



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ลูกผสมแบบใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

Novel Hybrid Photobioreactor for Algae Cultivation



T137668

ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์
ดร.ญานีพร ทักษรรชิต

RdH
ฐ154 ๑
2556

เลขหมู่..... 137668
เลขทะเบียน.....
รับเดือนปี 13 ก.ค. 2558

b. 12695622
i.

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หนังสือเป็นสมบัติของท่าน
โปรดช่วยกันรักษา

www.lib.kmitl.ac.th

สำนักหอสมุดกลาง โทร. 02-329-8544-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ เครื่องปฏิกรณ์ลูกผสมแบบใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย
แหล่งเงิน งบประมาณรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 150,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี 6 เดือน ตั้งแต่ เดือน 1 ตุลาคม 2556 ถึง 31 มีนาคม 2558

ชื่อ สกุล หัวหน้าโครงการ ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์

ชื่อ สกุล ผู้ร่วมโครงการวิจัย ดร.ญาณิพร พัชรวรโชติ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาและออกแบบเครื่องปฏิกรณ์การสังเคราะห์แสงแบบลูกผสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย โดยสามารถนำเครื่องปฏิกรณ์ไปใช้เพื่อการวิจัยหรือพัฒนาเป็นธุรกิจเชิงพาณิชย์ หลักการทำงานอ้างอิงจากเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนอากาศแบบใช้แสง เครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกซ้อนกันสองชั้นทำจากวัสดุอะคริลิกใส มีระบบหมุนเวียนของเหลวขึ้นอยู่กับ การออกแบบสองส่วนที่สำคัญ คือ บริเวณไพรเซอร์ ทาวน์คัมเมอร์ซึ่งเป็นสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัด ทาวน์คัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดไพรเซอร์ (A_p/A_r) เท่ากับ 3 และบริเวณช่องว่างด้านบน-ล่างของท่อ ทรงกระบอกด้านในเครื่องปฏิกรณ์ที่จะต้องมีความเท่ากัน โดยกำหนดไว้ให้มีค่าเท่ากับ 10 เซนติเมตร ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบผ่านหัวกระจายก๊าซแบบเป็ลลีย์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ติดตั้งบนพื้นผิวด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์มีอัตราการไหล 5-10 ลิตรต่อนาที บริเวณกลาง ทรงกระบอกภายในติดตั้งหลอดไฟชนิด LED สีแดง ขนาด 48 วัตต์ ที่มีองศาการกระจายแสง รวมกันเท่ากับ 360 องศา สำหรับการศึกษาครั้งนี้จะใช้สาหร่ายคอคลเรลล่า วุลกาวิส ประสิทธิภาพ การทำงานของระบบจะวัดผลจากความหนาแน่นของเซลล์ โดยจะเก็บตัวอย่างทุกๆ 24 ชั่วโมง เพื่อ วัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อหาความหนาแน่นของเซลล์ด้วยเครื่อง UV-VIS spectroscopy ที่ช่วงความ ยาวคลื่น 430 และ 640 นาโนเมตร ซึ่งจากการทดลองในครั้งนี้พบว่าเครื่องปฏิกรณ์การสังเคราะห์ แสงแบบลูกผสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายนั้นมีรูปแบบการหมุนเวียนของของเหลวตรงตาม ทฤษฎี นอกจากนี้ค่าการดูดกลืนแสงยังมีปริมาณเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นความหนาแน่นของเซลล์ สาหร่ายที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

คำสำคัญ: เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงแบบหมุนวน การเพาะเลี้ยงสาหร่าย สาหร่ายคอคลเรลล่า วุลกาวิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Researcher : Dr.Tanawan Pinnarat and Dr.Yaneeporn Patcharavorachot

Faculty : Engineering Department : Chemical Engineering

ABSTRACT

This project studied and designed a hybrid photobioreactor that use for algae cultivation in laboratory scale or can be developed to commercial scale. Reactor characteristic is similar to an airlift photobioreactor, which comprise of superimposed 2 piece transparent acrylic tube. The mixing process depends on riser - downcomer, which has ratio of downcomer to riser surface area of 3. The length from the top must be equal to the length from bottom zone. In this case, value of 10 centimeters was used. Bubbles move from bottom to top of reactor by diffuser, which has diameter of 10 centimeters. The air was pumped 5-10 liter per minute. A diffuser is installed at the center on the base inside the hybrid photobioreactor. The light tube is modified from red LED that requires 48 watt power. The LED light has totally 360 degrees of lighting. This project used *Chlorella Vulgaris* algae to test the system. To test the efficiency of the system, the cell density was measured for optical density (OD value) by UV-VIS spectroscopy in the wavelength of 430 and 640 nanometers. From this experiment, a design of hybrid photobioreactor has a circulating pattern similar to a theory and biomasses continue to increase. This was observed from increasing value of optical density, which determines the growth rate.

Keywords: Airlift Photobioreactor, *Chlorella Vulgaris*, Algae Cultivation

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยทุนสนับสนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ประจำปี 2557 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณนักศึกษา คือนางสาวขวัญชนก ปั้นบำรุงสุข นางสาวน้ำฝน นิยมวงศ์ นางสาวจตุพร ภัคดี นายณัฐจักร วงศ์คำ สำหรับการช่วยในการทดลอง และนายธาดา ทรัพย์พิพัฒนา สำหรับการจัดรูปแบบเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์ และขอขอบคุณผู้มีรายนามดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี สำหรับความช่วยเหลือในการประกอบและติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ และขอขอบคุณ คุณครุณี ผลโพธิ์ และคุณพิมพ์ใจ ภูชนะกิจ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบคุณ รศ.ดร. สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตร์การประมง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและความอนุเคราะห์ในด้านการเพาะเลี้ยงสาหร่าย ทั้งอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อทดสอบเครื่องปฏิกรณ์

ขอขอบคุณ คุณบุปผา จงพัฒน์ นักวิทยาศาสตร์ประจำวิทยาศาสตร์การประมง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและเพาะพันธุ์หัวเชื้อสาหร่าย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่อบรมสั่งสอนให้มีความตั้งใจ เป็นแรงผลักดันในการทำงาน ซึ่งงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยและศึกษาเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์เพื่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในอนาคต

ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์

ดร.ญาติเพร พ็ชรโรชิต

31 มีนาคม 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ	iv
สารบัญตาราง	vi
สารบัญภาพ	vii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	15
3.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์.....	15
3.2 การเตรียม Medium Culture	18
บทที่ 4 ผลการวิจัย	22
4.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์.....	22
4.2 การทดสอบพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์	22
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	32
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	32
5.1 ข้อเสนอแนะ.....	32
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย	34
6.1 สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	35
ภาคผนวก	39
ภาคผนวก ก	39
ภาคผนวก ข	41
ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	4
2.2	4
2.3	10
2.4	11
3.1	16
3.2	18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	3
2.2	6
2.3	7
2.4	7
2.5	8
2.6	8
2.7	9
2.8	12
2.9	13
3.1	15
3.2	17
3.3	18
3.4	20
4.1	22
4.2	23
4.3	24
4.4	24
4.5	26
4.6	26
4.7	27
4.8	28
4.9	29
4.10	29
4.11	30
4.12	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สาหร่ายเป็นพืชที่มีความน่าสนใจมีองค์ประกอบหลัก อย่างคือ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต 3 และไขมัน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย สาหร่ายขนาดเล็กบางสายพันธุ์มีปริมาณโปรตีนมากกว่าในถั่วเหลืองและนม [1] ทำให้สาหร่ายเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากโปรตีนแล้วยังมีวิตามินและคอลลาเจนส่งผลให้เกิดการวิจัยและพัฒนาสาหร่ายเพื่อใช้เป็นยารักษาโรค ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม และเครื่องสำอาง [2],[3] น้ำมันก็เป็นส่วนประกอบสำคัญที่พบในสาหร่าย พบว่าในเซลล์สาหร่ายส่วนใหญ่มีปริมาณน้ำมันประมาณ 20-40 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแห้งและอาจสูงถึง เปอร์เซ็นต์ขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่ายและสภาวะการเพาะปลูก [4] สาหร่ายสามารถผลิตน้ำมันได้มากกว่าพืชยืนต้นเช่น มะพร้าว ปาล์ม ในขณะที่พืชยืนต้นใช้พื้นที่เพาะปลูกมากกว่าเช่น ปาล์ม น้ำมันใช้พื้นที่เพาะปลูกมากกว่าสาหร่ายถึง กันเท่าตัวเพื่อให้ผลิตน้ำมันในปริมาณที่เท่า 20[5] นอกจากนี้ประโยชน์ดังกล่าวแล้วการปลูกสาหร่ายจำเป็นต้องใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และธาตุอาหาร ดังนั้นการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในบริเวณโรงงานจะช่วยลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และช่วยบำบัดน้ำเสีย [6],[7]

จากการศึกษาค้นคว้าการแปรสภาพสาหร่ายเป็นน้ำมันอย่างจริงจังของหลากหลายองค์กรทั่วโลก พบว่าปัญหาที่สำคัญคือ การเพิ่มปริมาณการผลิตให้อยู่ในระดับอุตสาหกรรมนั้นยังขาดความชัดเจนของกระบวนการผลิตและการเพาะปลูก สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระบบปิดสามารถควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและสิ่งปนเปื้อน เพื่อคุณภาพของผลผลิตและความคุ้มทุนแต่ยังมีข้อจำกัดในการเพิ่มปริมาณการผลิตให้อยู่ในระดับอุตสาหกรรม [7] เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนเป็นตัวเลือกที่ถูกนำมาศึกษา เนื่องจากใช้พื้นที่ในการผลิตน้อย มีประสิทธิภาพการเพาะปลูกที่ดีและการขยายขนาดมีความเป็นไปได้มากกว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น [8]

ซึ่งในการศึกษารุ่นนี้เลือกเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนทรงกระบอกแนวตั้ง เครื่องปฏิกรณ์จะถูกออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนแสง ความเข้มข้นของแก๊ส และอัตราการไหลแก๊ส ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องในการศึกษารุ่นนี้จะทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ คอแลเรลล่า วุลกาวิส (*Chlorella Vulgaris*) และทำการวัดคุณสมบัติของของผสมภายในเครื่อง เพื่อตรวจสอบสภาวะต่างๆภายในเครื่องปฏิกรณ์ว่าเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายหรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงเพื่อเลี้ยงสาหร่าย
2. สร้างเครื่องปฏิกรณ์
3. ทดลองเลี้ยงสาหร่าย และศึกษาสภาวะที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เลือกใช้ปฏิกรณ์แบบหมุนวนเพื่อออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสง
2. สร้างเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาได้ตามท้องตลาด
3. ทดลองเลี้ยงสาหร่าย สายพันธุ์ *คอลลเรลล่า วูลกาวิส (Chlorella Vulgaris)* โดยศึกษาอัตราการไหลของแก๊ส

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนตามหลักทฤษฎีและอ้างอิงจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
3. สร้างเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงแบบหมุนวนโดยใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาได้ตามท้องตลาด
4. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *คอลลเรลล่า วูลกาวิส (Chlorella Vulgaris)*
5. ทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ก่อนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยใช้น้ำ
6. ทดลองเลี้ยงสาหร่าย และศึกษาอัตราการไหลของแก๊ส

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงแบบหมุนวนที่มีประสิทธิภาพพร้อมใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ต่างๆ
2. ทราบถึงสภาวะการป้อนเข้าของแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *คอลลเรลล่า วูลกาวิส*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

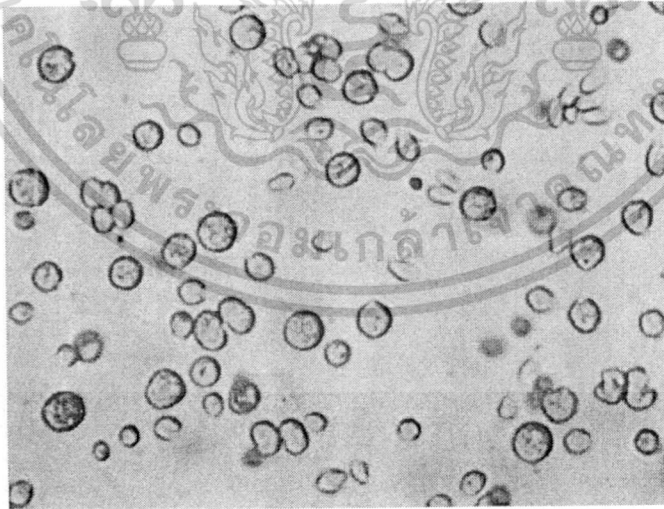
แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และการทบทวนวรรณกรรม

2.1 สาหร่ายน้ำมัน

สาหร่ายจัดเป็นพืชชั้นต่ำที่มีคลอโรพลาสต์ สามารถสังเคราะห์อาหารได้เอง และจะเติบโตในบริเวณที่มีแสงแดด และมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำสูง แต่ไม่มีส่วนที่เป็น ลำต้น ราก และใบที่แท้จริง สาหร่ายมีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงมากเมื่อเทียบกับพืชทั่วไป จึงทำให้สาหร่ายเติบโตได้อย่างรวดเร็ว โดยสามารถจำแนกสาหร่ายออกเป็น 2 กลุ่ม คือ สาหร่ายขนาดใหญ่ และสาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งพิจารณาจากขนาดของสาหร่าย สำหรับงานวิจัยนี้จะสนใจการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเท่านั้น

2.1.1 สาหร่ายขนาดเล็ก

สาหร่ายขนาดเล็กเป็นสาหร่ายที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.4 ไมโครเมตร ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า แต่สามารถมองเห็นได้ด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์ (ภาพที่ 2.1) สามารถพบได้ในน้ำจืดและน้ำเค็ม และในปัจจุบันนักวิจัยพบว่าในสาหร่ายนั้นมีองค์ประกอบที่มีคุณค่าทางอาหารมากมาย ทั้งโปรตีน แร่ธาตุ และวิตามิน นอกจากนี้ยังพบว่าในเซลล์ของสาหร่ายมีการสะสมน้ำมันอยู่สูงมากเมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่นและใช้พื้นที่เพาะปลูกน้อยกว่า เปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 สาหร่ายขนาดเล็กผ่านกล้องจุลทรรศน์

ที่มา : https://www.kit.edu/kit/english/1838_332.php

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าผลผลิตน้ำมันของพืชน้ำมันชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับสาหร่าย [10]

ชนิดพืช	ร้อยละผลได้ของน้ำมัน (ลิตร/เฮกเตอร์)
สาหร่าย (Algae)	100,000
ละหุ่ง (Castor)	1,413
มะพร้าว (Coconut)	2,689
ปาล์ม (Palm)	5,950
ดอกคำฝอย (Safflower)	779
ถั่วเหลือง (Soy)	446
ดอกทานตะวัน (Sunflower)	952

นอกจากนี้นักวิจัยยังพบว่า ปริมาณของสารอาหารที่มีในสาหร่ายจะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของสายพันธุ์ จึงต้องพิจารณาสายพันธุ์ที่ใช้เลี้ยงให้เหมาะสมกับความต้องการ จากการศึกษาพบว่า สาหร่ายบางชนิดสามารถเก็บสะสมน้ำมัน ได้มากถึงร้อยละ 70-80 ของน้ำหนักแห้ง แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณน้ำมันสะสมในสาหร่ายแต่ละชนิด [11]

สาหร่ายขนาดเล็ก	ปริมาณน้ำมัน (% น้ำหนักแห้ง)
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75
<i>Chlorella</i> sp	28-32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca</i> sp	16-37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis</i> sp	25-33
<i>Monallanthus salina</i>	>20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหร่ายขนาดเล็ก	ปริมาณน้ำมัน (% น้ำหนักแห้ง)
Nanochloris sp	20-35
Nannochloropsis sp	31-68
Neochloris oseoabundans	35-54
Nitzschia sp	45-47
Phaeodactylum tricornutum	20-30
Schizochytrium sp	50-77
Tetraselmis suecia	15-23

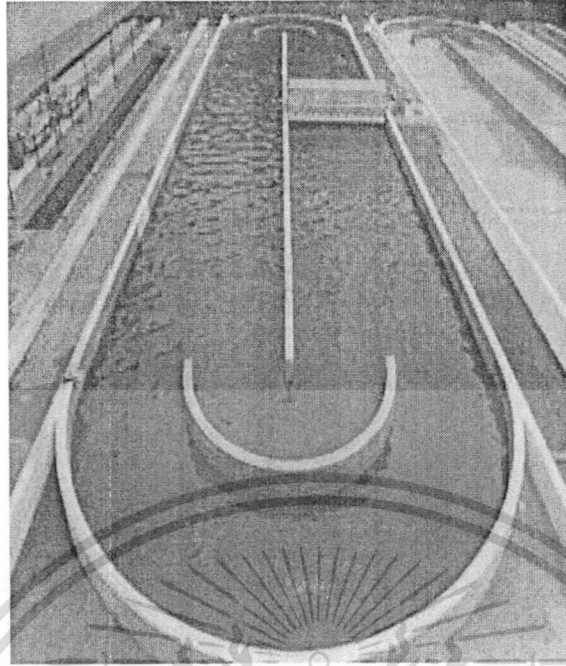
2.2 ภาพแบบการเพาะเลี้ยง

วิธีการเพาะปลูกสาหร่ายให้มีประสิทธิภาพนั้นเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจ โดยนักวิจัยได้มีการพัฒนาวิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายหลากหลายวิธีด้วยกัน โดยสามารถแบ่งระบบที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้เป็น 2 ระบบ คือ ระบบเปิด และระบบปิด ซึ่งกลไกการทำงานและลักษณะของการเพาะเลี้ยงเป็นดังต่อไปนี้

