

การเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. ด้วยการตกตะกอนและการกรอง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIOMASS HARVESTING OF DIATOM *NITZSCHIA* SP. BY SEDIMENTATION AND FILTRATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp. ด้วยการตกตะกอนและการกรอง
โดย	น.ส.ณัฐฐาทิพย์ ศรีพรหม
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.กษิตศ หนูทอง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ดร.กริชชาติ ว่องไวลิขิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กษิตศ หนูทอง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มะลิวัลย์ คุตะโค)

ณัฐฐาทิพย์ ศรีพรหม : การเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. ด้วยการ  
 ตกตะกอนและการกรอง . ( BIOMASS HARVESTING OF DIATOM NITZSCHIA SP.  
 BY SEDIMENTATION AND FILTRATION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.กษิตศ หนูทอง,  
 อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้งานการตกตะกอนและการกรองเพื่อเก็บเกี่ยว  
 ชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. และปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดำเนินงาน ในส่วนของ  
 วิธีการตกตะกอน พบว่าการเพิ่มปริมาณชีวมวลไดอะตอมในของเหลวจาก 0.06 – 0.30 กรัม/ลิตร  
 ช่วยให้เซลล์ตกตะกอนได้ง่ายขึ้นโดยมีประสิทธิภาพการตกตะกอนอยู่ที่ 50% – 60% เมื่อความ  
 เข้มข้นของไดอะตอมอยู่ที่ประมาณ 0.30 กรัม/ลิตร ประสิทธิภาพการตกตะกอนของชีวมวลได  
 อะตอมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ประมาณ 90% เมื่อปรับพีเอชของของเหลวให้อยู่ในช่วง 9.5 –  
 10.0 และพบว่าค่าพีเอชมากกว่า 10.0 ทำให้เซลล์เสียสภาพและมีลักษณะทางกายภาพแตกต่าง  
 จากเซลล์ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสง นอกจากนี้พบว่าการปรับอุณหภูมิในช่วง 2 –  
 25 องศาเซลเซียส มีผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนเพียงเล็กน้อย ในส่วนของวิธีการกรอง  
 พบว่าวัสดุกรองและขนาดรูกรองที่ควรเลือกใช้คือตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30  
 ไมโครเมตร โดยวัสดุดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกรองประมาณ 94% เมื่อใช้กรองชีวมวลได  
 อะตอมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.32 กรัม/ลิตร จากนั้นจึงศึกษารูปแบบการกรอง 2 แบบ คือ การ  
 กรองแบบถูกรองทรงกรวยและการกรองแบบลาดเอียง ซึ่งพบว่าการกรองแบบถูกรองทรงกรวย  
 โดยใช้ตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร มีประสิทธิภาพการกรองที่ประมาณ 87%  
 ซึ่งสูงกว่าประสิทธิภาพการกรองแบบลาดเอียง สามารถกรองของเหลวได้มากกว่า ให้ฟลักซ์การ  
 กรองที่ค่อนข้างคงที่ สามารถสร้างและนำไปติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงได้ง่าย

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6270079521 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: DIATOM/SEDIMENTATION/FILTRATION

Nutthathip Sriprom : BIOMASS HARVESTING OF DIATOM *NITZSCHIA* SP. BY  
SEDIMENTATION AND FILTRATION. Advisor: Assoc. Prof. KASIDIT NOOTONG,  
Ph.D. Co-advisor: Sorawit Powtongsook

This work studied the possibility of using sedimentation and filtration as means to harvest the biomass of diatom *Nitzschia* sp. and the effect of different operating parameters on harvesting efficiency. For sedimentation, increasing initial cell concentration from 0.06 to 0.30 g/L resulted in higher cell settling efficiency, as high as 50% to 60% when the initial cell concentration was roughly 0.30 g/L. Cell settling efficiency increased significant, reaching approximately 90%, when adjust the pH of the liquid in range 9.3 to 10.5. Significant amount of ruptured cells was observed when the initial pH of the liquid exceeded 10.0. In addition, changing the temperature of the liquid, in the range from 2 to 25 °C, exerted insignificant effect on the cell settling efficiency. For cell harvesting by filtration, stainless steel screen with the average pored size of 30 µm was chosen as the filtered medium due to the highest cell removal efficiency at 94% and ease of operation. The stainless steel screen was subsequently applied into two configuration: (1) cone shape filtration and (2) inclined filtration. The results of the evaluation indicated that the cone shape filtration yielded higher cell removal efficiency (87%) than the inclined filtration; accommodated more liquid volume; produced relatively constant filtration flux; was easier to build and integrate with the photobioreactor.

Field of Study: Chemical Engineering

Academic Year: 2021

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. กษิติศ หนูทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร. สรวิศ เผ่าทองสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้ความรู้ คำปรึกษา คอยชี้แนะให้คำแนะนำและหลักการที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในแต่ละขั้นตอนของการทำงานวิจัย รวมทั้งตรวจทานและแก้ไขงานวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ดร. กริชชาติ ว่องไวลิขิต ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน ศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ กรรมการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มะลิวัลย์ คุตะโค กรรมการ ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณา ชี้แนะ ตรวจทาน แก้ไขงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์และถูกต้อง นอกจากนี้ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือและมอบความรู้ที่เป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่สำหรับทำวิจัย ตลอดจนให้ความกรุณาสำหรับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี รวมทั้งคำแนะนำในการวิเคราะห์ทางด้านวิทยาศาสตร์

ขอขอบคุณ คุณ ปวีณา ตปณียวรวงค์ นาย กิตติคุณ สุคันธวงศ์ น.ส.จรีลักษณ์ เปล่งสกุล น.ส. สุชานันท์ ขวัญเจริญ และพี่ๆ เพื่อนที่ทำงานวิจัยในศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเลทุกคน ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับมิตรภาพ กำลังใจ ตลอดจนความช่วยเหลือทั้งในด้านการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากบริษัทมิตรผลไบโอเพาเวอร์ จำกัด สำหรับทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย ตลอดจนจัดซื้อเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ในการทำการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ช่วยสนับสนุน ส่งเสริม เป็นแรงผลักดัน และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัย จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

ณัฐฐาทิพย์ ศรีพรหม

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญภาพ.....	1
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2.....	4
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สัณฐานวิทยาและลักษณะทั่วไปของไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp.....	4
2.2 ฟุโคแซนทีน.....	5
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการผลิตฟุโคแซนทีนของไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp.....	6
2.4 การเก็บเกี่ยวเซลล์ไดอะตอม.....	7
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23

บทที่ 3 .....	26
วิธีดำเนินงานวิจัย .....	26
3.1 การเตรียมชีวมวลไดอะตอม .....	26
3.2 แผนการทดลอง .....	27
3.3 ความเป็นไปได้ของการตกตะกอน .....	30
3.4 ความเป็นไปได้ของการกรอง .....	31
3.5 เทคนิคการวิเคราะห์.....	34
บทที่ 4 .....	38
ผลการดำเนินงาน .....	38
4.1 การเพาะเลี้ยงไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp.....	38
4.2 การเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอมด้วยวิธีการตกตะกอน.....	41
4.3 การเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอมด้วยวิธีการกรอง.....	50
บทที่ 5 .....	59
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	60
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก .....	63
ภาคผนวก ข .....	64
ภาคผนวก ค .....	65
ภาคผนวก ง.....	66
ภาคผนวก จ .....	68
ภาคผนวก ฉ .....	71
ภาคผนวก ช .....	79



บรรณานุกรม.....	90
ประวัติผู้เขียน.....	97



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

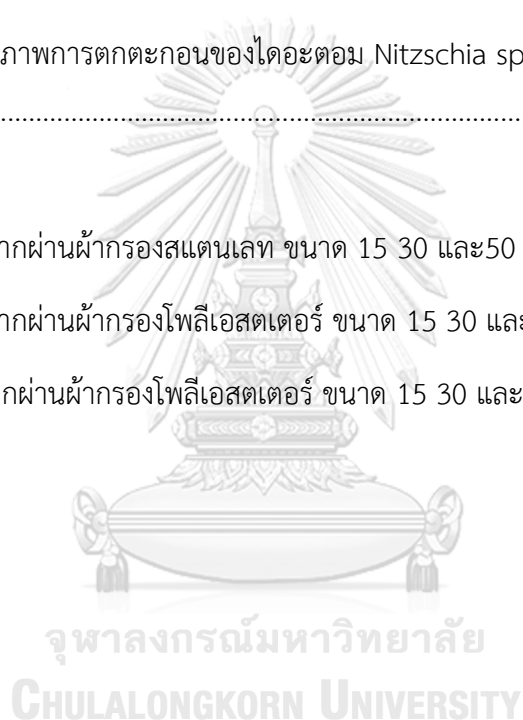
ตารางที่ 2.1	วิธีที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวชีวมวลของไดอะตอมแต่ละชนิด .....	23
ตารางที่ 2.2	ประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวด้วยวิธีการกรองในไดอะตอมแต่ละชนิด .....	25
ตารางที่ 3.1	อาหารสูตรมาตรฐานกิลลาร์ด F/2 [44] .....	26
ตารางที่ 3.2	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองชนิดวัสดุกรองและขนาดรูพรุนของวัสดุกรอง .....	32
ตารางที่ 4.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอมด้วยการปรับพีเอช .....	48
ตารางที่ 4.2	แสดงลักษณะภายในและภายนอกของเซลล์ไดอะตอมหลังจากปรับพีเอช .....	49
ตารางที่ 4.3	การเปรียบเทียบชนิดตัวกรองสำหรับแยกชีวมวลไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp. ออกจากของเหลว โดยทำการทดลองที่ขนาดรูกรองเท่ากับ 15 ไมโครเมตร .....	51
ตารางที่ 4.4	การเปรียบเทียบขนาดช่องว่างของตะแกรงสแตนเลสสำหรับการกรองไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp. ออกจากของเหลว .....	52
ตารางที่ 4.5	ข้อมูลการกรองไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp. ด้วยถุงกรองทรงกรวยที่ทำจากตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร .....	54
ตารางที่ 4.6	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดในการกรองแบบลาดเอียงที่มุมต่างๆ .....	58

## สารบัญญภาพ

ภาพที่ 2.1 เซลล์ไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp.....	4
ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ด้านอาหารและเวชสำอางที่มีสารฟิวโคแซนทินเป็นส่วนประกอบ [20] .	6
ภาพที่ 2.3 รูปแบบของการเก็บเกี่ยวไดอะตอม[24] .....	7
ภาพที่ 2.4 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงข้ามให้กับคอลลอยด์ (ก) ก่อนเติมไอออน (ข) หลังจากการเติมไอออนแล้ว [30].....	11
ภาพที่ 2.5 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆจะเห็นว่าแบบ (ก) ซึ่งเป็นการลดความหนาของชั้นกระจายด้วย $Al^{+3}$ , $Ca^{+2}$ และ $Na^{+}$ ต้องการสารเคมีมากที่สุด ส่วนแบบ (ง) ซึ่งเป็นการใช้โพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อม(สะพาน) ให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมตัวกัน มีความต้องการสารโคแอกกูแลนต์น้อยที่สุด [30].....	12
ภาพที่ 2.6 เภณท์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคต่างๆทั้ง 5 ประเภท [30].....	14
ภาพที่ 2.7 มุมมองแผนผังของพื้นผิว superhydrophilic, hydrophilic, hydrophobic และ superhydrophobic (จากซ้ายไปขวา) [38] .....	20
ภาพที่ 2.8 กลไกการรวมกลุ่มทางชีวภาพของสาหร่ายขนาดเล็ก [10].....	22
ภาพที่ 3.1 แนวทางการทดลองการเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp. ด้วยวิธีการตกตะกอน .....	28
ภาพที่ 3.2 หน่วยกรองไดอะตอม .....	32
ภาพที่ 3.3 การกรองแบบถ่วงกรองทรงกรวย.....	33
ภาพที่ 3.4 แผนผังระบบการกรองแบบลาดเอียงเพื่อไขแยกชีวมวลไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp. ....	34
ภาพที่ 3.5 ขนาดสเกล Ocular Micrometer ในกล้องจุลทรรศน์ .....	37

ภาพที่ 4.1	น้ำหนักเซลล์แห้งและความหนาแน่นเซลล์ของไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp. ที่ทำการเพาะเลี้ยงในสภาวะน้ำเค็ม 30 พีเอสยู ความเข้มข้นแสง 15,000 ลักซ์ คาร์บอนไดออกไซด์ 2% ด้วยอาหารมาตรฐานสูตร F/2 เพิ่มความเข้มข้นซิลิเกต 3 เท่า .....	38
ภาพที่ 4.2	(ก) ขนาดเซลล์เดี่ยว และ (ข) เรียงตัวคล้ายโซ่ของไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp.....	40
ภาพที่ 4.3	ความหนาแน่นเซลล์ไดอะตอมที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างของกรวยอิมฮอฟเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไดอะตอมที่ใช้ตกตะกอนมีค่าแตกต่างกัน (ก) 0.06 กรัม/ลิตร (ข) 0.19 กรัม/ลิตร (ค) 0.25 กรัม/ลิตร และ (ง) 0.30 กรัม/ลิตร .....	42
ภาพที่ 4.4	ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของชีวมวลไดอะตอม (ก) 0.06กรัม/ลิตร (ข) 0.19 กรัม/ลิตร (ค) 0.25 กรัม/ลิตร และ (ง) 0.30 กรัม/ลิตร .....	43
ภาพที่ 4.5	จำนวนเซลล์ไดอะตอมที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างของกรวยอิมฮอฟที่อุณหภูมิต่างกัน (ก) 2 องศาเซลเซียส (ข) 9 องศาเซลเซียส และ (ค) 25 องศาเซลเซียส.....	45
ภาพที่ 4.6	ประสิทธิภาพการตกตะกอนของเซลล์ไดอะตอมที่อุณหภูมิต่างกัน .....	46
ภาพที่ 4.7	ค่าซีตาโพเทนเชียลที่พีเอช 8.3-10.5.....	48
ภาพที่ 4.8	เปรียบเทียบสีของเหลวก่อนการกรองและหลังการกรองด้วยตะแกรงสแตนเลสที่มีช่องว่าง 30 และ 50 ไมโครเมตร.....	52
ภาพที่ 4.9	ฟลักซ์การกรองของเหลวจากการกรองด้วยถุงกรองทรงกรวยที่ทำจากตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร .....	54
ภาพที่ 4.10	ปริมาตรน้ำสะสมที่ผ่านตัวกรองทุก 1 นาที.....	55
ภาพที่ 4.11	เปรียบเทียบสีความขุ่นของเหลวก่อนและหลังการกรองด้วยถุงกรองทรงกรวยที่ทำจากตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร .....	55
ภาพที่ 4.12	ฟลักซ์การกรองของเหลวด้วยรูปแบบการกรองแบบลาดเอียงจากตะแกรงสแตนเลส 30 ไมโครเมตรที่มุมทดสอบต่างๆ .....	57

ภาพที่ จ-1 อุปกรณ์ในการกรองแบบดั้งเดิม .....	68
ภาพที่ จ-2 อุปกรณ์กรองแบบถลุงกรองทรงกรวย .....	69
ภาพที่ จ-3 หน่วยกรองการกรองแบบลาดเอียง.....	70
ภาพที่ ง-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเซลล์แห้งและจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณ .....	67
ภาพที่ ฉ- 1 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของไดอะตอม <i>Nitzschia</i> sp. เมื่อปรับ pH ด้วย NaOH 1M .....	78
ภาพที่ ช- 1 น้ำหลังจากผ่านผ้ากรองสแตนเลส ขนาด 15 30 และ50 ไมครอน ตามลำดับ.....	80
ภาพที่ ช- 2 น้ำหลังจากผ่านผ้ากรองโพลีเอสเตอร์ ขนาด 15 30 และ50 ไมโครเมตร ตามลำดับ .	81
ภาพที่ ช-3 น้ำหลังจากผ่านผ้ากรองโพลีเอสเตอร์ ขนาด 15 30 และ50 ไมโครเมตร ตามลำดับ ..	82



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ไดอะตอม (Diatoms) เป็นจุลสาหร่ายเซลล์เดียว มีลักษณะเป็นเปลือกสองฝาที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก เจริญเติบโตได้ทั้งแบบเซลล์เดี่ยวและต่อกันเป็นสายโซ่ หรือเป็นกลุ่มก้อน ไดอะตอมมีศักยภาพสูงในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตฟูโคแซนทิน เนื่องจากเจริญเติบโตได้เร็ว และมีปริมาณฟูโคแซนทินประมาณร้อยละ 2 ถึง 6 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง ซึ่งมากกว่าปริมาณในสาหร่ายทะเลประมาณ 100 เท่า [1]

ฟูโคแซนทิน (Fucoxanthin) เป็นสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ประเภทแซนโทฟิลล์ มีโครงสร้างที่เป็นเอกลักษณ์ ประกอบด้วยพันธะอัลลีนิกและ 5,6-โมนออีพ็อกไซด์ ฟูโคแซนทินจัดเป็นสารเมตาโบไลต์ (Metabolite) ที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพทำให้มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเสริมและยาที่เกี่ยวข้องกับการลดน้ำหนัก เบาหวาน และการควบคุมอัตราการเผาผลาญของร่างกาย [2] นอกจากนี้ฟูโคแซนทินสามารถใช้งานในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยเป็นสารเพิ่มสีส้มแก่กล้ามเนื้อและผิวหนัง รวมถึงเสริมสร้างภูมิคุ้มกันแก่สัตว์น้ำวัยอ่อน [3] ในปัจจุบันการผลิตฟูโคแซนทินใช้การสกัดจากชีวมวลสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล กระบวนการดังกล่าวมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น การเจริญเติบโตช้าของสาหร่ายทะเล สภาวะการเพาะเลี้ยงซึ่งต้องการน้ำทะเลที่มีอุณหภูมิต่ำ ความยุ่งยากในการเก็บเกี่ยวสาหร่าย และการปนเปื้อนของโลหะหนัก เป็นต้น [4] จากการค้นคว้าพบว่าไดอะตอม *Odontella aurita* และ *Phaeodactylum tricornutum* ได้รับความสนใจในการใช้ผลิตฟูโคแซนทินมากที่สุดซึ่งเป็นผลจากมีปริมาณฟูโคแซนทินต่อหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด [1, 5-7] อย่างไรก็ตามจากความหลากหลายทางชีวภาพของไดอะตอมในประเทศไทยจึงทำให้เกิดแรงจูงใจในการศึกษาการผลิตฟูโคแซนทินในไดอะตอมสายพันธุ์อื่น งานวิจัยของมาฆมาศ ธวัชชัย (2560) ได้เพาะเลี้ยงไดอะตอม *Bacillaria paxillifer* ซึ่งต่อมาถูกจำแนกเป็นไดอะตอม *Nitzschia* sp. เพื่อผลิตฟูโคแซนทิน ไดอะตอมชนิดนี้ถูกเลือกใช้งานเนื่องจากสามารถผลิตฟูโคแซนทินได้ค่อนข้างสูงสามารถเก็บเกี่ยวได้ง่ายเนื่องจากเซลล์มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และพบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำเค็มและน้ำกร่อยในประเทศ [8] สภาวะการเพาะเลี้ยงและแนวทางการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสง (Photobioreactor) เพื่อเพาะเลี้ยงไดอะตอม *Nitzschia* sp. มีการศึกษาและรายงานผลไว้โดยมาฆมาศ ธวัชชัย (2560) และ รัฐณัฐธิดา โถบารุง (2561) [8, 9] อย่างไรก็ตามแนวทางในการเก็บเกี่ยวชีวมวลของไดอะตอมชนิดนี้ยังมีอยู่จำกัด ซึ่งเป็นอุปสรรคในการออกแบบและเลือกอุปกรณ์ที่ใช้เก็บ

เกี่ยวเซลล์และทำบริสุทธิ์ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการเพาะเลี้ยงจุลสาหร่าย นอกจากนี้มีรายงานว่า การเก็บเกี่ยวชีวมวลอาจมีต้นทุนสูงถึงประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิต [10, 11] ดังนั้นการศึกษาถึงวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวเซลล์และมีต้นทุนต่ำจึงมีความจำเป็น ผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า *Nitzschia* sp. ซึ่งมีขนาดเซลล์ค่อนข้างใหญ่ และมีแนวโน้มรวมตัวเป็นกลุ่มก่อนจะจมตัวลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงได้อย่างรวดเร็วเมื่อหยุดการเป่าอากาศ [8, 9] ดังนั้นการตกตะกอนและการกรองจึงอาจเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่ใช้รวบรวมชีวมวลในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งทำให้ง่ายต่อการนำชีวมวลไปแยกและทำบริสุทธิ์ในขั้นตอนถัดไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อศึกษาถึงแนวทางเบื้องต้นของการเก็บเกี่ยวไดอะตอม *Nitzschia* sp. จากการเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสง
- เพื่อศึกษาสภาวะสำหรับใช้ตกตะกอนและกรองชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. จากการเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสง

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- ชีวมวลของไดอะตอม *Nitzschia* sp. ที่ใช้ในการทดลองมาจากการเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงแบบถังกวนขนาด 5 ลิตร ภายใต้สภาวะเหมาะสมซึ่งรายงานไว้ในงานวิจัยของ มาฆมาต รัชชชัย (2560) และ ฐิณัฐธิดา โถบำรุง (2561)
- วิเคราะห์คุณลักษณะของเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับการตกตะกอน ได้แก่ (1) ขนาดของเซลล์ (2) Terminal velocity (3) Zeta potential และ (4) แรงเข้าสู่ศูนย์กลาง
- ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนของชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. ที่จะศึกษา ได้แก่ (1) ปริมาณชีวมวลไดอะตอมเริ่มต้น (0.05 ถึง 0.3 กรัม/ลิตร) (2) อุณหภูมิ (2 ถึง 25 องศาเซลเซียส) (3) พีเอช (9 ถึง 11)

- ปัจจัยที่มีผลต่อการกรองชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. ที่จะศึกษา ได้แก่ (1) ชนิดของวัสดุกรอง (ไนลอน โพลีเอสเตอร์ และ stainless 304) (2) ขนาดรูพรุนของวัสดุกรอง และ (3) รูปแบบการกรอง (กรองแบบถ่วงกรองทรงกรวย และ การกรองแบบลาดเอียง)

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับแนวทางการเก็บเกี่ยวไดอะตอม *Nitzschia* sp. ที่มีประสิทธิภาพ สามารถเพิ่มความเข้มข้นของชีวมวลซึ่งทำให้การดำเนินงานในขั้นตอนถัดไปทำได้ง่ายขึ้น สามารถประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย สิ่งเหล่านี้ล้วนช่วยให้กระบวนการเพาะเลี้ยงไดอะตอมในเชิงพาณิชย์มีความเป็นไปได้มากขึ้นในเชิงเศรษฐศาสตร์ นอกจากนี้แนวคิดและรายละเอียดการดำเนินงานยังสามารถต่อยอดไปสู่ไดอะตอมสายพันธุ์อื่น
- งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงไดอะตอมเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้น ซึ่งต่อบริบทนโยบายภาครัฐที่ผลักดันระบบเศรษฐกิจ BCG (Bio-Circular-Green Economy) รวมถึงการพัฒนาเศรษฐกิจตามรูปแบบอุตสาหกรรมอนาคตหรือ New S-Curve



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สันฐานวิทยาและลักษณะทั่วไปของไดอะตอม *Nitzschia* sp.

*Nitzschia* sp. เป็นไดอะตอมชนิดเพนเนท (Pennate diatom) เป็นสาหร่ายเซลล์เดี่ยว ลักษณะรูปร่างเซลล์มีหลายแบบทั้งเซลล์เดี่ยวและสามารถอยู่รวมกันเป็นเส้นและกลุ่ม โดยมีรูปร่างรีแบบใบข้าว ฝาของเซลล์มีลักษณะตรงหรือโค้ง ปลายเซลล์มนหรือโป่ง [12] ลักษณะด้านข้างของเซลล์เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดตั้งแต่ 10 ถึง 40 ไมครอน เซลล์มีสีน้ำตาลอมเหลือง การดำรงชีวิตมักลอยลอยหรือบางครั้งจะยึดเกาะตามผิววัสดุ ไดอะตอมสายพันธุ์นี้ประกอบไปด้วยโปรตีน กรดไขมัน เป็นจำนวนมากชีวมวลของมันจึงถูกนำมาใช้เป็น พลังงานทดแทน อาหารสัตว์น้ำวัยอ่อน เช่น ลูกกุ้ง ลูกปลา และลูกหอย [13, 14] และภายในเซลล์ประกอบไปด้วยสารสีฟิวโคแซนทิน เป็นสารมีมูลค่าสูงสามารถนำมาใช้เป็นอาหารเสริมสำหรับมนุษย์ได้ ไดอะตอม *Nitzschia* sp. มีการจัดเรียงอนุกรมวิธานตั้งแต่ระดับดิวิชันจนถึงระดับสกุลตามหลักการจำแนกของ Marsson (1901) ดังนี้ [13]

Division Chromophyta

Class Bacillariophyceae

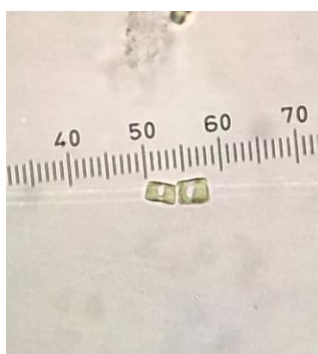
Subclass Bacillariophycidae

Order Bacillariales

Family Bacillariaceae

Genus *Nitzschia*

Species *Nitzschia* sp.



ภาพที่ 2.1 เซลล์ไดอะตอม *Nitzschia* sp.

## 2.2 ฟุโคแซนทิน

ฟุโคแซนทิน คือ สารสีส้มที่อยู่ในกลุ่มแคโรทีนอยด์ประเภทแซนโทฟิลล์ สามารถสกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาลเช่น Fucus, Dictyota และ Laminaria หรือจะพบได้มากในไดอะตอม [15] โดยไดอะตอมคือ สาหร่ายเซลล์เดียว มีลักษณะสีน้ำตาลอมเหลือง เนื่องจากมีปริมาณฟุโคแซนทินสูง ในเซลล์ของไดอะตอม ฟุโคแซนทินมีหน้าที่สำคัญในการให้ คลอโรฟิลล์จับกับโปรตีนเกิดเป็นสารสีโมเลกุลใหญ่ไว้ใช้เก็บเกี่ยวแสง ( Light harvesting complex) ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) [15-17] ฟุโคแซนทินเป็นสารที่มีโครงสร้างเฉพาะตัว โครงสร้างของโมเลกุลประกอบไปด้วยพันธะอัลลินิก (allenic) และ 5,6-monoepoxide โดยจะถูกเผาผลาญและเปลี่ยนเป็น ฟุโคแซนทินอล (fucoxanthinol) ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันเซลล์ไขมันที่ใหม่ ไม่ให้กลายเป็นเซลล์ไขมันที่โตเต็มวัย จากนั้นเปลี่ยนเป็น อะมารูเซียแซนทิน (amarouciaxanthin) ในตับ หลังจากนั้นจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย [16, 17] ทำให้ในปัจจุบันได้มีการนำสารฟุโคแซนทินมาใช้ประโยชน์ทางด้านอาหารเสริม คือ เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร เวชสำอางและยา

### 2.3.1 ประโยชน์ของสารฟุโคแซนทินที่มีต่อร่างกายมนุษย์ [18, 19]

1. ช่วยกระตุ้นโปรตีนไมโทคอนเดรีย ยูซีพีวัน เพื่อกระตุ้นการเผาผลาญไขมันและลดการสะสมของไขมันใหม่
2. ช่วยให้ค่าเลือดดีขึ้น เช่น ค่าการอักเสบของหัวใจ และโรคหลอดเลือดในกลุ่มผู้ป่วยโรคอ้วนลงพุง
3. กระตุ้นการฝ่อตายไปเอง (Apoptosis) ของเซลล์มะเร็งลำไส้ใหญ่ เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาว เซลล์มะเร็งต่อมลูกหมาก เซลล์มะเร็งเต้านม
4. มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ
5. กระตุ้นยีน SERT-1 ที่มีส่วนช่วยลดริ้วรอยและรอยย่นของผิว



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ด้านอาหารและเวชสำอางที่มีสารฟูโคแซนทินเป็นส่วนประกอบ [20]

### 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการผลิตฟูโคแซนทินของไดอะตอม *Nitzschia sp.*

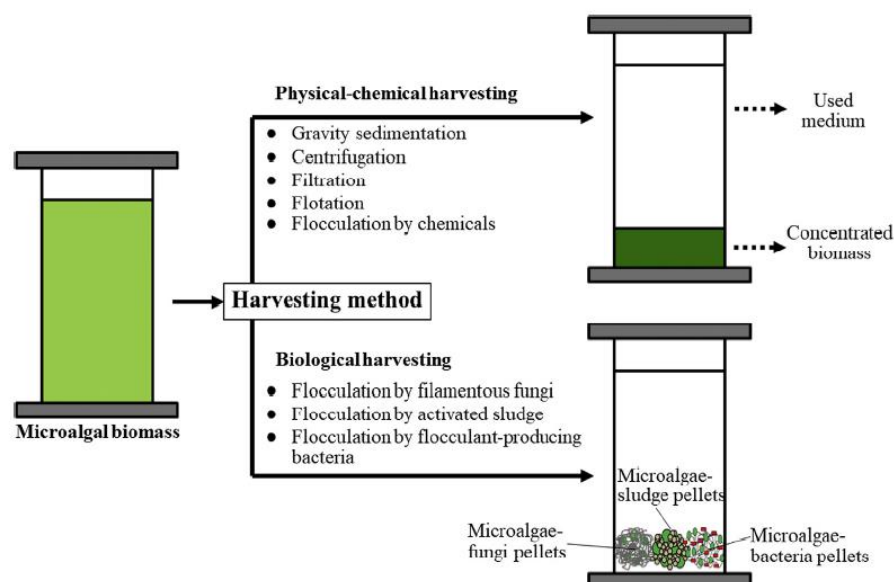
จากการค้นคว้าพบว่าการเพาะเลี้ยงไดอะตอม *Nitzschia sp.* มีค่อนข้างจำกัดโดยเฉพาะการเพาะเลี้ยงเพื่อผลิตฟูโคแซนทิน จากงานวิจัยพบว่า การเพาะเลี้ยงไดอะตอม *Nitzschia sp.* ด้วยสูตรอาหาร F/2 น้ำทะเลความเค็ม 25 psu ที่สภาวะ ความเข้มข้นแสง 2,000 ลักซ์ อุณหภูมิ 22 องศา pH 7.4 สามารถผลิตฟูโคแซนทินได้  $2.23 \pm 0.67 \text{ mg g}^{-1}$  [21] และเพื่อเพิ่มปริมาณสารฟูโคแซนทินจึงมีงานวิจัยที่ได้ทำการปรับสูตรอาหาร F/2 โดยการเพิ่มความเข้มข้นของซิลิกาเพิ่มขึ้น 3 เท่าจากความเข้มข้นเดิม เพาะเลี้ยงภายใต้คาร์บอนไดออกไซด์ 2% โดยปริมาตร ความเข้มข้นแสง 15,000 ลักซ์ จะสามารถผลิตสารฟูโคแซนทินได้มากถึง  $3.35 \pm 0.09 \text{ mg g}^{-1}$  [8]

