลี้ยงพืชลอยน้ำในน้ำเสียจากการหมักแบบไร้อากาศของน้ำล้างมูลโคนม พบว่า ค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดในการเพาะเลี้ยงที่มีการเจือจางและไม่เจือจาง ลดลง 38.5% และ 20.6% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 ค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์

Type of Wastewater	Total alkalinity (mg $CaCO_3$/L)		
	Initial	After 3 weeks of Hornwort cultivation	After 3 weeks of without Hornwort cultivation
Maturation pond effluent	350	313	330
Alkali ash solution	390	370	383
Absorbed solution	495	453	473

Prince of Songkla University Pattani Campus

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การเตรียมสารละลายด่างจากเถ้าปาล์ม

จากการละลายของเถ้าปาล์มในน้ำเสียจากบ่อบ่ม พบว่าได้สารละลายด่างที่มีค่า pH สูงสุดเท่ากับ 11 และมีค่าสภาพความเป็นด่าง 6,300 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ที่อัตราส่วนเถ้าปาล์มต่อน้ำเสียบ่อบ่ม 0.7 กิโลกรัมต่อลิตร โดยสารประกอบโพแทสเซียมในเถ้าปาล์มสามารถละลายได้มากที่สุดจากเดิมในน้ำเสียบ่อบ่มมีค่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มขึ้นเป็น 6,600 มิลลิกรัมต่อลิตร

ประสิทธิภาพการกำจัดเถ้าปาล์มแขวนลอยลดลงตามอัตราการไหลล้นที่เพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด 99.46% ที่อัตราการไหลล้น 13,029 ลิตรต่อวันต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นอัตราการตกจมของเถ้าปาล์มมีค่าสูงสุดและสามารถผลิตสารละลายด่างเถ้าปาล์มได้ที่อัตราเร็วสูง ๆ

5.1.2 การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม

จากการทดลองการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มพบว่าเมื่อใช้อัตราการไหลของสารละลายและอัตราส่วนระหว่างเถ้าปาล์มกับน้ำเสียบ่อบ่มเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้น การใช้สารละลายด่างจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มกับการใช้น้ำเสียจากบ่อบ่มเพียงอย่างเดียวที่อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 210 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 33% และ 53% ตามลำดับ ในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้ได้ 100% ต้องใช้อัตราการไหลของน้ำเสียจากบ่อบ่มอย่างน้อย 210 ลิตรต่อชั่วโมง ในขณะที่ใช้อัตราการไหลของสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มเพียง 90 ลิตรต่อชั่วโมง จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพสูงกว่า ซึ่งทางบริษัท ปาล์มพัฒนาไบโอแก๊ส จำกัด ใช้ไบโอ-สครับเบอร์ในการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพซึ่งเป็นระบบที่ป้อนน้ำเสียจากบ่อบ่มและอากาศเพื่อเป็นอาหารสำหรับจุลินทรีย์ที่กำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการทำความสะอาดแก๊สต่ำกว่าการใช้การดูดซึมทางเคมีโดยใช้สารละลายด่างจากเถ้าปาล์ม การนำเถ้าปาล์มซึ่งเป็นของเสียและมีปริมาณมากใช้เป็นสารละลายดูดซึมทางเคมีในการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพนั้นเป็นการเพิ่มความเสถียรโดยการทำให้เถ้ามีสมบัติเป็นกลางสามารถนำไปกำจัดทิ้งได้โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาดินเค็ม ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มในการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพซึ่งสามารถใช้สครับเบอร์ที่ทางโรงงานมีอยู่แล้วเป็นหอดูดซึมทางเคมีได้

Prince of Songkla University Pattani Campus

5.1.3 การเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดโดยใช้น้ำเสียจากระบบทำความสะอาดแก๊สชีวภาพด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่ม

สาหร่ายพุงชะโดมีการเติบโตที่รวดเร็ว พบว่าเมื่อเพาะเลี้ยงในน้ำเสียที่มีค่า COD เริ่มต้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สาหร่ายพุงชะโดที่น้ำหนักเริ่มต้น 50 กรัมต่อน้ำเสีย 30 ลิตร มีอัตราการเติบโตเฉพาะต่อวันเท่ากับ 3.51% สามารถลดปริมาณ COD ไนเตรทและฟอสเฟตในน้ำเสีย 76% 76% และ 53% ตามลำดับ ที่การเพาะเลี้ยง 3 สัปดาห์ ดังนั้นสามารถใช้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดในน้ำเสียนอกจากจะเป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นสุดท้ายแล้วยังสามารถผลิตชีวมวลสาหร่ายพุงชะโดเพื่อนำไปผลิตเป็นพลังงานหรืออาหารสัตว์ต่อไปได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การนำไปประยุกต์ใช้จริง ในการเตรียมสารละลายด่างจากเถ้าปาล์มกับน้ำเสียบ่อบ่มควรมีระบบการกรองที่ดี เพื่อป้องกันการอุดตันของหัวสเปรย์และความสกปรกของคอลัมน์

5.2.2 หากนำสาหร่ายพุงชะโดเป็นพืชที่บำบัดน้ำเสีย ควรมีสารอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตและควรเก็บเกี่ยวอย่างมากสุด ทุก ๆ 2 สัปดาห์ ไม่ฉะนั้นจะเกิดการเน่าเสียของน้ำเพิ่มขึ้น

5.2.3 การศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มในระบบดูดซึมที่ใหญ่ขึ้น เช่นการใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีอยู่แล้วในโรงงาน จะทำให้ได้ข้อมูลการทดลองมากขึ้น

5.2.4 การทดลองศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยสารละลายด่างผสมจากเถ้าปาล์มและน้ำเสียจากบ่อบ่มในระบบดูดซึมทางเคมีเปรียบเทียบกับการกำจัดโดยใช้ไบโอสครับเบอร์ จะทำให้ทราบข้อมูลข้อดีข้อเสียของทั้งสองระบบ เช่น ค่าใช้จ่ายกรณีดำเนินการแบบต่อเนื่อง ประสิทธิภาพของระบบ ความเถียรของระบบ เป็นต้น

5.2.5 การศึกษาการนำสาหร่ายพุงชะโดไปใช้ประโยชน์ในแง่ของอาหารสัตว์ หรือการนำไปใช้เป็นพลังงานชีวภาพ จะเพิ่มระบบการบูรณาการการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพและการเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโดน่าสนใจมากขึ้น

บรรณานุกรม

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2550. ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ พิมพ์ครั้งที่ 2 (ฉบับปรับปรุง). อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดก๊าซและไอ. ศูนย์บริหารวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กุลยา โอตากะ, พิทยา สีสด และ ทะยานรุ่ง เหลือสินทรัพย์. 2555. น้ำและมลพิษทางน้ำ. เคมีเบื้องต้น.

ชื่นจิต ชาญชิตปรีชา. 2542. การใช้สาหร่ายกำจัดสีและซีโอดีในน้ำทิ้งจากโรงงานสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม, คณะสาธารณสุขศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล.

ช่อทิพย์ อาธารมาศ. 2531. พรรณไม้น้ำของไทย. ภาควิชาชีววิทยา. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน.

จงกล พรมยะ และขจรเกียรติ แซ่ตัน. 2548. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อสุขภาพ. ภาคเทคโนโลยีการประมง. คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่.