2.2.1 ระบบเปิด

เพาะเลี้ยงโดยใช้อุปกรณ์เชิงกลเพื่อช่วยให้สาหร่ายเจริญเติบโต เป็นบ่อเปิดขนาดใหญ่ กลางแจ้ง เพาะเลี้ยงในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ เช่น การเพาะเลี้ยงในบ่อเปิด (open pond) ทะเลสาบ (lagoon) หรืออาจจะเป็นบ่อวน (Raceway pond) ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ให้ระบบหมุนวน ข้อดีของการเพาะเลี้ยงในระบบเปิดคือ การก่อสร้างและการดำเนินการที่ง่ายกว่าการเพาะเลี้ยงในระบบปิด แต่มีข้อจำกัดคือ ปริมาณแสงที่ให้สาหร่าย หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่เพียงพอ และความต้องการพื้นที่ติดตั้งใช้บริเวณกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 การเพาะเลี้ยงในบ่อเปิด

ที่มา : <http://www.aban.com/facilities.html>

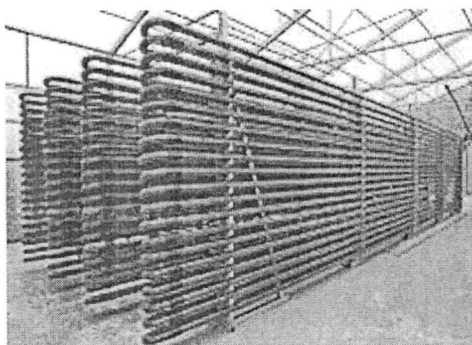
2.2.2 ระบบปิด

การเพาะเลี้ยงในระบบปิดเป็นการเพาะเลี้ยงในเครื่องปฏิกรณ์ โดยสามารถควบคุมสภาวะให้เหมาะสมตามต้องการ ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิดนั้นมีลักษณะและข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไปเพื่อปรับให้เหมาะสมกับความต้องการของการใช้งานในแต่ละประเภท ซึ่งเป็นข้อดีของการเพาะเลี้ยงในระบบปิดเมื่อเทียบกับระบบเปิด แม้ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ หรือการเพาะเลี้ยงอาจมีต้นทุนที่สูงกว่าในระบบเปิด แต่ในอุตสาหกรรมบางอย่างที่จำเป็นต้องควบคุมสภาวะ เช่น ควบคุมการปนเปื้อนของสารร้ายจากสภาพแวดล้อมภายนอก หรือควบคุมความเข้มแสงและปริมาณแก๊ส เป็นต้น ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการเพาะเลี้ยงสารร้าย สามารถแบ่งได้ดังนี้

2.2.2.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (Tubular Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อจะมีทั้งแบบแวนอนและนอนตั้ง มีลักษณะเป็นท่อทรงกลมยาวขดไปมา มักใช้เป็นท่อพลาสติกหรือท่อกระจกเป็นวัสดุให้แสงสามารถส่องผ่านไปยังสารร้ายเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสง ระบบไหลเวียนของของเหลวและแก๊สในเครื่องปฏิกรณ์เกิดขึ้น โดยการปั๊มในการเพิ่มแรงดันของของเหลวให้เคลื่อนที่ นอกจากนั้นอาจมีระบบเพิ่มเติมเพื่อนำเอาของเหลวในระบบมาเติมแก๊สที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงของสารร้ายก่อนที่จะปั๊มของเหลวเข้าไหลเวียนในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

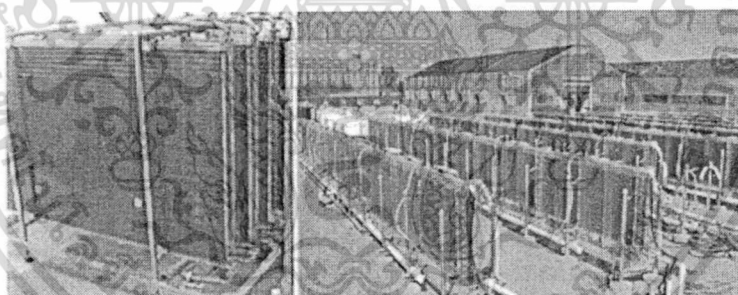


ภาพที่ 2.3 เครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบท่อ

ที่มา : http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=13437&page=47

2.2.2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบแผ่น (Flat Plate Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบแผ่นมักจะมีลักษณะเป็นแนวดิ่ง ทำด้วยวัสดุใสเป็นแผ่นสองข้างประกบกัน มีที่ว่างตรงกลางระหว่างแผ่นใสเพื่อบรรจุของเหลว ในส่วนบริเวณล่างสุดมีการปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบเกิดการไหลเวียนและแลกเปลี่ยนแก๊สให้สาหร่ายสามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์แสง ในบางครั้งอาจมีการเพิ่มหลอดไฟเข้าไปในบริเวณช่องว่างที่ใสของเหลว เพื่อใช้เป็นแสงเทียมทดแทนแสงอาทิตย์ที่อาจไม่เพียงพอในวันที่มีแสงน้อยหรือหากเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่



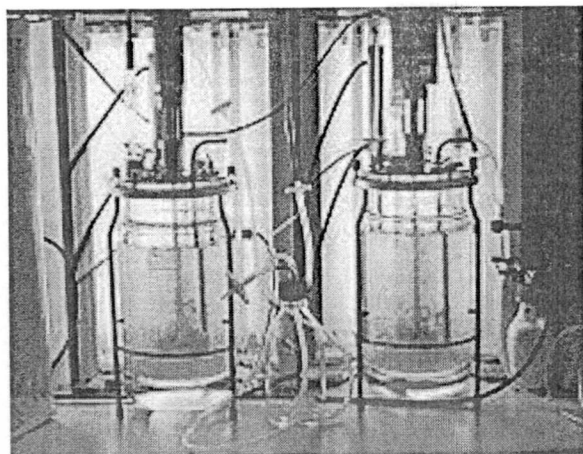
ภาพที่ 2.4 เครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบแผ่น

ที่มา : http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=13437&page=47

2.2.2.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (Stir Tank Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดถังกวนมีลักษณะเป็นทั้งภาพทรงกลมหรือทรงกระบอกขนาดใหญ่ มีการติดตั้งใบพัดให้การหมุนเวียนของของเหลวและแก๊สในระบบสามารถเกิดขึ้น อาจมีการเติมแก๊สบริเวณส่วนล่างของถัง และด้วยลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นถังขนาดใหญ่ อาจต้องมีการเพิ่มแสงเทียมเพื่อช่วยในการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ชนิดถังกวนจำเป็นต้องใช้พลังงานค่อนข้างมาก เนื่องจากมีใบพัดที่เพิ่มเติมเข้ามาในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

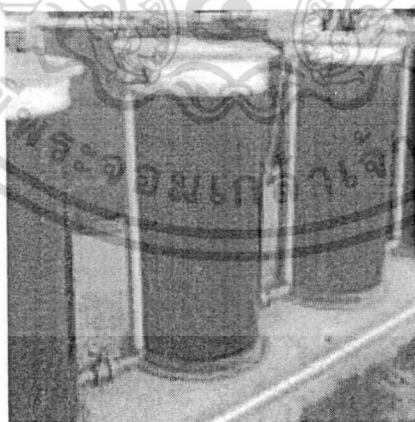


ภาพที่ 2.5 เครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบถังกวน

ที่มา : <http://en.wikipedia.org/wiki/Photobioreactor>

2.2.2.4 เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟอง (Bubble Column Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟองมีการใช้งานที่หลากหลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่เว้นแม้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกสูงในแนวตั้ง มีการป้อนแก๊สผ่านหัวกระจายแก๊สในบริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ แก๊สจะเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของเครื่อง และมีการแยกตัวออกของแก๊สออกจากของเหลวที่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ การแลกเปลี่ยนของแก๊สกับของเหลวในระบบขึ้นกับความเร็วของแก๊สและความสามารถในการละลายของแก๊สในน้ำที่ตรงมีความเหมาะสมและสัมพันธ์กัน



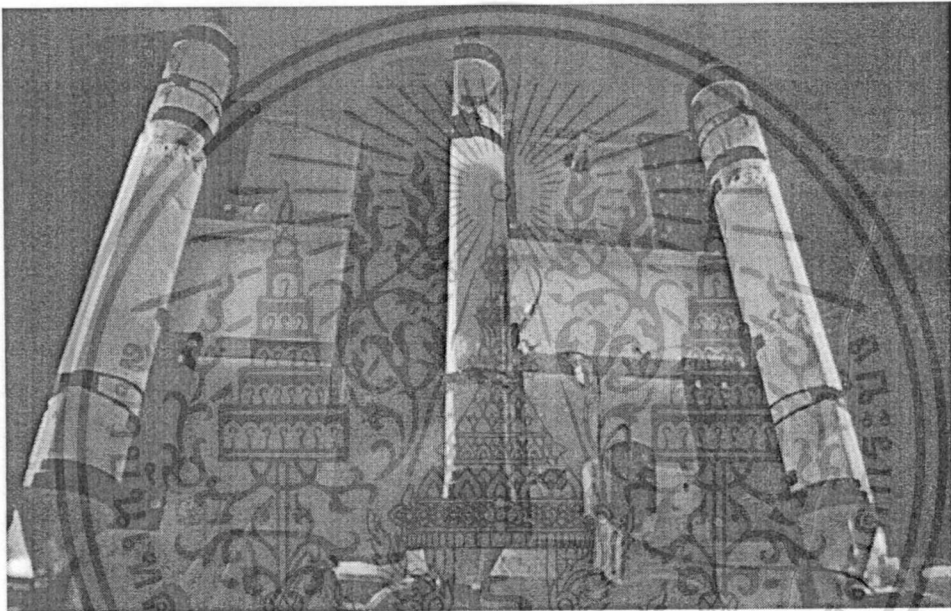
ภาพที่ 2.6 เครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบฟอง

ที่มา : <http://www.oilgae.com/blog/2015/03/control-of-co2-input-conditions-during-outdoor-culture-of-chlorella-vulgaris-in-bubble-column-photobioreactors.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.5 เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวน (Airlift Reactor)

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนมีลักษณะคล้ายคลึงกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟอง แต่มีการเพิ่มท่อที่เรียกว่า draft tube เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการไหลเวียนของของเหลวและแก๊สภายใน เครื่องปฏิกรณ์อีกทั้งความร้อนที่สามารถถ่ายเทได้ง่ายขึ้น เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนจะมีการปล่อยแก๊สในบริเวณด้านล่างของถัง โดยแก๊สจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนเช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟอง แต่จะมีการแยกของแก๊สออกด้านบนเพียงบางส่วนและมีบางส่วนไหลวนกลับลงมาในด้านล่างของระบบเครื่องปฏิกรณ์ภาพแบบนี้ มีการถ่ายเทมวล และการถ่ายเทความร้อนที่ดี



ภาพที่ 2.7 เครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบหมุนวน

ที่มา : <http://www.oilgae.com/blog/2015/03/control-of-co2-input-conditions-during-outdoor-culture-of-chlorella-vulgaris-in-bubble-column-photobioreactors.html>

ซึ่งเมื่อนำข้อดีข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ในระบบปิดมาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการเพาะปลูก การควบคุมการปนเปื้อน ขนาดพื้นที่ที่ต้องการในการเพาะปลูก และความเป็นไปได้ในการขยายขนาด เพื่อนำมาพิจารณาตัดสินใจเลือกชนิดเครื่องปฏิกรณ์ที่จะใช้ศึกษา ได้ตามตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์ระบบปิดแต่ละชนิด

ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์	ประสิทธิภาพการเพาะปลูก	การควบคุมการปนเปื้อน	ขนาดพื้นที่ที่ต้องการ	การขยายขนาด	อ้างอิง
เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (Tubular Reactor)	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง	ยาก	[17]
เครื่องปฏิกรณ์แบบแผ่น (Flat Plate Reactor)	ดีมาก	ยาก	น้อย	ยาก	[18]
เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (Stir Tank Reactor)	ดี	ยาก	มาก	ง่าย	[19]
เครื่องปฏิกรณ์แบบพ่นฟอง (Bubble Column Reactor)	พอใช้	ดี	ปานกลาง	ง่าย	[20]
เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน (Airlift Reactor)	ดี	ดีมาก	ปานกลาง	ง่าย	[21]

จากตารางที่ 2.3 เมื่อเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ในแต่ละชนิด พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อให้ประสิทธิภาพการเพาะปลูกที่ต่ำที่สุด เนื่องจากระยะเวลาของแก๊สที่ใช้เดินทางในท่อนาน สหราชอาณาจักรมีโอกาสสัมผัสกับแก๊สที่ปล่อยเข้าไปได้น้อยและไม่ทั่วถึง อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในการขยายขนาดที่ยาก สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบแผ่น ให้ประสิทธิภาพการเพาะปลูกดีมาก ลดปัญหาระยะเวลาการเดินทางของแก๊สเพื่อให้แก๊สสัมผัสกับสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์ได้ดีขึ้น แต่ยังมีปัญหาในการควบคุมการปนเปื้อนและการขยายขนาดเพราะลักษณะที่เป็นแผ่นของเครื่องปฏิกรณ์ที่บาง ทำให้เป็นข้อจำกัดในการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์จะต้องใช้พื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ให้ประสิทธิภาพการเพาะปลูกสาหร่ายที่ดี และขยายขนาดได้ง่ายกว่าแบบท่อและแบบแผ่น แต่ยังมีปัญหาการปนเปื้อนของระบบและใช้ขนาดพื้นที่กว้าง จึงไม่เหมาะกับการใช้งานจริงเพราะอาจมีผลกับต้นทุนและผลตอบแทนของการผลิต ในเครื่องปฏิกรณ์แบบพ่นฟองอากาศและเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนมีการป้องกันการปนเปื้อนดี และการขยายขนาดที่ง่าย แต่ประสิทธิภาพการเพาะปลูกของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบพ่นฟองอากาศเนื่องจากการเพิ่มท่อกลวงภายในเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหมุนวนแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ จึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนมีประสิทธิภาพในการเพาะปลูกที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำเครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายมาใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม จะเห็นได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดการหมุนวนนั้นมีความเป็นไปได้สูง เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ด้วยข้อดีดังนี้คือ การก่อสร้างง่าย มีส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ มีการถ่ายเทมวลและความร้อนที่ดี การผสมกันของของเหลวภายในเครื่องมีประสิทธิภาพ ต้องการพลังงานต่ำ และใช้ต้นทุนต่ำในการดำเนินการ โดยในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการถ่ายเทมวล (Mass transfer) ภาพแบบการผสมที่เกิดขึ้น เวลาที่ใช้ในการผสม โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ ลักษณะทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์ ความเร็วของของเหลวและแก๊ส ความเหมาะสมของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบการใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

สายพันธุ์สาหร่าย	ปริมาตรเครื่อง (ลิตร)	A_o/A_r	อัตราการไหลแก๊ส (vvm)	ความเร็วแก๊ส (cm/s)	ความเข้มข้น CO_2 (%)	อัตราการเจริญเติบโต (ต่อวัน)	อ้างอิง
<i>Hematococcus pluvialis</i>	3	3.2	N/A	0.4	1.0	0.31	[22]
<i>Chlorella sorokiniana</i>	N/A	4.4	0.33	N/A	5.0	0.25	[23]
<i>Skeletonema costatum</i>	3	3.24	N/A	1.5	อากาศบริสุทธิ์	1.68	[24]
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	17	2.63	N/A	3	อากาศบริสุทธิ์	1.78	[25]
<i>Chlorella sorokiniana</i>	1.4	N/A	0.33	N/A	4.4	N/A	[26]
<i>Anabaena</i>	1.4	1.6	0.25	N/A	1.0	N/A	[27]
<i>Spirulina platensis</i>	1.5	2.6	3.3	N/A	อากาศบริสุทธิ์	0.16-0.28	[28]
<i>Spirulina platensis</i>	1.51	1.49	1	N/A	อากาศบริสุทธิ์	0.47	[29]