## 2.4 การเก็บเกี่ยวเซลล์ไดอะตอม

ไดอะตอมที่เลี้ยงในระบบเปิดหรือในระบบปิดแบบ Photobioreactor มักจะมีขนาดเล็กและความเข้มข้นของเซลล์ต่ำอยู่ในช่วง 0.5-5 g/L จึงส่งผลกระทบต่อเรื่องของการเก็บเกี่ยวไดอะตอมและการกำจัดของเหลวเพราะต้องใช้พลังงานในการเก็บเกี่ยวสูง [22] และหากไดอะตอมมีขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอน ไดอะตอมจะลอยตัว ตกตะกอนยากและไม่เอื้ออำนวยในการเก็บเกี่ยว ประจุไฟฟ้าขั้วลบที่อยู่บนผิวจะส่งผลให้เกิดไฟฟ้าสถิตและทำให้ไดอะตอมลอยตัว ไม่เกิดการตกตะกอน โดยในกระบวนการเก็บเกี่ยวเซลล์ไดอะตอมเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีค่าใช้จ่ายสูง 20-30% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด ดังนั้นการเก็บเกี่ยวที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมสำหรับสายพันธุ์แต่ละชนิดและเพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน [23]

วิธีการเก็บเกี่ยวไดอะตอมสามารถจำแนกได้ 2 วิธี คือ

- 1.การเก็บเกี่ยวทางกายภาพ-เคมี (Physical/Chemical harvesting) เช่น การตกตะกอน การปั่นเหวี่ยง การกรอง และการรวมกลุ่ม
- 2.การเก็บเกี่ยวทางชีวภาพหรือ Biological harvesting



ภาพที่ 2.3 รูปแบบของการเก็บเกี่ยวไดอะตอม[24]

### 2.4.1 การปั่นเหวี่ยง (Centrifugation)

การปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวไดอะตอมอย่างกว้างขวางในระดับอุตสาหกรรมเนื่องจาก เป็นเทคนิคที่ง่าย รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพเพื่อเก็บเกี่ยวชีวมวลขนาดเล็ก แต่ต้องใช้พลังงานสูง แรงเหวี่ยงสูงและแรงเหวี่ยงยังอาจทำให้เซลล์แตกและโครงสร้างเสียหายได้ บางอุตสาหกรรมเช่น pharmaceuticals, polyunsaturated fatty acids ต้องมีการกักเก็บชีวมวลหลายรอบดังนั้นจึงต้องมีการปั่นเหวี่ยงสูงขึ้นส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายสูง [23, 24] เครื่องปั่นเหวี่ยง เป็นเครื่องมือสำหรับสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เพื่อนำไปใช้แยกสารหรืออนุภาค โดยอาศัยหลักความแตกต่างของความหนาแน่น ขนาดของสารหรืออนุภาคนั้นๆ เครื่องหมุนเหวี่ยงมีแกนหมุนเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าเข้ามอเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และทำให้แกนมอเตอร์หมุน ความเร็วรอบในการหมุน (rpm = round per minutes) ควบคุมด้วยวงจรไฟฟ้า ส่วนเวลาที่ใช้ในการหมุนควบคุมด้วย สวิตช์ปิด-เปิด หรือนาฬิกา

-ความเร็วรอบและแรงหนีศูนย์กลาง

การแยกสารด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงต้องมีการกำหนดเวลา และแรงหนีศูนย์กลางสำหรับงานนั้นๆ เสมอ ซึ่งในบางครั้งจะพบว่า มีการกำหนดเป็นค่าความเร็วรอบของการหมุนโรเตอร์ ซึ่งอาจเกิดปัญหากับการใช้งานในกรณีที่ต้องการความถูกต้องของแรงหนีศูนย์กลาง แรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ (relative centrifugal force) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับรัศมีการหมุนไม่เท่ากัน ดังนั้นการกำหนดวิธีการแยกสารด้วยค่าความเร็วรอบจึงไม่ใช่วิธีการที่เป็นมาตรฐาน ปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตจึงมักจะเตรียมตารางเทียบค่าทั้งสองที่ใช้กับโรเตอร์แต่ละชนิดของผู้ผลิตไว้แล้ว หรือผู้ใช้สามารถทำการคำนวณได้เอง โดยการใช้สูตรดังต่อไปนี้ [25]

$$RCF = \frac{rpm^2 \times r}{89500}$$

RCF = แรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ หน่วยเป็น xg

r = รัศมีเซลล์ไดอะตอม หน่วยเป็น เซนติเมตร

RPM = อัตราความเร็วรอบ หน่วยเป็น รอบ/นาที (round per minute)

#### 2.4.2 การตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วง (Gravity sedimentation)

การตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วง (Gravity sedimentation) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวที่ถูกนำมาพิจารณาเป็นอันดับต้นๆ เพราะมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำและสะดวก มีการทิ้งของเหลวหลังจากตกตะกอนมากกว่า 90% นิยมใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียและแยกกากตะกอนเนื่องจากมีความสามารถในการรองรับกากตะกอนในปริมาณมากและมูลค่าของชีวมวลไม่สูงนัก โดยของเหลวและของแข็งที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันจะสามารถแยกออกจากสารแขวนลอยโดยการตกตะกอนและจะเห็นความแตกต่างของสีน้ำอย่างชัดเจน กระบวนการนี้ใช้พลังงานต่ำ ต้นทุนในการออกแบบต่ำแต่ข้อเสียคือ มีอัตราการตกตะกอนที่ช้า ซึ่งมีผลมาจาก การเคลื่อนที่ของเซลล์ ความหนาแน่นเซลล์ ขนาดเซลล์และการปั่นป่วนของน้ำ อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะได้ผลเมื่อความหนาแน่นของของแข็งและของเหลวมีความแตกต่างกัน [26] มีงานวิจัยให้เห็นว่าการตกตะกอนจากแรงโน้มถ่วงเหมาะสำหรับการแยกสาหร่ายขนาดใหญ่ เช่นสาหร่ายเกลียวทอง (*Spirulina* spp.) เพื่อเพิ่มการจับตัวของเซลล์ผ่านการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง ควรหยุดการให้อากาศลงจะทำให้เกิดการจับตัวอัตโนมัติของเซลล์ได้ การจับตัวเป็นก้อนจะใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการตกตะกอน นอกจากนี้ การจับตัวอัตโนมัติ สามารถพัฒนาได้โดยการปรับปรุงด้วยการปรับ pH ของสภาวะการเลี้ยงที่เหมาะสมสำหรับการรวมเซลล์ [27, 28] มีงานวิจัยที่ได้ปรับปรุงกระบวนการเก็บเกี่ยวให้เหมาะสมกับสาหร่ายขนาดเล็ก โดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอร์ริกคลอไรด์ เป็นสารช่วยตกตะกอนในกระบวนการตกตะกอน และสามารถเก็บเกี่ยวมวลชีวภาพขนาดเล็กได้มากกว่า 95% และงานวิจัยที่ปรับปรุงวิธีการเก็บเกี่ยวแบบตกตะกอนโดยใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารช่วยตกตะกอนพบว่าสามารถเพิ่มอัตราการตกตะกอนได้มากกว่า 90% ก่อนนำไปปั่นเหวี่ยง [23] นอกจากนี้ยังมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 M ปรับเปลี่ยน pH ในน้ำเพาะเลี้ยงไดอะตอม *Nannochloropsis oculata*, *Phaeodactylum tricornutum* ซึ่งเป็นไดอะตอมน้ำเค็ม พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวได้ถึง 90% โดยช่วง pH ที่เหมาะสมคือ 9 และ 9.3 [28]

การตกตะกอนโดยใช้วิธีทางเคมี คือการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ เกิดการรวมตัวและจับกันเป็นฟล็อก เป็นกระบวนการที่สำคัญในการกำจัดน้ำทิ้ง สามารถกำจัดความขุ่น สี แบคทีเรีย สาหร่าย สารที่เป็นต้นเหตุทำให้เกิดกลิ่นและรสในน้ำและฟอสเฟต โดยเติมสารที่ทำให้ตกตะกอน (Coagulant) ซึ่งทำให้อนุภาคต่าง ๆ เข้ามาเกาะกันได้ เมื่อสารเคมีสัมผัสอนุภาคต่าง ๆ จะทำให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนลง การแปรสภาพรูปร่างของตะกอนเล็ก ๆ กลายเป็นตะกอนใหญ่ขึ้น (Floc) เรียกกระบวนการนี้ว่า การรวมตะกอน (Flocculation) [29] กระบวนการตกตะกอนทางเคมีประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

## 1. การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

เสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงผลักและแรงดูดระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ แรงผลักซึ่งมากกว่าแรงดูดทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ถ้าแรงดูดสูงกว่าแรงผลักอนุภาคคอลลอยด์จะไม่มีเสถียรภาพ และไม่สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

### 1.1 กลไกการลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer)

กลไกนี้เป็นการทำลายเสถียรภาพทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ โดยลดค่าซีตาโพเทนเชียล (Zeta potential) ที่ผิวบนสุดของอนุภาค ดังภาพที่ 2. 4 ด้วยการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาคคอลลอยด์ การทำลายเสถียรภาพโดยการลดความหนาของชั้นกระจายด้วยการเติมสารละลายของเกลือต่างๆ มีที่น่าสนใจดังนี้

- 1.1.1 ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้า (ที่มีไอออนประจุบวก) ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยวิธีลดความหนาของชั้นกระจาย ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์
- 1.1.2 ไม่ว่าจะเติมไอออนประจุบวกมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้คอลลอยด์เปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวก (Charge Reversal) ดังภาพที่ 2.5

### 1.2 กลไกการดูดติดผิวและการทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and charge neutralization)

ทำได้โดยการใส่สารเคมีที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกับประจุอนุภาคคอลลอยด์และสามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ เป็นการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าที่ผิว (Zeta potential) และชั้นกระจายจนกระทั่งแรงแวนเดอร์วาลส์สามารถเอาชนะแรงแผลกกระหว่างอนุภาคได้ จึงทำให้อนุภาคคอลลอยด์สามารถรวมตัวกันตกตะกอนได้

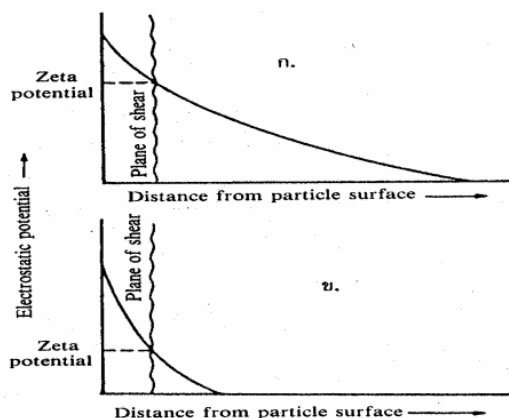
### 1.3 กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation)

การใส่สารส้มให้เกิดผลึก  $Al(OH)_3$  เหมือนวุ้นสีขาว เพื่อให้อนุภาคมาเกาะแล้วรวมตัวกันเป็นฟล็อกได้ กลไกการใช้ผลึกสารอินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรก คือ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum Dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ น้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้โคแอกกูแลนต์จำนวนมากจึงจะเกิดโคแอกกูแลชั่น

ได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้โคแอกกูแลนต์น้อยกว่า เหตุผลคือน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีอากาศสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้นแม้ว่าการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นแล้วก็ตาม โคแอกกูแลนต์อาจไม่เกิดได้ดีเท่าที่ควร การใช้โคแอกกูแลนต์ปริมาณสูงก็เพื่อสร้างผลึกจำนวนมากๆ สำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูง จึงไม่จำเป็นต้องใช้อาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมากเท่ากับกรณีแรก

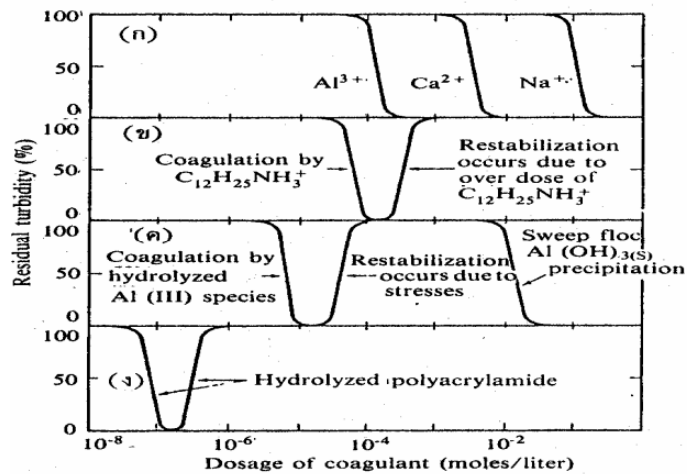
#### 1.4 การใช้สารพอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมของแต่ละอนุภาค(Polymer bridging)

โดยการใส่สารพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ลงไป ในน้ำ ซึ่งโมเลกุลของสารพอลิเมอร์สามารถเกาะติดกับโมเลกุลของอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง และจะดึงเอาอนุภาคคอลลอยด์ให้ตกตะกอนลงไปพร้อมกับสารพอลิเมอร์ได้ สารประกอบธรรมชาติหลายชนิดเช่น แป้ง, เซลลูโลส, น้ำตาลและโปรตีนบางชนิด รวมทั้งสารอินทรีย์พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถใช้เป็นสารโคแอกกูแลนต์ในการกำจัดคอลลอยด์ได้ ซึ่งการเกาะติดนี้อาจเป็นผลมาจากประจุที่ต่างกันของพอลิเมอร์และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงทางปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของพอลิเมอร์และคอลลอยด์



ภาพที่ 2.4 ผลของการเติมอิมอนที่มีประจุตรงข้ามให้กับคอลลอยด์ (ก) ก่อนเติมอิมอน (ข) หลังจากการเติมอิมอนแล้ว [30]





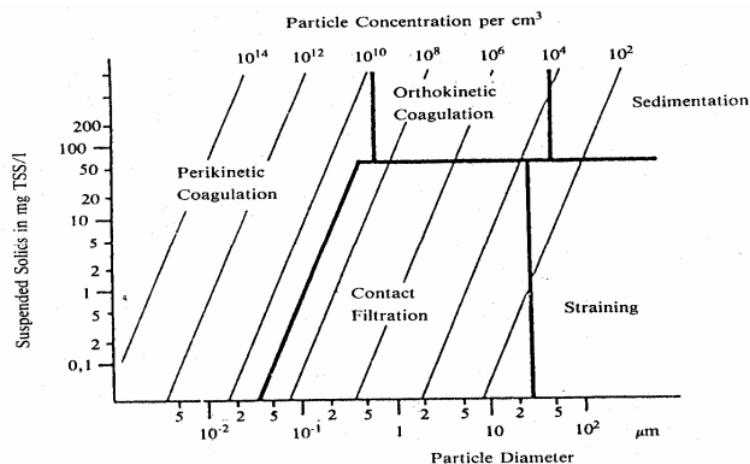
ภาพที่ 2.5 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆจะเห็นว่าแบบ (ก) ซึ่งเป็นการลดความหนาของชั้นกระจายด้วย  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$  และ  $Na^{+}$  ต้องการสารเคมีมากที่สุด ส่วนแบบ (ง) ซึ่งเป็นการใช้โพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อม(สะพาน) ให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมตัวกัน มีความต้องการสารโคแอกกูแลนต์น้อยที่สุด [30]

2. การทำให้อนุภาคต่าง ๆ เคลื่อนที่มากกระทบหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด (transport of colloidal particles)

เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจะมีโอกาสสัมผัสกันระหว่างอนุภาคได้ง่ายขึ้น และหลังสัมผัสแล้วจะเกาะติดแน่นเป็นฟล็อก และหลุดออกจากกันยาก วิธีการสร้างสัมผัสให้อนุภาคมีหลายวิธี ดังภาพที่ 2.6 ดังนี้

- 2.1 การทำให้อนุภาคต่าง ๆ เคลื่อนที่มาสัมผัส โดยอาศัยแรงหรือพลังงานจากภายนอก (orthokinetic flocculation) วิธีปฏิบัติที่นิยมมากที่สุด คือ กวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกัน เป็นเหตุให้อนุภาคต่างๆมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่รวดเร็วจนเกินไป มิฉะนั้นแล้วฟล็อกที่เกิดขึ้นอาจจะแตกหรือหลุดออกจากกันได้วิธีนี้เป็นวิธีธรรมดาที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ในการสร้างสัมผัสหรือสร้างฟล็อกคู่เคลื่อนเรียกว่า ถังกวนช้า และวิธีการสร้างสัมผัสนี้มีชื่อเทคนิคว่า Orthokinetic flocculation อนุภาคคอลลอยด์ที่มีฟล็อกคู่เคลื่อนแบบนี้ควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอนและมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก/ล.

- 2.2 การรวมตะกอนเป็นวิธีการสัมผัสกันของอนุภาคคอลลอยด์ที่อาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Peri-kinetic flocculation) โดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบ บราวเนียน(Brownian motion) ซึ่งเกิดขึ้นจากอนุภาคของคอลลอยด์ถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ
- 2.3 การสร้างตะกอนด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน การสัมผัสกันของอนุภาคคอลลอยด์เกิดจากการตกตะกอนด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันของอนุภาคขนาดต่าง ๆ โดยอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่จะตกตะกอนลงมาด้วยความเร็วสูงกว่าอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็ก
- 2.4 การกรองสัมผัส(Contact filtration) ชั้นกรองจะช่วยเพิ่มอัตราสัมผัสให้และยังบังคับให้อนุภาคต่าง ๆ เคลื่อนที่เข้ามาชิดกันด้วย ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอนและมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มก/ล. ฟล็อกคูลชันอาจจะเกิดขึ้นโดยการสร้างสัมผัสแบบ orthokinetic flocculation แต่อาจเกิดขึ้นช้าเนื่องจากโอกาสสัมผัสน้อย วิธีแก้ไขอาจกระทำดังนี้
- 2.4.1 ใช้ถังกรองทรายแบบกรองเร็วหรือถังกรองแบบ 2 ชั้น ชั้นกรองช่วยเพิ่มอัตราสัมผัสให้และยังบังคับให้อนุภาคต่างๆเคลื่อนที่เข้ามาชิดกันด้วย การใช้ถังกรองช่วยสร้างฟล็อกคูลชันเช่นนี้เรียกว่ากรองสัมผัส (Contact filtration) แต่เนื่องจากช่องว่างในชั้นกรองมีจำกัด วิธีนี้จึงใช้ได้กับอนุภาคที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 50 มก/ล. การใช้กรวดขนาดเล็กแทนทรายอาจจะเพิ่มปริมาตรช่องว่างได้แต่เป็นการลดพื้นที่สัมผัส ดังนั้นจึงอาจจะได้ผลในทางฟล็อกคูลชันไม่ดีเท่าชั้นทราย
- 2.4.2 ใช้อนุภาคที่จับตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคใหม่ ในทางปฏิบัติสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ ทำให้ฟล็อกจับตัวกันเป็นชั้นสลัดจ์ (Sludge Blanket) และบังคับให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ผ่านชั้นสลัดจ์ อีกวิธีหนึ่งคือนำเอาฟล็อกกลับคืนมาผสมกับอนุภาคคอลลอยด์จากนั้นจึงสร้างสัมผัสตามแบบ orthokinetic flocculation ไปตามปกติ การใช้ถังตกตะกอนแบบ Solids Contact Clarifier ก็ใช้หลักการนี้
- 2.5 การใช้อนุภาคที่จับตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเป็นเป้าสัมผัสให้อนุภาคใหม่ กรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอนแต่มีความเข้มข้นต่ำ การสร้างสัมผัสอาจใช้วิธีการกรองได้เช่นกัน แต่สารกรองที่ใช้ควรมีขนาดใหญ่กว่าทราย



ภาพที่ 2.6 เภทที่ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคต่างๆทั้ง 5 ประเภท [30]

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตกตะกอน

#### 1. พีเอช (pH)

น้ำแต่ละชนิดจะมีช่วงของพีเอช ที่เกิดการรวมตัวและตกตะกอนได้ การเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำที่ไม่อยู่ในค่า pH ที่เหมาะสม นอกจากจะไม่เปลืองสารเคมีแล้วยังจะทำให้น้ำที่เหลือมีคุณภาพที่ดีอีกด้วย จากงานวิจัยพบว่า การเก็บเกี่ยวไดอะตอมน้ำจืด *Chromochloris zofingienis* ด้วยการปรับค่า pH ด้วย NaOH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จะทำให้ประสิทธิภาพการรวมตัวสูงของชีวมวลสูงขึ้น อีกทั้งอัตราเร็วในการตกตะกอนมีค่าสูงขึ้นมากกว่า 90% เมื่อความเข้มข้นของ NaOH มีค่าน้อยกว่า 10 mM [23] น้ำตามธรรมชาติมักจะมีเกลืออินทรีย์ละลายอยู่ในความเข้มข้นที่แตกต่างกันซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสิ่งเหล่านี้

- ช่วง pH ที่เหมาะสม
- ระยะเวลาในการจับตัวของตะกอน
- ปริมาณสารเคมีสร้างตะกอนที่เหมาะสม
- ปริมาณของสารเคมีที่อยู่ในน้ำ

## 2. คุณสมบัติความชุ่ม

คุณสมบัติความชุ่มในน้ำเกิดจากเศษดินและแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 0.002-0.005 มิลลิเมตร อนุภาคเหล่านี้จะตกตะกอนได้เองถ้ามีเวลามากพอ การเติมสารสร้างตะกอนลงในน้ำจะทำให้การจับตัวเป็นตะกอนเกิดได้ง่ายและรวดเร็ว แต่การเพิ่มของปริมาณสารสร้างตะกอนที่เติมลงในน้ำไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความชุ่มที่เพิ่มขึ้นเพราะที่ความชุ่มมากจะจับตัวตกตะกอนได้ง่ายกว่าเนื่องจากโอกาสที่อนุภาคต่าง ๆ จะมาชนกันและจับตัวกันมีมากขึ้น

## 3. ชนิดของสารเคมีสร้างตะกอน

การเลือกชนิดของสารเคมีสร้างตะกอนจะต้องทำการทดลองเปรียบเทียบ สารส้มเป็นสารเคมี ที่นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะมีราคาถูกและหาได้ง่าย ในงานวิจัยพบว่ามีการใช้สารสร้างตะกอนชีวภาพหลายชนิด เช่น Poly- $\gamma$ -glutamic acid ( $\gamma$ -PGA) ที่นำมาเป็นสารช่วยตกตะกอนในสาหร่ายที่มีค่า pH ต่ำ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรวมตัวของชีวมวลได้มากกว่า 96% และใช้เวลาในการตกตะกอนเพียง 10 นาที [10]

## 4. อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิลดลง ความหนืด (Viscosity) ของน้ำจะเพิ่มขึ้น อัตราการตกตะกอนของฟล็อกจะช้าลง เพราะมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนืดของน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ pH จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย

## 5. การกวน

การกวนเพื่อให้เกิดการปั่นป่วนในน้ำ ในตอนแรกจะเป็นการกวนเร็วเนื่องจากการกวนเร็วจะทำให้มีโอกาสที่อนุภาคต่าง ๆ จะมาชนกันและจับตัวกันมากขึ้น ต่อมาจะเป็นการกวนช้าเพื่อป้องกันฟล็อกที่จับตัวกันไม่ให้แตกตัว

## 6. อัตราการเกิดฟล็อก

ในระยะแรกของการเกิดฟล็อก อนุภาคมีการชนกันถี่เท่าไร้อัตราที่จะเกิดเป็นฟล็อกก็จะมีมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มจำนวนฟล็อกแล้วยังเพิ่มน้ำหนักและขนาดฟล็อกอีกด้วย [29]

### ประเภทของการตกตะกอน

1. Discrete Settling หรือ free sedimentation คือ การตกตะกอนที่อนุภาคไม่มีปฏิสัมพันธ์กัน ขนาดและความเร็วของการตกตะกอนไม่เปลี่ยนแปลง พบมากในระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากอนุภาคมีน้ำหนักแน่นอน มีความเร็วที่สำคัญคือ settling velocity ( $V_s$ ) และ overflow rate ( $V_0$ ) สามารถคำนวณหาความเร็วที่ใช้ในการตกตะกอนได้จาก Stokes' law

$$V_s = \frac{g(p-p_s)d^2}{18\mu}$$

เมื่อ  $V_s$  คือ settling velocity

$p_s$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค

$p$  คือ ความหนาแน่นของสารละลาย

$d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

$\mu$  คือ ความหนืดของสารละลาย

2. Flocculation settling เป็นการตกตะกอนที่อนุภาคสามารถยุบตัวรวมกันได้ รวมตัวกันได้ เกาะกันได้ดี ทำให้ปริมาตรลดลงแต่ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งการที่ตะกอนรวมตัวกันทำให้ความเร็วในการตกตะกอน ( $V_s$ ) เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการตกตะกอนประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับความลึกของถังตกตะกอนและพื้นที่ผิวหน้าตัด
3. Zone settling เป็นการตกตะกอนเหมือนแบบที่ 2 แต่จะเกิดเมื่อในน้ำมีตะกอนหนาแน่น ( $SS > 1000$  mg/L) ทำให้มองเห็นเป็นการตกเป็นแถวๆ เรียงเป็นชั้นๆ ความเร็วที่ใช้ในการตกตะกอนจะคงที่
4. Compression settling เป็นการตกตะกอนที่อนุภาคจะตกลงกันถึง และเมื่ออนุภาคด้านบนตกลงมาทับกันมาก ๆ อนุภาคด้านล่างจะถูกกดอัดและยุบตัว แล้วอนุภาคชั้นต่อ ๆ ไปก็จะถูกกดอัดและยุบตัวมาเรื่อย ๆ ตามอนุภาคที่ตกลงมา ทำให้มีพื้นที่ในการตกตะกอนอีกเกิดขึ้นในน้ำที่มีตะกอนหนาแน่นสูง ( $SS > 22,000$  mg/L)

### 2.4.3 การกรอง (Filtration)

การกรอง (Filtration) การกรองเป็นกระบวนการแยกมวลชีวภาพขนาดเล็กจากตัวกลางที่เป็นของเหลวโดยทำให้สารผ่านตัวกรองภายใต้แรงโน้มถ่วงหรือความดันสุญญากาศ โดยเซลล์สำหรับ

ขนาดเล็กจะถูกกักเก็บไว้บนผ้ากรอง กระบวนการกรองสามารถทำได้ทั้งระบบแบบต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่อง ประโยชน์ของการเก็บเกี่ยวด้วยวิธีการกรองคือ ไม่ใช้สารเคมี ประหยัด ง่ายและไม่ใช้พลังงาน วัสดุเมมเบรนสามารถเป็นพอลิเมอร์ทั่วไปหรือเซรามิกได้ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเมมเบรนพอลิเมอร์และเซรามิก พบว่าเมมเบรนเซรามิกให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าในด้านอัตราการไหลที่สูงและความสามารถในการทำซ้ำได้สูงกว่าแต่ราคาของเมมเบรนแบบเซรามิกสูงกว่าเมมเบรนพอลิเมอร์ เมื่อเร็วๆ นี้ได้มีงานวิจัยที่พัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ราคาถูกเช่น พอลิเมอร์อะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนส์ไตรีน เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการแยกน้ำออกจากสาหร่ายขนาดเล็ก การพัฒนานี้ยังสามารถช่วยลดต้นทุนได้มากสำหรับกระบวนการเก็บเกี่ยวชีวมวลผ่านการกรอง [24]

ประสิทธิภาพการกรองขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ขนาดรูพรุนของแผ่นกรอง ความหนืดของของเหลวที่กรอง จำนวนของสารแขวนลอยในของเหลว และความดันที่ใช้ แผ่นกรองหรือตัวกลางที่กรองต้องมีรูพรุนที่เล็กพอเพื่อที่จะสามารถกรองอนุภาคต่าง ๆ ได้ นอกจากนั้นรูพรุนเหล่านี้ต้องไม่อุดตันได้ง่ายซึ่งจะไปลดประสิทธิภาพของการกรอง และแผ่นกรองต้องมีความแข็งแรงพอที่จะไม่ขาดได้ง่ายเมื่อใช้แรงดัน และต้องสามารถขจัดเอา Filter cake ออกได้ง่าย บางครั้งตัวช่วยกรอง เช่น diatomaceous earth หรือแร่เพอร์ไลต์ ซึ่งเป็น หินซิลิเกต ก็ใช้เป็นตัวช่วยในการแยกแหว่งของแข็งออกจากของเหลว ตัวช่วยกรองเหล่านี้เติมลงไปในสารแขวนลอยในระหว่างการกรองเพื่อเพิ่มปริมาณของ filter cake ที่อยู่บนแผ่นกรอง ซึ่งจะใช้ filter acid หรือตัวช่วยกรองที่ต่อเมื่อ filtrate หรือสิ่งที่กรองได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า ราคาแพง [31]

ประเภทของการกรอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปแบบการกรองสามารถแบ่งออกได้ 3 แบบ คือ การกรองแบบผ่านตัวกลางหรือตะแกรง (Screen filtration) การกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (Depth filtration) และการกรองแบบติดค้างที่ผิวหน้า (Surface filtration) ซึ่งรูปแบบการกรองจะเป็นแบบใดขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลางที่นำมาใช้ในการกรอง การกรองแต่ละแบบจะมีอัตราเร็วที่แตกต่างกัน ดังนี้ [32]

1. การกรองแบบผ่านตัวกลางหรือตะแกรง (Screen filtration) เป็นการกรองที่มีอัตราเร็วในการกรองสูงสุด ตะกอนหรือสารแขวนลอยจะติดอยู่บนผิววัสดุกรอง วัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวกลางในการกรองสามารถทำจากผ้า เส้นใยสังเคราะห์หรือแผ่นโลหะได้

2. การกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (Depth filtration) เป็นรูปแบบการกรองแบบธรรมดา อัตราเร็วต่ำกว่าการกรองแบบผ่านตัวกลางหรือตะแกรง นิยมใช้ในโรงงานผลิตน้ำประปา สารกรองที่นิยมนำมาใช้ คือ ทราย เนื่องจากขนาดของสารกรองมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาค อนุภาคจึงมีโอกาสเข้าไปในชั้นกรองได้

3. การกรองแบบติดค้างที่ผิวหน้า (Surface filtration) เป็นรูปแบบการกรองที่มีอัตราเร็วต่ำที่สุด ลักษณะคล้ายกับการกรองแบบผ่านตัวกลางหรือตะแกรง คือตะกอนหรือสารแขวนลอยจะถูกดักจับและติดค้างที่ผิวของสารกรอง เช่น เครื่องกรองสารแบบชั่วคราว นิยมใช้ดินเบาในการฉาบลงบนผิวชั้นกรองให้มีความหนา 3-5 มิลลิเมตร ทำให้ได้รูกรอง 1-100 ไมครอน เมื่อเดินระบบกรองจนอุดตันจะต้องชูดเอาสารกรองทิ้งไป