ฤทัยรัตน์ วิศาลสุวรรณกร. 2548. ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเติบโตของสาหร่าย *Chlorella sp.* โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน เมื่อเพาะเลี้ยงในปฏิกรณ์ชีวภาพแสง. วิทยานิพนธ์ของการศึกษาระดับปริญญาโท. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุลาลงกรณ์.

พิมล พันธ์จงหาญ. 2549. การกำจัดสีเบสิคด้วยกลไกการดูดซับทางชีวภาพ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, วิศวกรรมเคมี, คณะ วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2537. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร.

วราวุธ เสือดี. 2549. การออกแบบระบบควบคุมมลพิษอากาศ. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

สรวิศ เผ่าทองศุข. 2543. สาหร่ายศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเพื่อการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายในประเทศไทย. เอกสารเผยแพร่ชุดโครงการอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย. 2553. การปรับปรุงและควบคุมคุณภาพก๊าซชีวภาพ คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม.

Al-mulali, M.Z., Awang, H., Khalil, H.P.S.A. and Aljoumaily, Z.S. 2015. The incorporation of oil palm ash in concrete as a means of recycling: A review. Cement & Concrete Composites. 55, 129–138.

Aggarangsi, P., Tippayawong, N., Moran, J.C. and Rerkkriangkrai, P. 2013. Overview of livestock biogas technology development and implementation in Thailand. Energy for Sustainable Development. 17, 371–377.

Aronsson, K.A. and, Ekelund, N.G.A. 2006. Effects on growth, photosynthesis and pigments of the freshwater moss *Fontinalis antipyretica* Hedw. after exposure to wood ash solution. Science of the Total Environment. 372, 236–246.

Badiei, M., Jahim, J.M., Anuar, N. and Abdullah, S.R.S. 2011. Effect of hydraulic retention time on biohydrogen production from palm oil mill effluent in anaerobic sequencing batch reactor.International Journal of Hydrogen Energy. 36, 5912–5919.

Brennan L. and Owende P. 2010. Biofuels from microalgae-a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. Renewable Sustainable Energy Rev. 14, 557–77.

Breure, A.M. and Andel, J.G. 1987. Microbial impact on anaerobic digestion. In: Wise DL ed. Bioenvironmental systems Vol.II. Boca Raton: CRC Press. 95-113.

Cavinato, C., Giuliano, A., Bolzonella, D., Pavan, P.,Cecchi, F. 2012. Bio-hythane production from food waste by dark fermentation coupled with anaerobic digestion process: A long-term pilot scale experience. International Journal of Hydrogen Energy, 37. 11549-11555.

Chan, Y.J., Chong, M.F. and Law, C.L. 2010. Biological treatment of anaerobically digested palm oil mill effluent (POME) using a Lab scale Sequencing Batch Reactor (SBR) Start up and operation of anaerobic EGSB reactor treating palm oil mill effluent. J Environ Manage. 91(8), 1738-46.

Corina P. Vermeer, C.P., Escher, M., Portielje, R. and J.M. de Klein, J. 2003. Nitrogen uptake and translocation by Chara. Aquatic Botany. 76, 245–258.

Demeyer, A. Voundi Nkana, J.C. and Verloo, M.G. 2001. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. Bioresource Technology. 77, 287–295.

Dierberg. F.E., DeBusk, T.A., Jackson, S.D., Chimney, M.J. and Pietro K. 2001. Submerged aquatic vegetation-based treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural runoff: response to hydraulic and nutrient loading. Water Research. 36, 1409-1422.

Dilek á F. B.,Taplamacioglu á H. M. and Tarlan E. 1999. Colour and AOX removal from pulping effluents by algae. Applied Microbiologyand Biotechnology. 52, 585-591.

Fang, C., O-Thong, S., Boe, K. and Angelidaki, I. 2011. Comparison of UASB and EGSB reactors performance, for treatment of raw and de-oiled palm oil mill effluent (POME). Journal of Hazardous Materials. 189, 229–234.

Gao, L., Keener, T.C., Zhuang, L. and Siddiqui, K.F. 2002. A technical and economic comparison of biofiltration and wet chemical oxidation (scrubbing) for odor control at wastewater treatment plants. Environmental Engineering and Policy. 2, 203-212.

Hosseini, S.E. and Wahid, M.A. 2015. Utilization of biogas released from palm oil mill effluent for power generation using self-preheated reactor. Energy Conversion and Management. 105, 957–966.

Fulke, A. B., Mudliar, S. N., Yadav, R., Shekh, A., Srinivasan, N., Ramanan, R., Krishnamurthi, K., Devi, S. S. and Chakrabarti, T. 2010. Biomitigation of CO_2, calcite formation and simultaneous biodiesel precursors production using Chlorella sp. Bioresource Technology. 101, 8473-8476.

Habib, M.A.B., Yusoff, F.M., Phang, S.M., Ang, K.J. and Mohamed, S. 1997. Nutritional values of chironomid larvae grown in palm oil mill effluent and algal culture. Aquaculture. 158, 95-105.

Iliuta, I. and Larachi, F. 2003. Concept of bifunctional redox iron-chelate process for H_2S removal in pulp and paper atmospheric emissions. Chemical Engineering Science. 58, 5305-5314.

Kasikamphaiboon, P., Chungsiriporn, J., Bunyakan, C. and Wiyaratn, W. 2013. Simultaneous removal of CO_2 and H_2S using MEA solution in a packed column absorber for biogas upgrading. Songklanakarin J. Sci. Technol. 35 (6), 683-691.

Kolthoff, I.M., Sandell, E.B., Meehan, E.J. and Stanley Bruckenstein. 1963. Quantitative Chemical Analysis. 4th edition. The Macmillan Company Collier-Macmillan Limited, London.

Kongjan, P. O-Thong, S and Angelidaki, I. 2013. Hydrogen and methane production from desugared molasses using a two-stage thermophilic anaerobic process. Engineering in Life Sciences. 13(2), 118–125.

Koyama, M., Yamamoto, S., Ishikawa, K., Ban, S. and Toda, T. 2014. Anaerobic digestion of submerged macrophytes: Chemical composition and anaerobic digestibility. Ecological Engineering. 69, 304–309.

Kufel L., Kufel I. 2002. *Chara* beds acting as nutrient sinks in shallow lakes - a review. Aquatic Botany. 72(3), 249-260.

Lahijani, P, Zainal, Z.A, Mohamed, A.R., and Mohammadi, M. 2013. Ash of palm empty fruit bunch as a natural catalyst for promoting the CO_2 gasification reactivity of biomass char. Bioresource Technology. 132, 351–355.

Lam, M.K. and Lee, K.T. 2011. Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): Win–win strategies toward better environmental protection. Biotechnology Advances. 29, 124–141.

Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Sungworagarn, S., Pipatmanomai, S. and Tia, S. 2012. A pilot-scale investigation of ash and deposition formation during oil-palm empty-fruit-bunch (EFB) combustion. Fuel Processing Technology. 96, 250–264.

Mamimin, C., Thongdumyu, P., Hniman, A., Prasertsan, P., Imai, T. and O-Thong, S. 2012. Simultaneous thermophilic hydrogen production and phenol removal from palm oil mill effluent by Thermoanaerobacterium-rich sludge. International Journal of Hydrogen Energy. 37(20), 15598-15606.

McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P., 2005. Unit Operations Of Chemical Engineering. McGraw Hill Copanies. Singapore.

Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R.D., Kumar, R., Seth, C.S. and Gupta, D.K. 2006. Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatins and antioxidant system in response to its accumulation. Chemosphere. 65 (6), 1027-1039.