หมายเหตุ : N/A คือ ไม่มีข้อมูล

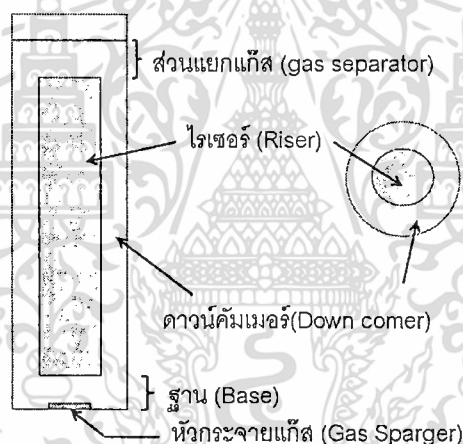
: A_o/A_r คือ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดคานาคิมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดไรเซอร์

: vvm คือ ปริมาตรแก๊สต่อปริมาตรของเหลวต่อนาที (gas volume per liquid volume per minute)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

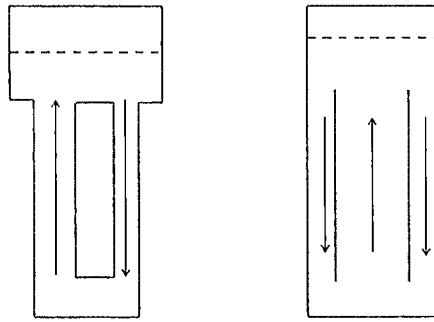
2.3 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์

ลักษณะเด่นของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนอากาศคือ ของเหลวจะไหลขึ้นจากใจกลางคอลัมน์ไปตามความสูงเครื่องปฏิกรณ์โดยการใส่ท่อกลวงและวกกลับลงสู่ด้านล่างเครื่องทำให้เกิดการผสมที่ดี เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนอากาศประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลัก ตามภาพที่ 2.8 คือส่วนไรเซอร์ (Riser) ส่วนดาวน์คัมเมอร์ (Downcomer) ส่วนฐาน (Base) และส่วนแยกแก๊ส (Gas separator) ซึ่งการออกแบบตามทฤษฎีของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนจะต้องมีความสูงของส่วนแยกแก๊สและส่วนฐานที่เท่ากัน อากาศจะถูกป้อนผ่านหัวกระจายแก๊สจากด้านล่างถึงเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนที่มีการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบนถูกเรียกว่า ไรเซอร์ และส่วนที่มีการไหลตรงข้ามถูกเรียกว่า ดาวน์คัมเมอร์ ซึ่งการไหลวนเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของผสม 2 สถานะในไรเซอร์และการไหลวนจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออัตราการไหลของแก๊สมากพอที่จะทำให้ความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถพาแก๊สที่เคลื่อนที่ขึ้นจากส่วนของไรเซอร์ไหลผ่านส่วนของดาวน์คัมเมอร์ส่วนทางกลับลงสู่ด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ [8]



ภาพที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน

เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดหมุนวนภายในและชนิดหมุนวนภายนอก ซึ่งความแตกต่างของทั้งสองชนิด อยู่ที่เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนภายนอกประกอบด้วยสองคอลัมน์ที่แยกออกจากกัน มีจุดเชื่อมต่อ 2 จุดอยู่ที่ส่วนบนและส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งความต่างนี้ส่งผลให้เกิดการแยกแก๊สในส่วนของด้านบนดัง [30] ตามภาพที่ 2.9



ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนภายใน ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนภายนอก

ภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนภายใน
เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนภายนอก

ที่มา : E. Kadic and T. J. Heindel, *An Introduction to Bioreactor Hydrodynamics and Gas-Liquid Mass Transfer*, 1 edition. Wiley, 2014

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 2.4 พบว่าการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ทุกขนาดจะต้องคำนึงถึงอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดคาน์คัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดโรเตอร์ (A_c/A_r) ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวส่งผลต่อลักษณะการไหลและความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ อัตราส่วน A_c/A_r ที่ส่งผลให้เครื่องปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายจะอยู่ในช่วง 1-5 [22-29]

2.3.1 ความเร็วของของเหลวและแก๊ส

อัตราการไหลและความเร็วของแก๊สขาเข้าส่งผลต่อความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเช่นกัน หากแก๊สขาเข้ามีความเร็วที่น้อยเกินไปของเหลวจะไม่สามารถพาฟองแก๊สกลับลงมาในส่วนของคาน์คัมเมอร์ทำให้เกิดการไหลวนของแก๊ส เวลาในการถ่ายโอนมวลระหว่างแก๊สกับของเหลวจึงลดลง แต่ถ้าความเร็วของแก๊สขาเข้ามากเกินไปจะเกิดการรวมตัวกันของฟองแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์อย่างรวดเร็วอัตราการป้อนแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์นั้นจะต้องคำนึงถึงปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์เป็นหลัก อัตราการไหลของแก๊สจึงมักนิยมเขียนในหน่วยของ ปริมาตรแก๊สต่อปริมาตรของเหลวต่ออนาที (vvm) โดยส่วนใหญ่อัตราการไหลของแก๊สที่ทำให้สาหร่ายเติบโตได้ดีจะอยู่ในช่วง 0.1-0.7 vvm [22],[25-28] แต่อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของแก๊สที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดแรงเฉือนภายในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้เซลล์สาหร่ายแตกได้

2.3.2 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายและเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของแก๊สขาเข้าโดยตรงถ้าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงและมีอัตราการไหลที่เร็วจะส่งผลให้สารอาหารภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเป็นกรดและมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่มากเกินความจำเป็น หากความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำในแก๊สขาเข้าที่มีอัตราเร็วต่ำ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จะน้อยไม่เพียงพอต่อความต้องการของสาหร่าย สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออากาศมักอยู่ในช่วง 1-5 เปอร์เซ็นต์เป็นช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม [21-22],[25-26]

ดังนั้นการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าวข้างต้นและทำการปรับเปลี่ยนให้มีความเหมาะสมกับการเลี้ยงสาหร่ายในแต่ละสายพันธุ์อีกด้วย



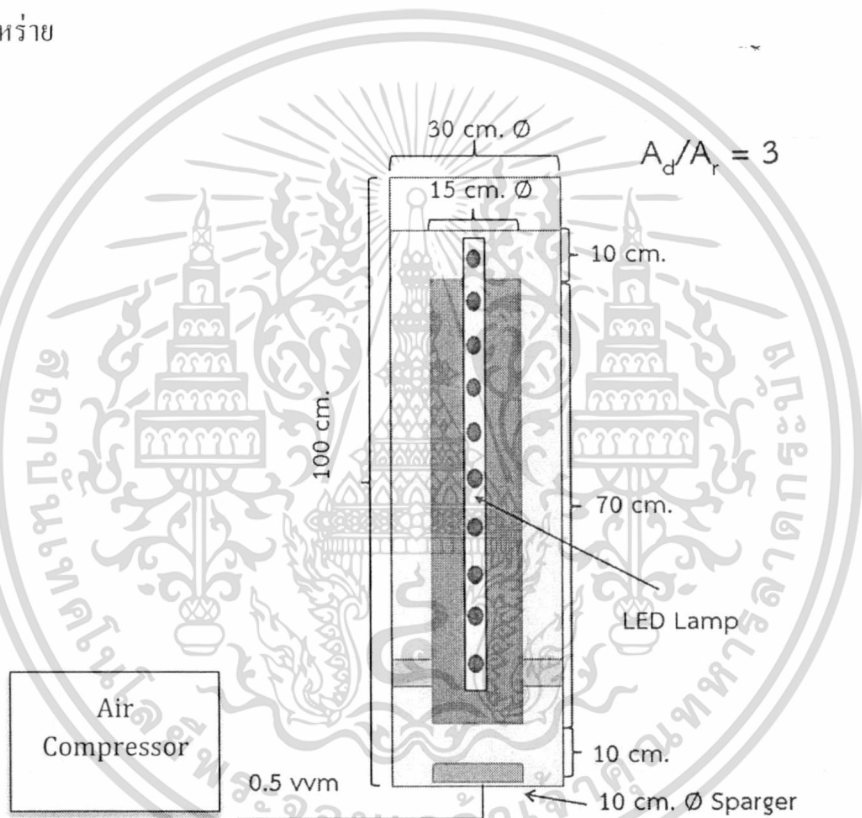
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายมีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยอุปกรณ์หลักในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายประกอบด้วย

1. เครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกออกแบบ
2. ป้อนอากาศ
3. สารอาหาร
4. หัวเชื้อสาหร่าย



ภาพที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์หลักในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

3.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์

งานวิจัยครั้งนี้เลือกศึกษาเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน (Airlift reactor) ทรงกระบอกแนวตั้ง ภายในมีท่อกลวง (Draft tube) สวมกันอยู่ เครื่องปฏิกรณ์ถูกแบ่งเป็นสองส่วนคือ คิวคัมเมอร์และไรเซอร์ โดยมีการเติมอากาศเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จากทางด้านล่างของไรเซอร์ทำให้ของผสมภายในไรเซอร์เคลื่อนที่ขึ้นในส่วนไรเซอร์และเคลื่อนที่ลงในส่วนของคิวคัมเมอร์ ก่อให้เกิดการหมุนวนในแนวแกนตั้งภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องปฏิกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์ออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนแสง ความเข้มข้นของแก๊ส อัตราการไหล แก๊สได้ การออกแบบคำนึงถึงอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดควาน์คัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดของไรเซอร์ ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์และการเจริญเติบโตของสาหร่าย เมื่ออัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดควาน์คัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดของไรเซอร์ลดลงจะทำให้ความเร็วในการไหลวนของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ใช้เวลาในการไหลวนครบรอบนานขึ้น ทำให้การถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวและแก๊สดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า A_d/A_r ที่น้อยมากๆ ความเร็วของของไหลในไรเซอร์จะลดลงจนไม่สามารถพาแก๊สกลับสู่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ผ่านทางควาน์คัมเมอร์ทำให้ถ่ายโอนมวลได้ไม่ดี ถ้าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์ (d_p/d_r) เท่ากับ 0.5-0.6 หรือ A_d/A_r เท่ากับ 1.77-3 นั้นของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์จะใช้เวลานานวนน้อยที่สุด [32] ทำให้มีปริมาณแก๊สสะสมในเครื่องปฏิกรณ์ (Gas- holdup) มากขึ้นเกิดการถ่ายโอนมวลที่ได้น้อย เครื่องปฏิกรณ์การเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่ดีนั้นต้องมี ระยะเวลาการหมุนวนและการถ่ายโอนมวลที่เหมาะสมจากการออกแบบตามหลักของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3.1

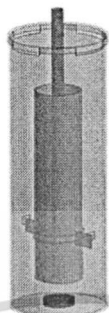
ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดและมิติของเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสง

องค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์	ขนาด(เซนติเมตร)
ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์	100
เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์	30
ความสูงของท่อกลาง	70
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลาง	15
ความสูงหลอดไฟ	80
ระยะห่างระหว่างท่อกลางกับระดับน้ำ	10
เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกระจายแก๊ส	10
ระยะห่างระหว่างท่อกลางกับก้นถัง	10
เส้นผ่านศูนย์กลางหลอดไฟ	3

ตัวเครื่องปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิกใส ซึ่งมีคุณสมบัติโปร่งใส แข็งแรง สามารถป้องกันคราบสกปรก ทนทานต่อน้ำ และทนทานต่อการล้างทำความสะอาดด้วยกรด [33] ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกรณ์จะถูกกำหนดด้วยขนาดของวัสดุที่หาได้ทั่วไปในท้องตลาดคือ 30 เซนติเมตร อัตราส่วน A_0/A_1 เท่ากับ 3 เพื่อให้ของเหลวใช้เวลาในการไหลน้อยที่สุด



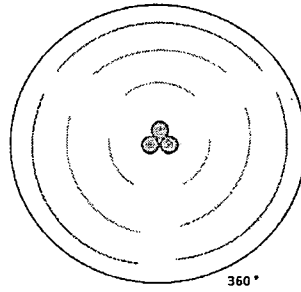
ภาพที่ 3.2 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย

เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ จะทำการเลี้ยงสาหร่าย ซึ่งสาหร่ายในแต่ละชนิดมีวิธีการเพาะเลี้ยง อาหาร และการดูแล ที่แตกต่างกัน สาหร่ายที่ถูกเลือกนำมาเพาะเลี้ยงเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องปฏิกรณ์ในครั้งนี้คือ สายพันธุ์ *คลอเรลล่า วูลกาวิส* เนื่องจากเป็นสายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตน้ำมันและโปรตีนสูงโดยเทียบจากน้ำหนัก และหาได้ง่าย จึงเหมาะที่จะนำมาศึกษา

การเลือกองค์ประกอบสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *คลอเรลล่า วูลกาวิส* จำเป็นต้องควบคุมให้อยู่ในสภาวะต่างๆดังนี้

1. แสง จากการศึกษาพบว่าสาหร่ายสายพันธุ์ *คลอเรลล่า วูลกาวิส* สามารถเจริญเติบโตในแสงทุกความยาวคลื่น แต่จะเจริญเติบโตได้ดีเมื่อให้แสงที่มีที่ความยาวคลื่น 620-660 นาโนเมตร ความเข้มแสงอยู่ในช่วง 1600-2000 PPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) [34] การศึกษานี้จึงเลือกใช้แสงไฟจากหลอด LED สีแดงที่มีความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปกติทั่วไปแผงไฟ LED จะมีการส่องสว่างด้านเดียว และกระจายแสงเพียง 120 องศาเท่านั้น จึงนำแผงของหลอดไฟ LED มาดัดแปลง โดยใช้ LED สามชุดประกอบกันเพื่อให้การกระจายของแสงครบ 360 องศา ซึ่ง ตามภาพที่ 3.3 ครอบด้วยหลอดแก้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ภายในห้องคลวงบริเวณศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์
2. ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ถูกกำหนดไว้ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตรอากาศด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 0.4 ปริมาตรแก๊สต่อปริมาตรสารอาหารต่อนาที (vvm) [35] เมื่อคำนวณที่ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ 57 ลิตรจะต้องใช้อัตราการไหลของแก๊สประมาณ 22 ลิตรต่อนาที แต่เนื่องจากการทดลองเลี้ยงเบื้องต้นต้องใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากถังซึ่งมีราคาแพงจึงปรับเปลี่ยนเป็นการป้อนอากาศซึ่งแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 การประกอบแผงหลอด LED เพื่อให้ได้การกระจายแสง 360 องศา

3.2 การเตรียม Medium Culture

สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายนอกจากแสงและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตแล้ว สาหร่ายยังจำเป็นต้องมีอาหารที่ใช้สำหรับเลี้ยง ประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิด ซึ่งปริมาณสารเคมีที่ใช้ต่อปริมาตรน้ำ 1 ลิตร จะแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สูตรอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายต่อปริมาตรน้ำ 1 ลิตร

ลำดับ	ชื่อสาร	สูตร	น้ำหนักที่ใช้/ลิตร (กรัม)
1	โพแทสเซียมไนเตรท	KNO_3	1.25
2	โมโนโพแทสเซียมไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต	KH_2PO_4	1.25
3	แมกนีเซียมซัลเฟต 7-ไฮเดรต	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1
4	แคลเซียมคลอไรด์	CaCl_2	0.084
5	กรดบอริก	H_3BO_3	0.114
6	เฟอร์รัสซัลเฟต 7-ไฮเดรต	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.05
7	ซิงค์ซัลเฟต 7-ไฮเดรต	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.088
8	แมงกานีสคลอไรด์ 4-ไฮเดรต	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	ชื่อสาร	สูตร	น้ำหนักที่ใช้/ลิตร (กรัม)
9	โมลิบดีนัมออกไซด์	MoO ₃	0.007
10	คอปเปอร์ซัลเฟต 5-ไฮเดรต	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.016
11	โคบอลต์ไนเตรท 6-ไฮเดรต	Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0.005
12	อีดีทีเอ	EDTA	0.5

3.3 การทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ เครื่องปฏิกรณ์และวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการขยายพันธุ์ สาหร่าย

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายจำเป็นต้องมีการดูแลการปนเปื้อนของแบคทีเรียเป็นพิเศษ เพราะแบคทีเรียส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของสาหร่ายที่ทำการเพาะเลี้ยง โดยทั่วไปการกำจัดแบคทีเรียใช้วิธีการอบด้วยอุณหภูมิสูงอย่างน้อย 105 องศา ประมาณ 1-2 ชั่วโมง จึงสามารถใช้วิธีการอบฆ่าเชื้อได้เฉพาะการเพาะเลี้ยงที่ใช้ภาชนะขนาดเล็กคือ ขวดภาพชมพูนขนาด 250 มิลลิลิตร และขวดแก้วขนาด 2 ลิตร ที่ใช้สำหรับขยายพันธุ์สาหร่ายก่อนที่นำไปเลี้ยงในเครื่องปฏิกรณ์ แต่ด้วยเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่เกินกว่าจะทำการอบด้วยเครื่องอบจึงต้องทำความสะอาดตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 การทำความสะอาดเครื่องด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์

การทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (CINaO) ในการทดลองใช้น้ำยาซักผ้าขาวยี่ห้อไฮเตอร์ขวดสีฟ้าซึ่งมีคุณสมบัติในการกำจัดเชื้อราและแบคทีเรียและไม่มีส่วนผสมของสารให้ความหอม แช่ทิ้งไว้ 10 นาที