การเดินระบบการกรองแบ่งออกได้ 2 ระบบ คือ ระบบความดันคงที่ (Constant Pressure) และ ระบบค่าฟลักซ์คงที่ (Constant flux) [31]

-ระบบความดันคงที่ (Constant Pressure)

เป็นระบบที่มีการควบคุมความดันไว้ที่ค่าหนึ่ง ให้คงที่ตลอดเวลาในการเดินระบบ โดยไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์ อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านระบบกรองจะลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป ส่งผลให้ค่า ฟลักซ์มีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการอุดตันของแผ่นกรอง ข้อดีของระบบนี้คือสามารถเลือกขนาดปั๊มได้ตามต้องการ

-ระบบค่าฟลักซ์คงที่ (Constant flux)

เป็นระบบที่มีการควบคุมค่าฟลักซ์ให้คงที่ค่าหนึ่ง เมื่อเดินระบบจะมีการเพิ่มความดันให้กับระบบเพื่อรักษาค่าฟลักซ์ให้มีค่าคงที่ ทำให้มีการใช้พลังงานมากขึ้น การกรองแบบนี้มีข้อดีคือสามารถลดขนาดของเครื่องกรองเพื่อรองรับของไหลทั้งหมดที่ต้องทำการกรองได้

ค่าฟลักซ์ (Flux)

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกรองคือ ค่าฟลักซ์ ลักษณะการไหลของของเหลว และความเข้มข้นของสารละลายที่ทำการกรอง ลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) จะมีผลทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ถ้าความเข้มข้นสารละลายมากขึ้นจะทำให้ค่าฟลักซ์ของการกรองมีค่าลดลง โดยค่าฟลักซ์จะเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการกรอง ซึ่งแสดงในรูปของปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่านรูพรุนของวัสดุกรองต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา สามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้ [31]

$$J = \frac{Q}{A\Delta t}$$

เมื่อ  $J$  = ค่าฟลักซ์ (ลิตร/ตารางเมตร/ชั่วโมง)

$Q$  = ปริมาตรของของเหลวที่ผ่านแผ่นกรอง (ลิตร)

$A$  = พื้นที่ผิวของแผ่นกรองที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (ตารางเมตร)

$\Delta t$  = เวลาที่เก็บของเหลว (ชั่วโมง)

ส่วนประสิทธิภาพการกรอง (E)% ของหน่วยกรองตะกอนสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$E = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100$$

เมื่อ  $C_0$  = ความเข้มข้นของอนุภาคในน้ำที่เข้าหน่วยกรองตะกอน

$C_1$  = ความเข้มข้นของอนุภาคในน้ำที่กรองได้

ซึ่งทั้งค่าฟลักซ์และประสิทธิภาพในการกรองสามารถนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของหน่วยกรองตะกอนได้ โดยค่าฟลักซ์ที่ลดลงสามารถบอกได้ว่าน้ำที่กรองได้ต่อพื้นที่ของวัสดุกรองมีปริมาตรลดลงเนื่องจากการอุดตัน ส่วนประสิทธิภาพการกรองจะบอกถึงคุณภาพของน้ำในหน่วยกรองตะกอนที่สามารถกรองได้

ประเภทของผ้ากรอง

ประเภทของผ้ากรองที่ใช้ในการกรองของเหลวมีหลายชนิด ได้แก่

- ผ้ากรองชนิดพอลิโพรพิลีน (Polypropylene Fabric Filter)
- ผ้ากรองชนิดพอลิเอสเตอร์ (Polyester Fabric Filter)
- ผ้ากรองชนิดไนลอน (Nylon Fabric Filter)
- ผ้ากรองชนิด stainless steel 304

ในที่นี้จะกล่าวถึงผ้ากรองพอลิเอสเตอร์ ไนลอน และ stainless steel 304 เนื่องจากนำมาใช้ในการทดลอง โดยรายละเอียดมี ดังนี้



- ผ้ากรองชนิดโพลีเอสเตอร์ (Polyester Fabric Filter)

ผ้ากรองชนิดโพลีเอสเตอร์เป็นเส้นใยสังเคราะห์ มีคุณสมบัติแห้งเร็ว พื้นผิวแข็งกระด้าง ไม่ยืดไม่หดหรือยับ ทนความร้อนได้สูง ทนแรงดึงได้มากกว่าผ้ากรองชนิดไนลอน [31] มีมุมสัมผัสกับหยดน้ำเท่ากับ  $117^{\circ}$  [33]

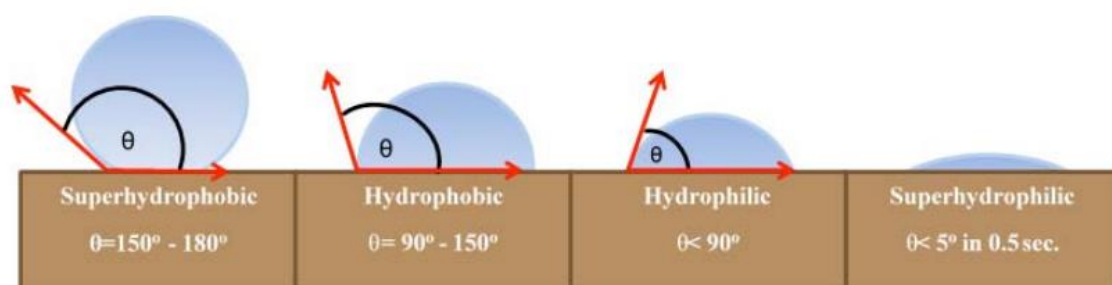
- ผ้ากรองชนิดไนลอน (Nylon Fabric Filter)

ผ้ากรองชนิดไนลอนสังเคราะห์ขึ้นจากสารเคมีเป็นองค์ประกอบหลัก มีความหนาแน่นสูงผ้ากรองชนิดนี้สามารถซึมซับน้ำได้ง่ายและเร็ว น้ำหนักเบา ผิวสัมผัสอ่อนนุ่ม ทนต่อรังสีอัลตราไวโอเลตแต่ไม่สามารถทนต่อแรงดึงจึงทำให้ยับง่าย [31] มีมุมสัมผัสกับหยดน้ำเท่ากับ  $86^{\circ}$  [34]

- ผ้ากรองชนิด Stainless 304

ผ้ากรองชนิดนี้จะแตกต่างจาก 2 ชนิดที่กล่าวมาเนื่องจากไม่ได้ทำจากเส้นใยแต่ทำจากเส้นสแตนเลส แล้วนำมาถักสานเป็นตาข่าย มีความทนต่อการฉีกขาดและกัดกร่อน [35] มีมุมสัมผัสกับหยดน้ำเท่ากับ  $70.77^{\circ}$  [36]

มุมสัมผัส (Contact angle) คือ มุมระหว่างระนาบของของเหลวกับอากาศที่กระทำต่อกัน ซึ่งมุมสัมผัสจะใช้ในการบ่งบอกคุณลักษณะของชิ้นงานหรือตัวอย่างได้ มุมสัมผัสมากแสดงพฤติกรรมแบบ Hydrophobic (ภาพที่ 2.7) ยกตัวอย่างเช่น เมื่อหยดน้ำลงบนชิ้นงานเพื่อทดสอบการกลิ้งของหยดน้ำที่หยดลงไป หากมุมสัมผัสมากจะทำให้น้ำกลิ้งออกจากชิ้นงานได้ง่าย ในทางกลับกันมุมสัมผัสที่น้อยจะแสดงพฤติกรรม Hydrophilic ช่วยในการเชื่อมหรือติดระหว่างชั้นของของเหลวกับชั้นของของแข็งให้แน่นสนิทกัน[37]



ภาพที่ 2.7 มุมมองแผนผังของพื้นผิว superhydrophilic, hydrophilic, hydrophobic และ superhydrophobic (จากซ้ายไปขวา) [38]

#### 2.4.4 การลอยตัว(Flotation)

กระบวนการลอยตัวเป็นเทคนิคที่ทำงานตรงข้ามกับการตกตะกอน คือ ทำให้ของแข็งที่ต้องการลอยตัวขึ้นเพื่อแยกออกจากน้ำ โดยการผสมน้ำกับฟองอากาศขนาดเล็ก เมื่อฟองอากาศลอยตัวขึ้นจะพาของแข็งที่สัมผัสกับฟองอากาศนั้นลอยขึ้นสู่น้ำ วิธีการทำให้ลอยมี 4 วิธี ดังนี้ [24]

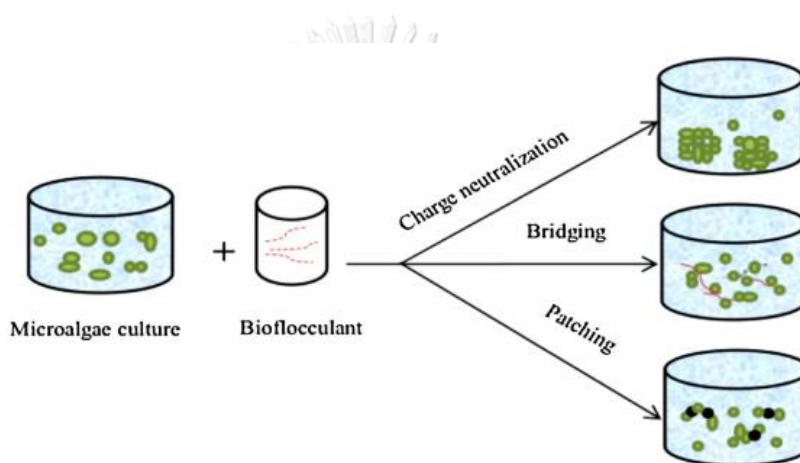
1. Dispersed air flotation
2. Dissolved air flotation
3. Electro-flotation
4. Ozone-flotation

อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเซลล์สาหร่ายเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการลอยตัว มีงานวิจัยค้นพบว่าวิธี Ozone flotation มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีอื่น วิธี Ozone flotation สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการลอยตัวของเซลล์สาหร่าย โดยจะปรับปรุงพื้นผิวของผนังเซลล์และลดการปล่อยสารบางอย่างที่ออกจากผนังเซลล์ ยิ่งไปกว่านั้นวิธีนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณภาพของน้ำให้มีความชุ่มและสารอินทรีย์ในน้ำลดลง อีกปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกแบบลอยตัวคือ ขนาดของฟองอากาศ ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีความเร็วของฟองอากาศช้าและพื้นที่ต่อปริมาตรสูง ทำให้เซลล์สาหร่ายมีพื้นที่และเวลาในการสัมผัสกับฟองแก๊สนาน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวด้วยการลอยตัวสูงขึ้น อีกทั้งการทำงานร่วมกันระหว่างการรวมกลุ่มกับการลอยตัวยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวได้อีกด้วย [24]

#### 2.4.5 การตกตะกอนแบบชีวภาพโดยใช้เชื้อราเส้นใย (Bioflocculation by filamentous fungi)

การเก็บเกี่ยวสาหร่ายขนาดเล็กด้วยวิธีทางชีวภาพคือทางเลือกหนึ่งในการแยกมวลชีวภาพขนาดเล็กจากของเหลว เนื่องจากวิธีนี้ใช้พลังงานต่ำและไม่มีการเติมสารเคมี เมื่อเร็ว ๆ นี้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กด้วยเชื้อราเส้นใยถือเป็นวิธีการที่มีศักยภาพสำหรับการเก็บเกี่ยว microalgal การทำ bioflocculation สามารถทำได้โดยการเพิ่มเชื้อราแบบเพลเลตทรงกลมหรือสปอร์ เชื้อราแบบเพลเลตทรงกลมเป็นตัวช่วยใน bioflocculation มี 2 ขั้นตอน คือ 1. ในการอัดเป็นทรงกลมของเซลล์เชื้อราก่อนที่จะเติมลงในน้ำเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก เทคนิคนี้สามารถเก็บเกี่ยวเซลล์สาหร่ายขนาดเล็ก แต่ต้องเติมอาหารเลี้ยงเชื้อตามระยะเวลาในการสร้างเม็ดเชื้อรา เทคนิคที่สองที่ใช้คือ สปอร์ของเชื้อราเรียกว่า co-pelletization ช่วยให้เชื้อราเติบโตและพร้อมจับกลุ่มเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กในเชื้อราแบบเพลเลตทรงกลม(ภาพที่ 2.8) เทคนิคนี้สามารถลดขั้นตอนการดำเนินงานและเพิ่มผลผลิต

อย่างไรก็ตามไม่ใช่เชื้อราทุกชนิดที่สามารถใช้วิธี co-pelletization ได้มีงานวิจัยรายงานว่าเชื้อราไตรโคเดอร์มารีซีไอ *Trichoderma reesei* ไม่สามารถทำเป็นเพลเลตทรงกลมกับเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กได้ ทั้งนี้เชื้อราแบบเพลเลตทรงกลมสามารถเก็บเกี่ยวเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยเวลา 10 นาที เชื้อราแบบเพลเลตทรงกลมอื่น ๆ ที่ใช้ในการรวมกลุ่มทางชีวภาพของเซลล์สาหร่ายขนาดเล็ก ได้แก่ เชื้อราเพลเลตทรงกลมจาก *Mucor circinelloides*, *Penicillium expansum* และ *Rhizopus oryzae*[39] เชื้อราจะเข้าไปเปลี่ยนประจุบนพื้นผิวของเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กจากลบให้เป็นกลาง ทำให้เซลล์สาหร่ายขนาดเล็กติดกับเม็ดของเชื้อรา ด้วยการที่เซลล์เชื้อราจะหลั่งสารเหนียวออกมานอกเซลล์ทำให้เซลล์สาหร่ายขนาดเล็กเข้าไปติดกับมันได้ [24]



ภาพที่ 2.8 กลไกการรวมกลุ่มทางชีวภาพของสาหร่ายขนาดเล็ก [10]

#### 2.4.6 การตกตะกอนแบบชีวภาพโดยใช้แบคทีเรีย (Bio-flocculation by flocculant-producing bacteria)

การตกตะกอนทางชีวภาพที่เป็นนวัตกรรมใหม่โดยใช้แบคทีเรียเข้ามาช่วยเรียกว่า bio-flocculant สามารถแยกตะกอนออกจากน้ำได้หลายชนิดอีกทั้งยังได้ตะกอนในปริมาณที่สูงอีกด้วย สามารถลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีฟีนอล น้ำเสียจากโรงงานปศุสัตว์ น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม นิยมนำมาใช้เพราะต้นทุนถูกและมีอาหารเลี้ยงเชื้อสำหรับแบคทีเรีย ทำให้การรวมกลุ่มทางชีวภาพ ทำให้เป็นที่นิยมอย่างมาก

การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กด้วยแบคทีเรียที่ผลิตสารช่วยตกตะกอนสามารถลดขั้นตอนและเวลาได้การเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย โดยเซลล์แบคทีเรียจะสร้างสารพอลิเมอร์ออกมานอกเซลล์ที่สามารถออกฤทธิ์เป็น bio-flocculant และช่วยให้การตกตะกอนของเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กดีขึ้น

นอกจากนี้ยังเป็นไปได้ว่าเซลล์ทั้งสองอาจผลิตสารพอลิเมอร์ออกมานอกเซลล์ที่มีความแตกต่างกันเมื่อเซลล์สัมผัสกันจะเกิดการตกตะกอน มีงานวิจัยค้นพบว่าการเติมแบคทีเรียเข้าไปในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสาหร่ายขนาดเล็กกอยู่ จะช่วยให้มีประสิทธิภาพการรวมกลุ่มตกตะกอนถึง 83% ในเวลา 24 ชั่วโมง [24]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าพบว่าข้อมูลการเก็บเกี่ยวเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กด้วยวิธีการตกตะกอนมีอยู่มากในน้ำจืด แต่เซลล์สาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในน้ำทะเลมีน้อย มีการใช้เทคนิคมากกว่าหนึ่งเทคนิคในการเก็บเกี่ยวเพื่อความคุ้มค่าในระดับอุตสาหกรรม ใช้สารตกตะกอนที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน อีกทั้งประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวก็ยังขึ้นกับเทคนิคแต่ละอย่างที่ใช้ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 วิธีที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวชีวมวลของไดอะตอมแต่ละชนิด

สายพันธุ์สาหร่าย	น้ำเพาะเลี้ยง	เทคนิคที่ใช้	สารช่วยตกตะกอน	ประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยว	pH	อ้างอิง
<i>Chromochloris zofingiensis</i>	น้ำจืด	Flocculation+ Centrifugation	0.5 M Mg(OH) <sub>2</sub>	>90%	9.5	[23]
<i>Desmodesmus</i> sp.	น้ำจืด	Bio flocculation	Poly-Y-glutamic acid	>96%	3	[10]
<i>Micractinium reisseri</i>	น้ำจืด	Bio flocculation	Chitosan	>99.5%	4	[27]
<i>Scenedesmus obliquus</i>	น้ำจืด	Bio flocculation	Chitosan	>99.5%	4	[27]
<i>Tetraselmis</i> sp.	น้ำทะเล	Flotation	1,3-diamine hydrochloride (1:1) with HCl	>99%	6	[11]
<i>Chlorella vulgaris</i>	น้ำจืด	Flocculation	1M Mg(OH) <sub>2</sub>	>95%	11.5	[28]
<i>Scenedesmus</i> sp.	น้ำจืด	Flocculation	1 M NaOH	>90%	11.5	[28]

สายพันธุ์สาหร่าย	น้ำ เพาะเลี้ยง	เทคนิคที่ใช้	สารช่วย ตกตะกอน	ประสิทธิภาพ ในการเก็บ เกี่ยว	pH	อ้างอิง
<i>Chlorococcum</i> sp.	น้ำจืด	Flocculation	1 M NaOH	>90%	11.5	[28]
<i>Nahnochloropsis</i> <i>oculate</i>	น้ำทะเล	Flocculation	1 M NaOH	>90%	9.5	[28]
<i>Phaeodactylum</i> <i>tricornutum</i>	น้ำทะเล	Flocculation	1 M NaOH	>90%	9.5	[28]
<i>Chlorella</i> <i>vulgaris</i>	น้ำจืด	Flocculation	0.1 nM Mg(OH) <sub>2</sub>	90%	10.7	[40]
<i>Phaeodactylum</i> <i>tricornutum</i>	น้ำทะเล	Flocculation	0.1 nM Mg(OH) <sub>2</sub>	73%	10.3	[41]

จากการค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับการเก็บเกี่ยวสาหร่ายขนาดเล็กด้วยวิธีการกรองมืออยู่ค่อนข้างน้อย และปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวมีอยู่หลายชนิด เช่น ขนาดของเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กแต่ละสายพันธุ์ ขนาดรูพรุนของผ้ากรอง ความหนืด และวัสดุที่ใช้ทำ membrane มีการป้องกันไม่ให้เกิดการอุดตันของ membrane ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และยังมีงานวิจัยที่ได้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบการกรองเพื่อแยกตะกอนออกจากน้ำเลี้ยงปลา โดยใช้รูปแบบการกรองแบบลาดเอียงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกตะกอนออกจากน้ำบ่อเลี้ยงปลา [31]

ตารางที่ 2.2 ประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวด้วยวิธีการกรองในไดอะตอมแต่ละชนิด

สายพันธุ์สาหร่าย	เทคนิคที่ใช้	ประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยว	Membrane	อ้างอิง
<i>Phaeodactylum tricorutum</i>	Filtration	98%	polyvinylidene fluoride	[42]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Filtration	98%	polyvinylidene fluoride	[42]
<i>Phaeodactylum tricorutum</i>	Filtration	85%	Ceramic membrane 2 ไมครอน	[43]
<i>Nannochloropsis gaditana</i>	Filtration	89%	Ceramic membrane 2 ไมครอน	[43]
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	Filtration	97%	Ceramic membrane 2 ไมครอน	[43]

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.1 การเตรียมชีวมวลไดอะตอม

หัวเชื้อไดอะตอม *Nitzschia* sp. ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นำหัวเชื้อไดอะตอมปริมาตร 5 มิลลิลิตร มาผสมกับอาหารสูตร F/2 (ตารางที่ 3.1) ปริมาตร 45 มิลลิลิตร ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่ปิดด้วยจุกสำลี ทำการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 วัน จากนั้นถ่ายหัวเชื้อ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และนำมาผสมกับอาหารสูตร F/2 โดยใช้ส่วนประกอบดังตารางที่ 3.1 อย่างละ 1 มิลลิลิตร ยกเว้น F/2 vitamin solution ใช้ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ในน้ำทะเลความเค็ม 30 พีเอสยู ปริมาตร 900 มิลลิลิตร ทำการเพาะเลี้ยงไดอะตอมในขวดแก้วดูแรนที่ความเข้มแสง 5,000 ลักซ์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เปลี่ยนถ่ายหัวเชื้อทุกสัปดาห์เพื่อให้มีปริมาณเพียงพอสำหรับการทดลอง

ตารางที่ 3.1 อาหารสูตรมาตรฐานกิลลาร์ด F/2 [44]

ส่วนประกอบ	ความเข้มข้น
NaNO <sub>3</sub>	8.83×10 <sup>-4</sup> M
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	3.63×10 <sup>-5</sup> M
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	1.07×10 <sup>-4</sup> M
F/2 trace metal solution	ส่วนที่ 2
F/2 vitamin solution	ส่วนที่ 3

## F/2 trace metal solution (ส่วนที่ 2)

ส่วนประกอบ	ความเข้มข้น
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	1×10 <sup>-5</sup> M
Na <sub>2</sub> EDTA·2H <sub>2</sub> O	1×10 <sup>-5</sup> M
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	4×10 <sup>-8</sup> M
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	3×10 <sup>-8</sup> M
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	8×10 <sup>-8</sup> M
CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5×10 <sup>-8</sup> M
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	9×10 <sup>-7</sup> M

## F/2 vitamin solution (ส่วนที่ 3)

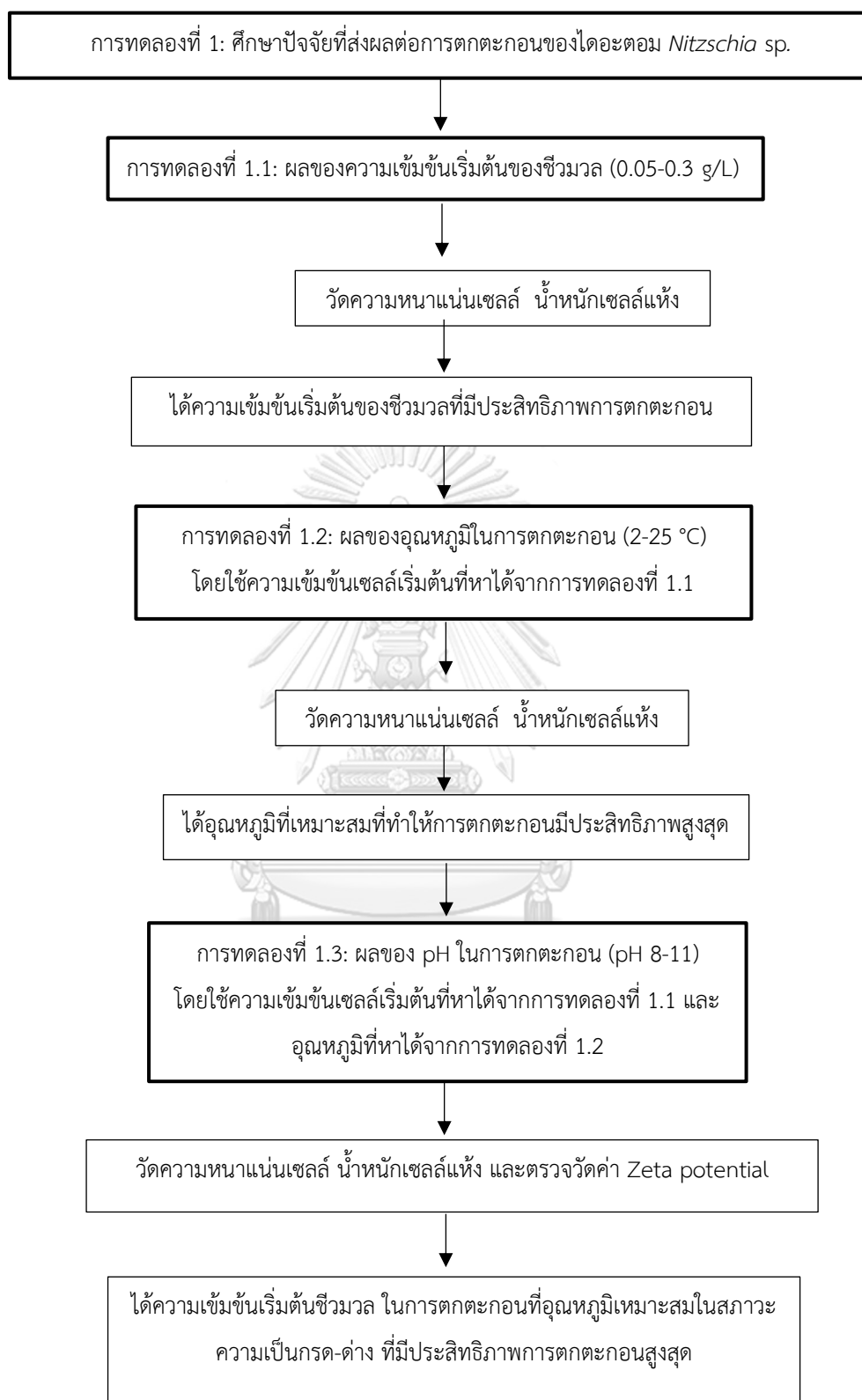
ส่วนประกอบ	ความเข้มข้น
Vitamin B <sub>12</sub> (cyanocobalamin)	1×10 <sup>-10</sup> M
Biotin	2×10 <sup>-9</sup> M
Thiamine·HCl	3×10 <sup>-7</sup> M

## 3.2 แผนการทดลอง

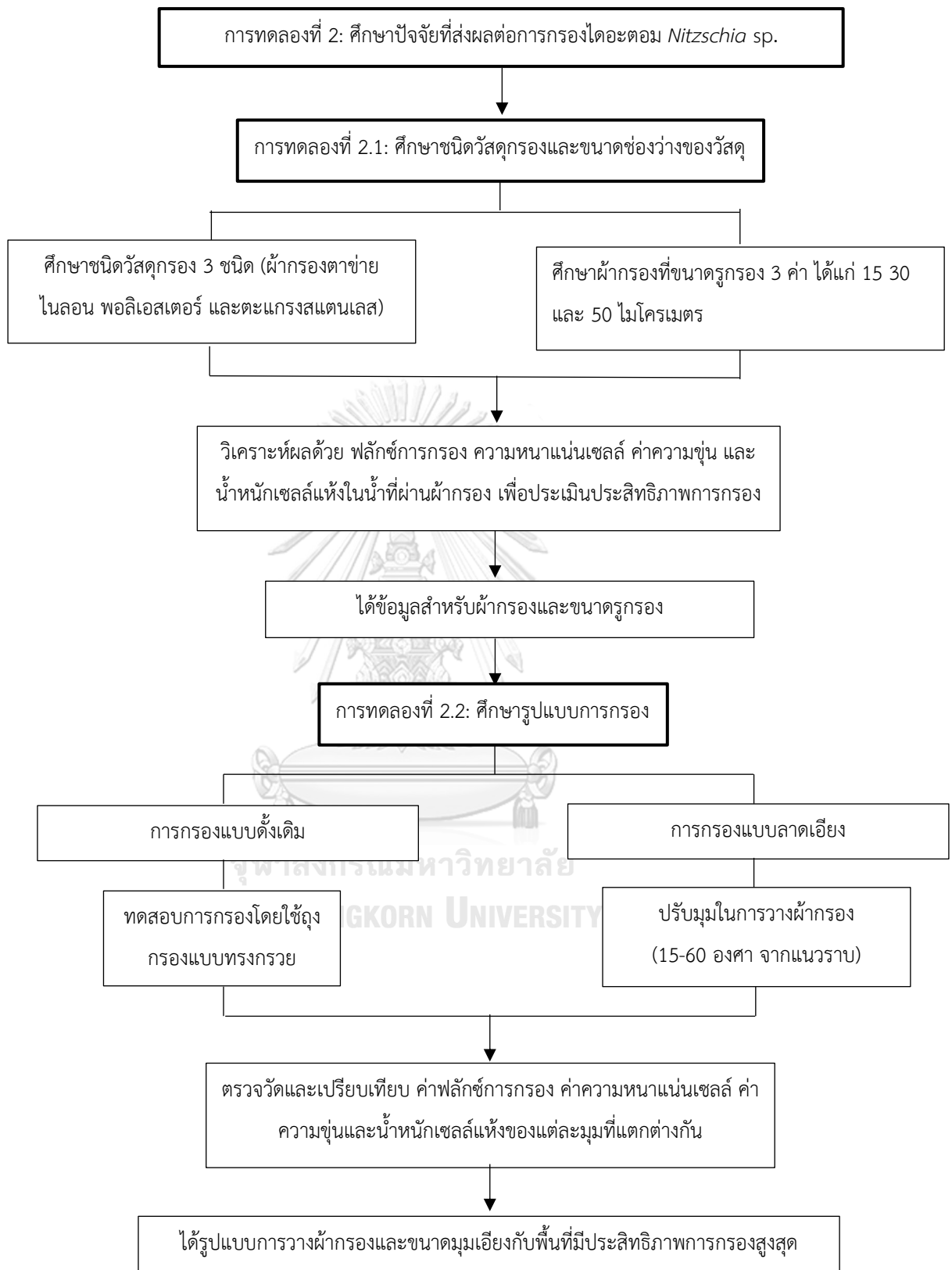
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางการเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การเก็บเกี่ยวชีวมวลด้วยวิธีการตกตะกอน และ 2) การเก็บเกี่ยวชีวมวลด้วยวิธีการกรอง ภาพที่ 3.1(ก) และ 3.2(ข) แสดงแผนผังแนวทางการทดลองการเก็บเกี่ยวชีวมวลด้วยวิธีการตกตะกอน และการกรอง ตามลำดับ





ภาพที่ 3.1 (ก) แนวทางการทดลองการเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. ด้วยวิธีการตกตะกอน



ภาพที่ 3.1 (ข) แนวทางการทดลองการเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. ด้วยวิธีการกรอง

### 3.3 ความเป็นไปได้ของการตกตะกอน

#### 3.3.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของชีวมวลไดอะตอม

นำตัวอย่างไดอะตอม *Nitzschia* sp. ปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากส่วนที่ 3.1 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันในช่วง 0.05 ถึง 0.3 กรัม/ลิตร ( $24 \times 10^4$  ถึง  $283 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร) มาตกตะกอนในกรวย Imhoff ระหว่างการตกตะกอนทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ตำแหน่งบน (ห่างจากผิวน้ำด้านบน 3 เซนติเมตร) และตำแหน่งล่าง (ห่างจากกัน Imhoff Cone 3 เซนติเมตร) ครั้งละ 2 มิลลิลิตร ทุก 10 นาที เป็นเวลา 40 นาที และนำไปตรวจวัดความหนาแน่นเซลล์และความขุ่น น้ำหนักเซลล์แห้งจะหาจากกราฟมาตรฐาน(standard curve) ระหว่างค่าความขุ่นกับน้ำหนักแห้ง สมการที่ (3.1) ที่ได้จัดทำไว้จากค่าความขุ่น และใช้คำนวณประสิทธิภาพการตกตะกอน ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละความเข้มข้น

