เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย

Airlift Bioreactor for Algae Cultivation

ณัฐจักร วงศ์คำ จตุพร ภักดี ธนวรรณ พิณรัตน์
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้กล่าวถึงชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ระบบปิด ที่สามารถนำมาใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายโดยมีการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของชนิดเครื่องปฏิกรณ์ โดยเครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนมีความเป็นไปได้ในการใช้งานระดับอุตสาหกรรม และได้กล่าวถึงปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวให้มีความเหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

คำสำคัญ : เครื่องปฏิกรณ์, การเพาะเลี้ยง, สาหร่าย

Abstract

This article reviews the possible bioreactor in closed system, which can be used for algae cultivation. The advantage and disadvantage of different type of reactor were compared. The airlift bioreactor has high potential to apply in the industrial scale. In addition, the important parameters in bioreactor design for algae cultivation were mentioned.

Keywords : Bioreactor, Cultivation, Algae

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีและแสวงหาพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากปิโตรเลียม นอกจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำแล้ว การผลิตน้ำมันจากสาหร่ายนับเป็นแหล่งพลังงานสำคัญอย่างหนึ่ง เพราะสาหร่ายมีอัตราการขยายพันธุ์รวดเร็ว วงจรชีวิตสั้น ใช้พื้นที่และน้ำในการเพาะปลูกน้อยกว่าพืชยืนต้นที่ให้น้ำมันทั่วไป [1]และ[2]

การปลูกสาหร่ายจำเป็นต้องใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และธาตุอาหาร ดังนั้นการปลูกสาหร่ายในบริเวณโรงงานจะช่วยลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และช่วยบำบัดน้ำเสีย [2]และ[3] สาหร่ายนั้นมีองค์ประกอบหลัก 3 อย่างคือ โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมัน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร ยารักษาโรค ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม และเครื่องสำอาง [3]และ[4] การเพาะปลูกสาหร่ายในระบบที่ต้องการความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์และกำลังการผลิตสูงนั้นเครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนเป็นตัวเลือกที่มีความเป็นไปได้เพื่อนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการเพาะเลี้ยง โดยบทความนี้จะเปรียบเทียบความเหมาะสมของเครื่องปฏิกรณ์และเน้นเครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนซึ่งเป็นระบบปิดที่น่าสนใจสำหรับการเพาะปลูกสาหร่ายและกล่าวถึงปัจจัยที่สำคัญที่ควรคำนึงถึงในการเพาะเลี้ยงโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวน

2. เครื่องปฏิกรณ์สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย

ดังนั้นวิธีการเพาะปลูกสาหร่ายให้มีประสิทธิภาพเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจ โดยนักวิจัยได้มีการพัฒนาวิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายหลากหลายวิธีด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการเลี้ยงในระบบเปิดหรือระบบปิด ระบบเปิดเป็นเพาะเลี้ยงโดยใช้อุปกรณ์เชิงกลเพื่อช่วยให้สาหร่ายเจริญเติบโตเป็นบ่อเปิดขนาดใหญ่ กลางแจ้ง เพาะเลี้ยงในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ เช่น การเพาะเลี้ยงในบ่อเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(open pond) ทะเลสาบ (lagoon) หรืออาจจะเป็นบ่อวน (Raceway pond) ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ให้ระบบหมุนวน ข้อดีของการเพาะเลี้ยงในระบบเปิดคือ การก่อสร้างและการดำเนินการที่ง่ายกว่าการเพาะเลี้ยงในระบบปิด แต่มีข้อจำกัดคือ ปริมาณแสงที่ให้สาหร่าย หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่เพียงพอ และต้องการพื้นที่ติดตั้งบริเวณกว้าง โดยที่การเลี้ยงในระบบเปิดนั้นมีราคาถูกและสร้างได้ง่าย แต่จะใช้เนื้อที่ค่อนข้างมากและควบคุมสิ่งเจือปนได้ยาก จึงมีการพัฒนาการเพาะ-เลี้ยงในระบบปิด ระบบปิดเป็นการเพาะเลี้ยงในเครื่องปฏิกรณ์โดยควบคุมสภาวะให้เหมาะสมตามความต้องการ ซึ่งสามารถออกแบบได้หลายวิธี ข้อดี ข้อเสียของระบบปิดในแต่ละวิธีแสดงดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ในแต่ละชนิด พบว่า เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อให้ประสิทธิภาพการเพาะปลูกที่ต่ำที่สุด เนื่องจากระยะเวลาของแก๊สที่ใช้เดินทางในท่อนาน สาหร่ายจึงมีโอกาสสัมผัสกับแก๊สที่ปล่อยเข้าไปได้น้อยและไม่ทั่วถึงอีกทั้งยังมีข้อจำกัดในการขยายขนาดที่ยาก