Mondal, M.K. Balsora, H.K and Varshney, P. 2012. Progress and trends in CO_2 capture/separation technologies: A review. Energy. 46, 431-441.

Najafpour, G.D., Zinatizadeh, A.A.L., Mohamed, A.R., Isa, M.H. and Nasrollahzadeh, H. 2006. High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluent in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor. Process Biochemistry. 41, 370–379.

Perry, J (Ed). 1973. Chemical Engineerings, Handbook 5thed, McGraw Hill, New York.

Poh, P.E. and Chong, M.F. 2010. Biomethanation of Palm Oil Mill Effluent (POME) with a thermophilic mixed culture cultivated using POME as a substrate. Chemical Engineering Journal. 164, 146–154.

Rafson, I and Harold, J. 1998. Odour and VOC Control Handbook, McGraw Hill, New York, U.S.A.

Rai, U.N., Sinha, S., Tripathi, R.D. and Chandra, P. 1995. Wastewater treatability potential of some aquatic macrophytes: Removal of heavy metals. Ecological Engineering. 5, 5-12.

Rama Devi, S. and Prasad, M.N.V. 1998. Copper toxicity in *Ceratophyllum demersum* L. (Coontail), a free floating macrophyte: Response of antioxidant enzymes and antioxidants. Plant Science. 138 (2), 157-165

Prince of Songkla University Pattani Campus

Sawanya Saeleum. 2003. Utilization of Wastewater from Biogas Ponds in Pig Farms as Nutrients for Freshwater Algae. A Thesis of master degree of Science, Mahidol University.

Sialve, B., Bernet, N. and Bernard, O. 2009. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make mocroalgal biodiesel sustainable. Biotechnology Advance. 27, 409-416.

Sidik, U.H., Razali, F.B. Alwi, S.R.W. and Maigari, F. 2013. Biogas production through Co-digestion of palm oil mill effluent with cow manure Nigerian Journal of Basic and Applied Science. 21(1), 79-84.

Sooknah, R.D. and Wilkie, A.C. 2004. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater. Ecological Engineering. 22, 27–42.

Rama Devi, S. and Prasad, M.N.V. 1998. Copper toxicity in Ceratophyllum demersum L. (Coontail), a free floating macrophyte: Response of antioxidant enzymes and antioxidants. Plant Science. 138, 157-165.

Tippayawong, N. and Thanompongchart, P. 2010. Biogas quality upgrade by simultaneous remove of CO_2 and H_2S in a packed. Energy, 35, 4531- 4535.

Vergara-Fernandeza, A., Vargas, G., Alarcon, N. and Velasco, A. 2008. Evaluation of marine algae as a source of biogas in a two-stage anaerobic reactor system. Biomass and Bioenergy. 32, 338-344.

Weiland P. 2010. Biogas production: current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology. 85(4), 849-860.

Witoon, T. 2011. Capture and separation technologies of CO2 from combustion of fossil fuel. KKU Engineering Journal. 38(4), 453-467.

Wong, Y.S, Teng, T.T., Ong, S.A, Norhashimah, M., Rafatullah, M. and Lee, H.C. 2013. Anaerobic acidogenesis biodegradation of palm oil mill effluent using Suspended Closed Anaerobic Bioreactor (SCABR) at mesophilic temperature. Procedia Environmental Sciences. 18, 433–441.

Yin, C.Y., Aishah Syed Abdul Kadir, S, Lim, Y.P., Nawirah Syed-Ariffin, S. and Zamzuri, Z. 2008. An investigation into physicochemical characteristics of ash produced from combustion of oil palm biomass waste in a boiler. Fuel Processing Technology. 89, 693-696.

Yincheng, G. , Zhenqi, N. and Wenyi, L. 2011. Comparison of removal efficiencies of carbon dioxide between aqueous ammonia and NaOH solution in a fine spray column. Energy Procedia. 4, 512-518.

Prince of Songkla University Pattani Campus

Zeng, Q., Guo, Y., Niu, Z. and Lin, W. 2013. The absorption rate of CO2 by aqueous ammonia in a packed column. Fuel Processing Technology. 108, 76-81.

Zicari, S.M. 2003. Removal of hydrogen sulfide from biogas using cow-manure compost. A Thesis Presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science.

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ภาคผนวก

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์ความเป็นด่าง (Alkalinity) ด้วยวิธีมาตรฐาน AOAC Official Method 973.43

4.1 การเตรียมสารละลาย

ก. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน 0.1 N H_2SO_4

(1) ปิเปต Conc. H_2SO_4 2.66 มิลลิลิตร

(2) ปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

ข. วิธีการทดลอง

(1) กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1

(2) นำตัวอย่างที่ผ่านการกรองปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

(3) นำไปวัด pH

(4) ถ่ายตัวอย่างลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

(5) ไทเทรตตัวอย่างน้ำจนตัวอย่างน้ำมี pH 4.5 ด้วย 0.1 N H_2SO_4

(6) บันทึกปริมาตรของ 0.1 N H_2SO_4 ที่ใช้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

ข. การคำนวณ

$$\text{Alkalinity} = \frac{(\text{ปริมาตรของ 0.1 N } H_2SO_4 \text{ ที่ใช้})(\text{ความเข้มข้นของ } H_2SO_4)(50)(100)}{\text{ปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้}}$$

ตารางที่ ก.1 การประมาณความเข้มข้นของ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-)

Condition	Predominant form of alkalinity	Approximate concentration (M)
Vp = Vm	CO_3^{2-}	$[CO_3^{2-}]$ = Vp x N / Vs
Vp = 0	HCO_3^-	$[HCO_3^-]$ = Vm x N / Vs
Vm = 0	OH^-	$[OH^-]$ = Vp x N / Vs
Vm>Vp	CO_3^{2-}	$[CO_3^{2-}]$ =Vp x N / Vs
	HCO_3^-	$[HCO_3^-]$ = (Vm-Vp) x N / Vs
Vp>Vm	CO_3^{2-}	$[CO_3^{2-}]$ = Vm x N / Vs
	OH^-	$[OH^-]$ = (Vp-Vm) x N / Vs

Prince of Songkla University Pattani Campus

2. การวิเคราะห์ Chemical Oxygen Demand (COD) วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน AOAC Official Method 973.46

2.1 การเตรียมสารละลาย

ก. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน 0.1 N $K_2Cr_2O_7$

(1) นำ $K_2Cr_2O_7$ ประมาณ 5.100 กรัม อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

(2) นำไปวางให้เย็นใน Desiccator เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

(3) ชั่ง $K_2Cr_2O_7$ 4.931 กรัม

(4) เติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร แล้วคนให้ $K_2Cr_2O_7$ ละลายให้หมด

(5) เติม H_2SO_4 ปริมาตร 167 มิลลิลิตร

(6) เติม $HgSO_4$ 33.3 กรัม

(7) วางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

(8) ปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

ข. การเตรียมสารละลายกรด H_2SO_4 reagent

(1) ชั่ง Ag_2SO_4 22 กรัม

(2) เติมลงไปในขวด Conc. H_2SO_4 ปริมาตร 2.5 ลิตร

(3) วางทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ แล้วจึงนำมาใช้งาน

ฃ. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน 0.05 N $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$

(1) ชั่ง $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$ 19.6 กรัม

(2) เติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร แล้วคนให้ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$ ละลายให้หมด

(3) ปิเปต H_2SO_4 20.0 มิลลิลิตร วางทิ้งไว้ให้เย็น

(4) ปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

ค. การเตรียมสารละลายเจือจาง 20% H_2SO_4

(1) เติมน้ำกลั่นปริมาตร 180 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