#### 3.3.2 ผลของอุณหภูมิ

นำตัวอย่างไดอะตอมปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากส่วนที่ 3.1 ที่ปรับความเข้มข้นเริ่มต้นตามผลการทดลองที่ 1 มาทดลองในภาชนะซึ่งจะถูกนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิ 2 และ 9 องศาเซลเซียส และอีกชุดปริมาตร 500 มิลลิลิตรวางไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) หลังจากนั้นประมาณ 6 ชั่วโมง นำตัวอย่างชีวมวลทั้งสองชุดมาทดลองในกรวย Imhoff ใช้แท่งแก้วกวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำกรวย Imhoff กลับไปไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 2 และ 9 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการตกตะกอน ทำแบบเดียวกันที่อุณหภูมิห้องที่ 25 องศาเซลเซียส ทำการเก็บตัวอย่างทั้งสองตำแหน่งคือ ตำแหน่งบน (ห่างจากผิวน้ำด้านบน 3 เซนติเมตร) และตำแหน่งล่าง (ห่างจากกัน Imhoff cone 3 เซนติเมตร) โดยตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างมีระยะห่างกัน 22 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างทุก 10 นาที เป็นเวลา 40 นาที เพื่อวิเคราะห์ความหนาแน่นเซลล์และความขุ่น น้ำหนักเซลล์แห้งจะหาจากกราฟมาตรฐาน(standard curve) ระหว่างค่าความขุ่นกับน้ำหนักเซลล์แห้ง สมการที่ (3.1) ได้จัดทำไว้จากค่าความขุ่น และใช้คำนวณประสิทธิภาพการตกตะกอน ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละความเข้มข้น

### 3.3.3 ผลของการปรับ pH

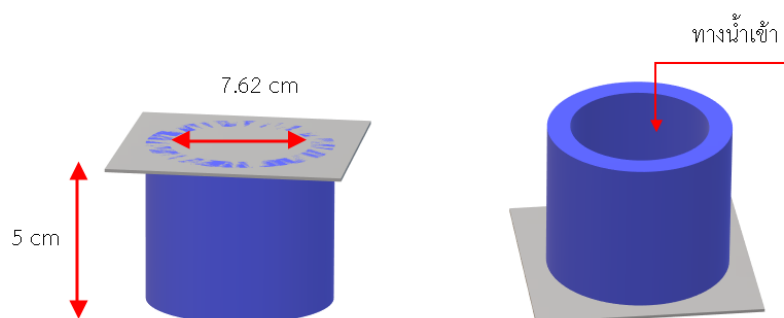
นำตัวอย่างไดอะตอมปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากส่วนที่ 3.1 ที่ปรับความเข้มข้นเริ่มต้นตามผลการทดลองที่ 1 จากนั้นปรับ pH ของน้ำด้วยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ให้ได้ pH ระหว่าง 8 ถึง 11 จากนั้นเทตัวอย่างชีวมวลไดอะตอมลงในกรวย Imhoff ทำการทดลองตกตะกอน เซลล์ไดอะตอมที่อุณหภูมิตามผลการทดลองที่ 2 และเก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างของกรวย Imhoff โดยตำแหน่งบนจะอยู่ห่างจากผิวน้ำ 3 เซนติเมตร และตำแหน่งล่างอยู่ห่างจากกัน Imhoff 3 เซนติเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที วิเคราะห์ความหนาแน่นเซลล์และความขุ่น น้ำหนักเซลล์แห้งจะหากราฟมาตรฐาน(standard curve) ระหว่างค่าความขุ่นกับน้ำหนักเซลล์แห้ง สมการที่ (3.1) ได้จัดทำไว้จากค่าความขุ่น สำหรับใช้คำนวณประสิทธิภาพการตกตะกอน ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ใส่แต่ละ pH นอกจากนี้หลังสิ้นสุดการทดลองในแต่ละค่า pH ได้เก็บตัวอย่างน้ำที่มีไดอะตอม ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เพื่อส่งวิเคราะห์ค่า Zeta potential ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.4 ความเป็นไปได้ของการกรอง

#### 3.4.1 ผลของชนิดวัสดุกรองและขนาดช่องว่างในการกรอง

เตรียมวัสดุกรองไดอะตอม 3 ชนิด คือ (1) ฝากรองตาข่ายไนลอน (2) ฝากรองตาข่ายพอลิเอสเตอร์ และ (3) ตะแกรงสแตนเลส (stainless steel 304) โดยวัสดุกรองทั้ง 3 ชนิด มีช่องว่างสำหรับการกรองเป็นตาข่ายเส้นเดี่ยวสานกันเป็นตาราง นำวัสดุกรองมาเย็บติดกับชุดการกรองซึ่งแสดงในภาพที่ 3.2 โดยมีพื้นที่การกรองเท่ากับ 0.00455 ตารางเมตร (เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 7.62 เซนติเมตร) เริ่มต้นการทดลองด้วยการนำตัวอย่างไดอะตอม *Nitzschia* sp. ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ที่ปรับความเข้มข้นตามผลการทดลองที่ 1 ของส่วนการตกตะกอนมากรองผ่านวัสดุกรอง (ฝากรองตาข่ายไนลอน ฝากรองตาข่ายพอลิเอสเตอร์ และตะแกรง สแตนเลส) ที่ขนาดรูกรอง 15 ไมโครเมตร ที่อัตราการไหล 80 มิลลิลิตร/นาที โดยทิศทางของเหลวขาเข้าจะตั้งฉากกับแนวระนาบของวัสดุกรอง หลังสิ้นสุดการกรองได้เก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านวัสดุกรองและนำไปวิเคราะห์ความหนาแน่นเซลล์และน้ำหนักเซลล์แห้ง และตรวจวัดน้ำหนักเซลล์แห้งที่ติดอยู่บนวัสดุกรอง ข้อมูลที่ได้จะนำไปคำนวณประสิทธิภาพการกรองและฟลักซ์การกรองเฉลี่ย จากนั้นเริ่มต้นการทดลองใหม่โดยใช้วัสดุกรองชนิด

เดิมที่มีขนาดช่องว่างการกรองเท่ากับ 30 และ 50 ไมโครเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ในแต่ละขนาดช่องว่างการกรอง



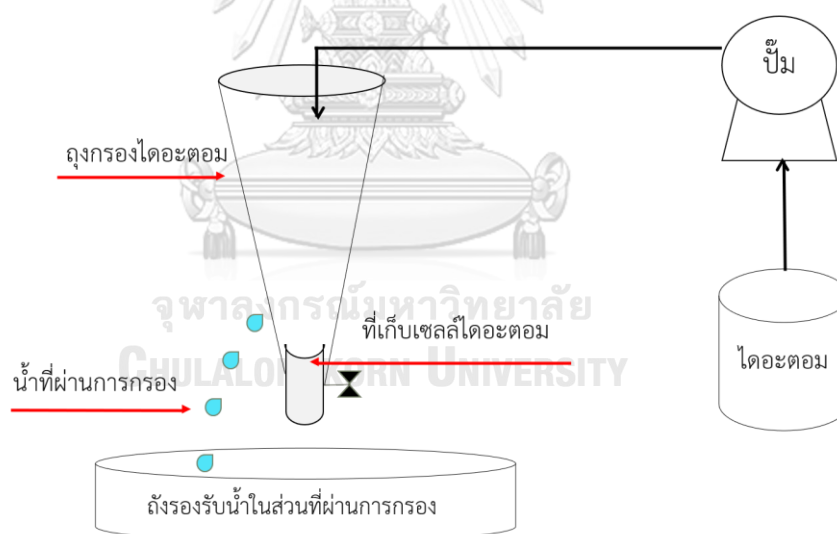
ภาพที่ 3.2 หน่วยกรองไดอะตอม

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองชนิดวัสดุกรองและขนาดรูพรุนของวัสดุกรอง

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1.ชนิดวัสดุกรอง	- ผ้าไนลอน พอลิเอสเตอร์ และ ตะแกรงสแตนเลส
2.ขนาดรูกรองของวัสดุกรอง	- 15 30 และ 50 ไมโครเมตร
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1.อัตราการไหลของน้ำ	- 80 มิลลิลิตร/นาที
2.พื้นที่ของผ้ากรอง	- 0.00455 ตารางเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์
1.ฟลักซ์การกรอง	- ค่าฟลักซ์การกรองในหน่วย (ลิตร/ชั่วโมง × ตารางเมตร)
2.ปริมาณของชีวมวลที่ติดบนผ้ากรอง	- ปริมาณชีวมวลไดอะตอมบนผ้ากรอง
3.ปริมาณชีวมวลที่ผ่านผ้ากรอง	- ปริมาณชีวมวลไดอะตอมที่ไหลผ่านผ้ากรองไปกับน้ำ

### 3.4.2 ผลของรูปแบบการกรอง

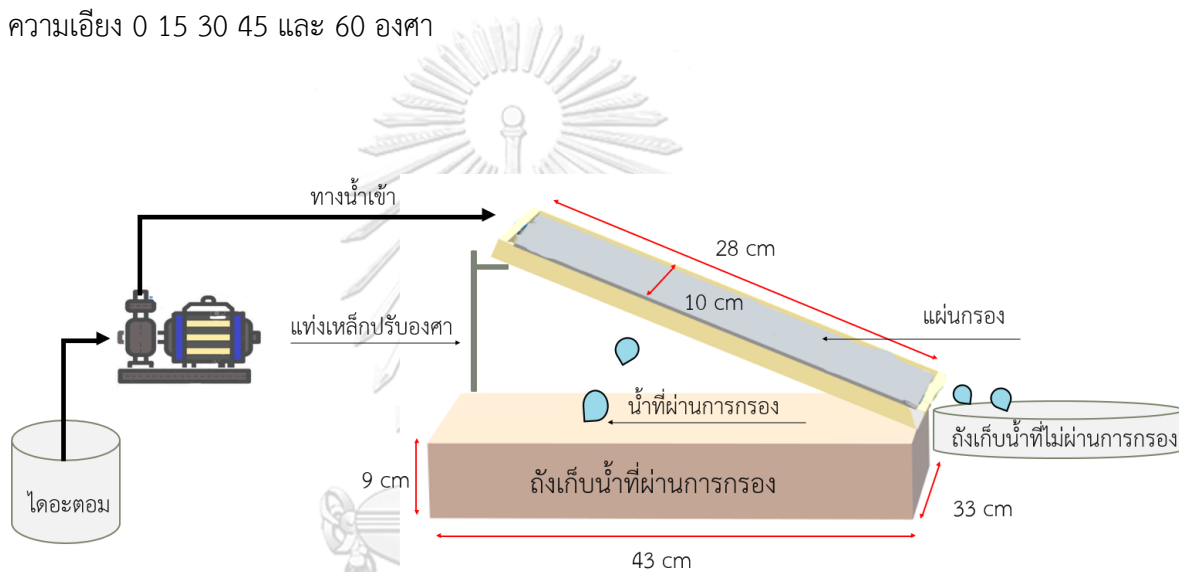
เลือกชนิดวัสดุกรองและรูปทรงของวัสดุกรองจากการทดลองที่ 1 โดยใช้รูปแบบการกรองทรงกรวยที่คล้ายกับถุงดักแพลงก์ตอน (Plankton net) และการกรองแบบลาดเอียง (Inclined filtration) ในการกรองแบบถุงกรองทรงกรวย (ภาพที่ 3.3) ตัวถุงมีลักษณะเป็นรูปกรวยที่มีพื้นที่ในการกรองประมาณ 0.0922 ตารางเมตร และมีส่วนเก็บชีวมวลไดอะตอมที่ทำจากพอลิไวนิลคลอไรด์ และมีวาล์วเปิดปิดด้านล่างเพื่อความสะดวกในการถ่ายชีวมวลไดอะตอมออกจากระบบ เริ่มต้นการทดลองด้วยการเตรียมไดอะตอม *Nitzschia* sp. 2,000 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.3 กรัม/ลิตร นำมาพักไว้ในถังพักที่มีวาล์วเปิดและควบคุมอัตราการไหลเข้าเท่ากับ 80 มิลลิลิตร/นาที จากนั้นเปิดวาล์วให้ของเหลวไหลผ่านถุงกรองทรงกรวย ไดอะตอมบางส่วนจะถูกเก็บไว้ในส่วนเก็บเซลล์ ขณะที่ของเหลวจะซึมผ่านวัสดุกรองออกมาลงสู่ภาชนะรองรับด้านล่าง ทำการเก็บตัวอย่าง 2 จุด คือ (1) ของเหลวที่อยู่ในส่วนกักเก็บเซลล์ และ (2) ของเหลวที่อยู่ในภาชนะรองรับด้านล่าง (ภาพที่ 3.3) ตัวอย่างที่เก็บได้นำไปวิเคราะห์หาความหนาแน่นเซลล์ น้ำหนักเซลล์แห้ง และค่าฟลักซ์การกรองเฉลี่ย ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



ภาพที่ 3.3 การกรองแบบถุงกรองทรงกรวย

ในส่วนการกรองแบบลาดเอียงนั้น นำตัวอย่างไดอะตอม *Nitzschia* sp. ปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร มาเก็บไว้ในถังพักน้ำ หน่วยกรองแบบลาดเอียงสร้างจากกล่องพลาสติกทรงสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง 33 เซนติเมตร ยาว 43 เซนติเมตร และสูง 9 เซนติเมตร ที่บริเวณด้านข้างมีแท่นเหล็กรองรับแผ่นกรองที่

ปรับระดับความเอียงได้ 5 ระดับ ตั้งแต่ 0 ถึง 60 องศา กับแนวราบ ชุดทดลองมีช่องทางน้ำเข้าและแผ่นกรองที่มีขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 28 เซนติเมตร (ภาพที่ 3.4) วางเอียงทำมุมกับช่องทางน้ำเข้า โดยแผ่นกรองสามารถปรับระดับความเอียงและถอดออกมาทำความสะอาดได้ ติดตั้งวาล์วเพื่อช่วยควบคุมอัตราการไหลของน้ำเข้าหน่วยกรอง ตัวอย่างน้ำที่มีไดอะตอมจะไหลเข้าทางด้านบนบริเวณช่องทางน้ำเข้าและผ่านแผ่นกรองที่วางเอียงทำมุมกับแนวระนาบ น้ำจะไหลผ่านช่องว่างของวัสดุกรองลงสู่ด้านล่างของกล่อง ขณะที่ชีวมวลไดอะตอมจะติดอยู่บนผ้ากรอง การทดลองนี้ได้เก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านวัสดุกรองลงสู่ด้านล่างและปริมาณชีวมวลที่ติดบนผ้ากรอง เพื่อนำมาวิเคราะห์ฟลักซ์การกรองเฉลี่ย ความหนาแน่นเซลล์ และน้ำหนักเซลล์แห้ง ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ที่ระดับความเอียง 0 15 30 45 และ 60 องศา



ภาพที่ 3.4 แผนผังระบบการกรองแบบลาดเอียงเพื่อใช้แยกชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp.

### 3.5 เทคนิคการวิเคราะห์

#### 3.5.1 น้ำหนักเซลล์แห้ง

วิธีการวัดน้ำหนักแห้ง [40] เริ่มต้นจากนำตัวอย่างของเหลวที่มีชีวมวลไดอะตอมมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาด 47 มิลลิเมตร ที่ผ่านการอบแห้งจนน้ำหนักคงที่และผ่านการดูดความชื้นมาแล้ว จากนั้นล้างเซลล์ไดอะตอมบนกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่นเพื่อล้างอนุภาคเกลือ และนำกระดาษกรองไปอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักไม่

เปลี่ยนแปลง จากนั้นนำไปลบกับค่าน้ำหนักกระดาศกรงเริ่มต้นก่อนทำการกรงแล้วแสดงผลในหน่วยกรัมต่อลิตร ในการทดลองนี้ได้นำตัวอย่างมาตรฐานของซีวมวลไดอะตอมที่ทราบน้ำหนักเซลล์แห้งแน่นอนมาตรวจวัดค่าความขุ่นที่ 680 นาโนเมตร [41] และนำมาสร้างสมการเชิงเส้นเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเซลล์แห้งและความขุ่นที่อ่านได้จาก Spectrophotometer ซึ่งแสดงในสมการที่ (3.1) โดยมี  $R^2 = 0.998$  (ภาคผนวก ง)

$$DW = 0.8117OD_{680} - 0.0279 \quad (3.1)$$

เมื่อ DW คือ น้ำหนักเซลล์แห้งของไดอะตอม (กรัม/ลิตร) และ  $OD_{680}$  คือ ค่าความขุ่นของตัวอย่างเซลล์ไดอะตอมที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร

### 3.5.2 การวัดจำนวนเซลล์ไดอะตอม

นับจำนวนเซลล์ไดอะตอม *Nitzschia* sp. ด้วยสไลด์นับเม็ดเลือด (Hemocytometer) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า สไลด์นับเม็ดเลือด 1 ชิ้น มีช่องใส่ตัวอย่างซึ่งมีลักษณะเป็นตารางใหญ่สี่เหลี่ยม 2 ตาราง อยู่กลางสไลด์ แต่ละตารางใหญ่จะมีตารางเล็กอยู่ 9 ตาราง โดยแต่ละตารางเล็กมีพื้นที่เท่ากับ 1 ตารางมิลลิเมตร และมีความลึกเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร การนับเซลล์จะใส่ตัวอย่างเซลล์ลงบนแผ่นสไลด์และนับจำนวนเซลล์บนตารางเล็กจำนวน 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยจำนวนเซลล์ต่อปริมาตรตารางเล็ก 1 ตาราง สามารถคำนวณความหนาแน่นเซลล์ดังนี้ [9]

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นเซลล์ไดอะตอม} &= \text{จำนวนเซลล์} / (\text{ความกว้าง} \times \text{ความยาว} \times \text{ความลึก}) \\ &= 1 \text{ เซลล์} / (1 \text{ มิลลิเมตร} \times 1 \text{ มิลลิเมตร} \times 0.1 \text{ มิลลิเมตร}) \\ &= 1 \text{ เซลล์} / (0.0001 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรหรือ} 0.0001 \text{ มิลลิลิตร}) \\ &= 1 \times 10^4 \text{ เซลล์/มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

### 3.5.3 ประสิทธิภาพการตกตะกอน

ประสิทธิภาพการตกตะกอน (E)% สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.2 โดยใช้ค่า OD ที่ได้จากการวัดมาคำนวณ [42]



$$E = \frac{OD_i - OD_f}{OD_i} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $OD_i$  คือ ค่าความขุ่นที่ 680 นาโนเมตร ของตัวอย่างน้ำก่อนเริ่มทดลองการตกตะกอน และ  $OD_f$  คือ ค่าความขุ่นที่ 680 นาโนเมตร ของตัวอย่างน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองการตกตะกอน

#### 3.5.4 ประสิทธิภาพการกรอง

ประสิทธิภาพการกรอง (E)% คำนวณได้จากสมการที่ 3.3 โดยใช้ค่าความขุ่นที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร

$$E = \frac{OD_i - OD_f}{OD_i} \times 100 \quad (3.3)$$

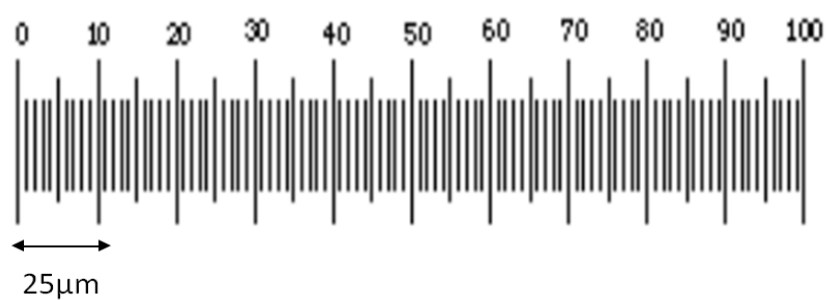
เมื่อ  $OD_i$  คือ ค่าความขุ่นที่ 680 นาโนเมตร ของตัวอย่างน้ำก่อนเริ่มทดลองการกรอง และ  $OD_f$  คือ ค่าความขุ่นที่ 680 นาโนเมตร ของตัวอย่างน้ำเมื่อสิ้นสุดการทดลองการกรอง

#### 3.5.5 การวัดค่า Zeta potential

เตรียมตัวอย่างของเหลว (10 มิลลิลิตร) ที่ประกอบไปด้วยไดอะตอมในอาหาร F/2 หลังเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับ pH จากนั้นจึงส่งตัวอย่างน้ำไปตรวจวัดค่า Zeta potential ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ด้วยเครื่อง Zetasizer nano smart install guide เวอร์ชัน MAN0383-06-EN โดยอาศัยเทคนิค Electrophoretic light scattering

#### 3.5.6 การวัดขนาดของเซลล์ไดอะตอม

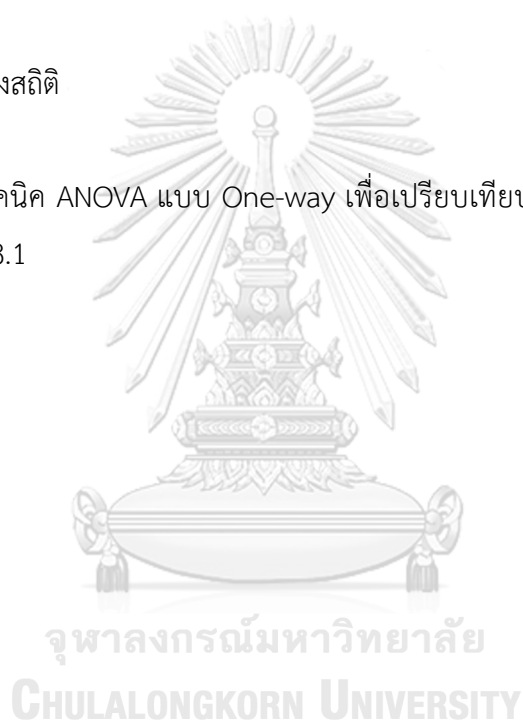
การวัดขนาดของเซลล์ไดอะตอม *Nitzschia* sp. ในวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการโดยใช้สไลด์นับเม็ดเลือดภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า และมี Ocular Micrometer ในกล้อง โดยมีขนาดสเกลแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ขนาดสเกล Ocular Micrometer ในกล้องจุลทรรศน์

### 3.5.7 การวิเคราะห์เชิงสถิติ

ในงานวิจัยนี้จะให้เทคนิค ANOVA แบบ One-way เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง ผ่านโปรแกรม MINITAB version 18.1

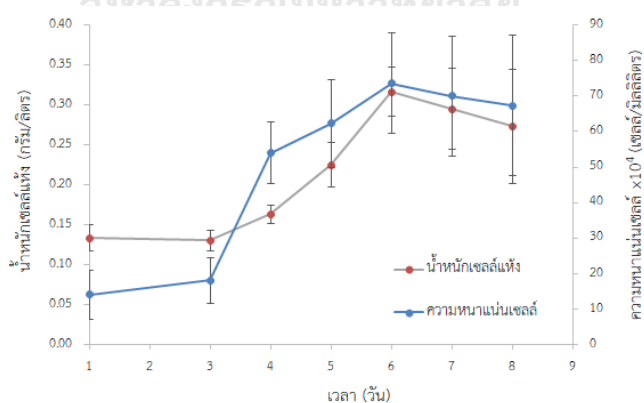


## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 การเพาะเลี้ยงไดอะตอม *Nitzschia* sp.

เพาะเลี้ยงไดอะตอม *Nitzschia* sp. ในน้ำเค็ม 30 พีเอสยู ด้วยอาหารสูตร F/2 โดยเพิ่มความเข้มข้น ซิลิเกต 3 เท่า จากสูตรอาหารเดิม และใช้คาร์บอนไดออกไซด์ 2% โดยปริมาตร ภายใต้ความเข้มแสง 15,000 ลักซ์ ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงแบบถังกวนขนาด 5 ลิตร พบว่าวันที่ 1 - 3 เซลล์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากอยู่ในระยะการปรับตัว จากนั้นเซลล์จึงเริ่มเข้าสู่ระยะการเติบโตแบบทวีคูณ โดยมีความหนาแน่นเซลล์เพิ่มจาก  $18 \pm 7 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร ในวันที่ 3 เป็น  $74 \pm 9 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร ในวันที่ 6 ดังภาพที่ 4.1 เซลล์เข้าสู่ระยะการเติบโตคงที่ในช่วงวันที่ 6-8 โดยมีความหนาแน่นเซลล์สูงสุดเท่ากับ  $74 \pm 9 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร ผลการวิเคราะห์น้ำหนักเซลล์แห้งพบว่า เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับความหนาแน่นเซลล์ โดยน้ำหนักเซลล์แห้งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเพาะเลี้ยงระหว่างวันที่ 1-5 ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เซลล์อยู่ในระยะการเติบโตแบบทวีคูณ และในวันที่ 6-8 พบว่าน้ำหนักเซลล์แห้งเริ่มมีค่าคงที่ เนื่องจากเซลล์เริ่มเข้าสู่ระยะการเติบโตคงที่ โดยมีน้ำหนักเซลล์แห้งในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยงเท่ากับ 0.32 กรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของ ฐิณัฐธิดา [9] ที่ทำการเพาะเลี้ยงในสภาวะเดี่ยวและมีน้ำหนักเซลล์แห้ง 0.21 กรัม/ลิตร



ภาพที่ 4.1 น้ำหนักเซลล์แห้งและความหนาแน่นเซลล์ของไดอะตอม *Nitzschia* sp. ที่ทำการเพาะเลี้ยงในสภาวะน้ำเค็ม 30 พีเอสยู ความเข้มแสง 15,000 ลักซ์ คาร์บอนไดออกไซด์ 2% ด้วยอาหารมาตรฐานสูตร F/2 เพิ่มความเข้มข้นซิลิเกต 3 เท่า

เมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงได้นำตัวอย่างเซลล์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงแบบถังกวนไปทดลองตกตะกอนในกรวยอิมฮอฟ ซึ่งพบว่ามี การแบ่งแยกชั้นระหว่างของเหลวใสและเซลล์ที่จมตัว หลังเริ่มตกตะกอนประมาณ 30-40 นาที นอกจากนี้ได้เก็บตัวอย่างเซลล์ไดอะตอมไปวิเคราะห์ ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40X พบว่าเซลล์เดี่ยวมีขนาดเฉลี่ยในช่วง 15-20 ไมโครเมตร และมีสีเหลืองอมน้ำตาล (ภาพที่ 4.2(ก)) และพบว่าเซลล์สามารถดำรงชีวิตใน ลักษณะเรียงต่อกันคล้ายโซ่ หากพิจารณาการตกตะกอนของเซลล์เดี่ยวโดยใช้ขนาดเซลล์ที่คำนวณ จากปริมาตรของลูกบาศก์ขนาด 17.5 ไมโครเมตร (ค่าเฉลี่ยระหว่าง 15 และ 20 ไมโครเมตร) จะได้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ไดอะตอมเท่ากับ 21.70 ไมโครเมตร จากนั้นแทนค่าลงใน Stokes' law

$$V_s = \frac{g(p-p_s)d^2}{18\mu}$$

เมื่อ  $p$  คือ ความหนาแน่นของอาหารเลี้ยงเชื้อ F/2 เท่ากับ 1.0107 กรัม/มิลลิลิตร [45]

$p_s$  คือ ความหนาแน่นเซลล์ไดอะตอม เท่ากับ 1.3350 กรัม/ลิตร

$d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของไดอะตอม เท่ากับ 21.70 ไมโครเมตร

$\mu$  คือ ความหนืดของน้ำเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.0097 กรัม/เซนติเมตร·วินาที

$g$  คือ แรงโน้มถ่วงของโลก เท่ากับ 980 เซนติเมตร/วินาที<sup>2</sup>

เพื่อคำนวณความเร็วในการตกตะกอน จะได้รับความเร็วในการตกตะกอนของไดอะตอม เซลล์เดี่ยวเท่ากับ 0.00857 เซนติเมตร/วินาที ความเร็วตกตะกอนที่ได้รับคาดว่าจะมีค่าน้อยกว่า ความเร็วในการตกตะกอนของเซลล์ที่เรียงตัวคล้ายสายโซ่ที่มีน้ำหนักมากขึ้น และหากนำค่าความเร็ว ในการตกตะกอนของเซลล์เดี่ยวไปใช้คำนวณเวลาที่ต้องใช้ตกตะกอนเป็นระยะทาง 22 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างตำแหน่งผิวน้ำในกรวยอิมฮอฟและตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างเซลล์หลังจาก 30 นาที จะพบว่าต้องใช้เวลาประมาณ 42 นาที ซึ่งค่าที่คำนวณได้สูงกว่าเวลาที่ใช้ในทดลองไม่มากนัก อย่างไรก็ตามการใช้สมการ Stokes' law ในการวิเคราะห์ความเร็วการตกตะกอนอาจมีข้อจำกัดที่ ส่งผลต่อความแม่นยำ กล่าวคือ (1) ลักษณะของเซลล์ในสมการของ Stokes' law เป็นทรงกลมแต่ผล การศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าเซลล์มีลักษณะคล้ายทรงลูกบาศก์และ (2) เซลล์ที่ตกตะกอน ภายใต Stokes' law จะเป็นอิสระต่อกันซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเซลล์ในของเหลวเจือจาง อย่างไรก็ตามการตกตะกอนของเซลล์ที่ใช้ทดลอง (0.32 กรัม/ลิตร) อาจมีค่าค่อนข้างสูงซึ่งทำให้

กระบวนการ Flocculation เข้ามามีอิทธิพลได้ ดังนั้นการหาความเร็วของการตกตะกอนจึงควรใช้ Settling test [46] ซึ่งต้องใช้ปริมาณเซลล์เป็นจำนวนมากจึงเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของการทดลองนี้