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์ระบบปิดแต่ละชนิด

ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์	ประสิทธิภาพการเพาะปลูก	การควบคุมการปนเปื้อน	ขนาดพื้นที่ที่ต้องการ	การขยายขนาด	อ้างอิง
เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (Tubular Reactor)	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง	ยาก	[5]
เครื่องปฏิกรณ์แบบแผ่น (Flat Plate Reactor)	ดีมาก	ยาก	น้อย	ยาก	[6]
เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (Stir Tank Reactor)	ดี	ยาก	มาก	ง่าย	[7]
เครื่องปฏิกรณ์แบบพ่นฟอง (Bubble Column Reactor)	พอใช้	ดี	ปานกลาง	ง่าย	[8]
เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน (Airlift Reactor)	ดี	ดีมาก	ปานกลาง	ง่าย	[9]

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบแผ่นให้ประสิทธิภาพ การเพาะปลูกดีมาก ลดปัญหาระยะเวลาการเดินทางของแก๊สเพื่อให้แก๊สสัมผัสกับสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์ได้ดีขึ้น และมีพื้นที่รับแสงมาก แต่ยังมีปัญหาในการควบคุมการปนเปื้อนและการขยายขนาดเพราะลักษณะที่เป็นแผ่นของเครื่องปฏิกรณ์ที่บาง ทำให้เป็นข้อจำกัดในการขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์จะต้องใช้พื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน ให้ประสิทธิภาพการเพาะปลูกสาหร่ายที่ดี และขยายขนาดได้ง่ายกว่าแบบท่อและแบบแผ่น แต่ยังมีปัญหาการปนเปื้อนของระบบและใช้ขนาดพื้นที่กว้าง จึงไม่เหมาะกับการใช้งานจริง เพราะอาจมีผลกับต้นทุนและผลตอบแทนของการผลิต ในเครื่องปฏิกรณ์แบบพ่นฟองอากาศและเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนมีการป้องกันการปนเปื้อนดี และการขยายขนาดที่ง่ายแต่ประสิทธิภาพการเพาะปลูกของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบพ่นฟองอากาศเนื่องจากมีการเพิ่มท่อกลวงภายในเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหมุนวนแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ จึงทำให้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนมีประสิทธิภาพในการเพาะปลูกที่ดีที่สุดโดยปกติสำหรับการเพาะเลี้ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาหร่ายเครื่องปฏิกรณ์สังเคราะห์แสงนี้จะมีการให้แสงโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์หรือการใช้แสงเทียมจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ส่องให้ความสว่างจากภายนอก

เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำเครื่องปฏิกรณ์เพาะเลี้ยงสาหร่ายมาใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม จะเห็นได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดการหมุนวนนั้นมีความเป็นไปได้สูง เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ด้วยข้อดีดังนี้คือ การก่อสร้างง่าย มีส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ มีการถ่ายเทมวลและความร้อนที่ดี การผสมกันของของเหลวภายในเครื่องมีประสิทธิภาพ ต้องการพลังงานต่ำ และใช้ต้นทุนต่ำในการดำเนินการ โดยในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการถ่ายเทแลกเปลี่ยนมวล (Mass transfer) รูปแบบการผสมที่เกิดขึ้น เวลาที่ใช้ในการผสม โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบคือ ลักษณะทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์ ความเร็วของของเหลวและแก๊ส ความเหมาะสมของปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหมุนวนสำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

สายพันธุ์สาหร่าย	ปริมาตร (ลิตร)	A_d/A_r	อัตราการไหลแก๊ส (vvm)	ความเร็วแก๊ส (cm/s)	ความเข้มข้น CO_2 (%)	อัตราการเจริญเติบโต (ต่อวัน)	อ้างอิง
Hematococcus pluvialis	3	3.20	N/A	0.4	1.0	0.31	[10]
Chlorella sorokiniana	N/A	4.40	0.33	N/A	5.0	0.25	[11]
Skeletonema costatum	3	3.27	N/A	1.5	อากาศบริสุทธิ์	1.68	[12]
Chaetoceros calcitrans	17	2.63	N/A	3	อากาศบริสุทธิ์	1.78	[13]
Chlorella sorokiniana	1.4	N/A	0.33	N/A	4.4	N/A	[14]
Anabaena sp	1.4	1.60	0.25	N/A	1.0	N/A	[15]
Spirulina platensis	1.5	2.60	3.3	N/A	อากาศบริสุทธิ์	0.16-0.28	[16]
Spirulina platensis	1.51	1.49	1	N/A	อากาศบริสุทธิ์	0.47	[17]

หมายเหตุ : N/A คือ ไม่มีข้อมูล

: A_d/A_r คือ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดดาวน์คัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดไรเซอร์

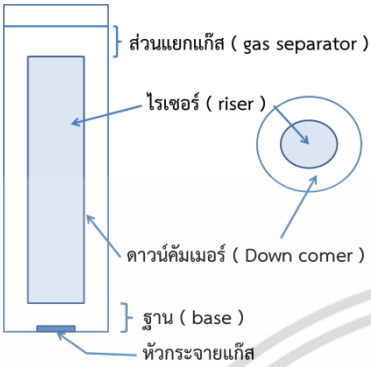
3. ปัจจัยที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน

3.1 ลักษณะทางกายภาพของเครื่องปฏิกรณ์

ลักษณะเด่นของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนอากาศคือ ของเหลวจะไหลขึ้นจากใจกลางคอลัมน์ไปตามความสูงเครื่องปฏิกรณ์โดยการใส่ท่อกลวง เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนอากาศประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักตามรูปที่ 1 คือส่วนไรเซอร์ (Riser) ส่วนดาวน์คัมเมอร์(Downcomer) ส่วนฐาน (Base) และส่วนแยกแก๊ส (Gas separator) ซึ่งการออกแบบตามทฤษฎีของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนจะต้องมีความสูงของส่วนแยกแก๊สและส่วนฐานที่เท่ากัน อากาศจะถูกป้อนผ่านหัวกระจายแก๊สจากด้านล่างถังเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนที่มีการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบนถูกเรียกว่า ไรเซอร์ และส่วนที่มีทิศการไหลตรงข้ามถูกเรียกว่า ดาวน์คัมเมอร์ ซึ่งการไหลเวียนเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของผสม 2 สถานะในไรเซอร์และการไหลเวียนจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออัตราการไหลของแก๊สมากพอที่จะทำให้ความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถพาแก๊สที่

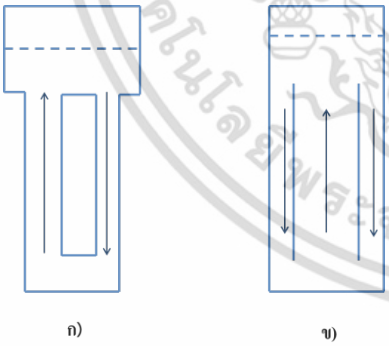
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ขึ้นจากส่วนของไรเซอร์ไหลผ่านส่วนของดาวน์คัมเมอร์สวนทางกลับลงสู่ด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ [18]



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน

เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดหมุนวนภายในและชนิดหมุนวนภายนอก ซึ่งความแตกต่างของทั้งสองชนิด อยู่ที่เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนภายนอกประกอบด้วยสองคอลัมน์ที่แยกออกจากกันมีจุดเชื่อมต่อ 2 จุดอยู่ที่ส่วนบนและส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งความต่างนี้ส่งผลให้เกิดการแยกแก๊สในส่วนของด้านบนถัง [19] ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวน ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนภายนอก ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนภายใน [20]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 2 พบว่าการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ทุกขนาดจะต้องคำนึงถึงอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดดาวน์คัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดไรเซอร์ (A_d/A_r) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อ A_d/A_r ลดลงจะทำให้ความเร็วในการไหลวนของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ใช้เวลาในการไหลวนครบรอบนานขึ้น ทำให้การถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวและแก๊สดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า A_d/A_r ที่น้อยมากเกินไป ความเร็วของของไหลในไรเซอร์จะลดลงจนไม่สามารถพาแก๊สกลับสู่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ผ่านทางดาวน์คัมเมอร์ทำให้ถ่ายโอนมวลได้ไม่ดี อัตราส่วน A_d/A_r ที่ส่งผลให้เครื่องปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายจะอยู่ในช่วง 1-5 [10-13],[15-17]