(2) ปิเปต H_2SO_4 ปริมาตร 50.0 มิลลิลิตร เติมลงไป แล้วคนให้เข้ากัน

(3) ถ่ายใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 200 มิลลิลิตร

ฅ. การเตรียมเฟอโรอิน (Feroin indicator)

(1) ละลาย 1,10-phenanthroline monohydrate ($C_{12}H_8N_2H_2O$) 1.48 กรัม

(2) เติม Ferrous sulfate heptahydrate ($FeSO_47H_2O$) 0.70 กรัม

(3) ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2.2 วิธีการทดลอง

ก. ล้างหลอดทดลองและฝาด้วย 20% H_2SO_4 ก่อนทำการทดลอง

ข. เจือจางน้ำตัวอย่างให้อยู่ในช่วงค่าซีโอดี (COD) ที่จะวิเคราะห์

ฃ. ปิเปตสารละลาย 0.1 N $K_2Cr_2O_7$ ปริมาตร 3.0 มิลลิลิตร เติมลงไปในหลอดทดลอง

Prince of Songkla University Pattani Campus

ค. ปิเปตตัวอย่างน้ำที่เจือจางแล้วปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร เติมลงไปในหลอดทดลอง

ศ. ปิเปต H_2SO_4 reagent ปริมาตร 7.0 มิลลิลิตร เติมลงไปในหลอดทดลอง

ฆ. ปิดฝาหลอดทดลอง แล้วเขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกัน

ง. นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จ. วางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ฉ. นำไปไทเทรตด้วย 0.05 N $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$ โดยใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์

ช. จุดยุติจะได้สารละลายสีน้ำตาลแดง

ซ. บันทึกปริมาตรของ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$ ที่ใช้

ฌ. สารละลาย Blank จะต้องทำทุกขั้นตอน (ทุกหลอดเท่าที่เจือจาง) แต่ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่าง

2.3 การหาความเข้มข้นของ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$

ก. ปิเปตน้ำกลั่น 50.0 มิลลิลิตร เติมลงไปในขวดรูปชมพู่

ข. ปิเปตสารละลาย 0.1 N $K_2Cr_2O_7$ ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร เติมลงไปในขวดรูปชมพู่

ฃ. ปิเปต H_2SO_4 reagent ปริมาตร 15.0 มิลลิลิตร เติมลงไปในขวดรูปชมพู่ แล้วเขย่าให้เข้ากัน

ค. วางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ศ. หยดเฟอโรอิน 3 หยด

ฆ. นำไปไทเทรตกับสารละลาย $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$

ง. จุดยุติจะได้สารละลายสีน้ำตาลแดง

จ. บันทึกปริมาตรของ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$ ที่ใช้

2.4 การคำนวณความเข้มข้นของ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$,

$$N = (0.1)\ (5) \ /$$ ปริมาตรของ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$ ที่ใช้

2.5 การคำนวณค่าซีโอดี (COD)

COD, มิลลิลิตร (หลอดทดลอง) = (A-B) (N) (8000) / (ปริมาตรของน้ำตัวอย่างที่ใช้)

COD, มิลลิลิตร (น้ำตัวอย่าง) = (COD ในหลอดทดลอง) (จำนวนเท่าของการเจือจาง)

เมื่อ A คือ ปริมาตร $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$ ที่ใช้ไทเทรตสารละลาย Blank (มิลลิลิตร)

B คือ ปริมาตร $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$ ที่ใช้ไทเทรตน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

Prince of Songkla University Pattani Campus

3. การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท วิเคราะห์ด้วยวิธี Brucine Method (APHA, AWWA & WEF No. 4500-NO3-E, 1998)

3.1 การตรียมสารละลาย

ก. การตรียมสารละลายบรูซีน-กรดซัลฟานิลิค

(1) ละลาย Brucine Sulfate 1 กรัม และ กรดซัลฟานิลิค 0.1 กรัม ในน้ำร้อน 70 มิลลิลิตร

(2) เติมกรดเกลือเข้มข้น 3 มิลลิลิตร ทำให้เย็น

(3) ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร

(4) สารนี้จะอยู่ได้นานหลายเดือน หากเกิดสีชมพูในขวด ก็ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์

ข. สารละลายกรด H_2SO_4 (4+1)

(1) ค่อยเทกรด H_2SO_4 200 มิลลิลิตร ลงในน้ำ

(2) ปรับปริมาตรให้ครบ 250 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร

ค. สารละลายโซเดียมคลอไรด์

(1) ละลายโซเดียมคลอไรด์ 300 กรัม ในน้ำกลั่น

(2) ปรับปริมาตรให้ครบ 1000 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร

ค. สารละลายสต๊อคไนเตรท

(1) ละลาย Anhydrous KNO_3 721.8 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น

(2) ปรับปริมาตรให้ครบ 1000 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร

สารละลายนี้ 1000 มิลลิลิตร เท่ากับ 100 ไมโครกรัมไนเตรทไนโตรเจน

ฆ.สารละลายมาตรฐานไนเตรท

(1) ปิเปต สารละลายสต๊อคไนเตรท 20 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร

(2) ปรับปริมาตรให้ครบ 1000 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร

สารละลายนี้ 1000 มิลลิลิตร ท่ากับ 2 ไมโครกรัมไนเตรทไนโตรเจน

3.2 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

ก. ปิเปต สารละลายมาตรฐานไนเตรท มา 1 3 5 และ 7 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง

ข. ปริมาตรให้ครบ 10 มิลลิลิตร ใช้น้ำกลั่น

ค. เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันดี

ค. เติมสารละลายกรด H_2SO_4 (4+1) 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันดี

ฆ. นำหลอดไปแช่น้ำให้หายร้อน แล้วเติมสารละลายบรูซีน-กรดซัลฟานิลิค 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันดี

ง. นำหลอดทดลองไปอังในน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

จ. วัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร โดยใช้ความเข้มข้น 0 ไมโครกรัม เป็น Blank

ฉ. พล๊อตกราฟระหว่างความเข้มข้นกับค่าดูดกลืนแสง

3.3 กาวิเคราะห์ตัวอย่าง

ก. ปิเปต ตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง

Prince of Songkla University Pattani Campus

ข. เติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันดี

ค. เติมสารละลายกรด H_2SO_4 (4+1) 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันดี

ฅ. นำหลอดไปแช่น้ำให้หายร้อน แล้วเติมสารละลายบรูซีน-กรดซัลฟานิลิค 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันดี

ฆ. นำหลอดทดลองไปอังในน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

ง. วัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร โดยใช้ความเข้มข้น 0 ไมโครกรัม เป็น Blank

จ. ค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ เทียบกับกราฟมาตรฐาน

ฉ. การคำนวณ

ไนเตรทไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร) = $\frac{\text{ไมโครกรัมไนเตรทไนโตรเจนที่อ่านได้จากกราฟ}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้}}$

4. การวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต วิเคราะห์ด้วยวิธี Spectrophotometer Ascorbic Acid Method (APHA, AWWA & WEF No. 4500-PE, 1998)

4.1 การเตรียมสารละลาย

ก. การเตรียมสารละลายกรด H_2SO_4 5 N

(1) เติมกรด H_2SO_4 conc. 70 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรที่มีน้ำกลั่น

(2) แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 500 มิลลิลิตร

ข. การเตรียมสารละลายแอนติโมนิลโพแทสเซียมทาเตรท

(1) ละลาย $K(SbO)C_4H_4O_6.0.5H_2O$ 1.3715 กรัม ในน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร

(2) ปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร จนครบ 500 มิลลิลิตร

ค. การเตรียมสารละลายแอมโนเนียมโมลิบเดท

(1) ละลาย $(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$ 20 กรัมในน้ำกลั่น

(2) ปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตร จนครบ 500 มิลลิลิตร

(3) เก็บในขวดพลาสติกที่ 4 องศาเซลเซียส

ฅ. การเตรียมสารละลายกรดแอสคอร์บิค 0.1 M

(1) ละลายกรดแอสคอร์บิค 1.76 กรัม

(2) ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร

(3) สารละลายนี้จะอยู่ตัวประมาณ 1 อาทิตย์ ถ้าเก็บไวที่ 4 องศาเซลเซียส

ฆ. น้ำยารวม (Combined Reagent)

(1) ในสัดส่วนสำหรับ 100 มิลลิลิตร

(2) กรด H_2SO_4 5 N 50 มิลลิลิตร สารละลายแอนติโมนิลโพแทสเซียมทาเตรท 5 มิลลิลิตร สารละลายแอมโนเนียมโมลิบเดท 15 มิลลิลิตร และ กรดแอสคอรบิค 30 มิลลิลิตร

(3) ผสมสารละลายที่อุณหภูมิห้อง ผสมให้เข้ากันทุกครั้ง ให้เรียงตามลำดับ

(4) น้ำยาตัวนี้จะอยู่ได้นาน 4 ชม.

Prince of Songkla University Pattani Campus

ง. สารละลายสต๊อคฟอสเฟต

(1) ละลาย Anhydrous KH_2PO_4 219.5 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น

(2) ปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรให้ครบ 1000 มิลลิลิตร

สารละลายนี้ 1000 มิลลิลิตร เท่ากับ 50 ไมโครกรัมฟอสเฟต

จ. สารละลายมาตรฐานฟอตเฟส

(1) ปิเปต สารละลายสต๊อคฟอสเฟต 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร

(2) ปรับปริมาตรให้ครบ 1000 มิลลิลิตร

สารละลายนี้ 1 มิลลิลิตร เท่ากับ 2.5 ไมโครกรัมฟอสเฟต

4.2 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

ก. ปิเปต สารละลายมาตรฐานฟอสเฟต มา 2 4 6 8 10 และ 12 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร

ข. ปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

ค. เทใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมน้ำยารวม 8 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

ศ. ตั้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที

ฆ. วัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร โดยใช้ความเข้มข้น 0 ไมโครกรัมเป็น Blank

ง. พล๊อตกราฟระหว่างความเข้มข้นกับค่าดูดกลืนแสง

4.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ก. ปิเปต ตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร

ข. เติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1 หยด ถ้าเป็นสีแดงให้ หยด H_2SO_4 5 N จนกระทั่งสีแดงหายไป

ค. น้ำยารวม 8 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

ศ. ตั้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที

ฆ. วัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร โดยใช้ความเข้มข้น 0 ไมโครกรัมเป็นแบลงค์

ง. ค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ เทียบกับกราฟมาตรฐาน

จ. การคำนวณ

$$\text{ฟอสเฟต (มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อลิตร)} = \frac{\text{ไมโครกรัมฟอสเฟตที่อ่านได้จากกราฟ}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้}}$$

5. การวิเคราะห์ความเปนกรด-ดาง ด้วยวิธี Electrometric Method (APHA, AWWA & WEF No. 4500-H B, 1998)

5.1 สารเคมี

ก. สารละลายมาตรฐาน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าความเป็นกรดด่างของตัวอย่าง

ข. น้ำกลั่น

Prince of Songkla University Pattani Campus

5.2 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ก. ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างแท่งอิเลคโทรดให้สะอาดใช้กระดาษทิชชูซับน้ำให้แหง

ข. ใส่อิเลคโทรดลงในบีกเกอรที่ บรรจุสารละลายมาตรฐาน (ซึ่ง pH buffer จะต้องมีค่าความเป็นกรดด่างใกล้เคียงกับตัวอย่างโดยทั่วไปจะใช้สารละลายมาตรฐานที่มีค่าความเป็นกรดด่างอยูที่ 4, 7 และ 9)

ค. ปรับเครื่องมือให้ไดคามาตรฐานตามคำแนะนำในคูมือการใช้งาน

ศ. ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างอิเลคโทรดอีกครั้ง ซับน้ำให้แหง

ฆ. จุ่มอิเลคโทรดลงในตัวอย่าง (ตัวอย่างที่วัดจะต้องมีอุณหภูมิใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิของสารละลาย pH buffer ในข้อ ข

ง. อ่านค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ไดจากเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง

6. การวิเคราะห์ความเข้มข้นขององค์ประกอบในแก๊สเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

GC : Shimadzu GC 8A

Column : Porapak Q column, stainless steel 60/80 mesh, Length 1m.

Detector : Thermal conductivity detector (TCD)

Sample size injected : 0.5 mL

Carrier gas : N_2 at flow rate of 20 mL/min

Injector Temperature : 120 ^{0}C

Detector temperature : 150 ^{0}C

Column temperature : 70 ^{0}C

7. การวิเคราะห์ความเข้มข้นขององค์ประกอบในแก๊สด้วยแก๊สมิเตอร์

รูปที่ ก.1 แก๊สมิเตอร์

Prince of Songkla University Pattani Campus

8.การหาประสิทธิภาพของการดูดซึม

ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 removal efficiency) คำนวณจากสมการ (18)

$$CO_2 \text{ Removal efficiency, \%} = [(C\ co_{2,\ in} - C\ co_{2,\ out})/\ C\ co_{2,\ in}](100) \quad (18)$$

เมื่อ Cco_2, in คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าระบบ (V/V)

Cco_2, out คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบ (V/V)

9. การหาอัตราการเติบโตเฉพาะ

ซึ่งคำนวณได้จากสมมาการ (19)

$$\text{Specific growth rate, \%} = \frac{\ln W_{final} - \ln W_{initial}}{\text{Day}} \times 100 \quad (19)$$

เมื่อ W_{final} คือ น้ำหนักของสาหร่ายเริ่มต้น (กรัม)

$W_{initial}$ คือ น้ำหนักของสาหร่ายสุดท้าย (กรัม)

Day คือ ระยะเวลาที่ทำการเพาะเลี้ยง

Prince of Songkla University Pattani Campus

ภาคผนวก ข
ข้อมูล

ตารางที่ ข.1 อัตราส่วนระหว่างเถ้าปาล์มกับน้ำ ต่อค่า pH และร้อยละการละลาย

Weight ratio of palm ash to water	pH of alkali solution	Dissolved palm ash (g/L)	Dissolved palm ash (%)
0.01	10.23	0.67	6.63
0.02	10.6	1.11	5.42
0.03	10.74	1.48	4.92
0.04	10.83	1.76	4.39
0.05	10.87	2.05	4.08
0.06	10.89	2.41	4.01
0.08	10.89	3.28	4.06
0.10	10.90	4.00	3.99
0.12	10.91	4.70	3.90
0.14	10.91	5.40	3.84
0.16	10.91	5.87	3.65
0.20	10.91	7.14	3.56
0.30	10.90	9.68	3.21
0.50	10.88	15.72	3.14
0.70	10.88	21.06	3.22

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.2 อัตราส่วนระหว่างเถ้าปาล์มกับน้ำ ต่อค่าสภาพความเป็นด่าง