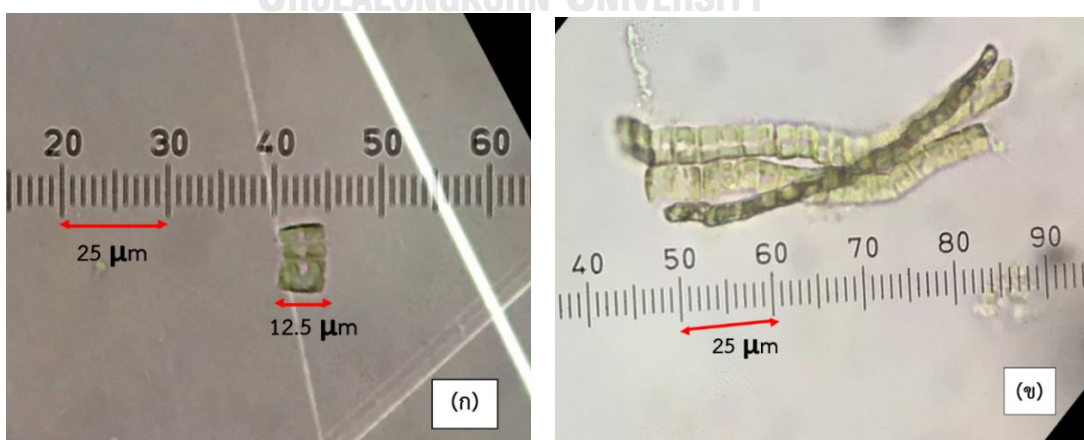
สำหรับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจากเครื่องหมุนเหวี่ยงสร้างขึ้นเพื่อเร่งให้อนุภาคตกตะกอนเร็วขึ้น โดยอาศัยหลักการเร่งให้อนุภาคตกตะกอนเร็วขึ้น ภายใต้สนามของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง แรงนอนกันของอนุภาคจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงหนีศูนย์กลาง ทำให้อนุภาคนอนกันด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน ภายใต้สนามแรงหนีศูนย์กลางอนุภาคจะตกตะกอนด้วยอัตราเร็วที่ไม่เท่ากัน การปั่นแยกตะกอน ทั้งนี้จะขึ้นกับขนาดของสารถ้ามีขนาดใหญ่จะใช้เวลาสั้น และสารที่มีขนาดเล็กจะใช้เวลามากขึ้น แต่ถ้าสารมีขนาดเล็กมากไม่สามารถตกตะกอนได้จะต้องเพิ่มแรงโน้มถ่วงของโลกให้มากขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการนำสารละลายนั้นไปทำการหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วคงที่ จะเกิดแรงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่อสาร เรียกว่า “centrifugal force” ซึ่งจะสัมพันธ์กับแรงโน้มถ่วงโลก เรียกว่า relative centrifugation force (RCF) สามารถคำนวณแรงหนีศูนย์กลางสัมพันธ์(RCF) จากจำนวนรอบการหมุนที่สมบูรณ์ของหัวหมุนต่อนาที จากสมการ

$$RCF = \frac{rpm^2 \times r}{89500}$$

เมื่อ rpm คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการปั่นเหวี่ยง เท่ากับ 25,000 rpm

r คือ รัศมีของไดอะตอม เท่ากับ  $1.085 \times 10^{-3}$  เซนติเมตร

พบว่าไดอะตอมเซลล์เดียวมีแรงหนีศูนย์กลางสัมพันธ์เท่ากับ  $7.57 \times g$  นั้นหมายถึง มีแรงหนีศูนย์กลางที่กระทำต่อไดอะตอม (centrifugal force) มีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วงของโลก 7.57 เท่า [25]



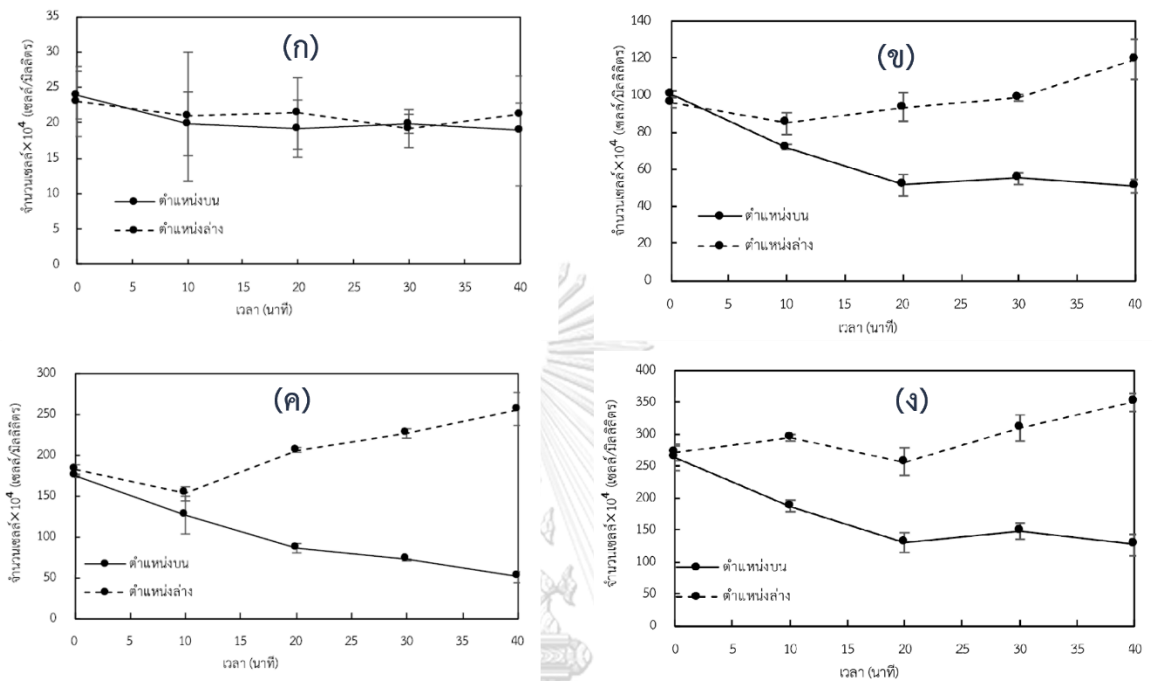
ภาพที่ 4.2 (ก) ขนาดเซลล์เดี่ยว และ (ข) เรียงตัวคล้ายโซ่ของไดอะตอม *Nitzschia* sp.

## 4.2 การเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอมด้วยวิธีการตกตะกอน

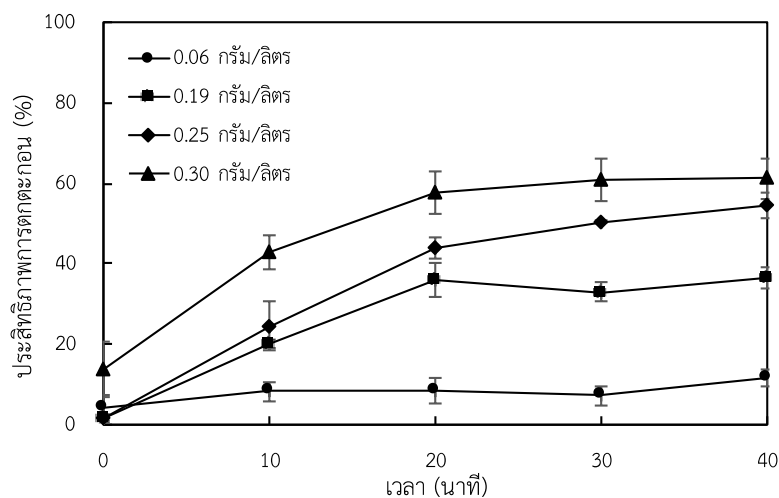
### 4.2.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไดอะตอม

การทดลองนี้เลือกใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไดอะตอมในช่วง 0.06 ถึง 0.30 กรัม/ลิตร เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จากการทดลองในส่วนของ 4.1 และเป็นค่าที่ไม่แตกต่างจากการเพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงแบบอากาศยกในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [9] ผลการทดลองซึ่งแสดงในภาพที่ 4.3 พบว่าเมื่อทำการทดลองตกตะกอนชีวมวลไดอะตอมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.06 กรัม/ลิตร จำนวนเซลล์ที่ตำแหน่งบนและล่างของกรวยอิมฮอฟที่ใช้เก็บตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันคือ  $23 \times 10^4$  ที่ตำแหน่งบน และ  $24 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร ที่ตำแหน่งล่าง และความหนาแน่นเซลล์ในทั้งสองตำแหน่งมีแนวโน้มคงที่แม้ปล่อยให้ตกตะกอนนานถึง 40 นาที และเมื่อนำค่าความขุ่นไปคำนวณประสิทธิภาพการตกตะกอนซึ่งแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่าไดอะตอมสามารถตกตะกอนได้มากขึ้นเล็กน้อยจาก 4% เป็น 7% ต่อมาเมื่อทดลองตกตะกอนชีวมวลไดอะตอมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.19 กรัม/ลิตร พบว่าไดอะตอมตกตะกอนได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 0.06 กรัม/ลิตร ซึ่งแสดงได้จากจำนวนเซลล์ที่ตำแหน่งบนของกรวยอิมฮอฟที่ลดลงจาก  $101 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร เหลือ  $51 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร เมื่อเวลาผ่านไป 40 นาที ขณะที่จำนวนเซลล์ที่ตำแหน่งล่างของกรวยอิมฮอฟเพิ่มจาก  $96 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร เป็น  $120 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร ในส่วนของประสิทธิภาพการตกตะกอน พบว่าเพิ่มขึ้นจาก 1.5% เป็น 36% เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที และมีแนวโน้มคงที่หลังจากนั้น และเมื่อทดลองตกตะกอนชีวมวลไดอะตอมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นที่สูงขึ้นในช่วง 0.25 ถึง 0.30 กรัม/ลิตร พบว่าไดอะตอมตกตะกอนได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นก่อนหน้านี้ ซึ่งแสดงได้จากจำนวนเซลล์ที่ตำแหน่งล่างที่มากกว่าตำแหน่งบนอย่างมีนัยสำคัญและค่าประสิทธิภาพการตกตะกอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thomus kiorboe [47] ที่กล่าวว่า อนุภาคมีอัตราการรวมตัวช้าเนื่องจาก มีการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำเพาะเลี้ยงและการติดกันของอนุภาคต่ำ ส่งผลให้เซลล์ไดอะตอมอยู่เป็นเซลล์เดี่ยว ไม่เกิดการรวมตัวและตกตะกอน ผลการทดลองที่ได้รับคาดว่าเกิดจากแรงดึงดูดของเซลล์ผ่านพันธะแวนเดอร์วาลและพันธะไฮออนนิค และเมื่อมีปริมาณเซลล์เริ่มต้นมากขึ้นจะทำให้เซลล์มีโอกาสสัมผัสกันสูงขึ้นและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้มีน้ำหนักรวมและตกตะกอนได้เร็ว ประสิทธิภาพการตกตะกอนของไดอะตอมเริ่มมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 20 นาที ข้อมูลดังกล่าวอาจนำไปใช้เพื่อประมาณระยะเวลาของการตกตะกอนได้ โดยควรใช้เวลาตั้งแต่ 30 ถึง 40 นาที หลังหยุดการเป่าอากาศในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสง นอกจากนี้การตกตะกอนยังสามารถแยกของเหลวได้ประมาณ 0.98 ถึง 0.99 ลิตร จากตัวอย่างทั้งหมด 1 ลิตร ผลการทดลอง

ที่ได้รับแสดงให้เห็นว่าการตกตะกอนสามารถใช้เพื่อลดภาระของเหลว (Liquid loading) ของอุปกรณ์  
ในขั้นถัดไปได้เป็นอย่างมาก ซึ่งทำให้ลดขนาดอุปกรณ์และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่ต่ำลง



ภาพที่ 4.3 ความหนาแน่นเซลล์ไดอะตอมที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างของกรวยอิมฮอฟเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไดอะตอมที่ใช้ตกตะกอนมีค่าแตกต่างกัน (ก) 0.06 กรัม/ลิตร (ข) 0.19 กรัม/ลิตร (ค) 0.25 กรัม/ลิตร และ (ง) 0.30 กรัม/ลิตร



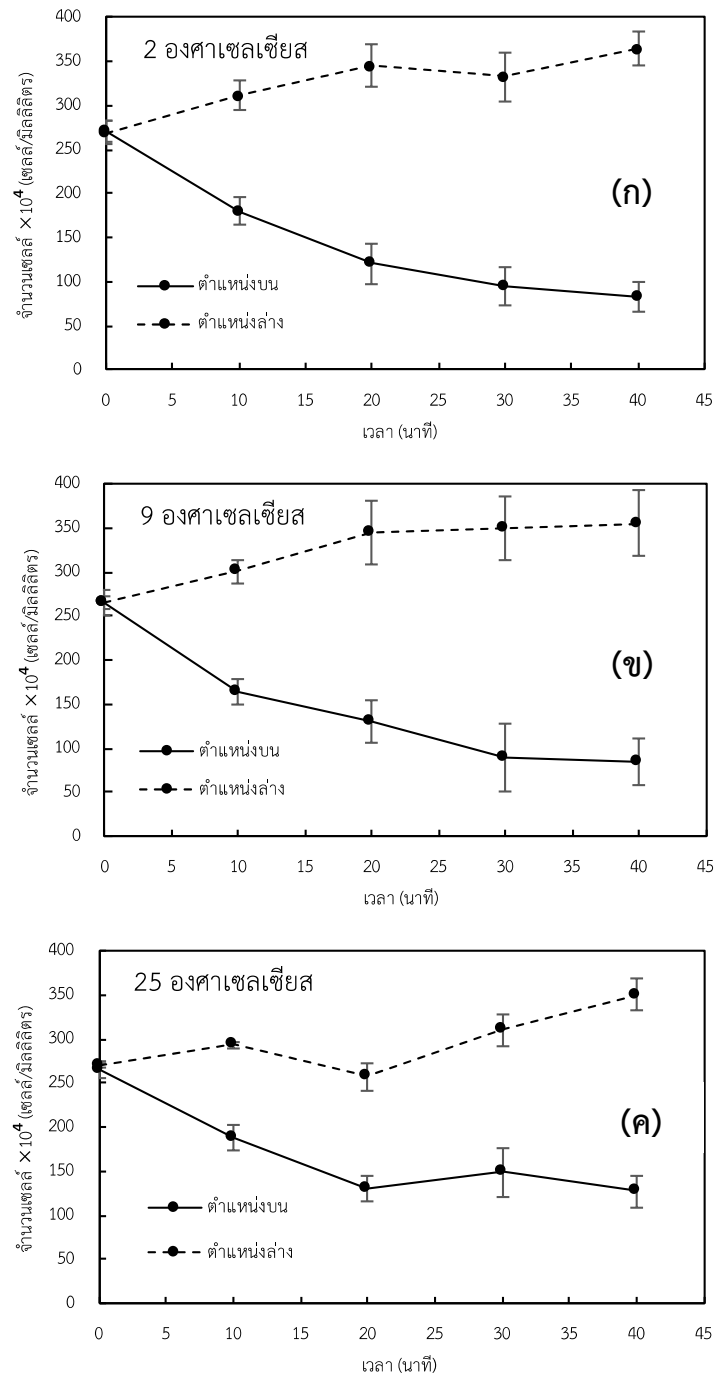
**ภาพที่ 4.4** ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของซีวมวลไคโตสอม (ก) 0.06กรัม/ลิตร (ข) 0.19 กรัม/ลิตร (ค) 0.25 กรัม/ลิตร และ (ง) 0.30 กรัม/ลิตร

#### 4.2.2 ผลของอุณหภูมิ

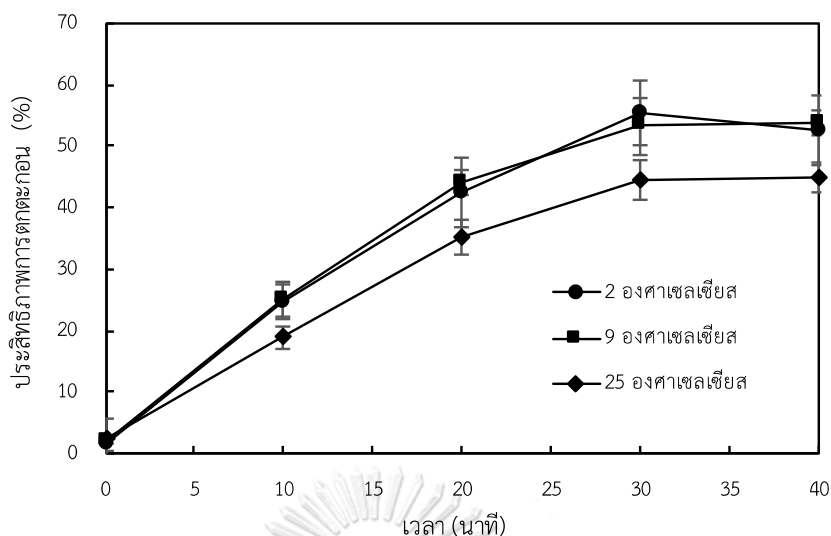
ทดลองการตกตะกอนเซลล์ไคโตสอมในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 2 ถึง 25 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของไคโตสอมในการทดลองนี้ควบคุมที่ประมาณ 0.3 กรัม/ลิตร ตามผลการทดลองของหัวข้อที่ 4.2.1 ผลการทดลองซึ่งแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่าในทุกอุณหภูมิที่ใช้ตกตะกอน จำนวนเซลล์ที่ตำแหน่งบนของกรวยอิมฮอฟมีแนวโน้มลดลง ขณะที่จำนวนเซลล์ที่ตำแหน่งล่างของกรวยอิมฮอฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลา และเริ่มคงที่เมื่อเวลาที่ใช้ตกตะกอนมากกว่า 20 นาที โดยประสิทธิภาพการตกตะกอนเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ  $55.5 \pm 5.19$  % ที่อุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส และ  $53.9 \pm 2.06$  % ที่อุณหภูมิ 9 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการตกตะกอนในช่วงอุณหภูมิต่ำ (2 และ 9 องศาเซลเซียส) มีค่ามากกว่าประสิทธิภาพการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ( $45.02 \pm 2.48$  %) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ภาพที่ 4.5) จะเห็นได้ว่าการใช้อุณหภูมิต่ำสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนได้ ซึ่งอาจอธิบายอย่างง่ายได้จากสมการของ Stokes ( $v_s = g(\rho - \rho_s)d^2 / 18\mu$ ) ที่ระบุว่าความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดค่าความหนืดของของเหลวซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่ามีความแตกต่างจากทฤษฎีเนื่องจากข้อจำกัดในการใช้สมการ Stokes's law ที่กล่าวว่า เซลล์ที่ตกตะกอนภายใต้ Stokes' law จะเป็นอิสระต่อกันซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเซลล์ในของเหลวเจือจาง โดย



ตัวอย่างที่นำมาทดลอง มีความเข้มข้นของเซลล์เท่ากับ 0.30 กรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง จึงส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณ อีกทั้งมีรายงานว่า เมื่อความหนืดลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลด้านลบต่อการตกตะกอน โดยที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการรบกวนพันธะไฮโดรเจนระหว่างพอลิเมอร์กับน้ำ ทำให้พอลิเมอร์เกิดการขดตัวส่งผลต่อการรวมกลุ่มและตกตะกอน [48] และในรายงานของ Santiago Ramos กล่าวว่า ในน้ำทะเลมีส่วนประกอบของ โปแทสเซียม แมกนีเซียม ซึ่งจะตกตะกอนได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ [49] โดยอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร F/2 มีส่วนประกอบของโปแทสเซียม ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนที่อุณหภูมิต่ำดีกว่าที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามการดำเนินงานที่อุณหภูมิต่ำจะต้องแลกกับความต้องการพลังงานเพื่อใช้ทำความร้อนออกจากของเหลวซึ่งอาจไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ ผลการทดลองที่ได้รับมีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Mahith Nadella ซึ่งศึกษาช่วงอุณหภูมিরะหว่าง 4 ถึง 44 องศาเซลเซียส ในการตกตะกอนน้ำเสียโดย  $FeCl_3$  เป็นสารช่วยตกตะกอน ซึ่งพบว่าอุณหภูมิ 22-25 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่เหมาะสมโดยพิจารณาทั้งจากประสิทธิภาพการตกตะกอนและเศรษฐศาสตร์ร่วมกัน [50] จากเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้นจึงเลือกอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองต่อไป



ภาพที่ 4.5 จำนวนเซลล์ไดอะตอมที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างของกรวยอิมฮอฟที่อุณหภูมิแตกต่างกัน (ก) 2 องศาเซลเซียส (ข) 9 องศาเซลเซียส และ (ค) 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของเซลล์ไดอะตอมที่อุณหภูมิต่างกัน

#### 4.2.3 ผลของการปรับพีเอช

ทดลองการตกตะกอนของเซลล์ไดอะตอมเมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำจากการเพาะเลี้ยงจากพีเอช 8.3 ถึง 10.5 โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และปรับความเข้มข้นเริ่มต้นของไดอะตอมประมาณ 0.34 กรัม/ลิตร ( $65 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร) ทำการทดลองตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที จากตารางที่ 4.1 การตกตะกอนโดยไม่เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (พีเอช = 8.3) พบว่าเซลล์ส่วนใหญ่จะอยู่แบบเซลล์เดี่ยวและกระจายตัวอยู่ในน้ำเพาะเลี้ยง (ตารางที่ 4.2(ก)-4.2(ค)) เมื่อปล่อยให้ตกตะกอนพบว่าปริมาณตะกอนที่จมตัวลงมา 0.5 มิลลิลิตร และมีจำนวนเซลล์บริเวณน้ำใสเท่ากับ  $20 \pm 0.94 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร และมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนที่ 66.77% เมื่อปรับพีเอชเพิ่มขึ้นให้อยู่ในช่วง 9 ถึง 9.5 พบว่าตะกอนที่จมตัวมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยและมีจำนวนเซลล์บริเวณน้ำใสประมาณ  $17 \times 10^4$  ถึง  $18 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร และมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนที่ 75.15% ถึง 76.94% เซลล์เกิดการรวมกลุ่มกันมากขึ้นเมื่อเทียบกับชุดทดลองก่อนปรับพีเอช ลักษณะกายภาพของเซลล์ไดอะตอมพบว่ายังคงมีลักษณะคล้ายกับในกรณีที่ไม่มีการปรับพีเอช (ตารางที่ 4.2(ง) – 4.2(ฉ)) เมื่อปรับพีเอชเริ่มต้นเป็น 10 พบว่ามีปริมาณตะกอนจมตัวเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนที่ประมาณ 7.7 มิลลิลิตร และมีจำนวนเซลล์บริเวณน้ำใสเท่ากับ  $5 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร และมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ 90.98% อย่างไรก็ตามพบว่ารูปร่างเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ไม่ปรับพีเอช โดยบางเซลล์มีลักษณะคล้ายกับเม็ดข้าวขนาด

เล็กกระจายอยู่และมีลักษณะคล้ายคลึงคลุ่มเซลล์เอาไว้ (ตารางที่ 4.2(ญ) – 4.2(ฎ)) และเมื่อเพิ่มพีเอชเริ่มต้นเป็น 10.5 พบว่าตะกอนที่จมตัวมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นมากที่ประมาณ 43 มิลลิลิตร มีจำนวนเซลล์บริเวณน้ำใส  $4 \times 10^4$  เซลล์/มิลลิลิตร และมีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ 93.71% แต่ลักษณะของเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากคือคล้ายกับเซลล์แตกและสีของตัวอย่างน้ำมีเหลืองอ่อน (ตารางที่ 4.2(ฐ) – 4.2(ฒ))

เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าซีตา (Zeta potential) พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าซีตามีค่าลดลงเมื่อปรับเพิ่มค่าพีเอชของตัวอย่างไดอะตอม (ภาพที่ 4.6) โดยที่พีเอช 8.3 มีค่าศักย์ไฟฟ้าซีตาเท่ากับ -10.27 มิลลิโวลต์ เมื่อเปลี่ยนพีเอชเริ่มต้นให้อยู่ในช่วง 9 ถึง 9.5 มีค่าศักย์ไฟฟ้าซีตาเพิ่มขึ้นในช่วง -9.50 ถึง -7.64 มิลลิโวลต์ และเมื่อปรับพีเอชเป็น 10 ถึง 10.5 มีค่าศักย์ไฟฟ้าซีตาเท่ากับ -1.62 ถึง -1.06 มิลลิโวลต์ จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าติดลบน้อยลงเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นซึ่งเกิดจากการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization)

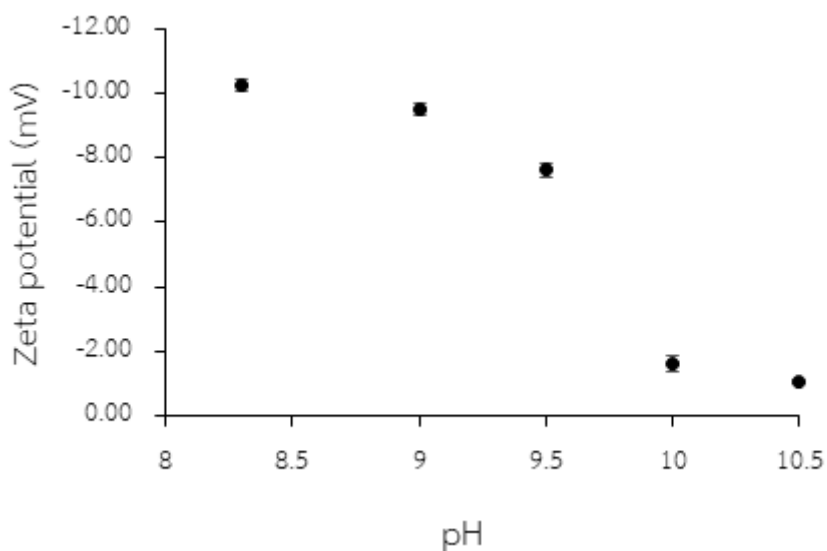
โดย มั่นสิน ตันฑูรเวศม์ [30] กล่าวว่า ระบบคอลลอยด์อาจมีเสถียรภาพหรือไม่ก็ได้ ซึ่งถ้าคอลลอยด์มีเสถียรภาพจะสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนภายในเวลาอันสั้น แต่ถ้าอนุภาคคอลลอยด์ตกตะกอนและแยกตัวจากน้ำจะถือว่าเสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกทำลายและไม่มีเสถียรภาพอีกต่อไป ซึ่งเสถียรภาพของคอลลอยด์จะขึ้นอยู่กับแรงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงดูดระหว่างอนุภาคจะเรียกว่า Van Der Waals Force มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล แรงผลักระหว่างอนุภาคจะต้องสูงกว่าแรงดูดจึงจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ แต่ถ้าเมื่อใดที่แรงดูดมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคแล้ว อนุภาคคอลลอยด์จะสามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อกได้ ซึ่งเมื่อนั้นแสดงว่าเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ถูกทำลายไป จะเห็นว่าเมื่ออนุภาคของคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมาก จะทำให้แรงดูดมีอำนาจมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคขาดเสถียรภาพและพร้อมที่จะรวมตัวกันและตกตะกอนลงมา ส่วนอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าสูงจะมีชั้นกระจาย (Diffuse layer) หนา ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคมีอิทธิพลมากกว่าแรงดูด และไม่เปิดโอกาสให้อนุภาคเข้ามาใกล้กันจนเกิดการดูดเข้าหากันจึงทำให้อนุภาคยังคงแขวนลอยอยู่ในน้ำได้

จากการทดลองสรุปได้ว่า pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนคือ 9.5 เพราะมีประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวสูงร้อยละ 77 อีกทั้งลักษณะของเซลล์ยังคงสภาพเดิมไม่เกิดการแตกที่จะส่งผลต่อ

ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเซลล์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zechen Wu และคณะ [28] ที่สรุปว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนไดอะตอม *N. oculata* ซึ่งเป็นไดอะตอมน้ำเค็ม คือ 9.3

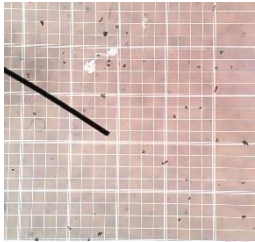
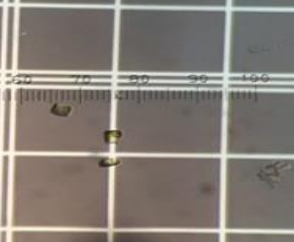
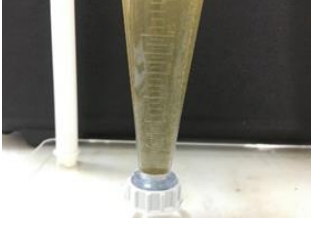
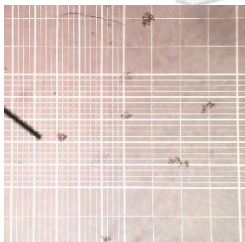
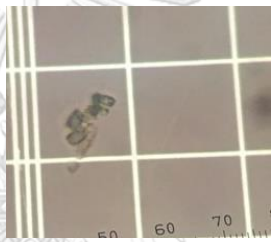


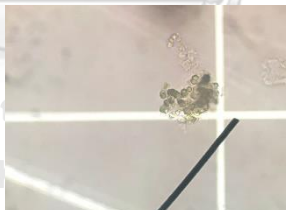
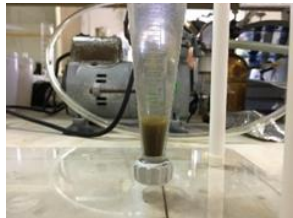
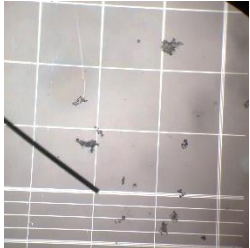
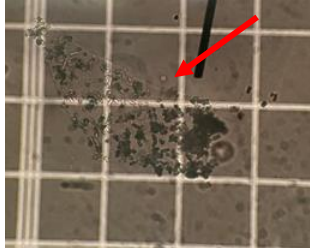

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอมด้วยการปรับพีเอช


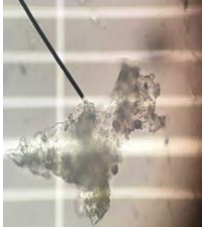

พีเอช	ปริมาณตะกอน (มิลลิลิตร/200 มิลลิลิตร)	จำนวนเซลล์ $\times 10^4$ เซลล์ต่อ มิลลิลิตร	ค่าความขุ่นหลัง ตกตะกอน	ประสิทธิภาพการ เก็บเกี่ยว (%)
8.3	$0.5 \pm 0.28$	$20 \pm 0.94$	$0.106 \pm 0.023$	$66.77 \pm 7.24$
9.0	$1 \pm 0.35$	$18 \pm 4.18$	$0.079 \pm 0.032$	$75.15 \pm 10.11$
9.5	$1.1 \pm 0.14$	$17 \pm 8.34$	$0.073 \pm 0.020$	$76.94 \pm 6.19$
10.0	$7.7 \pm 0.47$	$5 \pm 0.94$	$0.028 \pm 0.017$	$90.98 \pm 5.42$
10.5	$43 \pm 0.00$	$4 \pm 1.41$	$0.020 \pm 0.001$	$93.71 \pm 0.44$



ภาพที่ 4.7 ค่าซีตาโพเทนเชียลที่พีเอช 8.3-10.5

ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะภายในและภายนอกของเซลล์ไดอะตอมหลังจากปรับพีเอช

พีเอช เริ่มต้น	ลักษณะเซลล์ที่กำลังขยาย 10x	ลักษณะเซลล์ที่กำลังขยาย 40x	ลักษณะของเหลวภายนอก
8.3	(ก) 	(ข) 	(ค) 
9	(ง) 	(จ) 	(ฉ) 
9.5	(ช) 	(ซ) 	(ฅ) 
10	(ญ) 	(ฎ) 	(ฏ) 