3.3.2 การทำความสะอาดเครื่องด้วยเตทอด

ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำยาฆ่าเชื้อ โรค เลือกใช้น้ำยาฆ่าเชื้อ โรคเตทอด แช่ทิ้งไว้ 60 นาที จากนั้นเทออกแล้วล้างด้วยน้ำสะอาดที่ปราศจากเชื้อ โรค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทำความสะอาดขั้นสุดท้าย

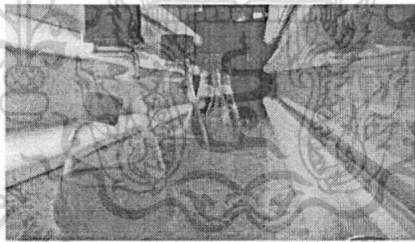
แช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าสารเคมีไม่มีตกค้างในเครื่องปฏิกรณ์

3.4 การเตรียมหัวเชื้อ

สำหรับสายที่รับได้มาจากคณะเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีปริมาณไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องทำการขยายพันธุ์เพื่อเพิ่มปริมาณเอง ก่อนนำไปเพาะเลี้ยงในเครื่องปฏิกรณ์มีทั้งหมด 2 ขั้นตอนดังนี้

3.4.1 เตรียมเชื้อในขวด 250 มิลลิลิตร

การเตรียมเชื้อสายที่รับได้มาจำเป็นต้องควบคุมการปนเปื้อน ซึ่งควบคุมได้ง่ายในขวดขนาดเล็ก โดยเตรียมเชื้อสายที่รับได้มาปริมาณ 150 มิลลิลิตรในขวดภาพหมฟู่จำนวน 5 ขวด ก่อนนำสายและอาหารเลี้ยงสายมาผสมกันในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ของสายที่โตเต็มที่ต่อปริมาตร Medium Culture ปิดจุกด้วยสำลีพันผ้าก๊อช ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นแสงเทียมในการช่วยให้สายเจริญเติบโตได้ดีขึ้น เขย่าเข้าเย็น ให้สายไม่ตกตะกอนลงก้นขวดแล้ว วัตถุประสงค์เจริญเติบโตทุกวัน โดยใช้เวลาในการเพาะเลี้ยงประมาณ 4-7 วันในขั้นตอนนี้ตามภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 การเพาะเลี้ยงสายในขวด 250 มิลลิลิตร

3.4.2 เตรียมในขวด 2 ลิตร

หลังจากที่ได้เตรียมหัวเชื้อขึ้นต้นแล้ว จำเป็นต้องขยายพันธุ์อีกรอบในขวดขนาด 2 ลิตร โดยใช้อัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกับการเตรียมขั้นแรก จึงใช้หัวเชื้อทั้งหมด 600 มิลลิลิตร ในส่วนที่เหลืออีก 150 ลิตร นำกลับไปขยายพันธุ์ในขวดภาพหมฟู่เพื่อใช้ในการเลี้ยงครั้งต่อไป การเพาะเลี้ยงสายในขวด ขนาด 2 ลิตร จำเป็นต้องป้อนอากาศเพื่อให้สายได้มีการเจริญเติบโตที่ดี ใช้เวลาในการเพาะเลี้ยงประมาณ 7-10 วันให้สายเติบโตเต็มที่ ก่อนนำไปเลี้ยงในเครื่องปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวิเคราะห์ผล

3.5.1 การวัดการเจริญเติบโตของสาหร่าย

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย สามารถทำได้ โดยการวัดค่าการเจริญเติบโต ผ่านค่าการดูดกลืนแสงของสาหร่าย (Optical density) โดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectroscopy โดยที่สาหร่าย *คลอเรลล่า วูลกาวิส* เป็นสาหร่ายสีเขียว สามารถดูดกลืนแสงได้ดี ในช่วงแสงสีแดงและน้ำเงิน มีช่วงความยาวคลื่นอยู่ที่ 420-460 นาโนเมตรสำหรับแสงสีแดง และ 630-660 นาโนเมตรในแสงสีน้ำเงินพบว่า ในช่วงความยาวคลื่นที่ 420-460 มีค่าดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ 430 นาโนเมตร และในช่วงความยาวคลื่นที่ 630-660 มีค่าดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ 640 นาโนเมตร สำหรับการวัดค่าการดูดกลืนแสงจะทำการสุ่มตัวอย่างทุกวัน ทั้งในบริเวณด้านบนและด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อสาหร่ายเจริญเติบโตจะทำให้มีค่าดูดกลืนแสงที่เพิ่มมากขึ้นและสามารถนำมาวิเคราะห์การเจริญเติบโตของสาหร่ายได้

นอกจากนี้ด้วยการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการใส่หลอดไฟ LED กลางเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อสาหร่ายเจริญเติบโตและมีความหนาแน่นมากขึ้น จะทำให้แสงจากด้านบนสามารถส่องสว่างออกมา บริเวณนอกถังเครื่องปฏิกรณ์ได้น้อยลง จึงมีการวัดค่าเพื่อตรวจสอบและหาแนวโน้มการลดลงของความเข้มแสงโดยใช้ Lux meter เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบในอนาคตที่สามารถปรับแสงไฟให้มีความเหมาะสม และเป็นการประหยัดไฟได้

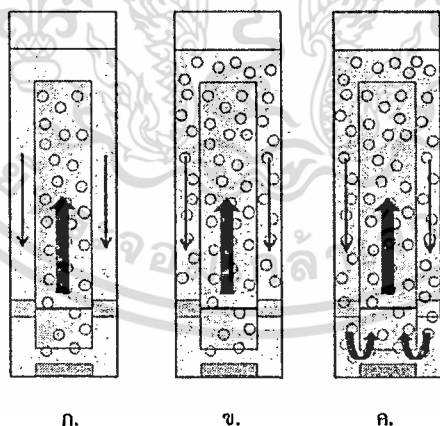
บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ถูกออกแบบตามทฤษฎีของปฏิกรณ์หมุนวน โดยมีขนาดและมิติของเครื่องปฏิกรณ์
สังเคราะห์แสงตามแสดงในบทที่ 3

4.2 การทดสอบพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์

จากการทดสอบพฤติกรรมการไหลเบื้องต้นด้วยเม็ดพอลิเมอร์พอลิโพรพิลีนซึ่งมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำพบว่าที่อัตราการไหลที่กำหนดคือ 22 ลิตรต่อนาที ขณะที่เกิดอุปกรณ์เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ฟองแก๊สขนาดเล็กจะไหลขึ้นสู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ในส่วนของไรเซอร์แล้วตกกลับลงมาทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ผ่านทางควาน์คัมเมอร์ ให้ลักษณะการไหลที่สมบูรณ์ (ตามภาพ 4.1 ค) ซึ่งฟองแก๊สมีเวลาในการสัมผัสกับของเหลวมากที่สุดทำให้มีการแลกเปลี่ยนมวลสารดีที่สุดเมื่อเทียบกับการไหลภาพแบบอื่นภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเท่ากัน ภาพแบบการไหลดังกล่าวจึงเหมาะสมเพื่อให้มีการถ่ายเทมวลสารอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงพร้อมที่จะนำไปใช้งานสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย



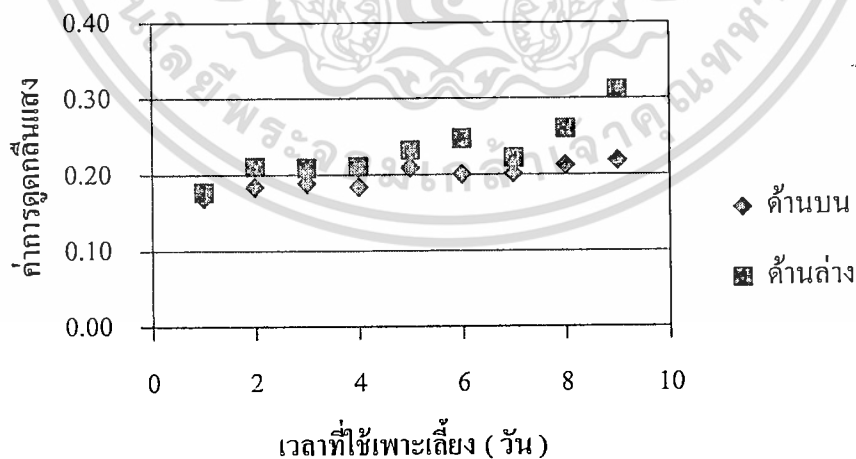
ภาพที่ 4.1 แผนภาพการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน ก) การไหลเวียนเฉพาะส่วนไรเซอร์ จ)
การไหลเวียนแบบไม่ครบรอบการไหล ค) การไหลเวียนแบบสมบูรณ์

ที่มา : E. Kadic and T. J. Heindel, *An Introduction to Bioreactor Hydrodynamics and Gas-Liquid Mass Transfer*, 1 edition. Wiley, 2014

อย่างไรก็ตาม ภาพแบบการไหลแบบที่ 4.1 ค) ถ้าความเร็วของของเหลวที่มากขึ้นไปอาจส่งผลให้เกิดแรงเฉือนซึ่งไม่เป็นผลดีต่อสารร้าย อาจทำให้เซลล์สารร้ายแตกได้ [31] การศึกษาการเพาะปลูก สารร้ายขนาดเล็ก คอลเรลล่า วุลกาวิส โดยกำหนดอัตราการไหลของแก๊สเข้าที่ต่างกันและสภาวะบางประการที่แตกต่าง

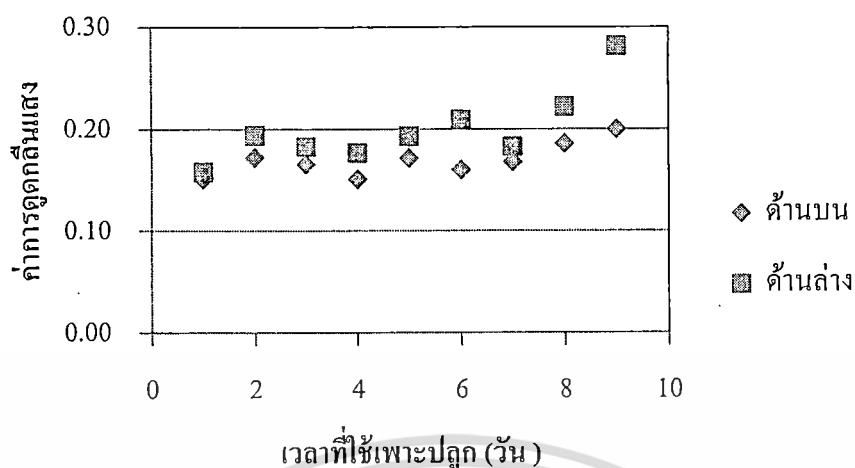
ครั้งที่ 1

ตัวแปร	สภาวะที่ใช้จริง
อัตราการไหลแก๊ส	5 ลิตร/นาที (0.09 vvm)
บีมที่ใช้	บีมอากาศขนาดเล็ก
ตัวกรองอากาศ	ไม่มี
สารเคมี	AR เกรด
การล้างเครื่อง	แช่ไฮเตอร์ แช่เคทตอล แช่น้ำ 24 ชั่วโมง
สาเหตุที่หยุดการเพาะปลูก	น้ำรั่ว, อัตราการไหลไม่เสถียร

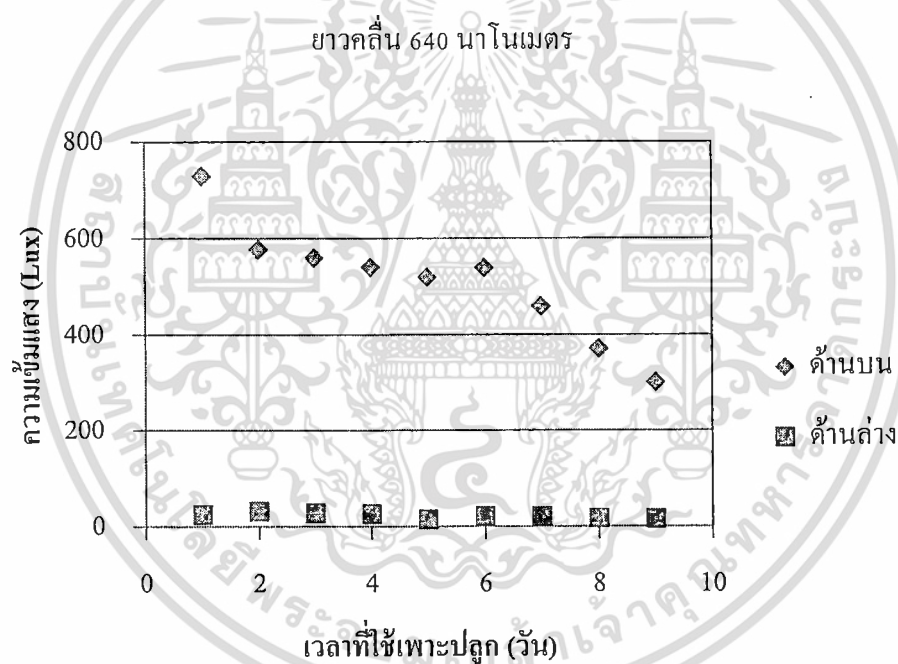


ภาพที่ 4.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สารร้ายในการเพาะปลูกสารร้ายครั้งที่ 1 ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สำหรับใช้ในการเพาะปลูกสำหรับครั้งที่ 1 ที่ความ



ภาพที่ 4.4 แสดงค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ในการเพาะปลูกครั้งที่ 1

การเพาะปลูกสำหรับในครั้งที่ 1 ได้กำหนดอัตราการไหลของอากาศเข้า 5 ลิตรต่อนาทีซึ่งเท่ากับ 0.09 vvm โดยใช้ปั๊มอากาศขนาดเล็กแต่เนื่องจากการประกอบด้วยการติดกาวที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ไม่หนาแน่นพอทำให้น้ำรั่วออกทางด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลให้เมื่อเลี้ยงไปถึงวันที่ 9 ปริมาณน้ำลดลงจนถึงขอบด้านบนของท่อกลวง น้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์จึงไม่เกิดการไหลวนทำให้ต้องหยุดการเพาะเลี้ยง จากภาพที่ 4.2 และ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้เพาะปลูกกับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

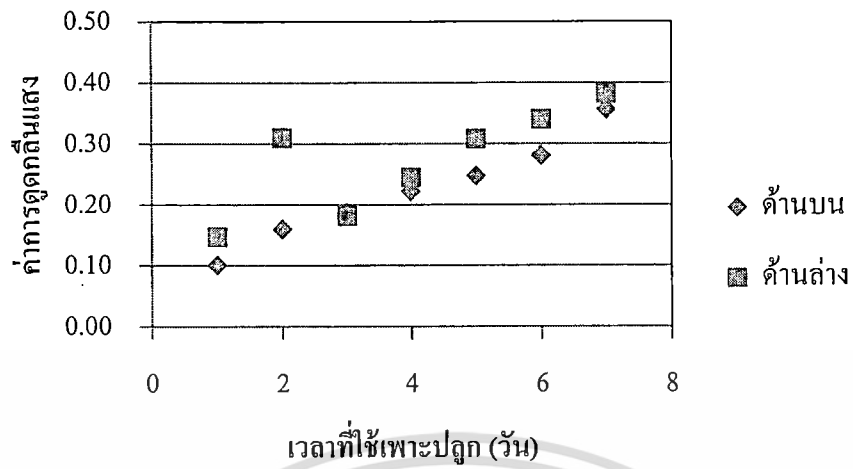
การดูดกลืนแสงพบว่า ค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในวันที่ 2 และมีค่าเกือบคงที่จนถึงวันที่ 6 หมายถึงปริมาณเซลล์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อสังเกตความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงระหว่างตัวอย่างจากตัวอย่างที่เก็บจากทางด้านบนและตัวอย่างที่เก็บจากทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์พบว่าค่าการดูดกลืนแสงทางด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าค่าการดูดกลืนแสงทางด้านบนเล็กน้อยนั่นคือ เซลล์สาหร่ายทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์หนาแน่นกว่าเซลล์สาหร่ายด้านบนเครื่องปฏิกรณ์ และยิ่งเวลาผ่านไปมากขึ้นความต่างของค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทั้งสองจะยิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงวันที่ 9 จะมีความแตกต่างมากเนื่องจากเกิดการรั่วไหลของเครื่องปฏิกรณ์ทำให้สาหร่ายเริ่มตกตะกอนเพราะการไหลเวียนไม่สมบูรณ์

จากภาพ 4.4 ค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบนนั้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในวันที่ 2 ของการเพาะปลูก จากนั้นมีค่าคงที่จนถึงวันที่ 6 ของการเพาะเลี้ยงเนื่องจากความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือเกือบคงที่สอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างภายในเครื่องปฏิกรณ์ ค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์มีค่าต่ำและไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากบริเวณที่วัดความเข้มแสงนั้นระดับต่ำเกินไป แสงที่ให้แก่เครื่องปฏิกรณ์ไม่สามารถส่องถึง สามารถแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนบริเวณวัดความเข้มแสง