Weight ratio of palm ash to water	Alkalinity of total (mg/L $CaCO_3$)	Approximate concentration (mg/L $CaCO_3$)		
		OH^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-
0.01	201	11	190	0
0.02	345	8	336	0
0.03	445	35	410	0
0.04	516	26	490	0
0.05	621	61	560	0
0.06	718	31	687	0
0.08	1,640	0	1,320	320
0.1	1,813	0	1,460	353
0.12	2,010	0	1,806	203
0.14	2,280	0	2,253	27
0.16	2,586	0	2,340	246
0.20	2,920	0	2,520	400
0.30	3,840	0	3,800	40
0.50	4,906	0	4,680	226
0.70	6,306	0	5,680	626

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.3 ปริมาณ SS ที่เวลาตกจมและความลึกต่าง ๆ

Time (min)	SS concentrations at indicated depths (g/l)	
	45 cm (Tap 1)	90 cm (Tap 2)
5	57,910	57,910
10	27,130	30,740
15	20,090	23,430
20	14,640	20,040
25	6,610	18,440
30	1,730	15,280
35	990	11,390
40	690	2,950
45	510	950
50	400	550
55	380	400

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.4 %SS removed และ %SS remaining กับเวลาที่ความลึก 45 cm

Time (min)	SS remaining (mg/L) (ข้อมูลจากตารางที่ ข.3)	SS remaining (%) y = (SS/SSo) x 100	SS removed (%) z = 100 – y
5	57,910	100	0
10	30,740	46.84855811	53.15144189
15	23,430	34.69176308	65.30823692
20	20,040	25.28060784	74.71939216
25	18,440	11.41426351	88.58573649
30	15,280	2.987394232	97.01260577
35	11,390	1.709549301	98.2904507
40	2,950	1.191504058	98.80849594
45	950	0.880676912	99.11932309
50	550	0.69072699	99.30927301

ตารางที่ ข.5 %SS removed และ %SS remaining กับเวลาที่ความลึก 90 cm

time (min)	SS remaining (mg/L) (ข้อมูลจากตารางที่ ข.3)	SS remaining (%) y = (SS/SSo) x 100	SS removed (%) z = 100 – y
5	57,910	100	0
10	30,740	53.08236919	46.91763081
15	23,430	40.45933345	59.54066655
20	20,040	34.60542221	65.39457779
25	18,440	31.84251425	68.15748575
30	15,280	26.38577102	73.61422898
35	11,390	19.66845104	80.33154896
40	2,950	5.094111552	94.90588845
45	950	1.640476602	98.3595234
50	550	0.949749611	99.05025039

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.6 %SS removed กับเวลาที่ความลึกต่าง ๆ

% SS removal	Time (min)	
	45 cm (Tap 1)	90 cm (Tap 2)
0	0.0	0.0
5	0.5	0.5
10	0.9	1.1
20	1.7	2.0
30	2.5	3.0
40	3.0	3.5
50	4.5	5.7
60	7.0	10.4
70	12.5	22.0
80	17.0	30.0
90	20.7	33.2
95	23.5	35.0

ตารางที่ ข.7 %SS removed กับ Vs

% SS removed	T (min) At H = 90 cm	Settling velocity (m/hr) Vs = H/t = 0.9x60/t = 54/t
0	0.0	0
5	0.5	108.0
10	1.1	49.0
20	2.0	27.0
30	3.0	18.0
40	3.5	15.4
50	5.7	9.5
60	10.4	5.2
70	22.0	2.4
80	30.0	1.8
90	33.2	1.6
95	35.0	1.5

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.8 Vs กับ Overflow rate

Time (min)	SS removed (%)	Settling velocity (m/hr)	Overflow rate (L/day.m^2)
0	0	0	0
0.5	46.91763	1.150953	27,622.88
1.1	59.54067	0.906943	21,766.64
2.0	65.39458	0.825757	19,818.16
3.0	68.15749	0.792283	19,014.79
3.5	73.61423	0.733554	17,605.29
5.7	80.33155	0.672214	16,133.14
10.4	94.90589	0.568985	13,655.63
22.0	98.35952	0.549006	13,176.15
30.0	99.05025	0.545178	13,084.27
33.2	99.30927	0.543756	13,050.14
35.0	99.46469	0.542906	13,029.75

ตารางที่ ข.9 อัตราการไหลของสารละลายต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลแก๊ส 10 ลิตรต่อนาที

Solution flow rate	CH_4 concentration (%)		CO_2 concentration (%)		CO_2 removal
(L/h)	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	(%)
50	50	57.85	50	42.14	15.70
100	50	61.64	50	38.35	23.28
150	50	65.35	50	34.64	30.71

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.10 อัตราการไหลของสารละลายต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลแก๊ส 5 ลิตรต่อนาที โดยใช้น้ำเสียจากบ่อบ่ม

Solution flow rate (L/h)	CH_4 concentration (%)		CO_2 concentration (%)		H_2S concentration (ppm)		CO_2 removal (%)	H_2S removal (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet		
60	60.56	64.13	38.43	34.86	763.33	36.66	9.28	95.19
90	60.56	67.36	38.43	31.63	763.33	10	17.69	98.68
120	60.56	68.93	38.43	30.06	763.33	10	21.76	98.69
150	60.56	71.56	38.43	27.43	763.33	0	28.62	100.00
180	60.56	73.93	38.43	25.06	763.33	0	34.77	100.00
210	60.56	73.23	38.43	25.76	763.33	0	32.95	100.00

ตารางที่ ข.11 อัตราการไหลของสารละลายต่อประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลแก๊ส 5 ลิตรต่อนาที โดยใช้น้ำเสียจากบ่อบ่มละลายเถ้าปาล์ม 0.3 กิโลกรัม

Solution flow rate (L/h)	CH_4 Concentration (%)		CO_2 Concentration (%)		H_2S Concentration (ppm)		CO_2 removal (%)	H_2S removal (%)
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet		
60	59.93	70.53	39.26	28.66	1,023.33	13.33	26.99	98.69
90	59.93	73.83	39.26	25.36	1,023.33	0	35.39	100.00
120	59.93	78.56	39.26	20.63	1,023.33	0	47.45	100.00
150	59.93	80.03	39.26	19.16	1,023.33	0	51.18	100.00
180	59.93	80.7	39.26	18.5	1,023.33	0	52.88	100.00
210	59.93	81.73	39.26	17.46	1,023.33	0	52.88	100.00

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.12 อัตราการไหลของสารละลายต่อค่าสภาพเป็นด่าง

Solution flow rate (L/h)	Alkalinity of maturation pond effluent (mg/L $CaCO_3$)			Alkalinity of maturation pond effluent + Ash 0.3kg/L (mg/L $CaCO_3$)		
	OH^-	CO_2^{-3}	HCO^{-3}	OH^-	CO_2^{-3}	HCO^{-3}
inlet	0	280	3,640	0	1,880	3,600
60	0	0	3,920	0	0	5,480
90	0	0	3,920	0	0	5,480
120	0	0	3,920	0	0	5,480
150	0	0	3,920	0	0	5,480
180	0	0	3,920	0	440	5,040
210	0	0	3,920	0	680	4,800

ตารางที่ ข.13 ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด ต่ออัตราการเติบโตเฉพาะ เมื่อ T1 T2 และ T3 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโด เท่ากับ 50, 75 และ 100 กรัม ตามลำดับ