10.5	(ฐ) 	(ฑ) 	(ฒ) 
------	--	---	--

### 4.3 การเก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอมด้วยวิธีการกรอง

#### 4.3.1 ประเภทของวัสดุกรองและขนาดรูกรองของผ้ากรอง

การทดลองนี้เลือกใช้ตัวกรอง 3 ชนิด คือ ผ้ากรองไนลอน ผ้ากรองพอลิเอสเตอร์และตะแกรงสแตนเลส ผ้ากรองไนลอนและผ้ากรองพอลิเอสเตอร์พบการใช้งานในการกรองลูกกุ้ง แพลงก์ตอนสัตว์ และของแข็งแขวนลอยขนาดเล็ก ในระหว่างการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ มีความทนทาน สามารถพับได้ และมีการคายน้ำที่ดี ขณะที่ตะแกรงสแตนเลสมีความแข็งแรง ทนทาน และทำความสะอาดได้ง่ายกว่า ผ้ากรองไนลอนและพอลิเอสเตอร์ อีกทั้งพบการใช้งานจริงในการกรองตะกอนของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดมากกว่า 30 ไมโครเมตร ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด [51] ในการทดลองครั้งที่ 1 ได้เลือกวัสดุกรองที่กล่าวมาในข้างต้นโดยมีขนาดรูกรองเท่ากับ 15 ไมโครเมตร ผลการทดลองซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าตะแกรงสแตนเลสมีประสิทธิภาพการกรองเซลล์  $91.67 \pm 4.77\%$  โดยกรองเซลล์ได้ 0.29 กรัม ซึ่งใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการกรองของผ้ากรองไนลอน แต่ตะแกรงสแตนเลสใช้เวลาในการกรองทั้งสิ้น 42 นาที ซึ่งน้อยกว่าเวลาในการกรองด้วยผ้ากรองไนลอนที่ใช้เวลาประมาณ 63 นาที และตะแกรงสแตนเลสสามารถทำความสะอาดได้ง่ายโดยใช้สายยางฉีดน้ำแรงดันต่ำ ขณะที่ผ้ากรองไนลอนต้องใช้แปรงช่วยขัดถู การทดสอบด้วยผ้ากรองพอลิเอสเตอร์ที่ขนาดรูกรองเท่ากันให้ประสิทธิภาพการกรองต่ำสุดที่  $68.22 \pm 6.38\%$  และใช้เวลาเฉลี่ยในการกรองนานถึง 74 นาที จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการกรองสำหรับผ้ากรองแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน เนื่องจาก ผ้ากรองแต่ละชนิดมีมุมสัมผัสหยดน้ำ (contact angle) ต่างกัน โดยมุมสัมผัสมากจะแสดงพฤติกรรมแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) คือ น้ำไม่เกิดการซึมผ่านผ้ากรอง และที่มุมสัมผัสน้อยจะแสดงพฤติกรรมแบบชอบน้ำ (Hydrophilic) คือ น้ำจะสามารถซึมผ่านผ้ากรองได้รวดเร็ว โดยตะแกรงสแตนเลสมีมุมสัมผัสกับน้ำเท่ากับ  $70.77^\circ$  [52] ขณะที่ผ้ากรองไนลอนและผ้ากรองพอลิเอสเตอร์มีมุมสัมผัสกับน้ำเท่ากับ  $82^\circ$  [34] และ  $117^\circ$  [33] ตามลำดับ จะเห็นว่าตะแกรงสแตนเลสมีมุมสัมผัสกับน้ำน้อยที่สุดจึงเป็นสาเหตุ

ทำให้วัสดุกรองชนิดนี้ใช้เวลาในการกรองน้อยที่สุด จากผลการทดลองที่ได้รับจึงสรุปในเบื้องต้นได้ว่า ควรใช้งานตะแกรงสแตนเลส

**ตารางที่ 4.3** การเปรียบเทียบชนิดตัวกรองสำหรับแยกชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. ออกจากของเหลว โดยทำการทดลองที่ขนาดรูกรองเท่ากับ 15 ไมโครเมตร

วัสดุตัวกรอง	ปริมาณของไดอะตอมบนตัวกรอง (กรัม)	เวลาที่ใช้กรองของเหลว (นาที)	ฟลักซ์การกรองเฉลี่ย (ลิตร/ชั่วโมง·ตารางเมตร)	ประสิทธิภาพการกรอง (%)
ผ้ากรองไนลอน	$0.27 \pm 0.041^{ab}$	$63 \pm 11.35^a$	$215 \pm 42.9^a$	$86.02 \pm 14.54^a$
ผ้ากรองพอลิเอสเตอร์	$0.22 \pm 0.020^b$	$73 \pm 13.5^a$	$184 \pm 34.2^a$	$72.22 \pm 8.38^b$
ตะแกรงสแตนเลส	$0.29 \pm 0.010^a$	$42 \pm 0.58^b$	$317 \pm 4.4^b$	$91.67 \pm 4.77^a$

อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

การทดลองต่อได้เปรียบเทียบการกรองของตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรองเท่ากับ 15 30 และ 50 ไมโครเมตร ผลการทดลองซึ่งแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าการกรองไดอะตอมปริมาตร 1 ลิตร ที่มีความเข้มข้นชีวมวล 0.32 กรัม/ลิตร ตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 30 ไมโครเมตร ให้ประสิทธิภาพการกรองสูงสุดที่  $93.75 \pm 5.41\%$  และมีปริมาณไดอะตอมติดอยู่บนตัวกรองเท่ากับ  $0.30 \pm 0.01$  กรัม ซึ่งไม่แตกต่างจากผลการทดลองที่ตัวกรองมีขนาดช่องว่าง 15 ไมโครเมตร ประสิทธิภาพการกรองไดอะตอมของตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดช่องว่าง 50 ไมโครเมตร ลดลงอย่างชัดเจน โดยมีประสิทธิภาพการกรองเท่ากับ  $85.52 \pm 6.50\%$  ประสิทธิภาพการกรองที่ได้รับไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) กับช่องว่างที่ 15 และ 30 ไมโครเมตร และเมื่อพิจารณาตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ เวลา และ ฟลักซ์ของเหลว ร่วมด้วยจะพบว่า ตะแกรงสแตนเลสขนาด 30 ไมโครเมตร ใช้เวลากรองน้อยกว่าตะแกรงสแตนเลส ขนาด 15 ไมโครเมตร และให้ฟลักซ์ของเหลวที่ค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง อีกทั้งขนาดช่องว่างที่ 30 ไมโครเมตร มีค่าน้อยกว่าขนาดเฉลี่ยของไดอะตอมที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ซึ่งมีความยาวประมาณ 40 ไมโครเมตร นอกจากนี้ น้ำที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรองมากกว่า 50 ไมโครเมตร พบว่ามีความขุ่นน้ำที่ใช้



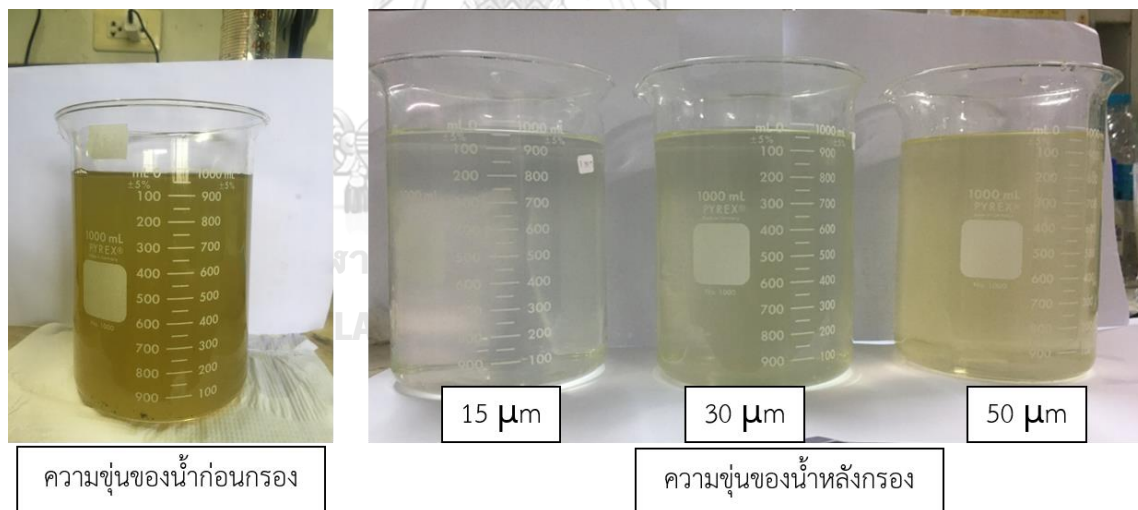
ตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร อย่างชัดเจน (ภาพที่ 4.7) ดังนั้นจึงตัดสินใจใช้ตะแกรงสแตนเลสที่มีช่องว่าง 30 ไมโครเมตร เพื่อใช้ทดลองเรื่องรูปแบบการกรองต่อไป

#### ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบขนาดช่องว่างของตะแกรงสแตนเลสสำหรับการกรองไดอะตอม

*Nitzschia* sp. ออกจากของเหลว

ขนาดช่องว่าง (ไมโครเมตร)	ปริมาณของไดอะตอมบนตัวกรอง (กรัม)	เวลาที่ใช้กรองของเหลว (นาทีก)	ฟลักซ์การกรองเฉลี่ย (ลิตร/ชั่วโมง·ตารางเมตร)	ประสิทธิภาพการกรอง (%)
15	$0.29 \pm 0.01^a$	$42 \pm 0.58^a$	$317 \pm 4.4^a$	$91.67 \pm 4.77^a$
30	$0.30 \pm 0.01^a$	$37 \pm 1.12^b$	$360 \pm 11.1^b$	$93.75 \pm 5.41^a$
50	$0.27 \pm 0.02^a$	$34 \pm 2.10^b$	$392 \pm 13.2^c$	$85.52 \pm 6.50^a$

อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )



ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบสีของเหลวก่อนการกรองและหลังการกรองด้วยตะแกรงสแตนเลสที่มีช่องว่าง 30 และ 50 ไมโครเมตร

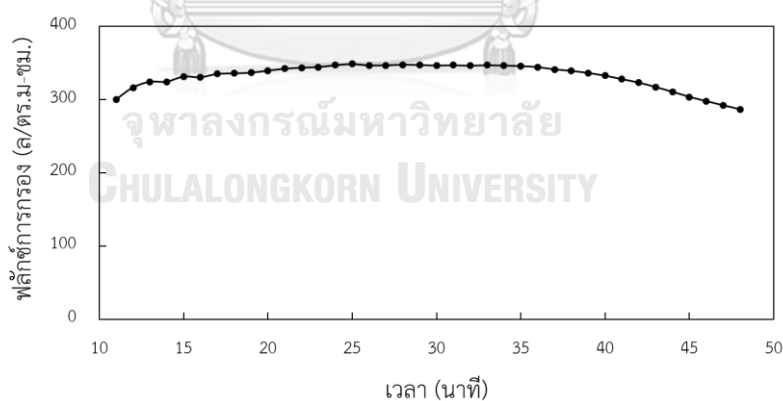
#### 4.3.2 รูปแบบการเก็บเกี่ยวไดอะตอม

- การกรองแบบถุงกรองทรงกรวย

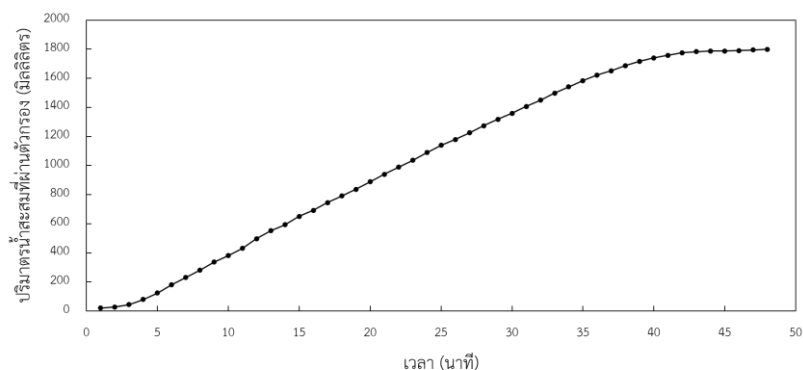
จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองและการแยกชีวมวลจากการทดลองที่ 4.3.1 พบว่า ตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร มีประสิทธิภาพการแยกชีวมวลดีที่สุด ดังนั้นจึงนำตะแกรง สแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร มาเย็บในลักษณะคล้ายถุงดักแพลงก์ตอน ผลการทดลองพบว่า ฟลักซ์การกรองของเหลวในระหว่าง 10 – 50 นาที มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 347.29 ลิตร/ตารางเมตร.ชั่วโมง ในนาทีที่ 30 และพบว่าทุกๆ 1 นาทีจะมีปริมาณน้ำที่ผ่านผ้ากรอง 30-50 มิลลิลิตร จนถึงนาทีที่ 37 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านผ้ากรองจะน้อยลงเหลือเพียง 4-10 (ภาพที่ 4.9 ) เนื่องจากน้ำขาเข้าถูกปล่อยเข้าสู่ถุงกรองจนครบ 2000 มิลลิลิตร ใช้เวลาประมาณ 37 นาที และภายในถุงกรองพบว่ามีน้ำบางส่วนเอ่อล้นอยู่ภายในถุงกรอง ซึ่งน้ำส่วนนี้จะเกิดการกรองในอัตราที่ช้าลง เนื่องจากมีเซลล์บางส่วนอุดตันบนผ้ากรองและไม่ไหลลงสู่ที่เก็บเซลล์ ไดอะตอมด้านล่าง ทำให้มีปริมาณน้ำที่ไหลผ่านผ้ากรองหลังนาทีที่ 37 มีปริมาณลดน้อยลง และหลังจบการทดลองพบว่า น้ำที่อยู่ภายในส่วนเก็บเซลล์ไดอะตอมมีปริมาณทั้งสิ้น  $179 \pm 2$  มิลลิลิตร และสามารถกรองได้ในรูปน้ำหนักเซลล์แห้งทั้งสิ้น  $0.173 \pm 0.015$  กรัม และน้ำที่ไหลผ่านการกรองมีปริมาตรทั้งสิ้น  $1799 \pm 23$  มิลลิลิตร มีปริมาณเซลล์ที่ผ่านการกรองเท่ากับ  $0.041 \pm 0.003$  กรัม คิดเป็นประสิทธิภาพการกรอง  $86.48 \pm 0.99\%$  (ตารางที่ 4.5) นอกจากนี้พบว่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำก่อนกรอง ขณะที่น้ำที่อยู่ภายในส่วนที่เก็บเซลล์ ไดอะตอมมีค่าความขุ่นสูงขึ้น (ภาพที่ 4.10)

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการกรองไดอะตอม *Nitzschia* sp. ด้วยถุงกรองทรงกรวยที่ทำจากตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร

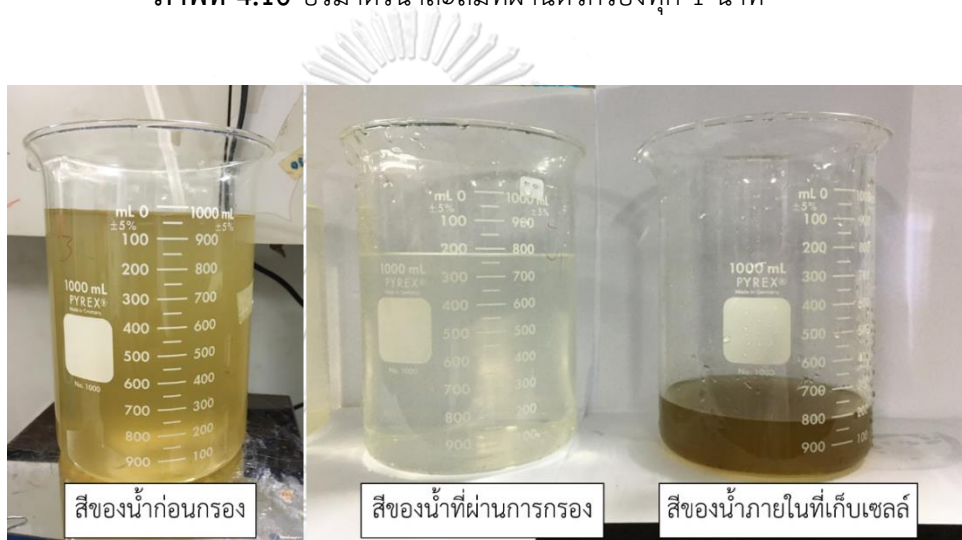
พารามิเตอร์	ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง	
	น้ำส่วนที่ผ่านผ้ากรอง	น้ำส่วนที่อยู่ภายในที่เก็บเซลล์ไดอะตอม
ปริมาณน้ำ (มิลลิลิตร)	1799 ± 23	179 ± 2
น้ำหนักแห้งของชีวมวล (กรัม)	0.041 ± 0.003	0.173 ± 0.015
จำนวนเซลล์ ×10 <sup>4</sup> เซลล์/มิลลิลิตร	4 ± 0	มีจำนวนเซลล์มาก
ค่าความขุ่น	0.023 ± 0.014	0.964 ± 0.132
ประสิทธิภาพการแยกชีวมวล (%)	86.48 ± 0.99	



ภาพที่ 4.9 ฟลักซ์การกรองของเหลวจากการกรองด้วยถุงกรองทรงกรวยที่ทำจากตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.10 ปริมาณน้ำที่ผ่านตัวกรองทุก 1 นาที

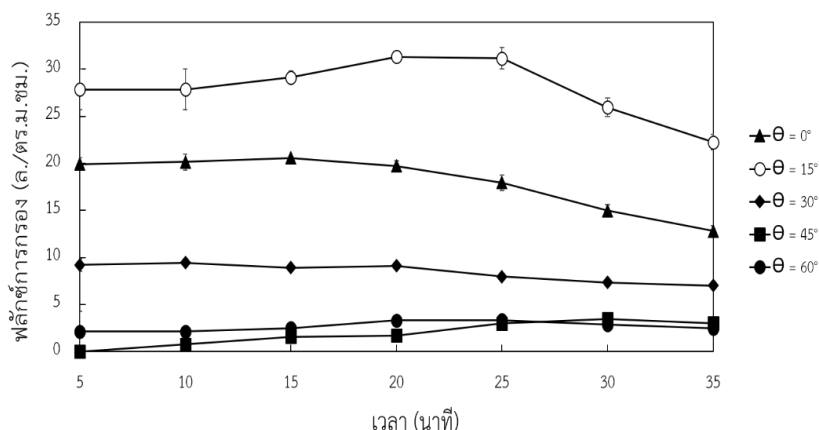


ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบสีความขุ่นของเหลวก่อนและหลังการกรองด้วยถุงกรองทรงกรวยที่ทำจากตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร

จากการทดลองพบว่า การกรองรูปแบบนี้สามารถเพิ่มความเข้มข้นเซลล์ในส่วนที่เก็บเซลล์ได้อะตอมได้สูง มีความสะดวกในการเก็บเกี่ยว สามารถฉีดทำความสะอาดถุงกรองจากภายนอกเพื่อให้เซลล์ที่ติดค้างภายในถุงกรองหลุดออกและหล่นไปในที่เก็บเซลล์ได้อะตอมได้ และสามารถทำการกรองในได้ในกรณีที่มีน้ำเพาะเลี้ยงจำนวนมาก ถุงกรองสามารถติดตั้งเข้ากับถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงที่มีลักษณะเป็นคอลัมน์ทรงกระบอก เช่น ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงแบบอากาศยก (Internal-loop airlift) หรือ ห่อเป่าอากาศ (Bubble column) หรือแม้กระทั่งบริเวณปลายท่อที่มีการสูบลมไหลได้อะตอมออกมาจากระบบเพาะเลี้ยง โดยไม่ต้องหยุดให้อากาศหรือเปิดถังเพาะเลี้ยงออกมา ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงการปนเปื้อน การเก็บเกี่ยวเซลล์ในลักษณะนี้ยังเหมาะสมกับการเลี้ยงแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่อง เนื่องจากสามารถเก็บเกี่ยวเซลล์ได้อะตอมได้ขณะทำการเพาะเลี้ยง

#### -การกรองแบบลาดเอียง

จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองและการแยกชีวมวลจากการทดลองที่ 4.3.1 พบว่าตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร มีประสิทธิภาพดีที่สุด ดังนั้นจึงนำตะแกรงสแตนเลสมาทำการศึกษาการกรองแบบลาดเอียง ผลการทดลองพบว่า การวางแผ่นกรองในลักษณะที่มีความชันมากเกินไป ( $\theta$  มีค่าสูง) เมื่อเทียบกับระดับแนวราบ ทำให้น้ำไหลลงมาอย่างรวดเร็วผ่านหน้าตะแกรงสแตนเลสและไม่ไหลผ่านแผ่นกรองลงสู่ด้านล่าง เมื่อทดสอบการกรองที่มุมเอียง 15 องศา ค่าฟลักซ์การกรองสูงสุดเท่ากับ 31.34 ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง ในนาที่ที่ 20 (ภาพที่ 4.11) และที่มุมทดสอบ 30 45 และ 60 องศาพบว่าฟลักซ์การกรองมีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์การกรอง เนื่องจากมีปริมาณน้ำที่ไหลผ่านผ้ากรองน้อยมากจนไม่เกิดการกรอง และที่มุม 45 องศา มีค่าฟลักซ์การกรองน้อยที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.71 ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง ในนาที่ที่ 20 เนื่องจากมีปริมาณน้ำที่ไหลผ่านผ้ากรองน้อยมากจนไม่เกิดการกรอง สังเกตได้จากปริมาณน้ำสะสมที่ผ่านตัวกรองของมุม 30 45 และ 60 องศา (ภาพที่ 4.12) จะเห็นว่าปริมาณน้ำสะสมน้อยมากเมื่อเทียบกับมุม 0 และ 15 องศา เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์การกรองที่มุม 0 และ 15 องศาเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์การกรองอย่างเห็นได้ชัด โดยในนาที่ที่ 35 มุมทดสอบที่ระดับ 0 และ 15 องศา มีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์การกรอง โดยมีค่าลดลงไปร้อยละ 56.3 และ 79.9 จากค่าฟลักซ์การกรองเริ่มต้น ซึ่งสาเหตุของการลดลงของค่าฟลักซ์การกรองในมุมทดสอบที่ระดับ 0 และ 15 องศา นั้นเกิดจากรูปแบบการวางแผ่นกรองที่มีความลาดเอียงน้อย ทำให้แรงไหลของน้ำที่ไหลผ่านแผ่นกรองนั้นไม่สามารถชะล้างพัลพาเซลส์ไดอะตอมที่ติดค้างบนแผ่นกรองลงสู่ถังเก็บเซลล์ด้านล่างได้ จึงทำให้เซลล์ไดอะตอมสะสมตัวเกิดการอุดตันบนพื้นผิวบริเวณหน้าแผ่นกรองได้ ทำให้ค่าฟลักซ์การกรองลดลง ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปกฉัตร [53] ที่พบว่า การสะสมตัวของตะกอนบริเวณพื้นที่ผิวกรองส่งผลให้เกิดการอุดตันของระบบกรองและทำให้ค่าฟลักซ์การกรองลดลงในอัตราที่รวดเร็ว



ภาพที่ 4.12 ฟลักซ์การกรองของเหลวด้วยรูปแบบการกรองแบบลาดเอียงจากตะแกรงสแตนเลส 30 ไมโครเมตรที่มุมทดสอบต่างๆ

เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนปริมาตรน้ำและน้ำหนักแห้งของไดอะตอมที่แยกออกจากน้ำเพาะเลี้ยง (ตารางที่ 7) พบว่าที่ระดับมุมทดสอบระดับ 15 องศา สามารถแยกเซลล์ไดอะตอมออกจากน้ำเพาะเลี้ยงได้สูง โดยมีปริมาตรน้ำที่ไม่ไหลผ่านการกรองประมาณ  $638 \pm 12.5$  มิลลิลิตร มีน้ำหนักเซลล์แห้งเท่ากับ 0.265 กรัม ทำให้น้ำในส่วนนี้มีค่าความเข้มข้นสูงขึ้นจากความเข้มข้นเริ่มต้นถึงร้อยละ 30 และมีปริมาตรน้ำที่ผ่านการกรองสูงถึง  $364 \pm 13.5$  มิลลิลิตร มีน้ำหนักเซลล์แห้ง 0.011 กรัม รองลงมาคือที่ระดับมุมทดสอบ 0 น้ำที่ไม่ผ่านการกรองมีปริมาตร  $675 \pm 25$  มิลลิลิตร มีน้ำหนักเซลล์แห้ง 0.262 กรัม และน้ำที่ไม่ผ่านการกรองนี้มีค่าความเข้มข้นเซลล์สูงขึ้นจากความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 8 ส่วนน้ำที่ผ่านการกรองมีปริมาตร  $210 \pm 9.5$  มิลลิลิตร มีน้ำหนักเซลล์แห้ง 0.004 กรัม และสุดท้ายที่ระดับมุมทดสอบ 30 45 และ 60 องศา พบว่าน้ำที่ไม่ผ่านการกรองมีปริมาตรสูงกว่า 880 มิลลิลิตร และน้ำที่ผ่านการกรองมีปริมาตรน้อยกว่า 115 มิลลิลิตร เมื่อพิจารณาความเข้มข้นน้ำก่อนกรองและน้ำที่ไม่ผ่านการกรอง พบว่าความเข้มข้นของน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าฟลักซ์ที่มีค่าน้อยมากและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์เลยตลอดการทดลอง ทั้งนี้จากผลการทดลองจะพบว่ารูปแบบการวางแผ่นกรองที่มีลักษณะลาดเอียงมากหรือน้อยเกินไปนั้นจะส่งผลต่อค่าฟลักซ์การกรอง ปริมาณน้ำที่ผ่านการกรอง และความเข้มข้นเซลล์ในส่วนน้ำขาออกโดยตรง ดังนั้นการวางแผ่นกรองที่มุมทดสอบ 0 30 45 และ 60 องศาซึ่งเป็นรูปแบบการวางแผ่นกรองที่มีลักษณะลาดเอียงมากหรือน้อยเกินไป จะส่งผลต่อฟลักซ์การกรองของเหลวและปริมาณน้ำที่ผ่านการกรองน้อยเกินไป เมื่อเทียบกับมุมทดสอบที่ 15 องศา สำหรับการนำไปใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมสามารถนำมุมทดสอบที่ 15 องศา ไปใช้งานได้ โดยจากงานวิจัยของ Ebeling [54] ได้ทำการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยใช้สารส้มและสารช่วยตกตะกอนร่วมกับเครื่องรีดตะกอนแบบเอียง (Belt filter

press) ในการแยกสารแขวนลอยและฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสีย พบว่าการใช้สารส้มหรือสารช่วยตกตะกอนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถแยกสารแขวนลอยและฟอสฟอรัสออกได้หมด และเครื่องรีดตะกอนแบบเอียงสามารถแยกตะกอนของแข็งออกจากของเหลวได้มากถึง 13% โดยมุมเอียงที่เครื่องรีดตะกอนใช้คือ 10 องศา จากสาเหตุดังกล่าวมมทดสอบที่ 15 องศา จึงเป็นมุมทดสอบที่เหมาะสมกับการนำมารองใต้อะตอมโดยใช้รูปแบบการกรองแบบลาดเอียง

**ตารางที่ 4.6** เปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดในการกรองแบบลาดเอียงที่มุมต่างๆ

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	Θ				
	0	15	30	45	60
น้ำหนักเซลล์แห้งบนผ้ากรอง (กรัม)	0.16±0.008 <sup>a</sup>	0.079±0.0015 <sup>b</sup>	0.14±0.0125 <sup>a</sup>	0.081±0.0235 <sup>b</sup>	0.089±0.0115 <sup>b</sup>
น้ำหนักเซลล์แห้งที่ไม่ผ่านผ้ากรอง (กรัม)	0.09±0.002 <sup>c</sup>	0.186±0.008 <sup>a</sup>	0.136±0.006 <sup>b</sup>	0.183±0.002 <sup>a</sup>	0.181±0.003 <sup>a</sup>
น้ำหนักเซลล์แห้งที่ผ่านผ้ากรอง (กรัม)	0.004±0.003 <sup>a</sup>	0.011±0.001 <sup>a</sup>	0.003±0.005 <sup>a</sup>	0.003±0 <sup>a</sup>	0.001±0 <sup>b</sup>
จำนวนเซลล์ที่ไม่ผ่านผ้ากรอง×10 <sup>4</sup> เซลล์/มิลลิลิตร	28±3 <sup>c</sup>	77±3 <sup>a</sup>	68±1 <sup>a</sup>	64±2 <sup>b</sup>	63±3 <sup>b</sup>
จำนวนเซลล์ที่ผ่านผ้ากรอง×10 <sup>4</sup> เซลล์/มิลลิลิตร	4±2 <sup>a</sup>	5±2 <sup>a</sup>	6±1 <sup>a</sup>	5±0 <sup>a</sup>	7±2 <sup>a</sup>
ปริมาตรน้ำสะสมที่ไม่ผ่านการกรอง (มิลลิลิตร)	675±25 <sup>a</sup>	638±12.5 <sup>a</sup>	880±10 <sup>b</sup>	945±5 <sup>b</sup>	950±0 <sup>b</sup>
ปริมาตรน้ำสะสมที่ผ่านการกรอง (มิลลิลิตร)	210±9.5 <sup>a</sup>	364±13.5 <sup>b</sup>	115±5 <sup>c</sup>	50±0.5 <sup>d</sup>	40±5 <sup>d</sup>
ค่าฟลักซ์การกรองเฉลี่ย (ล./ตร.ม-ชม)	17.17±0.60 <sup>a</sup>	27.94±1.17 <sup>b</sup>	8.43±0.22 <sup>c</sup>	1.93±0.10 <sup>d</sup>	2.68±0.54 <sup>d</sup>

อักษรที่แตกต่างกันในแถวแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนากระบวนการเก็บเกี่ยวเซลล์ไดอะตอม *Nitzschia* sp. ด้วยวิธีการตกตะกอนและการกรอง โดยทั้ง 2 วิธีมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานจริงในการเพาะเลี้ยงไดอะตอมในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากสามารถดำเนินการได้ง่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวเซลล์ไดอะตอมด้วยวิธีการตกตะกอนและการกรอง โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ 1) ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเก็บเกี่ยวเซลล์ไดอะตอมด้วยวิธีการตกตะกอน ซึ่งประกอบด้วย ความเข้มข้นเซลล์เริ่มต้น อุณหภูมิ และพีเอชในน้ำเพาะเลี้ยง และ 2) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเก็บเกี่ยวเซลล์ไดอะตอมด้วยวิธีการกรอง โดยศึกษาผลของ วัสดุกรอง ขนาดรูกรอง และรูปแบบการกรอง ผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 การเก็บเกี่ยวเซลล์ไดอะตอมด้วยวิธีการตกตะกอน