3.2 ความเร็วของของเหลวและแก๊ส

อัตราการไหลและความเร็วของแก๊สขาเข้าส่งผลต่อความเร็วของของเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเช่นกัน หากแก๊สขาเข้ามีความเร็วที่น้อยเกินไปของเหลวจะไม่สามารถพาฟองแก๊สกลับลงมาในส่วนของดาวน์คัมเมอร์ทำให้ไม่เกิดการไหลเวียนของแก๊ส เวลาในการถ่ายโอนมวลระหว่างแก๊สกับของเหลวจึงลดลง แต่ถ้าความเร็วของแก๊สขาเข้ามากเกินไปจะเกิดการรวมตัวกันของฟองแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์อย่างรวดเร็วอัตราการป้อนแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์นั้นจะต้องคำนึงถึงปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์เป็นหลัก อัตราการไหลของแก๊สจึงมักนิยมเขียนในหน่วยของปริมาตรแก๊สต่อปริมาตรของเหลวต่อนาที (vvm) โดยส่วนใหญ่อัตราการไหลของแก๊สที่ทำให้สาหร่ายเติบโตได้ดีจะอยู่ในช่วง 0.25-3.3 vvm [11],[14-17] แต่อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของแก๊สที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดแรงเฉือนภายในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้เซลล์สาหร่ายแตกได้ [20]

3.3 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเจริญเติบของสาหร่ายและเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของแก๊สขาเข้าโดยตรงถ้าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงและมีอัตราการไหลที่เร็วจะส่งผลให้สารอาหารภายในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเป็นกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่มากเกินความจำเป็น หากความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำในแก๊สขาเข้าที่มีอัตราเร็วต่ำ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จะน้อยไม่เพียงพอต่อความต้องการของสาหร่าย สำหรับการเพาะเลี้ยงสาหร่ายความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออากาศมักอยู่ในช่วง 1-5 เปอร์เซ็นต์เป็นช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม [10], [11],[14],[15] การใช้อากาศบริสุทธิ์เป็นแก๊สขาเข้าจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเพราะในอากาศบริสุทธิ์จะมีคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ แต่มีอยู่ปริมาณหนึ่งเท่านั้นสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้แต่ไม่ดีเท่าการใส่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอากาศในปริมาณที่เหมาะสมต่อสายพันธุ์สาหร่ายแต่ละชนิด

ส่วนการเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้นสามารถวัดได้จากความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์เทียบกับเวลาโดยใช้เครื่องนับเซลล์ Heamacytometer ซึ่งอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\mu = \frac{\ln N_2 - \ln N_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

เมื่อ μ คืออัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย (h^{-1}) N_1 และ N_2 ความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายที่เวลาะ t_1 และ เวลา t_2 ตามลำดับ (cell h^{-1}) t_1 คือเวลาที่เก็บตัวอย่างครั้งแรก (h_2) t_2 คือเวลาที่เก็บตัวอย่างครั้งที่สอง (h_2) [13]และ[14] อย่างไรก็ตามอัตราการเจริญเติบโตยังขึ้นกับปัจจัยอื่นนอกเหนือจากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น เช่น สายพันธุ์สาหร่าย สารอาหารที่ใช้เพาะปลูก เป็นต้น

4. สรุป

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนวนเป็นวิธีที่มีความเป็นไปได้ในการใช้งานในระดับอุตสาหกรรมโดยการออกแบบต้องคำนึงถึงปัจจัยทางกายภาพ ค่าอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดดาวน์คัมเมอร์ต่อพื้นที่หน้าตัดไรเซอร์ อัตราเร็วของการป้อนแก๊ส ความเร็วของของเหลวและแก๊ส ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และทำการปรับเปลี่ยนให้มีความเหมาะสมกับการเลี้ยงสาหร่ายในแต่ละสายพันธุ์อีกด้วย

5.เอกสารอ้างอิง

[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,” Bio technol. Prog., vol. 24, no. 4, pp. 815–820, Aug. 2008.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] S. Yadala and S. Cremaschi, “Design and optimization of artificial cultivation units for algae production,” Energy, Jun. 2014.

[9] M. H. Abdel-Aziz, I. Nirdosh, and G. H. Sedahmed, “Liquid–solid mass and heat transfer behavior of a concentric tube airlift reactor,” Int.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

J. Heat Mass Transf., vol. 58, no. 1–2, pp.735–739, Mar. 2013.

[10] 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.

[11] 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.

[12] S. Monkonsit, S. Powtongsook, and P. Pavasant, "Comparison between Airlift Photobioreactor and Bubblecolumn for Skeletonema Costatum Cultivation," Eng. J., vol. 15, no. 4, pp. 53–64, Mar. 2011.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

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

[18] 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.

[19] 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.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้