Code sample		$W_{initial}$ (g)	W_{final} (g)	Specific Growth Rate (% per day)
T1	T11	50.2	132.6	4.60
	T12	50.0	124.5	4.30
	T13	50.1	129.7	4.50
	ave	50.1	128.9	4.50
T2	T21	75.1	172.3	3.95
	T22	75.1	164.9	3.74
	T23	75.2	165.3	3.75
	ave	75.1	167.5	3.80
T3	T31	100.2	187.2	2.97
	T32	100.1	167.5	2.45
	T33	100.3	173.9	2.60
	ave	100.2	176.2	2.60

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.14 ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด ต่อค่า pH และการเปลี่ยนแปลงของ COD เมื่อ T1 T2 และ T3 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโด เท่ากับ 50 75 และ 100 กรัม ตามลำดับ

day	pH				COD (mg/L)				%COD removal			
	C	T1	T2	T3	C	T1	T2	T3	C	T1	T2	T3
0	8.61	8.61	8.61	8.61	546	546	546	546	0	0	0	0
7	9.49	9.74	9.85	9.93	253	217	200	214	53	60	63	60
14	9.45	9.76	9.91	9.97	208	120	111	93	61	78	79	82
21	9.33	9.87	9.93	9.99	320	280	337	364	41	48	38	33

ตารางที่ ข.15 ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด ต่ออัตราการเติบโตเฉพาะ เมื่อใช้น้ำในการเพาะเลี้ยงที่แตกต่างกัน

Code sample		$W_{initial}$ (g)	W_{final} (g)	Specific Growth Rate (% per day)
Maturation pond effluent	M_1	50.30	101.50	3.34
	M_2	50.20	98.50	3.20
	M_3	50.70	105.10	3.47
	ave	50.40	101.70	3.34
Alkali ash solution	MA_1	50.20	54.50	0.39
	MA_2	50.80	60.80	0.85
	MA_3	50.10	59.40	0.81
	ave	50.36	58.23	0.69
Absorbed solution	MAC_1	50.70	104.90	3.46
	MAC_2	50.30	106.00	3.54
	MAC_3	50.30	105.70	3.53
	ave	50.43	105.53	3.52

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.16 ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด ต่อค่า pH เมื่อใช้น้ำในการเพาะเลี้ยงที่แตกต่างกัน

Day	pH					
	M	MA	MAC	C_M	C_{MA}	C_{MAC}
0	8.69	9.17	8.70	8.69	9.17	8.70
7	9.29	9.21	9.35	8.85	9.18	8.87
14	9.63	9.25	9.43	9.60	9.21	9.12
21	10.26	10.06	9.64	9.66	8.97	9.11

* M = Maturation pond effluent

MA = Alkali ash solution

MAC = Absorbed solution

C_M = Control Maturation pond effluent

C_{MA} = Control Alkali ash solution

C_{MAC} = Control Absorbed solution

ตารางที่ ข.17 ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด ต่อการเปลี่ยนแปลงของ COD เมื่อใช้น้ำในการเพาะเลี้ยงที่แตกต่างกัน

Day	COD (mg/L)						COD removal (%)					
	M	MA	MAC	C_M	C_{MA}	C_{MAC}	M	MA	MAC	C_M	C_{MA}	C_{MAC}
0	720	520	600	720	520	600	0	0	0	0	0	0
7	476	614	356	622	516	456	34	-	40	13	0.8	24
14	223	489	161	558	461	369	69	6	73	22	11	38
21	173	302	97	434	474	297	76	42	83	39	9	50

* M = Maturation pond effluent

MA = Alkali ash solution

MAC = Absorbed solution

C_M = Control Maturation pond effluent

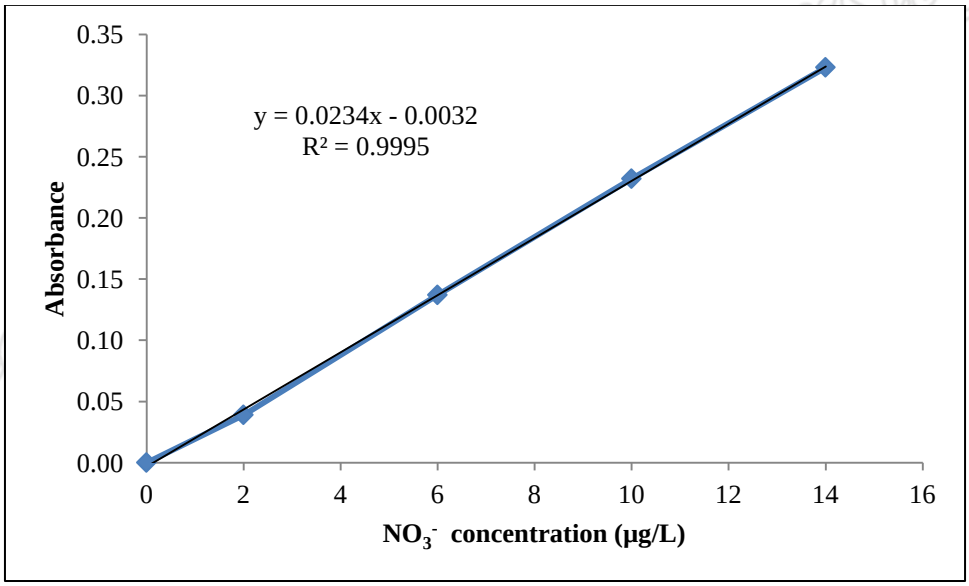
C_{MA} = Control Alkali ash solution

C_{MAC} = Control Absorbed solution

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.18 ความเข้มข้นไนเตรทมาตรฐานต่อค่าการดูดกลืนแสง

NO_3^- concentration (µg/L)	Absorbance
0	0
2	0.039
6	0.137
10	0.232
14	0.323



รูปที่ ข.1 กราฟสารละลายมาตรฐานไนเตรท

ตารางที่ ข.19 ปริมาณไนเตรทของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์ T1 T2 และ T3 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโด เท่ากับ 50 75 และ 100 กรัม ตามลำดับ

Code sample	Absorbance	NO_3^- concentration		NO_3^- removal
		µg/L	mg/L	(%)
Initial	0.145	6.333	0.633	-
T11	0.034	1.589	0.158	74.89
T12	0.031	1.482	0.148	76.58
T13	0.032	1.504	0.150	76.24
T21	0.058	2.615	0.261	58.70
T22	0.044	2.017	0.201	68.15
T23	0.049	2.230	0.223	64.77
T31	0.022	1.076	0.107	82.99
T32	0.03	1.418	0.141	77.59
T33	0.034	1.611	0.161	74.56
C1	0.036	1.675	0.167	73.54
C2	0.033	1.547	0.154	75.57
C3	0.039	1.803	0.180	71.52

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.20 ปริมาณไนเตรทของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์

Code sample	Absorbance	NO_3^- concentration		NO_3^- removal
		µg/L	mg/L	(%)
M_o	0.157	6.846	0.684	-
M_1	0.053	2.401	0.240	64.91
M_2	0.080	3.576	0.357	47.75
M_3	0.060	2.700	0.270	60.54
C_{M1}	0.086	3.833	0.383	44.00
C_{M2}	0.077	3.448	0.344	49.62
C_{M3}	0.078	3.470	0.347	49.31
MA_o	0.206	8.940	0.894	-
MA_1	0.048	2.188	0.218	75.52
MA_2	0.043	1.995	0.199	77.67
MA_3	0.055	2.487	0.248	72.17
C_{MA1}	0.049	2.230	0.223	75.04
C_{MA2}	0.063	2.807	0.280	68.59
C_{MA3}	0.066	2.978	0.297	66.68
MAC_o	0.184	8	0.800	-
MAC_1	0.034	1.568	0.156	80.39
MAC_2	0.046	2.123	0.212	73.45
MAC_3	0.044	2.017	0.201	74.78
C_{MAC1}	0.057	2.594	0.259	67.57
C_{MAC2}	0.057	2.572	0.257	67.84
C_{MAC3}	0.066	2.957	0.295	63.03

* M = Maturation pond effluent

MA = Alkali ash solution

MAC = Absorbed solution

C_M = Control Maturation pond effluent

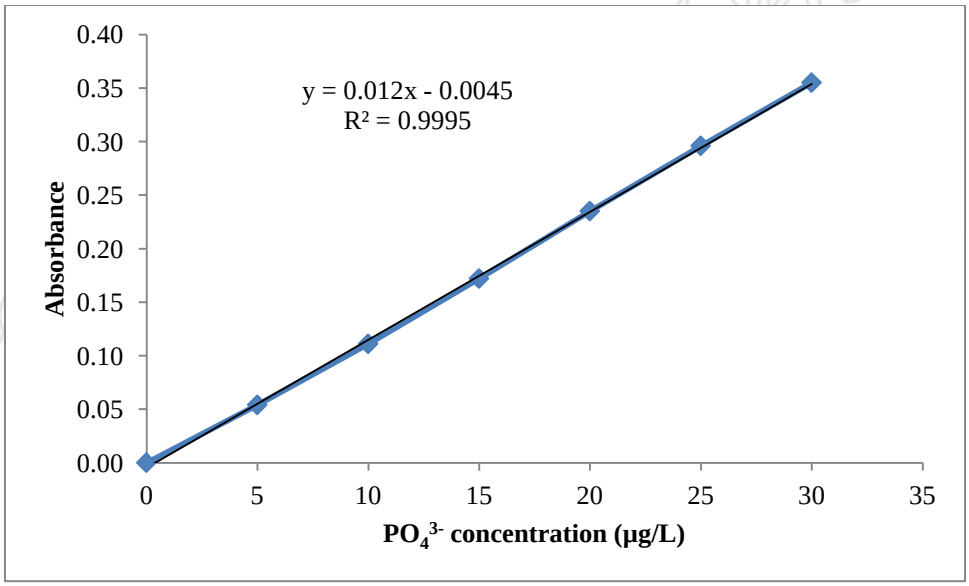
C_{MA} = Control Alkali ash solution

C_{MAC} = Control Absorbed solution

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.21 ความเข้มข้นฟอสเฟตมาตรฐานต่อค่าการดูดกลืนแสง

PO_4^{3-} concentration (µg/L)	Absorbance
0	0
5	0.054
10	0.111
15	0.172
20	0.235
25	0.296
30	0.355



รูปที่ ข.2 กราฟสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต

ตารางที่ ข.22 ปริมาณฟอสเฟตของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์ T1 T2 และ T3 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของสาหร่ายพุงชะโด เท่ากับ 50 75 และ 100 กรัม ตามลำดับ

Code sample	Absorbance	PO_4^{3-} concentration		PO_4^{3-} removal
		µg/L	mg/L	(%)
Initial	0.340	28.708	0.574	-
T11	0.001	0.458	0.009	98.40
T12	0.000	0.375	0.008	98.69
T13	0.002	0.542	0.011	98.11
T21	0.001	0.458	0.009	98.40
T22	0.001	0.458	0.009	98.40
T23	0.000	0.375	0.008	98.69
T31	0.001	0.458	0.009	98.40
T32	0.001	0.458	0.009	98.40
T33	0.001	0.458	0.009	98.40
C1	0.040	3.708	0.074	87.08
C2	0.047	4.292	0.086	85.05
C3	0.041	3.792	0.076	86.79

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ ข.23 ปริมาณฟอสเฟตของน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพุงชะโด เมื่อผ่านไป 3 สัปดาห์

Code sample	Absorbance	PO_4^{3-} concentration			PO_4^{3-} removal
		µg/L**	µg/L	mg/L	(%)
M_o	0.169	14.458	72.292	1.446	
M1	0.006	0.908	4.542	0.091	93.72
M2	0.006	0.858	4.292	0.086	94.06
M3	0.006	0.858	4.292	0.086	94.06
C_{M1}	0.093	8.092	40.458	0.809	44.03
C_{M2}	0.082	7.192	35.958	0.719	50.26
C_{M3}	0.087	7.608	38.042	0.761	47.38
MA_o	0.154	13.192	65.958	1.319	
MA_1	0.071	6.258	31.292	0.626	52.56
MA_2	0.063	5.608	28.042	0.561	57.49
MA_3	0.065	5.775	28.875	0.578	56.22
C_{MA1}	0.133	11.475	57.375	1.148	13.01
C_{MA2}	0.138	11.875	59.375	1.188	9.98
C_{MA3}	0.138	11.858	59.292	1.186	10.11
MAC_o	0.160	13.692	68.458	1.369	
MAC_1	0.076	6.675	33.375	0.668	51.25
MAC_2	0.073	6.492	32.458	0.649	52.59
MAC_3	0.069	6.158	30.792	0.616	55.02
C_{MAC1}	0.147	12.658	63.292	1.266	7.55
C_{MAC2}	0.148	12.708	63.542	1.271	7.18
C_{MAC3}	0.149	12.825	64.125	1.283	6.33

* M = Maturation pond effluent

MA = Alkali ash solution

MAC = Absorbed solution

C_M = Control Maturation pond effluent

C_{MA} = Control Alkali ash solution

C_{MAC} = Control Absorbed solution

**Diluted 5 times

Prince of Songkla University Pattani Campus

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล ทิวะ รัตนยา
รหัสประจำตัวนักศึกษา 5720320305
วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2556

ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนการค้นคว้าวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ประจำปี 2557

ทุนยกเว้นค่าธรรมเนียมการศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2557

ทุนอุดหนุนการค้นคว้าวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2558

ทุนฝึกงานในห้องปฏิบัติการระยะสั้น (Laboratory Attachment) ในต่างประเทศ (กลุ่มประเทศอาเซียน) ประจำปีงบประมาณ 2558 ระดับบัณฑิตศึกษา

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Thiwa Boonyanurak, Rattana Jariyaboon, Prawit Kongjan and Chonlatee Cheewasedtham. Biogas cleaning using alkaline solution achieved from oil palm ash. 6th International Conference on Fermentation Technology for Value Added Agricultural Products (FerVAAP-2015), Khon Kaen, Thailand, 29-31th July, 2015.

Thiwa Boonyanurak, Rattana Jariyaboon, Prawit Kongjan and Chonlatee Cheewasedtham. Biogas upgrading by absorption with alkaline ash solution. 2015 APEC Conference on Promoting Innovative and High Value-added Bio-product Production Technologies for Sustainable Development and 10th Asia Biohydrogen and Biorefinery Symposium (APEC-BPT/ABBS-2015), Ken-ting, Pingtung, Taiwan, 21-24th September, 2015.

Thiwa Rattanaya, Rattana Jariyaboon, Prawit Kongjan, Chonlatee Cheewasedtham and Charun Bunyakan. Cultivation of *Ceratophyllum demersum L.* by wastewater from biogas scrubber. 39th National Graduate Research Conference & 4th International Graduate Research Conference 2016, Assumption University of Thailand, Suvarnabhumi campus, Samuthprakarn, Thailand 30th June –1st July, 2016.

Prince of Songkla University Pattani Campus