การตกตะกอนสามารถช่วยแยกชีวมวลไดอะตอมออกจากของเหลวได้โดยใช้เวลาในการตกตะกอนประมาณ 30 ถึง 40 นาที ผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นเซลล์เริ่มต้นประมาณ 0.3 กรัม/ลิตร ประสิทธิภาพการตกตะกอนจะอยู่ในช่วง 50% ถึง 60% ซึ่งมากกว่าประสิทธิภาพการตกตะกอนเมื่อใช้ความเข้มข้นเซลล์ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ การลดอุณหภูมิลงเหลือประมาณ 2 ถึง 9 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนได้เล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แต่อาจมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการตกตะกอนเพิ่มขึ้นได้ถึงประมาณ 90% เมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นไปที่ประมาณ 9 ถึง 10 แม้ว่าประสิทธิภาพการตกตะกอนจะมีค่าค่อนข้างกว้าง แต่ข้อสรุปสำคัญที่ได้คือการตกตะกอนสามารถทำให้ชีวมวลไดอะตอมมีความเข้มข้นมากขึ้นและง่ายต่อการทำบริสุทธิ์ในขั้นตอนถัดไป และสามารถแยกน้ำปริมาณมากออกจากชีวมวลโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย นอกจากนี้สามารถดำเนินการได้ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเชิงแสงแบบอากาศยก โดยอาจออกแบบให้มีส่วนลาดเอียงที่กั้นถังคล้ายกับกรวยอิมฮอฟเพื่อให้สามารถรวบรวมชีวมวลที่ตกตะกอนลงสู่ด้านล่างได้ง่าย



### 5.1.2 การเก็บเกี่ยวเซลล์ไดอะตอมด้วยวิธีการกรอง

การกรองมีประสิทธิภาพในการแยกชีวมวลไดอะตอมออกจากของเหลวได้ดีกว่าและเร็วกว่าการตกตะกอน ผลการทดลองที่ได้พบว่าการใช้งานตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับผ้ากรองไนลอนและพอลิเอสเตอร์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพการกรองสูงกว่า ใช้เวลาในการกรองต่ำกว่า อีกทั้งสามารถทำความสะอาดและซ่อมบำรุงได้ง่าย โดยการกรองเซลล์ไดอะตอมที่มีความเข้มข้นเซลล์เริ่มประมาณ 0.32 กรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพการกรองเท่ากับ 93.75% ใช้เวลากรอง 36.67 นาที มีปริมาณชีวมวลไดอะตอมติดบนผ้ากรอง  $0.30 \pm 0.01$  กรัม/ลิตร และมีปริมาณชีวมวลที่ปนมาในน้ำขาออก  $0.03 \pm 0.00$  กรัม/ลิตร จากนั้นจึงนำตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร มาศึกษาเปรียบเทียบกับรูปแบบการกรองแบบถ่วงกรองทรงกรวยและแบบลาดเอียง ผลการทดลองพบว่าการกรองในลักษณะถ่วงกรองทรงกรวยให้ประสิทธิภาพการกรองสูงกว่าการกรองแบบลาดเอียง และสามารถกรองของเหลวได้มากกว่า ความเข้มข้นของเซลล์ไดอะตอมที่ได้หลังการกรองมีค่าสูงกว่าการกรองแบบลาดเอียง นอกจากนี้ถ่วงกรองไดอะตอมยังสามารถสร้างได้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งานมากกว่า โดยถ่วงกรองทรงกรวยมีประสิทธิภาพการกรองเท่ากับ 86.48%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาถึงวิธีการเก็บเกี่ยวเซลล์ไดอะตอม *Nitzschia* sp. วิธีการตกตะกอนและการกรอง พบว่าทั้งวิธีการตกตะกอนและการกรองสามารถเก็บเกี่ยวเซลล์ออกจากของเหลวได้ดี อย่างไรก็ตามระหว่างทดลองยังพบอุปสรรคในการดำเนินงาน จึงได้สรุปข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยต่อไปดังนี้

1. ควรศึกษาระดับความเข้มข้นของไดอะตอมที่สูงขึ้นเนื่องจากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพาะเลี้ยงไดอะตอมมีแนวโน้มว่าจะสามารถผลิตไดอะตอมได้ในปริมาณมากขึ้น (>0.5 กรัม/ลิตร)
2. ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงชนิดและความเข้มข้นของสารช่วยตกตะกอนที่ควรใช้งาน เช่น โพลีเมอร์ ดินเหนียว ดินกาฬิน เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนของเซลล์ไดอะตอม
3. ควรศึกษาเพิ่มเติมและปรับปรุงเกี่ยวกับระบบการกรองแบบลาดเอียง เช่น ศึกษาถึงอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่หน่วยกรอง เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสม ภาวะของแข็งที่เหมาะสม การประยุกต์การวนน้ำกลับเข้าสู่หน่วยกรองทำให้เกิดการกรองหลายรอบ

4. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการกรองแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องกรองแบบ Rotary vacuum filter
5. ควรศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการควรรวมหน่วยการกรองเข้ากับการตกตะกอน หรือหน่วยปฏิบัติการอื่น เช่น การหมุนเหวี่ยง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยว ลดเวลา และลดค่าใช้จ่าย





## ภาคผนวก ก

### การนับเซลล์และคำนวณความหนาแน่นเซลล์

การดำเนินการนับเซลล์ไดอะตอม *Nitzschia* sp. ด้วยสไลด์นับเม็ดเลือด (Hemocytometer) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40x โดยสไลด์นับเม็ดเลือด 1 อัน มีช่องใส่ตัวอย่างซึ่งมีลักษณะเป็นตารางสี่เหลี่ยม 2 ตารางอยู่กลางสไลด์โดยแต่ละตารางมีพื้นที่เท่ากับ 1 ตารางมิลลิเมตร และมีความลึกเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ ก.1 ซึ่งการนับเซลล์จะทำการใส่ตัวอย่างลงบนแผ่นสไลด์ นับเซลล์บนตารางสี่เหลี่ยมและนำมาคำนวณความหนาแน่นเซลล์ได้ดังนี้

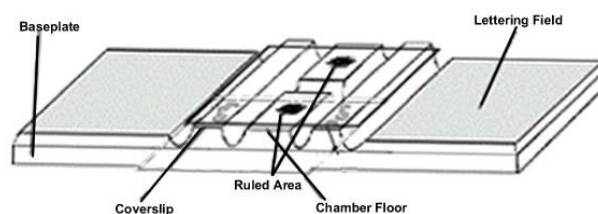
ปริมาตรของสไลด์นับเม็ดเลือด = ความกว้าง x ความยาว x ความลึก

$$= 1 \text{ มิลลิเมตร} \times 1 \text{ มิลลิเมตร} \times 0.1 \text{ มิลลิเมตร}$$

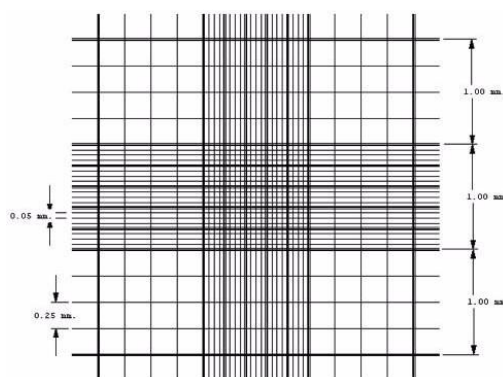
$$= 0.1 \text{ ลูกบาศก์มิลลิเมตร}$$

$$= 0.0001 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ } 0.0001 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$= 1 \times 10^4 \text{ เซลล์/มิลลิลิตร}$$



CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ ก-1 พื้นที่ตารางสำหรับนับเซลล์สำหรับยี่ห้อ[55]

## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์น้ำหนักเซลล์แห้ง

#### อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
2. กระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
3. ตู้อบ อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส
4. Vacuum desiccator

#### วิธีการวิเคราะห์น้ำหนักแห้ง

1. นำกระดาษกรอง Whatman GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ไปอบที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ และนำไปเก็บไว้ที่ Vacuum desiccator เพื่อป้องกันความชื้น เมื่ออุณหภูมิกระดาษหายร้อนแล้วนำกระดาษไปชั่งน้ำหนักก่อนทำการกรอง
2. เก็บตัวอย่างน้ำประมาณ 5-10 มิลลิลิตร
3. นำตัวอย่างน้ำมาทำการกรองผ่านกระดาษ Whatman GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ที่ผ่านการอบและชั่งน้ำหนักกระดาษจากข้อ 1
4. ล้างเซลล์บนกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่นประมาณ 20-40 มิลลิลิตร
5. นำกระดาษกรองที่ผ่านการกรองมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่
6. ชั่งกระดาษกรองที่ผ่านการกรองมาแล้วด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
7. น้ำหนักเซลล์แห้ง คือ ผลต่างของน้ำหนักกระดาษกรองที่มีเซลล์กับน้ำหนักกระดาษกรองเริ่มต้น

## ภาคผนวก ค

### การวัดค่าความขุ่น

#### อุปกรณ์

1. UV-Vis Spectrophotometer
2. Cuvette
3. อาหาร F/2 สำหรับทำ Blank
4. ตัวอย่างที่ต้องการทำการวัด

#### วิธีการวัดค่าความขุ่น

1. เปิดเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ตั้งค่าเครื่องสำหรับวัดตัวอย่างที่มีความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร
2. นำอาหาร F/2 ใส่ใน cuvette 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำเข้าตรวจก่อนเพื่อทำการ Autozero เครื่อง
3. เมื่อ Autozero แล้ว นำตัวอย่างที่ต้องการวัดค่าความขุ่น ใส่ใน cuvette 1 มิลลิลิตร เปิดฝาเครื่องและนำไปใส่ในช่องที่ตรวจ ปิดฝาและกด start ค่าความขุ่นจะแสดงผลที่หน้าจอของเครื่อง

## ภาคผนวก ง

### การติดตามผลการทดลอง

#### 1. การคำนวณความหนาแน่นของเซลล์โตอะตอม

จากลักษณะของช่องสไลด์นับเซลล์ในภาคผนวก ก ทำการหยดตัวอย่างโตอะตอมที่ต้องการนับจำนวนลงไป 1-2 หยด ในช่องใส่ตัวอย่าง (load port) ของสไลด์นับเม็ดเลือดตรงที่มีกระจกปิดสไลด์ปิดอยู่ เพื่อให้ตัวอย่างสาหร่ายจะกระจายไปทั่วตารางสี่เหลี่ยม จากนั้นวางสไลด์นับเม็ดเลือดทิ้งไว้ 1 นาที เพื่อให้เซลล์สาหร่ายจมลงสู่พื้นสไลด์และนำสไลด์นับเม็ดเลือดวางบนแท่นกล้องจุลทรรศน์ ปรับกล้องและเริ่มกำลังขยายจากต่ำไปสูง จากนั้นจึงทำการนับเซลล์บนช่องสี่เหลี่ยมตรงกลาง ซึ่งสามารถคำนวณหาความหนาแน่นเซลล์ได้ดังนี้

$$(n/x) \times 10^4 = \text{จำนวนเซลล์ใน 1 มิลลิลิตร}$$

เมื่อ  $n$  = จำนวนเซลล์ทั้งหมดที่นับได้

$x$  = ตัวหารซึ่งใช้ค่าร้อยละของพื้นที่ใส่แต่ละช่องที่นับ

#### 2. การคำนวณอัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุดโตอะตอม

เมื่อทราบความหนาแน่นเซลล์จากการนับเซลล์ด้วยสไลด์นับเม็ดเลือด ภายใต้กล้องจุลทรรศน์สามารถคำนวณอัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด ( $\mu_m$ ) จากสมการ

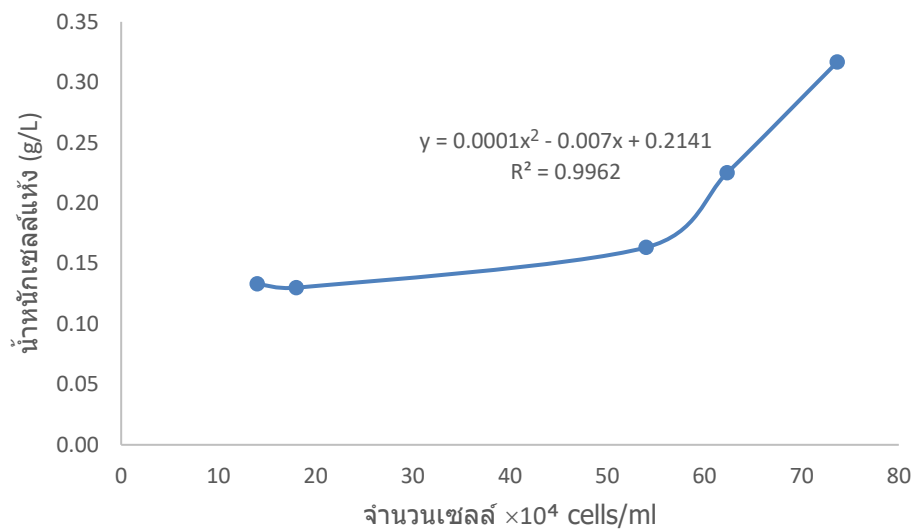
$$\mu_m = (\ln N_2 - \ln N_1) / (t_2 - t_1)$$

เมื่อ  $\mu_m$  = อัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด (วัน<sup>-1</sup>)

$N_1$  = จำนวนเซลล์ในช่วง Exponential phase (เซลล์/มิลลิลิตร) ที่เวลา  $t_1$

$N_2$  = จำนวนเซลล์ในช่วง Exponential phase (เซลล์/มิลลิลิตร) ที่เวลา  $t_2$

3. ความสัมพันธ์ของน้ำหนักเซลล์แห้งและความหนาแน่นเซลล์



ภาพที่ ง-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเซลล์แห้งและจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณ





## ภาคผนวก จ

### การทำหน่วยกรอง

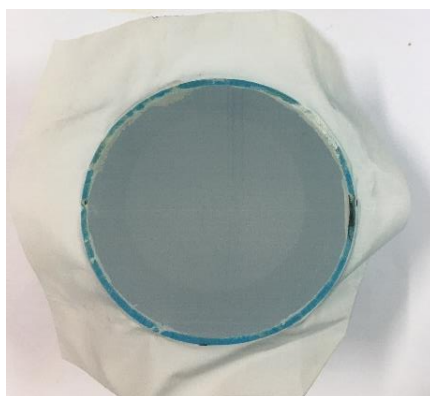
1. การกรองแบบดั้งเดิมเพื่อทดสอบประสิทธิภาพวัสดุกรองและขนาดรูกรอง

#### อุปกรณ์

1. ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 เซนติเมตร
2. ผ้ากรองสแตนเลส, ไนลอน และโพลีเอสเตอร์
3. กาวร้อน
4. กระดาษทรายละเอียด

#### วิธีการทำ

1. ตัดท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 เซนติเมตร ให้มีความยาว 5 เซนติเมตร และขัดขอบด้วยกระดาษทรายละเอียด ให้พื้นขอบเรียบและสม่ำเสมอ
2. ตัดผ้ากรองเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีความยาวและความกว้าง 10x10 เซนติเมตร
3. ทากาวที่ขอบของท่อพีวีซี จากนั้นนำผ้ากรองที่ตัดไว้แล้วทาขอบท่อพีวีซีโดยจับขอบให้ตึงทุกด้าน อย่าให้เกิดการหย่อน
4. รอให้กาวแห้งและตรวจสอบการรั่วซึมของน้ำจากขอบท่อพีวีซี



ภาพที่ จ-1 อุปกรณ์ในการกรองแบบดั้งเดิม

## 2. การกรองแบบถุงกรองทรงกรวย

### อุปกรณ์

1. ผ้ากรองที่มีความยาว 50 เซนติเมตร
2. ห่วงเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร
3. ข้อต่อตรง 1 นิ้ว ลด 4 หุน
4. วาล์ว 4 หุน
5. ข้อรีด
6. เชือก

### วิธีการทำ

1. นำผ้ากรองไปเย็บเป็นรูปทรงกรวยปลายตัด ที่มีรัศมีด้านบน 5 เซนติเมตร และมีรัศมีด้านล่างกรวยตัด 2 เซนติเมตร มีความสูง 40 เซนติเมตร
2. นำข้อต่อตรง 1 นิ้ว ลด 4 หุนใส่ลงไปในพื้นที่เย็บเป็นรูปกรวยปลายตัด ปลายผ้าจะสวมแน่นพอดีกับข้อต่อตรง จากนั้นนำข้อรีดมารัดไว้
3. นำวาล์ว 4 หุนมาต่อกับปลายข้อต่อ 1 นิ้วลด 4 หุน ทางด้านล่าง เพื่อเป็นช่องในการปล่อยน้ำ
4. เย็บปลายผ้าด้านบนเข้ากับห่วงเหล็กและร้อยกับเชือกเพื่อทำที่แขวน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONG



ภาพที่ จ-2 อุปกรณ์กรองแบบถุงกรองทรงกรวย

### 3. การกรองแบบลาดเอียง

#### อุปกรณ์

1. ผ้ากรอง
2. ฟิวเจอร์บอร์ด
3. ภาชนะโตะแบบทึบขนาดกว้าง 33 เซนติเมตร ยาว 43 เซนติเมตร และสูง 9 เซนติเมตร
4. แผ่นเหล็กบาง

#### วิธีการทำ

1. ตัดกระดาษฟิวเจอร์บอร์ด เจาะตรงกลางออกให้มีความกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 28 เซนติเมตร
2. ตัดผ้ากรองให้มีความกว้าง 11 เซนติเมตรและยาว 29 เซนติเมตร จากนั้นไปซิงติดกับแผ่นฟิวเจอร์บอร์ดที่ได้ทำการเจาะตรงกลางออกแล้ว ให้แน่นทุกมุม
3. เจาะแผ่นเหล็กบางที่มีความกว้าง 12 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร มาทำการเจาะตรงกลางออกให้มีความกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 28 เซนติเมตร เพื่อทำเป็นที่รองรับแผ่นฟิวเจอร์บอร์ด
4. ทำกับเจาะรูภาชนะโตะ 3 รูที่ขอบภาชนะเพื่อทำการยึดติดบานพับประตูกับภาชนะก่อน ด้านหนึ่ง จากนั้นนำแผ่นเหล็กบางที่เจาะตรงกลางออกแล้วมายึดติดกับบานพับประตูอีกด้านหนึ่ง โดยจัดให้ปลายของแผ่นเหล็กบางอยู่ที่ขอบภาชนะพอดีเพื่อความสะดวกสำหรับทางน้ำออก เมื่อติดแผ่นเหล็กกับบานพับประตูแล้วจะพบว่ามันสามารถปรับระดับของแผ่นเหล็กได้ ตามมุมที่เราต้องการ



ภาพที่ จ-3 หน่วยกรองการกรองแบบลาดเอียง

### ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองการเก็บเกี่ยวไดอะตอม *Nitzschia* sp. ด้วยวิธีการ

ตกตะกอน

- เก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. วิธีการตกตะกอนโดยศึกษาถึงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นเซลล์ที่มีการตกตะกอน

ตารางที่ ฉ- 1 จำนวนเซลล์ น้ำหนักแห้ง และค่าความขุ่น ที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างขณะทำการทดลองที่เวลาต่างๆ โดยมีจำนวนเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ  $24 \times 10^4$  เซลล์/มล. มีน้ำหนักแห้งเริ่มต้น 0.061 กรัม/ลิตร และมีค่าความขุ่นเริ่มต้น 0.085

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	จำนวนเซลล์ $\times 10^4$ เซลล์/มล.	น้ำหนักแห้ง (กรัม/ลิตร)	ค่าความขุ่น ที่ 680 นาโนเมตร
ตำแหน่งบน			
0	24 $\pm$ 3.33	0.0600 $\pm$ 0.0132	0.085 $\pm$ 0.005
10	20 $\pm$ 4.49	0.0422 $\pm$ 0.0201	0.078 $\pm$ 0.006
20	19 $\pm$ 4.03	0.0396 $\pm$ 0.0192	0.078 $\pm$ 0.006
30	20 $\pm$ 1.31	0.0440 $\pm$ 0.0059	0.078 $\pm$ 0.002
40	19 $\pm$ 7.79	0.0347 $\pm$ 0.0347	0.077 $\pm$ 0.011
ตำแหน่งล่าง			
0	21 $\pm$ 4.85	0.0464 $\pm$ 0.0224	0.080 $\pm$ 0.007
10	21 $\pm$ 9.05	0.0427 $\pm$ 0.0411	0.080 $\pm$ 0.013
20	21 $\pm$ 5.04	0.0489 $\pm$ 0.0211	0.081 $\pm$ 0.007
30	19 $\pm$ 2.69	0.0404 $\pm$ 0.0131	0.077 $\pm$ 0.004
40	21 $\pm$ 1.65	0.0494 $\pm$ 0.0069	0.080 $\pm$ 0.002

ตารางที่ ๒- 2 จำนวนเซลล์ น้ำหนักแห้ง และค่าความชื้น ที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างขณะทำการทดลองที่เวลาต่างๆ โดยมีจำนวนเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ  $99 \times 10^4$  เซลล์/มล. มีน้ำหนักแห้งเริ่มต้น 0.19 กรัม/ลิตร และมีค่าความชื้นเริ่มต้น 0.197

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	จำนวนเซลล์ $\times 10^4$ เซลล์/มล.	น้ำหนักแห้ง (กรัม/ลิตร)	ค่าความชื้น ที่ 680 นาโนเมตร
ตำแหน่งบน			
0	101 $\pm$ 1.60	0.1912 $\pm$ 0.0014	0.200 $\pm$ 0.002
10	72 $\pm$ 1.32	0.1608 $\pm$ 0.0016	0.157 $\pm$ 0.002
20	52 $\pm$ 5.63	0.1301 $\pm$ 0.0102	0.126 $\pm$ 0.008
30	55 $\pm$ 3.21	0.1369 $\pm$ 0.0052	0.132 $\pm$ 0.004
40	51 $\pm$ 3.54	0.1292 $\pm$ 0.0064	0.125 $\pm$ 0.005
ตำแหน่งล่าง			
0	96 $\pm$ 2.64	0.1869 $\pm$ 0.0024	0.193 $\pm$ 0.003
10	55 $\pm$ 5.79	0.1358 $\pm$ 0.0093	0.131 $\pm$ 0.008
20	93 $\pm$ 7.68	0.1842 $\pm$ 0.0076	0.189 $\pm$ 0.011
30	99 $\pm$ 1.80	0.1892 $\pm$ 0.0016	0.196 $\pm$ 0.002
40	120 $\pm$ 11.03	0.2065 $\pm$ 0.0084	0.228 $\pm$ 0.016

ตารางที่ ๓- 3 จำนวนเซลล์ น้ำหนักแห้ง และค่าความชุ่มชื้น ที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างขณะทำการทดลองที่เวลาต่างๆ โดยมีจำนวนเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ  $178 \times 10^4$  เซลล์/มล. มีน้ำหนักแห้งเริ่มต้น 0.248 กรัม/ลิตร และมีค่าความชุ่มชื้นเริ่มต้น 0.316

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	จำนวนเซลล์ $\times 10^4$ เซลล์/มล.	น้ำหนักแห้ง (กรัม/ลิตร)	ค่าความชุ่มชื้น ที่ 680 นาโนเมตร
ตำแหน่งบน			
0	$174 \pm 1.04$	$0.2410 \pm 0.0005$	$0.310 \pm 0.001$
10	$126 \pm 23.71$	$0.2107 \pm 0.0178$	$0.238 \pm 0.035$
20	$86 \pm 5.48$	$0.1765 \pm 0.0058$	$0.177 \pm 0.008$
30	$72 \pm 0.76$	$0.1606 \pm 0.0009$	$0.156 \pm 0.001$
40	$51 \pm 6.42$	$0.1285 \pm 0.0111$	$0.125 \pm 0.009$
ตำแหน่งล่าง			
0	$183 \pm 6.06$	$0.2454 \pm 0.0029$	$0.323 \pm 0.009$
10	$153 \pm 8.22$	$0.2289 \pm 0.048$	$0.278 \pm 0.0123$
20	$206 \pm 2.84$	$0.2560 \pm 0.0012$	$0.357 \pm 0.0042$
30	$227 \pm 5.75$	$0.2650 \pm 0.0022$	$0.389 \pm 0.0086$
40	$256 \pm 20.18$	$0.2756 \pm 0.0070$	$0.433 \pm 0.0302$

ตารางที่ ๔- 4 จำนวนเซลล์ น้ำหนักแห้ง และค่าความชุ่ม ที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างขณะทำการทดลองที่เวลาต่างๆ โดยมีจำนวนเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ  $283 \times 10^4$  เซลล์/มล. มีน้ำหนักแห้งเริ่มต้น 0.3 กรัม/ลิตร และมีค่าความชุ่มเริ่มต้น 0.580

เวลา (นาทื)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	จำนวนเซลล์ $\times 10^4$ เซลล์/มล.	น้ำหนักแห้ง (กรัม/ลิตร)	ค่าความชุ่ม ที่ 680 นาโนเมตร
ตำแหน่งบน			
0	299	0.2899	0.499
10	188	0.2478	0.322
20	131	0.2147	0.246
30	149	0.2268	0.274
40	127	0.2123	0.241
ตำแหน่งล่าง			
0	267	0.2795	0.449
10	294	0.2882	0.489
20	200	0.2534	0.349
30	173	0.2400	0.308
40	180	0.2439	0.319

2. เก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. วิธีการตกตะกอนโดยศึกษาถึงผลของอุณหภูมิของน้ำเพาะเลี้ยงขณะทำการเก็บเกี่ยวที่ส่งผลต่อการตกตะกอน

**ตารางที่ ๕- 5** จำนวนเซลล์ น้ำหนักแห้ง และค่าความขุ่น ที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างขณะทำการทดลองที่เวลาต่างๆ โดยมีจำนวนเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ  $72 \times 10^4$  เซลล์/มล. มีน้ำหนักแห้งเริ่มต้น 0.3 กรัม/ลิตร และมีค่าความขุ่นเริ่มต้น 0.638 อุณหภูมิที่ทำการทดลองคือ  $2^\circ\text{C}$

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	จำนวนเซลล์ $\times 10^4$ เซลล์/มล.	น้ำหนักแห้ง (กรัม/ลิตร)	ค่าความขุ่น ที่ 680 นาโนเมตร
ตำแหน่งบน			
0	264	0.4818	0.628
10	159	0.4388	0.575
20	130	0.3682	0.488
30	90	0.3008	0.405
40	60	0.3577	0.475
ตำแหน่งล่าง			
0	269	0.4680	0.611
10	300	0.5809	0.750
20	348	0.4632	0.605
30	340	0.3690	0.489
40	350	0.3950	0.521



ตารางที่ ๖- 6 จำนวนเซลล์ น้ำหนักแห้ง และค่าความชื้น ที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างขณะทำการทดลองที่เวลาต่างๆ โดยมีจำนวนเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ  $272 \times 10^4$  เซลล์/มล. มีน้ำหนักแห้งเริ่มต้น 0.3 กรัม/ลิตร และมีค่าความชื้นเริ่มต้น 0.638 อุณหภูมิที่ทำการทดลองคือ  $9 \text{ }^\circ\text{C}$

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	จำนวนเซลล์ $\times 10^4$ เซลล์/มล.	น้ำหนักแห้ง (กรัม/ลิตร)	ค่าความชื้น ที่ 680 นาโนเมตร
ตำแหน่งบน			
0	$260 \pm 1.60$	$0.0611 \pm 0.0004$	$0.110 \pm 0.000$
10	$150 \pm 5.76$	$0.0492 \pm 0.0117$	$0.095 \pm 0.014$
20	$131 \pm 2.50$	$0.0365 \pm 0.0227$	$0.079 \pm 0.028$
30	$94 \pm 1.52$	$0.0373 \pm 0.0214$	$0.080 \pm 0.026$
40	$60 \pm 4.16$	$0.0422 \pm 0.0200$	$0.086 \pm 0.024$
ตำแหน่งล่าง			
0	$260 \pm 2.51$	$0.0738 \pm 0.0054$	$0.125 \pm 0.006$
10	$274 \pm 2.00$	$0.0711 \pm 0.0037$	$0.122 \pm 0.004$
20	$350 \pm 11.85$	$0.0636 \pm 0.0102$	$0.113 \pm 0.012$
30	$348 \pm 13.04$	$0.0614 \pm 0.0021$	$0.110 \pm 0.002$
40	$350 \pm 8.71$	$0.0657 \pm 0.0150$	$0.115 \pm 0.018$

ตารางที่ ๗- 7 จำนวนเซลล์ น้ำหนักแห้ง และค่าความชื้น ที่ตำแหน่งบนและตำแหน่งล่างขณะทำการทดลองที่เวลาต่างๆ โดยมีจำนวนเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ  $272 \times 10^4$  เซลล์/มล. มีน้ำหนักแห้งเริ่มต้น 0.3 กรัม/ลิตร และมีค่าความชื้นเริ่มต้น 0.638 อุณหภูมิที่ทำการทดลองคือ  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

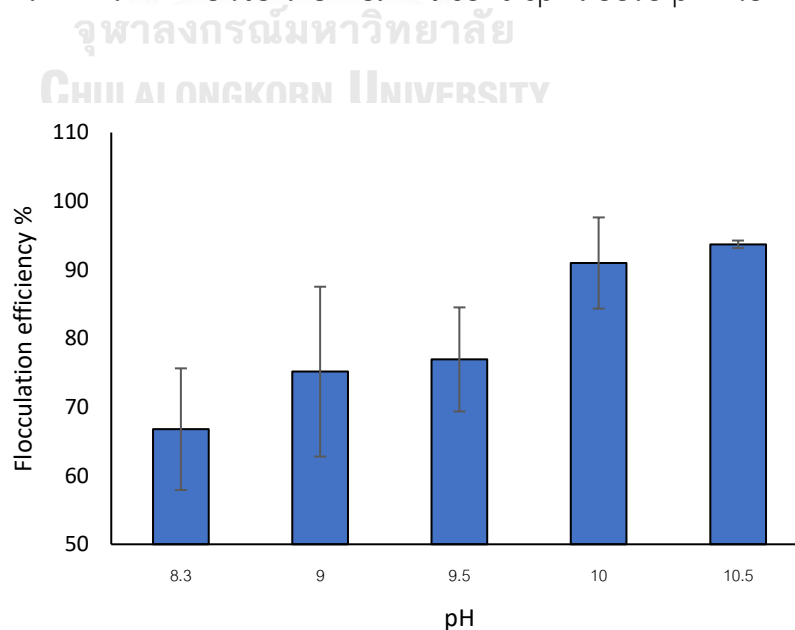
เวลา (นาที่)	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	จำนวนเซลล์ $\times 10^4$ เซลล์/มล.	น้ำหนักแห้ง (กรัม/ลิตร)	ค่าความชื้น ที่ 680 นาโนเมตร
ตำแหน่งบน			
0	257 $\pm$ 6.94	0.0614 $\pm$ 0.0065	0.110 $\pm$ 0.008
10	170 $\pm$ 1.80	0.0549 $\pm$ 0.0099	0.102 $\pm$ 0.012
20	145 $\pm$ 3.33	0.0446 $\pm$ 0.0012	0.089 $\pm$ 0.014
30	157 $\pm$ 2.25	0.0435 $\pm$ 0.0120	0.088 $\pm$ 0.014
40	124 $\pm$ 6.02	0.0430 $\pm$ 0.010	0.087 $\pm$ 0.012
ตำแหน่งล่าง			
0	254 $\pm$ 3.61	0.0763 $\pm$ 0.0072	0.128 $\pm$ 0.009
10	295 $\pm$ 7.05	0.0660 $\pm$ 0.0152	0.116 $\pm$ 0.019
20	242 $\pm$ 5.00	0.0503 $\pm$ 0.0223	0.096 $\pm$ 0.027
30	300 $\pm$ 2.75	0.0533 $\pm$ 0.0241	0.100 $\pm$ 0.029
40	349 $\pm$ 12.1	0.0541 $\pm$ 0.0170	0.101 $\pm$ 0.021