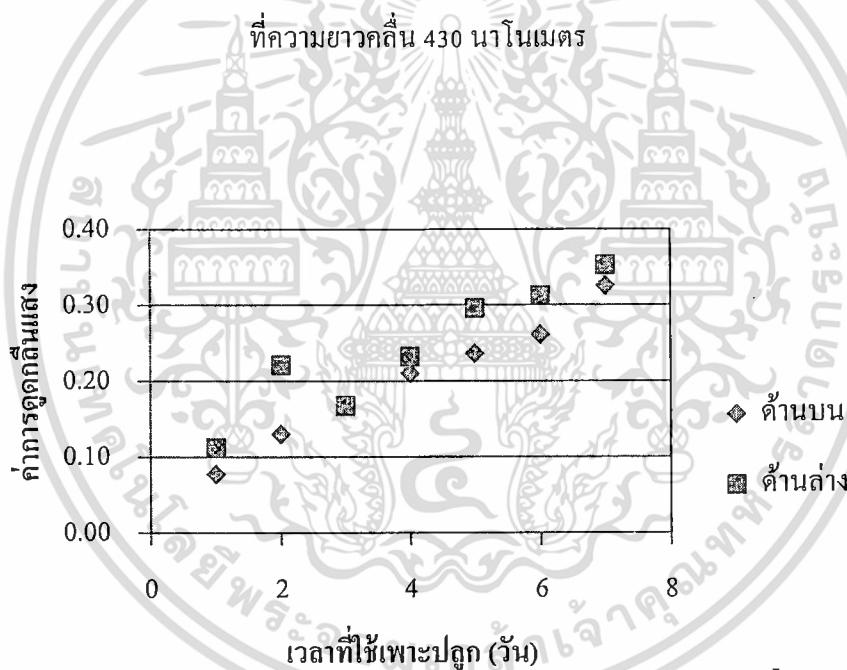
ครั้งที่ 2

ตัวแปร	สถานะที่ใช้จริง
อัตราการไหลแก๊ส	5 ลิตร/นาที่
ปั๊มที่ใช้	ปั๊มอากาศ
ตัวกรองอากาศ	ไม่มี
สารเคมี	commercial เกรด
การล้างเครื่อง	แช่ไฮเตอร์ แช่เดทอล แช่น้ำ 24 ชั่วโมง
สาเหตุที่หยุดการเพาะปลูก	สาหร่ายตาย วันที่ 8 ของการเพาะปลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



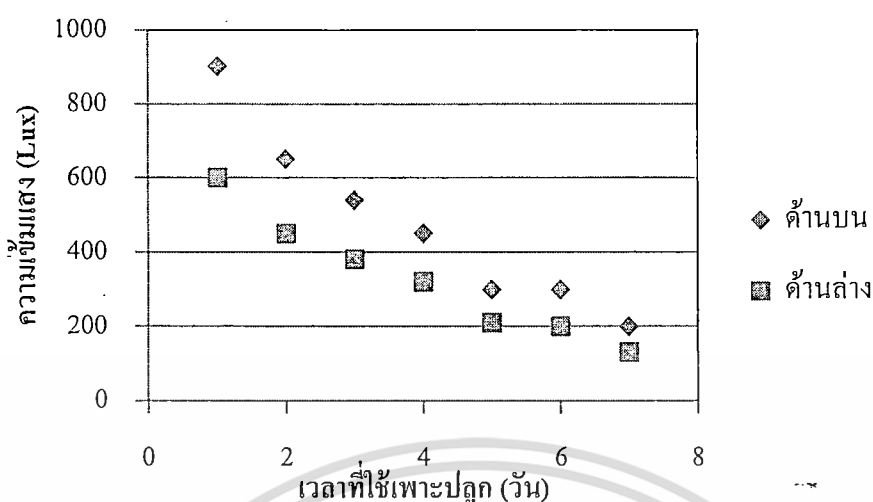
ภาพที่ 4.5 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สำหรับใช้ในการเพาะปลูกสาหร่ายครั้งที่ 2



ภาพที่ 4.6 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สำหรับใช้ในการเพาะปลูกสาหร่ายครั้งที่ 2

ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 แสดงค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ในการเพาะปลูกครั้งที่ 2

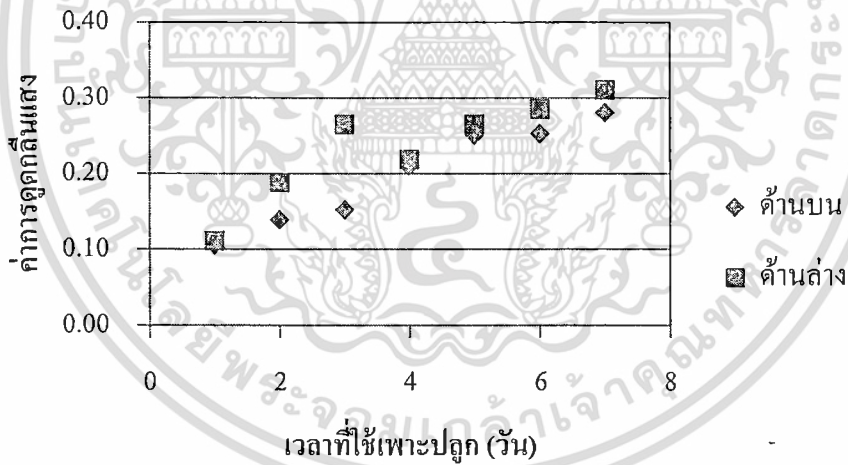
การเพาะปลูกในครั้งที่ 2 ได้ทำการแก้ไขการรั่วซึมของเครื่องปฏิกรณ์และเปลี่ยนจากบ่มอากาศขนาดเล็กเป็นบ่มอากาศขนาดกลาง โดยการเพาะปลูกสาหร่ายในครั้งที่ 2 นั้นกำหนดให้มีสภาวะการเพาะปลูกเช่นเดียวกับการเพาะปลูกครั้งที่ 1 พบว่าที่สภาวะเดียวกัน หากเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเสถียรมากกว่าสาหร่ายจะเจริญเติบโตได้ดีกว่า สังเกตได้จากค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในภาพที่ 4.5 และ 4.6 และเมื่อสังเกตค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ถูกเก็บจากทางด้านล่างและด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าระบบที่ไม่เสถียร (การเพาะปลูกครั้งที่ 1) เป็นการบ่งชี้ว่าระบบมีการไหลเวียนแบบสมบูรณ์

ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทางด้านล่างในวันที่ 2 ของการเพาะเลี้ยงนั้นมีค่าสูงกว่าปกติ อาจเกิดจากตัวอย่างที่เก็บมีตะกอนขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากเซลล์สาหร่ายเกาะกลุ่มกันหรือเกิดการนอนก้นของเซลล์สาหร่ายบริเวณบอวลวาล์วที่ใช้เก็บตัวอย่าง ทำให้ตัวอย่างที่เก็บได้เข้มข้นกว่าความเป็นจริง

หลังจากการปรับบริเวณการวัดค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่างให้สูงขึ้นทำให้ได้ค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ดังภาพ 4.7 พบว่าค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงเริ่มต้นค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านบนและด้านล่างมีค่าต่างกันมากและมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป

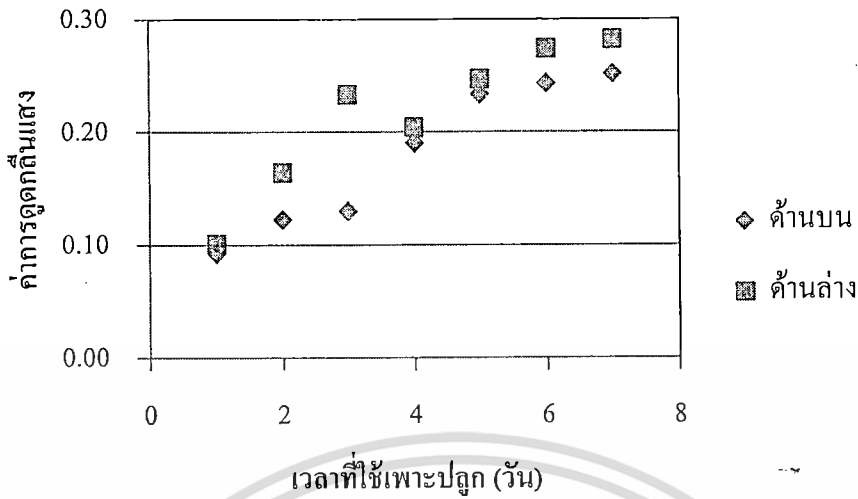
ครั้งที่ 3

ตัวแปร	สภาวะที่ใช้จริง
อัตราการไหลแก๊ส	10 ลิตร/นาที
บีมที่ใช้	บีมอากาศ
ตัวกรองอากาศ	ไม่มี
สารเคมี	commercial เกรด
การล้างเครื่อง	แช่ไฮเตอร์ แช่เคทตอล แช่น้ำ 24 ชั่วโมง
สาเหตุที่เลิกเลี้ยง	สาหร่ายตาย วันที่ 8



ภาพที่ 4.8 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในการเพาะปลูกสาหร่ายครั้งที่ 3 ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในการเพาะปลูกสาหร่ายครั้งที่ 3 ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร



ภาพที่ 4.10 แสดงค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ในการเพาะปลูกครั้งที่ 3

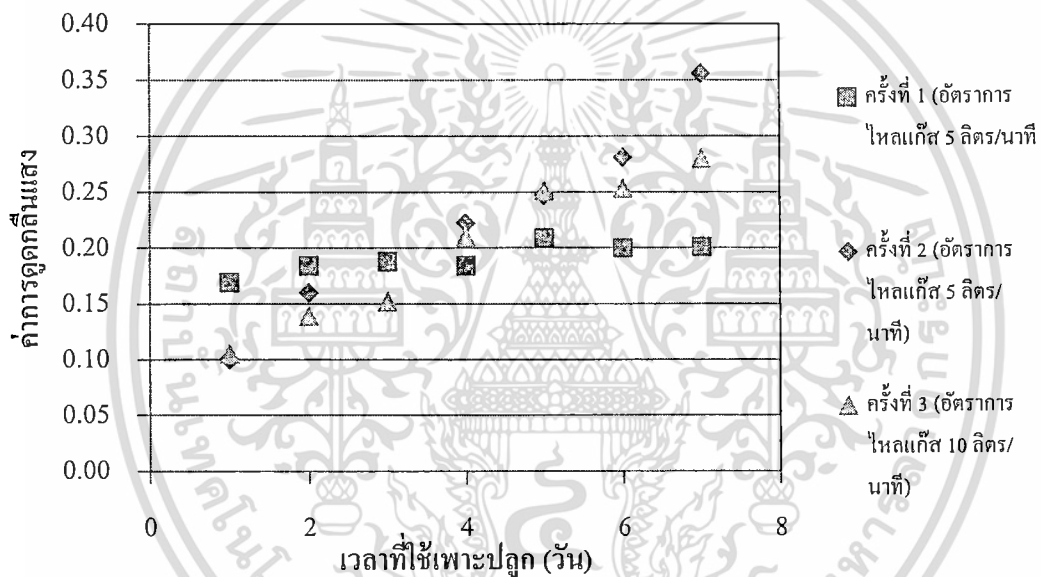
เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สเข้าเป็น 10 ลิตรต่อนาทีหรือเท่ากับ 0.18 vvm พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเลี้ยงที่เพิ่มขึ้น และความต่างของค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ถูกเก็บจากตำแหน่งที่ต่างกันนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าการเพาะปลูกที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาทีดังภาพที่ 4.8 และ 4.9 แต่ยังมีค่าการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวอย่างในวันที่ 3 ที่สูงกว่าค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างในวันที่ 4 ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดในการเก็บตัวอย่างหรือความผิดพลาดจากการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามค่าการดูดกลืนแสงยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

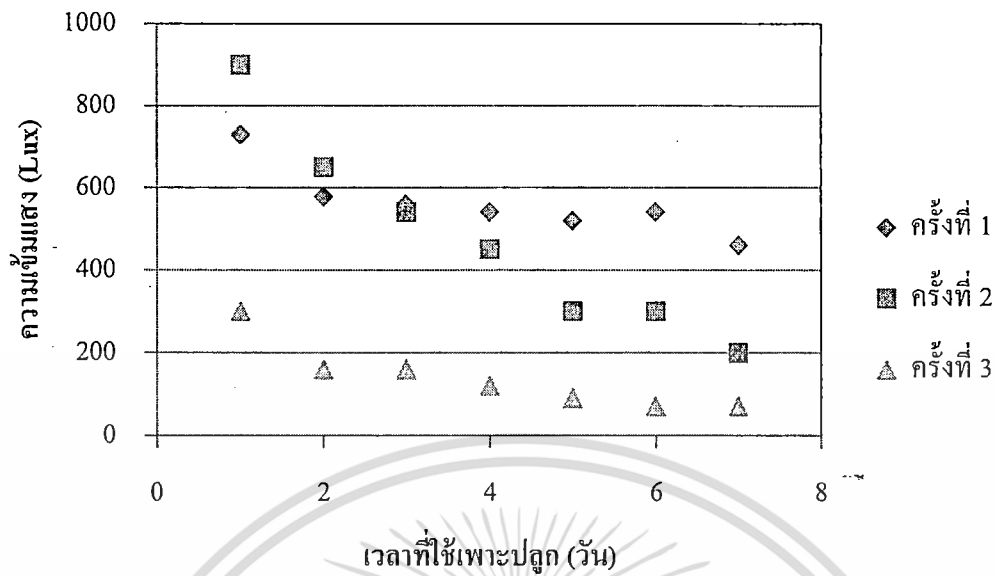
จากภาพที่ 4.10 พบว่าค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในวันแรก จากนั้นลดลงอย่างคงที่และมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป หมายถึงความหนาแน่นของเซลล์ภายในบริเวณต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์จะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อปริมาณเซลล์สาหร่ายเพิ่มขึ้น

การเปรียบเทียบอัตราการไหลของแก๊สเข้ากับค่าการดูดกลืนแสงทั้งสามครั้งเป็นไปตามภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของอาหารและเซลล์สาหร่ายที่ทำการเพาะปลูกแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์เมื่อทำการเพาะปลูกแต่ละครั้ง

จากภาพที่ 4.11 พบว่าการเพาะปลูกสาหร่ายในครั้งที่ 1 ที่มีอัตราการไหลของแก๊สเข้า 5 ลิตร ต่อนาทีที่มีความหนาแน่นเริ่มต้นของเซลล์สาหร่ายมากที่สุดแต่มีการเพิ่มขึ้นของเซลล์สาหร่ายน้อยทำให้ในวันที่ 7 ของการเพาะปลูกสาหร่ายในครั้งที่ 1 มีความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายน้อยที่สุด เนื่องจากมีสภาวะการเพาะปลูกที่ไม่สม่ำเสมอ ปริมาณของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ลดลงอย่างต่อเนื่องทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ไม่ดีและทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อน เมื่อทดลองในสภาวะเดิมซ้ำอีกครั้งหลังจากมีการแก้ไขข้อบกพร่องของเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าแม้ความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นน้อยกว่าในครั้งที่ 1 แต่สาหร่ายก็มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดทำให้สารอาหารและเซลล์สาหร่ายมีค่าการดูดกลืนแสงในวันที่ 7 เท่ากับ 0.35 และเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สเข้าเพิ่มขึ้นเป็น 10 ลิตรต่อนาทีสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ไม่ดีเท่าการเพาะปลูกที่มีอัตราการไหลของแก๊สเข้า 5 ลิตรต่อนาที แต่อาจเป็นผลมาจากความเข้มแสงเริ่มต้นที่น้อยเกินไป เนื่องจากความผิดปกติของหลอดไฟ ดังภาพที่ 4.12 พบว่าความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์เริ่มต้นประมาณ 300 Lux ในขณะที่การทดลองครั้งที่ 1 และ 2 มีความเข้มแสงเริ่มต้นประมาณ 700 Lux และ 900 Lux ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ทำการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงเพื่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยองค์ประกอบสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ คือ ชนิดของแหล่งกำเนิดแสง สารอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่าย และอัตราการป้อนอากาศ ซึ่งสามารถทำการปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของสายพันธุ์สาหร่ายที่นำมาเพาะเลี้ยง โดยการออกแบบอ้างอิงจากหลักการของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน โดยมีความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ 100 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ 30 เซนติเมตร ความสูงของท่อกลวง 70 เซนติเมตร อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดควมเมอร์ต่อไรเซอร์ (A_u/A_r) เท่ากับ 3 ระยะห่างระหว่างท่อกลวงกับกันลึง 10 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างท่อกลวงกับระดับของเหลว 10 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางหัวกระจายแก๊ส 10 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่อหลอดไฟ 3 เซนติเมตร ความสูงท่อหลอดไฟ 80 เซนติเมตร สำหรับกรณีศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *คอลเรลล่า วูลกาวิส* นั้นพบว่าจากการทดสอบเบื้องต้นสาหร่ายภายในปฏิกรณ์สามารถมีการหมุนวนที่ดี และผลจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 430 และ 640 นาโนเมตรพบว่าเซลล์สาหร่ายผสมสารอาหารในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามลำดับ และความเข้มแสงภายนอกเครื่องปฏิกรณ์มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งหมายถึงสาหร่ายมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น สำหรับทั้งอัตราเร็วอากาศ 5 และ 10 ลิตรต่อนาที

5.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องปฏิกรณ์ถูกผสมแบบใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสามารถมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆและนำหลักการใช้งานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาประยุกต์ใช้ดังนี้

1. แสง

งานวิจัยครั้งนี้แหล่งกำเนิดแสงใช้พลังงานจากไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งแหล่งพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) เช่น โซลาร์เซลล์ กังหันลม หรือการเก็บพลังงานเหลือใช้จากเปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ที่สามารถแปลงพลังงานจากการสั่นสะเทือนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้

2. สารอาหาร

สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด การนำน้ำทิ้งจากโรงงานมาเพาะเลี้ยงสาหร่ายนอกจากจะลดต้นทุนการผลิตแล้วยังเป็นการบำบัดน้ำทิ้งด้วยในตัว เพราะสาหร่ายจะใช้แร่ธาตุและสารเคมีในน้ำทิ้งเพื่อการเจริญเติบโตเป็นการลดความเข้มข้นของแร่ธาตุและสารเคมีบางชนิดจึงเป็นการบำบัดน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

สำหรับศึกษาในห้องทดลองจำเป็นต้องใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบถังอัดความดันและอากาศแบบถังอัดความดันเพื่อให้สามารถปรับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ได้ แต่ในการใช้งานจริงสามารถใช้แก๊สจากปล่องควันของโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงไฟฟ้าได้ แต่ต้องปรับให้มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมก่อน เนื่องจากสาหร่ายใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสง การใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากปล่องควันเพาะเลี้ยงสาหร่ายเป็นการบำบัดแก๊สเสียด้วยเช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลผลิตงานวิจัย

6.1 สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 “Changes: Cleaner Energy, Leaner Processes, Better Living” จังหวัดเชียงใหม่ 18-19 ธันวาคม 2557

จตุพร ภัคดี ณัฐจักร วงศ์คำ ฉวีณีพร พิชรวรโชติ และธนวรรณ พิณรัตน์ เครื่องปฏิกรณ์ลูกผสมแบบใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella Vulgaris* ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 ธันวาคม 2557

บทความนี้แสดงในภาคผนวก ข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Spolaore, C. Joannis-Cassan, E. Duran, and A. Isambert, "Commercial applications of microalgae," *J. Biosci. Bioeng.*, vol. 101, no. 2, pp. 87–96, Feb. 2006.
- [2] T. M. Mata, A. A. Martins, and N. S. Caetano, "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 217–232, Jan. 2010.
- [3] M. R. Brown, M. Mular, I. Miller, C. Farmer, and C. Trenerry, "The vitamin content of microalgae used in aquaculture," *J. Appl. Phycol.*, vol. 11, no. 3, pp. 247–255, Jun. 1999.
- [4] C.-Y. Chen, K.-L. Yeh, R. Aisyah, D.-J. Lee, and J.-S. Chang, "Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 71–81, Jan. 2011.
- [5] A. Salis, M. Nicolò, S. Guglielmino, and V. Solinas, "Biodiesel from Microalgae," in *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*, K. N. Timmis, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 2827–2839.
- [6] Y. Li, M. Horsman, N. Wu, C. Q. Lan, and N. Dubois-Calero, "Biofuels from microalgae," *Biotechnol. Prog.*, vol. 24, no. 4, pp. 815–820, Aug. 2008.
- [7] T. M. Mata, A. A. Martins, and N. S. Caetano, "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 217–232, Jan. 2010.
- [8] L. E. Erickson, "Airlift bioreactors, by M.Y. Chisti. First edition, 1989, 345 pages. Elsevier applied science, London, England and New York, USA \$74.00 (U.S.)," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 68, no. 2, pp. 349–349, Apr. 1990.
- [9] Available online at https://www.kit.edu/kit/english/1838_332.php

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Demirbas, A. and Demirbas, M.F. (2011) Importance of Algae Oil as Source of Biodiesel. *Energy Conversion Management*, 52, 163-170.
- [11] L. Gouveia, *Microalgae as a Feedstock for Biofuels*, Springer Briefs in Microbiology, 2009
- [12] Available online at <http://www.aban.com/facilities.html>
- [13] Available online at <http://en.wikipedia.org/wiki/Photobioreactor>
- [14] Available online at http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=13437&page=47
- [15] Available online at <http://www.oilgae.com/blog/2015/03/control-of-co2-input-conditions-during-outdoor-culture-of-chlorella-vulgaris-in-bubble-column-photobioreactors.html>
- [16] Available online at <http://www3.imperial.ac.uk/ceREaCT/people1/phdstudents/pongsathorndechatiwongse>
- [17] C. U. Ugwu, H. Aoyagi, and H. Uchiyama, "Photobioreactors for mass cultivation of algae," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 10, pp. 4021–4028, Jul. 2008.
- [18] A. Massart, A. Mirisola, D. Lupant, D. Thomas, and A.-L. Hantson, "Experimental characterization and numerical simulation of the hydrodynamics in an airlift photobioreactor for microalgae cultures," *Algal Res.*
- [19] M. Hernández, G. Quijano, R. Muñoz, and S. Bordel, "Modeling of VOC mass transfer in two-liquid phase stirred tank, biotrickling filter and airlift reactors," *Chem. Eng. J.*, vol. 172, no. 2–3, pp. 961–969, Aug. 2011.
- [20] S. Yadala and S. Cremaschi, "Design and optimization of artificial cultivation units for algae production," *Energy*, Jun. 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] M. H. Abdel-Aziz, I. Nirdosh, and G. H. Sedahmed, "Liquid–solid mass and heat transfer behavior of a concentric tube airlift reactor," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 58, no. 1–2, pp. 735–739, Mar. 2013.
- [22] K. Kaewpintong, A. Shotipruk, S. Powtongsook, and P. Pavasant, "Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of *Haematococcus pluvialis* in airlift bioreactor," *Bioresour. Technol.*, vol. 98, no. 2, pp. 288–295, Jan. 2007.
- [23] K. Kumar and D. Das, "Growth characteristics of *Chlorella sorokiniana* in airlift and bubble column photobioreactors," *Bioresour. Technol.*, vol. 116, pp. 307–313, Jul. 2012.
- [24] S. Monkonsit, S. Powtongsook, and P. Pavasant, "Comparison between Airlift Photobioreactor and Bubble Column for *Skeletonema Costatum* Cultivation," *Eng. J.*, vol. 15, no. 4, pp. 53–64, Mar. 2011.
- [25] S. Krichnavaruk, W. Loataweesup, S. Powtongsook, and P. Pavasant, "Optimal growth conditions and the cultivation of *Chaetoceros calcitrans* in airlift photobioreactor," *Chem. Eng. J.*, vol. 105, no. 3, pp. 91–98, Jan. 2005.
- [26] K. Kumar, D. Banerjee, and D. Das, "Carbon dioxide sequestration from industrial flue gas by *Chlorella sorokiniana*," *Bioresour. Technol.*, vol. 152, pp. 225–233, Jan. 2014.
- [27] B. K. Nayak, S. Roy, and D. Das, "Biohydrogen production from algal biomass (*Anabaena* sp. PCC 7120) cultivated in airlift photobioreactor," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, no. 14, pp. 7553–7560, May 2014.
- [28] X. Yuan, A. Kumar, A. K. Sahu, and S. J. Ergas, "Impact of ammonia concentration on *Spirulina platensis* growth in an airlift photobioreactor," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 3, pp. 3234–3239, Feb. 2011.

[29] S. Oncel and F. V. Sukan, "Comparison of two different pneumatically mixed column photobioreactors for the cultivation of *Arthrospira platensis* (*Spirulina platensis*)," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 11, pp. 4755–4760, Jul. 2008.

[30] K. Mohanty, D. Das, and M. N. Biswas, "Hydrodynamics of a novel multi-stage external loop airlift reactor," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 61, no. 14, pp. 4617–4624, Jul. 2006

[31] E. Kadic and T. J. Heindel, *An Introduction to Bioreactor Hydrodynamics and Gas-Liquid Mass Transfer*, 1 edition. Wiley, 2014

[32] P. WEILAND, "Influence of Draft Tube Diameter on Operation Behavior of Airlift Loop Reactors," *Ger Chem Eng*, vol. 7, pp. 374–385, 1984.

[33] Available online at http://dundean.com/tips_what_is_latex_paint.shtml

[34] C. Yan, X. Luo, and Z. Zheng, "Effects of various LED light qualities and light intensity supply

[35] H. Zheng, Z. Gao, F. Yin, X. Ji, and H. Huang, "Effect of CO₂ supply conditions on lipid production of *Chlorella vulgaris* from enzymatic hydrolysates of lipid-extracted microalgal biomass residues," *Bioresour. Technol.*, vol. 126, pp. 24–30, Dec. 2012.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก สรุปลำค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย

รหัสโครงการ/รหัสสัญญา 2557-01-01077.....



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 4 รอบ 18 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2557

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน(แบบปกติ) แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เครื่องปฏิกรณ์ลูกผสมแบบใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

(ภาษาอังกฤษ) Novel Hybrid Photobioreactor for algae cultivation

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 31 มีนาคม 2557 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2558

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี 6 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2556 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2558

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินต่ำกว่างวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1150,000 บาท 100 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป) 21 ตุลาคม 2557

งวดที่ 2 บาท % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย)บาท(คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร :ค่าจ้างชั่วคราว	0	0	0
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	0	0	0
ค่าใช้สอย	10,000	10,000	0
ค่าวัสดุ	120,000	120,000	0
ค่าสาธารณูปโภค	20,000	20,000	0
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	0	0	0
รวม	150,000	150,000	0

.....
 อ.ดร. อานนท์ นิลรัตน์
 (.....)

.....
 ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

.....
 (.....)
 ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน/เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง

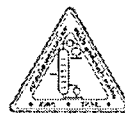
หมายเหตุ : นักวิจัยหรือเจ้าหน้าที่การเงินสามารถปรับหรือเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมข้อความได้ตามความเหมาะสมและสอดคล้องกับการดำเนินงาน อาทิเช่น นักวิจัยอยู่ระหว่างการดำเนินการเคลียร์ด้านเอกสารทางการเงิน หรือข้อความอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข เอกสารหลักฐานอ้างอิงของผลผลิต จากบทที่ 6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เครื่องปฏิกรณ์ลูกผสมแบบใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์

Chlorella Vulgaris

จตุพร ภัคดี ธีรจักร วงศ์คำ ญาณิพร พัทธวรโชติ และธนวรรณ พิณรัตน์*

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล kptanawa@gmail.com

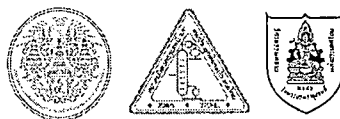
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาและออกแบบเครื่องปฏิกรณ์การสังเคราะห์แสงแบบลูกผสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella Vulgaris* การออกแบบอ้างอิงจากระบบการเพาะเลี้ยงแบบหมุนเวียนอากาศโดยใช้แสง วัสดุทำด้วยอะคริลิกใสรูปทรงกระบอกสองชั้นซ้อนกัน การหมุนเวียนของเหลวในถังปฏิกรณ์ขึ้นอยู่กับสองส่วน คือ บริเวณไรเซอร์และดาวนคัมเมอร์ ซึ่งบริเวณไรเซอร์เป็นบริเวณที่ของไหลเคลื่อนที่ตามทิศของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งกำเนิด ส่วนบริเวณ ดาวนคัมเมอร์มีทิศทางตรงข้าม โดยที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้นประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ถูกป้อนเข้าบริเวณด้านล่างของเครื่องผ่านหัวกระจายแก๊ส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร อัตราการไหลสามารถปรับให้เหมาะสมกับการไหลเวียนและการเจริญเติบโตของสาหร่าย ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 50 ลิตร อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลางต่อเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 0.5 จากการสังเกตปรากฏการณ์การไหลเวียนพบว่าเครื่องปฏิกรณ์ให้การไหลเวียนที่เหมาะสม บริเวณกลางทรงกระบอกภายในติดตั้งหลอดไฟชนิด LED สีแดงซึ่งมีช่วงคลื่นแสงที่เหมาะสมเป็นแหล่งกำเนิดแสงให้สาหร่ายใช้สังเคราะห์สารอาหารพบว่าเครื่องแบบปฏิกรณ์ลูกผสมแบบระบบหมุนเวียนอากาศเหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella Vulgaris* คำสำคัญ : เครื่องปฏิกรณ์การสังเคราะห์แสงแบบระบบหมุนเวียนอากาศ, สาหร่าย *Chlorella Vulgaris*, ปรากฏการณ์การไหล

1. บทนำ

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างมากสำหรับการดำรงชีวิตของมนุษย์ และมีแนวโน้มความต้องการเพิ่มมากขึ้นในอนาคต แต่พลังงานนั้นลดน้อยลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากพลังงานปิโตรเลียม ต้องอาศัยการสะสมสารประกอบอินทรีย์เป็นเวลานานก่อน เปลี่ยนสภาพเป็นปิโตรเลียมอีกทั้งการใช้งานเชื้อเพลิงเหล่านี้ยังส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีและแสวงหาพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากปิโตรเลียม นอกจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำแล้ว การสกัดน้ำมันจากสาหร่ายนับเป็นแหล่งพลังงานสำคัญอย่างหนึ่ง เพราะสาหร่ายมีอัตราการขยายพันธุ์รวดเร็ว วงจรชีวิตสั้น ใช้พื้นที่และน้ำในการเพาะปลูกน้อยกว่าพืชยืนต้น [1,2]

สาหร่ายขนาดเล็ก (microalgae) มีองค์ประกอบภายในแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ บางชนิดอุดมไปด้วยโปรตีน พบว่าในสาหร่ายขนาดเล็กบางสายพันธุ์มีปริมาณโปรตีนมากกว่าในถั่วเหลืองและนม [3] ทำให้สาหร่ายถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากโปรตีนแล้วสาหร่ายยังมีวิตามิน คอลลาเจน ส่งผลให้เกิดการวิจัยและพัฒนาสาหร่ายเพื่อใช้เป็นยารักษาโรค ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม และเครื่องสำอาง [4,5] น้ำมันก็เป็นส่วนประกอบสำคัญที่พบในสาหร่าย พบว่าในเซลล์สาหร่ายส่วนใหญ่มีปริมาณน้ำมันประมาณ 20-40 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแห้งและอาจสูงถึง 75 เปอร์เซ็นต์ขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่ายและ



สภาวะการเพาะปลูก [6] สาหร่ายสามารถผลิตน้ำมันได้มากกว่าพืชยืนต้นเช่น มะพร้าว ปาล์ม ในขณะที่พืชยืนต้นเช่น ปาล์มน้ำมัน ใช้พื้นที่เพาะปลูกมากกว่าสาหร่ายถึง 20 เท่าตัวเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันที่เท่ากัน [7]

จากการศึกษาค้นคว้าการแปรรูปสาหร่ายเป็นน้ำมันอย่างจริงจังของหลากหลายองค์กรทั่วโลกพบว่าปัญหาที่สำคัญคือการเพิ่มปริมาณการผลิตให้อยู่ในระดับอุตสาหกรรมนั้นยังขาดความชัดเจนของกระบวนการผลิตและเพาะปลูก การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในระบบปิดยังมีข้อจำกัดในการขยายขนาดเครื่องเพาะเลี้ยงให้เข้าสู่ระบบอุตสาหกรรม แต่ระบบปิดนี้สามารถควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและสิ่งปนเปื้อน เพื่อคุณภาพของผลผลิตและความคุ้มค่า [4] หัวข้อการวิจัยเพื่อศึกษาถึงระบบการเพาะปลูกสาหร่ายที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นที่น่าสนใจและเครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนเวียนอากาศเป็นตัวเลือกที่ถูกนำมาศึกษา เนื่องจากใช้พื้นที่ในการผลิตน้อย มีประสิทธิภาพการเพาะปลูกที่ดีและการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรมมีความเป็นไปได้มากกว่า เครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น [8]

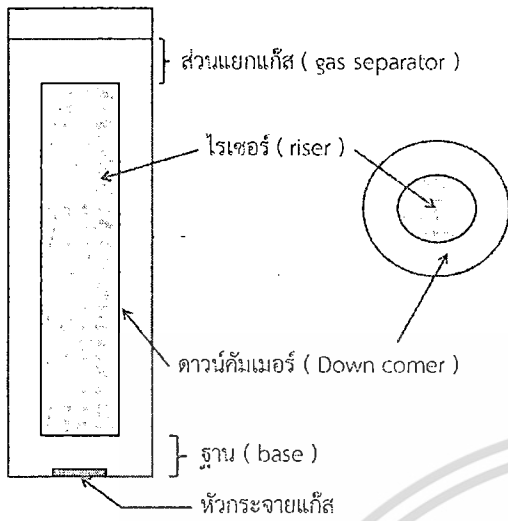
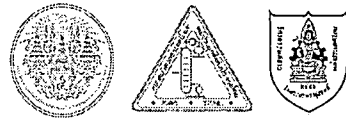
2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จากการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เพาะเลี้ยงแบบต่างๆ พบว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอากาศสามารถควบคุมสภาวะในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้ดีที่สุด ใช้พื้นที่ไม่มากและง่ายต่อการขยายขนาดสู่อุตสาหกรรม เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ระบบปิดชนิดอื่น ดังตารางที่ 1 ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอากาศจึงถูกนำมาศึกษา

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิด [9]

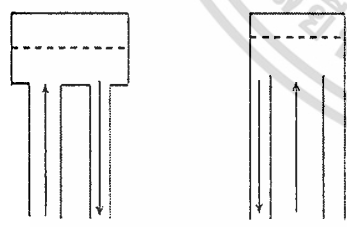
ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์	ประสิทธิภาพการเพาะปลูก	การควบคุมการปนเปื้อน	ขนาดพื้นที่เพาะปลูก	การขยายขนาด
แบบท่อ	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง	ยาก
แบบแผ่น	ดีมาก	ยาก	น้อย	ยาก
แบบถังกวน	ดี	ยาก	ใหญ่	ง่าย
แบบฟองอากาศ	พอใช้	ดี	ปานกลาง	ง่าย
แบบหมุนเวียนอากาศ	ดี	ดีมาก	ปานกลาง	ง่าย

เมื่อไม่นานมานี้เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอากาศถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ด้วยข้อดีดังนี้ การก่อสร้างง่าย มีส่วนที่ไม่เคลื่อนไหว มีการถ่ายเทมวลและความร้อนที่ดี การผสมกันของของเหลวภายในเครื่องมีประสิทธิภาพ ต้องการพลังงานต่ำ และใช้ต้นทุนต่ำในการดำเนินการ ซึ่งลักษณะเด่นของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอากาศคือ ของเหลวจะไหลขึ้นจากใจกลางคอลัมน์ไปตามความสูงเครื่องปฏิกรณ์โดยการใส่ท่อกลวง เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอากาศประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักตามรูปที่ 1 คือส่วนไรเซอร์ (riser) ส่วนดาวน์คัมเมอร์ (downcomer) ส่วนฐาน (base) และส่วนแยกแก๊ส (gas separator) อากาศจะถูกป้อนผ่านหัวกระจายแก๊สจากด้านล่างถึงเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนที่มีการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบนถูกเรียกว่า ไรเซอร์ และส่วนที่มีการไหลตรงข้ามถูกเรียกว่า ดาวน์คัมเมอร์ ซึ่งการไหลเวียนเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของผสม 2 สถานะในไรเซอร์และการไหลเวียนจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออัตราการไหลของแก๊สมากพอ [8] ที่จะทำให้ความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถพาแก๊สที่เคลื่อนที่ขึ้นจากส่วนของไรเซอร์ไหลผ่านส่วนของดาวน์คัมเมอร์ส่วนทางกลับลงสู่ด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนอากาศ

เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดหมุนเวียนภายในและชนิดหมุนเวียนภายนอก ซึ่งความแตกต่างกันของทั้งสองชนิด อยู่ที่เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนภายนอกประกอบด้วยสองคอลัมน์ที่แยกออกจากกัน มีจุดเชื่อมต่อ 2 จุดอยู่ที่ส่วนบนและส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งความต่างนี้ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของการแยกแก๊สในส่วนของด้านบนถึง [10] ตามรูปที่ 2



ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนภายนอก ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนภายใน

รูปที่ 2 แสดงลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนภายนอก ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนภายใน [11]

เครื่องปฏิกรณ์ลูกผสมแบบใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสามารถมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆและนำหลักการใช้งานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาประยุกต์ใช้ดังนี้

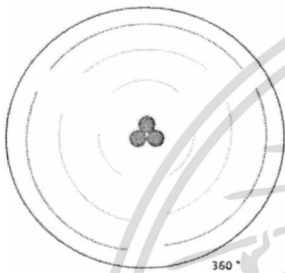
1. แสง ปัจจุบันแหล่งกำเนิดแสงใช้พลังงานจากไฟฟ้าโดยตรงซึ่งแหล่งพลังงานไฟฟ้างานดังกล่าวสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานจากโซลาเซลล์ กังหันลม หรือ เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ที่สามารถแปลงพลังงานจากการสั่นสะเทือนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้
2. สารอาหาร สาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด การนำน้ำทิ้งจากโรงงานมาเพาะเลี้ยงสาหร่ายนอกจากจะลดต้นทุนการผลิตแล้วยังเป็นการบำบัดน้ำทิ้งไปในตัว เพราะสาหร่ายจะใช้แร่ธาตุและสารเคมีในน้ำทิ้งเพื่อการเจริญเติบโตเป็นการลดความเข้มข้นของแร่ธาตุและสารเคมีบางชนิดจึงเป็นการบำบัดน้ำเสีย [2,4]
3. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในการศึกษาจำเป็นต้องใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบอัดความดันและอากาศแบบอัดความดันเพื่อให้สามารถปรับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ได้ แต่ในการใช้งานจริงสามารถใช้แก๊สจากปล่องควันของโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงไฟฟ้าได้ แต่ต้องปรับให้มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมก่อน เนื่องจากสาหร่ายใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสงการใช้แก๊สจากปล่องควันเพาะเลี้ยงสาหร่ายเป็นการบำบัดแก๊สเสียด้วยเช่นกัน [2,4]

การเลือกองค์ประกอบสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella Vulgaris* จำเป็นต้องควบคุมให้อยู่ในสภาวะต่างๆดังนี้

1. แสง จากการศึกษาพบว่าสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella Vulgaris* มีการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง 620-630 นาโนเมตร ความเข้มแสงอยู่ในช่วง 1600-2000 PPF ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-2}$) [12] การศึกษานี้จึงเลือกใช้แสงไฟจากหลอด LED สีแดงที่มีความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปกติทั่วไปแผงไฟ LED จะมีการส่องสว่างด้านเดียว และกระจายแสงแค่ 120 องศาเท่านั้น นำแผงของหลอดไฟ LED มาดัดแปลง โดยใช้ LED สามัญชุดประกบกันเพื่อให้การกระจายของแสงครบ 360 องศา ซึ่ง ตามรูปที่ 3 ครอบด้วย

หลอดแก้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ภายในท่อ กลวงบริเวณศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์

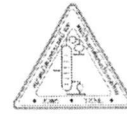
2. ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นของ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกกำหนดไว้ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตร อากาศด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 0.1 ปริมาตรแก๊สต่อปริมาตร สารอาหารต่อนาที (vvm) [13] เมื่อคำนวณที่ปริมาตรเครื่อง ปฏิกรณ์ 57 ลิตรจะต้องใช้อัตราการไหลของแก๊สประมาณ 22 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 3 การประกอบแผงหลอด LED เพื่อให้ได้การกระจายแสง 360 องศา

3. ผลการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้เลือกศึกษาเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน (Airlift reactor) ทรงกระบอกแนวตั้ง ภายในมีท่อกลาง (draft tube) สวมกันอยู่ เครื่องปฏิกรณ์ถูกแบ่งเป็นสองส่วนคือ ตาวันคัมเมอร์และโรเซอร์ โดยมีการเติมอากาศผสมแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จากทางด้านล่างของโร เซอร์ทำให้ของผสมภายในโรเซอร์ เคลื่อนที่ขึ้นและเคลื่อนที่ลงใน ส่วนของตาวันคัมเมอร์ ก่อให้เกิดการหมุนเวียนในแนวแกนตั้ง ภายในเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์ออกแบบให้สามารถ ปรับเปลี่ยนแสง ความเข้มข้นของแก๊ส อัตราการไหลแก๊สได้ การ ออกแบบคำนึงถึงอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดตาวันคัมเมอร์ต่อ พื้นที่หน้าตัดของโรเซอร์ ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวมีผลต่อความเร็ว ลักษณะการไหลของของผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์และการ เจริญเติบโตของสาหร่ายพันธุ์ *Chlorella Vulgaris* ถ้าอัตราส่วน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่อง ปฏิกรณ์ (d_c/d_r) เท่ากับ 0.5-0.6 นั้นของไหลภายในเครื่อง

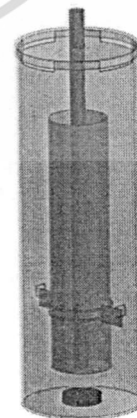


ปฏิกรณ์จะใช้เวลาหมุนวนน้อยที่สุด [14] เครื่องปฏิกรณ์การ เเพาะเลี้ยงสาหร่ายที่ดีนั้นต้องมี ระยะเวลาการหมุนวน และการ ถ่ายโอนมวลที่เหมาะสมจากการออกแบบตามหลักของเครื่อง ปฏิกรณ์แบบหมุนวน ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบสำหรับ งานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงขนาดและมิติของเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสง

องค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์	ขนาด(เซนติเมตร)
ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์	100
เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์	30
ความสูงของท่อกลาง	70
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลาง	15
ระยะห่างระหว่างท่อกลางกับก้นถัง	10
ระยะห่างระหว่างท่อกลางกับระดับน้ำ	10
เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกระจายแก๊ส	10
เส้นผ่านศูนย์กลางหลอดไฟ	3
ความสูงหลอดไฟ	80

ตัวเครื่องปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิกใส ซึ่งมีอะคริลิกมีคุณสมบัติ โปร่งใส แข็งแรง สามารถป้องกันคราบสกปรก ทนทานต่อน้ำ และ ทนทานต่อการล้างทำความสะอาดด้วยกรด [15] ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์จึงถูกกำหนดด้วยขนาดของวัสดุที่ทำ ได้ทั่วไปในท้องตลาดคือ 30 เซนติเมตร อัตราส่วนของเส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อกลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 0.5 เพื่อให้ของเหลวใช้เวลาในการไหลวนน้อยที่สุด ดังรูปที่ 4

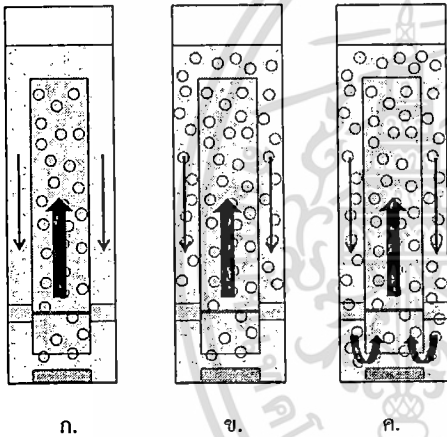


รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์ลูกผสมแบบ ใหม่สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella Vulgaris*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากการทดสอบพฤติกรรมการไหลเบื้องต้นด้วยเม็ดพอลิเมอร์ พอลิโพรพิลีนซึ่งมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำพบว่าที่อัตราการไหลที่กำหนดคือ 22 ลิตรต่อนาที ขณะที่แก๊สถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ฟองแก๊สขนาดเล็กจะไหลขึ้นสู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ในส่วนของโรเซออร์แล้วตกกลับลงมาทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ผ่านทางดาวนด์คัมเมอร์ ให้ลักษณะการไหลที่สมบูรณ์ (ตามรูป 5ค) ซึ่งฟองแก๊สมีเวลาในการสัมผัสกับของเหลวมากที่สุดทำให้มีการแลกเปลี่ยนมวลสารดีที่สุดในเมื่อเทียบกับการไหลรูปแบบอื่นภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเท่ากัน รูปแบบการไหลดังกล่าวจึงเหมาะสมเพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลสารอย่างมีประสิทธิภาพดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงพร้อมที่จะนำไปใช้งานสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย



รูปที่ 5 แผนภาพการไหลรูปแบบต่างๆ ก.) การไหลเวียนเฉพาะส่วนโรเซออร์ ข.) การไหลเวียนแบบไม่ครบรอบการไหล ค.) การไหลเวียนแบบสมบูรณ์ [11]

อย่างไรก็ตาม รูปแบบการไหลแบบที่ 5ค ความเร็วของของเหลวที่มากเกินไปอาจส่งผลให้เกิดแรงเฉือนซึ่งไม่เป็นผลดีต่อสาหร่าย อาจทำให้เซลล์สาหร่ายแตกได้ [11] ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลและเวลาที่ใช้นั้นควรมีการศึกษาเพื่อหารูปแบบที่ดีที่สุดต่อไป

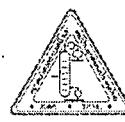
4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้ทำการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงแบบลูกผสมแบบใหม่เพื่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยองค์ประกอบสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์สามารถทำการปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของสายพันธุ์สาหร่ายที่นำมาเพาะเลี้ยง คือ ชนิดของแหล่งกำเนิดแสง สารอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่าย และอัตราการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการออกแบบอ้างอิงจากหลักการของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนโดยมีความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ 100 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ 30 เซนติเมตร ความสูงช่องท่อกลาง 70 เซนติเมตร อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกลางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 0.5 ระยะห่างระหว่างท่อกลางกับกันดั้ม 10 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างท่อกลางกับระดับของเหลว 10 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางหัวกระจายแก๊ส 10 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่อหลอดไฟ 3 เซนติเมตร ความสูงท่อหลอดไฟ 80 เซนติเมตร

สำหรับกรณีศึกษาการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella Vulgaris* นั้น สภาวะที่เหมาะสมที่ต้องใช้คือ แสงที่มีความยาวคลื่น 620-630 นาโนเมตร ที่ความเข้มแสง 1600-2000 PPF ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-2}$) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออากาศ 5 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหล 22 ลิตรต่อนาที

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณเงินสนับสนุนจากโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ประจำปี 2557 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



- [1] Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae beats bioethanol," *Trends Biotechnol.*, vol. 26, no. 3, pp. 126–131, Mar. 2008.
- [2] Y. Li, M. Horsman, N. Wu, C. Q. Lan, and N. Dubois-Calero, "Biofuels from microalgae," *Biotechnol. Prog.*, vol. 24, no. 4, pp. 815–820, Aug. 2008.
- [3] P. Spolaore, C. Joannis-Cassan, E. Duran, and A. Isambert, "Commercial applications of microalgae," *J. Biosci. Bioeng.*, vol. 101, no. 2, pp. 87–96, Feb. 2006.
- [4] T. M. Mata, A. A. Martins, and N. S. Caetano, "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 217–232, Jan. 2010.
- [5] M. R. Brown, M. Mular, I. Miller, C. Farmer, and C. Trenerry, "The vitamin content of microalgae used in aquaculture," *J. Appl. Phycol.*, vol. 11, no. 3, pp. 247–255, Jun. 1999.
- [6] C.-Y. Chen, K.-L. Yeh, R. Aisyah, D.-J. Lee, and J.-S. Chang, "Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 71–81, Jan. 2011.
- [7] A. Salis, M. Nicolò, S. Guglielmino, and V. Solinas, "Biodiesel from Microalgae," in *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*, K. N. Timmis, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 2827–2839.
- [8] L. E. Erickson, "Airlift bioreactors, by M.Y. Chisti. Elsevier applied science, London, England and New York, USA," *Can. J. Chem. Eng.*
- [9] Available online at <http://www.powerplantccs.com/ccs/cap/fut/alg/alg.html>
- [10] K. Mohanty, D. Das, and M. N. Biswas, "Hydrodynamics of a novel multi-stage external loop airlift reactor," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 61, no. 14, pp. 4617–4624, Jul. 2006.
- [11] E. Kadic and T. J. Heindel, *An Introduction to Bioreactor Hydrodynamics and Gas-Liquid Mass Transfer*.
- [12] C. Yan, X. Luo, and Z. Zheng, "Effects of various LED light qualities and light intensity supply
- [13] H. Zheng, Z. Gao, F. Yin, X. Ji, and H. Huang, "Effect of CO₂ supply conditions on lipid production of *Chlorella vulgaris* from enzymatic hydrolysates of lipid-extracted microalgal biomass residues," *Bioresour. Technol.*, vol. 126, pp. 24–30, Dec. 2012.
- [14] P. WEILAND, "Influence of Draft Tube Diameter on Operation Behavior of Airlift Loop Reactors," *Ger Chem Eng*, vol. 7, pp. 374–385, 1984.
- [15] Available online at http://dundean.com/tips_what_is_latex_paint.shtml

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ- สกุล ดร.ชนวรรณ พิณรัตน์

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีพ.ศ.ที่จบ
Ph.D	วิศวกรรมเคมี	University of Michigan	2554
วศ.ม (วิศวกรรมเคมี)	วิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2547
วศ.บ (วิศวกรรมเคมี)	วิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2544

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ วิศวกรรมพลังงานทางเลือก จลนพลศาสตร์วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมสีเขียว

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2557	ทุนวิจัยเงินงบประมาณรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2556	ทุนวิจัยเงินงบประมาณรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2555	โครงการสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่ (วท.)	ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
2549-2554	ทุนรัฐบาลเพื่อการศึกษาต่อปริญญาโท เอก	กระทรวงวิทยาศาสตร์ ในความดูแลของ ก.พ.

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

- Tanawan Pinnarat. Modeling for Conversion of Two-phase Esterification for Biodiesel Production. KMITL-Science and Technology Journal. 2013 ;13: 33-38.
- Shujauddin Changi, Tanawan Pinnarat, and Phillip E.Savage. Mechanistic Modeling of Hydrolysis and Esterification for Biofuel Process. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011 ;50: 12471-12478.
- Shujauddin Changi, Tanawan Pinnarat, and Phillip E.Savage. Modeling Hydrolysis and Esterification Kinetics for Biofuel Processes. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2011 ;50: 3206-3211.
- Robert B. Levine, Tanawan Pinnarat, and Phillip E.Savage. Biodiesel Production from Wet Algae Biomass Through in Situ Lipid Hydrolysis and Supercritical Transesterification. Energy Fuels. 2010 ;24: 5235-5243.
- Tanawan Pinnarat, and Phillip E.Savage. Noncatalytic esterification of oleic acid in ethanol. Journal of Supercritical Fluids. 2010 ;53: 53-59.
- Tanawan Pinnarat, and Phillip E.Savage. Assessment of Noncatalytic Biodiesel Synthesis Using Supercritical Reaction Conditions. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2008 ;47: 6801-6808.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสนอผลงานวิชาการ

- Panatorn Kongpairin and Tanawan Pinnarat. Transesterification of Sunflower Oil using Expanded Carbon dioxide in Methanol. The 4th International Thai Chemical Engineering and Applied Chemistry. 2014
- ชัยพร จึงโชคกะพิศิฐ มนูญชาพร ใจปลื้ม และธนวรรณ พิณรัตน์ แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจากกรดโอเลอิกโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 18-19 ธันวาคม 2557
- จตุพร ภัคดี ณัฐจักร วงศ์คำ ญาณิพร พัทรวรโชติ และธนวรรณ พิณรัตน์ เครื่องปฏิกรณ์ลูกผสมแบบใหม่สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella Vulgaris* ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 18-19 ธันวาคม 2557
- ธาดา ทรัพย์พิพัฒนา ชนินทร ศรีมิ่งมิตร และธนวรรณ พิณรัตน์ การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้อะซิโตนเพื่อลดความต้านทานจากการแพร่ ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 18-19 ธันวาคม 2557
- Patt Sribenjaluk and Tanawan Pinnarat. Non-catalytic Hydrolysis of Triglyceride using co-solvent at moderate condition. The 3rd International Thai Chemical Engineering and Applied Chemistry. 2013
- Nuchanart Moradtad, Patt Sribenjaluk, and Tanawan Pinnarat. Optimization of Algae Biodiesel Production by Acid Transesterification using ASPEN. The 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Chemical Engineering. 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ- สกุล ดร.ณัฐพร พัชรวร โชติ

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีพ.ศ.ที่จบ
วศ.ด (วิศวกรรมเคมี)	วิศวกรรมเคมี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2548
วศ.บ (วิศวกรรมเคมี)	วิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	2553

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ การจำลองกระบวนการโดยใช้โปรแกรม ASPEN

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2557	ทุนวิจัยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2557	ทุนวิจัยเงินงบประมาณรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2556	ทุนวิจัยเงินงบประมาณรายได้คณะ วิศวกรรมศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
2555	ทุนวิจัยเงินงบประมาณรายได้คณะ วิศวกรรมศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

- Chutichai, B., Patcharavorachot, Y., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Parametric analysis of a circulating fluidized bed biomass gasifier for hydrogen production. Energy 82 (2015) : 406-413.
- Authayanun, S., Saebea, D., Patcharavorachot, Y., and Arpornwichanop, A., Evaluation of an integrated methane autothermal reforming and high-temperature proton exchange membrane fuel cell system. Energy 80 (2015) : 331-339.
- Authayanun, S., Patniboon, A., Saebea, D., Patcharavorachot, Y., and Arpornwichanop, A., Effect of Flow Pattern on Single and Multi-stage High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack Performance. Computer Aided Chemical Engineering 33 (2014) : 1471-1476.
- Patcharavorachot, Y., Sangduan, K., Ponpesh, P., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Integration of Ethanol Processor and CO₂ Absorption to Produce Hydrogen for Fuel Cell. Energy Procedia 61 (2014) : 2215-2218.
- Saebea, D., Authayanun, S., Patcharavorachot, Y., and Arpornwichanop, A., Thermodynamic Analysis of Hydrogen Production from the Adsorption-enhanced Steam Reforming of Biogas. Energy Procedia 61 (2014) : 2254-2257.
- Patcharavorachot, Y., Tiraset, S., Wiyaratn, W., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Using a membrane reactor for the oxidative coupling of methane: simulation and optimization. Clean Technologies and Environmental Policy 16 (2014) : 1295-1306.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **Patcharavorachot, Y.**, Chery-rod, N., Nudchapong, S., Authayanun, S., and Arpornwichanop, A., Hydrogen Production from Glycerol Steam Reforming in Supercritical Water with CO₂ Absorption Unit. Chemical Engineering Transactions 39 (2014) : 349-354.
- Likkasith, C., Saebea, D., Arpornwichanop, A., Piemnernkoom, N., and **Patcharavorachot, Y.**, Simulation of Hydrogen Production with *in Situ* CO₂ Removal Using Aspen Plus. Chemical Engineering Transactions 39 (2014) : 415-420.
- Arpornwichanop, A., Suwanmanee, U., Saebea, D., **Patcharavorachot, Y.**, and Authayanun, S., Study on a Proton Exchange Membrane Fuel Cell System Fuelled by a Mixture of Bio-ethanol and Methane. Chemical Engineering Transactions 39 (2014) : 1033-1038.
- Saebea, D., Authayanun, S., **Patcharavorachot, Y.**, and Arpornwichanop, A., Enhancement of Hydrogen Production for Steam Reforming of Biogas in Fluidized Bed Membrane Reactor. Chemical Engineering Transactions 39 (2014) : 1177-1182.
- Authayanun, S., Aunsup, P., **Patcharavorachot, Y.**, and Arpornwichanop, A., Theoretical analysis of a biogas-fed PEMFC system with different hydrogen purifications: Conventional and membrane-based water gas shift processes. Energy Conversion and Management 86 (2014) : 60-69.
- Authayanun, S., Saebea, D., **Patcharavorachot, Y.**, and Arpornwichanop, A., Effect of different fuel options on performance of high-temperature PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) : systems. Energy 68 (2014) : 989-997.
- **Patcharavorachot, Y.**, Tiraset, S., Saebea, D., Paengjuntuek, W., and Arpornwichanop, A., Optimization of a Membrane-based Oxidative Coupling of Methane Reactor Using Surface Response Methodology. Chemical Engineering Transactions 35 (2013) : 121-126.
- Arpornwichanop, A., and **Patcharavorachot, Y.**, Investigation of a proton-conducting SOFC with internal autothermal reforming of methane. Chemical Engineering Research and Design 91 (2013) : 1508-1516.

- Saebea, D., **Patcharavorachot, Y.**, Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Analysis of a pressurized solid oxide fuel cell–gas turbine hybrid power system with cathode gas recirculation. International Journal of Hydrogen Energy 38 (2013) : : 4748-4759.
- Saebea, D., Authayanun, S., **Patcharavorachot, Y.**, Paengjuntuek, W., and Arpornwichanop, A., Use of different renewable fuels in a steam reformer integrated into a solid oxide fuel cell: Theoretical analysis and performance comparison. Energy 51 (2013) : 305-313.
- **Patcharavorachot, Y.**, Wasuleewan, M., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Analysis of hydrogen production from methane autothermal reformer with a dual catalyst-bed configuration. Theoretical Foundations of Chemical Engineering 46 (2012) : 658-665.
- Thanomjit, C., **Patcharavorachot, Y.**, and Arpornwichanop, A., Design and Thermal Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell System Integrated with Ethanol Steam Reforming. Computer Aided Chemical Engineering 30 (2012) : 287-291.
- Saebea, D., **Patcharavorachot, Y.**, and Arpornwichanop, A., Analysis of an ethanol-fuelled solid oxide fuel cell system using partial anode exhaust gas recirculation. Journal of Power Sources 208 (2012) : 120-130.
- Chaichana, K., **Patcharavorachot, Y.**, Chutichai, B., Saebea, D., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Neural network hybrid model of a direct internal reforming solid oxide fuel cell. International Journal of Hydrogen Energy 37 (2012) : 2498-2508.
- Saebea, D., Arpornwichanop, A., **Patcharavorachot, Y.**, and Assabumrungrat, S., Adsorption-membrane hybrid system for ethanol steam reforming: Thermodynamic analysis. International Journal of Hydrogen Energy 36 (2011) : 14428-14434.
- Arpornwichanop, A., Wasuleewan, M., **Patcharavorachot, Y.**, and Assabumrungrat, S., Investigation of a Dual-Bed Autothermal Reforming of Methane for Hydrogen Production. Chemical Engineering Transactions 25 (2011) : 929-934.

- Authayanun, S., Arpornwichanop, A., Patcharavorachot, Y., Wiyaratn, W., and Assabumrungrat, S., Hydrogen production from glycerol steam reforming for low- and high-temperature PEMFCs. International Journal of Hydrogen Energy 36 (2010) : 267-275.
- Patcharavorachot, Y., Brandon, N.P., Paengjuntuek, W., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Analysis of Planar Solid Oxide Fuel Cells based on Proton-Conducting Electrolyte. Solid State Ionics 181 (2010) : 1568-1576.
- Patcharavorachot, Y., Paengjuntuek, W., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Performance evaluation of combined solid oxide fuel cells with different electrolytes. International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010) : 4301-4310.
- Arpornwichanop, A., Patcharavorachot, Y., and Assabumrungrat, S., Analysis of a proton-conducting SOFC with direct internal reforming. Chemical Engineering Science 65 (2010) : 581-589.

การเสนอผลงานวิชาการ

- Sampavapon, A., Saebea, D., Authayanun, S., Patcharavorachot, Y., and Arpornwichanop, A. Effect of Different Feedstock Types on a Biomass Gasification. The 4th TIChE International Conference 2014, December 18-19, 2014, Chiang Mai, Thailand.
- Thongdee, S., Wiyaratn, W., Patcharavorachot, Y., and Arpornwichanop, A. Theoretical Analysis of the Solid Oxide Steam Electrolysis Cell: Effect of Methane Addition. The 4th TIChE International Conference 2014, December 18-19, 2014, Chiang Mai, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Mahisanan, C., **Patcharavorachot, Y.**, and Arpornwichanop, Optimization of an Integrated SOFC-SOEC System for Clean Power Generation. The 4th TIChE International Conference 2014, December 18-19, 2014, Chiang Mai, Thailand.
- Rattanachai, W., Saebea, S., and **Patcharavorachot, Y.** Thermodynamic analysis of glycerol supercritical water reforming with different CO₂ removal process. The 4th TIChE International Conference 2014, December 18-19, 2014, Chiang Mai, Thailand.
- Jienkulsawad, P., Saebea, D., **Patcharavorachot, Y.**, Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A. Performance Analysis of the Solid Oxide Fuel Cell and Molten Carbonate Fuel Cell Combined System. The 23rd International Symposium on Chemical Reaction Engineering, September 7-10, 2014, Bangkok, Thailand.
- **Patcharavorachot, Y.**, Chery-rod, N., Nudchamong, S., Authayanun, S., and Arpornwichanop, A. Hydrogen Production from Glycerol Steam Reforming in Supercritical Water with CO₂ Absorption Unit. The 17th Conference “Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction” (PRES 2014), August 23-27, 2014, Prague, Czech Republic.
- Likkasith, C., Saebea, D., Arpornwichanop, A., Piemnernkoom, N., and **Patcharavorachot, Y.** Simulation of Hydrogen Production with In Situ CO₂ Removal Using Aspen Plus. The 17th Conference “Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction” (PRES 2014), August 23-27, 2014, Prague, Czech Republic.
- Arpornwichanop, A., Suwanmanee, U., Saebea, D., **Patcharavorachot, Y.**, and Authayanun, S. Study on a Proton Exchange Membrane Fuel Cell System Fuelled by a Mixture of Bio-Ethanol and Methane. The 17th Conference “Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction” (PRES 2014), August 23-27, 2014, Prague, Czech Republic.
- Saebea, D., Authayanun, S., **Patcharavorachot, Y.**, and Arpornwichanop, A. Enhancement of hydrogen production for steam reforming of biogas in fluidized bed membrane reactor, The 17th Conference “Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction” (PRES 2014), August 23-27, 2014, Prague, Czech Republic.

- **Patcharavorachot, Y.**, Tanthaworn, P., and Urailert, P. Integrated system of glycerol supercritical water reforming process and pressurized solid oxide fuel cell. The 4th International Conference on Engineering and Applied Science (ICEAS 2014), July 22-24, 2014, Sapporo, Japan.
- **Patcharavorachot, Y.**, Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A. Integration of ethanol processor and CO₂ absorption to produce hydrogen for fuel cell. The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014, May 30 – June 2, 2014, Taipei City, Taiwan.
- Saebea, D., Authayanun, S., **Patcharavorachot, Y.**, Arpornwichanop, A. Thermodynamic analysis of hydrogen production from the adsorption-enhanced steam reforming of biogas. The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014, May 30 – June 2, 2014, Taipei City, Taiwan.
- Saebea, D., Arpornwichanop, A., and **Patcharavorachot, Y.** Integrated system of a proton-conducting SOFC and ethanol autothermal reformer: Design and performance evaluation. Fifth European Fuel Cell Technology & Applications Conference, Piero Lunghi Conference, December 11-13, 2013, Rome, Italy
- Saebea, D., Authayanun, S., **Patcharavorachot, Y.**, Arpornwichanop, A. design of energy recuperation in a solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system with ethanol as fuel, Fifth European Fuel Cell Technology & Applications Conference, Piero Lunghi Conference, December 11-13, 2013, Rome, Italy
- **Patcharavorachot, Y.**, and Arpornwichanop, A., Investigation of a proton-conducting SOFC with internal autothermal reforming of methane. the 22nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE22), Jun 17 – 20, 2012, London.
- Thanomjit, C., **Patcharavorachot, Y.**, and Arpornwichanop, A., Design and Thermal Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell System Integrated with Ethanol Steam Reforming. The 22nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE22), Jun 17 – 20, 2012, London.
- Supawimon, P., **Patcharavorachot, Y.**, Assabumrungrat, S. and Arpornwichanop, A., Analysis of Steam Biomass Gasification for Synthesis Gas Production. The 4th KKU International

- Engineering Conference 2012 (KKU-IENC 2012), May 10-12, 2012, Khon Kaen University, Thailand.
- Saebea, D., Authayanun, A., **Patcharavorachot, Y.**, Paengjuntuek, W., and Arpornwichanop, A., Performance Analysis of SOFC Systems Integrated with Steam Reforming of Different Renewable Fuels. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), Mar 28 – 30, 2012, Santiago de Compostela (Spain).
 - Tippawan, P., **Patcharavorachot, Y.**, Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Thermodynamic Evaluation of Ethanol Steam Reforming via Acetaldehyde as an Intermediate. The 21th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry International Conference (TICChE 2011), Nov. 10-11, 2011, Hatyai, Songkhla, Thailand.
 - Aunsup, P., **Patcharavorachot, Y.**, Assabumrungrat, S. and Arpornwichanop, A. (2011). Comparison of Different Hydrogen Production Processes from Biogas: Thermodynamic Analysis. The 21th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry International Conference (TICChE 2011), Nov. 10-11, 2011, Hatyai, Songkhla, Thailand.
 - Saebea, D., Arpornwichanop, A., **Patcharavorachot, Y.**, and Assabumrungrat, S., Design of a Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid Power System with Cathode Gas Recycling. 6th Asia Pacific Chemical Reaction Engineering Symposium (APCRE'11), Sep. 18-21, 2011, Beijing, China.
 - Arpornwichanop, A., Wasuleewan, M., **Patcharavorachot, Y.**, and Assabumrungrat, S., Investigation of a Dual-Bed Autothermal Reforming of Methane for Hydrogen Production. 14th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES11), May 8-11, 2011, Florence, Italy
 - Sangduan, K., **Patcharavorachot, Y.**, Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Analysis of CO₂ absorption for purification of hydrogen in ethanol reforming processes. The 3rd Regional Conference on Chemical Engineering (RCCE), Jan. 20-21, 2011, Metro Manila, Philippines.
 - **Patcharavorachot, Y.**, Brandon, N.P., Assabumrungrat, S., and Arpornwichanop, A., Theoretical Study of a Planar Solid Oxide Fuel Cell Using Proton-Conducting Electrolyte.