3. เก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. วิธีการตกตะกอนโดยศึกษาถึงผลของการปรับพีเอชของน้ำเพาะเลี้ยงด้วย NaOH ที่ส่งผลต่อการตกตะกอน

ตารางที่ 8- 8 จำนวนเซลล์ ค่าความขุ่น และปริมาณตะกอน ขณะทำการทดลองที่เวลา 30 นาที โดยมีจำนวนเซลล์เริ่มต้นเท่ากับ  $65 \times 10^4$  เซลล์/มล. มีน้ำหนักแห้งเริ่มต้น 0.34 กรัม/ลิตร และมีค่าความขุ่นเริ่มต้น 0.318 อุณหภูมิที่ทำการทดลองคือ 25 °C ปรับ pH ด้วย NaOH 1 M

พีเอช	ปริมาณตะกอน (มิลลิลิตร)	จำนวนเซลล์ $\times 10^4$ เซลล์ต่อ มิลลิลิตร	ค่าความขุ่น	ประสิทธิภาพการ เก็บเกี่ยว
8.3	$0.5 \pm 0.28$	$20 \pm 0.94$	$0.106 \pm 0.023$	$66.77 \pm 7.24$
9	$1 \pm 0.35$	$18 \pm 4.18$	$0.079 \pm 0.032$	$75.15 \pm 10.11$
9.5	$1.1 \pm 0.14$	$17 \pm 8.34$	$0.073 \pm 0.020$	$76.94 \pm 6.19$
10	$7.7 \pm 0.47$	$5 \pm 0.94$	$0.028 \pm 0.017$	$90.98 \pm 5.42$
10.5	$43 \pm 0.00$	$4 \pm 1.41$	$0.02 \pm 0.001$	$93.71 \pm 0.44$

ภาพที่ 8- 1 ประสิทธิภาพการตกตะกอนของไดอะตอม *Nitzschia* sp. เมื่อปรับ pH ด้วย NaOH 1M



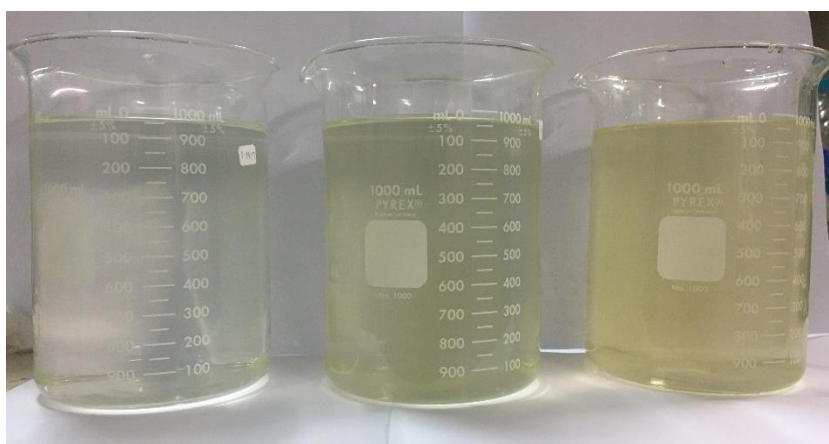
### ภาคผนวก ข

ผลการทดลองการเก็บเกี่ยวไดอะตอม *Nitzschia* sp. ด้วยวิธีการกรอง

1. เก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. ด้วยวิธีการกรองโดยศึกษาถึงผลของวัสดุกรองและขนาดของรูกรอง

ตารางที่ ข- 1 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดเพื่อหาประสิทธิภาพของผ้ากรองสแตนเลสที่ขนาดรูกรอง 15 30 และ 50 ไมโครเมตร

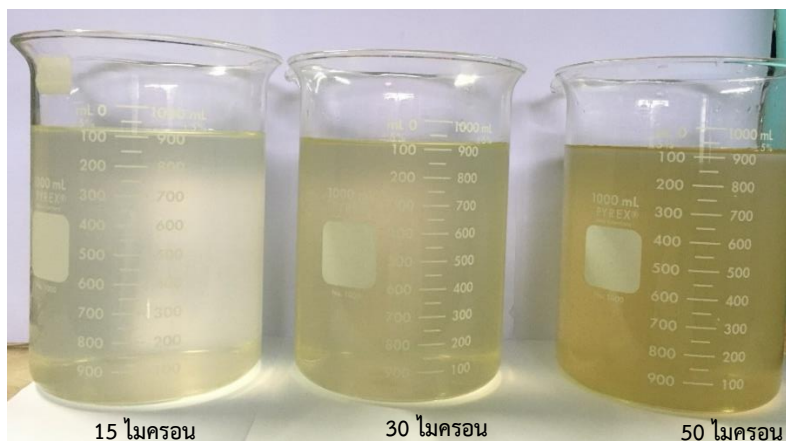
พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	<i>Nitzschia</i> sp.		
	ขนาดรูกรอง		
	15 ไมโครเมตร	30 ไมโครเมตร	50 ไมโครเมตร
ปริมาณชีวมวลที่ติดบนผ้ากรอง (กรัม/ลิตร)	0.29 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.27 ± 0.02
ปริมาณชีวมวลที่ปนในน้ำขาออก (กรัม/ลิตร)	0.04 ± 0.02	0.03 ± 0.00	0.04 ± 0.00
เวลา (นาที)	41.67 ± 0.58	36.67 ± 1.1	33.67 ± 1.1
ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)	316.52 ± 4.42	359.87 ± 11.13	391.99 ± 13.18
จำนวนเซลล์ขาออก ×10 <sup>4</sup> เซลล์/มิลลิลิตร	2 ± 0.57	6 ± 1.52	17 ± 1.52
ค่าความขุ่น	0.020 ± 0.00	0.030 ± 0.00	0.080 ± 0.00
ประสิทธิภาพการแยกชีวมวล (%)	91.67 ± 4.77	93.75 ± 5.41	85.52 ± 6.50



ภาพที่ ข- 1 น้ำหลังจากผ่านผ้ากรองสแตนเลสขนาด 15 30 และ 50 ไมครอน ตามลำดับ

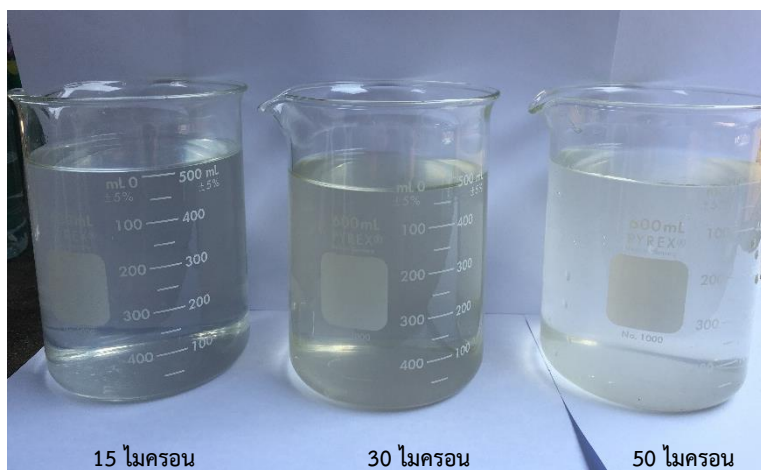
ตารางที่ ข- 2 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดเพื่อหาประสิทธิภาพของผ้ากรองโพลีเอสเตอร์ที่ขนาดรูกรอง 15 30 และ 50 ไมครอน

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	ขนาดรูกรอง		
	15 ไมครอน	30 ไมครอน	50 ไมครอน
ปริมาณชีวมวลที่ติดบนผ้ากรอง (กรัม/ลิตร)	0.22 $\pm$ 0.02	0.18 $\pm$ 0.04	0.15 $\pm$ 0.01
ปริมาณชีวมวลที่ปนในน้ำขาออก (กรัม/ลิตร)	0.07 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.02	0.07 $\pm$ 0.03
เวลา (นาที)	73.33 $\pm$ 13.5	54.67 $\pm$ 5.03	41.33 $\pm$ 2.31
ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)	184.0 $\pm$ 34.22	242.57 $\pm$ 22.02	319.68 $\pm$ 17.30
จำนวนเซลล์ขาออก $\times 10^4$ เซลล์/มิลลิลิตร	9 $\pm$ 8.71	12 $\pm$ 6.65	18 $\pm$ 2
ค่าความขุ่น	0.030 $\pm$ 0.03	0.030 $\pm$ 0.02	0.05 $\pm$ 0.01
ประสิทธิภาพการแยกชีวมวล (%)	72.22 $\pm$ 8.38	58.89 $\pm$ 13.07	48.89 $\pm$ 3.85



ภาพที่ ข- 2 น้ำหลังจากผ่านผ้ากรองโพลีเอสเตอร์ ขนาด 15 30 และ 50 ไมโครเมตร ตามลำดับ  
ตาราง ข-3 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดเพื่อหาประสิทธิภาพของผ้ากรองไนลอนที่ขนาดรูกรอง 15 30 และ 50 ไมโครเมตร

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	ขนาดรูกรอง		
	15 ไมโครเมตร	30 ไมโครเมตร	50 ไมโครเมตร
ปริมาณชีวมวลที่ติดบนผ้ากรอง (กรัม/ลิตร)	0.27 $\pm$ 0.04	0.24 $\pm$ 0.03	0.28 $\pm$ 0.00
ปริมาณชีวมวลที่ปนในน้ำขาออก (กรัม/ลิตร)	0.04 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.00
เวลา (นาที)	63.0 $\pm$ 11.35	44.0 $\pm$ 6.55	44.67 $\pm$ 6.11
ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)	214.46 $\pm$ 42.86	304.09 $\pm$ 44.28	299.14 $\pm$ 43.02
จำนวนเซลล์ขาออก $\times 10^4$ เซลล์/มิลลิลิตร	3 $\pm$ 2.08	20 $\pm$ 3.05	28 $\pm$ 3.78
ค่าความขุ่น	0.01 $\pm$ 0.00	0.050 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.04
ประสิทธิภาพการแยกชีวมวล (%)	86.02 $\pm$ 14.54	76.37 $\pm$ 10.36	89.25 $\pm$ 1.86



ภาพที่ ช-3 น้ำหลังจากผ่านผ้ากรองโพลีเอสเตอร์ ขนาด 15 30 และ 50 ไมโครเมตร ตามลำดับ



2. เก็บเกี่ยวชีวมวลไดอะตอม *Nitzschia* sp. ด้วยวิธีการกรองโดยศึกษาถึงรูปแบบการกรอง

2.1 การกรองแบบถุงกรองทรงกรวย

ตารางที่ ข-4 ปริมาณน้ำที่สามารถไหลผ่านผ้ากรองสแตนเลสขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร ทุกๆ 1 นาที และค่าฟลักซ์การกรองของผ้ากรองสแตนเลสขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตรด้วยรูปแบบการกรองแบบถุงกรองทรงกรวย โดยใช้ปริมาณน้ำเพาะเลี้ยงในการกรอง 2 ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำและฟลักซ์การกรอง		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ปริมาณน้ำ (มล.)	ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)
1	20	155.41	21	161.82
2	28	108.28	28	108.11
3	44	112.95	28	72.19
4	79	150.96	23	43.49
5	124	189.55	20	29.98
6	179	228.45	22	27.80
7	230	250.77	22	24.45
8	281	268.15	23	21.88
9	336	285.63	30	25.63
10	381	291.46	24	18.22
11	432	299.94	24	16.53
12	497	316.35	48	30.79
13	551	324.15	52	30.74
14	594	324.29	37	20.14
15	650	331.38	35	18.02
16	692	330.41	30	14.40
17	745	334.96	33	14.85
18	791	335.74	31	13.18



19	837	336.71	26	10.63
20	888	339.49	27	10.32
21	940	342.13	34	12.21
22	989	343.60	32	11.08
23	1036	344.39	34	11.21
24	1089	346.92	40	12.77
25	1140	348.54	41	12.55
26	1179	346.69	38	11.17
27	1225	346.87	41	11.59
28	1273	347.59	42	11.40
29	1318	347.29	44	11.59
30	1360	346.50	46	11.65
31	1407	346.91	51	12.47
32	1450	346.26	51	12.18
33	1498	346.96	54	12.48
34	1541	346.42	53	11.98
35	1584	345.84	60	13.07
36	1622	344.37	60	12.69
37	1652	341.26	49	10.21
38	1687	339.26	41	8.23
39	1717	336.44	28	5.52
40	1741	332.61	16	3.00

## 2.2 การกรองแบบลาดเอียง

**ตารางที่ ข-5** ปริมาณน้ำที่สามารถไหลผ่านผ้ากรองสแตนเลสขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร ทุกๆ 5 นาที และค่าฟลักซ์การกรองของผ้ากรองสแตนเลสขนาดรูกรอง 30 ไมโครเมตร ด้วยรูปแบบการกรองแบบลาดเอียง ที่มุมทดสอบ 0 องศา โดยใช้ปริมาณน้ำเพาะเลี้ยงในการกรอง 1 ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำและฟลักซ์การกรอง		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ปริมาณน้ำ (มล.)	ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)
5	46.5	19.93	1.5	0.64
10	94	20.14	4	0.86
15	144	20.57	1	0.14
20	184	19.71	5	0.54
25	209.5	17.96	9.5	0.81
30	209.5	14.96	9.5	0.68
35	209.5	12.83	9.5	0.58

ตารางที่ ข-6 ปริมาณน้ำที่สามารถไหลผ่านผ้ากรองสแตนเลสขนาดรูกรอง 30 ไมครอน  
 ทุกๆ 5 นาที และค่าฟลักซ์การกรองของผ้ากรองสแตนเลสขนาดรูกรอง 30 ไมครอนด้วย  
 รูปแบบการกรองแบบลาดเอียง ที่มุมทดสอบ 15 องศา โดยใช้ปริมาณน้ำเพาะเลี้ยงในการ  
 กรอง 1 ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำและฟลักซ์การกรอง		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ปริมาณน้ำ (มล.)	ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)
5	65	27.86	5	2.14
10	130	27.86	10	2.14
15	204	29.14	5	0.71
20	292.5	31.34	2.5	0.27
25	363.5	31.16	13.5	1.16
30	363.5	25.96	13.5	0.96
35	363.5	22.26	13.5	0.83

ตารางที่ ข-7 ปริมาณน้ำที่สามารถไหลผ่านผ้ากรองสแตนเลสขนาดรูกรอง 30 ไมครอน  
 ทุกๆ 5 นาที และค่าฟลักซ์การกรองของผ้ากรองสแตนเลสขนาดรูกรอง 30 ไมครอนด้วย  
 รูปแบบการกรองแบบลาดเอียง ที่มุมทดสอบ 30 องศา โดยใช้ปริมาณน้ำเพาะเลี้ยงในการ  
 กรอง 1 ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำและฟลักซ์การกรอง		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ปริมาณน้ำ (มล.)	ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)
5	21.5	9.21	1.5	0.64
10	44	9.43	1	0.21
15	62.5	8.93	0.5	0.07
20	85	9.11	1	0.11
25	93	7.97	3	0.26
30	103	7.36	3	0.21
35	114.5	7.01	0.5	0.03

ตารางที่ ข-8 ปริมาณน้ำที่สามารถไหลผ่านผ้ากรองสแตนเลสขนาดรูกรอง 30 ไมครอน ทุกๆ 5 นาที และค่าฟลักซ์การกรองของผ้ากรองสแตนเลสขนาดรูกรอง 30 ไมครอนด้วย รูปแบบการกรองแบบลาดเอียง ที่มุมทดสอบ 45 องศา โดยใช้ปริมาณน้ำเพาะเลี้ยงในการ กรอง 1 ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำและฟลักซ์การกรอง		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ปริมาณน้ำ (มล.)	ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)
5	0	0	0	0
10	3.5	0.75	1.5	0.32
15	11	1.57	1	0.14
20	16	1.71	1	0.11
25	35	3	1	0.09
30	48.5	3.46	0.5	0.04
35	49.5	3.03	0.5	0.03

ตารางที่ ข-9 ปริมาณน้ำที่สามารถไหลผ่านผ้ากรองสแตนเลสขนาดรูกรอง 30 ไมครอน ทุกๆ 5 นาที และค่าฟลักซ์การกรองของผ้ากรองสแตนเลสขนาดรูกรอง 30 ไมครอนด้วย รูปแบบการกรองแบบลาดเอียง ที่มุมทดสอบ 60 องศา โดยใช้ปริมาณน้ำเพาะเลี้ยงในการ กรอง 1 ลิตร

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำและฟลักซ์การกรอง		ค่าความคลาดเคลื่อน (S.D)	
	ปริมาณน้ำ (มล.)	ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ฟลักซ์การกรอง (ล/ตร.ม-ชม.)
5	5	2.14	5	2.14
10	10	2.14	0	0.00
15	17.5	2.50	2.5	0.36
20	31	3.32	1	0.11
25	39	3.34	6	0.51
30	40	2.86	5	0.36
35	40	2.45	5	0.31

## บรรณานุกรม

- [1] S. M. Kim, Y. J. Jung, O. N. Kwon *et al.*, “A potential commercial source of fucoxanthin extracted from the microalga *Phaeodactylum tricornutum*,” *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 166, no. 7, pp. 1843-55, Apr, 2012.
- [2] J. Peng, J. P. Yuan, C. F. Wu *et al.*, “Fucoxanthin, a marine carotenoid present in brown seaweeds and diatoms: metabolism and bioactivities relevant to human health,” *Mar Drugs*, vol. 9, no. 10, pp. 1806-28, 2011.
- [3] S. Hemaiswarya, R. Raja, R. Ravi Kumar *et al.*, “Microalgae: a sustainable feed source for aquaculture,” *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 27, no. 8, pp. 1737-1746, 2010.
- [4] “<Commercial-scale preparation of biofunctional fucoxanthin from waste parts of Brown Sea algae *Laminaria japonica*. Food Sci. Technol.pdf>.”
- [5] R. Yang, D. Wei, and J. Xie, “Diatoms as cell factories for high-value products: chrysolaminarin, eicosapentaenoic acid, and fucoxanthin,” *Crit Rev Biotechnol*, vol. 40, no. 7, pp. 993-1009, Nov, 2020.
- [6] B. Gao, A. Chen, W. Zhang *et al.*, “Co-production of lipids, eicosapentaenoic acid, fucoxanthin, and chrysolaminarin by *Phaeodactylum tricornutum* cultured in a flat-plate photobioreactor under varying nitrogen conditions,” *Journal of Ocean University of China*, vol. 16, no. 5, pp. 916-924, 2017.
- [7] S. Xia, B. Gao, J. Fu *et al.*, “Production of fucoxanthin, chrysolaminarin, and eicosapentaenoic acid by *Odontella aurita* under different nitrogen supply regimes,” *J Biosci Bioeng*, vol. 126, no. 6, pp. 723-729, Dec, 2018.
- [8] M.Tawatchai, “Cultivation of diatom *Bacillaria paxillifer* for fucoxanthin pigment production using silica extracted from fly ash.,” Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Chemical Engineering, Faculty of Engineering, 2017.
- [9] T. Thobumrung, “Cultivation of diatom *Nitzschia sp.* for fucoxanthin production in flat-panel airlift photobioreactors,” Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Chemical Engineering, Faculty of

- Engineering, 2018.
- [10] T. Ndikubwimana, X. Zeng, N. He *et al.*, “Microalgae biomass harvesting by bioflocculation-interpretation by classical DLVO theory,” *Biochemical Engineering Journal*, vol. 101, pp. 160-167, 2015.
- [11] S. Garg, L. Wang, and P. M. Schenk, “Flotation separation of marine microalgae from aqueous medium,” *Separation and Purification Technology*, vol. 156, pp. 636-641, 2015.
- [12] ล. วงศ์รัตน์, แพลงก์ตอนพืช(*Phytoplankton*), p.^pp. 851, ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ, 2542.
- [13] R. G. Mery Rambu Djoru, and Suwari, “Phytoplankton (microalgae) as an alternative of renewable energy sources,” vol. 823, 2020.
- [14] A. Jiang, H. Ji, H. Liu *et al.*, “Culture of benthic diatom *Nitzschia* sp. with macroalgae carriers and its application as feed of juveniles *Stichopus japonicus*,” *Helgoland Marine Research*, vol. 74, no. 1, 2020.
- [15] X. Mao, S. H. Y. Chen, X. Lu *et al.*, “High silicate concentration facilitates fucoxanthin and eicosapentaenoic acid (EPA) production under heterotrophic condition in the marine diatom *Nitzschia laevis*,” *Algal Research*, vol. 52, 2020.
- [16] S. M. Kim, S.-W. Kang, O. N. Kwon *et al.*, “Fucoxanthin as a major carotenoid in *Isochrysis aff. galbana*: Characterization of extraction for commercial application,” *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, vol. 55, no. 4, pp. 477-483, 2012.
- [17] S. Xia, K. Wang, L. Wan *et al.*, “Production, characterization, and antioxidant activity of fucoxanthin from the marine diatom *Odontella aurita*,” *Mar Drugs*, vol. 11, no. 7, pp. 2667-81, Jul 23, 2013.
- [18] M. Petrushkina, E. Gusev, B. Sorokin *et al.*, “Fucoxanthin production by heterokont microalgae,” *Algal Research*, vol. 24, pp. 387-393, 2017.
- [19] L. J. Martin, “Fucoxanthin and Its Metabolite Fucoxanthinol in Cancer Prevention and Treatment,” *Mar Drugs*, vol. 13, no. 8, pp. 4784-98, Jul 31, 2015.
- [20] ริกกริมส์, "สุดยอดผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร Fucoxanthin แบรินด์ยอดนิยม 10 บทความสำหรับปี 2020," 2019, pp. <https://th.top10supps.com/best-fucoxanthin-supplements/>.
- [21] M. S. Sahin, M. I. Khazi, Z. Demirel *et al.*, “Variation in growth, fucoxanthin, fatty



- acids profile and lipid content of marine diatoms *Nitzschia* sp. and *Nanofrustulum shiloi* in response to nitrogen and iron,” *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 17, pp. 390-398, 2019.
- [22] A. Waghmare, K. Nagula, A. Pandit *et al.*, “Hydrodynamic cavitation for energy efficient and scalable process of microalgae cell disruption,” *Algal Research*, vol. 40, 2019.
- [23] J. J. Mayers, A. R. Landels, M. J. Allen *et al.*, “An energy and resource efficient alkaline flocculation and sedimentation process for harvesting of *Chromochloris zofingiensis* biomass,” *Bioresource Technology Reports*, vol. 9, 2020.
- [24] B. Cheirsilp, S. Srinuanpan, and Y. I. Mandik, "Efficient Harvesting of Microalgal biomass and Direct Conversion of Microalgal Lipids into Biodiesel," *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*, pp. 83-96, 2020.
- [25] ร. ช. อาริจิตรานุสรณ์, “บทที่ 5 เครื่องหมุนเหวียง,” *เครื่องมือวิทยาศาสตร์*, pp. 109-136.
- [26] M. Hapóńska, E. Clavero, J. Salvadó *et al.*, “Pilot scale dewatering of *Chlorella sorokiniana* and *Dunaliella tertiolecta* by sedimentation followed by dynamic filtration,” *Algal Research*, vol. 33, pp. 118-124, 2018.
- [27] S. Srinuanpan, B. Cheirsilp, P. Prasertsan *et al.*, “Strategies to increase the potential use of oleaginous microalgae as biodiesel feedstocks: Nutrient starvations and cost-effective harvesting process,” *Renewable Energy*, vol. 122, pp. 507-516, 2018.
- [28] Z. Wu, Y. Zhu, W. Huang *et al.*, “Evaluation of flocculation induced by pH increase for harvesting microalgae and reuse of flocculated medium,” *Bioresour Technol*, vol. 110, pp. 496-502, Apr, 2012.
- [29] ป. ไกวัลสีปลื้ม, “โคแอกกูแลนต์และโคแอกกูแลนต์เอตจากแป้งเมล็ดขนุน,” *คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 2545.
- [30] ม. ตันจุลเวศม์, *วิศวกรรมประปา*, กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [31] S. Tivananthakorn, “Suspended solid filtration for recirculating aquaculture system using inclined screen filter,” *Environmental Engineering, Chulalongkorn university*, 2013.
- [32] พ. เพ็ชรมนกุล, “การเติมอากาศและการกรองสำหรับการพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในประเทศ,”

วารสารช่างพูด คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, pp. 14-15, 2555.

- [33] H. Wang, J. Fang, T. Cheng *et al.*, "One-step coating of fluoro-containing silica nanoparticles for universal generation of surface superhydrophobicity," *Chem Commun (Camb)*, no. 7, pp. 877-9, Feb 21, 2008.
- [34] D. Enterprises. "Critical Surface Tension and Contact Angle with Water for Various Polymers,"  
[https://www.accudynetest.com/polytable\\_03.html?sortby=contact\\_angle](https://www.accudynetest.com/polytable_03.html?sortby=contact_angle).
- [35] b. f. a. seperation, "ผ้ากรองตาข่าย (Mesh,Screen)."
- [36] N. J. d. A. Patrícia Campos Bernardes, Sukarno Olavo Ferreira, João Paulo Natalino de Sá, Emiliane, and D. M. Z. D. Andrade Araújo, Livia Maria Pinheiro Luiz, "Assessment of hydrophobicity and roughness of stainless steel adhered by an isolate of *Bacillus cereus* from a dairy plant," *Microbiology*, vol. 984-992, 2010.
- [37] L. SPC RT CO. "มุมสัมผัส และ แรงตึงผิวในอุตสาหกรรม," <http://spc-rt.com/index.php/knowledge/249-contact-angle-and-surface-tension-in-industry>.
- [38] A. R. Alharbi<sup>1</sup>, I. M. A. , W. S. K. *et al.*, "Highly Hydrophilic Electrospun Polyacrylonitrile/ Polyvinylpyrrolidone Nanofibers Incorporated with Gentamicin as Filter Medium for Dam Water and Wastewater Treatment," *Journal of Membrane and Separation Technology*, pp. 38-56 2016.
- [39] S. Gultom, and B. Hu, "Review of Microalgae Harvesting via Co-Pelletization with Filamentous Fungus," *Energies*, vol. 6, no. 11, pp. 5921-5939, 2013.
- [40] J. S. García-Pérez, A. Beuckels, D. Vandamme *et al.*, "Influence of magnesium concentration, biomass concentration and pH on flocculation of *Chlorella vulgaris*," *Algal Research*, vol. 3, pp. 24-29, 2014.
- [41] D. Vandamme, A. Beuckels, G. Markou *et al.*, "Reversible Flocculation of Microalgae using Magnesium Hydroxide," *BioEnergy Research*, vol. 8, no. 2, pp. 716-725, 2014.
- [42] M. R. Bilad, V. Discart, D. Vandamme *et al.*, "Harvesting microalgal biomass using a magnetically induced membrane vibration (MMV) system: filtration performance and energy consumption," *Bioresour Technol*, vol. 138, pp. 329-38, Jun, 2013.

- [43] S. D. Rios, J. Salvado, X. Farriol *et al.*, “Antifouling microfiltration strategies to harvest microalgae for biofuel,” *Bioresour Technol*, vol. 119, pp. 406-18, Sep, 2012.
- [44] R. R. Guillard, "Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates," *Culture of marine invertebrate animals*, pp. 29-60: Springer, 1975.
- [45] K. A. Miklasz, and M. W. Denny, “Diatom sinkings speeds: Improved predictions and insight from a modified Stokes' law,” *Limnology and Oceanography*, vol. 55, no. 6, pp. 2513-2525, 2010.
- [46] ส. สมรไกรสรกริจ, คู่มือการควบคุมถังตกตะกอน *Lamellae Clarifier* ประเภท *Vacuum Type*.
- [47] T. Kjørboe, J. L. S. Hansen, A. L. Alldredge *et al.*, “Sedimentation of phytoplankton during a diatom bloom: Rates and mechanisms,” *Journal of Marine Research*, vol. 54, no. 6, pp. 1123-1148, 1996.
- [48] P. Mpofo, J. Addai-Mensah, and J. Ralston, “Temperature influence of nonionic polyethylene oxide and anionic polyacrylamide on flocculation and dewatering behavior of kaolinite dispersions,” *J Colloid Interface Sci*, vol. 271, no. 1, pp. 145-56, Mar 1, 2004.
- [49] D. P. Santiago Ramos, L. A. Coogan, J. G. Murphy *et al.*, “Low-temperature oceanic crust alteration and the isotopic budgets of potassium and magnesium in seawater,” *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 541, 2020.
- [50] M. Nadella, R. Sharma, and S. Chellam, “Fit-for-purpose treatment of produced water with iron and polymeric coagulant for reuse in hydraulic fracturing: Temperature effects on aggregation and high-rate sedimentation,” *Water Res*, vol. 170, pp. 115330, Mar 1, 2020.
- [51] ก. อ่าหนองโพธิ์, “การพัฒนาหน่วยแยกตะกอนแนวตั้งแบบใช้อากาศช่วยผสมสำหรับระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ,” วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย, วิศวกรรมศาสตร์, 2559.
- [52] N. J. d. A. Patrícia Campos Bernardes<sup>1</sup>, Sukarno Olavo Ferreira<sup>2</sup>, João Paulo Natalino de Sá<sup>1</sup>, Emiliane, and D. M. Z. D. Andrade Araújo<sup>1</sup>, Livia Maria Pinheiro Luiz<sup>1</sup>, “Assessment of hydrophobicity and roughness of stainless steel adhered by an isolate of *Bacillus cereus* from a dairy plant,” *Brazilian Journal of Microbiology*, pp. 984-992, 2010.
- [53] ป. ชูติวิศุทธิ์, “ประสิทธิภาพของระบบกรองแบบแบ่งส่วนในการแยกจุลสารร้ายและอนุภาคสารแขวนลอย

เพื่อควบคุมคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ,” ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, วิศวกรรมศาสตร์, 2552.

- [54] J. M. Ebeling, C. F. Welsh, and K. L. Rishel, “Performance evaluation of an inclined belt filter using coagulation/flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from microscreen backwash effluent,” *Aquacultural Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 61-77, 2006.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐฐาทิพย์ ศรีพรหม
วัน เดือน ปี เกิด	20 พฤศจิกายน 2539
สถานที่เกิด	นครปฐม
วุฒิการศึกษา	จบการศึกษาระดับมัธยมที่โรงเรียน พระปฐมวิทยาลัย จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม จากมหาวิทยาลัยศิลปากร ปี การศึกษา 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	30 หมู่ 11 ต.สระกะเทียม อ.เมือง จ.นครปฐม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY