การแยกสาหร่ายจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย กระบวนการโคแอกกูเลชัน และการกรอง

นางสาวอรภา ปรีชาวาท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

SEPARATION OF ALGAE FROM LIQUID PHASE BY COMBINATION OF DISSLOVED AIR FLOTATION, COAGULATION AND FILTRATION PROCESSES

Miss Orapa Prechawat

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกสาหร่ายจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย กระบวนการโคแอกกูเลชัน และการกรอง
โดย	นางสาวอรภา ปรีชาวาท
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเธียร)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. มรุพัชร จำนงค์วงศ์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อรภา ปรีชาวาท : การแยกสาหร่ายจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย กระบวนการโคแอกกูเลชัน และการกรอง. (SEPARATION OF ALGAE FROM LIQUID PHASE BY COMBINATION OF DISSLOVED AIR FLOTATION, 170 หน้า.

ปัจจุบันสาหร่ายเซลล์เดียวนับเป็นมลภาวะทางน้ำชนิดหนึ่ง เนื่องจากทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันส่งผลให้แหล่งน้ำเกิดสี กลิ่น และรสอันไม่พึงประสงค์ นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคสาหร่ายเซลล์เดียวนำมาพัฒนาเป็นพลังงานทางเลือกที่ใช้พื้นที่ในการเพาะปลูกน้อยกว่าพืชชนิดอื่นๆ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายออกจากเฟสของเหลวด้วยการตกตะกอนตามธรรมชาติ กระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (MDAF) และกระบวนการไฮบริด (MDAF ร่วมกับการกรอง) โดยใช้สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาช่วงการเจริญเติบโตแบบเต็มที่ (Log phase) ในการเตรียมน้ำสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อทำการแยกอนุภาคในถังปฏิกิริยากว้าง 0.25 เมตร ยาว 1.15 เมตร และสูง 1.6 เมตร โดยเลือกใช้สารส้มและสารแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนท์ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการตกตะกอน กระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (MDAF) และกระบวนการไฮบริด (MDAF ร่วมกับการกรอง) มีประสิทธิภาพการแยก คือ 9% 72.4% และ 94.8% ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการไฮบริด คือ 89.1% พบว่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสของเหลวขึ้นกับลักษณะของอนุภาค เช่น ขนาด และค่าซีต้าโพแทนเชียว นอกจากนี้งานวิจัยคาดว่าในอนาคตการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์สำหรับกักเก็บอนุภาคสาหร่ายออกจากถังปฏิกิริยาจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคสูงขึ้นได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

ปีการศึกษา 2556

5570454621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS: DISSOLVED AIR FLOTATION PROCESS / COAGULATION PROCESS / FILTRATION PROCESS / ALGAE

ORAPA PRECHAWAT: SEPARATION OF ALGAE FROM LIQUID PHASE BY COMBINATION OF DISSLOVED AIR FLOTATION, COAGULATION AND FILTRATION PROCESSES. ADVISOR: ASSOC. PROF. PISUT PAINMANAKUL, 170 pp.

Algae bloom is one of important water pollution (i.e. taste, odor, and turbidity). Algae were among contaminants that cause problems in water treatment process due to their small size and suspension. In addition, the algae are chosen as an alternative energy crop that uses less space than other crops. The objective of this work is to study the separation mechanism of algae using sedimentation process, modified dissolved air flotation (MDAF) process which is the combined process between the coagulation and dissolved air flotation processes and hybrid process (MDAF+Filtration). The algae (Chlorella sp.) in log phases were used for preparing the synthesis wastewater. A flotation tank with 0.25 m width, 1.15 m length and 1.6 m height was applied in the separation process. Aluminium sulfate (alum) and calcium chloride were used as a coagulant. The results showed that, the treatment efficiencies (%Eff) were greater than those obtained with algae separation. The %Eff values related with decantation, MDAF and hybrid processes were 9%, 72.4% and 94.8%, respectively. The hybrid process can accumulate the algae from water 89.1%. In addition, size and zeta potential of particles as well as the suspension capacity in liquid phase should be considered as important parameters affecting the overall treatment efficiency. In the future, studying the skimmer for accumulation algae scum will be higher accumulation efficiency.

Chulalongkorn University

Department:	Environmental Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Environmental Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2013		

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้โอกาส คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล และดร.มรุพัชร จำนงค์วงศ์ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำ ติชม แก้ไขให้งานวิจัยนี้เป็นไปในแนวทางที่ดี

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม และคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชา

ขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม ทุกๆท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณนายพชร โพธิ์ทอง นางสาวภัทรศิริ ฟักแก้ว นางสาวรัชนัน ชำนาญหมอ นายณัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา นายธนากร อื้อมุกดากุล นางสาววิรินทร์ กิตติธรรมวงศ์ และนายปิยพันธ์ ประพันธ์วัฒนะ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคำแนะนำในทุกๆด้านมาโดยตลอด

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนอุดหนุนจากภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่สนับสนุนและให้โอกาสในการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 สาหร่าย 4

2.2 กระบวนการบำบัดและแยกสาหร่าย 11

2.3 กระบวนการโคแอกกูเลชัน 12

2.3.1 การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ (Destabilization) 13

2.3.2 การกระทบหรือสัมผัสกันของคอลลอยด์ (Transport of colloidal Particles) 15

2.4 กระบวนการทำให้ลอย (J. K. Edzwald, 2010) 24

2.4.1 กระบวนการทำให้ลอยแบ่งตามลักษณะการสร้างฟองแก๊ส 24

2.4.2 กลไกการทำให้ลอย 24

2.4.3 โมเดลทางคณิตศาสตร์การชนกันระกว่างอนุภาคและฟองอากาศในส่วนสัมผัส 29

2.5 กระบวนการกรอง 34

2.5.1 ลักษณะการกรองน้ำ 34

2.5.2 กลไกการกรองน้ำ 35

2.5.3 การออกแบบและการคำนวณระบบกรองน้ำ 37

2.6 กระบวนการรวม (Hybrid Process) 45

2.7 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง 46

หน้า

2.8 ประเภทของถังปฏิกิริยา 48
2.9 วิจัยที่เกี่ยวข้อง 51
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย 61
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี........ 61
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ 61
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 64
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย 65
3.2.1 การเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่ายและการศึกษาการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนทางธรรมชาติ 67
3.2.2 การศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนวิธีการจาร์เทส 69
3.2.3 การออกแบบอุปกรณ์แยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการไฮบริด........ 72
3.2.4 การศึกษาการแยกสาหร่ายออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการ MDAF........ 77
3.2.5 การศึกษาการแยกสาหร่ายออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการไฮบริด........ 82
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์........ 87
4.1 การศึกษาลักษณะสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*)........ 87
4.2 การศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนวิธีการจาร์เทส 93
4.3 ผลการออกแบบอุปกรณ์แยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการไฮบริด 108
4.4 ผลการศึกษาการแยกสาหร่ายออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการ MDAF 123
4.5 ผลการศึกษาการแยกสาหร่ายออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการไฮบริด 133
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 145
5.1 สรุปผลการวิจัย........ 145
5.2 ข้อเสนอแนะ........ 148
รายการอ้างอิง 149
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 170

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 ลักษณะ ขนาด และพื้นที่ผิวของเซลล์สาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ และปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่ต้องการใช้ 7

2-2 แสดงขนาด รูปร่าง ความหนาแน่น และค่าซีต้าโพเทนเชียลของเซลล์สาหร่าย 8

2-3 แสดงขนาด รูปร่าง ความหนาแน่น และค่าซีต้าโพเทนเชียลของเซลล์สาหร่าย (ต่อ) 9

2-4 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันกับการตกตะกอน 20

2-5 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันกับการตกตะกอน (ต่อ) 21

2-6 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันกับการตกตะกอน (ต่อ) 22

2-7 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันกับการตกตะกอน (ต่อ) 23

2-8 ประสิทธิภาพการกำกัดสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย 32

2-9 ประสิทธิภาพการกำกัดสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย(ต่อ) 33

2-10 คุณสมบัติทั่วไปของสารกรองชนิดทรายซิลิกา ถ่านแอนทราไซท์ GAC การ์เนทและอิลเมนไนท์ 38

2-11 ประสิทธิภาพการกำกัดสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการกรอง 44

2-12 ลักษณะสารอินทรีย์ในเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ Microcystis aeruginosa Chlorella vulgaris Asterionellaformosa และ Melosira sp 51

2-13 ลักษณะเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ Microcystis aeruginosa Chlorella vulgaris Asterionellaformosa และ Melosira sp 52

2-14 ค่าพารามิเตอร์ EOM และ IOM ของสาหร่ายสายพันธุ์ M.aeruginosa 55

2-15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus quadricauda* ด้วยกระบวนการทำให้ลอยร่วมกับการเติมสารโซเดียมไบคาร์บอเนต 58

3-1 ลักษณะของอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา 64

3-2 สูตรอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาสูตร N8 64

3-3 ตัวแปรการศึกษาการทำจาร์เทส 69

3-4 ตัวแปรศึกษาการเดินระบบผ่านอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้นท่อ และกวนช้าแบบใบพัด 71

3-5 การออกแบบระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับโคแอกกูเลชันและการกรอง 73

3-6 ตัวแปรศึกษาลักษณะของถังปฏิกิริยา 74

ตารางที่ หน้า

3-7 คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 75
3-8 ปริมาณอากาศละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ณ ความดันอากาศต่างๆ 76
3-9 ตัวแปรศึกษาขนาดของฟองอากาศที่ความดันอัดอากาศต่างๆ 76
3-10 ตัวแปรศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย 78
3-11 ตัวแปรศึกษาสัดส่วนแบบจำลองการกระจายตัว 80
3-12 ตัวแปรศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นต่างๆ 82
3-13 ตัวแปรศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองที่ความหนาต่างๆ 83
3-14 ตัวแปรศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองที่ความเข้มข้นสาหร่ายต่างๆ 83
4-1 ลักษณะทางกายภาพของสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา 87
4-2 ปริมาณด่างและตะกอนสารส้ม 95
4-3 ค่า Gxt ที่อัตราการไหล 3 ลิตร/นาที ในแต่ละ element 108
4-4 ค่า Gxt ที่อัตราการไหล 10 ลิตร/นาทีในแต่ละ element 109
4-5 เกณฑ์การออกแบบถังปฏิกิริยาร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาสละลายและการกรอง 111
4-6 ปัจจัยการออกแบบการทดลอง 3 ปัจจัยที่ 5 ระดับ 116
4-7 การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design 117
4-8 เวลากักเก็บน้ำในถังปฏิกิริยาที่ตำแหน่งท่อน้ำทิ้งตะกอน และท่อน้ำใส 119
4-9 เวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยาจนถึงบริเวณท่อทิ้งน้ำตะกอน และท่อทิ้งน้ำใส 121
4-10 การกวนผสมในถังปฏิกิริยาที่ตำแหน่งท่อน้ำทิ้งตะกอน และท่อน้ำใส 122
4-11 สัดส่วนรูปแบบการกระจายตัวภายในถังปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งท่อทิ้งน้ำตะกอนและท่อทิ้งน้ำใส 129
4-12 การกระจายตัวของอนุภาคทรายกรอง 133
4-13 รายการค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์ 143
4-14 รายการอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินระบบการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำ 143
4-15 รายการค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ระดับความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้นต่างๆ 143
4-16 รายการค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีที่ระดับความเข้มข้นสาหร่ายต่างๆ 144
4-17 รายการค่าใช้จ่ายรวมด้านพลังงาน และด้านสารเคมี 144

5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายเริ่มต้นกับกระบวนการโคแอกกูเลชันที่เหมาะสม 145
5-2 ประสิทธิภาพการแยกและการรวบรวมอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการต่างๆ 146
5-3 เกณฑ์การออกแบบถังปฏิกิริยาร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายและการกรอง 147

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2-1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสายพันธุ์ไซยาโนแบคทีเรีย ไดอะตอม และสาหร่ายสีเขียว ด้วยการตกตะกอนโดยสารโคแอกกูแลนท์ที่ต่างกัน 12

2-2 ปริมาณสารส้มและค่าพีเฮชที่สัมพันธ์กับกลไกที่เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน 14

2-3 องค์ประกอบถังทำให้ลอยประกอบด้วย ส่วนสัมผัส และส่วนแยก 25

2-4 ส่วนสัมผัสและส่วนแยกในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย 25

2-5 การแยกตัวของอนุภาคแขวนลอยที่เกาะติดกับฟองอากาศและฟองอากาศอิสระออกจากเฟสน้ำ 28

2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับกระบวนการแยก 34

2-7 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง 36

2-8 อัตราการล้างย้อนที่ทำให้ชั้นถ่านขยายตัวที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ 41

2-9 กระบวนการไฮบริดจ์สำหรับแยกสาหร่ายออกจากเฟสน้ำ 46

2-10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายการกรอง และการตกตะกอน 53

2-11 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลของ IOM และ EOM 55

2-12 ข้อมูลเลือกกระบวนการกำจัดอนุภาคขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบ 56

2-13 การเปรียบเทียบค่าซีต้าโพแทนเชียลของสาหร่ายที่ค่า pH ต่างๆ 57

2-14 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโดยการเติม CTAB ที่ความเข้มข้นต่างๆในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย 57

2-15 กระบวนการการทั่วไปสำหรับแยก และทำให้เซลล์สาหร่ายแห้งเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง 60

3-1 อุปกรณ์ร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และการกรอง 61

3-2 ถังแยกอนุภาคสาหร่ายแบบรวม 62

3-3 อุปกรณ์นับจำนวนเซลล์สาหร่าย Hemocytometer counting chamber 63

3-4 ขั้นตอนการเตรียมน้ำสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่าย 67

3-5 การศึกษาการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนทางธรรมชาติ 68

3-6 การศึกษาการทำลายเสถียรภาพบนผิวของอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทส 70

3-7 ขั้นตอนการเดินระบบผ่านอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้น และกวนช้าแบบใบพัด 72

ภาพที่ หน้า

3-8 การออกแบบอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้นท่อ 72
3-9 การศึกษาลักษณะของถังปฏิกิริยา 74
3-10 การศึกษาขนาดของฟองอากาศ 77
3-11 การศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย 78
3-12 การศึกษาสัดส่วนแบบจำลองการกระจายตัว (Dispersion model) 80
3-13 การศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นต่างๆ 82
3-14 การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองที่ความหนาต่างๆ 84
3-15 การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองที่ความเข้มข้นสาหร่ายต่างๆ 85
3-16 การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการต่างๆ 86
4-1 รูปร่างของสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา 88
4-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา 88
4-3 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) 89
4-4 ลักษณะน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่อายุประมาณ 1-5 วัน 90
4-5 ลักษณะน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่อายุประมาณ 6-15 วัน 90
4-6 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์สาหร่ายที่อายุประมาณ 15-20 วัน 90
4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราน้ำล้นผิว และประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา 92
4-8 คอลัมน์ตรวจสอบการตกตะกอนแบบโดดของอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา 93
4-9 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำด้วยวิธีจาร์เทส ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆโดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ 94
4-10 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำด้วยวิธีจาร์เทส ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆโดยใช้สารแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนท์ 96
4-11 ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่ต้องการใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันต่อจำนวนเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้นต่างๆ 97
4-12 เปรียบเทียบปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากการใช้สารโคแอกกูแลนท์ต่างชนิดกัน 98
4-13 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิเมตรด้วยวิธีจาร์เทส 100
4-14 การแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยวิธีจาร์เทส ด้วยสารโคแอกกูแลนท์ต่างชนิดกัน 101

ภาพที่ หน้า

4-15 ค่าพีเอชภายหลังการโคแอกกูเลชันที่ความเข้มข้นสารส้ม และแคลเซียมคลอไรด์ต่างๆ 102
4-16 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มที่ความเข้มข้น 10^6 เซลล์/มิลลิลิตรสาร 103
4-17 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มที่ความเข้มข้น 5 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรใช้สารแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารแอกกูแลนท์ 104
4-18 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ 105
4-19 การทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วนกลไกเพิ่มน้ำหนักและขนาดอนุภาคด้วยสารส้มและการทำลายประจุที่ผิวอนุภาคด้วยแคลเซียมคลอไรด์ 106
4-20 คอลัมน์วิเคราะห์การแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอน 107
4-21 ระบบปฏิกิริยารวม (Hybrid tank) สำหรับแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำ 108
4-22 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่ความดันเกจต่างๆ ที่ความสูง 10 และ 60 เซนติเมตร 112
4-23 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศที่ความดันเกจต่างๆ ที่ความสูง 10 และ 60 เซนติเมตร 113
4-24 การกระจายตัวของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศขนาดเล็กที่ผลิตจากเครื่องผลิตฟองอากาศขนาดเล็กจากบริษัท ซาย แอนด์ เทคโนโลยี เซอร์วิส จำกัด 115
4-25 เครื่องสร้างฟองอากาศขนาดเล็กด้วยความดัน 4 บาร์ 115
4-26 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราน้ำล้นผิวต่าง 124
4-27 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งต่างๆ 124
4-28 อนุภาคสาหร่ายหลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายโดยระดับน้ำอยู่ที่ระดับเดียวกับเวียร์น้ำล้น 126
4-29 อนุภาคสาหร่ายหลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายโดยระดับน้ำอยู่ที่ระดับสูงกว่าเวียร์น้ำล้น 126
4-30 อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย 127
4-31 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวน การโคแอกกูเลชันกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลา 131

ภาพที่ หน้า

4-32 แนวทางการไหลของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายผ่านระบบการแยกอนุภาคแบบ MDAF 133

4-33 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการกรองที่ความสูงทรายกรองต่างๆ 134

4-34 ความเร็วการกรองน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตรที่ความสูงชั้นทรายกรองต่างๆ 135

4-35 การลำดับขนาดทรายกรองในถังปฏิกิริยา 136

4-36 กระบวนการกรองน้ำสังเคราะห์สาหร่ายผ่านคอลัมน์ทรายกรองขนาด 0.425 มิลลิเมตร ชั้นทรายกรองหนา 50 เซนติเมตร 137

4-37 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการกรองที่ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้นต่างๆ 138

4-38 ความเร็วการกรองน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆที่ความสูงชั้นทรายกรอง 50 เซนติเมตร 139

4-39 ประสิทธิภาพการแยกและการกักเก็บอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์หนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการต่างๆ 140

4-40 การแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และการกรอง 142

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนแหล่งน้ำดิบในธรรมชาติเกิดจากภาคอุตสาหกรรม และภาคครัวเรือน โดยงานวิจัยนี้ให้ความสนใจแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนสารอนินทรีย์จำพวกไนเตรทและฟอสฟอรัสละลายอยู่ทำให้แหล่งน้ำเหล่านั้นเกิดการเจริญเติบโตของสาหร่ายอย่างหนาแน่น (Algae bloom) ส่งผลให้เกิดปัญหารส กลิ่น และสีอันไม่พึงประสงค์ (Henderson และคณะ, 2008) นอกจากนี้แหล่งน้ำดิบที่มีสาหร่ายปนเปื้อนเมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาจะส่งผลให้เกิดสารพลอยได้ที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง หรือ Disinfection by product (DBPs) และทำให้เกิดผลกระทบหลายประการ เช่น การเพิ่มปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในการกำจัดความขุ่น ส่งผลให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย การอุดตันสารกรอง ส่งผลให้ทำการล้างย้อนบ่อยขึ้น นอกจากนี้ปัจจุบันสาหร่ายได้จัดเป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่งที่ใช้พื้นที่ในการเพาะปลูกน้อยกว่าพืชชนิดอื่น เช่น ข้าวโพด ปาล์ม เป็นต้น (Show และคณะ, 2012) ดังนั้นจึงมีการพัฒนาการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากเฟสน้ำ เช่น กระบวนการตกตะกอน กระบวนการออกซิเดชัน โดยการเติมสารคลอรีนเพื่อกำจัดเซลล์สาหร่ายแต่เมื่อคลอรีนรวมตัวกับสารอินทรีย์ ซึ่งรวมถึงเซลล์สาหร่ายด้วย ทำให้เกิดสารก่อมะเร็ง (DBPs) จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา และกระบวนการทำให้ลอย ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้สำหรับแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ โดยสาหร่ายจัดเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก และมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำจึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะทำการกำจัด และแยกด้วยกระบวนการทำให้ลอย เพื่อให้ได้น้ำดิบสำหรับการอุปโภค และบริโภค รวมทั้งตะกอนลอยที่ความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายในปริมาณสูงไปใช้เป็นพลังงานทางเลือกได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากแหล่งน้ำกระทำได้ยาก เนื่องจากเซลล์สาหร่ายมีเสถียรภาพในการลอยตัวในน้ำ ดังนั้นจึงควรทำลายเสถียรภาพของเซลล์สาหร่ายเสียก่อนด้วยกระบวนการที่นิยมใช้ คือ กระบวนการโคแอกกูเลชัน จากนั้นจึงทำการแยกอนุภาคเซลล์สาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยต่อไป นอกจากนี้เซลล์สาหร่ายที่อยู่ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติมักมีทั้งเซลล์ที่มีอายุน้อย และอายุมากปะปนกัน ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดเนื่องจากเซลล์สาหร่ายที่มีอายุมากจะมีขนาดเซลล์ใหญ่กว่าเซลล์ที่มีอายุน้อย และมีค่าซีต้าโพแทนเชียลเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น ทำให้เซลล์มีเสถียรภาพน้อยกว่าเซลล์ที่มีอายุน้อย จึงมักมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนลงสู่ก้นถัง (Henderson และคณะ, 2008) ทำให้การกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันมีประสิทธิภาพไม่สูงนัก

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากระบวนการแยกสาหร่ายเซลล์เดียวออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับโคแอกกูเลชัน และการกรอง โดยทำการออกแบบ

ระบบบำบัดดังกล่าวเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกสาหร่ายเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง ซึ่งจะช่วยลดปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้กำจัดความขุ่น และลดปริมาณสลัดจ์ที่ต้องทำการกำจัด

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัด และแยกสาหร่ายที่ปนเปื้อนในเฟสของเหลวด้วยกระบวนการไฮบริด ซึ่งเป็นกระบวนการร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชั่น และการกรอง

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอน กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน และกระบวนการร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน และการกรอง

1.2.3 เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบบำบัด และแยกสาหร่ายที่ปนเปื้อนในเฟสของเหลว คือ ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ อัตราการไหลน้ำเสียสังเคราะห์ อัตราการไหลน้ำอัดความดัน และความหนาทรายกรองที่เหมาะสม

1.2.4 เพื่อเสนอแนวทางออกแบบระบบบำบัดสาหร่ายแบบไฮบริด ประกอบด้วย กระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และกระบวนการกรอง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยในระดับต้นแบบ (Prototype) การทดลองทั้งหมดดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ระบบไฮบริดประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนกวนเร็วแบบในเส้นท่อ ส่วนกวนช้าแบบใบพัด และถังปฏิกรณ์แนวนอนภายในมี 3 ส่วนย่อยๆ คือ ส่วนสัมผัสฟองอากาศน้ำไหลขึ้น ส่วนแยกน้ำกับสาหร่ายโดยน้ำไหลลงด้านล่างส่วนสาหร่ายลอยขึ้นด้านบน และส่วนกรอง

1.3.2 สาหร่ายสายพันธุ์ที่ใช้ทำการศึกษา คือ คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) ที่ความเข้มข้น 1-10 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร

1.3.3 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา คือ ชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ อัตราการไหลน้ำเสียสังเคราะห์ อัตราการไหลน้ำอัดความดัน และความหนาทรายกรอง

1.3.4 วิเคราะห์จำนวนเซลล์สาหร่ายโดยใช้ Hemocytometer counting chamber และวัดค่าความขุ่น

1.3.5 การทดลองมี 6 ส่วน ได้แก่ 1.การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สาหร่ายและศึกษาลักษณะทางกายภาพของสาหร่าย 2.การทำจาร์เทสเพื่อหาชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสม 3.ทำการออกแบบระบบแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสของเหลวด้วยระบบไฮบริด 4.การเดินระบบผ่านอุปกรณ์การทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับการโคแอกกูเลชัน 5.การเดินระบบผ่านอุปกรณ์ไฮบริด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นแนวทางในการเลือกระบบการแยกสาหร่ายออกจากน้ำดิบ ในกระบวนการผลิตน้ำประปา

1.4.2 เป็นแนวทางในการเลือกระบบการแยกสาหร่ายออกจากเฟสของเหลว เพื่อนำสาหร่ายไปใช้เป็นพลังงานทางเลือก

1.4.3 ทราบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่าย คือ ชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ อัตราการไหลน้ำสังเคราะห์และน้ำฟองอากาศ และความหนาทรายกรอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาหร่าย (ทันดาว ทองตัน, 2545)

สาหร่ายสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะรูปร่างและขนาดหลากหลายสามารถพบได้ทั้งในน้ำจืด น้ำทะเล น้ำกร่อย น้ำพุร้อน ในดิน หรืออาศัยอยู่บนสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น นอกจากนี้ยังมีสารรงควัตุ เช่น สารคลอโลฟิลล์เอ สารคลอโลฟิลล์บี และสารแคโรทีน เป็นต้น จึงทำให้สาหร่ายสามารถสร้างอาหารเองได้ มีทั้งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ และไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ นอกจากนี้สาหร่ายยังสามารถจำแนกได้หลายรูปแบบ เช่น

2.1.1 การจำแนกสาหร่ายโดยการใช้รงควัตถุในจำแนกสามารถแบ่งได้เป็น 9 กลุ่ม

1) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanophyta)
2) สาหร่ายสีเขียว (Chlorophyta)
3) สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง (chrysophyta)
4) Euglenoids (Euglenophyta)
5) สาหร่ายไฟ (Charophyta)
6) สาหร่ายสีน้ำตาล (Phaeophyta)
7) สาหร่ายสีเหลืองแกมน้ำตาล (Pyrrophyta)
8) Cryptomanads (Cryptophyta)
9) สาหร่ายสีแดง (Rhodophyta)

2.1.2 การจำแนกสาหร่ายชนิดสาหร่ายที่สร้างปัญหาในระบบผลิตน้ำประปาทำให้เกิดกลิ่นและรสอะนไม่พึงประสงค์ แล้วยังก็ให้เกิดการอุดตันของระบบการกรองน้ำส่งผลให้ต้องทำการล้างย้อนถี่ขึ้นมีอยู่หลักๆ 3 กลุ่ม คือ

1) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Division Cyanophyta) จัดเป็นพวกเดียวกับแบคทีเรีย เนื่องจากเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียสเหมือนกัน แต่สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีรงควัตถุจำพวก คลอโรฟิลล์-เอ จึงสามารถสังเคราะห์แสงได้ พบได้ในแหล่งน้ำทั่วไป ส่วนใหญ่พบในน้ำจืด แต่ก็สามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำทะเล น้ำกร่อย น้ำพุร้อน หิมะ หรือในทะเลทราย เนื่องจากสาหร่ายชนิดนี้ทนต่อสภาวะความแห้งแล้งได้ดีกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ มีลักษณะที่สำคัญ ดังนี้

- รงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์-เอ แคโรทีนอยด์ ไฟโคโปรตีน โดยรงควัตถุไม่อยู่ในคลอโรพลาสต์ แต่กระจายเป็นอิสระในไซโตพลาสซึม
- ผนังเซลล์ 2 ชั้น คล้ายแบคทีเรียชนิดแกรมลบ ด้านนอกของผนังเซลล์มีลักษณะเป็นเมือกใส เรียกว่า Shealth

- ไม่มีหนวดแต่สามารถเคลื่อนที่แบบเลื่อนไหล และมีการเคลื่อนที่แบบถอยหน้า ถอยหลัง แกว่งซ้ายขวา เป็นคลื่น หรือหมุนเป็นเกลียว
- การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ
- สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้
- เซลล์สาหร่ายบางชนิดสามารถเปลี่ยนสีได้ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของแสง ความเข้มของแสง หรือปริมาณธาตุอาหาร
- อาหารสะสมในเซลล์สาหร่าย คือ แป้งไซยาโนไฟซิน ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตในรูปแกรนูลกระจายอยู่ในโครโมพลาสซึม

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหลายชนิดมีการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้สัตว์น้ำตาย สร้างกลิ่นเหม็น นอกจากนี้ในเซลล์สาหร่ายบางชนิดมีสารเคมีทำให้น้ำมีกลิ่นและรสชาติเปลี่ยนแปลง เช่น Geosmin และ 2-Methyllisoborneol (2-MIB) และสาหร่ายบางชนิดยังสร้างสารพิษ เช่น Microcystis และ Anabaena สร้างสารพิษที่มีผลทำลายตับและระบบประสาท ทำให้ผู้รับสารพิษนี้โดยการกินถึงแก่ความตายได้ นอกจากนี้การสัมผัสน้ำที่มีการเจริญเติบโตของสาหร่ายบางชนิดเหล่านี้จะทำให้เกิดอาการผิวหนังอักเสบ บวม และคันได้ เช่น *Anabaena spp.*, *Oscillatoria agardhii*, *O. rubescens*, *Lyngbya majuscula* หรือ *Gloeotrichia echinulata* สามารถกำจัดพิษเหล่านี้ ได้ด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

นอกจากนี้ยังพบว่า สารปฏิชีวนะบางชนิด เช่น Streptomycin หรือ Neomycin สามารถลดการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิดได้ (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2543)

2) สาหร่ายสีเขียว (Division Chlorophyta) มีลักษณะเซลล์เหมือนพืชชั้นสูง พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ เช่น น้ำจืด น้ำกร่อย น้ำทะเล หรือบนดิน มีลักษณะที่สำคัญ ดังนี้

- รงควัตุสีเขียว และมีส่วนประกอบเหมือนพืชชั้นสูง คือ มี คลอโรฟิลล์-เอ คลอโรฟิลล์-บี แคโรทีน และแซนโซฟิลล์ รงควัตถุอยู่ในคลอโรพลาสต์ โดยที่คลอโรพลาสต์มีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น มีรูปร่างแตกต่างกัน เช่น รูปถ้วย รูปวงรอบเซลล์ เป็นตาข่าย เป็นรูปเกลียว รูปดาว หรือเป็นแถบข้างเซลล์ และมีจำนวน 1 อันขึ้นไป
- อาจมีหรือไม่มีหนวด ส่วนใหญ่ที่เคลื่อนที่ได้จะพบหนวด ตั้งแต่ 1 เส้น หรือมากกว่า โดยหนวดที่พบไม่มีขน และอาจพบเกล็ดบนหนวดได้
- อาหารสะสมมีทั้งแป้งและไขมัน โดยส่วนมากอยู่ในรูปของแป้ง ประกอบด้วย อะไมโลส และ อะไมโลเพกติน สร้างจากไพรีนอยด์ซึ่งอยู่ภายในคลอโรพลาสต์
- สืบพันธุ์ได้ทั้งแบบอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ

3) สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง (Division Chrysophyta) ซึ่งรวมถึงสาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง และสาหร่ายกลุ่มไดอะตอมเข้าไว้ด้วยกันมีลักษณะสำคัญ ดังนี้

- รงควัตถุอยู่ในคลอโรพลาสต์ คือ คลอโรฟิลล์-เอ บางชนิดมี คลอโรฟิลล์-ซี แคโรทีน ได้แก่ เบต้า-แคโรทีน และเอบซีลอน-แคโรทีน แซนโธฟิลล์ ได้แก่ ฟูโคแซนธิน ไดอะโตแซนธิน และไฟโคบิโลโปรตีน โดยปริมาณของแคโรทีนอยด์และแซนโธฟิลล์มีมากกว่าคลอโรฟิลล์ จึงทำให้สีของคลอโรพลาสต์มีสีตั้งแต่ เหลือง เขียวแกมเหลือง เขียวมะกอก เหลืองแกมน้ำตาล น้ำตาลแกมทอง น้ำตาลอ่อน เป็นต้น
- ผนังเซลล์เป็นเนื้อเดียวกัน เป็นแผ่น หรืออาจไม่มีผนังเซลล์แต่มีเยื่อหุ้มเซลล์
- อาหารสะสมอยู่ในรูปแป้งอยู่ในรูป Chrysolaminarin หรือ Leucosin และไขมัน
- เซลล์มีรูปร่าง กลม รี ทรงกระบอก รูปกระสวย หรือรูปร่างเฉพาะ เช่น ไดอะตอม คือมีลักษณะเป็น 2 ฝาครอบกันพอดี

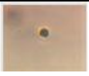
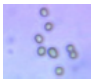
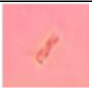
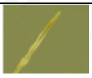
สำหรับสาหร่ายกลุ่มไดอะตอมอยู่ใน Class Bacillariophyceae เป็นองค์ประกอบสำคัญของกลุ่มประชากรสาหร่าย พบได้ในน้ำจืดและน้ำเค็ม อยู่เป็นเซลล์เดี่ยวและกลุ่มเซลล์ เซลล์ปกติไม่พบหนวด ผนังเซลล์ของไดอะตอมมีลักษณะพิเศษ ประกอบด้วย ฟรุสตูลที่เป็นซิลิกาล้อมด้วยสารเมือก ฟรุสตูลมี 2 ฝา คือฝาบน และฝาล่าง และมีวงคาดรอบฝาทั้งสองเรียกว่า Girdle Band อนุกรมวิธารของไดอะตอม จำแนกโดยใช้รูปร่าง จำนวน และตำแหน่งของคลอโรพลาสต์ รวมทั้งรูปร่างของเซลล์ โครงสร้างและลวดลายบนฝาที่มีลวดลายแตกต่างกันมากมาย โดยมี 2 อันดับ คือ Centric Diatom และ Pennate Diatom กลุ่มของไดอะตอมในระบบนิเวศ แบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ

- Euplanktonic Diatom มักก่อให้เกิดการบลูมในฤดูใบไม้ผลิและฤดูใบไม้ร่วงในทะเลสาปและมหาสมุทรในเขตอบอุ่น และในฤดูร้อนในเขตละติจูดที่สูง
- Benthic Diatom เป็นสาหร่ายที่จับกับสิ่งที่จมน้ำ และการขับเมือกของไดอะตอมและแบคทีเรีย ทำให้เกิดฟิล์มบางๆบนพื้นผิวของสิ่งที่จมน้ำ เป็นการเตรียมพื้นผิวให้กับสาหร่ายชนิดอื่นๆ การเกาะกับพื้นผิวอาจใช้ฝาข้างหนึ่งแนบกับพื้นผิว หรือเกาะโดยเมือกเหนียวๆก็ได้
- Meroplanktonic Diatom เป็นแพลงค์ตอนชั่วคราวที่เกาะพื้นผิวอย่างหลวมๆ เมื่อถูกรบกวนจะพัดพากลายเป็นแพลงค์ตอนลอยอิสระในน้ำ

ในระบบผลิตน้ำประปา สาหร่ายที่สร้างกลิ่นและรสซึ่งเป็นปัญหาในการผลิตน้ำ ได้แก่ สกุล *Synura* ผลิตกลิ่นแตงกวาดิบและรสขม สกุล *Dinobryon*, *Uroglenopsis* และ *Peridinium* ผลิตกลิ่นคาวปลาอย่างแรง *Synera* ผลิตกลิ่นอับ หรือสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Anabaena*, *Anacystis* และ *Aphanizomenon* ผลิตกลิ่นสกปรกคล้ายเล้าหมู *Gomphosphaeria*, *Cylindrospermum* และ *Rivularia* ผลิตกลิ่นหญ้า *Chlamydomonas*, *Crystomonas* และ *Euglena* ผลิตรสหวาน กลุ่มสาหร่ายที่ผลิตเมือก เช่น *Palmella*, *Anacystis*, *Rivularia*, *Anabaena* และ *Oscillatoria* เป็นสาเหตุของรสและกลิ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีเกิดการย่อยสลายในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน

สาหร่ายที่เป็นสาเหตุของการอุดตันของระบบกรองน้ำด้วยทราย ทำให้ช่วงเวลาการใช้สารกรองสั้นลง มักเป็นสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม เช่น *Asterionella*, *Fragilaria*, *Tabellaria*, *Aulacoseira* (*Melosira*) และ *Synedra*

ตาราง 2-1 ลักษณะ ขนาด และพื้นที่ผิวของเซลล์สาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ และปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่ต้องการใช้ (Henderson และคณะ, 2008)

Spicies	Photo	Cell size µm	Surface area µm²	Coagulant demand ng Al/cell	reference
Chlorella		3.5	38	1.18×10^{-2}	Liu et al. (1999)
Microcystis		5	78.5	1.03×10^{-2}	Drikas et al. (2001)
Chlorella		5.3	88	1.33×10^{-2}	Edzwald and Wingler (1990)
Cyclotella		6.1	117	3.2×10^{-2}	Edzwald and Wingler (1990)
Anabaena			133	2.7×10^{-2}	Jiang et al. (1993)
Asterionella		width 2 length 40	257	2.7×10^{-2}	Jiang et al. (1993)
Melosira		diameter 15-20 length 30-40	2.32×10^{3}	0.475; 1.08	Mouchet and bonnelye (1998); Jun et al. (2001)
Pediastrum		diameter 65-250 (disc)	2.60×10^{3}	0.475	Mouchet and bonnelye (1998);
Synedra		width 4.5-6	3.07×10^{3}	1.08	Jun et al. (2001)

จากตารางที่ 2-1 และ 2-2 พบว่าสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา ซึ่งเลือกใช้ทำการทดลองมีขนาดเซลล์ 3.5 ไมครอน ลักษณะเซลล์เป็นทรงกลม พื้นที่ผิวเซลล์ 38 ตารางไมโครเมตร ความหนาแน่น 1.07×10^{3} กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และปริมาณความต้องการสารโคแอกกูแลนท์ 1.18×10^{-2} นาโนกรัมของอะลูมินัม/เซลล์ ที่ค่าพีเอช 4-8 มีค่าซีต้าโพเทนเชียล -10 มิลลิโวล์ต และที่ค่าพีเอช 5.41-7.08 มีค่าซีต้าโพเทนเชียล -14.9 ถึง 19.8 มิลลิโวล์ต (Liu และคณะ, 1999) และ (Clasen และคณะ, 2000)

ตาราง 2-2 แสดงขนาด การอยู่ร่วมกัน รูปร่าง ความหนาแน่น และค่าซีต้าโพเทนเชียลของเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ต่างๆ ในแต่ละสภาวะที่ทำการตรวจวัด (Henderson และคณะ, 2008)

Particle	Size (µm)	Colonial	Shape	Density (kg/m^3)	Zeta potential (mV)	Test condition (pH; test water)	Reference
Microcystis aeruginosa	3-ก.ค.	Globular	Sphere	<1200	-25 to -30	9.5; maturation pond water	Jameson (1999); Vlaski et al. (1996)
Microcystis	N/A	Globular	Sphere	<1200	-7.5 to -26	5.59-7.94; synthetic test water	Clasen et al. (2000)
Synechochstis minuscula	6	Single cell or microcolonies	Sphere	-	-22.3; -28.5; -32.2	4; 5; 6	Bernhardt and Clasen (1994)
Synechochstis minuscula	5	Single cell or microcolonies	Sphere	-	-14.9 to -24.8	4.52-7.58; synthetic test water	Clasen et al. (2000)
Chlorella vulgaris	5.3	Single cell	Sphere	1070	-10-19.8; log	7; distilled water 6.5; reservoir	Lves (1959)
					-17.4; stationary		Edzwald and Wingler (1990)
Chlorella sp	3.5	Single cell	Sphere	1070	-10	4-8; distilled water	Liu et al. (1999)
					-14.9 to -19.8	5.41-7.08; synthetic test water	Clasen et al. (2000)

ตาราง 2-3 แสดงขนาด การอยู่ร่วมกัน รูปร่าง ความหนาแน่น และค่าซีต้าโพเทนเชียลของเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ต่างๆ ในแต่ละสภาวะที่ทำการตรวจวัด (Henderson และคณะ, 2008)

Particle	Size (μm)	Colonial	Shape	Density (kg/m³)	Zeta potential (mV)	Test condition (pH; test water)	Reference
Scenedesmus quadricauda	13.1	Row of 4-16 cells with spinal appendages	Ellipsoidal	-	-25 to -35	7-10; distilled water	Phoochinda and White (2003)
Scenedesmus obliquus	18(d); 25(l) 3-9(d);6-17(l)	Row(s) of 4-16 cells with spinal appendages	Ellipsoidal	-	(-23) - (-25) -11.2	7-10; distilled water 7	Chen et al. (1998) Bernhardt and Clasen (1991)
Selenastrum capriconutum	2-3(d); 6-8(l)	Single cell	Crescent	1090	-35	6-10; 10^{-3} M NaClo4 solution	Huang et al. (1999)
Cyclotella sp.	6.1	Chain	Sphere	1140	-19.8 to -22.3	4-10; reservoir water	Edzwald and Wingler (1990)
Stephanodiscus hantzscii	8-20(d); 40(spines)	Chain	Disc shaped with spines	-	-12.4	7	Bernhardt and Clasen (1991)
Fragillaria crotonensis	2-3(d); 40-150(l)	Cells joined along length	Elongated	-	-18.6	7	Bernhardt and Clasen (1991)
Nitzschia linearis	35(l)	No	Elongated	-	-30(Initial); -35(Log)	-28(Stationary)	Konno (1993)
Syendra acus	4.5-6(d); 100-300(l)	No	Needle	1100	(-30) to (-40)	7.5-7.7	Jun et al. (2001)

2.2 กระบวนการบำบัดและแยกสาหร่าย

การควบคุมการเจริญเติมโตของสาหร่ายแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ การควบคุมน้ำดิบ และการควบคุมในกระบวนการผลิตน้ำประปา

2.2.1 การควบคุมน้ำดิบ

ก. ทางกายภาพ ได้แก่ การใช้ถ่านกัมมันต์ การใช้คลื่นเสียง

ข. ทางเคมี ได้แก่ การใช้สารเคมีกำจัดสาหร่าย นิยมใช้สารคอปเปอร์ซัลเฟต หรือโพแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต ควรเลือกสารเคมีที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นในแหล่งน้ำ

ค. ทางชีวภาพ ได้แก่ การใช้โปรโตซัว แพลงก์สัตว์ หรือปลากินสาหร่าย

ง. การควบคุมการปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ตามมาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนและอุตสาหกรรม โดยควบคุมปริมาณธาตุสำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส

จ. การป้องกันการแบ่งชั้นของน้ำ โดยการเติมอากาศลงในน้ำให้เกิดการผสมกัน ส่งผลให้น้ำเย็นที่อยู่ด้านล่างเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนผิวน้ำ

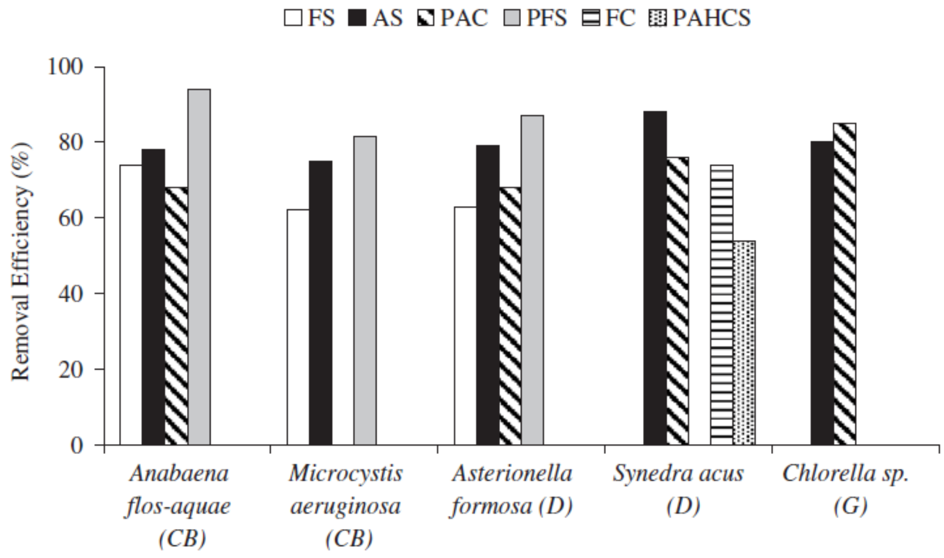
2.2.2 การควบคุมในกระบวนการผลิตน้ำประปา

ก. ทางกายภาพ

- การดักสาหร่ายที่ลอยอยู่บนผิวน้ำของถังกรองและถังตกตะกอนออกเนื่องจากสาหร่ายบางชนิดสามารถสร้างฟองได้
- การสร้างที่บังแสงเพื่อลดปัจจัยในการเจริญเติบโตของสาหร่าย นอกจากนี้ตำแหน่งการดึงน้ำดิบเข้าสู่ระบบควรอยู่ต่ำกว่าผิวน้ำพอสมควร

ข. ทางเคมี

- การปรับค่าพีเอชให้ไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย
- การเติมสารคลอรีนในถังตกตะกอนก่อนเข้าสู่กระบวนการกรองสามารถลดจำนวนสาหร่ายได้มากแต่ก่อให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่งขึ้น Environmental Protection Agency จึงกำหนดค่ามาตรฐานไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาไม่เกิน 100 ไมโครกรัม/ลิตร
- การเพิ่มสารโคแอกกูแลนท์และการเติมถ่านกัมมันต์ เป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนสูง
- การใช้ขั้วไฟฟ้าจุ่มน้ำก่อนนำน้ำเข้าสู่ถังกรอง สามารถลดปริมาณสาหร่ายเส้นใยลง
- ใช้ระบบการกรอง เช่นไมโครสเตรนเนอร์ เนื่องจากสาหร่ายมีขนาดเล็กทำให้ต้องใช้รูที่มีขนาดเล็ก ต้องใช้น้ำแรงดันสูงและล้างตะแกรงตลอดเวลา ส่วนพรีฟิลเตอร์เป็นวิธีที่ต้นทุนถูกกว่าไมโครสเตรนเนอร์แต่อุดตันง่ายและล้างทำความสะอาดยาก



รูปภาพ 2-1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสายพันธุ์ไซยาโนแบคทีเรีย (Jiang และคณะ , 1998) และ (Drikas และคณะ, 2001) ไดอะตอม (Jiang และคณะ, 1993) และ (Jun และคณะ, 2001) และสาหร่ายสีเขียว (Liu และคณะ, 1999) ด้วยการตกตะกอนโดยสารโคแอกกูแลนท์ต่างกัน คือ เฟอร์ริกซัลเฟต (FS) อะลูมินัมซัลเฟต (AS) โพลีอะลูมินัมคลอไรด์ (PAC) โพลีเฟอร์ริกซัลเฟต (PFS) เฟอร์ริกคลอไรด์ (FC) โพลีอะลูมินัมไฮโดรเจนคลอไรด์ซิลิเกต (PAHCS)

จากรูปภาพ 2-1 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมกับการเติมสารโคแอกกูแลนท์ชนิดโพลีอะลูมินัมคลอไรด์มีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 85% ซึ่งสูงกว่าการใช้อะลูมินัมซัลเฟตที่มีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 80% ทำให้ทราบว่าสารโคแอกกูแลนท์ทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกัน

2.3 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

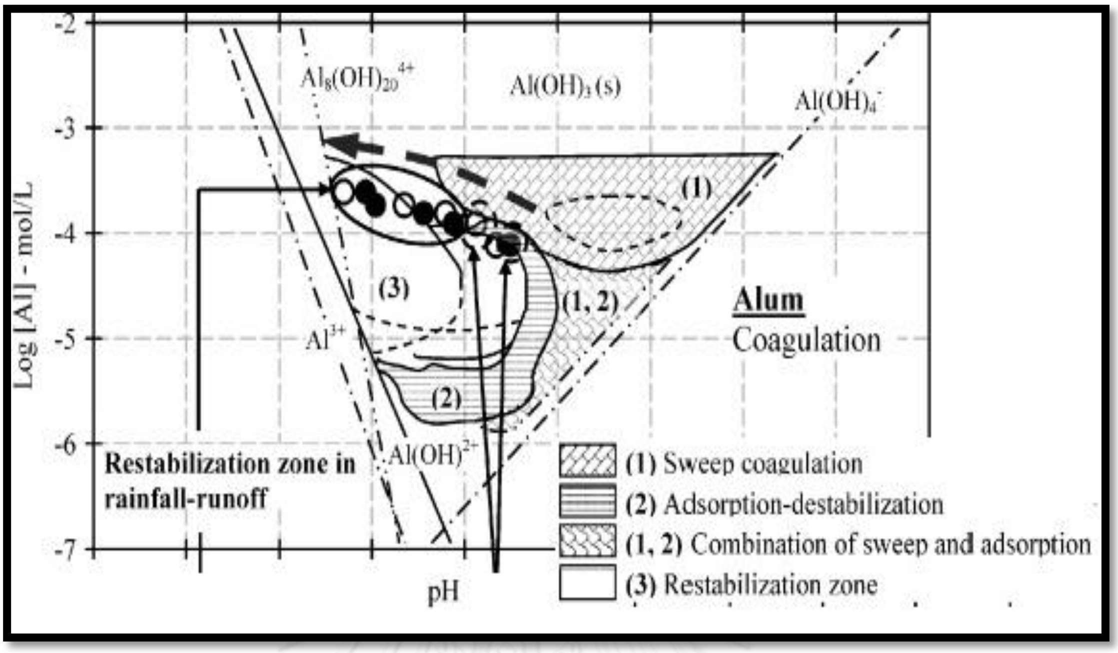
อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดอยู่ในช่วง 1 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร การที่มีขนาดเล็กมากจึงส่งผลให้ไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาจำกัด จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการทำให้อนุภาคคอลลอยด์จับกลุ่มกันเป็นลักษณะฟล็อก ซึ่งตกตะกอนได้ง่ายขึ้น ดังนั้นกระบวนการรวมกลุ่มอนุภาคคอลลอยด์ให้อยู่ในรูปของฟล็อก เรียกว่า กระบวนการโคแอกกูเลชัน ขั้นตอนการเกิดโคแอกกูเลชันมี 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

2.3.1 การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ (Destabilization)

เนื่องจากในธรรมชาติเสถรียรภาพคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงผลักที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าที่ชักนำโดยประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งมากกว่าแรงดูดวานเดอร์วาลส์ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพและแขวนลอยได้ในน้ำ ดังนั้นจึงต้องทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์จึงจะเกิดการรวมตัวกลายเป็นฟล็อก โดยอาศัยกลไกดังนี้

1) การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layer) การเพิ่มจำนวนประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาคในชั้นกระจาย ส่งผลให้ความหนาของชั้นกระจายลกลงและซีตาโพเทนเชียลลดลงด้วย
2) การดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization) ไอออนตรงกันข้ามของสารโคแอกกุแลนท์สามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ส่งผลให้ใช้สารโคแอกกูแลนท์ปริมาณน้อยกว่ากลไก 1. และแปรผันตามปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ นอกจากนี้กลไกนี้สามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นประจุตรงข้ามได้
3) การใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (Sweep coagulation) การเติมสารโคแอกกูแลนท์เพื่อเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้อนุภาคคอลลอยด์ ส่งผลให้เสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ง่ายขึ้น ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้แปรผกผันกับปริมาณอนุภาคคอลลอยด์
4) การใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Polymer Bridging) สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีโพลีเมอร์และตำแหน่งว่างบนพื้นผิวอนุภาค เมื่ออนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือว่าอนุภาคเสียเสถียรภาพแล้ว ส่วนอนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกโพลีเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระ จะเกิดการกลับคืนเสถียรภาพ (Restabilized Particle) ได้อีก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 2-2 ปริมาณสารส้มและค่าพีเอชที่สัมพันธ์กับกลไกที่เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Amirtharaja และคณะ, 1982)

การออกแบบและควบคุมถังกวนเร็ว ต้องการความปั่นป่วนสูงเพื่อผสมสารเคมีกับน้ำให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมกันทุกจุด กำหนดให้ความเร็วแกรเดียนท์ (Velocity Gradient, G) มากกว่าหรือเท่ากับ 300 /วินาที และเวลาในการกวนผสม (Detention Time, T) ไม่เกิน 1 นาที สามารถคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการกวนผสมน้ำได้จากสมการ 3-1 ของแคมท์และสไตน์ ดังนี้

$$G = \left(\frac{P}{\mu \times V} \right)^{0.5} \qquad 2\text{-}1$$

โดยที่ G = ความเร็วแกรเดียนท์ หรือความปั่นป่วน (/วินาที)

P = พลังงานที่ใช้สร้างความปั่นป่วน ($\frac{\text{ฟุต}}{\text{ปอนด์-วินาที}}$)

μ = ความหนืดของน้ำ, ($\frac{\text{ปอนด์}}{\text{ตารางฟุต} \times \text{วินาที}}$)

V = ปริมาณน้ำในถังกวนเร็ว (ลูกบาศก์ฟุต)

คำนวณหาพลังงานที่ใช้ เนื่องจากใช้ใบพัดในการกวนผสม

$$P = \frac{(k \times \rho)}{g} \times N^3 \times D^5 \qquad 2\text{-}2$$

โดยที่ k = ค่าคงที่ กรณี 3 ใบพัด k=1

กรณี 6 ใบพัด k=6.3

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต)

N = จำนวนรอบใบพัด ณ ปลายใบพัด (รอบ/วินาที)

D = เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด (ฟุต)

คำนวณหาเวลากวนผสมที่เหมาะสม ด้วยสูตรเอมไพริเคิล

$$G \times T_{opt} \times C^{1.46} = 5.9 \times 10^{6} \quad \text{2-3}$$

โดยที่ T_{opt} = เวลากวนผสมที่เหมาะสม

C = ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม

คำนวณหาปริมาตรถังกวนเร็ว

$$V = Q \times T \quad \text{2-4}$$

โดยที่ V = ปริมาตรถังกวนเร็ว

Q = อัตราการไหลน้ำเข้าถังกวนเร็ว

กรณีใช้เครื่องกวนในเส้นท่อ (Static mixer) กำหนดให้มีค่า G×t = 350-1700 เวลาสัมผัส ประมาณ 1-5 วินาที ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก (Kawamura, 2000)

2.3.2 การกระทบหรือสัมผัสกันของคอลลอยด์ (Transport of colloidal Particles)

อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว มีโอกาสเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกัน จนเกิดรูปฟล็อคมากขึ้น นอกจากนี้เมื่ออนุภาคเกาะติดกันแล้วไม่ควรหลุดออกจากกันหรือหลุดออกให้น้อยที่สุด หากเกิดการสัมผัสระหว่างอนุภาคแต่ไม่เกิดการรวมตัวกัน แสดงว่าการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ยังได้ผลไม่ดีพอ วิธีการสร้างสัมผัสให้กับคอลลอยด์มีวิธีดังนี้

1) ออร์โธไคเนติคฟล็อกคูเลชัน (Orthokinetic Flocculation) มักเกิดเมื่อคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1.0 ไมครอน และความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการกวนน้ำจนมีอัตราการไหลที่แตกต่างกัน และไม่เร็วเกิดไปจนทำให้ฟล็อคแตกตัวได้ วิธีนี้ได้รับความนิยมมาก ซึ่งจะเรียกอุปกรณ์ที่ใช้ว่า ถังกวนช้า สามารถคำนวณหาอัตราการลดจำนวนของคอลลอยด์ได้จากสมการดังนี้

$$J_{pk} = \left(\frac{-4 \times \eta \times k \times T}{3} \right) \times N^2 \qquad 2\text{-}5$$

โดยที่ J_{pk} = อัตราการลดจำนวนของคอลลอยด์

η = ประสิทธิภาพในการสัมผัส มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1

k = ค่าคงที่ของ Boltzmann คือ 1.38×10^{-16} erg/°K

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (°K)

N = จำนวนอนุภาคคอลลอยด์ต่อมิลลิเมตร

μ = ความหนืดของน้ำ, ($\frac{\text{กรัม}}{\text{เซนติเมตร} \times \text{วินาที}}$)

คำนวณหาเวลาที่ใช้ในการทำให้อนุภาคลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง

$$t_{1/2} = \frac{3 \times \mu}{4 \times \eta \times k \times T \times N_0} \qquad 2\text{-}6$$

โดยที่ $t_{1/2}$ = เวลาที่ใช้ในการทำให้อนุภาคลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง

N_0 = ความเข้มข้นคอลลอยด์เริ่มต้น

คำนวณหาจำนวนอนุภาคคอลลอยด์

$$N = \frac{N_0}{1 + \left(\frac{t}{t_{1/2}} \right)} \qquad 2\text{-}7$$

โดยที่ t = เวลาฟล็อคคูเลชัน (วินาที)

$t_{1/2}$ = เวลาครึ่งหนึ่งของฟล็อคคูเลชัน (วินาที)

N_0 = ความเข้มข้นคอลลอยด์เริ่มต้น

2) เพอริไคเนติคฟล็อกคูเลชัน (Perikinetic Flocculation) ทำให้คอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า 0.1-1.0 ไมครอน สัมผัสกัน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองโดยอาศัยกลไกการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนหรือการอาศัยความร้อนเพื่อเคลื่อนที่ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำจึงเป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก แต่ก็ไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากต้องใช้เวลาในการสร้างสัมผัสนานมากสามารถคำนวณหาอัตราการลดจำนวนของคอลลอยด์ได้จากสมการดังนี้

$$J_{ok} = \frac{-2G}{3} \times d^3 \times N^2 \qquad 2\text{-}8$$

โดยที่ J_{ok} = อัตรการลดจำนวนของคอลลอยด์
d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางคอลลอยด์ (เซนติเมตร)
G = ความเร็วแกรเดียนท์ (/วินาที)

3) การสัมผัสเนื่องจากการตกตะกอน (Sedimentation) มักเกิดกับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัม/ลิตร จึงสามารถกำจัดคอลลอยด์เหล่านี้ออกจากน้ำได้

4) การสัมผัสของคอลลอยด์ขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอน และความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถเกิดการสัมผัสแบบออร์โธไคเนติคฟล็อคคูเลชัน แต่ความเข้มข้นน้อยทำให้มีโอกาสในการสัมผัสกันต่ำ จึงใช้เวลาในการสร้างสัมผัสนาน สามารถแก้ไขได้ดังนี้

4.1 การกรองสัมผัส (Contact Filtration) เป็นการใช้เครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว 2 ชั้นกรองช่วยเพิ่มอัตราการสัมผัสและเป็นการบังคับให้คอลลอยด์เคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากขึ้น แต่เนื่องจากช่องว่างในชั้นกรองมีจำนวนจำกัด วิธีนี้จึงเหมาะกับความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มิลลิกรัม/ลิตร

4.2 การใช้ฟล็อคเป็นเป้าสัมผัส สามารถทำได้ 2 วิธี คือ ฟล็อคจับตัวเป็นชั้นสลัดจ์ โดยบังคับให้คอลลอยด์เคลื่อนตัวผ่านชั้นสลัดจ์เพื่อเพิ่มโอกาสสัมผัส และถังตกตะกอนแบบโซลิดซ์คอนแทคท์ (Solid contact clarifier) นำฟล็อคกลับสู่ถังเพื่อผสมกับคอลลอยด์ แล้วทำให้เกิดการสัมผัสแบบออร์โธไคเนติคฟล็อคคูเลชัน

5) การสัมผัสของคอลลอยด์ขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอน และความเข้มข้นต่ำอาจสร้างสัมผัสด้วยวิธีการกรองสัมผัสได้เช่นกัน แต่ขนาดของสารกรองควรมีขนาดใหญ่กว่าทรายกรองเพื่อเพิ่มปริมาตรช่องว่างสำหรับคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่จะส่งผลให้ลดพื้นที่ผิวสัมผัส จึงทำให้ประสิทธิภาพการเกิดฟล็อคต่ำกว่าการใช้ทรายกรอง

การออกแบบและควบคุมถังกวนช้า สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือแบบใบพัด และแบบแผ่นกั้นน้ำ ควรมีค่าความปั่นป่วนระหว่าง 20-50 วินาที$^{-1}$ แต่มีเวลาในการสัมผัสนานประมาณ 20-30 นาที สามารถหาค่าความปั่นป่วนหรือเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกวนช้าได้จากสมการ 2-9 ดังนี้

$$(G^*)^{2.8} \times T = K \qquad 2\text{-}9$$

โดยที่ G* = ความเร็วแกรเดียนท์ที่เหมาะสม (วินาที$^{-1}$)

T = เวลากักเก็บน้ำถังกวนช้า

K = ค่าคงที่ ขึ้นกับ ชนิดและปริมาณสารโคแอกูแลนท์ที่ใช้

กรณี ใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ที่ปริมาณไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/ลิตร

$$(G^*)^{2.8} \times T = \left(\frac{44\times10^5}{C}\right) \quad 2\text{-}10$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นสารส้ม

กรณี ใช้ใบพัดสร้างความปั่นป่วน แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ

1. แบบใบพาย (Paddle and reels) ความเร็วรอบไม่ควรเกิน 2-15 รอบ/นาที และความเร็วขอบใบพัดประมาณ 1-2 ฟุต/นาที เครื่องกวนชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าชนิดอื่นๆ
2. แบบเทอร์ไบน์ (Turbine) ความเร็วรอบอยู่ระหว่าง 10-15 รอบ/นาที และความเร็วขอบใบพัดสำหรับฟล็อคเปราะที่เกิดจากสารส้มหรือสารประกอบเหล็กไม่ควรเกิน 2 ฟุต/นาที ส่วนความเร็วขอบใบพัดสำหรับฟล็อคที่แข็งแรงซึ่งเกิดจากหินปูนไม่เกิน 4 ฟุต/นาทีและเครื่องกวนชนิดนี้ไม่เหมาะสำหรับสร้างความปั่นป่วนที่สูงกว่า 40 วินาที$^{-1}$
3. แบบใบพัดเรือ (Propeller) ความเร็วรอบอาจสูงถึง 150 รอบ/นาที ส่วนความเร็วขอบใบพัดไม่มีข้อจำกัดเครื่องกวนชนิดนี้สามารถสร้างความปั่นป่วนได้สม่ำเสมอและทั่วทั้งถังมากกว่าชนิดอื่นๆ

สามารถคำนวณหาพลังงานที่ต้องการใช้ในการกวนผสมได้จากสมการ 3-11 ดังนี้

$$P = 0.5 \times C_D \times A \times \rho \times V^3 \quad 2\text{-}11$$

โดยที่ P = พลังงานที่ต้องการใช้ในการกวนผสม

C_D = สัมประสิทธิ์ความหน่วง (Drag Coefficient)

= 1.8 สำหรับใบพาย

V = ความเร็วสัมพัทธ์ของใบพัด

= 0.75 × ความเร็วขอบใบพัด

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ

A = พื้นที่ของใบพัด

กรณีใช้แผ่นกั้นน้ำ (Baffled Flocculation) แบ่งถังกวนช้าออกเป็นห้องเล็กๆ จำนวนมากทำให้น้ำไหลวนอย่างนุ่มนวล โดยหลักปฏิบัติที่ใช้ในการออกแบบมีดังนี้

1. ความเร็วการไหลควรอยู่ระหว่าง 0.15-0.45 เมตร/วินาที เพื่อป้องกันไม่ให้ฟล็อคตกตะกอน
2. เวลาที่ใช้กักเก็บน้ำประมาณ 20-50 นาที
3. ระยะระหว่างแผ่นกั้นควรมากกว่า 0.45 เมตร
4. ระยะห่างระหว่างปลายของแผ่นกั้นและผนังถังมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นที่อยู่ติดกันซึ่งไม่น้อยกว่า 0.6 เมตร
5. การสูญเสียเฮด (head loss) แบบหักเลี้ยว 180 ° สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$H = 0.163 \times V^2 \qquad \text{2-12}$$

โดยที่ H = การสูญเสียเฮด (เมตร)

V = ความเร็วการไหลน้ำภายในถัง (เมตร/วินาที)

6. ความลึกถังกวนช้าแบบการไหลแนวระนาบควรมากกว่า 0.9 เมตร แต่ถ้ามีค่าต่ำกว่าควรใช้แบบการไหลแนวขึ้นบน-ลงล่าง
7. ช่องว่างระหว่างด้านบนของแผ่นกั้นจนถึงผิวน้ำ หรือช่องว่างระหว่างด้านล่างของแผ่นกั้นจนถึงก้นถังควรมีระยะประมาณ 1.5 เท่าของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น

จากตาราง 2-3 และ 2-4 พบว่าเฟสน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย (*Chlorella sp.*) ที่ความเข้มข้น 6.8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูแลชัน ซึ่งใช้อะลูมินัมซัลเฟตและ PAC ที่ 8 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นสารโคแอกกูแลนท์เป็น 80% และ 85% ตามลำดับ (Liu และคณะ, 1999)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง 2-4 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการตกตะกอน (Jiang และคณะ, 1993) (Drikas และคณะ, 2001) (Mouchet และคณะ, 1998) และ (Liu และคณะ, 1999);

Algae	Source water	Algae cells/mL	pH	Coagulant dose (mg/L)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	settling time (min)	Removal Efficiency (%)
Cyanobacteria								
Microcystis aeruginosa	Reservoir water	5×10^5 - 1.5×10^6	7.2	10.3 mg/L as Al ($Al_2(SO_4)_3$)	230; 60	25; 14	15	75
Microcystis aeruginosa	Reservoir water	1.0×10^4; 3-3.5 NTU	8	10 mg/L as Fe; 1 mg/L as superfloc C-573	1000; 30	30; ≥30	60; filtration at 10 m/hr; 200 mm sand bed	98.9
Microcystis aeruginosa	Growth media	5.8×10^4; 6.1 NTU	7.5	5 mg/L as Fe($Fe_2(SO_4)_3$)	300-60	35; 20	60	62
Microcystis aeruginosa	Growth media	5.8×10^4; 6.1 NTU	7.5	5 mg/L as Fe (PFS)	300-60	35; 20	60	81.6
Anabaena flosaquae	Growth media	2×10^5	7.5	11.2 mg/L as Fe ($Fe_2(SO_4)_3$)	300; 120	35; 25	120	74
Anabaena flosaquae	Growth media	2×10^5	7.5	5.4 mg/L as Al ($Al_2(SO_4)_3$)	300; 120	35; 25	120	78
Anabaena flosaquae	Growth media	2×10^5	7.5	11.2 mg/L as Fe (PFS)	300; 120	35; 25	120	94
Anabaena flosaquae	Growth media	2×10^5	7.5	5.4 mg/L as Al (PACl)	300; 120	35; 25	120	68

ตาราง 2-5 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการตกตะกอน (ต่อ)
(Jiang และคณะ, 1993) (Mouchet และคณะ, 1998) และ (Drikas และคณะ, 2001)

Algae	Source water	Algae cells/mL	pH	Coagulant dose (mg/L)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	settling time (min)	Removal Efficiency (%)
diatoms								
Asterionella formosa	Growth media	2×10^5	7.5	11.2 mg/L as Fe ($Fe_2(SO_4)_3$)	300; 120	35; 25	120	63
Asterionella formosa	Growth media	2×10^5	7.5	5.4 mg/L as Al ($Al_2(SO_4)_3$)	300; 120	35; 25	120	79
Asterionella formosa	Growth media	2×10^5	7.5	5.4 mg/L as Al (PAC)	300; 120	35; 25	120	68

ตาราง 2-6 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการตกตะกอน (ต่อ) (Jiang และคณะ, 1993) (Kempeneers และคณะ, 2001; Liu และคณะ, 1999; Mouchet และคณะ, 1998) (Drikas และคณะ, 2001)

Algae	Source water	Algae abundance cells/mL	pH	Coagulant dose (mg/L)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	settling time (min)	Removal Efficiency (%)	Reference
Asterionella formosa	Growth media	2×10^5	7.5	11.2 mg/L as Fe (PFS)	300; 120	35; 25	120	87	Jiang et al. (1993)
Synedra acus/	Reservoir water	1500	6.8	1.62 mg/L as Al ($Al_2(SO_4)_3$)	135; 60	45; 10	30	88	Jun et al. (2001)
Melosira									
Synedra acus	Reservoir media	1040	7	2.16 mg/L as Al (PAC)	135; 60	45; 10	30	76	Jun et al. (2001)
Synedra acus	Reservoir media	760	7	2.16 mg/L as Al (PAHCS)	135; 60	45; 10	30	54	Jun et al. (2001)
Synedra acus	Reservoir media	1040	5.3		135; 60	45; 10	30	74	Jun et al. (2001)
Synedra acus	Reservoir media	1480	6.8		135; 60	45; 10	30	99	Jun et al. (2001)

ตาราง 2-7 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการตกตะกอน (ต่อ) (Jiang และคณะ, 1993); (Kempeneers และคณะ, 2001; Mouchet และคณะ, 1998); (Liu และคณะ, 1999); (Drikas และคณะ, 2001)

Algae	Source water	Algae abundance cells/mL	pH	Coagulant dose (mg/L)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	settling time (min)	Removal Efficiency (%)	Reference
Chlorophyta									
Chlorella sp.	Deionised water; 0.05 M $NaNO_3$	6.8×10^5	8	8 mg/L as Al ($Al_2(SO_4)_3$)	100; 120	25; 20	30	80	Liu et al. (1999)
Chlorella sp.	Deionised water; 0.05 M $NaNO_3$	6.8×10^5	7	8 mg/L as Al (PAC)	100; 120	25; 20	30	85	Liu et al. (1999)
Mixture									
Spirulina,	Nutrient media	55 NTU	7	5.0 mg/L as chitosan	5 s	60; 30	30	90	Divakaran
oscillatoria, chlorella	and tap water;14 mg/L as $CaCO_3$								and Pillai (2002
Pediastrum clathratum and Melosira	Seine river water	$1\text{-}3\times10^4$	-	9.5 mg/L as AL	-	-	10	70-80	Mouchet and Bonnelye (1998)

2.4 กระบวนการทำให้ลอย (J. K. Edzwald, 2010)

กระบวนการทำให้ลอยเป็นกระบวนการแยกของแข็งออกจากของเหลวโดยส่วนใหญ่ใช้กับการแยกสารที่มีความเข้มข้นของแข็งต่ำ แหล่งน้ำที่มีสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย แหล่งน้ำที่มีความขุ่นต่ำ ค่าความเป็นด่างต่ำ หรือแหล่งน้ำที่มีสีเป็นองค์ประกอบ ซึ่งสามารถแยกด้วยวิธีการตกตะกอนได้ยาก และใช้ เวลากักเก็บน้ำของกระบวนการทำให้ลอยน้อยกว่ากระบวนการตกตะกอน เนื่องจากสามารถแยกสารแขวนลอยเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำมากกว่าจมตัว จึงแยกออกด้วยกระบวนการทำให้ลอยได้เร็วกว่า แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาด้านความต้องการทางด้านเครื่องจักรกล พลังงาน และบุคลากรผู้เชี่ยวชาญในการเดินระบบมากกว่ากระบวนการตกตะกอน

2.4.1 **กระบวนการทำให้ลอยแบ่งตามลักษณะการสร้างฟองแก๊ส** มี 3 วิธี ดังนี้ (Lundgren, 1976)

1) Electrolytic Flotation (Barrett, 1975)

กระบวนการทำให้ลอยด้วยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงสร้างฟองอากาศชนิดไฮโดรเจน และออกซิเจน ฟองที่ถูกสร้างจะมีขนาดเล็กมากและอัตราน้ำล้นผิวน้อยกว่า 4 เมตร/ชั่วโมง นิยมใช้กับถัง sludge thickener และโรงบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กขนาด 10-20 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

2) Dispersed-Air Flotation (Sherfold, 1984)

กระบวนการลอยด้วยการทำให้กระจัดกระจายมี 2 ลักษณะ คือ การทำให้ลอยในรูปของโฟม และการทำให้ลอยในรูปของฟอง แต่กระบวนการนี้ไม่เหมาะสมสำหรับน้ำเสีย เพราะทำให้เกิดฟองอากาศที่ขนาดใหญ่และความปั่นป่วนสูง และมีการนำไปใช้ในการแยกสาหร่ายที่มีความเข้มข้นสูง

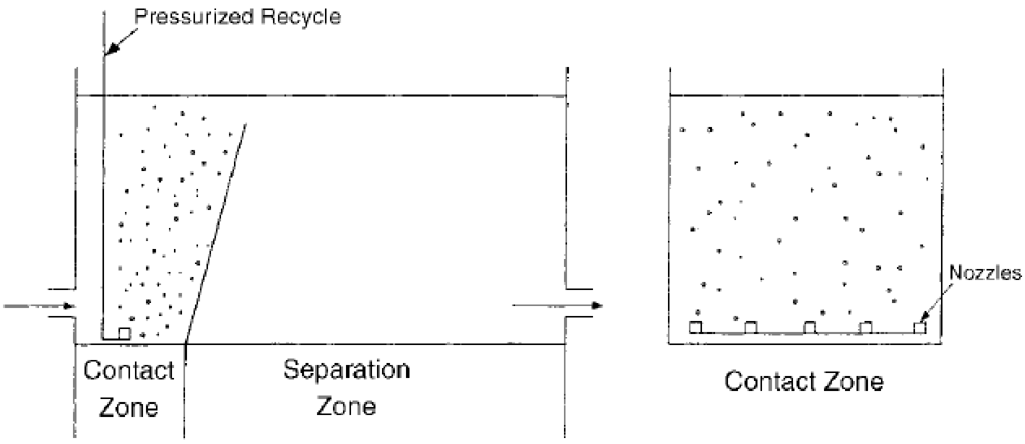
3) Dissolved-air flotation (DAF) (Barrett, 1975)

กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย สร้างฟองอากาศโดยการอัดอากาศที่ความดันประมาณ 4-5 บรรยากาศ แล้วปล่อยอากาศความดันสูงเข้าสู่น้ำเสีย ทำให้ความดันอากาศลดลงเป็นความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-100 ไมครอน ฟองอากาศจะจับตัวกับอนุภาคแขวนลอยกลายเป็นฟล็อกแล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ จากนั้นเครื่องกวาดจะทำการกวาดอนุภาคต่างๆ ที่ลอยตัวแยกออกมาไปกำจัดต่อไปส่วนน้ำใสจะออกทางด้านล่างของถัง ระบบนี้เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียเนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงมากในการเดินระบบ เพราะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อทำให้เกิดความดัน

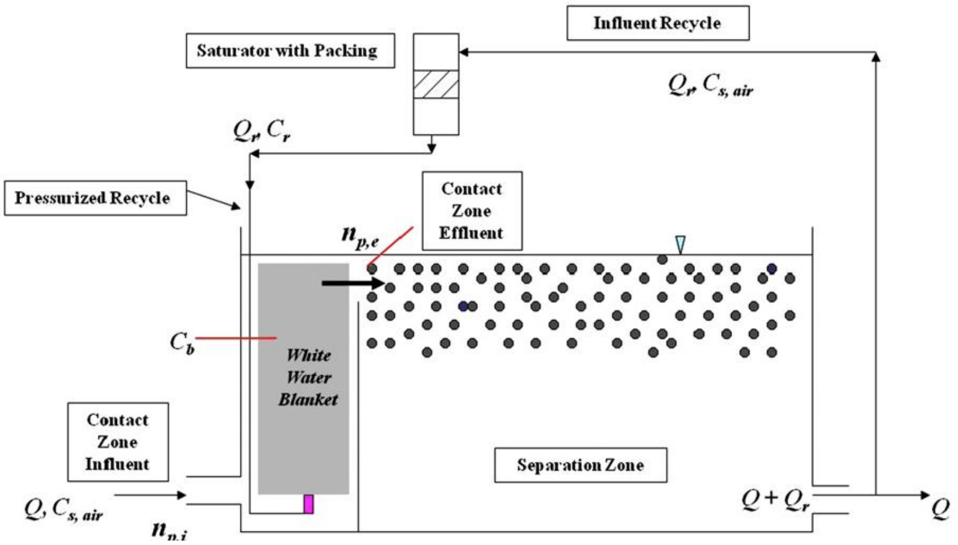
2.4.2 กลไกการทำให้ลอย

กระบวนการทำให้ลอยมักเกิดกลไกแบบยึดติด (Attachmech mechanism) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่มีความต่อเนื่องกัน คือ ส่วนสัมผัส (Contact zone) คือ ส่วนที่ฟองอากาศมีการสัมผัสและเกาะติดกับอนุภาคที่ปนเปื้อนอยู่ในเฟสน้ำ และส่วนแยก (Separation zone) คือ ส่วนที่อนุภาค

เกาะติดกับฟองอากาศแล้วลอยตัวและแยกออกจากกระแสน้ำดังรูปที่ 2-3 และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกอนุภาค ควรให้น้ำเสียก่อนเข้ากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายผ่านการบำบัดขั้นต้นก่อน เช่น กระบวนการโคแอกกูเลชัน



ภาพที่ 2-3 องค์ประกอบถังทำให้ลอยประกอบด้วย ส่วนสัมผัส และส่วนแยก
(J. K. Edzwald และคณะ, 1990)



ภาพที่ 2-4 ส่วนสัมผัสและส่วนแยกในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย
(J. K. Edzwald, 2010)

1) ส่วนสัมผัส (Contact zone)

ส่วนสัมผัสของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย เป็นส่วนที่ทำให้ฟล็อกของอนุภาคและฟองอากาศมีโอกาสสัมผัสและเกาะติดกัน จากนั้นความหนาแน่นของฟล็อกที่รวมตัวกับ

ฟองอากาศจะมีค่าน้อยลงกว่าน้ำจึงมีแนวโน้มลอยตัวขึ้นเมื่ออยู่ในน้ำ ประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นกับปริมาณอากาศที่เหมาะสมหรือเพียงพอต่อการสัมผัส ซึ่งความสามารถในการละลายของอากาศที่ความดันอากาศต่างๆสามารถคำนวณได้จากกฎของเฮนรี่ตามสมการ 2-13

$$X = \frac{yP}{H} \qquad \text{2-13}$$

โดยที่ X = สัดส่วนโมลของอากาศที่ละลายในน้ำ (โมลต่อโมล)
y = สัดส่วนโมลของก๊าซในอากาศ
P = ความดันอากาศ (บาร์)
H = ค่าคงที่ของเฮนรี่ (บาร์ต่อโมล)

การคำนวณความเข้มข้นอนุภาคโดยมวลของฟองอากาศที่แขวนลอยอยู่ในส่วนสัมผัส (Mass concentration)

$$C_b = \{\frac{e \times (C_r - C_{s,air}) \times R - k}{1 + R}\} \qquad \text{2-14}$$

โดยที่ C_b = ความเข้มข้นโดยมวลของฟองอากาศที่แขวนลอยส่วนสัมผัส
e = ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ
C_r = ความเข้มข้นอากาศละลายในน้ำที่ออกจากถังอัดความดัน
$C_{s,air}$ = ความเข้มข้นอากาศละลายน้ำที่เข้าส่วนสัมผัส
R = อัตราน้ำรีไซเคิลน้ำ
k = การขาดดุลของอากาศ

กำหนดให้ น้ำที่ผ่านกระบวนการฟล็อกคูเลชันแล้วอิ่มตัว ดังนั้น k = 0

การคำนวณความเข้มข้นอนุภาคโดยปริมาตรที่แขวนลอยอยู่ในส่วนสัมผัส (Volume concentration)

$$\varphi_b = \frac{C_b}{\rho_{bm}} \qquad \text{2-15}$$

โดยที่ φ_b = ความเข้มข้นโดยปริมาตรที่แขวนลอยอยู่ในส่วนสัมผัส
ρ_{bm} = ความหนาแน่นอากาศชื้น

การคำนวณจำนวนอนุภาคฟองอากาศแขวนลอยอยู่ในส่วนสัมผัส (Number concentration)

$$n_b = \frac{\varphi_b}{\pi \times d_b^3/6} \qquad \text{2-16}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยที่ n_b = จำนวนอนุภาคฟองอากาศแขวนลอยอยู่ในส่วนสัมผัส
d_b = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฟองอากาศ

การคำนวณขนาดเส้นผ่าศูนย์ของฟองอากาศ

$$d_{cb} = \frac{4 \times \sigma}{\Delta P} \qquad 2\text{-}17$$

โดยที่ d_{cd} = เส้นผ่าศูนย์กลางฟองอากาศ (critical bubble diameter)
σ = แรงตึงผิวของน้ำ (surface tension)
ΔP = ความดันที่ออกจากหัวจ่ายฟองอากาศ

การคำนวณความหนาแน่นของฟองอากาศเมื่อรวมตัวกับอนุภาค

$$\rho_{pb} = [\frac{\rho_p \times d_p^3 + N_{ab} \times (\rho_b \times d_b^3)}{d_p^3 + (N_{ab} \times d_b^3}] \qquad 2\text{-}18$$

โดยที่ ρ_{pb} = ความหนาแน่นของฟองอากาศเมื่อรวมตัวกับอนุภาค
ρ_p = ความหนาแน่นอนุภาค
d_b = ขนาดเส้นผ่าศูนย์อนุภาค
N_{ab} = จำนวนฟองอากาศที่ยึดเกาะกับอนุภาค
ρ_b = ความหนาแน่นอากาศที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 25 ℃
d_b = ขนาดเส้นผ่าศูนย์ฟองอากาศ

กำหนด ให้ฟองอากาศหนึ่งฟองยึดเกาะกับอนุภาคหนึ่งอนุภาค N_{ab} = 1

การคำนวณขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศเมื่อรวมตัวกับอนุภาค

$$d_{pb} = [d_p^3 + N_{ab} \times (d_b^3)]^{\frac{1}{3}} \qquad 2\text{-}19$$

โดยที่ d_{pb} = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศเมื่อรวมตัวกับอนุภาค

การคำนวณความเร็วลอยตัวขึ้นของฟองอากาศ (Stokes equation)

$$V_b = \frac{g \times (\rho_w - \rho_b) \times d_b^2}{18 \times \mu_w} \qquad 2\text{-}20$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สำหรับ ฟองอากาศขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอน ที่มีลักษณะกลม และค่าเรย์โนด์นัมเบอร์น้อยกว่า 1 ซึ่งเป็นการไหลแบบลามินาร์รอบฟองอากาศ

การคำนวณความเร็วลอยตัวขึ้นของฟองอากาศเมื่อรวมตัวกับอนุภาค (Modified stokes equation)

$$V_{pb} = \frac{4 \times g \times (\rho_w - \rho_{pb}) \times d_{pb}^2}{3 \times K \times \mu_w} \qquad \text{2-21}$$

โดยที่ ρ_{pb} = ความหนาแน่นของฟองอากาศเมื่อรวมตัวกับอนุภาค

K = ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะของรูปร่างการรวมตัวของอนุภาคและฟองอากาศ

สำหรับ K = 24 เมื่ออนุภาคขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ 40 ไมครอน ยึดเกาะกับฟองอากาศขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่า 100 ไมครอน K = 45 เมื่ออนุภาคขนาดใหญ่กว่าฟองอากาศที่ยึดเกาะ

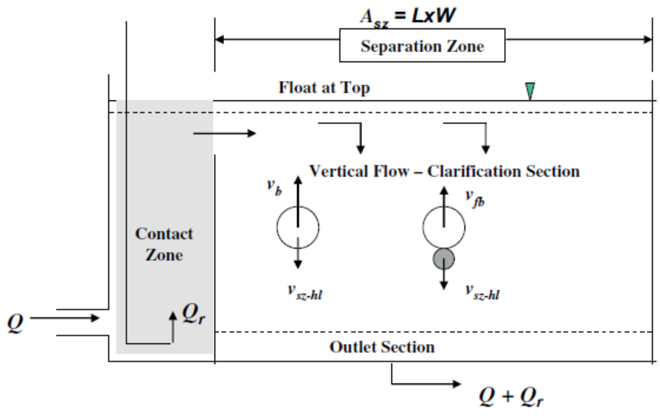
1) ส่วนแยก (Separation zone)

ส่วนแยกเป็นส่วนที่มีหน้าที่ในการแยกอนุภาคฟล็อคที่เกาะติดกับฟองอากาศและฟองอากาศอิสระออกจากเฟสน้ำ โดยอนุภาคแขวนลอยที่เกาะติดกับฟองอากาศและฟองอากาศอิสระจะสามารถแยกออกจากเฟสน้ำได้ก็ต่อเมื่อมีความเร็วลอยตัวมากกว่าหรือเท่ากับอัตราน้ำล้นผิวของส่วนแยก (V_{hl}) ตามทฤษฎีของ Hazen (แสดงดังรูปที่ 3-5)

$$V_b \text{ และ } V_{fb} \quad \geq V_{hl} = \frac{Q}{A_{sz}} \qquad \text{2-22}$$

โดยที่ A_{sz} = พื้นที่ผิวส่วนแยก

Q = อัตราการไหลของน้ำเสีย



ภาพที่ 2-5 การแยกตัวของอนุภาคแขวนลอยที่เกาะติดกับฟองอากาศและฟองอากาศอิสระออกจากเฟสน้ำ (J. K. Edzwald, 2010)

2.4.3 โมเดลทางคณิตศาสตร์การชนกันระกว่างอนุภาคและฟองอากาศในส่วนสัมผัส

1) โมเดล Heterogeneous Flocculation-Based (Tambo และคณะ, 1986) กรณีอนุภาคฟล็อกยึดเกาะกับฟองอากาศขณะชน

$$\frac{dN_{f,i}}{dt} = -k \times N_b \times (\alpha_{f,i} \times N_{f,i} - \alpha_{f,i-1} \times N_{f,i-1}) \quad ; (i = 1 - m_f) \qquad 2\text{-}23$$

กรณี อนุภาคไม่ยึดเกาะกับฟองอากาศ

$$\frac{dN_{f,0}}{dt} = -k \times N_b \times \alpha_0 \times N_{f,0} \quad ;(i = 0) \qquad 2\text{-}24$$

โดยที่

$N_{f,I}$ = ความเข้มข้นของอนุภาคฟล็อคเมื่อเข้ายึดเกาะกับฟองอากาศ

$N_{f,0}$ = ความเข้มข้นของอนุภาคฟล็อคเมื่อไม่มีการยึดเกาะฟองอากาศ

N_b = ความเข้มข้นฟองอากาศ

α_f = ค่าแฟคเตอร์การชนกันแบบยึดเกาะ

α_0 = ค่าแฟคเตอร์การชนกันแบบยึดเกาะแต่ปราศจากการยึดเกาะกับฟองอากาศ

m_f = จำนวนมากสุดของการยึดเกาะกันระหว่างฟองอากาศกับอนุภาค

k = ค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ขึ้นอยู่กับกลไกการเคลื่อนย้ายมวล

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ขึ้นอยู่กับกลไกการเคลื่อนย้ายมวล (k)

$$k = a \times G \times (d_b + d_f)^3 \qquad 2\text{-}25$$

$$G = (\frac{\varepsilon}{\mu})^{1/2} \qquad 2\text{-}26$$

โดยที่

a = ค่าคงที่

G = ความเร็วแกรเดียนเฉลี่ย

ε = อัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย

μ = ความหนืดน้ำ

d_b = เส้นผ่าศูนย์กลางฟองอากาศ

d_f = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฟล็อค

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เนื่องจากขนาดของฟองอากาศที่เกิดจากกระบวนการการอัดอากาศด้วยความดันมีขนาดอยู่ในช่วง 10-100 ไมครอน ดังนั้นหากต้องการเพิ่มอัตราการชนกันระหว่างฟองอากาศและฟล็อคจึงจำเป็นต้องปรับที่ขนาดของฟล็อคแทน

2) โมเดล White Water Collector (J. K. Edzwald, 1995)

การลอยตัวขึ้นของฟองอากาศในส่วนสัมผัสมีลักษณะคล้ายการกรอง การชนกันระหว่างอนุภาคและฟองอากาศที่ลอยตัวขึ้น สามารถพิจารณาได้จากการเคลื่อนย้ายมวลของอนุภาคเพื่อสะสมที่ผิวน้ำ โดยคำนวณประสิทธิภาพการชนกันของอนุภาคกับฟองอากาศได้ตามสมการ ดังนี้

กรณีการชนกันเนื่องจากการแพร่ (Brownian diffusion)

$$\eta_D = 6.18 \times \left(\frac{T \times k_b}{g \times (\rho_w - \rho_b)}\right)^{2/3} \times \left(\frac{1}{d_p}\right)^2 \qquad 2\text{-}27$$

โดยที่ η_D = ประสิทธิภาพการชนกันเนื่องการการแพร่

T = อุณหภูมิ

d_p = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค

d_b = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฟอง

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ

ρ_b = ความหนาแน่นของฟองอากาศ

k_b = ค่าคงที่ของโบล์ทซแมน (Boltzmann’s constant)

กรณีการชนกันเนื่องจากการขัดขวาง (Interception)

$$\eta_I = \left\{\left(\frac{d_p}{d_b}\right)+1\right\}^2 - \frac{3}{2} \times \left\{\left(\frac{d_p}{d_b}\right)+1\right\} + \frac{1}{2} \times \left\{\left(\frac{d_p}{d_b}\right)+1\right\}^{-1} \qquad 2\text{-}28$$

ถ้า $\frac{d_p}{d_b} << 1$ สามารถคำนวณประสิทธิภาพการชนกันเนื่องจากการขัดขวางได้ดังสมการ

$$\eta_I = \frac{3}{2} \times \left(\frac{d_p}{d_b}\right)^2 \qquad 2\text{-}29$$

กรณีการชนกันเนื่องจากการตกตะกอนของฟล็อค

$$\eta_s = [(\frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w - \rho_p}) \times (\frac{d_p}{d_b})^2] \qquad 2\text{-}30$$

การคำนวณประสิทธิภาพรวมของการชนกันระหว่างอนุภาคกับฟองอากาศ

$$\eta_T = \eta_D + \eta_I + \eta_S$$

$$\text{Efficiency} = \left(1 - \frac{\eta_{p,eff}}{\eta_{p,inf}}\right) = \left[1 - \exp \times \left(\frac{-\frac{3}{2} \times \alpha_{pb}\eta_T \times \varphi_b \times V_b \times t_{cz}}{d_b}\right)\right] \qquad 2\text{-}31$$

โดยที่ V_b = ความเร็วลอยตัวขึ้นของฟองอากาศ

t_{cz} = เวลากักเก็บในส่วนสัมผัส

จากตาราง 2-5 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (MDAF) ซึ่งสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella sp.* ที่ความเข้มข้น 1.1×10^5-1.3×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ที่ทำการกวนเร็ว 400 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 นาที และกวนช้า 30 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราน้ำรีไซเคิล 8% และปริมาณฟอง 4600 ppm เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้สารส้มและ PAC เป็นสารโคแอกกูแลนท์ ทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัด คือ 96.8% และ 97-99% ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง 2-8 ประสิทธิภาพการกำกัดสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ((J. K. Edzwald, Wingler, B.J., 1990), (Vlaski และคณะ, 1996), (Kempeneers และคณะ, 2001)

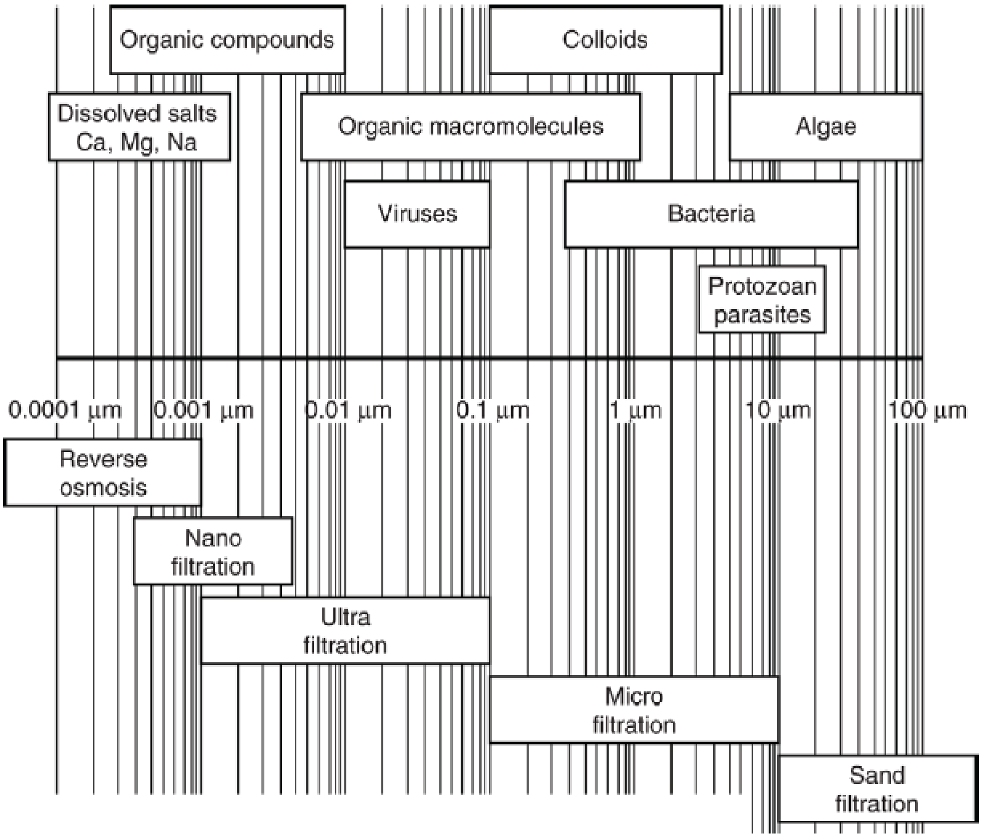
Algae	Source water	Algae abundance cells/mL	pH	Coagulant dose (mg/L)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Flotation/R/bubble concentration (min/ %/ ppm)	Removal Efficiency (%)	Reference
Chlorophyta									
Chlorella vulgaris	Reservoir water	$1.1\text{-}1.3 \times 10^5$	5.5	0.5 mg/L as Al (PACl)	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	97-99	Edzwald and Wingler (1990)
Chlorella vulgaris	Reservoir water	$1.1\text{-}1.3 \times 10^5$	6.5	1.6 mg/L as Al ($Al_2(SO_4)$)	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	96.8	Edzwald and Wingler (1990)
Diatom									
Cyclotella sp.	Reservoir water	$4.7\text{-}5.3 \times 10^4$	5.5	0.5-1 mg/L as Al^+ (PACl)	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	97-99	Edzwald and Wingler (1990)
Cyclotella sp.	Reservoir water	$4.7\text{-}5.3 \times 10^4$	6.5	1.6 mg/L as Al ($Al_2(SO_4)_3$)	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	99.8	Edzwald and Wingler (1990)
Cyanophyta									
Microcystis aeruginosa	Reservoir water	1×10^4;3-3.5 NTU	8	5 mg/L as Fe; 0.5 mg/L Superfloc C-573	1000; 30	10; 8	5; 7; Pressure: 600 kPa; Filtration: 10 m/hr	94.5	Vlaski et al.(1996)

ตาราง 2-9 ประสิทธิภาพการกำกัดสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (J. K. Edzwald และคณะ, 1990), (Vlaski และคณะ, 1996), (Kempeneers และคณะ, 2001)

Algae	Source water	Algae abundance cells/mL	pH	Coagulant dose (mg/L)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Flotation/R/bubble concentration (min/ %/ ppm)	Removal Efficiency (%)	Reference
mixture									
Melosira Cyclotella/ Stephanodiscus	Reservoir water	1.5×10^5	7.74	1.30 mg/L as Al (PACl)	static mixer	3; >7.2	9.5; 6; Pressure: 6 bar; Loading rate: 15 m/h	80	Kempeneers et al. (2001)
synedra		1.2×10^6						76	
Asterionella		4.0×10^4						58	
Chlamydomonas		3.4×10^4						66	
Scenedesmus		4.2×10^4						46	
		2.6×10^4						71	

2.5 กระบวนการกรอง (Filtration) (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

กระบวนการกรองจัดเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสารแขวนลอยในเฟสน้ำมายังสารกรอง หรือช่องว่างระหว่างสารกรองแล้วทำการจับสารกรองหรือสิ่งที่เกาะติดอยู่บนสารกรองก่อนแล้ว เหมาะสำหรับแยกอนุภาคขนาดเล็กที่ใช้เวลาในการตกตะกอนนาน เช่น อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน การประยุกต์ใช้กระบวนการกรองกับน้ำดิบที่ผ่านการแยกด้วยกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อน



ภาพที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับกระบวนการแยก

2.5.1 ลักษณะการกรองน้ำ

1) การกรองแบบติดผิวชั้นกรอง (Surface Filtration) มักมีอนุภาคสะสมตัวอยู่บนสารกรองทำให้เกิดเป็นชั้นเค้ก ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาดเล็ก การกรองลักษณะนี้จะเกิดกรณีน้ำดิบมีความเข้มข้นของอนุภาคสูง สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ

   1.1)เครื่องกรองแบบใช้แผ่นกรอง ซึ่งอาจเป็นผ้า แผ่นโลหะ หรือแผ่นใยสังเคราะห์ เช่น ไมโครสกรีน เป็นต้น

   1.2)เครื่องกรองแบบใช้แท่งกรอง ซึ่งยอมให้น้ำไหลผ่านเท่านั้น ส่วนตะกอนความขุ่นติดค้างบนผิวแท่งกรอง

1.3)เครื่องกรองแบบสารกรองชั่วคราว นิยมใช้ Diatomaceous Earth และPerlite เมื่อเกิดการอุดตันต้องขูดสารกรองทิ้งแล้วทำการฉาบผิวสารกรองใหม่

2) การกรองแบบติดค้างในชั้นกรองเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างระหว่างสารกรอง อนุภาคจึงถูกดักจับภายในชั้นสารกรอง นิยมใช้ทรายเป็นสารกรองสามารถแบ่งตามอัตราการกรองได้ 2 ประเภทดังนี้

2.1)เครื่องกรองทรายแบบกรองช้า (Slow sand filter) หรือถังกรองชีวะ (Bio filter) เหมาะสำหรับน้ำที่มีความขุ่นต่ำ และอัตราการกรองสม่ำเสมอไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี แต่อาศัยสาหร่ายหรือจุลินทรีย์ที่อยู่บนผิวชั้นกรองทำหน้าที่ผลิตสารโคแอกกูแลนท์ออกมาช่วยในการรวมตะกอน การกรองช้าควรมี 3 ขั้นตอน คือ ชั้นกรองทรายหยาบที่อัตรากรอง 20-30 เมตร/วัน ชั้นกรอง prefilter ที่อัตราการกรอง 10-20 เมตร/วัน และชั้นกรองช้าที่อัตราการกรอง 3-7 เมตร/วัน การทำความสะอาดใช้วิธีขูดผิวหน้าของชั้นกรองประมาณ 2-3 นิ้วออกล้างแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ระยะแรกหลังจากทำความสะอาดสารกรองมีประสิทธิภาพการกรองไม่ดี เนื่องจากยังไม่มีการสร้างสารโคแอกกูแลนท์จากสาหร่ายและจุลินทรีย์ จึงควรระบายน้ำขุ่นทิ้งก่อน

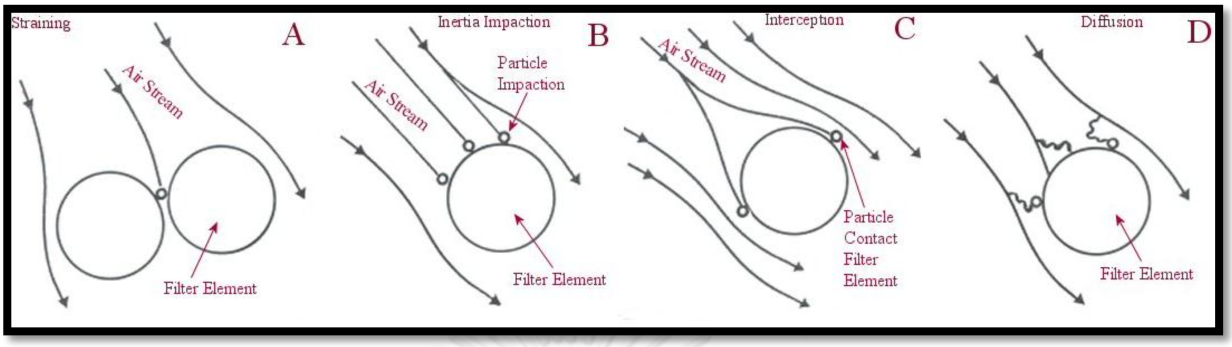
2.2)เครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว (Rapid sand filter) อัตราการกรองน้ำอยู่ในช่วง 4-50 เมตร/ชั่วโมง ทำความสะอาดโดยวิธีล้างย้อนอาจมีการใช้ลมหรือน้ำที่มีแรงดันสูงช่วยในการล้างย้อนเพื่อประสิทธิภาพการล้างย้อนที่ดีขึ้น การกรองเร็วมี 2 ลักษณะ คือ การกรองโดยตรง (Direct filtration) ไม่มีกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนก่อนเข้าสู่การกรองอาจมีการเติมสารเคมีหรือไม่ขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบ และการกรองโดยน้ำผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนมาก่อน

3) การกรองแบบผ่านตัวกลาง (Straining Filtration) เกิดเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างสารกรอง สารกรองจึงทำหน้าที่เสมือนตะแกรงแยกอนุภาคออกจากเฟสน้ำ

ในทางปฏิบัติลักษณะการกรองน้ำ อาจเกิดขึ้นได้ทั้ง 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำที่เข้าสู่กระบวนการกรองและขนาดของช่องว่างระหว่างสารกรอง

2.5.2 กลไกการกรองน้ำ

กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง (Transport Mechanism) ขึ้นอยู่กับขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค พบว่าอนุภาคขนาด 1 ไมครอนจัดเป็นขนาดของอนุภาคที่แยกด้วยกลไกการกรองได้ยากที่สุด กลไกการกรองประกอบด้วย 4 กลไกหลัก คือ



ภาพที่ 2-7 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง (Transport Mechanism)

a) กลไกการติดค้างอยู่บนสารกรอง (Straining) เกิดเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างสารกรอง ทำให้อนุภาคติดอยู่บนหรือภายในชั้นกรอง และเมื่อสัดส่วนระหว่างขนาดของอนุภาคต่อขนาดสารกรอง มากกว่า 0.07 จะมีประสิทธิภาพการแยกอนุภาคเป็น 100%
b) กลไกการตกตะกอน (Sedimentation) เกิดเมื่ออนุภาคมีขนาดค่อนข้างใหญ่ แต่เล็กกว่าช่องว่างระหว่างสารกรองจึงทำให้สามารถเคลื่อนตัวมาตกตะกอนในชั้นสารกรองได้
c) กลไกการดักจับโดยตรง (Interception) เกิดเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน เคลื่อนที่ตามกระแสน้ำไหลเบียดเข้าหาสารกรอง โดยประสิทธิภาพการเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองจะแปรผันตรงกับขนาดและน้ำหนักของสารแขวนลอย ดังนั้นสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน ขนาดอนุภาคยิ่งมากจะสามารถตกตะกอนและติดค้างสารกรองได้ง่าย
d) กลไกการแพร่ (Diffusion) เกิดเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน การเคลื่อนที่เป็นระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน (Brownian Diffusion) และประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จะแปรผกผันกับขนาด เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีโอกาสเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้มากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า

การคำนวณประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรองโดยรวม (Transportation Efficiency, η_T) สามารถคำนวณได้จากผลรวมประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายกรณีการตกตะกอน การดักจับโดยตรง และการแพร่จะได้

$$\eta_T = \eta_{Diffusion} + \eta_{Interception} + \eta_{Sediment}$$

$$\eta_T = \left(\frac{\Delta\rho \times g \times d_E^2}{18 \times \mu \times V}\right) + \left[\frac{3}{2} \times \left(\frac{d_E}{d_P}\right)^2\right] + \left[0.9 \times \left(\frac{K \times T}{d_E \times d_P \times V}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \qquad 2\text{-}32$$

โดยที่ d_P = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสารกรอง

d_E = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคที่ต้องการแยก

V = ความเร็วไหลผ่านตัวกลาง

K = ค่าคงที่โบล์ทซแมน (Boltzmann's constant)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

μ = ความหนืด (กิโลกรัม/เมตร-วินาที)

1) กลไกการจับสารแขวนลอย (Attachment Mechanism)

การทำให้สารแขวนลอยสามารถเกาะจับอยู่บนสารกรอง หรือสารแขวนลอยที่จับอยู่บนสารกรองก่อนแล้วต้องอาศัยกลไกการดูดติดผิว และการทำให้ประจุคอลลอยด์เป็นกลาง เนื่องจากสารกรองและสารคอลลอยด์มักมีประจุลบ จึงสมควรที่จะทำลายประจุของสารชนิดใดชนิดหนึ่งก่อนเพื่อไม่ให้เกิดแรงผลักกัน และหากสามารถเปลี่ยนประจุให้เป็นชนิดตรงข้ามกันได้จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดติดผิวดียิ่งขึ้น ประกอบด้วยกลไกหลัก 5 กลไก คือ

a) การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption) คือ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคและสารกรอง ประสิทธิภาพการดูดติดผิวลักษณะนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิสูงส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้น
b) การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) คือ การยึดติดระหว่างอนุภาคและสารกรอง โดยอนุภาคจะเข้ายึดจับกับรูพรุนหรือช่องว่างระหว่างสารกรอง การดูดติดผิวลักษณะนี้จะให้ประสิทธิภาพสูงเมื่ออุณหภูมิต่ำเพราะจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้ช้าลงและยิ่งจับได้ดียิ่งขึ้น
c) แรงดึงดูดระหว่างมวล (London-Van der waals Forces) คือ การดึงดูดกันระหว่างอนุภาคและสารกรอง มีอำนาจในการดึงดูดต่ำ ทำให้อนุภาคที่ถูกดึงดูดสามารถหลุดออกได้จากการไหลของน้ำที่ผ่านชั้นกรอง
d) การสร้างและรวมตะกอน (Coagulation) คือ กลไกการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคที่มีลักษณะคล้ายคอลลอยด์ เพื่อเพิ่มโอกาสให้อนุภาครวมตัวกันมากขึ้น จากนั้นจึงเคลื่อนตัวเข้าสู่สารกรองแล้วยึดเกาะด้วยกลไกอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น
e) กลไกชีวเคมี (Biological Mechanism) คือ กลไกที่เกิดจากจุลชีพที่อาศัยอยู่ระหว่างช่องว่างของสารกรอง ทำให้ช่องว่างระหว่างสารกรองมีขนาดเล็กลง สามารถดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้

2.5.3 การออกแบบและการคำนวณระบบกรองน้ำ

1) โมเดลทางคณิตศาสตร์ของการกรองน้ำ

การศึกษากลไกกระบวนการกรอง สามารถคำนวณประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคได้จากสมการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการกรอง (Filtration Efficiency Equation) ดังนี้

$$\ln\frac{C}{C_0} = -\frac{3}{2}\times\eta_T\times\alpha\times(1-\varepsilon)\times\frac{H_T}{d_P} \qquad 2\text{-}33$$

โดยที่ $\ln\frac{C}{C_0}$ = ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องกรอง

ε = ความพรุนของสารกรอง

η_T = ประสิทธิภาพการกระทบสารกรอง (single collector efficiency)

α = ประสิทธิภาพการเกาะติดสารกรอง (Collision efficiency)

d_p = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสารกรอง

H_T = ความสูงทั้งหมดของชั้นสารกรองตาราง 2-10

คุณสมบัติทั่วไปของสารกรองชนิดทรายซิลิกา ถ่านแอนทราไซท์ แอคทิเวเต็ดคาร์บอน การ์เนท และอิลเมนไนท์ ตามลำดับ

Typical Properties of common Filter Media for Granular-Bed Filter (Cleasby and Fan, 1981; Dharmarajah and Cleasby, 1986; Cleasby and Woods, 1975)

	Silica sand	Anthracite coal	Granular activated carbon	Garnet	Ilmenite
Grain density (Kg/m³)	2650	1450-1730	1300-1500	3600-4200	4200-4600
Loose-bed porosity; ε_0	0.42-0.47	0.56-0.60	0.5	0.45-0.55	*
Sphericity; Ψ	0.7-0.8	0.46-0.60	0.75	0.6	**

* For virgin carbon, pores filled with water, density increase when organics are adsorbed.

** Not available.

จากสมการที่ 2-33 พบว่าการเตรียมน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการกรองอย่างเหมาะสม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกรอง เช่น การเติมสารโคแอกกูแลนท์ในกระบวนการโคแอกกูเลชันส่งผลให้ η_T และ α เข้าใกล้ 1 มากยิ่งขึ้นเพราะอนุภาคจะถูกทำลายเสถียรภาพ จึงเป็นการเพิ่มโอกาสการกระทบและเกาะติดสารกรอง

การคำนวณหาการสูญเสียความดัน (Head loss)

กรณีน้ำไหลผ่านชั้นกรวดส่งผลให้รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ดังสมการที่ 3-35 และกรณีน้ำไหลผ่านชั้นทรายกรองมีรูปแบบการไหลเป็นลามินาร์ (Laminar flow) ดังสมการที่ 3-36 (Reynolds และคณะ, 1996)

$$\frac{\Delta H}{L}=\left[\frac{32\times\mu\times V_F}{D^2}\right]_{laminar}+\left[\frac{4\times f\times\rho\times V_F^2}{2\times D}\right]_{turbulent} \qquad 2\text{-}34$$

$$\frac{\Delta H}{L}=\frac{\left(150\times\upsilon\times V_F\times(1-\varepsilon)^2\times\sum(x/d^2)\right)}{g\times\psi^2\times\varepsilon^2}+\frac{1.75\times V_F^2\times(1-\varepsilon)\times\sum(x/d)}{\varepsilon^3\times\psi\times g} \qquad 2\text{-}35$$

$$\frac{\Delta H}{L}=\frac{\left(5\times\mu\times V_F\times(1-\varepsilon)^2\times(6/\psi)^2\times\sum(x/d^2)\right)}{\varepsilon^3} \qquad 2\text{-}36$$

โดยที่

ΔH = ความดันลด (Head loss)

V_F = อัตราเร็วในการกรอง

ε = ความพรุนของสารกรอง

ψ = ดัชนีของความกลม

ν = ความหนืดเชิงจลศาสตร์ (kinematic viscosity) $= \frac{\mu}{\rho}$

X = ปริมาณสารกรองที่มีขนาด d ต่อปริมาณสารกรองทั้งหมด

L = ความหนาสารกรอง

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

2) การเลือกสารกรอง (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

ขนาดของสารกรองถือว่ามีความสำคัญต่อคุณภาพน้ำที่ถูกกรองและเฮดสำหรับการกรองเป็นอย่างมากโดยขึ้นกับขนาดรูพรุนของสารกรองและพื้นที่ผิวสารกรอง สารกรองที่นิยมใช้ ได้แก่ ทรายซิลิกา ทรายกาเน็ท และแอนทราไซด์ หากสารกรองมีขนาดเล็กจะทำให้ได้น้ำที่มีคุณภาพดี แต่จะส่งผลให้ชั้นกรองอุดตันเร็วและมีการสูญเสียเฮดสูง ส่วนสารกรองที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะส่งผลให้คุณภาพน้ำที่ได้แย่ ดังนั้นการเลือกขนาดสารกรองให้เหมาะสมกับลักษณะน้ำที่เข้าเครื่องกรองถือว่าจำเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ควรคัดเลือกขนาดของสารกรองให้มีใกล้เคียงกันตามค่า U.C. (Uniform-Size Media) ไม่ต่ำกว่า 1.3 เพราะจะเป็นการสิ้นเปลือง

การคำนวณขนาดของสารกรอง กรณีการใช้สารกรอง 2 ชนิด ตามสมการดังนี้

$$d_1(60\%)\big/d_2(60\%)=\left(\frac{S.G.2-1}{S.G.1-2}\right)^{0.52} \qquad 2\text{-}37$$

โดยที่ $S.G.$ = ความถ่วงจำเพาะของสารกรอง

$d_{60\%}$ = ขนาดของสารกรองที่ความถี่สะสม 60%

การคำนวณความหนาของชั้นกรอง ดังสมการ

$$\frac{V \times \pi \times (\psi \times d)^3}{6} = l \times (1 - \varepsilon) \qquad 2\text{-}38$$

โดยที่ N = จำนวนสารกรองในชั้นกรอง

ψ = ดรรชีความกลม (Sphericity)

d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเม็ดสารกรอง

ε = ความพรุนของชั้นกรอง

$= \frac{\text{พื้นที่ผิวของวัสดุทรงกลม}}{\text{พื้นที่ผิววัสดุกรองที่มีปริมาตรเท่ากัน}}$

l = ความหนาชั้นกรอง

การคำนวณพื้นที่ผิวสารกรองทั้งหมด ดังสมการ

$$A = \frac{6 \times l \times (1 - \varepsilon)}{\psi \times d} \qquad 2\text{-}39$$

จากสมการที่ 2-38 และ 2-39 พบว่าประสิทธิภาพกระบวนการกรองแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวทั้งหมด เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดข้างต้นที่เหมือนกัน และการใช้สารกรองที่มีค่าความกลมต่ำ ควรเลือกขนาดให้มีขนาดของสารกรองที่จำนวนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (effective size) ต่ำจึงจะสามารถกรองได้ประสิทธิภาพเทียบเท่ากับสารกรองที่มีความกลมมาก

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นทราย โดยวิธีของ Amirtharajar

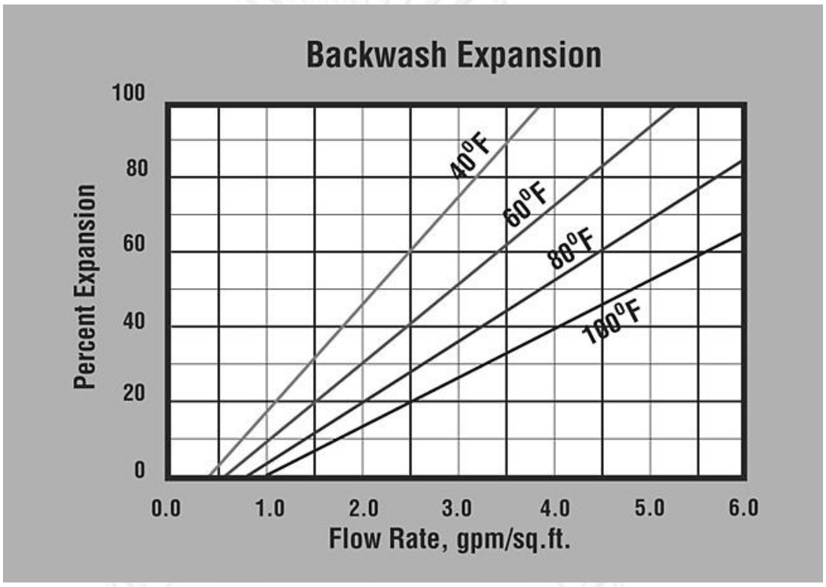
$$V_f = \frac{0.00381 \times (d_{60\%})^{1.82} \times [\gamma \times (\gamma_m - \gamma)]^{0.94}}{\mu^{0.88}} \qquad 2\text{-}40$$

โดยที่ V_f = อัตราเร็วน้อยสุดที่ทำให้ชั้นทรายขยายตัวพอดี (แกลลอน/นาที-ตารางฟุต)

$\gamma,\ \gamma_m$ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำและสารกรองตามลำดับ (ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต)

μ = ความหนืดของน้ำ (Centipoise)

จากสมการ 2-40 พบว่าการคำนวณเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของชั้นทราย โดยวิธีของ Amirtharajar ไม่สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของสารกรองชนิดอื่นได้ การหาค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของสารกรองชนิดถ่านจึงนิยมใช้กราฟอัตราการล้างย้อนที่ทำให้ชั้นถ่านขยายตัวในระดับต่างๆแทน



ภาพที่ 2-8 อัตราการล้างย้อนที่ทำให้ชั้นถ่านขยายตัวที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

การตรวจสอบอัตราเร็วน้อยสุดที่ทำให้ชั้นทรายขยายตัวด้วยการคำนวณสมการเรย์โนล (Reynold Number) ดังนี้

$$Re_f = \frac{\rho \times V_f d_{60\%}}{\mu} \qquad 2\text{-}41$$

โดยที่ Re_f = ค่าเรย์โนล (Reynold Number)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (ปอนด์-วินาที^{2}/ฟุต^4)

จากสมการ 2-41 หากค่าเรย์โนล (Reynold Number) มีค่าน้อยกว่า 10 ไม่ต้องทำการปรับแก้ค่าอัตราเร็วน้อยสุดที่ทำให้ชั้นทรายขยายตัว แต่หากมากกว่า 10 ต้องปรับแก้ด้วยค่า K_R

$$K_R = 1.775 \times Re_f^{-0.272} \qquad 2\text{-}42$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

คำนวณอัตราเร็วการตกตะกอนของสารกรองอย่างอิสระ (V_s) ดังสมการ

$$V_s = 8.45 \times V_f \quad \text{2-43}$$

คำนวณค่าเรย์โนลสำหรับอัตราเร็วการตกตะกอนของสารกรองอย่างอิสระจากความสัมพันธ์

$$Re_0 = 8.45 \times Re_f \quad \text{2-44}$$

คำนวณสัมประสิทธิ์การขยายตัวของชั้นกรอง (n)

$$n = 4.45 \times Re_0^{-0.1} \quad \text{2-45}$$

จากสมการ 2-45 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของชั้นกรองสารกรองทรายมีค่าอยู่ในช่วง 3.0-3.5

คำนวณอัตราเร็วน้ำไหลผ่านชั้นกรอง (V)

$$V = K \times \varepsilon^n \quad \text{2-46}$$

คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและความหนาชั้นกรอง ตามสมการ

$$\frac{l_e}{l_f} = \frac{(1-\varepsilon f)}{(1-\varepsilon e)} \quad \text{2-47}$$

โดยที่ l_e = ความหนาของชั้นกรองขณะขยายตัว

l_f = ความหนาของชั้นกรองขณะปกติ

ε_f = ความพรุนชั้นกรองขณะปกติ

ε_e = ความพรุนชั้นกรองขณะขยายตัว

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความพรุนชั้นกรองขณะขยายตัวมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการล้างย้อนดังนี้

$$V_b = k \times \varepsilon_e^n \quad \text{2-48}$$

3) การออกแบบรางระบายน้ำที่ผ่านการกรองแล้วและน้ำล้างเครื่องกรอง

ระบบระบายน้ำสำหรับระบบกรองมี 2 ประการ คือ การรวบรวมน้ำที่กรองแล้วส่งไปเก็บในบ่อน้ำใส และกระจายน้ำเพื่อล้างเครื่องกรอง โดยการออกแบบจะขึ้นกับอัตราการล้างย้อนเนื่องจากอัตราการล้างย้อนมีค่าสูงกว่าอัตราการกรอง สามารถออกแบบได้ 2 รูปแบบ คือระบบระบายน้ำแบบท่อ และแบบพื้นหรืออาจเรียกว่า พื้นปลอมการ ส่วนการออกแบบรางน้ำสำหรับรับน้ำล้างเครื่องกรอง

ควรมีลักษณะเป็นรูปตัวยู หรือตัววี และควรออกแบบให้ความสูงของรางอยู่ในระดับที่น้ำสกปรกจะสามารถลำเลียงออกนอกเครื่องกรองได้หมดและไม่ทำให้สารกรองหลุดออกไปด้วยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

ความสูงรางวัดจากผิวชั้นกรอง = ระยะที่ชั้นกรองขยายตัวเพิ่ม + ความลึกราง + 6 นิ้ว

กรณีออกแบบรางระบายน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้าและที่ก้นรางไม่มีความชันคำนวณจากสมการดังนี้

$$D = 1.73 \times \left(\frac{Q}{g \times W}\right)^{0.33} \qquad 2\text{-}49$$

โดยที่	D	= ความสูงของน้ำในรางที่จุดรับน้ำเข้าราง	= ความลึกของราง (ฟุต)
	Q	= อัตราน้ำล้นเข้ารางระบายน้ำสำหรับล้างย้อน (ลูกบาศก์ฟุต/วินาที)	
	W	= ความกว้างราง	
	g	= ความเร่งโน้มถ่วงของโลก	= 32.2 ฟุต/วินาที

4) การออกแบบชั้นวัสดุรองรับสารกรอง

ส่วนประกอบนี้ใช้สำหรับรองรับและป้องกันไม่ใช้สารกรองหลุดออกนอกระบบกรองน้ำ นิยมใช้กรวดหรือหินที่มีขนาดตั้งแต่ ¼ -2 นิ้ว เรียงตัวกันเป็นชั้นๆ และสูงประมาณ 10-24 นิ้ว หากต้องการจำกัดความสูงของเครื่องกรองควรใช้ Nozzle แทนการใช้วัสดุรองรับและท่อเจาะรู

5) การออกแบบระบบล้างเครื่องกรอง

กรณีกรองเร็วล้างถังกรองโดยปล่อยน้ำเข้าถังกรองจากด้านล่างถังผ่านชั้นกรองด้วยอัตราการไหลที่สูงประมาณ 15-20 แกลลอน/นาที/ตารางฟุต เป็นเวลา 6 นาที ส่งผลให้ชั้นกรองเกิดการขยายตัว ทำให้สิ่งสกปรกที่ติดอยู่ในชั้นกรองหลุดออก โดยให้สารกรองเกิดการขยายตัวประมาณ 30-40% และชั้นบนสุดมีความพรุนประมาณ 70% แต่การล้างย้อนสารกรองที่มีการเติมโพลีเมอร์ต่างๆ ควรกวนชั้นทรายด้วยลมพร้อมกับการล้างย้อน

จากตาราง 2-5 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายสีเขียวที่มีขนาดเล็กกว่า 3 ไมครอน ที่ความเข้มข้น 3000 เซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูแลชันร่วมกับกระบวนการกรอง โดยใช้กวนเร็ว 1000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที และกวนช้า 10 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 นาที ซึ่งใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ที่ 1 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นสารโคแอกกูแลนท์และ แอนทราไซด์และทรายเป็นสารกรอง มีประสิทธิภาพการบำบัด 48% (Petrusevski และคณะ, 1993)

ตาราง 2-11 ประสิทธิภาพการกำกัดสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการกรอง

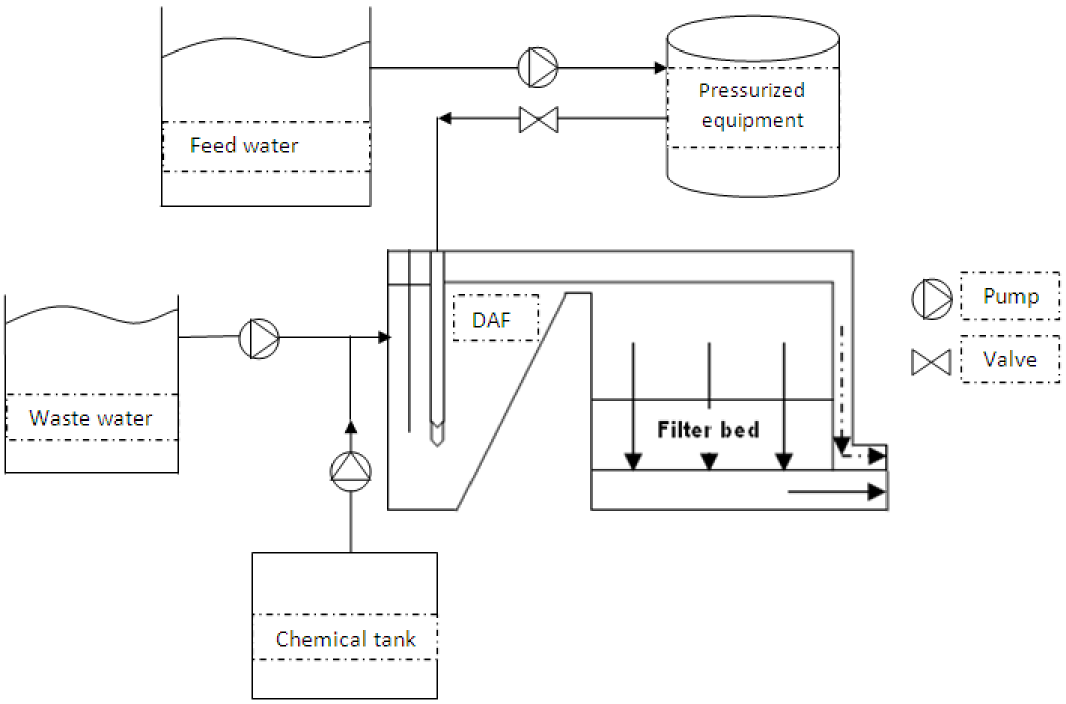
(J. K. Edzwald, Wingler, B.J., 1990; Vlaski และคณะ, 1996),(Kempeneers และคณะ, 2001)

Algae	Source water	Algae abundance cells/mL	Coagulant dose (mg/L)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	media	Loading rate (m/hr)	Removal Efficiency (%)	Reference
Cyanobacteria synechococcus	Reservoir water	~1.2×10^{6} clumps/mL	Pre-chlorination 1.25-1.68 mg/L as Al ($Al_2(SO_4)_3$)	Flash mixing	-	0.4 m no.2 anthracite; 0.45 m 16/30 sand	5; run time 42 hours	95 (not consistent)	Johnson et al. (1977)
Diatom Stephanodiscus hantzscii	Natural water	2000 cells/mL	1 mg/L as Fe ($FeCl_3$)	1000; 30	10; 7	200 mm; anthracite/sand	10	97	Petrusevski et al. (1993)
Green μ-algae (< 3 μm)	Natural water	3000 cells/mL	1 mg/L as Fe ($FeCl_3$)	1000; 30	10; 7	200 mm; anthracite/sand	10	48	Petrusevski et al. (1993)
Rhodophyta Rhodomonas minuta	Natural water	500 cells/mL	1 mg/L as Fe ($FeCl_3$)	1000; 30	10; 7	200 mm; anthracite/sand	10	5	Petrusevski et al. (1993)
Algae (species not specified)	-	Various algal concentration	100 mg/L as PAC; 0.5 mg/L as 423K (50% ionic groups)	Static mix	-	0.35 m activated carbon; 0.7 m sand; 0.1 m gravel	10	95	Klute and Neis -1983

2.6 **กระบวนการรวม (Hybrid Process)**

อนุภาคสาหร่ายจัดเป็นอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเล็ก ความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ และมีค่าซีต้าโพเทนเชียลเป็นค่าลบค่อนข้างสูง จึงทำให้มีเสภียรภาพในการแขวนลอยอยู่ในน้ำ และสาหร่ายยังส่งผลต่อระบบผลิตน้ำประปา เช่น การเพิ่มปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้สำหรับกำจัดความขุ่น การก่อให้เกิดผลพลอยได้ที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Disinfection by product) และการลดอายุการใช้งานของสารกรองในกระบวนการกรองเร็ว เนื่องจากสารกรองอุดตันเร็วขึ้นจึงทำให้ต้องทำการล้างย้อนบ่อย นอกจากนี้เซลล์สาหร่ายบางสายพันธุ์มีแฟคเจลลาทำให้สามารถเคลื่อนที่หลบหลีกฟล็อก และเคลื่อนที่ผ่านกระบวนการแยกได้ เช่น สาหร่ายแคลมิโดโมแนส (*Chlamydomonas*) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกเซลล์ลดลง และพบว่าสาหร่ายบางสายพันธุ์มีอากาศบรรจุอยู่ภายในเซลล์ ทำให้เซลล์มีความหนาแน่นต่ำกว่าสาหร่ายโดยทั่วไป เช่น สาหร่ายไมโครซิสติส แอรูจิโนซา (*Microcystis aeruginosa*) ในทางตรงกันข้ามพบว่าสาหร่ายจำพวกไดอะตอม มักจะมีผนังหุ้มเซลล์ที่หนัก ส่งผลให้ความหนาแน่นสูง อย่างไรก็ตามสาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์แสง และสร้างก๊าซออกซิเจนได้ทำให้ลดอัตราการตกตะกอนของฟล็อค (Henderson และคณะ, 2008) ทำให้สาหร่ายมีประสิทธิภาพในการแยกด้วยกระบวนการใดเพียงหนึ่งกระบวนการได้ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ เช่น กระบวนการตกตะกอน หรือกระบวนการทำให้ลอย

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากระบวนการแยกสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลล่า (*Chlorella sp.*) ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันและการกรอง เนื่องจากสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลล่ามีขนาดเล็ก และมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ จึงมีแนวโน้มที่จะแขวนลอย จึงเลือกกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคเซลล์สาหร่าย โดยมีการเติมสารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง (Liu และคณะ, 1999) ราคาถูก และเป็นที่นิยมจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย แต่เนื่องจากเซลล์สาหร่ายตามธรรมชาติมีทั้งกรณีเซลล์อายุน้อยและอายุมาก ซึ่งจะส่งผลให้ขนาดและค่าซีต้าโพแทนเชียลมีค่าเปลี่ยนแปลง จากตารางที่ 3-1 และ 3-2 พบว่าสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลล่าที่มีอายุเพิ่มขึ้นจะมีค่าซีต้าโพแทนเชียลลดลง ทำให้มีแนวโน้มตกตะกอนมากกว่าเซลล์ที่มีอายุน้อยกว่า งานวิจัยจึงเพิ่มกระบวนการกรองเพื่อใช้ในการแยกสาหร่ายออกจากเฟสน้ำ และเพิ่มประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายด้วย โดยกระบวนการแยกเซลล์สาหร่าย ดังนี้



ภาพที่ 2-9 กระบวนการไฮบริดจ์สำหรับแยกสาหร่ายออกจากเฟสน้ำ

จากภาพ 2-9 แสดงขั้นตอนของกระบวนการในการกำจัดสาหร่ายด้วยถังแนวนอน เริ่มด้วยการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคเซลล์สาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน จากนั้นตามด้วยกระบวนการฟล็อคคูเลชันเพื่อเพิ่มโอกาสให้สาหร่ายที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเกิดการรวมตัวกันในรูปของฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แล้วทำการเติมฟองอากาศใส่น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งส่วนนี้เรียกว่ากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ฟล็อคจะจับตัวกับฟองอากาศ ส่งผลให้อนุภาคที่รวมตัวกับฟล็อค และเกาะกับฟองอากาศแล้วมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ จึงมีแนวโน้มลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ จากนั้นทำการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากผิวน้ำ ส่วนฟล็อคที่ไม่ยึดเกาะกับฟองอากาศมีแนวโน้มที่จะตกตะกอน ซึ่งจะไหลตามแนวการไหลของน้ำผ่านสารกรองทำให้ฟล็อคเหล่านี้ติดค้างอยู่บนสารกรอง และน้ำใสไหลออกทางด้านล่างของถังโดยจะต้องทำการล้างย้อนเมื่อสารกรองอุดตัน

2.7 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis Experiments) (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551)

1) การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปเหมาะสำหรับศึกษาผลกระทบตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป สามารถศึกษาได้ทั้งสิ่งที่ส่งผลกระทบหลัก และส่งผลกระทบร่วม การออกแบบการทดลองไม่ซับซ้อน แต่จะส่งผลให้มีจำนวนชุดการทดลองมาก โดยสามารถคำนวณจำนวนชุดการทดลองดังสมการที่ 2-50

$$N = a^k \qquad 2\text{-}50$$

โดยที่ N = จำนวนชุดการทดลองทั้งหมด
a = จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษา
k = จำนวนปัจจัยที่ทำการศึกษา

2) การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน

การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนเหมาะสำหรับออกแบบการทดลองที่ต้องการประหยัดเวลาและเงินทุนในการทำการทดลอง เพราะจะสร้างชุดการทดลองน้อยกว่าแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป แต่จะตีความยากและซับซ้อนในการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยทั่วไปนิยมใช้ปัจจัยที่ 2 ระดับ สามารถคำนวณจำนวนชุดการทดลองได้ดังสมการที่ 2-51

$$N = 2^{k-p} \qquad 2\text{-}51$$

โดยที่ p = 1, 2 หรือ 3 ก็ได้แล้วแต่ผู้ออกแบบ

3) การออกแบบแบบ Flodover

การออกแบบการทดลองแบบ Flodover สามารถเพิ่มผลกระทบร่วมเข้าไปในการทดลองเริ่มต้น ทำให้สามารถพิจารณาความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากการทดลองเริ่มต้นเปรียบเทียบกับ การทดลองที่มีการเพิ่มใหม่

4) การออกแบบแบบ Plackett-Burman

การออกแบบแบบ Plackett-Burman ใช้สำหรับการออกแบบที่ต้องการลดจำนวนปัจจัยลงให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่ส่งผลกระทบสำคัญ ซึ่งใช้หลักการของเมตริกซ์ จึงส่งผลให้การออกแบบการทดลองสามารถศึกษาปัจจัยได้พร้อมกันหลายปัจจัย โดยจำนวนปัจจัยที่สามารถศึกษาได้สูงสุดไม่มากกว่าจำนวนชุดการทดลอง (n) แล้วหักลบ 1

5) การทดลองแบบ Box-Behnken

การทดลองแบบ Box-Behnken เป็นการออกแบบที่นิยมใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณที่มี 3 ระดับ โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการทำนาย สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้นและเชิงเส้นกำลังสอง แต่จะส่งผลให้มีจำนวนชุดการทดลองมาก

6) การออกแบบการ Central Composite

การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite เหมาะสมสำหรับการศึกษาหรือสร้างสมการทำนายแบบโพลิโนเมียลดีกรี 2 เพราะมีความยืดหยุ่น และมีประสิทธิภาพสูงสุดในการออกแบบการทดลอง ซึ่งสามารถนำผลที่ได้มาสร้างสมการทำนายเชิงเส้น โดยการออกแบบวิธีนี้เหมาะสมสำหรับการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ แต่สามารถรองรับปัจจัยเชิงคุณภาพได้ แต่ไม่ควรศึกษาเกิน 1 ปัจจัยเพราะจะต้องทำการปรบับแผนการทดลองด้วย

7) การทดลองแบบทากูชิ

การออกแบบการทดลองแบบทากูชิเหมาะสำหรับคัดเลือกปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบออกสามารถใช้ศึกษาปัจจัยที่มี 2 และ 3 ระดับได้ โดยอาศัยหลักการของกราฟเชิงเส้น

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการแบบ Central Composite Design (CCD) โดยมีปัจจัยที่ต้องการศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย จัดเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ 2 ปัจจัย คือ อัตราการไหลน้ำสังเคราะห์ และอัตราการไหลน้ำฟองอากาศ ส่วนอีกปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงคุณภาพ คือ ตำแหน่งจ่ายฟองอากาศ เมื่อทำการออกแบบการทดลองแล้วจะนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ผลการถดถอยเชิงเส้นด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปมินิแทบ (Minitab)

2.8 ประเภทของถังปฏิกิริยา (พิสุทธิ์ เพียรมนกุล, 2556)

2.8.1 ถังปฏิกิริยาในงานเชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมเชิงอุดมคติสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก

1) ถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท (Batch reactor) เป็นถังปฏิกิริยาที่ไม่มีการไหลเข้าและออกของสาร แต่จะเป็นการเติมสารลงไปแล้วทำปฏิกิริยากวนผสมอย่างสมบูรณ์จนทำให้สารกลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงนำสารออกจากถังจึงทำให้ถังปฏิกิริยารูปแบบนี้สูญเสียเวลาในการเติมสารเข้าและออกจากระบบ
2) ถังปฏิกิริยาแบบท่อ (Plug flow reactor) เป็นถังที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างสูง สารจะไหลเข้าสู่ถังอย่างต่อเนื่อง โดยสารที่หน้าตัดเดียวกันจะมีความเข้มข้นเท่ากันและจะมีความเข้มข้นเปลี่ยนไปเมื่อเวลาผ่านไป
3) ถังปฏิกิริยากวนผสมแบบสมบูรณ์ (Continuous stirred tank reactor, CSTR) เป็นถังปฏิกิริยาที่มีการไหลเข้าออกของสารอยู่ตลอดเวลา และภายในถังมีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ จนทำให้ความเข้มข้นสารภายในถังเท่ากันทุกจุด รวมถึงเท่ากับน้ำ

ที่ไหลออกจากถังด้วย โดยพบว่าหากทำการต่ออนุกรมถังปฏิกิริยาแบบ CSTR จะส่งผลให้มีความเป็น PFR สูงยิ่งขึ้น

2.8.2 การวิเคราะห์รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกิริยาจริงแบบไม่อุดมคติ (Fogler, 2005)

การออกแบบและการทำงานภายในถังปฏิกิริยาจริง ไม่สามารถมีรูปแบบการไหลอุดมคติเป็นประเภทใดประเภทหนึ่งได้ร้อยเปอร์เซ็นต์ แต่จะส่งผลให้เกิดรูปแบบการไหลแบบร่วมกัน ดังนั้นการออกแบบถังปฏิกิริยาจึงควรศึกษารูปแบบการไหลภายในถังด้วยฟังก์ชันการกระจายเรซิเดนซ์ไทม์ (Residence Time Distribution, RTD) ซึ่งมีรูปแบบการทดลอง 2 แบบ คือ

1) การทดลองแบบจ่ายครั้งเดียว (Pulse Input Experiment)
2) การทดลองแบบจ่าต่อเนื่อง (Step Tracer Experiment)

งานวิจัยนี้เลือกใช้การทดลองแบบจ่ายสารชี้วัดเพียงครั้งเดียว โดยเลือกใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารชี้วัด เนื่องจากสารโซเดียมคลอไรด์ไม่ทำปฏิกิริยาและตกค้างภายในถัง ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา RTD แสดงดังสมการดังนี้

การคำนวณค่าฟังก์ชันการกระจายเรซิเดนซ์ไทม์

$$E_t = \frac{C(t)}{\int_0^\infty C(t)dt} \qquad 2\text{-}52$$

โดยที่ $C(t)$ = ความเข้มข้นตัวชี้วัด ณ เวลานั้นๆ

t = เวลานั้นๆ

การคำนวณเวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยา

$$t_m = \int_0^\infty t \times E(t)dt \qquad 2\text{-}53$$

ค่าเวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยาที่ได้จากสมการควรมีค่าใกล้เคียงกับเวลากักเก็บที่ได้จากการออกแบบ จะทำให้ถังปฏิกิริยามีความสมบูรณ์ ไม่เกิดปริเวณมุมอับ (dead zone) และการไหลรัดวงจร (short curcrit)

กรณี $t_m > t_{design}$; เกิดบริเวณเกิดปริเวณมุมอับ

$t_m < t_{design}$; เกิดบริเวณการไหลรัดวงจร

การคำนวณค่าความแปรปรวนของอัตราส่วนความเข้มข้นสารชี้วัด

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (t - t_m)^2 \times E(t)dt \qquad 2\text{-}54$$

การคำนวณเลขเพคเลต์ (Peclet number, Pe)

$$\frac{\sigma^2}{t_m^2} = \frac{2}{Pe^2} \times (Pe - 1 + e^{-Pe}) \qquad 2\text{-}55$$

กรณี Pe > 1; ปัจจัยด้านการพามีผลมากกว่าด้านการแพร่และการกระจาย ส่งผลเป็นถังแบบในเส้นท่อ (PFR)

Pe < 1; ปัจจัยด้านการแพร่และการกระจายมีผลมากกว่าด้านการพา ส่งผลเป็นกวนผสมแบบสมบูรณ์ (CSTR)

การคำนวณค่าสัดส่วนการกระจายตัวแบบในเส้นท่อ (X_{PFR})

$$X_{PFR} = 1 - e^{-t_m k} \qquad 2\text{-}56$$

โดยที่ k = ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา

การคำนวณค่าสัดส่วนการกระจายตัวแบบกวนผสมสมบูรณ์ (X_{CSTR})

$$X_{CSTR} = \frac{t_m k}{1 + t_m k} \qquad 2\text{-}57$$

การวิเคราะห์ค่าสัดส่วนการกระจายหากพบว่า สัดส่วนการกระจายตัวรูปแบบใดมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแสดงว่าถังปฏิกิริยามีรูปแบบการไหลเข้าใกล้รูปแบบนั้นๆ

2.9 วิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การศึกษาเปรียบเทียบสายพันธุ์สาหร่ายที่แตกต่างในกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการทำให้ลอย

Henderson, 2008 ทำการศึกษาเปรียบเทียบสายพันธุ์สาหร่ายที่แตกต่างในกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการทำให้ลอยเพื่อหาความสัมพันธ์ของลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของสาหร่าย ได้แก่ Microcystis aeruginosa (cyanobacteria) Chlorella vulgaris (green algae) Asterionella Formosa และ Melosira sp. (diatoms) โดยวิเคราะห์ลักษณะความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายด้วยการนับเซลล์ พื้นที่ผิวของเซลล์ ความหนาแน่นของประจุ และค่าซีต้าโพแทนเชียล

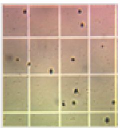
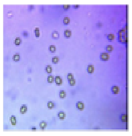
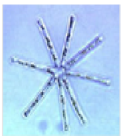
ตาราง 2-12 ลักษณะสารอินทรีย์ในเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ Microcystis aeruginosa (cyanobacteria) Chlorella vulgaris (green algae) Asterionellaformosa และ Melosira sp. (dia-toms)

Key AOM characteristics for C. vulgaris, M. aeruginosa, A. formosa and Melosira sp. At pH 7 (adapted from Henderson et al. (2008c)).				
	Chlorella vulgalis	Microcystis aeruginosa	Asterionella fomosa	Melosira sp.
AOM (ng/cell)	0.0029	0.00095	0.019	0.65
Charge density (meq/g)	3.2	0.1	1	Neg.
Hydrophobicity (%)	11	30	20	32
Carbohydrate: DOC (mg as glucose /mg as C)	1.1	0.7	1	0.8
Trans-/hydrophilic carbohydrates (%)	95	77	90	83
Protein: DOC (mg as Bovine serum albumin /mg as C	0.4	0.64	0.19	0.16
Protein: Carbohydrate (mg/mg)	0.4	0.6	0.2	0.2
AOM > 30 kDa (%)	62	55	9	30
AOM <1 kDa (%)	30	38	81	53

การทดลองใช้อุปกรณ์โมเดลรุ่น DBT6 และใช้สารอะลูมินัมซัลเฟตเป็นโคแอกกูแลนท์ ทำการกวนเร็วที่ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นปรับพีเฮชเป็น 5 สำหรับสาหร่ายสายพันธุ์ Microcystis aeruginosa และChlorella vulgaris ส่วนสาหร่ายชนิดอื่นๆปรับพีเอชเป็น 7 แล้วทำการกวนช้าที่ 30 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาทีจากนั้นเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยโดยอัดอากาศ 450 กิโลปาสคาลที่อัตราน้ำรีไซเคิล 12% เป็นเวลา 10 นาที

ตาราง 2-13 ลักษณะเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ Microcystis aeruginosa (cyanobacteria) Chlorella vulgaris (green algae) Asterionellaformosa และMelosira sp. (diatoms)

Key cell characterization data for C. vulgaris, M. aeruginosa, A. formosa and Melosira sp.

	Chlorella vulgaris		Microcystis aeruginosa		Asterionella formosa	Melosira sp.
	pH 5	pH 7	pH 5	pH 7	pH 7	pH 7
Cell images						
Initial cell concentration (cell/mL)	$5\times10^5\pm5\times10^4$		$6\times10^5\pm1.5\times10^4$		$6\times10^5\pm1.2\times10^4$	$1.9\times10^3\pm550$
Surface area (μm^2/cell)	55±30		95±34		370±95	5500±845
AOM concentration (mg/L as C)	1.5±0.15		0.6±0.01		1.0±0.2	1.2±0.4
Charge equivalents per cell (including associated AOM) (peq/cell)	0.004	0.011	Negligible	0.002	0.062	1.88
% charge contributed by AOM	-	84	-	5	30	Negligible

จากการศึกษาพบว่าสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์มีประจุต่อเซลล์อยู่ในช่วง 0.002-1.88 peq/cell โดย M. aeruginosa มีประจุต่ำสุดและ Melosira sp. มีประจุมากสุด นอกจากนี้หากค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของประจุในเซลล์สาหร่ายเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนความเข้มข้นของ AOM มีค่าอยู่ในช่วง 0.6-1.5 มิลลิกรัม/ลิตรเมื่อเทียบกับคาร์บอน ผลการวิเคราะห์ประจุที่เกิดจาก AOM เพียงอย่างเดียว คือ 84% 5% และ30% สำหรับ C. vulgaris M. aeruginosa และA. Formosa ตามลำดับ เนื่องจากเซลล์สาหร่ายและสารอินทรีย์ในเซลล์มีประจุลบ จำเป็นต้องเติมสารโคแอกกูแลนท์เพื่อกำจัดประจุลบบนเซลล์สาหร่ายให้เป็นกลางทางไฟฟ้าโดยประสิทธิภาพการทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้าขึ้นกับลักษณะของระบบ เมื่อทำการเติมสารโคแอกกูแลนท์อย่างเพียงพอจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดเซลล์สูงถึง 94-99% นอกจากนี้หากสาหร่ายมีมวลโมเลกุลสูงสารอินทรีย์ในเซลล์จะมีปริมาณโปรตีนสูงจะทำหน้าที่เสมือนเป็นสารโพลีเมอร์เอดส่งผลให้ไม่เกิดการกลับมามีเสถียรภาพใหม่ในช่วงพีเอช 5 และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในเซลล์สาหร่ายอยู่ในช่วง 46-71% ปริมาณสารอะลูมินัมที่เหลืออยู่ในระบบต้องเพียงพอสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ภายในเซลล์สาหร่ายอย่างมีประสิทธิภาพ และความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของประจุและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์สำหรับสาหร่ายทุกสายพันธุ์ที่พีเอช 7 ใช้ในการควบคุมสาหร่ายโดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพและทางเคมี

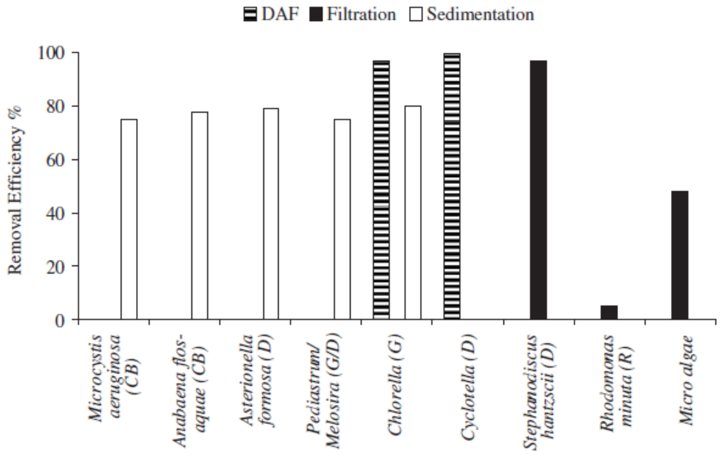


Fig. 4 – Comparison of removal efficiency using dissolved air flotation (Edwald and Wingler, 1990), filtration (Petruševski et al., 1993) and sedimentation (Jiang et al., 1993; Mouchet and Bonnélye, 1998; Drikas et al., 2001) for a variety of species (CB = cyanobacteria; D = diatom; G = green; CP = cryptophyta).

รูปภาพ 2-10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย 3 สายพันธุ์ คือ ไซยาโนแบคทีเรีย ไดอะตอม สาหร่ายสีเขียว และคริปโตไฟตาด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย การกรอง และการตกตะกอน

จากรูปภาพที่ 2-10 พบว่าสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาสามารถกำจัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีประสิทธิภาพสูงประมาณ 90% ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าการตกตะกอนประมาณ 20% แต่ไม่ได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกระบวนการกรอง

2.7.2 การศึกษาน้ำตัวอย่างจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสนเพื่อวิเคราะห์สาหร่าย

นางสาวทันดาว ทองตัน (2002) ได้ทำการศึกษาน้ำตัวอย่างจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน 5 จุด คือ น้ำดิบ น้ำที่ผ่านการตกตะกอนและการเติมคลอรีนขั้นต้น น้ำล้างทรายกรอง น้ำที่ผ่านการกรอง และน้ำประปา ช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2544 โดยน้ำดิบมีคุณภาพดังนี้ คือ อุณหภูมิน้ำดิบเฉลี่ย 29 ℃ ค่าพีเอชเฉลี่ย 7.28 ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 230 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ความขุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 104 NTU ค่าการใช้ออกซิเจนเฉลี่ย 4.12 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 5.71 มิลลิกรัม/ลิตร และปริมาณไนเตรทเฉลี่ย 0.23 มิลลิกรัม/ลิตร

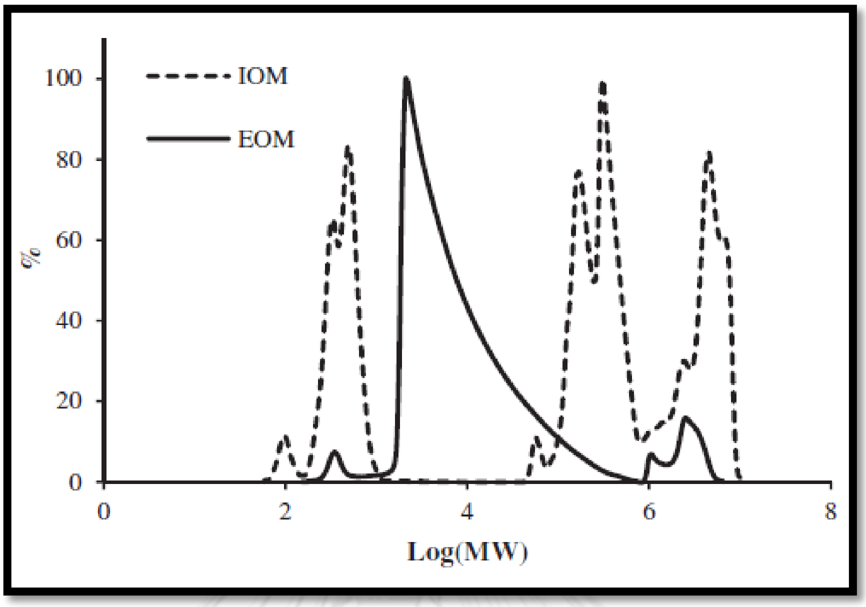
จากงานวิจัยนี้พบว่าสาหร่ายที่มักพบในกระบวนการผลิตน้ำประปา คือ ดิวิชัน Chrysophyta หรือกลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาลแกมทองพบจำนวนมากสุดเฉลี่ย 70.90%ของสาหร่ายทั้งหมดที่พบในน้ำดิบ Cyanophyta พบจำนวนเฉลี่ย 19.93%ของสาหร่ายทั้งหมดที่พบในน้ำดิบ และ Chloropyhta พบจำนวนเฉลี่ย 7.33%ของสาหร่ายทั้งหมดที่พบในน้ำดิบ โรงผลิตน้ำประปาสามเสนสามารถกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอน การเติมคลอรีนขั้นต้น และการกรองได้

ประสิทธิภาพ 99.52%ของสาหร่ายทั้งหมดที่พบในน้ำดิบ พบว่าสาหร่ายสร้างปัญหาให้กับกระบวนการผลิตน้ำประปา คือ ทำให้ระบบการกรองน้ำอุดตันเร็วจึงต้องทำการล้างบ่อกรองบ่อยเพื่อป้องกันปัญหา นอกจากนี้สาหร่ายที่พบในน้ำประปาบางสายพันธุ์สามารถสร้างสารพิษได้ ดังนั้นการควบคุมปริมาณสาหร่ายจึงถือเป็นสิ่งสำคัญ

2.7.3 การศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีกายภาพของสารอินทรีย์ของเซลล์สาหร่าย (AOM)

Lei Li และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีกายภาพของสารอินทรีย์ของเซลล์สาหร่าย (AOM) ประกอบด้วยสารอินทรีย์ภายในเซลล์ (intracellular organic matters, IOM) และสารอินทรีย์ภายนอกเซลล์ (extracellular organic matters, EOM) สารเหล่านี้เป็นต้นเหตุของปัญหาในกระบวนการบำบัดน้ำส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่สูงขึ้น การอุดตันของแมมแบรน ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (disinfection byproducts or DBPs) เกิดกลิ่นและรสอันไม่พึ่งประสงค์ และสารประกอบอื่นๆที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพเมื่ออยู่ในน้ำดื่ม และหากมวลโมเลกุลของ EOM สูงจะทำหน้าที่เสมือนสารฟล็อคคูแลนท์ แต่หากมวลโมเลกุลของ EOM น้อยทำให้กลายเป็นสารคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพเนื่องจากมีประจุลบที่พื้นผิวอนุภาค นอกจากนี้ EOM ของสาหร่ายทุกสายพันธุ์ประกอบด้วยสารที่ชอบน้ำเป็นส่วนใหญ่มากกว่า 57% โปรตีน 33% และคาร์โบไฮเดรต 28% การทดลองทำการสกัดจากสาหร่ายสายพันธุ์ M.aeruginosa จำนวน 2.01×10^{11} เซลล์/ลิตรที่อยู่ในช่วงการเจริญเติบโตแบบแอกโพแนนเชียล นำไปเซ็นทิฟิลที่ 10000 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำส่วนที่เป็นน้ำไปกรองด้วยกระดาษกรอง 0.45 ไมโครเมตร ทำให้ได้สาร EOM ส่วนเซลล์ที่ถูกแยกนำไปสกัดหา IOM เพื่อประเมินสารประกอบที่ได้จากการฆ่าเชื้อโรค และสารประกอบที่มำให้เกิดกลิ่นและรส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 2-11 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมลกุลของ IOM และ EOM

จากงานวิจัยนี้พบว่าสารสกัด IOM มีสารคาร์บอนอินทรีย์ที่เป็นละลายสูงถึง 100.5 มิลลิกรัม/ลิตร และความเป็นพิษของสาหร่าย MC-LR เป็น 506.1 ไมโครกรัม/ลิตร ส่วน EOM มีสารคาร์บอนอินทรีย์ที่เป็นละลายเป็น 29.7 มิลลิกรัม/ลิตร และความเป็นพิษของสาหร่าย MC-LR เป็น 141.2 ไมโครกรัม/ลิตร ค่าพารามิเตอร์อื่นๆแสดงดังตาราง

ตาราง 2-14 ค่าพารามิเตอร์ EOM และ IOM ของสาหร่ายสายพันธุ์ M.aeruginosa จำนวน 2.01×10^{11} เซลล์/ลิตร

Basic water quality parameters of the EOM and IOM extract solutions from exponential growth phase Microcystis aeruginosa solution (cell number 2.01×10^{11}/L).

	DON (mg/l)	MC-LR (μg/L)	DOC (mg/L)	Chlorophyll-a (mg/L)	DON/DOC
EOM	NA	141.2	29.7	NA	NA
IOM	23.1	506.1	100.5	3.2	0.23

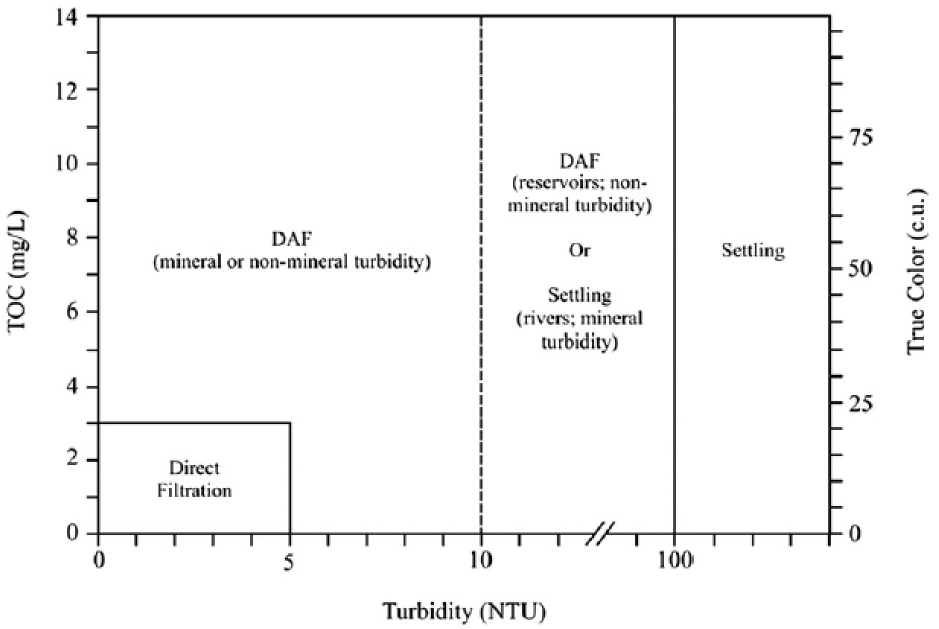
NA: not analyzed.

สมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของ EOM และ IOM เมื่อมีสัดส่วนความชอบน้ำสูง เนื่องจากสารประกอบส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายโปรตีน ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำลดลงใน

กระบวนการโคแอกกูเลชันแบบดั้งเดิม การตกตะกอน การกรอง นอกจากนี้หากส่วนที่ความชอบน้ำเข้าสู่กระบวนการกรองเร็วจะเป็นการเพิ่มสาร N-DBPs ในกระบวนการเติมคลอรีน

2.7.4 การรวบรวมศึกษากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

James K. Edzwald (2010) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ใช้ในการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย กับการตกตะกอน เนื่องจากสาหร่ายหลายชนิด เช่น ไดอะตอม สาหร่ายสีเขียว สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เป็นสาเหตุอุดตันในสารกรองส่งผลให้ต้องทำการล้างย้อนบ่อยขึ้น พบว่ากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่าย 90-99% และกระบวนการตกตะกอน 60-90% และหากมีกระบวนการบำบัดขั้นต้นอย่างเหมาะสมประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเป็น 96-99.9% นอกจากนี้หากน้ำเสียมีความเข้มข้นสาหร่ายมากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงมากกว่าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสาหร่ายต่ำ



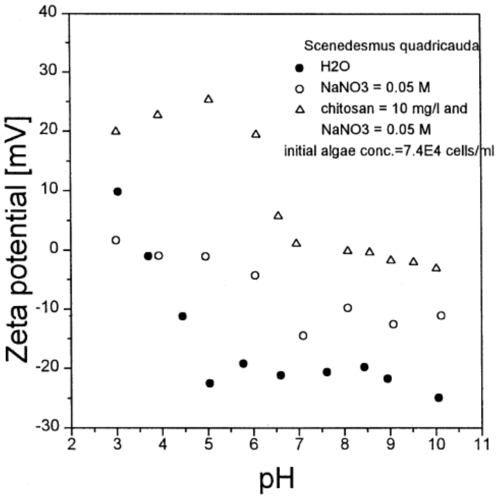
ภาพที่ 2-12 ข้อมูลเลือกกระบวนการกำจัดอนุภาคขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบ
(Valade และคณะ, 2009)

2.7.5 การศึกษากระบวนการกำจัดสาหร่ายจากแหล่งน้ำด้วยการทำให้ลอย

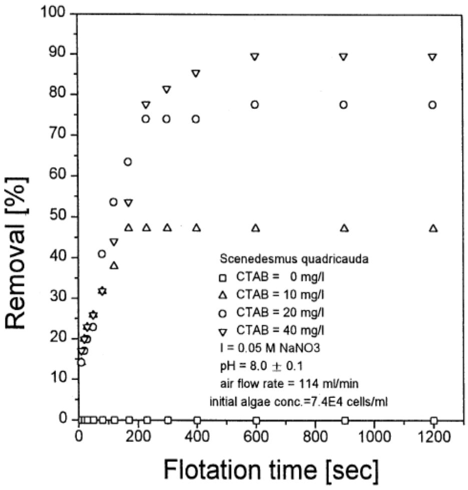
Y.M. Chen และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษากระบวนการทำให้ลอยแบบ Dispersed-Air เพื่อใช้กำจัดสาหร่าย *Scenedesmus quadricauda* โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวดักจับทั้ง 3 ชนิด คือ

1. N-Cetyl-N-N-N-trimethylammonium bromide (CTAB) ตัวดักจับชนิดประจุบวก
2. Sodium dodecylsulfate (SDS) ตัวดักจับชนิดประจุลบ
3. Triton X-100 ตัวดักจับชนิดไม่มีประจุ

พบว่าพีเอชเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับกระบวนการกำจัดสาหร่ายด้วยการทำให้ลอย เนื่องจากสาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus quadricauda* ในช่วง pH 5-8 ค่าซีต้าโพแทนเชียลจะมีค่าเป็นลบประมาณ 20 ควรใช้ตัวดักจับชนิดประจุบวก N-Cetyl-N-N-N-trimethylammonium bromide (CTAB) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึง 95% ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัม/ลิตร แต่หาก pH สูงกว่า 8 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกลดลง ดังนั้นแสดงว่าแรงทางไฟฟ้าที่กระทำระหว่างตัวดักจับ และพื้นผิวเซลล์มีความสำคัญจ่อกระบวนการแยกสาหร่ายเป็นอย่างมาก



รูปภาพ 2-13 การเปรียบเทียบค่าซีต้าโพแทนเชียลของสาหร่ายที่ความเข้มข้น 7.4×10^4 เซลล์/มิลลิลิตรที่ค่า pH ต่างๆ



รูปภาพ 2-14 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย ที่ความเข้มข้น 7.4×10^4 เซลล์/มิลลิลิตรโดยการเติม CTAB ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมสารโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นอัลคาไลนิตี้ และการปรับอัตราการไหลของอากาศไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus quadricauda*

ตาราง 2-15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus quadricauda* ด้วยกระบวนการทำให้ลอย ร่วมกับการเติมสารโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นอัลคาไลนิตี้ และการปรับอัตราการไหลของอากาศไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่าย

Table 1
Effect of $NaHCO_3$ on removal of *Scenedesmus quadricauda*[a]

$NaHCO_3$ (mg l^{-1})	Removal (%)
0.0	95.0
10.0	95.0
50.0	95.1

[a] $C_o = 7.4 \times 10^4$ cells ml^{-1} at pH of 8.0 ± 0.1; [chitosan] 10 mg l^{-1}; [SDS] 20 mg l^{-1}; air flow rate 114 ml min^{-1}.

Table 2
Effect of air flow rate on removal of *Scenedesmus quadricauda*[a]

Air flow rate (ml min^{-1})	Removal (%)
68	95.0
114	95.0
206	95.0

[a] $C_o = 7.4 \times 10^4$ cells ml^{-1} at pH of 8.0 ± 0.1; [chitosan] 10 mg l^{-1}; [SDS] 20 mg l^{-1}.

2.7.6 การศึกษาวิเคราะห์ผลกระบวนการแยก การเก็บเกี่ยวและการนำน้ำออกจากเซลล์สาหร่ายเพื่อนำสาหร่ายมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิง

Kuan Y. S. และคณะ (2012) ได้ทำการวิเคราะห์ผลการผลิตเชื้อเพลิงจากเซลล์สาหร่ายซึ่งใช้พื้นที่ในการเพาะน้อยกว่าการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนชนิดอื่นๆ เช่น ถั่วเหลือง ข้าวโพด เป็นต้น สามารถแบ่งกระบวนการออกเป็น ขั้นตอน คือ

1. การทำลายเสถียรภาพของเซลล์สาหร่าย โดยขึ้นกับประจุบนพื้นผิว ขนาด และความหนาแน่นมีผลกระทบต่อการแยกเซลล์สาหร่ายสามารถกระทำได้หลายวิธี ดังนี้
    - การเติมโอโซนให้ประจุบนพื้นผิวของอนุภาค
    - การเติมเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนท์ ไม่แนะนำให้ใช้
    - สารอินทรีย์ในเซลล์สาหร่าย (AOM) ประกอบด้วยไฮโดรฟิลิกโพลีแซกคาไรด์ (ชอบน้ำ) และไฮโดรโฟบิกโปรตีน (ไม่ชอบน้ำ) แนะนำให้ปรับพื้นผิวฟองด้วยสารเคมีจำพวกไฮโดรโฟบิกสายยาว และไฮโดรฟิลิกที่มีประจุสูงแทนกระบวนการโคแอกกูแลชัน

- การเติมโพลีเมอร์จำพวกสารอินทรีย์ เช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ และโพลีไฮดรอซีคอมเพล็ก

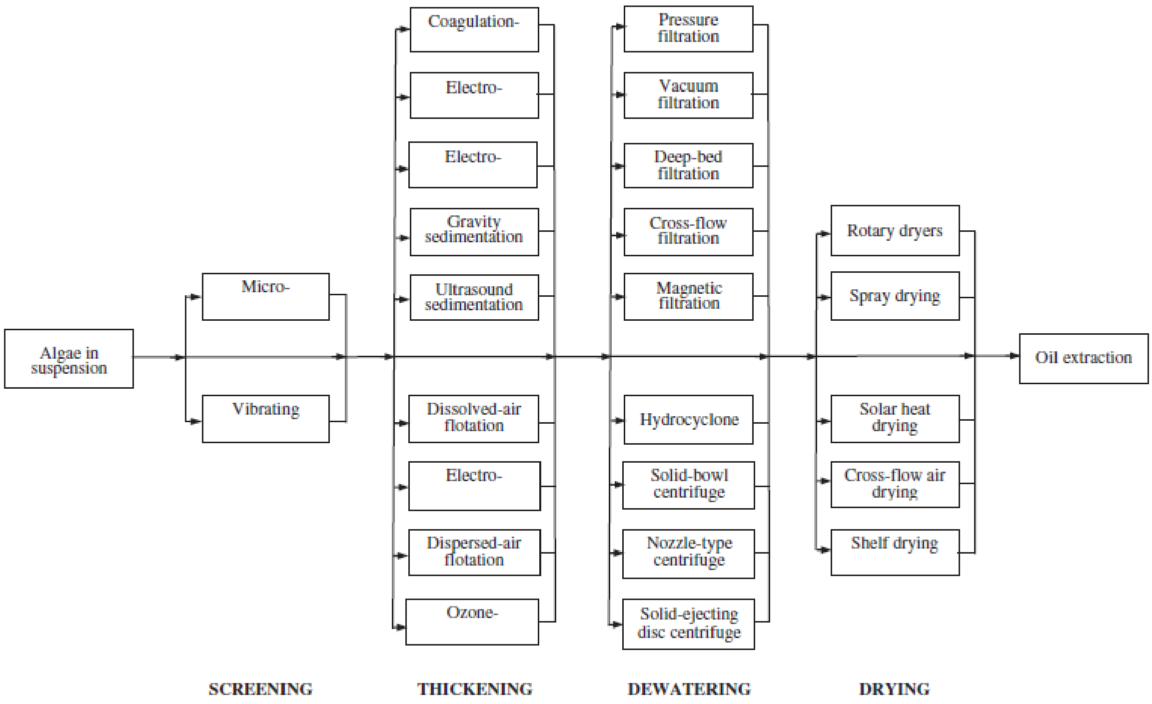
กระบวนการนี้ จะส่งผลให้เซลล์ถูกทำลายเสถียรภาพและเพิ่มโอกาสการรวมตัวกัน ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความเร็วในการตกตะกอนสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากมีฟองอากาศมายึดเกาะกับอนุภาคฟล็อกที่เกิดขึ้นทำให้ฟล็อกมีความหนาแน่นลดลงอย่างมาก ส่งผลให้ฟล็อกลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ นอกจากนี้การเพิ่มน้ำหนักของอนุภาคจะเป็นการเพิ่มความเร็วการตกตะกอนของเซลล์สาหร่ายซึ่งสามารถนำแรงหนีศูนย์กลางมาประยุกต์ใช้ได้

2. กระบวนการแยกเซลล์สาหร่ายจากตัวกลาง และการเก็บที่ความเข้มข้นสูงกว่า 10% การเลือกกระบวนการแยกขึ้นกับลักษณะของเซลล์สาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้
    - กระบวนการคัดกรอง (Screening) ประสิทธิภาพการแยกของขั้นตอนสกรีนขึ้นอยู่กับ ช่องว่างระหว่างตะแกรง และขนาดเซลล์สาหร่าย นิยมใช้ 2 ประเภท คือ
        1. การคัดกรองขนาดเล็ก (Micro straining)
        2. การคัดกรองแบบสั่น (Vibrating screen)
    - กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของแข็ง (Thickening) เป็นกระบวนการที่ช่วยลดต้นทุนในการแยกอนุภาค วีธีที่นิยมใช้สำหรับเซลล์สาหร่าย คือ
        1. กระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน
        2. การตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง
        3. กระบวนการทำให้ลอย
        4. กระบวนการทำให้ลอย และการบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชันโดยอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า
        5. กระบวนการอุลตร้าซาวด์

3. การนำน้ำออกจากเซลล์สาหร่าย (Dewatering)
    - การกรอง (Filtration)
    - การปั่นหมุน (Centrifugation)

4. การทำให้เซลล์สาหร่ายแห้ง (dewatering)
    - การทำให้เซลล์สาหร่ายแห้งด้วยการหมุน (Rotary dryer)
    - การทำให้เซลล์สาหร่ายแห้งด้วยการสเปร์ย (Spray drying)
    - การทำให้เซลล์สาหร่ายแห้งด้วยความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar heat drying)
    - การทำให้เซลล์สาหร่ายแห้ง (Cross-flow and vacuum shelf drying)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปภาพ 2-15 กระบวนการการทั่วไปสำหรับแยก และทำให้เซลล์สาหร่ายแห้งเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง

จากการวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าสาหร่ายแต่ละชนิดจะมีลักษณะที่แตกต่างตามชนิด และสภาวะรอบข้าง เช่น ค่าพีเอช ส่งผลให้การเลือกกระบวนการสำหรับใช้บำบัด และแยกแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของสาหร่าย แต่อย่างไรก็ตามเซลล์สาหร่ายส่วนใหญ่มักมีขนาดเล็ก และมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ ส่งผลให้กระบวนการบำบัด และแยกด้วยการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเป็นที่นิยม นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่ายทุกสายพันธุ์มีค่าซีต้าโพเทนเชียลเป็นลบ ส่งผลให้ต้องทำลายเสถียรภาพของเซลล์สาหร่ายก่อนเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยกระบวนการที่นิยม เช่น กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ ค่าซีต้าโพเทนเชียล ค่าพีเอช ขนาด และความหนาแน่นเซลล์สาหร่าย เพื่อใช้ในการพัฒนากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายต่อไป

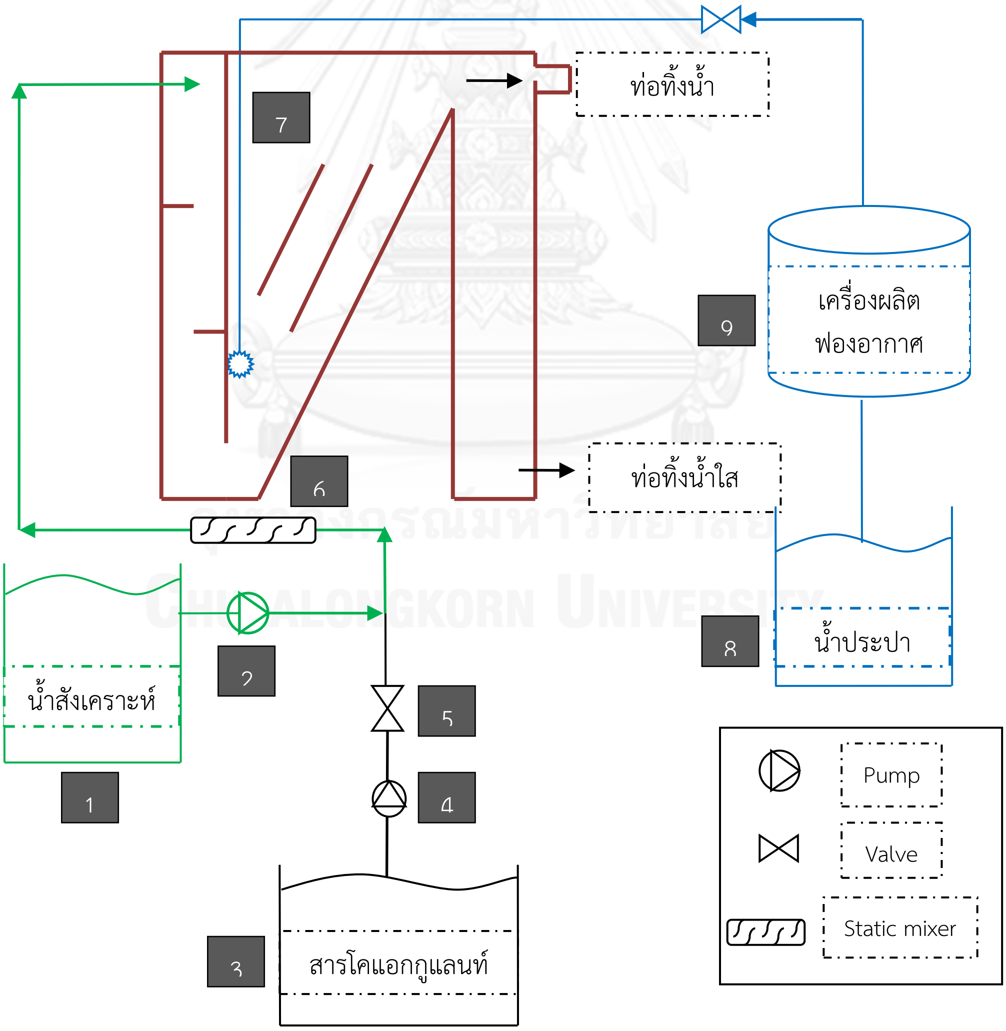
บทที่ 3
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

การแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และการกรองใช้วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีดังนี้

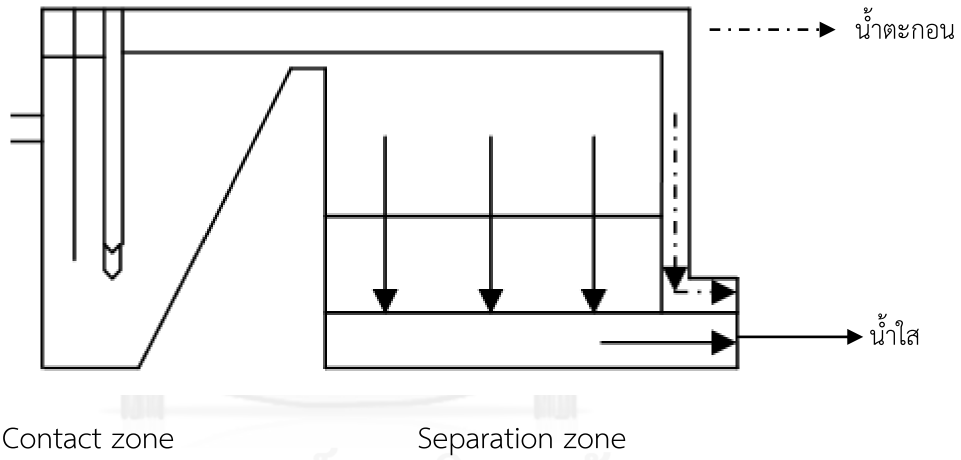
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

I. ชุดอุปกรณ์ร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และการกรอง แสดงดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 อุปกรณ์ร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และการกรอง

1) ถังเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่ายปริมาตร 150 ลิตร จำนวน 2 ถัง
2) เครื่องสูบน้ำสังเคราะห์แรงดัน 3 เมตร อัตราการไหล 10 ลิตร/นาที
3) ถังเตรียมสารโคแอกกูแลนท์ปริมาตร 6 ลิตร
4) เครื่องสูบสารโคแอกกูแลนท์ชนิดไดอะแฟรมแรงดัน 10 เมตร อัตราการไหล 1 ลิตร/นาที
5) บอลวาล์วสำหรับปิด-เปิดท่อลำเลียงสารเคมี
6) ท่อกวนเร็ว (static mixer)
7) ถังปฏิกิริยารวม (Hybrid tank)



ภาพที่ 3-2 ถังแยกอนุภาคสาหร่ายแบบรวม

8) ถังเตรียมน้ำสำหรับจ่ายให้เครื่องผลิตฟองอากาศ
9) เครื่องผลิตฟองอากาศขนาดเล็ก

II. อุปกรณ์การเตรียมหัวเชื้อสาหร่าย

1) ขวดพลาสติกใสขนาด 6 ลิตร จำนวน 12 ขวด
2) หัวจ่ายอากาศอากาศขนาด 3.5 เซนติเมตร จำนวน 12 หัว
3) สายยางขนาดเล็กและข้อต่อสำหรับต่อหัวจ่ายอากาศ
4) ปั๊มจ่ายอากาศ
5) หลอดไฟสำหรับให้แสงสว่าง

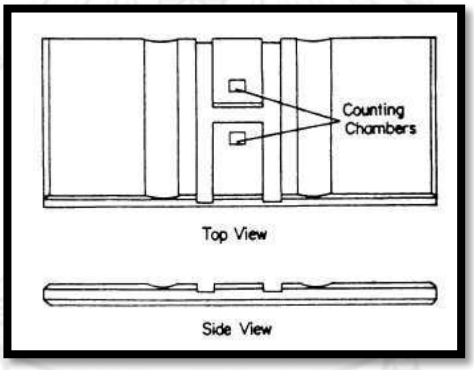
6) ไฟเบอร์สำหรับกรองอากาศ

III. อุปกรณ์การทดลองจาร์เทส (Jar Test)

1) เครื่องจาร์เทส
2) บีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จำนวน 6 ใบ
3) หลอดดูดสารสำหรับจ่ายสารโคแอกกูแลนท์และเก็บน้ำตัวอย่าง
4) คอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 1 เมตร สำหรับทดสอบการตกตะกอนของอนุภาค

IV. อุปกรณ์วิเคราะห์เซลล์สาหร่ายด้วยการนับเซลล์และความขุ่น

1) กล้องจุลทรรศน์
2) Hemocytometer counting chamber



ภาพที่ 3-3 อุปกรณ์นับจำนวนเซลล์สาหร่าย Hemocytometer counting chamber

3) หลอดหยดสาร
4) เครื่องวัดความขุ่นยี้ห้อ HACH รุ่น 2100A
5) เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)

V. อุปกรณ์กระบวนการกรอง

1) ทรายกรองละเอียดขนาด 0.45-0.55 มิลลิเมตร
2) ทรายหยาบขนาด0.5-0.8 มิลลิเมตร
3) กรวดขนาดเล็กรองรับสารกรอง 3-5 มิลลิเมตร
4) กรวดขนาดใหญ่รองรับสารกรอง 5-10 มิลลิเมตร
5) คอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 1 เมตร สำหรับทดสอบสารกรอง

VI. อุปกรณ์เดินระบบการกระจายเวลาในถังปฏิกิริยา (Residence Time Distribution; RTD)

1) เครื่องวัดคอนดักติวิตี้ (Conductivity meter)
2) หลอดเก็บตัวอย่างจำนวน 50 หลอด
3) นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. อนุภาคที่ทำการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา จากภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อสูตร N8

ตารางที่ 3-1 ลักษณะของอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา

ลักษณะทางกายภาพ	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	3.3	จากการทดลอง 4.1.1
รูปร่าง	ทรงกลมเดี่ยว	Rita และคณะ 2007
ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	1070	Liu และคณะ 1999
พื้นที่ผิวสัมผัส (ตารางไมครอน)	38	Liu และคณะ 1999
ซีต้าโพเทนเชียล (มิลลิโวลต์)	-14.9 ถึง -19.8	Clasen และคณะ 2000

ตารางที่ 3-2 สูตรอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาสูตร N8

สารเคมี	ปริมาณ (กรัม.)/น้ำ 1000 มิลลิลิตร
$Na_2HPO_4.2H_2O$	0.26
K_2HPO_4	0.74
$CaCl_2$	0.01
Fe EDTA	0.01
$MgSO_4.7H_2O$	0.05

KNO_3	1.00
Trace element*	1×10^{-3}
Distilled water	1.00
Trace element*	ปริมาณ (มก.)/น้ำ 1000 มิลลิลิตร
Al2(SO4)3.18H2O	3.58
MnCl2.4H2O	12.98
CuSO4.5H2O	1.83
ZnSO4.7H2O	3.20
Distilled water	1000.00

2. สารโคแอกกูแลนท์

 2.1)สารส้ม (Alum หรือ $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$)

 2.2)สารแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองแบ่งออกเป็น 6 ส่วน คือ

<u>การทดลองที่ 1</u> การเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) เพื่อทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพ กราฟการเจริญเติบโตของสาหร่าย และประสิทธิภาพการแยกด้วยกระบวนการตกตะกอนตามธรรมชาติ

<u>การทดลองที่ 2</u> ทำการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) ช่วงการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ (Log phase) ที่ความเข้มข้น 0.5 1 3 5 7 และ 9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ด้วยกระบวนการจาร์เทสโดยเลือกใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟต ($(Al_2(SO_4)_3\bullet18H_2O)$ หรือสารส้ม และแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) เป็นสารโคแอกกูแลนท์ โดยทำการกวนเร็วที่ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที กวนช้าที่ 40 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นปล่อยให้น้ำสังเคราะห์ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที ทำการเก็บตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการนับจำนวนเซลล์ เพื่อหาชนิดและปริมาณความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมสำหรับความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้นต่างๆ แล้วนำชนิดและความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนท์ที่ได้เดินระบบการทดลองขั้นต่อไป

<u>การทดลองที่ 3</u> ทำการออกแบบระบบแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และกระบวนการกรอง ซึ่งระบบประกอบด้วย ส่วนโคแอกกูเลชันแบบในเส้นท่อ ส่วนทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และส่วนการกรอง จากนั้นทำการเดิน

ระบบเพื่อศึกษาเวลากักเก็บ และแนวทางการไหลในถังปฏิกิริยา ใช้หลักการ RTD โดยเลือกสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น (NaCl) 20 กรัม/ลิตร ปริมาณ 300 มิลลิลิตร เป็นสารชี้วัด จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างจุดที่กำหนดทุกๆ 2 นาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อวัดค่าคอนดักทิวิตี้ แล้ววิเคราะห์เพื่อหาเวลากักเก็บในถังปฏิกิริยา และแนวทางการไหลของของเหลว นอกจากนี้ทำการศึกษาขนาดและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่ความดันอัดอากาศต่างๆ เพื่อหาความดันในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

การทดลองที่ 4 การศึกษาการแยกสาหร่ายออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชัน และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยผ่านอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้นท่อ จากนั้นเข้าสู่ส่วนทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ทำการจ่ายน้ำสังเคราะห์และน้ำอัดความดันที่อัตราน้ำล้นผิว (Overflow rate, OFR) และสัดส่วนอากาศต่อของแข็ง (Air/Solid, A/S) ต่างๆ แล้วทำการเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพผลการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากเฟสของเหลวด้วยวิธีการนับจำนวนเซลล์ เพื่อหาอัตรา OFR และ A/S ที่เหมาะสมสำหรับเดินระบบ

การทดลองที่ 5 การศึกษาการแยกสาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ออกจากเฟสของเหลวด้วยการกรองผ่านทรายกรองที่ระดับความหนาสารกรองต่างๆ จากนั้นเลือกสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพการแยกสูงเพื่อทำการเดินระบบแบบไฮบริด (MDAF+Filtration) แล้วเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากเฟสของเหลวด้วยวิธีการนับจำนวนเซลล์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการต่างๆ คือ การตกตะกอน การโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย การทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับโคแอกกูเลชัน และไฮบริด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.1 การเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่ายและการศึกษาการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนทางธรรมชาติ

3.2.2.1 การเตรียมน้ำสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่าย

ทำการเพาะเลี้ยงหัวเชื้อสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลล่า (*Chlorella sp.*) จากคณะวิทยาสาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ด้วยอาหารเหลวสูตร N8 โดยใช้สาหร่ายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร จากนั้นให้แสงสว่างและอากาศตลอดเวลา แล้วทำการเติมอาหารสัปดาห์ละ 1 ครั้ง สรุปขั้นตอนการเพาะสาหร่ายได้ดังรูปที่ 4-4

นำหัวเชื้อสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลล่าปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในน้ำกลั่นจนปริมาตรเป็น 1 ลิตร

↓

เติมอาหารเลี้ยงสาหร่ายสูตร N 8

↓

เติมอากาศ และให้แสงตลอดเวลา

↓

ปรับปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 6 ลิตร แล้วเติมอาหารเลี้ยง

↓

เติมอากาศและให้แสงตลอดเวลา และให้อาหารทุกๆ 1 สัปดาห์

ภาพที่ 3-4 ขั้นตอนการเตรียมน้ำสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่าย

3.2.2.1 การศึกษาการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนทางธรรมชาติ

การวิเคราะห์การตกตะกอนของอนุภาคสาหร่ายคลอเรลลาด้วยคอลัมน์เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และความสูง 100 เซนติเมตร โดยวิธีการนับจำนวนเซลล์มีขั้นตอนดังนี้ หยดสาหร่ายที่ความขุ่นแตกต่างกันลงบน Hemocytometer counting chamber ที่มีทั้งหมด 400 ช่อง แต่ละช่องมีขนาด 0.0025 ตารางมิลลิเมตร และหนา 0.1 มิลลิเมตร แล้วทำการปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ นำสไลด์ที่เตรียมไว้ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากนั้นทำการนับจำนวนเซลล์สาหร่าย สูตรการคำนวณความเข้มข้นเซลล์โดยสมการที่ 3-1

$$C = \frac{N}{(n \times A)d} \qquad 3\text{-}1$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นเซลล์
N = จำนวนเซลล์สาหร่ายที่ทำการนับได้ทั้งหมด
n = จำนวนช่องที่ทำการนับสาหร่าย
A = พื้นที่ต่อ 1 ช่องที่ทำการนับสาหร่าย
d = ความหนาของช่องที่ทำการนับ

ภาพที่ 3-5 การศึกษาการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนทางธรรมชาติ

3.2.2 การศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนวิธีการจาร์เทส

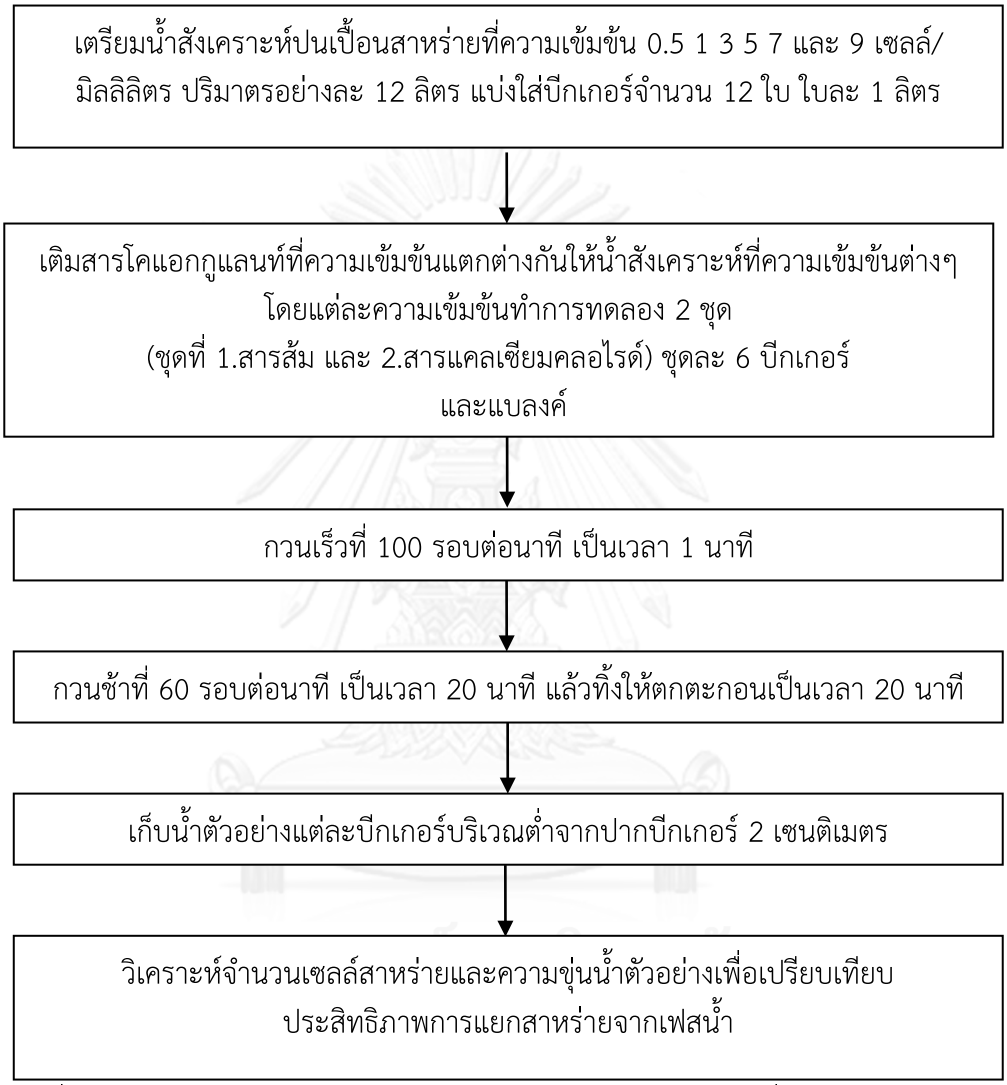
การทดลองจาร์เทสเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ และเพิ่มโอกาสการสัมผัสกันเพื่อสร้างฟล็อค จะทำให้ได้ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ และพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ

3.2.2.1 การศึกษาการทำลายเสถียรภาพบนผิวของอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทส

การทดลองศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) ช่วงการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ (log phase) ที่ความเข้มข้น 0.5 1 3 5 7 และ 9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร โดยเตรียมน้ำสังเคราะห์จากการผสมระหว่างน้ำประปา กับน้ำสาหร่ายเข้มข้นจึงทำให้น้ำสังเคราะห์มีค่าความเป็นด่างเพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาโคแอกกูเลชัน ส่งผลให้ค่าพีเอชสำหรับเดินระบบไม่เปลี่ยนแปลงมาก และมีค่าเหมาะสมสำหรับเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยเลือกใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟต (($Al_2(SO_4)_3 \bullet 18H_2O$) หรือสารส้ม และแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) เป็นสารโคแอกกูแลนท์ เพื่อทำการศึกษาหาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสำหรับจ่ายให้น้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตาราง 3-3 ตัวแปรการศึกษาการทำจาร์เทส

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
1. ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายเริ่มต้น 2. ความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนท์ (สารส้ม) 3. ความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนท์ (สารแคลเซียมคลอไรด์)	0.5 1 3 5 7 และ 9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ช่วง 2 ถึง 500 มิลลิกรัม/ลิตร ช่วง 2 ถึง 500 มิลลิกรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	**กระบวนการศึกษา**
1. ความเข้มข้นสาหร่าย	นับจำนวนเซลล์สาหร่ายด้วย Hemocytometer counting chamber
ตัวแปรควบคุม	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1. อัตราการกวนเร็ว และระยะเวลากวน 2. อัตราการกวนช้า และระยะเวลากวน 3. ระยะเวลาตกตะกอน	กวนเร็วที่ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที กวนช้าที่ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที 20 นาที



ภาพที่ 3-6 การศึกษาการทำลายเสถียรภาพบนผิวของอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทส

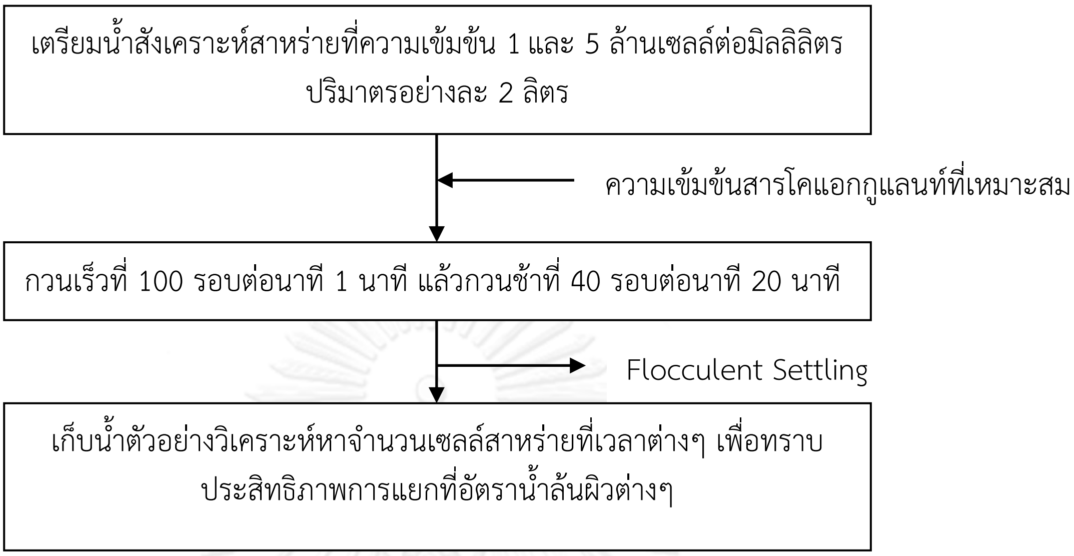
3.2.2.2 การศึกษาการตกตะกอนของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

การศึกษาการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มของการศึกษาการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆภายหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน เลือกทำการศึกษาน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 และ 5 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัม/ลิตร และสาหร่ายที่ความเข้มข้น 5 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ใช้แคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและลักษณะการตกตะกอนของอนุภาคสาหร่ายที่ผ่านการเติมสารโคแอกกูแลนท์ต่างชนิดกัน

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรศึกษาการเดินระบบผ่านอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้นท่อ และกวนช้าแบบใบพัด

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
1. ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายเริ่มต้น 2. ชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์	1 และ 5 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร --> สารส้ม 8 mg/L 5 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร --> แคลเซียมคลอไรด์ 100 mg/L
ตัวแปรตาม	**กระบวนการศึกษา**
1. ความเข้มข้นสาหร่าย	นับจำนวนเซลล์สาหร่ายด้วย Hemocytometer counting chamber
ตัวแปรควบคุม	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1.ปริมาตรน้ำสังเคราะห์เริ่มขึ้น 2.ระยะความสูงเก็บน้ำ 3.ระยะเวลาเก็บน้ำตัวอย่าง	2 ลิตร 28.5 48 68.5 และ 89 เซนติเมตร 0 10 20 30 60 90 150 210 270 และ 330 นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



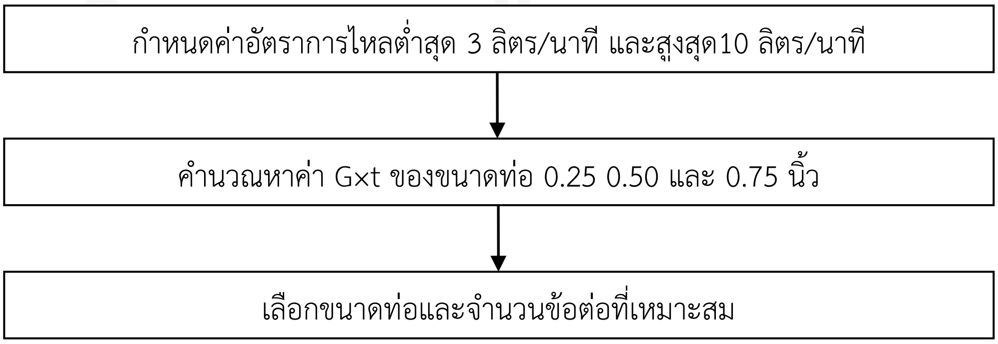
ภาพที่ 3-7 ขั้นตอนการเดินระบบผ่านอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้น และกวนช้าแบบใบพัด

3.2.3 การออกแบบอุปกรณ์แยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการไฮบริด

การออกแบบระบบแยกน้ำสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายออกจากเฟสน้ำประกอบด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และกระบวนการกรอง

3.2.3.1. การออกแบบอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้นท่อ (Static mixer)

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้นท่อ (Static mixer) ในช่วงอัตราการไหลของน้ำดิบ 3-10 ลิตร/นาที เพื่อวิเคราะห์ค่าผลคูณระหว่างความเร็วแกรเดียนท์ (G) และเวลาในการกวนผสม (t) โดยค่า G×t ที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้นท่อควรมีค่าอยู่ในช่วง 350-1700 (Kawamura)



ภาพที่ 3-8 การออกแบบอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้นท่อ (Static mixer)

3.2.3.2. การออกแบบถังปฏิกิริยาร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายและการกรอง

การออกแบบและศึกษาถังปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ ส่วนฟล็อคคูเลชัน ส่วนทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และส่วนกรอง ซึ่งเลือกใช้ถังรูปทรงสี่เหลี่ยมเป็นถังปฏิกิริยาเนื่องจากสามารถศึกษาแนวทางการไหลและสามารถติดตั้งอุปกรณ์สำหรับแยกตะกอนลอยสาหร่ายได้ง่าย โดยมีข้อกำหนดการออกแบบ (Design Criteria) ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 การออกแบบระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับโคแอกกูเลชันและการกรอง

กระบวนการ	ข้อกำหนดการออกแบบ	ช่วง	รายละเอียด
Flocculation	floc time	5-10 min	แนะนำให้ใช้ค่า 10 min
DAF	ขนาดฟล็อก	40-80 μm	ขนาดฟล็อก 25-50 ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูง
	อัตราน้ำรีไซเคิล	8-12 %	อัตราน้ำรีไซเคิลสูง ส่งผลให้ปริมาณฟองเพิ่มขึ้น
	ประสิทธิภาพเครื่อง saturator	80-95 %	-
	ความดัน	400-600 kPa	ความดันเปลี่ยนส่งผลให้ขนาดฟองอากาศเปลี่ยน
	เวลาในส่วนสัมผัส	1-2.5 min	มากกว่า 1.5 นาที ประสิทธิภาพดี
	hydraulic loading ของส่วนแยก	น้อยกว่า 20 m/h	-
	ความเร็วเข้าส่วนแยก	37 m/h	ขึ้นอยู่กับความสูงแผ่นกั้น
Filtration	ปริมาตร/พื้นที่(UFRVs)	600-800	-
	อัตราการกรอง	10-15 เมตร/ชั่วโมง	นิยมใช้ 15 เมตร/ชั่วโมง

3.2.3.3. การศึกษาลักษณะของถังปฏิกิริยา

การศึกษาเวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยา และการกวนผสมภายในถัง ซึ่งออกแบบการทดลองวิธี Central Composite Design (CCD) กำหนดตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อเวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยา และการกวนผสมภายในถังมี 3 พารามิเตอร์ คือ อัตราการไหลน้ำสังเคราะห์สาหร่าย อัตราการไหลน้ำฟองอากาศขนาดเล็ก และตำแหน่งหัวจ่ายฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งทำการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปมินิแทบ (Minitab) ที่ 5 ระดับ คือ -1.6 -1 0 1 และ 1.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรศึกษาลักษณะของถังปฏิกิริยา

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
1. อัตราการไหลน้ำอัดความดัน 2. อัตราการไหลน้ำสังเคราะห์ 3. ตำแหน่งจ่ายฟองอากาศ	1-4 ลิตร/นาที 3-10 ลิตร/นาที 100-150 เซนติเมตร จากด้านบนถัง
ตัวแปรตาม	**กระบวนการศึกษา**
1. ค่าการนำไฟฟ้า	เครื่อง conductivity meter
ตัวแปรควบคุม	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1. ปริมาณสารโซเดียมคลอไรด์	300

ภาพที่ 3-9 การศึกษาลักษณะของถังปฏิกิริยา

3.2.3.4 การศึกษาลักษณะของฟองอากาศในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Dissolved Air Flotation)

การศึกษาลักษณะฟองอากาศขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย เพื่อทำหน้าที่ดักจับอนุภาคสาหร่ายขนาดเล็กที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วให้ลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ เพื่อแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำ การทดลองนี้สร้างฟองอากาศขนาดเล็กจากการอัดอากาศและน้ำที่ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ทำให้อากาศละลายเข้าสู่เฟสน้ำและกลายเป็นฟองอากาศขนาดเล็กเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวน้ำเมื่อปล่อยออกสู่บรรยากาศ

1) การคำนวณความดันอากาศ (Pressurized water)

โดยกำหนดให้อุณหภูมิน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับทำการทดลองที่ 25 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ 3-2 และ 3-3 ของเฮนรี่ (Henry's Law) ส่งผลให้มีคุณสมบัติดังตารางที่ 3-7

$$y_A^* = \frac{K}{P} \times X_A \qquad 3\text{-}2$$

$$C_{air} = \left(\frac{P \times \%fraction \times MW}{K}\right)_{Nitrogen} + \left(\frac{P \times \%fraction \times MW}{K}\right)_{Oxygen} \qquad 3\text{-}3$$

เมื่อ x_A = สัดส่วนโมลของอากาศที่ละลายในน้ำ (โมลต่อโมล)

y^*_A = สัดส่วนโมลของก๊าซในอากาศ (โมลต่อโมล)

P = ความดันอากาศ (บาร์)

K = ค่าคงที่ของเฮนรี่ (atm)

C_{air} = ค่าความเข้มข้นอากาศ (กรัมต่อลิตร)

%fraction = ค่าสัดส่วนก๊าซต่ออากาศ

MW = มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล

ตารางที่ 3-7 คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

องค์ประกอบ	สัดส่วน (%)	ค่าคงที่ Henry (atm/(mol/L))	ค่าคงที่ Henry ($atm(mol_{water}+mol_{gas})/mol_{gas}$)	MW (g/mol)	Density (kg/m^3)
N_2	78.09	1639.34	4.26×10^4	28	1.205
O_2	20.94	769.23	9.08×10^4	32	

จากสมการที่ 3-2 แสดงปริมาณอากาศที่สามารถละลายในน้ำได้ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ความดันอากาศต่างๆ และความเข้มข้นอากาศจากสมการที่ 3-3 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 ปริมาณอากาศละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ณ ความดันอากาศต่างๆ

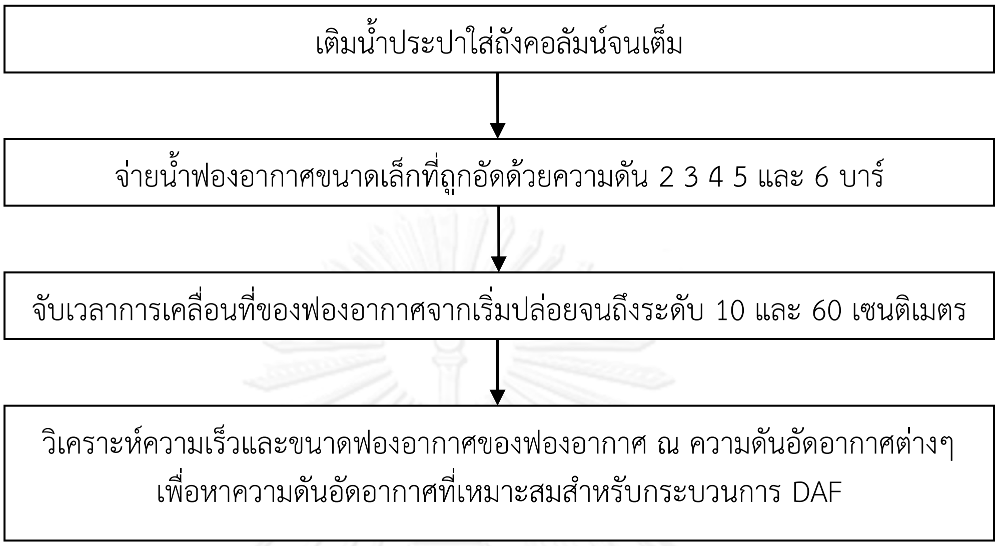
Pressure	(atm)	1	2	3	4	5	6	7	8
Dissolved air (C_r)	(g_{air}/L_{water})	0.022	0.044	0.066	0.088	0.110	0.132	0.154	0.176
Air release	(g_{air}/L_{water})	0.000	0.022	0.044	0.066	0.088	0.110	0.132	0.154
	(L_{air}/L_{water})	0.000	0.018	0.037	0.055	0.073	0.091	0.110	0.128

2) การศึกษาขนาดของฟองอากาศ

การทดลองขั้นตอนนี้ทำการศึกษาความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฟองอากาศที่ความดันอากาศต่างๆ ด้วยคอลัมน์ทรงกระบอกขนาด 10 เซนติเมตร ความสูง 100 เซนติเมตร ทำการจับเวลาการเคลื่อนที่ของฟองอากาศที่ระดับความสูง 10 และ 60 เซนติเมตร จากด้านล่างถัง ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะของฟองอากาศทั้งหมดในระบบ (Painmanakul และคณะ, 2010) จึงมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค โดยพื้นที่ผิวจำเพาะของฟองอากาศจะแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ

ตารางที่ 3-9 ตัวแปรศึกษาขนาดของฟองอากาศที่ความดันอัดอากาศต่างๆ

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
1. ความดันอัดอากาศ 2. ระดับความสูงที่ฟองอากาศเคลื่อนที่	2 3 4 5 และ 6 บาร์ 10 และ 60 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	**กระบวนการศึกษา**
1. ขนาดของฟองอากาศ	จับเวลา
ตัวแปรควบคุม	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1.อัตราการไหลน้ำอัดฟองอากาศ	1 ลิตร/นาที



ภาพที่ 3-10 การศึกษาขนาดของฟองอากาศ

3.2.4 การศึกษาการแยกสาหร่ายออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการ MDAF

การศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำด้วยระบบร่วมระหว่างการโคแอกกูเลชันแบบในเส้นท่อ และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายภายในถังปฏิกิริยาที่ทำการออกแบบจากการทดลองที่ 3.2.4

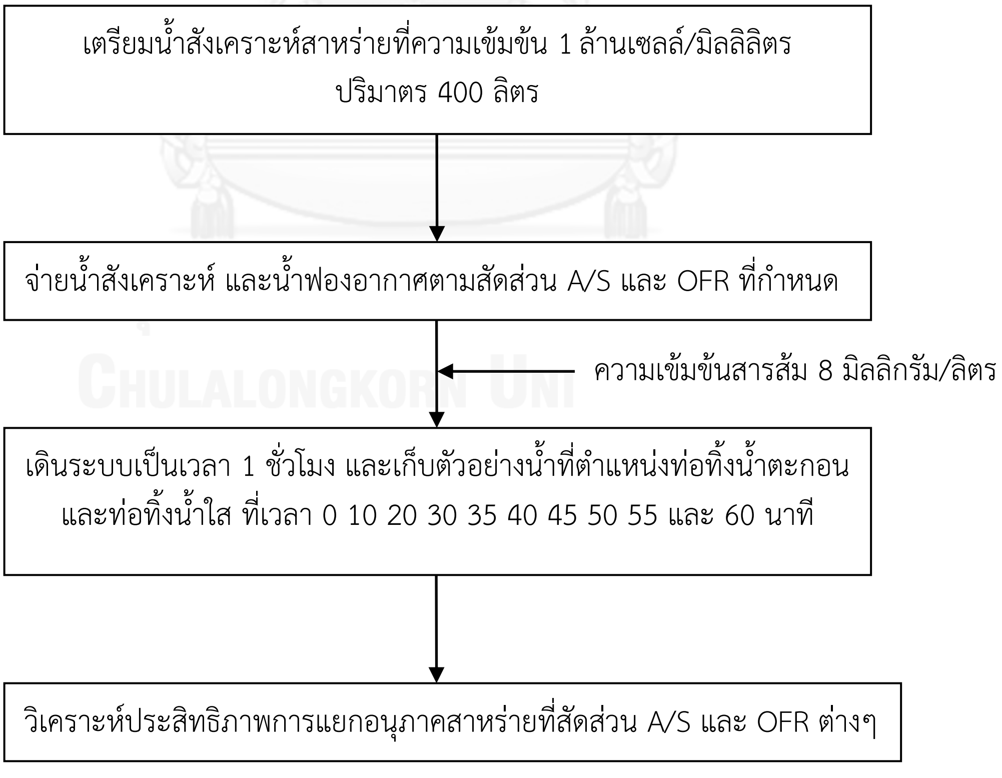
3.2.4.1. การศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตรออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ที่สัดส่วน A/S และ OFR ต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3-10 ตัวแปรศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
1. สัดส่วน A/S 2. ค่า OFR	2×10^{-3}-8×10^{-3} มิลลิลิตร/มิลลิกรัม 10.3-14.3 เซนติเมตร/นาที
ตัวแปรตาม	**กระบวนการศึกษา**
1. ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่าย	นับจำนวนเซลล์สาหร่ายด้วย Hemocytometer counting chamber
ตัวแปรควบคุม	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1. ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น 2. ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง 3. ตำแหน่งในจ่ายฟองอากาศ	1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร 0 10 20 30 35 40 45 50 55 และ 60 นาที 110 เซนติเมตรจากด้านบนถัง



ภาพที่ 3-11 การศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่เวลาต่างๆ ค่าสัดส่วนอากาศต่อของแข็ง (A/S) และค่าอัตราน้ำล้นผิว (OFR) สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

1) การคำนวณประสิทธิภาพการแยกและการกักเก็บอนุภาคสาหร่าย

$$\text{Separation (\%)} = \frac{\left((C_0 \times Q_{solid}) - (C_t \times (Q_{solid} + Q_{air})\right) \times 100}{C_0 \times Q_{solid}} \qquad 3\text{-}4$$

$$\text{Collection (\%)} = \frac{\left((C_t \times (Q_{solid} + Q_{air})\right) \times 100}{C_0 \times Q_{solid}} \qquad 3\text{-}5$$

โดยที่ Separation (%) = ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายออกจากเฟสของเหลว
Collection (%) = ประสิทธิภาพการรวบรวมตะกอน
C_t = ค่าความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายที่เวลาใดๆ
C_0 = ค่าความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายที่เวลาเริ่มต้น
Q_{air} = ค่าอัตราการไหลของน้ำฟองอากาศ (ลิตรต่อนาที)
Q_{solid} = ค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย (ลิตรต่อนาที)

2) การคำนวณค่าสัดส่วน A/S

$$\text{A/S} = \frac{C_{air} \times Q_{air}}{\text{C}_{\text{solid}}\text{Q}_{\text{solid}}} \qquad 3\text{-}6$$

โดยที่ A/S = ค่าสัดส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณสารแขวนลอย (มิลลิลิตรของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง)
C_{air} = ความเข้มข้นอากาศละลายในน้ำ
C_{solid} = ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในน้ำ

3) การคำนวณค่าสัดส่วน OFR

$$\text{OFR} = \frac{\sum Q}{A} \qquad 3\text{-}7$$

โดยที่ *OFR* = อัตราน้ำล้นผิว
$\sum Q$ = อัตราการไหลสุทธิภายในถังปฏิกิริยา
A = พื้นที่ผิวบริเวณส่วนสัม

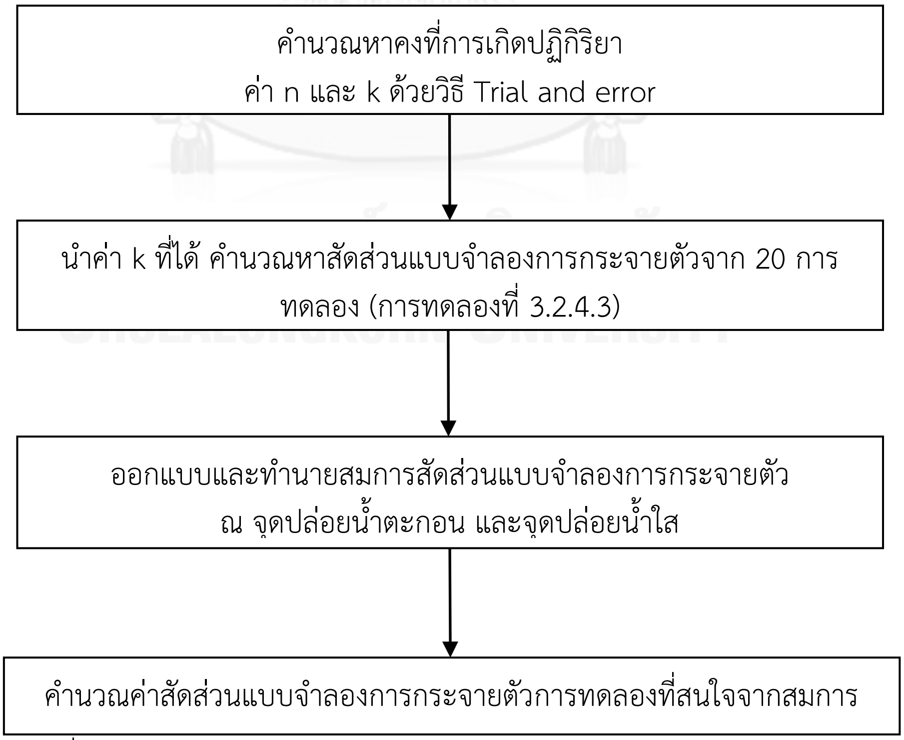
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.4.2. การศึกษาสัดส่วนแบบจำลองการกระจายตัว (Dispersion model)

การศึกษากระบวนการแยกอนุภาคสาหร่ายที่อัตราน้ำล้นผิว 12.4 เซนติเมตร/นาที และอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งช่วง 0.006 มิลลิลิตรของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง โดยกำหนดให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 แล้วทำนายค่าคงที่ปฏิกิริยาและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการ

ตารางที่ 3-11 ตัวแปรศึกษาสัดส่วนแบบจำลองการกระจายตัว

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
1. อัตราการไหลน้ำอัดความดัน	1-4 ลิตร/นาที
2. อัตราการไหลน้ำสังเคราะห์	3-10 ลิตร/นาที
3. ตำแหน่งจ่ายฟองอากาศ	100-150 เซนติเมตร จากด้านบนถัง
ตัวแปรตาม	**กระบวนการศึกษา**
1. ค่าการนำไฟฟ้า	เครื่อง conductivity meter
ตัวแปรควบคุม	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1. ปริมาณสารโซเดียมคลอไรด์	300 มิลลิลิตร



ภาพที่ 3-12 การศึกษาสัดส่วนแบบจำลองการกระจายตัว (Dispersion model)

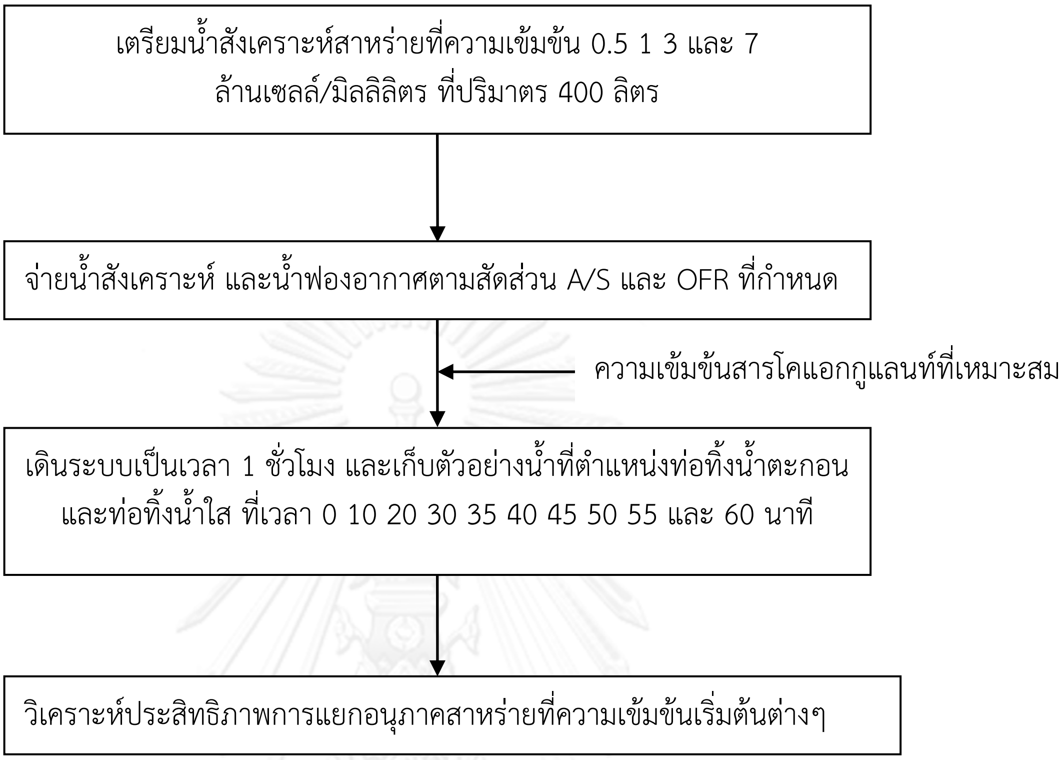
3.2.4.3. อากาศละลายการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นต่างๆ ออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วย

ความเข้มข้นสาหร่ายมีความต้องการชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยในส่วนนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นแตกต่างกันด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราน้ำล้นผิว 12.4 เซนติเมตร/นาที และอัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง 0.006 มิลลิลิตรของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง โดยเลือกทำการศึกษาที่ตัวอย่างความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่าย 0.5 1 3 และ 5 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร โดยมีขั้นตอนการทดลองภาพที่ 3-13

ตาราง 3-12 ตัวแปรศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
1.ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่าย 2.ชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์	0.5 1 3 และ 7 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร สารส้ม และแคลเซียมคลอไรด์
ตัวแปรตาม	**กระบวนการศึกษา**
1. ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่าย	นับจำนวนเซลล์สาหร่ายด้วย Hemocytometer counting chamber
ตัวแปรควบคุม	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1. A/S 2. OFR 3. ตำแหน่งในจ่ายฟองอากาศ	0.006 มิลลิลิตรต่อมิลลิกรัม 12.4 เซนติเมตร/นาที 125 เซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 3-13 การศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.2.5 การศึกษาการแยกสาหร่ายออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการไฮบริด

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชัน และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย มีประสิทธิภาพการแยกสูงสุดประมาณ 75% โดยตะกอนอนุภาคสาหร่ายจะลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำแล้วแยกออกจากถัง ส่วนน้ำใสจะไหลลงสู่ด้านล่าง งานวิจัยในส่วนนี้ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำ ดังนั้นจึงเพิ่มกระบวนการกรองในส่วนท้ายของถังปฏิกิริยา โดยเลือกใช้ทรายกรองขนาด 0.45-0.55 มิลลิเมตร เป็นสารกรองเพื่อกรองอนุภาคสาหร่ายที่ไม่ถูกดักจับด้วยฟองอากาศขนาดเล็กแล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำให้ติดอยู่ในชั้นกรองทรายไม่ให้หลุดไปกับน้ำใส

3.2.5.1. การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรอง

การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองตรง และกระบวนการกรองภายหลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันที่ระดับความสูงทรายกรองต่างๆ โดยใช้ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size, $d_{10\%}$) 0.425 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Non Uniformity Coefficient, $\frac{d_{60\%}}{d_{10\%}}$) 1.18 มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ตาราง 3-13 ตัวแปรศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองที่ความหนาต่างๆ

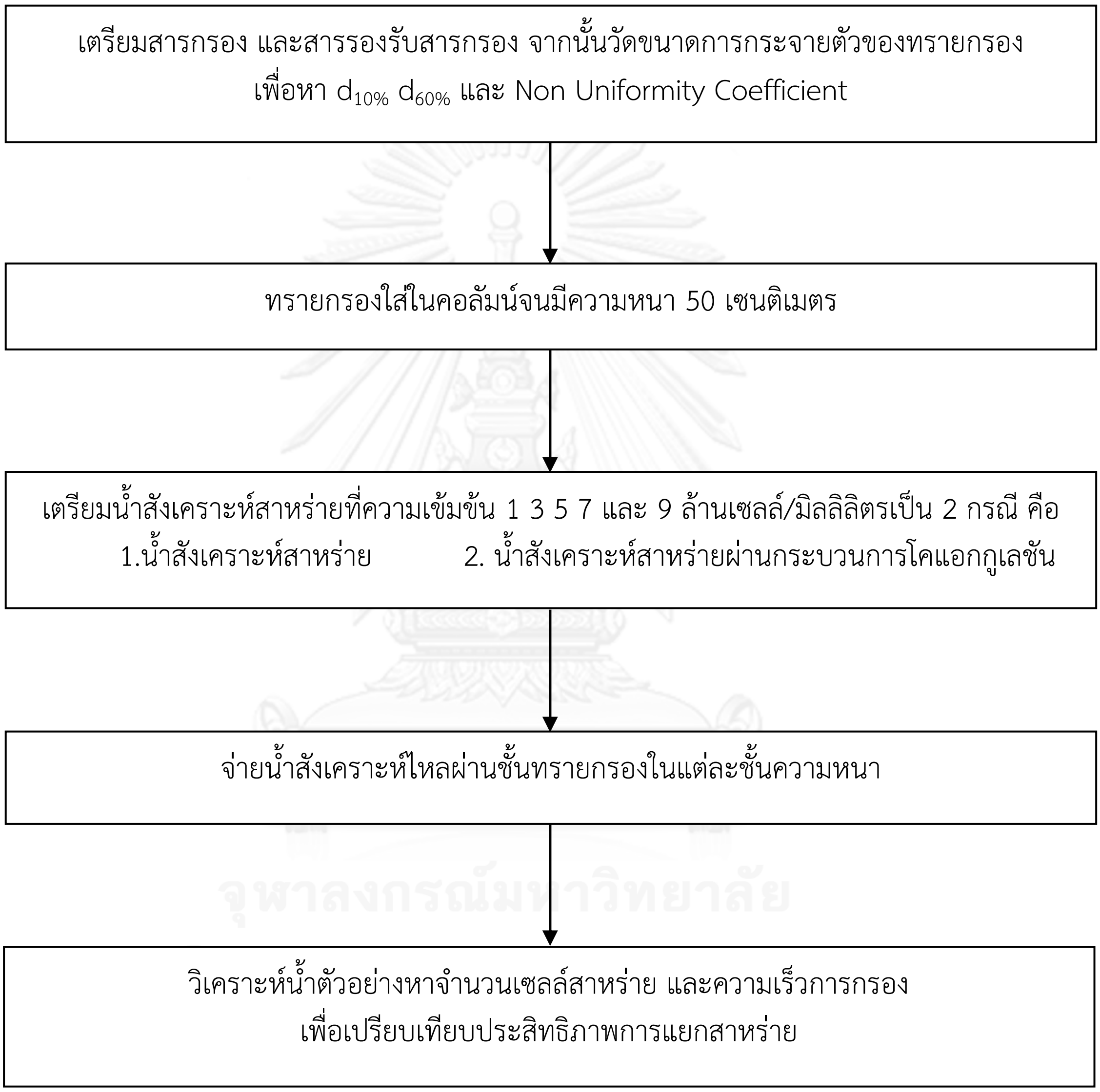
ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
1.ความหนาทรายกรอง 2.ลักษณะน้ำสังเคราะห์	10 20 30 40 และ 50 เซนติเมตร ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน
ตัวแปรตาม	**กระบวนการศึกษา**
1.ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่าย	นับจำนวนเซลล์สาหร่ายด้วย Hemocytometer counting chamber
ตัวแปรควบคุม	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1.น้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 2.ขนาดทรายกรอง 3.ชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์	1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร 0.425 มิลลิเมตร สารส้ม 8 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 3-14 ตัวแปรศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองที่ความเข้มข้นสาหร่ายต่างๆ

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
1.ความหนาทรายกรอง 2.ลักษณะน้ำสังเคราะห์	10 20 30 40 และ 50 เซนติเมตร ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน
ตัวแปรตาม	**กระบวนการศึกษา**
1.ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่าย	นับจำนวนเซลล์สาหร่ายด้วย Hemocytometer counting chamber
ตัวแปรควบคุม	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1.น้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 2.ขนาดทรายกรอง 3.ชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์	1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร 0.425 มิลลิเมตร สารส้ม 8 มิลลิกรัม/ลิตร

Chulalongkorn University

ภาพที่ 3-14 การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองที่ความหนาต่างๆ

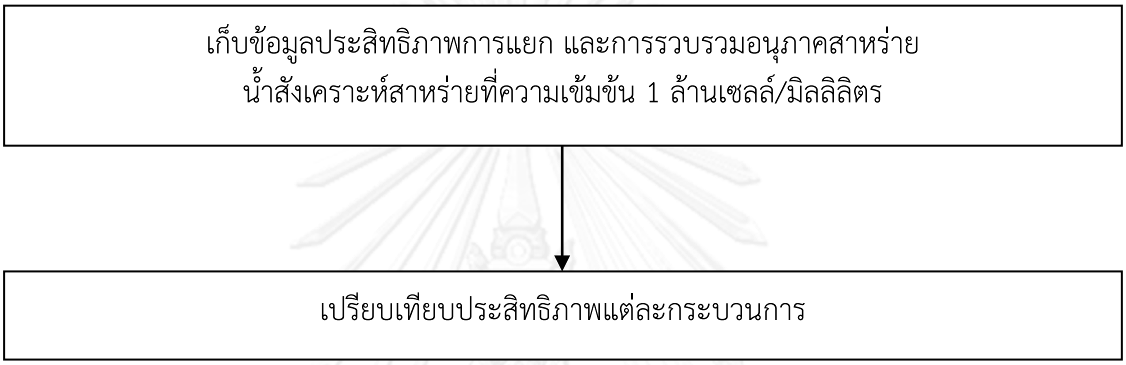


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 3-15 การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองที่ความเข้มข้นสาหร่ายต่างๆ

3.2.5.2. การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการต่างๆ

การเดินระบบแยกน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย โดยผ่านอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้นท่อ จากนั้นเข้าสู่ส่วนทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และส่วนกรอง ตามลำดับ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากเฟสของเหลวด้วยวิธีการนับจำนวนเซลล์



ภาพที่ 3-16 การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการต่างๆ

3.2.5.3. การศึกษาค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเพื่อแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการไฮบริดจ์ (Hybrid process)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาสละลาย และการกรอง มีต้นทุนของการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ ด้านการก่อสร้างระบบ ด้านพลังงาน และด้านสารเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การศึกษาลักษณะสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*)

สาหร่ายจัดเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กสามารถเจริญเติบโตได้ดีในแหล่งน้ำที่มีปริมาณฟอสฟอรัสและไนโตรเจนสูง ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication or Algae bloom) ทำให้แหล่งน้ำเกิดสี กลิ่น และรสอันไม่พึ่งประสงค์ นอกจากนี้ในปัจจุบันสาหร่ายเซลล์เดียวจัดเป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่งที่ใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงน้อยกว่าพืชชนิดอื่น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาลักษณะและกระบวนการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*)ออกจากเฟสของเหลว

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพน้ำสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่าย

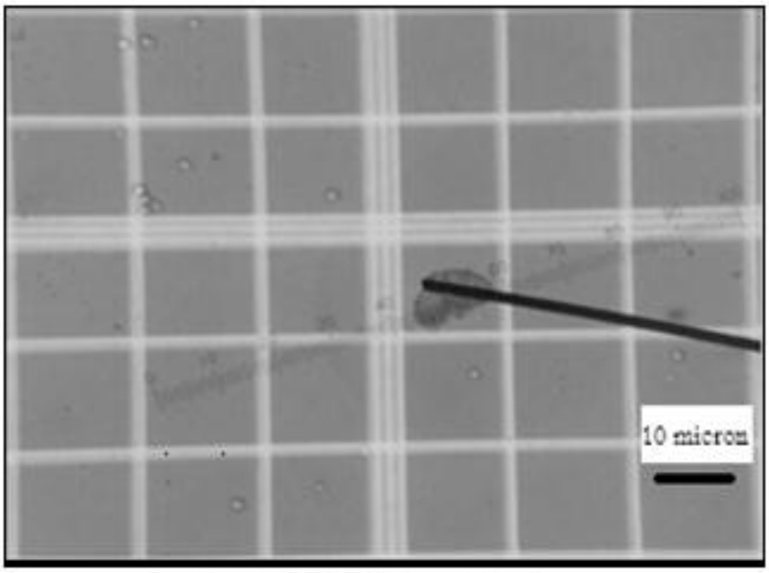
น้ำสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายเซลล์เดี่ยวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมการผสมระหว่าน้ำประปากับหัวเชื้อสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) ช่วงการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ (Log phase) ที่ความเข้มข้นประมาณ 10^7 เซลล์/มิลลิลิตร แล้วเจือจางเป็นความเข้มข้นที่ต้องการ ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพดังตารางที่ 4-1

ตาราง 4-1 ลักษณะทางกายภาพของสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*)

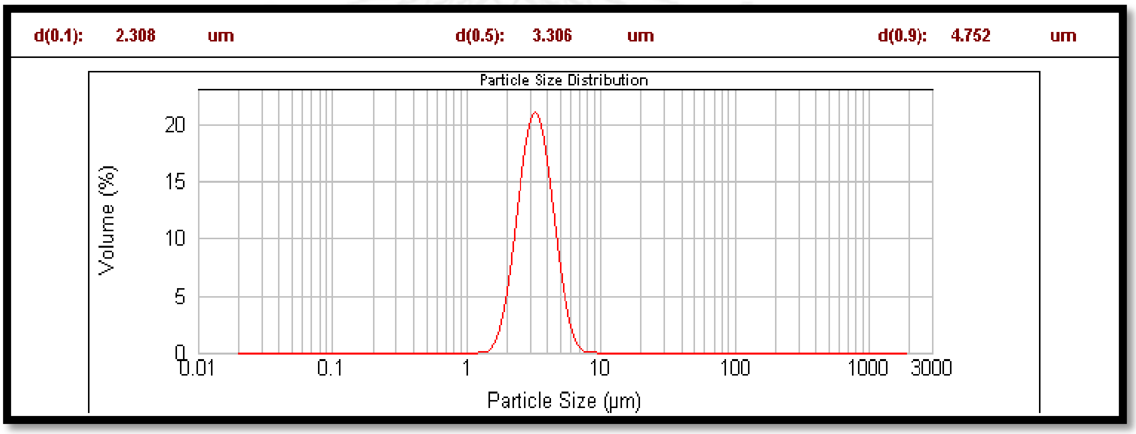
ลักษณะทางกายภาพ	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	3.3	จากการทดลอง 4.1.1
รูปร่าง	ทรงกลมเดี่ยว	(Henderson และคณะ, 2008)
ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	1070	(Liu และคณะ, 1999)
พื้นที่ผิวสัมผัส (ตารางไมครอน)	38	(Liu และคณะ, 1999)
ซีต้าโพเทนเชียล (มิลลิโวลต์)	-14.9 ถึง -19.8	(Clasen และคณะ, 2000)
ประสิทธิภาพการตกตะกอน	9%	จากการทดลอง 4.1.2

จากตารางที่ 4-1 พบว่าอนุภาคสาหร่ายเซลล์เดียวมีลักษณะเป็นทรงกลมเดี่ยวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3.3 ไมครอน ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสมีค่า 38 ตารางไมครอน ดังแสดงรูปที่ 4-1 และ 4-2 ซึ่งจัดเป็นสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็ก และมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ 1070

กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้ยังมีค่าซีตาโพแทนเชียลติดลบประมาณ 14.9 ถึง 19.8 ขึ้นอยู่กับขนาดและอายุของอนุภาค ทำให้อนุภาคเซลล์สาหร่ายสามารถแขวนลอยอยู่ได้ในเฟสน้ำได้อย่างมีเสถียรภาพ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกด้วยกระบวนการตกตะกอนตามธรรมชาติมีค่าต่ำ



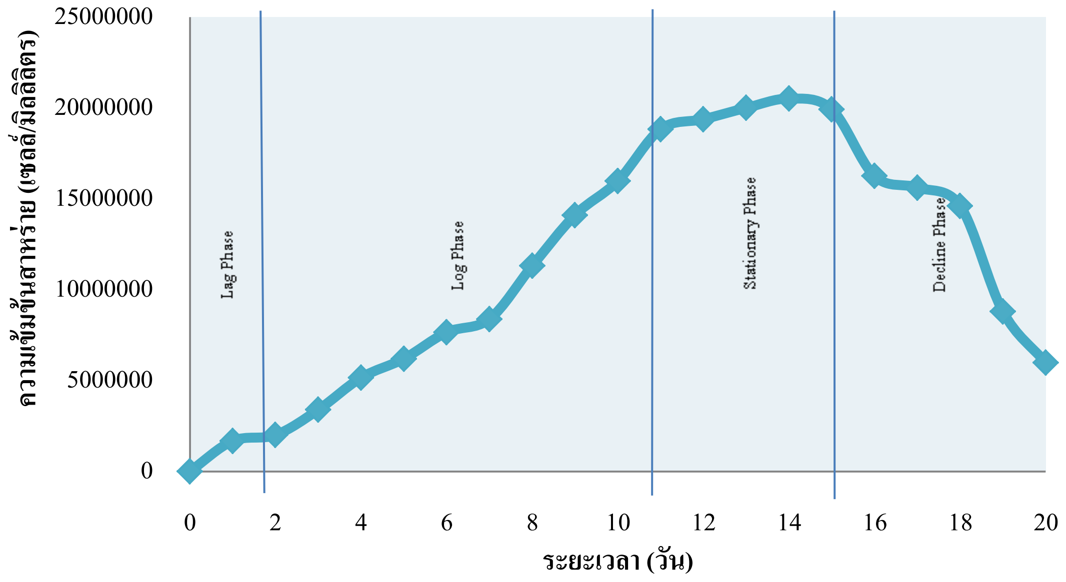
ภาพที่ 4-1 รูปร่างของสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*)



ภาพที่ 4-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลามีขนาดอนุภาคประมาณ 3.3 ไมครอน จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)

การเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วงการเจริญเติบโต คือ ช่วงการปรับตัว (Lag phase) ระยะเวลา 0-2 วัน ช่วงการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ (Log phase) ระยะเวลา 3-10 วัน ช่วงการเจริญเติบโตแบบคงที่ (Stationary phase)

ระยะเวลา 10-15 วัน และช่วงการเจริญเติบโตแบบถดถอย (Decline phase) ระยะเวลา 15 วันขึ้นไป ดังภาพที่ 4-3 นอกจากนี้ช่วงระยะการเจริญเติบโตของสาหร่ายส่งผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพของอนุภาคสาหร่าย โดยอนุภาคสาหร่ายที่อยู่ในช่วงการเจริญเติบโตแบบถดถอยมีค่าซีตาโพแทนเชียลเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น ทำให้เสถียรภาพการแขวนลอยของอนุภาคสาหร่ายในน้ำลดต่ำลง ส่งผลให้อนุภาคสาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตช่วงนี้มีแนวโน้มที่จะตกตะกอนตามธรรมชาติได้มากกว่าช่วงการเจริญเติบโตแบบอื่นๆ ส่วนในช่วงการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ (Log phase) อนุภาคสาหร่ายมีค่าซีต้าโพแทนเชียลติดลบสูง ส่งผลให้อนุภาคสาหร่ายมีแนวโน้มที่จะแขวนลอยอยู่ในเฟสน้ำอย่างมีเสถียรภาพ ส่งผลให้แยกอนุภาคออกจากเฟสน้ำได้ยาก



ภาพที่ 4-3 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) ระยะเวลา 20 วัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ (Log phase) ระยะการเจริญเติบโต 2-11 วัน เนื่องจากเป็นช่วงการเจริญเติบโตที่มีปัญหาในการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำมากที่สุด เพราะอนุภาคสาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตนี้มีเสถียรภาพการแขวนลอยอยู่ในน้ำสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4-4 ลักษณะน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่อายุประมาณ 1-5 วัน

ภาพที่ 4-5 ลักษณะน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่อายุประมาณ 6-15 วัน

ภาพที่ 4-6 ลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์สาหร่ายที่อายุประมาณ 15-20 วัน

การศึกษาขั้นตอนนี้ทำให้ทราบว่าอนุภาคสาหร่ายเซลล์เดียวสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) ช่วงการเจริญเติมโตอย่างเต็มที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน และมีค่าซีตาโพแทนเชียวอยู่ในช่วง -14.9 ถึง -19.8 ส่งผลให้อนุภาคสาหร่ายในเฟสน้ำไม่รวมตัวกัน และมีเสถียรภาพในการลอยตัวในเฟสของเหลว ดังนั้นหากต้องการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำควรทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายเสียก่อนแล้วจึงทำการแยกด้วยกระบวนการที่เหมาะสมต่อไป

4.1.2 ผลการศึกษาการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนทางธรรมชาติ

อนุภาคสาหร่ายจัดเป็นสิ่งมีชีวิตทรงกลมขนาดเล็ก และพบว่าแขวนลอยอยู่ในน้ำแบบไม่มีการรวมตัวกันโดยมีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.2-200 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งจัดเป็นน้ำที่มีตะกอนแขวนลอยที่ความเข้มข้นไม่สูงมาก ส่งผลให้การตกตะกอนที่เกิดขึ้นจัดเป็นการตกตะกอนแบบโดด (Discrete Settling) สามารถคำนวณความเร็วการตกตะกอนของอนุภาคสาหร่ายได้จากสมการสโตค (Stokes equation) ดังสมการที่ 4-1

$$V_0 = \frac{g\times(\rho_s-\rho)\times d^2}{18\times\mu} \qquad 4\text{-}1$$

โดยที่ V_0 = ความเร็วการตกตะกอนของอนุภาคแบบโดด

g = ค่าคงที่แรงโน้มถ่วงโลก

ρ_s = ความหนาแน่นของอนุภาคสาหร่าย

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ

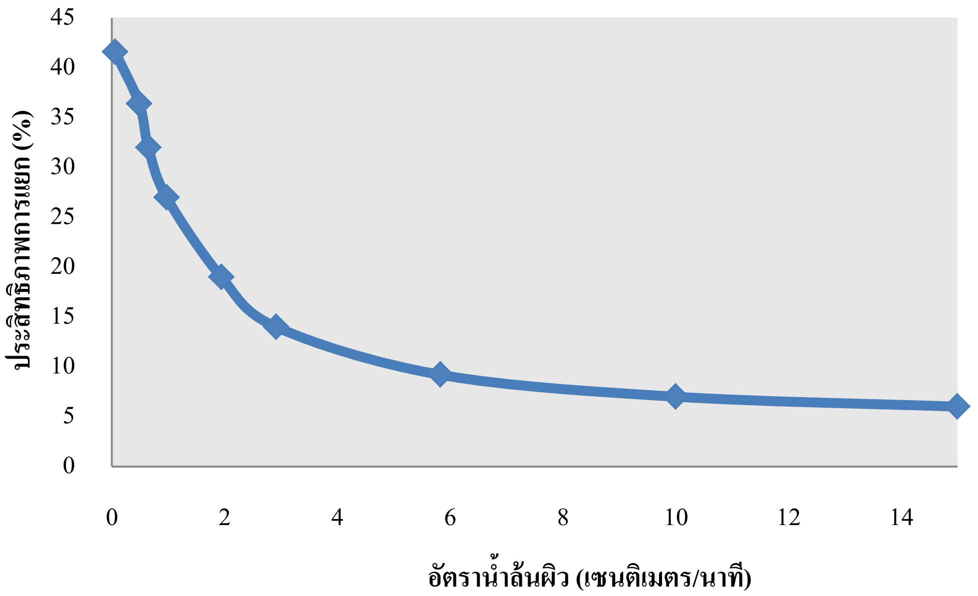
d = เส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคสาหร่าย

μ = ความหนืดสมบูรณ์ของน้ำ

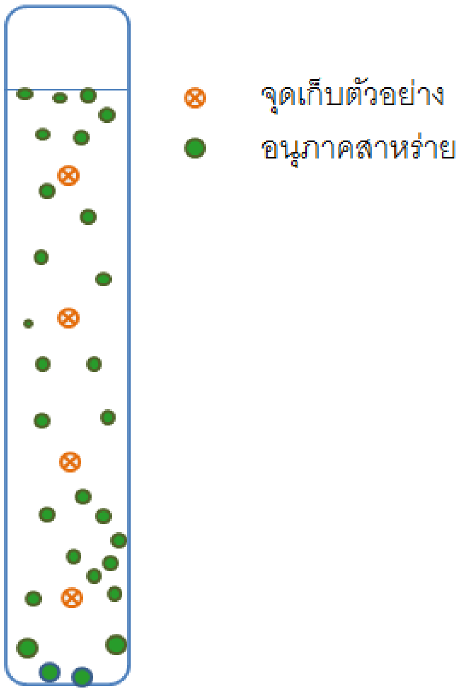
จากการคำนวณความเร็วการตกตะกอนที่อุณหภูมิ 25 ℃ พบว่าความเร็วการตกตะกอนของอนุภาคสาหร่ายมีค่า 1.96 มิลลิเมตร/ชั่วโมง หรือ 3.26×10^{-3} เซนติเมตร/นาที ซึ่งหมายความว่าอนุภาคสาหร่ายเคลื่อนที่ลงสู่ก้นภาชนะด้วยระยะทางประมาณ 2 มิลลิเมตรในเวลาหนึ่งชั่วโมง แสดงให้เห็นว่ากระบวนการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำมีประสิทธิภาพต่ำ

นอกจากการหาความเร็วการตกตะกอนจากการคำนวณตามสมการที่ 4-1 แล้วยังสามารถหาจากการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลการตกตะกอนแบบโดด พบว่าค่าอัตราน้ำล้นผิว (Overflow rate) ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายโดยหากเพิ่มอัตราน้ำล้นผิวจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกลดต่ำลง และที่อัตราน้ำล้นผิวที่เหมาะสมสำหรับถังตกตะกอนทั่วไปมีค่าประมาณ 2.29-5.69 เซนติเมตร/นาที พบว่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอ

เรลลามีค่า 8-13% ซึ่งถือเป็นการแยกที่มีประสิทธิภาพต่ำดังแสดงจากภาพที่ 4-7 ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าไม่ควรทำการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยการตกตะกอนตามธรรมชาติ



ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราน้ำล้นผิว และประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา



ภาพที่ 4-8 คอลัมน์ตรวจสอบการตกตะกอนแบบโดดของอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา

การศึกษาขั้นตอนนี้ทำให้ทราบว่าอนุภาคสาหร่ายเซลล์เดียวไม่สามารถแยกออกจากเฟสของน้ำด้วยกระบวนการตกตะกอนทางธรรมชาติ เนื่องจากอนุภาคสาหร่ายมีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน และมีค่าซีตาโพเทนเชียลติดลบ ส่งผลให้มีเสถียรภาพในการแขวนลอยในเฟสน้ำ ดังภาพที่ 4-8 และหากต้องการแยกออกจากเฟสน้ำควรทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสาหร่ายเสียก่อนด้วยการทำให้ค่าซีตาโพแทนเชียลมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน จะส่งผลให้อนุภาคสาหร่ายมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันมากขึ้น จากนั้นจึงทำการรวมอนุภาคสาหร่ายให้มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยกระบวนการฟล็อคคูเลชันแล้วค่อยทำการแยกด้วยกระบวนการอื่นที่เหมาะสมต่อไป

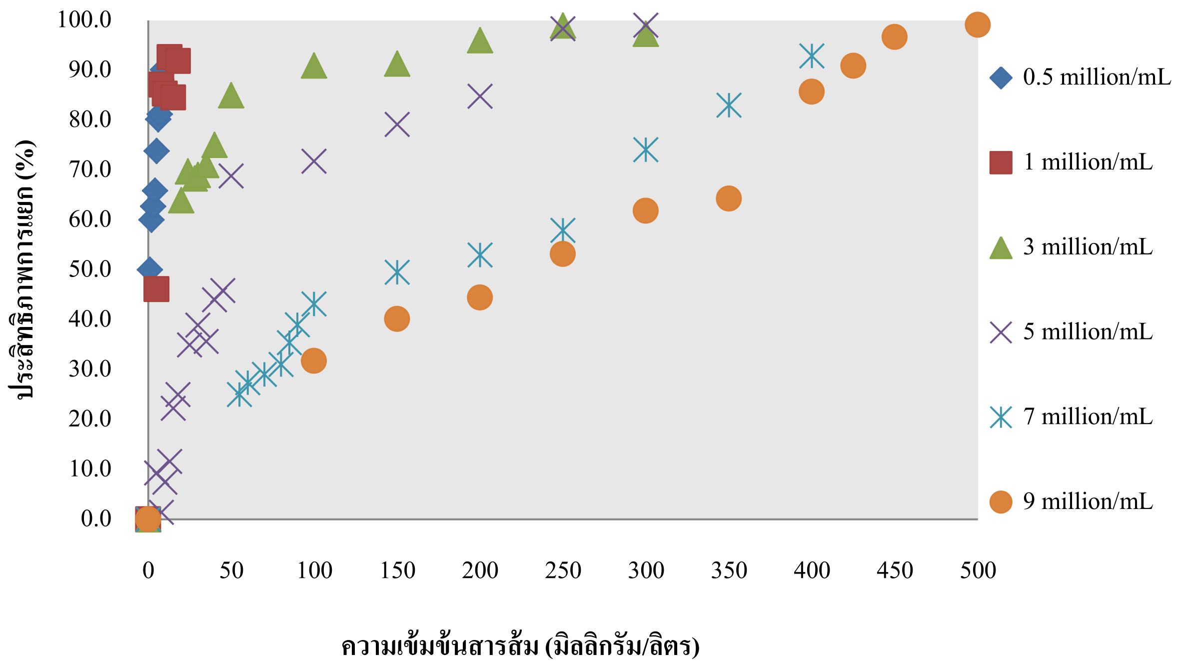
4.2 การศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนวิธีการจาร์เทส

อนุภาคสาหร่ายมีประจุลบเคลือบอยู่ที่ผิวด้านนอก ทำให้อนุภาคไม่รวมตัวกันจึงส่งผลให้อนุภาคเหล่านี้ลอยตัวอยู่ในน้ำได้อย่างมีเสถียรภาพ ในขั้นตอนนี้จึงทำการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) ช่วงการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ (Log phase) ที่ความเข้มข้น 0.5 1 3 5 7 และ 9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร โดยเตรียมน้ำสังเคราะห์จากการผสมระหว่างน้ำประปา กับน้ำสาหร่ายเข้มข้น แล้วเข้าสู่กระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อทำลายเสถียรภาพประจุบนพื้นผิวคอลลอยด์ และกระบวนการฟล็อคคูเลชันเพื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีโอกาสสัมผัสและรวมตัวกัน จนกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยวิธีจาร์เทส

4.2.1 ผลการศึกษาการทำลายเสถียรภาพบนผิวของอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอน วิธีการจาร์เทส

การศึกษากระบวนการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน วิธีการจาร์เทส เลือกใช้สารอะลูมิเนียมซัลเฟต (($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) หรือสารส้ม และแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) เป็นสารโคแอกกูแลนท์ เพื่อทำการศึกษาหาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสำหรับจ่ายให้น้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายความเข้มข้นของสาหร่าย โดยความเข้มข้นของอนุภาคสาหร่ายขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ระยะเวลาการเจริญเติบโต ความเข้มแสง ปริมาณอากาศ และปริมาณสารอาหารในแหล่งน้ำ ส่งผลให้ความเข้มข้นของสาหร่ายในแหล่งน้ำมีค่าแตกต่างกันออกไป งานวิจัยในส่วนนี้สนใจศึกษาชนิด และปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมสำหรับความเข้มข้นสาหร่ายที่ระดับต่างๆ คือ 0.5 1 3 5 7 และ 9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร

ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนด้วยจาร์เทส โดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูเลชันมีประสิทธิภาพดังนี้



ภาพที่ 4-9 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำด้วยวิธีจาร์เทส ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆโดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์

จากภาพที่ 4-9 พบว่าหากความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้ใช้ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมสูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น 0.5 1 3 5 7 และ 9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร มีความต้องการปริมาณสารส้ม 3 6 8 50 200 300 และ 400 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันที่เกิดขึ้นจัดเป็นกระบวนการแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยสารโคแอกกูแลนท์ (Sweep Coagulation) ส่งผลให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีลักษณะถูกหุ้มด้วยผลึกของสารส้ม ซึ่งจากการศึกษาทางทฤษฎีการเกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึกสารส้มที่สภาวะปริมาณเป้าสัมผัสสูงขึ้น จะส่งผลให้ใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่น้อยลง แต่จากการศึกษากลไกการทำลายเสถียรภาพแบบห่อหุ้มอนุภาคสาหร่ายด้วยผลึกสารส้มพบว่าความเข้มข้นสาหร่ายที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ใช้ปริมาณสารส้มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องมาจากสาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตมีโครงสร้างเซลล์เฉพาะตัวไม่เหมือนกับอนุภาคความขุ่นทั่วไป และหากใช้ปริมาณสารส้มสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย และจะทำให้ได้ตะกอนที่มีปริมาณสารประกอบอะลูมินัมสูงขึ้น และมีความต้องการปริมาณด่างที่เพิ่มขึ้นด้วย หากน้ำสังเคราะห์สาหร่ายมีปริมาณด่างไม่เพียงพอ จะส่งผลให้ค่าพีเอชไม่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน

และส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกลดต่ำลงได้ ดังนั้นควรเลือกใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมไม่มากหรือน้อยจนเกินไปโดยสามารถคำนวณปริมาณตะกอนและด่างได้จากสมการที่ 4-2

การคำนวณปริมาณตะกอนสารส้มที่เกิดขึ้น และปริมาณด่างที่ใช้ในกระบวนการเติมสารส้มจากสมการสตอยชิโอเมตริคของกระบวนการโคแอกกูเลชันของสารสารส้ม ดังสมการที่ 4-2

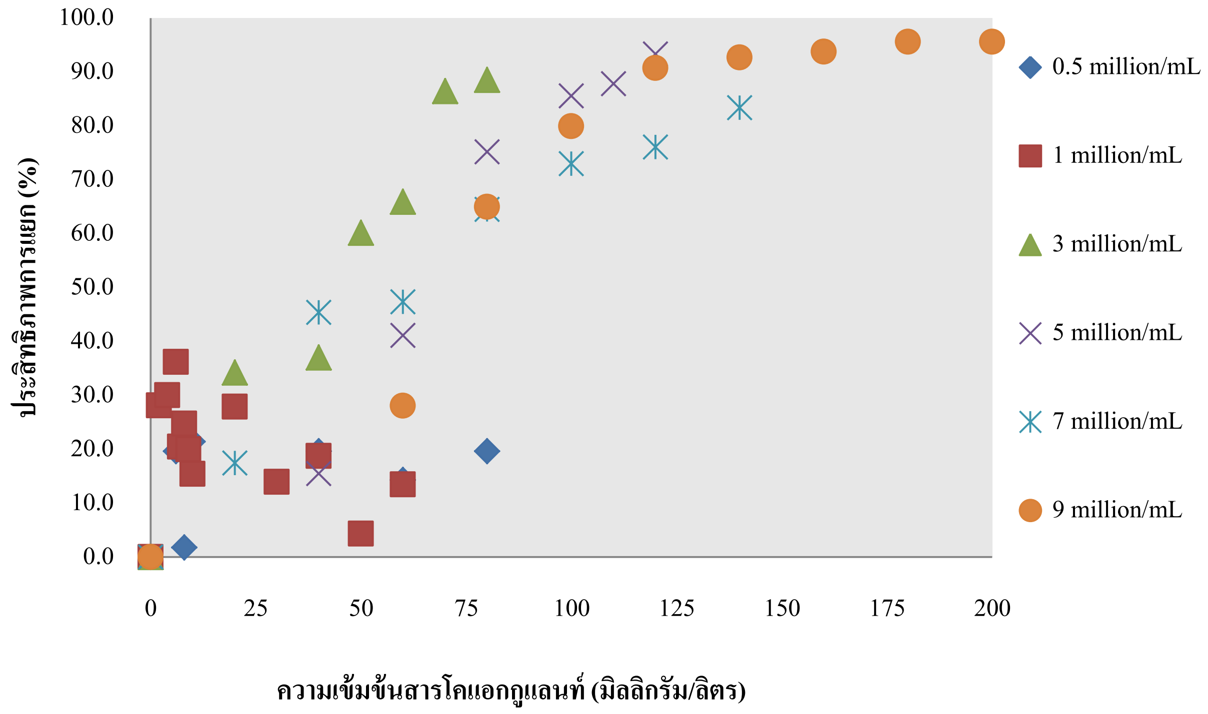
$$Al_2(SO_4)_3 14.3H_2O + 3Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 3CaSO_4 + 2Al(OH)_3 + 6CO_2 + 14.3H_2O \quad 4\text{-}2$$

ตารางที่ 4-2 ปริมาณด่างและตะกอนสารส้ม

ปริมาณสารส้ม(มิลลิกรัม/ลิตร)	ด่าง (มิลลิกรัม/ลิตร)	ตะกอนสารส้ม (มิลลิกรัม/ลิตร)
8	4	2.08
100	50	26
150	75	39
200	100	52
250	125	65

นอกจากนี้น้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 3 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมสูงเป็น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 6 เท่าของปริมาณสารส้มที่เหมาะสมสำหรับน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ดังนั้นงานวิจัยในส่วนถัดไปจึงสนใจศึกษาสารโคแอกกูแลนท์ชนิดอื่นที่เหมาะสำหรับการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นสูงขึ้น

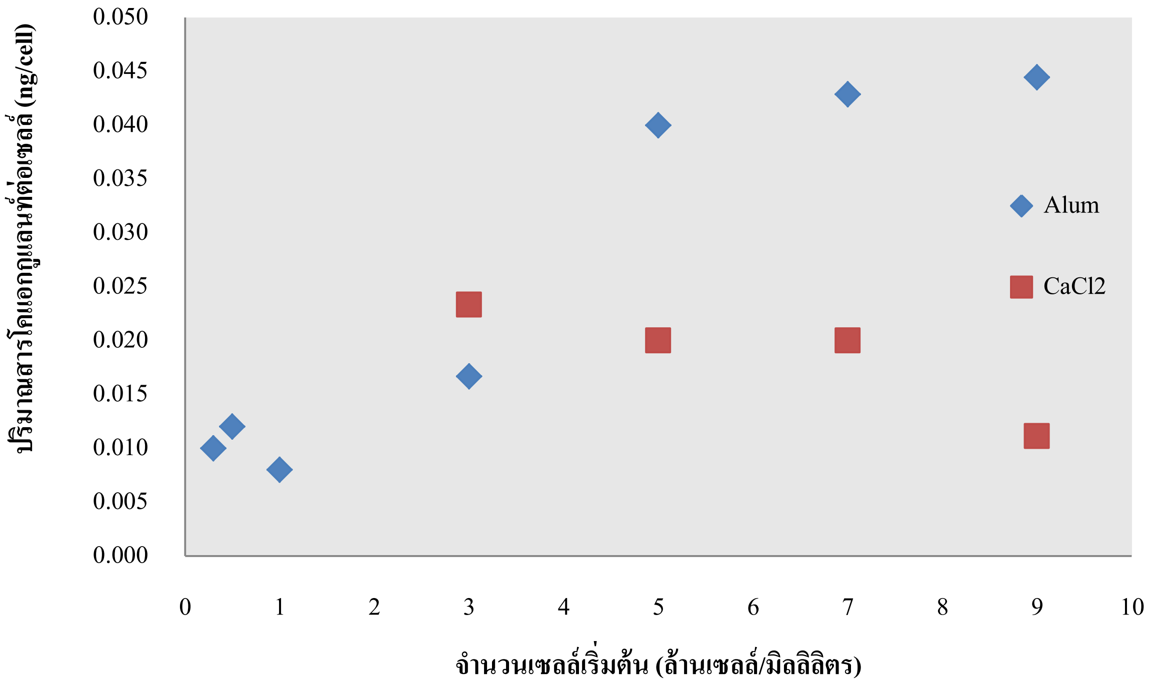
ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนด้วยจาร์เทส โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูเลชัน เนื่องจากพื้นผิวของอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลามีประจุลบเคลือบอยู่ด้านนอก ส่งผลให้ค่าซีต้าโพเทนเชียวมีค่าเป็นลบ ดังนั้นการศึกษาในส่วนนี้จึงเลือกใช้สารแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนท์ โดยสารแคลเซียมคลอไรด์จะแตกตัวเป็นประจุบวกของแคลเซียม จับกับประจุลบที่ผิวของอนุภาคสาหร่ายส่งผลให้ค่าซีต้าโพเทนเชียลเข้าใกล้ศูนย์มากยิ่งขึ้น ดังนั้นอนุภาคสาหร่ายจึงมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันมากขึ้น การทดลองในส่วนนี้ทำการศึกษาหาปริมาณสารแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมสำหรับน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 0.5 1 3 5 7 และ 9 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร



ภาพที่ 4-10 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำด้วยวิธีจาร์เทส ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆโดยใช้สารแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนท์

จากภาพที่ 4-10 พบว่าแคลเซียมคลอไรด์ช่วงความเข้มข้น 2-60 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 3 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตรต่ำกว่า 40% แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมคลอไรด์ไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารโคแอกกูแลนท์ในการทำลายเสถียรภาพน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 3 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ส่วนน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 3 5 7 และ 9 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร มีความต้องการแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 70 100 140 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่สูงข้นต้องการปริมาณสารแคลเซียมคลอไรด์ในการทำลายเสถียรภาพที่น้อยลง เนื่องจากมีปริมาณเป้าสัมผัส (อนุภาคสาหร่าย) ที่สูงขึ้น ส่งผลให้เพิ่มโอกาสการชนกันของอนุภาคสาหร่าย

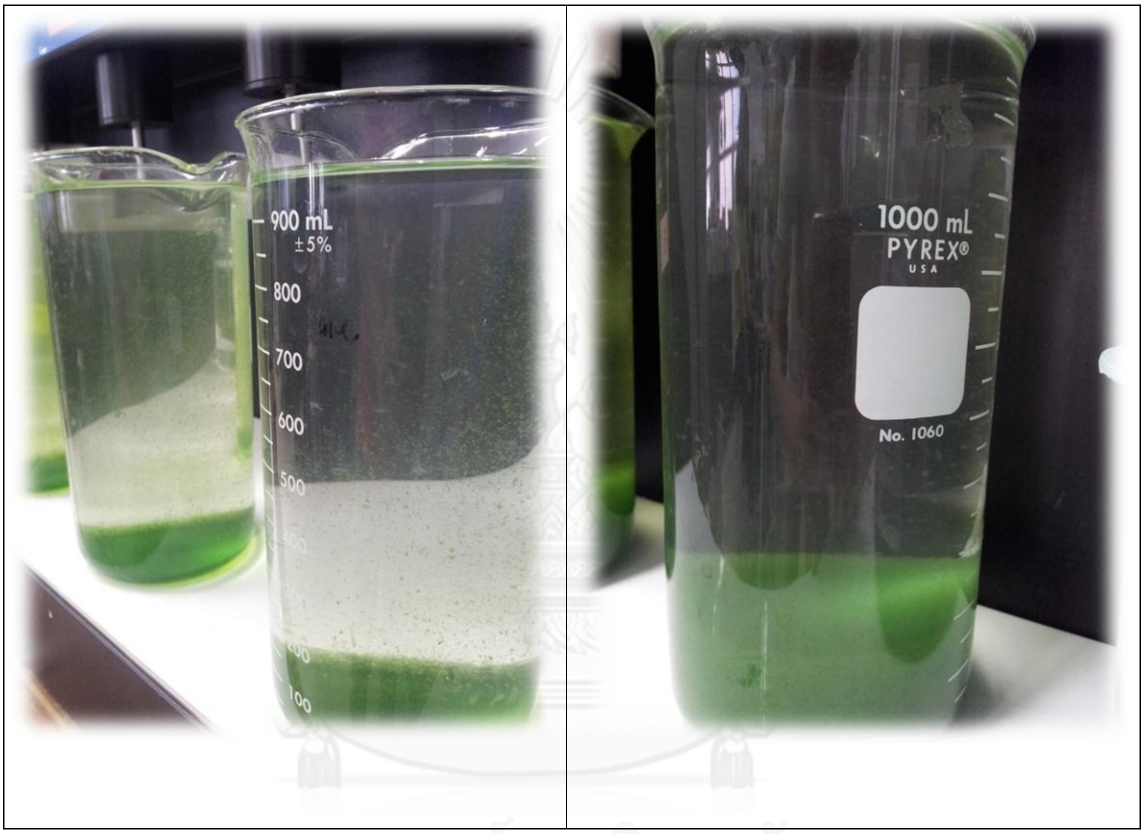
ผลการศึกษาเปรียบเทียบความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ต่อจำนวนเซลล์ของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่าง โดยสารโคแอกกูแลนท์ที่เลือกใช้ คือ สารอะลูมิเนียมซัลเฟต ($(Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) หรือสารส้ม และแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)



ภาพที่ 4-11 ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่ต้องการใช้ในจาร์เทสต่อจำนวนเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้นต่างๆ ให้ประสิทธิภาพการแยกประมาณ 85%

จากภาพที่ 4-11 พบว่าการศึกษาชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์สำหรับการทำจาร์เทสที่ให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายประมาณ 85% ต่อจำนวนเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าการใช้สารแคลเซียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์สำหรับน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 3 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ให้ประสิทธิภาพการแยกต่ำกว่า 85% ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสของเหลว ส่วนการใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ที่ความเข้มข้นสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาต่ำกว่า 3 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตรมีความต้องการสารส้มประมาณ 1×10^{-2} นาโนกรัมอะลูมินัมต่อจำนวนเซลล์ ดังนั้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 3 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ควรใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ เนื่องจากมีความต้องการปริมาณสารส้มต่ำ และให้ประสิทธิภาพสูง แต่ที่ความเข้มข้นสาหร่าย 3 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร จะมีความต้องการสารส้มประมาณ 1.5×10^{-2} นาโนกรัมอะลูมินัมต่อจำนวนเซลล์ และมีความต้องการสารแคลเซียมคลอไรด์ที่ 2.3×10^{-2} นาโนกรัมแคลเซียมต่อจำนวนเซลล์ สามารถเลือกใช้สารทั้งสองชนิดเป็นสารโคแอกกูแลนท์ แต่ควรเลือกใช้สารส้มเนื่องจากใช้ปริมาณน้อยกว่าแคลเซียมคลอไรด์ นอกจากนี้น้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 3 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร สารส้มและแคลเซียมคลอไรด์ให้ประสิทธิภาพสูงทั้งคู่ แต่ที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่สูงขึ้นส่งผลให้มีความต้องการสารส้มที่เพิ่มมากขึ้นเป็นประมาณ 4.0×10^{-2} นาโนกรัมอะลูมินัมต่อจำนวนเซลล์ ส่วนสารแคลเซียมคลอไรด์ต้องการสารแคลเซียมคลอไรด์ที่ลดลงเป็นช่วง 1.1×10^{-2}-2.0×10^{-2} นาโนกรัมแคลเซียมต่อจำนวนเซลล์ ดังนั้นที่

ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายสูงกว่า 3 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ควรเลือกใช้สารแคลเซียมคลอไรด์ เนื่องจากมีความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ต่อจำนวนเซลล์สาหร่ายน้อยกว่าการเลือกใช้สารส้ม



ภาพที่ 4-12 เปรียบเทียบปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากการใช้สารโคแอกกูแลนท์ต่างชนิดกัน ด้านซ้าย : สารแคลเซียมคลอไรด์ และด้านขวา : สารส้ม

จากภาพที่ 4-12 พบว่าการทำจาร์เทสที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายสูงกว่า 3 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ด้วยการเติมสารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์จะส่งผลให้ตะกอนสาหร่ายมีปริมาณสูงกว่าการใช้สารแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนท์ เนื่องจากตะกอนที่ได้มีปริมาณสารประกอบอะลูมินัมเจือปนอยู่ด้วย แต่ตะกอนที่ได้จากการเติมแคลเซียมคลอไรด์จะเป็นตะกอนสาหร่ายรวมตัวกันเท่านั้นจึงมีปริมาณน้อยกว่า ดังนั้นที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายสูงกว่า 3 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ควรเลือกใช้สารแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนท์

การศึกษากลไกการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคได้จากการเปรียบเทียบค่าคงที่การละลาย (K_{sp}) กับผลคูณความเข้มข้นของตะกอนที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาที่อุณหภูมิ 25° พีเอช 7

สารส้ม ($K_{sp} = 3\times10^{-34}$) $(Al^{+3})(OH^{-})^{3}$ > K_{sp}

แคลเซียมคลอไรด์ ($K_{sp} = 5.02\times10^{-6}$) $(Ca^{+2})(OH^{-})^{2}$ < K_{sp}

กรณี

Q < Ksp สารละลายอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัว ไม่ตกตะกอน

Q = Ksp สารละลายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวพอดี

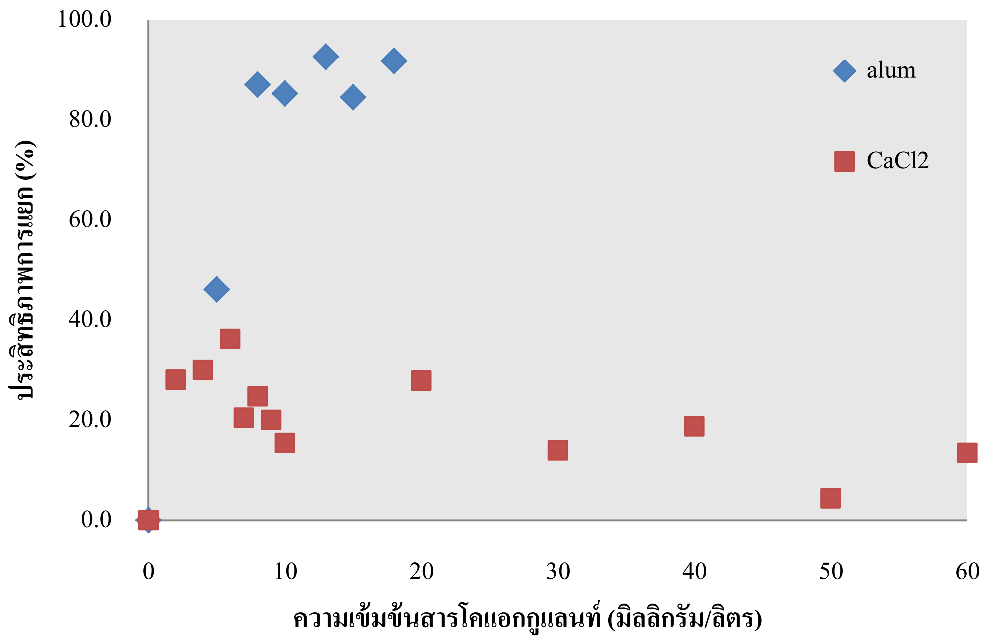
Q > Ksp สารละลายเกินสภาวะอิ่มตัวประจุบวกและลบบางส่วนรวมกันเกิดตะกอนขึ้น

จากการทดลองในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าการเติมสารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ทำให้เกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบห่อหุ้มด้วยอนุภาคสารส้มเนื่องจากสารละลายเกินสภาวะอิ่มตัวเกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนขึ้น ส่วนการเติมแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนท์ทำให้เกิดกลไกการดูดติดและทำลายประจุที่ผิวอนุภาคเนื่องจากสารละลายอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัว ไม่เกิดการตกตะกอน

จากการทดลองในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 3 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ควรเลือกใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ ส่วนน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นสูงกว่า 3 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ควรเลือกใช้สารแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนท์ นอกจากนี้พบว่าที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่าย 1 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตรมีความต้องการสารโคแอกกูแลนท์น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นอื่นๆที่ศึกษา ซึ่งเป็นการประหยัดสารเคมี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้น้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตรเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้วยกระบวนการต่างๆ

4.2.2 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

งานวิจัยนี้เลือกทำการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นสาหร่าย 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร เนื่องจากมีความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นในช่วง 0.5-9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร เพื่อลดปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนท์และนำไปใช้ในการทดลองในส่วนถัดไป



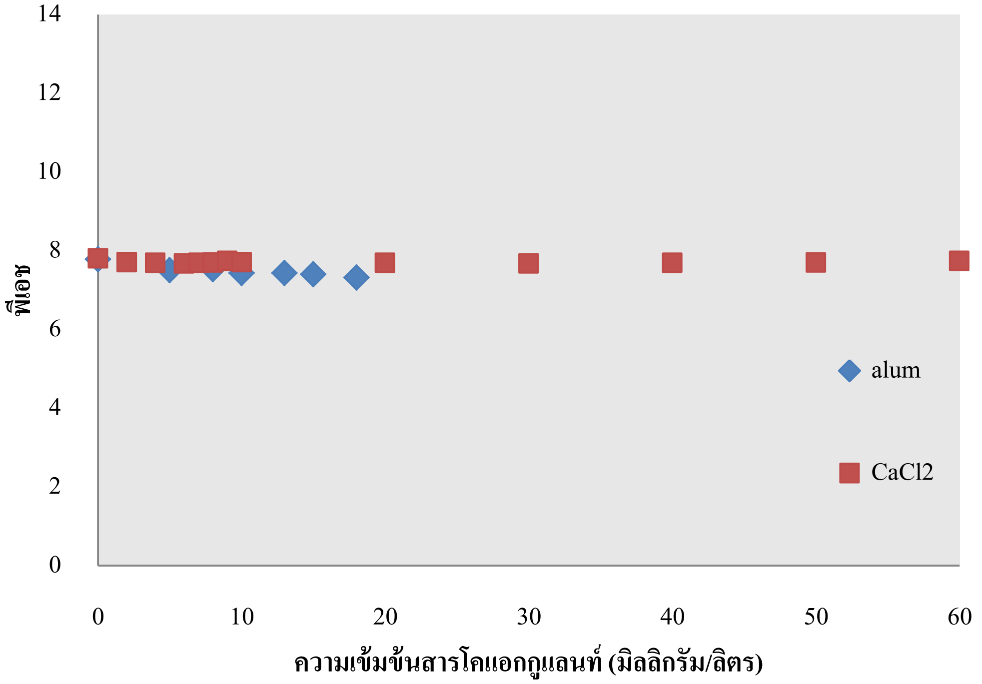
ภาพที่ 4-13 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิเมตรด้วยวิธีจาร์เทส (Jar test)

จากภาพที่ 4-13 พบว่าสารสารส้มที่ความเข้มข้นช่วง 0-20 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาออกจากน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิเมตร ได้ประสิทธิภาพการแยกสูงถึง 85% ที่ความเข้มข้นสารส้ม 8 มิลลิกรัม/ลิตร และหากเพิ่มความเข้มข้นสารส้มมากกว่า 8 มิลลิกรัม/ลิตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือค่อนข้างคงที่ ส่วนความเข้มข้นสารแคลเซียมคลอไรด์ในช่วง 0-60 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ประสิทธิภาพการแยกสูงสุดที่ 36% ที่ความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์ 6 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพการแยกต่ำกว่าการใช้สารส้ม เนื่องจากน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่ำ มีจำนวนอนุภาคสาหร่ายหรือเป้าล่อน้อย จึงส่งผลให้การดักจับและการชนกันของอนุภาคเกิดขึ้นน้อยทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีขนาดไม่ใหญ่พอที่จะตกตะกอนลงสู่ก้นถัง ดังนั้นสารส้มที่ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัม/ลิตร ดังแสดงภาพที่ 4-14 มีความเหมาะสมเป็นสารโคแอกกูแลนท์สำหรับแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร

ภาพที่ 4-14 การแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยวิธีจาร์เทส ด้วยสารโคแอกกูแลนท์ต่างชนิดกัน
ด้านซ้าย : แคลเซียมคลอไรด์ ด้านขวา : สารส้ม

นอกจากนี้จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ยังพบว่ากระบวนการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจากการเติมสารส้มเป็นสารโคแอกกูเลชันจัดเป็นกระบวนการห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยสารโคแอกกูแลนท์ (Sweep Coagulation) เนื่องจากลักษณะของตะกอนสาหร่ายมีการรวมตัวกันของอนุภาคสาหร่ายและถูกหุ้มด้วยผลึกของสารส้ม แล้วทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงมีแนวโน้มตกตะกอนลงสู่ก้นภาชนะ ส่วนกระบวนการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจากการเติมสารแคลเซียมคลอไรด์จัดเป็นกระบวนการทำลายประจุที่ผิวคอลลอยด์ จากการแตกตัวประจุบวกของแคลเซียมจับตัวกับประจุลบบนผิวของอนุภาคสาหร่าย ส่งผลให้พื้นผิวของอนุภาคสาหร่ายเป็นกลาง จึงมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันโดยตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นตะกอนของอนุภาคสาหร่ายจับตัวกัน ส่งผลให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีขนาดไม่ใหญ่นักเมื่อเทียบกับตะกอนสาหร่ายที่ถูกห่อหุ้มด้วยสารส้ม

CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 4-15 ค่าพีเอชภายหลังการโคแอกกูเลชันที่ความเข้มข้นสารส้ม และแคลเซียมคลอไรด์ต่างๆ

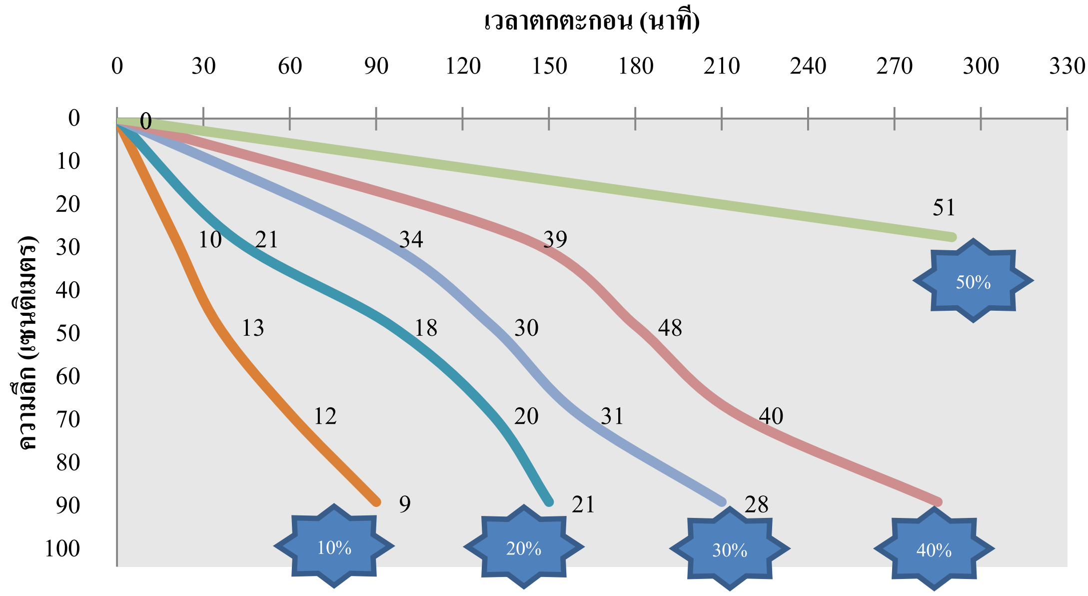
จากภาพที่ 4-15 พบว่าน้ำสังเคราะห์สาหร่ายมีค่าพีเฮชเริ่มต้นประมาณ 8 หลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันแบบจาร์เทส ส่งผลทำให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในช่วง 7-8 เนื่องจากการเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่ายใช้น้ำประปาเป็นตัวเจือจาง ซึ่งองค์ประกอบของน้ำประปามีปริมาณอัลคาไลนิตี้หรือด่างเพียงพอต่อการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน จึงทำให้น้ำที่ได้หลังการทำจาร์เทสสามารถรักษาระดับพีเอชให้ไม่เปลี่ยนแปลงไปมาก และยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน คือ 6.8-8.2

จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ทำให้ทราบว่าปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมสำหรับน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร คือ ความเข้มข้นสารส้มที่ 8 มิลลิกรัม/ลิตร โดยการเติมสารส้มที่มากเกินไปส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่จะส่งผลต่อปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณสารประกอบอะลูมินัมสูงขึ้น ส่งผลให้ยากแก่การกำจัด นอกจากนี้การเติมสารส้มปริมาณมากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความต้องการปริมาณด่างที่เพิ่มขึ้นด้วย ตามสมการที่ 4-2 และจากการศึกษาการตกตะกอนของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายพบว่ามีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นงานวิจัยในส่วนถัดไปจึงสนใจศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

4.2.3 ผลการศึกษาการตกตะกอนของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

การศึกษาการตกตะกอนของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆภายหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน เลือกทำการศึกษาน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 และ 5 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยใช้สารส้มและแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนท์ตามลำดับ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและลักษณะการตกตะกอนของอนุภาคสาหร่ายที่ผ่านการเติมสารโคแอกกูแลนท์ต่างชนิดกัน

การศึกษาการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร หลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันแบบจาร์เทสด้วยสารส้มที่ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพดังรูปที่ 4-16



ภาพที่ 4-16 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรสาร

จากภาพที่ 4-16 พบว่าอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มแล้ว ส่งผลให้การตกตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นแบบรวมกลุ่ม เนื่องจากอนุภาคสาหร่ายมีการรวมกลุ่มกันและเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้น จึงมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนเพิ่มมากขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพการแยกด้วยกระบวนการตกตะกอนสูงกว่าการตกตะกอนตามธรรมชาติดังสมการที่ 4-3

กรณีถังปฏิกิริยาสูง 150 เซนติเมตร หากพิจารณาอัตราน้ำล้นผิวสำหรับถังตกตะกอนทั่วไปที่ 3 ลิตร/นาที จะมีเวลากักเก็บในถัง 50 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพการแยกด้วยการตกตะกอน 19.4% และหากพิจารณาเป็นถังทำให้ลอยด้วยอากาศละลายจะมีค่าอัตราน้ำล้นผิวในช่วง 8-25 ลิตร/นาที พบว่าจะมีเวลากักเก็บที่มากสุดที่ยังเหมาะสม คือ 20 นาที มีประสิทธิภาพการแยก 13%

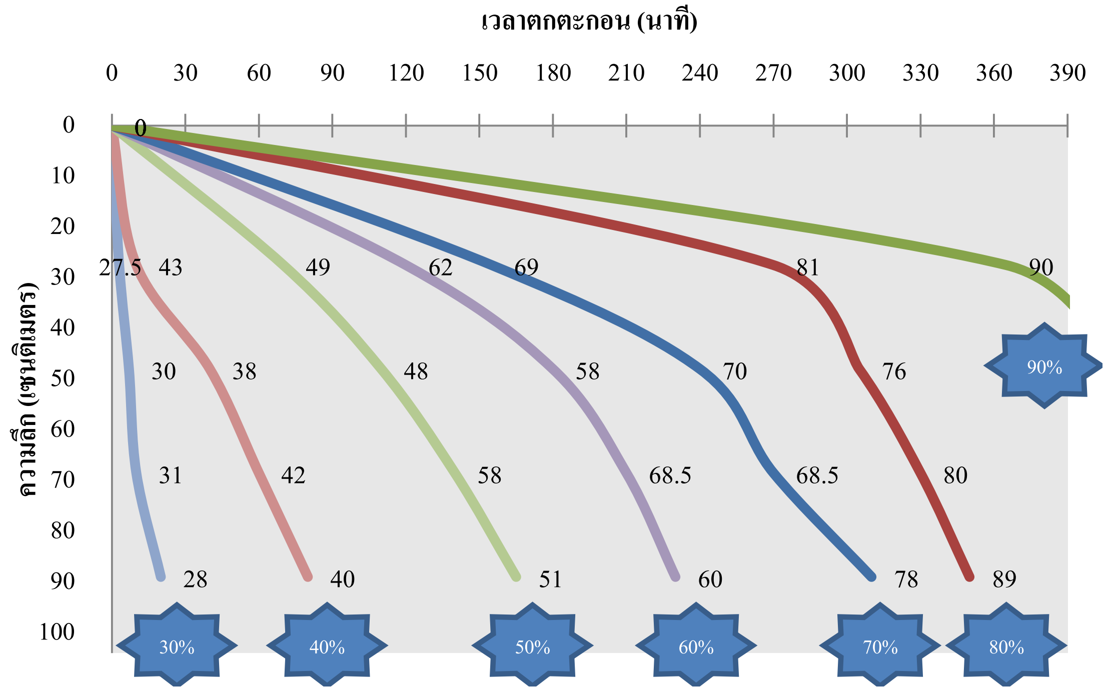
ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายจากที่เวลากักเก็บ 20 นาที ดังสมการที่ 4-3

% การกำจัดตะกอนแขวนลอย = $5 + (5\times d_1/d) + (10\times d_2/d) + (10\times d_3/d) + (10\times d_4/d) + (10\times d_5/d)$

= $5 + (5\times 60/90) + (10\times 22.5/90) + (10\times 11/90) + (10\times 5.5/90) + (10\times 3/90)$

= 13 %

การศึกษาการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 5 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร หลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันแบบจาร์เทสด้วยแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพการแยกดังรูปภาพที่ 4-17



ภาพที่ 4-17 ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มที่ความเข้มข้น 5 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ใช้สารแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารแอกกูแลนท์

จากภาพที่ 4-17 พบว่าอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารแคลเซียมคลอไรด์แล้ว ส่งผลให้การตกตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นแบบรวมกลุ่ม เนื่องจากอนุภาคสาหร่ายมีการรวมกลุ่มกันและเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้น จึงมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนเพิ่มมากขึ้นทำให้มี

ประสิทธิภาพการแยกด้วยกระบวนการตกตะกอนสูงกว่าการตกตะกอนตามธรรมชาติดังแสดงตามสมการที่ 4-4

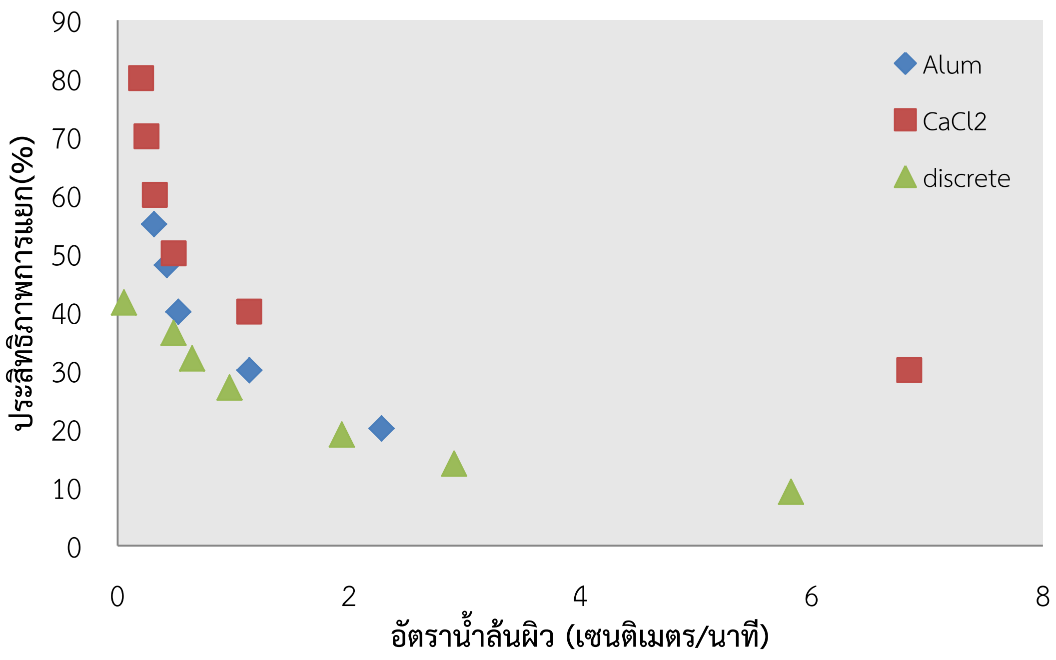
กรณีถังปฏิกิริยาสูง 150 เซนติเมตร หากพิจารณาอัตราน้ำล้นผิวสำหรับถังตกตะกอนทั่วไปที่ 3 ลิตร/นาที จะมีเวลากักเก็บในถัง 50 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพการแยกด้วยการตกตะกอน 48.1% และหากพิจารณาเป็นถังทำให้ลอยด้วยอากาศละลายจะมีค่าอัตราน้ำล้นผิวในช่วง 8-25 ลิตร/นาที พบว่าจะมีเวลากักเก็บที่มากสุดที่ยังเหมาะสม คือ 20 นาที มีประสิทธิภาพการแยก 42%

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายที่เวลากักเก็บ 20 นาที จากสมการที่ 4-4

% การกำจัดตะกอนแขวนลอย = $30 + (10\times d_1/d) + (10\times d_2/d) + (10\times d_3/d) + (10\times d_4/d) + (10\times d_5/d) + (10\times d_6/d)$

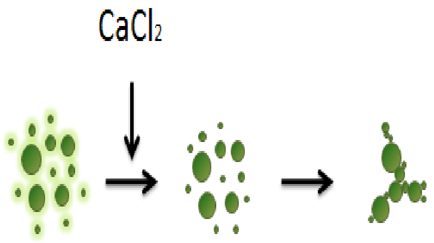
= $30 + (10\times 63.5/90) + (10\times 23/90) + (10\times 8/90) + (10\times 6.5/90) + (10\times 4.5/90) + (10\times 2.5/90)$

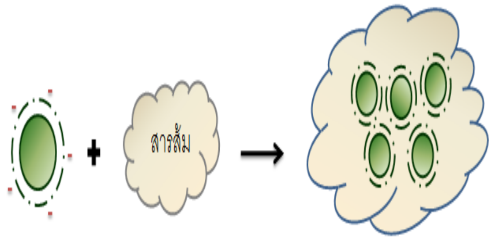
= 42 %



ภาพที่ 4-18 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่าอนุภาคสาหร่ายที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารแคลเซียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพการตกตะกอนสูงกว่าน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม เนื่องจากตะกอนอนุภาคสาหร่ายที่เกิดจากการเติมสารแคลเซียมคลอไรด์ส่งผลให้ตะกอนที่เกิดเป็นตะกอนของอนุภาคสาหร่ายรวมตัวกัน ซึ่งมีน้ำหนักมากกว่าตะกอนที่เกิดจากการเติมสารส้มที่ส่งผลให้ตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นตะกอนสาหร่ายร่วมกับตะกอนสารอะลูมินัมไฮดรอกไซด์ที่มีลักษณะปุยและรวมตัวไม่แน่นมาก ส่งผลให้น้ำหนักตะกอนเบากว่าตะกอนที่เกิดจากการเติมแคลเซียมคลอไรด์ ดังนั้นตะกอนที่เกิดจากการเติมสารแคลเซียมคลอไรด์จึงมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนสูงกว่าตะกอนที่เกิดจากการเติมสารส้ม





กลไก : ทำลายประจุที่ผิวอนุภาคด้วยแคลเซียมคลอไรด์	กลไก : เพิ่มน้ำหนักและขนาดอนุภาคด้วยสารส้ม

ภาพที่ 4-19 การทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วนกลไกเพิ่มน้ำหนักและขนาดอนุภาคด้วยสารส้มและการทำลายประจุที่ผิวอนุภาคด้วยแคลเซียมคลอไรด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4-20 คอลัมน์วิเคราะห์การแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลางคอลัมน์ 5 เซนติเมตร และความสูง 100 เซนติเมตร

ภาพที่ 4-20 คอลัมน์วิเคราะห์การแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลางคอลัมน์ 5 เซนติเมตร และความสูง 100 เซนติเมตร

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยวิธีการจาร์เทส พบว่าเมื่ออนุภาคสาหร่ายผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันแล้วเข้าสู่กระบวนการตกตะกอนต้องใช้เวลานานในการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำ และตะกอนสาหร่ายที่เกิดขึ้นค่อนข้างเบาและฟุ้งได้ง่าย ดังนั้นการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันแล้วตามด้วยกระบวนการตกตะกอนจึงไม่เหมาะสมสำหรับใช้แยกสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาและใช้เวลาในการแยกนาน นอกจากนี้ประสิทธิภาพการตกตะกอนที่ได้ยังไม่สูงมากพอสำหรับแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำ ดังนั้นงานวิจัยในส่วนถัดไปจึงสนใจที่จะทำการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายเซลล์เดี่ยวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายแทนการตกตะกอน

4.3 ผลการออกแบบอุปกรณ์แยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการไฮบริด

4.3.1 ผลการออกแบบอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้นท่อ (Static mixer)

อนุภาคสาหร่ายมีขนาดเล็กระดับไมครอน และมีค่าซีต้าโพแทนเชียลเป็นค่าลบ ส่งผลให้อนุภาคสาหร่ายแขวนลอยอยู่ในเฟสน้ำได้อย่างมีเสถียรภาพโดยไม่รวมตัวกัน ดังนั้นจึงออกแบบระบบกวนเร็วเพื่อทำการกวนผสมระหว่างสารโคแอกกูแลนท์กับน้ำสังเคราะห์สาหร่ายให้ผสมกันอย่างทั่วถึงเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสาหร่าย และเพิ่มโอกาสการสัมผัสและรวมตัวกันของอนุภาคสาหร่าย โดยออกแบบอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้นท่อ เนื่องจากอุปกรณ์ชนิดนี้ไม่ใช้พลังงานจากภายนอก เพราะการกวนผสมเกิดจากการบังคับน้ำให้ไหลเปลี่ยนทิศทางตามแนวทางภายในท่อ ส่งผลให้ความเร็วแกรเดียนท์ (G) และเวลาในการกวนผสม (t) ขึ้นกับอัตราการไหลของน้ำดิบ

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาอัตราการไหลของน้ำดิบในช่วง 3-10 ลิตร/นาที เพื่อทำการคำนวณค่าผลคูณระหว่างความเร็วแกรเดียนท์ (G) และเวลาในการกวนผสม (t) ที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์กวนเร็วแบบในเส้นท่อควรมีค่า Gxt อยู่ในช่วง 350-1700 (Kawamura) ดังตารางที่ 4-3 และ 4-4 ตามลำดับ ตัวอย่างการคำนวณตามตารางที่ ก-22

ตารางที่ 4-3 ค่า Gxt ที่อัตราการไหล 3 ลิตร/นาที ในแต่ละ element

เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (นิ้ว)	Gxt (element)							
	2	3	4	5	6	7	8	9
0.25	363	701	795	879	956	1027	1093	1156
0.50	257	430	487	538	585	629	669	708
0.75	349	644	731	808	878	943	1004	1062

ตารางที่ 4-4 ค่า Gxt ที่อัตราการไหล 10 ลิตร/นาทีในแต่ละ element

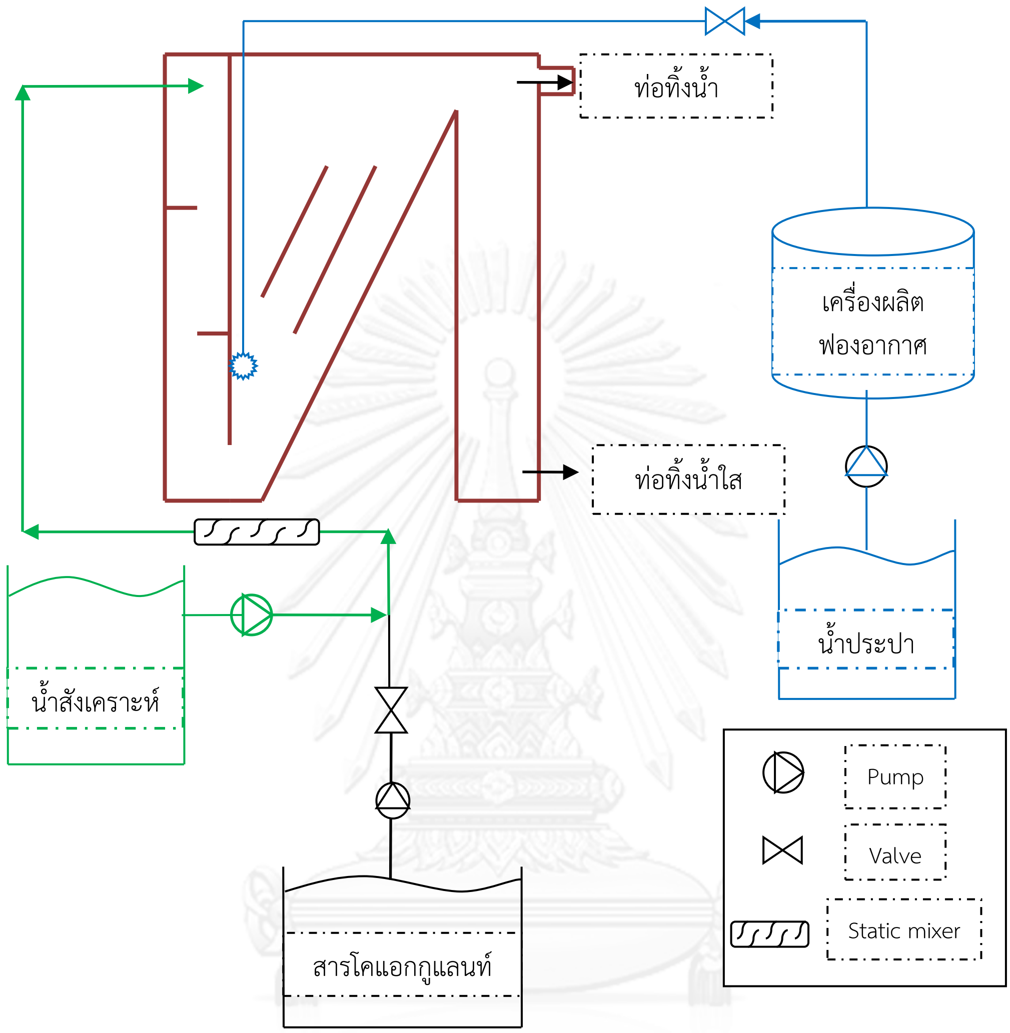
เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (นิ้ว)	Gxt (element)							
	2	3	4	5	6	7	8	9
0.25	597	765	868	960	1043	1120	1193	1261
0.50	445	859	974	1077	1171	1258	1339	1415
0.75	327	611	693	766	833	895	953	1007

จากตารางที่ 4-3 และ 4-4 แสดงการคำนวณค่า Gxt ที่อัตราการไหล 3 และ 10 ลิตร/นาที ตามลำดับ ดังนั้นเลือกใช้ขนาดท่อกวนเร็วที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ความยาว 185 มิลลิเมตร และมีจำนวน elements 6 ข้อโดยทำจากวัสดุชนิด Matt SUS304 Flange JIS 10K

4.3.2 ผลการออกแบบถังปฏิกิริยาร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายและการกรอง

การออกแบบและศึกษาถังปฏิกิริยาที่แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนฟล็อคคูเลชัน ส่วนทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และส่วนกรอง ดังแสดงภาพที่ 4-20 เหตุผลที่เลือกใช้ถังปฏิกิริยาทรงสี่เหลี่ยมเนื่องจากสามารถศึกษาแนวทางการไหลและสามารถติดตั้งอุปกรณ์สำหรับแยกตะกอนลอยสาหร่ายได้ง่ายโดยเกณฑ์การออกแบบตามตารางที่ 4-5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 4-21 ระบบปฏิกิริยารวม (Hybrid tank) สำหรับแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำ

จากภาพที่ 4-21 แสดงระบบปฏิกิริยารวม ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการโคแอกกูเลชันแบบในเส้นท่อ กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และกระบวนการกรอง โดยมีแนวทางการไหล คือ น้ำสังเคราะห์สาหร่ายผสมกับสารโคแอกกูแลนท์แล้วไหลเข้าสู่เส้นท่อกวนเร็ว (การโคแอกกูเลชัน) จากนั้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายเข้าสู่ถังปฏิกิริยาทางด้านบน แล้วไหลเข้าสู่ส่วนสัมผัส ทำให้อนุภาคสาหร่ายถูกดักจับด้วยฟองอากาศขนาดเล็กแล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำไหลเข้าสู่ส่วนแยกโดยตะกอนสาหร่ายจะแยกออกทางผิวน้ำ และน้ำใสแยกทางด้านล่างของส่วนแยก

ตารางที่ 4-5 เกณฑ์การออกแบบถังปฏิกิริยาร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาสละลาย และการกรอง (Fawcett, 1997)

กระบวนการ	พารามิเตอร์	เกณฑ์การออกแบบ	ช่วงที่เลือกใช้
ส่วนฟล็อคคูเลชั่น	เวลากักเก็บ (นาที)	5-45	7.5-25
	Velocity gradient × time (G×t)	4×10^4-6×10^4 DAF < 2×10^4 OK	~5×10^3
ส่วนทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	อัตราน้ำล้นผิว (OFR) (เซนติเมตร/นาที)	13-20	12-15
	เวลากักเก็บ(ส่วนสัมผัส) (นาที)	1-2.5	> 1.5
	ความดันอัดอากาศ (บาร์)	4-6	4
	ความเร็วเข้าสู่ส่วนแยก (เมตร/ชั่วโมง)	> 37	>37
	ความลึกถัง (เมตร)	1.5-3.5	1.5
	ความเอียงแผ่นกั้น (องศา)	60-70	60
ส่วนกรอง	ความเร็วการกรอง (เมตร/ชั่วโมง)	5-15	5-15
	ความหนาสารกรอง (เซนติเมตร)	50-80	10-50

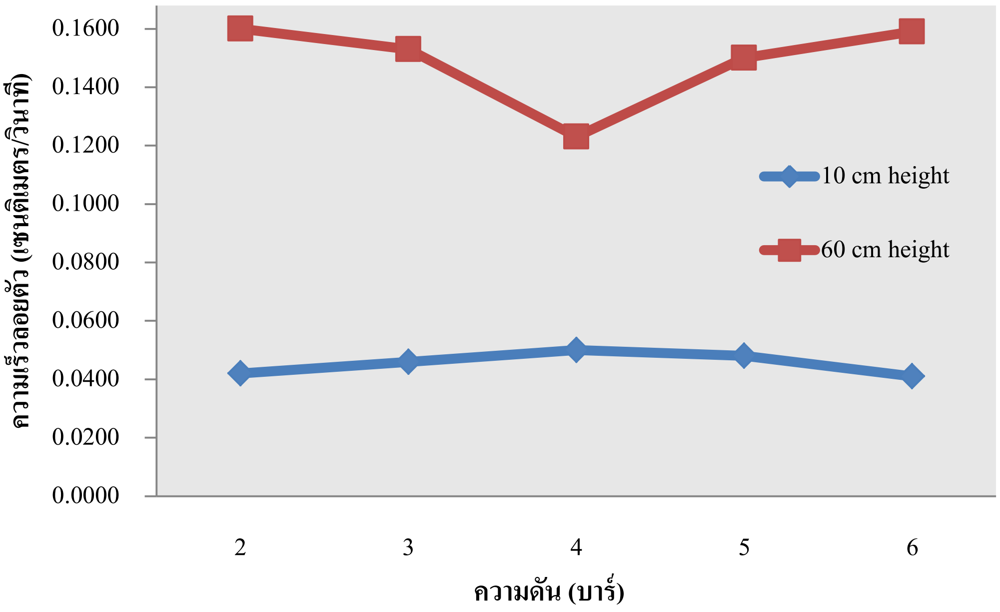
จากตารางที่ 4-5 แสดงช่วงที่ใช้ในการออกแบบถังปฏิกิริยาร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และการกรอง เพื่อใช้ในการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำ โดยที่ส่วนทำให้ลอยด้วยอากาศละลายสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนย่อย คือ ส่วนสัมผัสเพื่อสร้างโอกาสการสัมผัสกันของอนุภาคกับฟองอากาศโดยควรมีรูปแบบการไหลแบบในเส้นท่อ (plug flow) (Gregory และคณะ,

1999) และส่วนแยกเพื่อแยกอนุภาคที่ถูกดักจับด้วยฟองอากาศแล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ และน้ำใสที่ไหลลงสู่ด้านล่างของส่วนแยก

4.3.3 ผลการศึกษาลักษณะฟองอากาศในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Dissolved Air Flotation, DAF)

การศึกษาลักษณะฟองอากาศขนาดเล็กสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพื่อทำหน้าที่ดักจับอนุภาคสาหร่ายขนาดเล็กที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วให้ลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ เพื่อแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำ การทดลองนี้สร้างฟองอากาศขนาดเล็กจากการอัดอากาศและน้ำที่ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ทำให้อากาศละลายเข้าสู่เฟสน้ำและกลายเป็นฟองอากาศขนาดเล็กเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวน้ำเมื่อปล่อยออกสู่บรรยากาศ

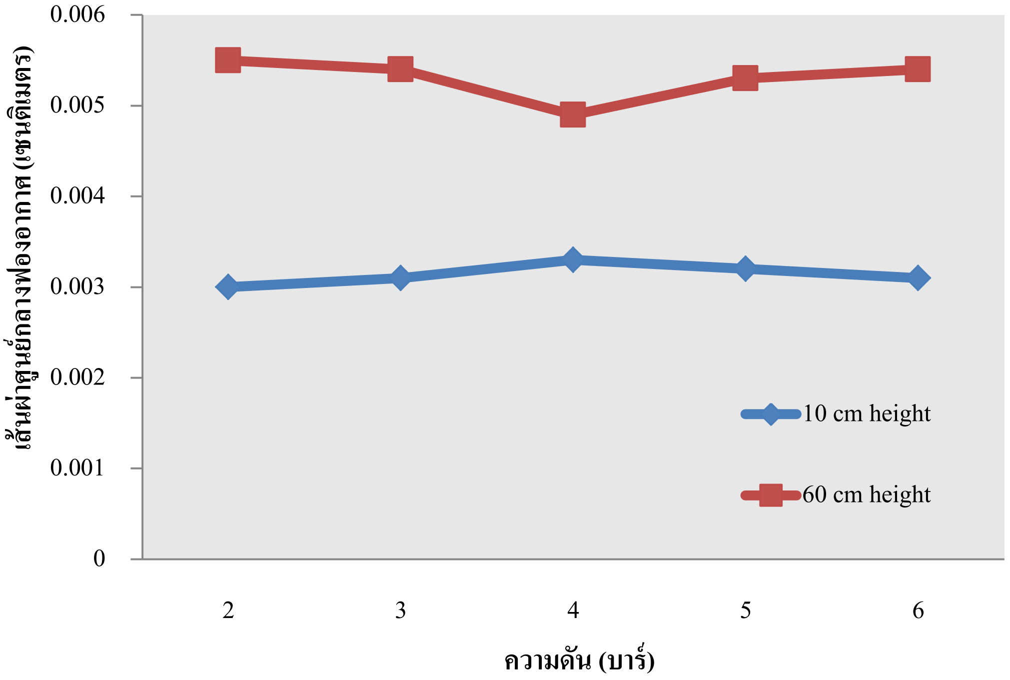
ผลการศึกษาขนาดของฟองอากาศจากกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเป็นกระบวนการที่สร้างโอกาสการดักจับของฟองอากาศขนาดเล็กกับอนุภาคแขวนลอย ดังนั้นพื้นที่ผิวจำเพาะของฟองอากาศทั้งหมดในระบบ (Painmanakul และคณะ, 2010) จึงมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค โดยพื้นที่ผิวจำเพาะของฟองอากาศจะแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ การทดลองขั้นตอนนี้จึงทำการศึกษาความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฟองอากาศที่ความดันอากาศต่างๆ ที่ความสูง 10 และ 60 เซนติเมตร จากด้านล่างถัง ดังแสดงตามรูปที่ 4-22 และ 4-23 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-22 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่ความดันเกจต่างๆ ที่ความสูง 10 และ 60 เซนติเมตร

จากภาพที่ 4-22 พบว่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีค่าสูงขึ้นตามระยะทางที่เคลื่อนที่สูงขึ้น และในช่วงความดันอากาศ 2-6 บาร์ พบว่าความดันอากาศที่ 4 บาร์ ทำให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่ความสูง 60 เซนติเมตร มีค่าต่ำที่สุด คือ 0.12 เซนติเมตร/วินาที นอกจากนี้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอัดอากาศเข้าสู่เฟสน้ำ ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศใหญ่สุดไม่เกิน 130 ไมครอน ส่งผลให้การไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow) จึงสามารถคำนวณขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศได้จากสมการของสโตก (Gregory และคณะ, 1999) ดังสมการที่ 4-5

$$V_b = \frac{g\times(\rho_{w-\rho_b})\times d_b^2}{18\times\mu} \quad 4\text{-}5$$



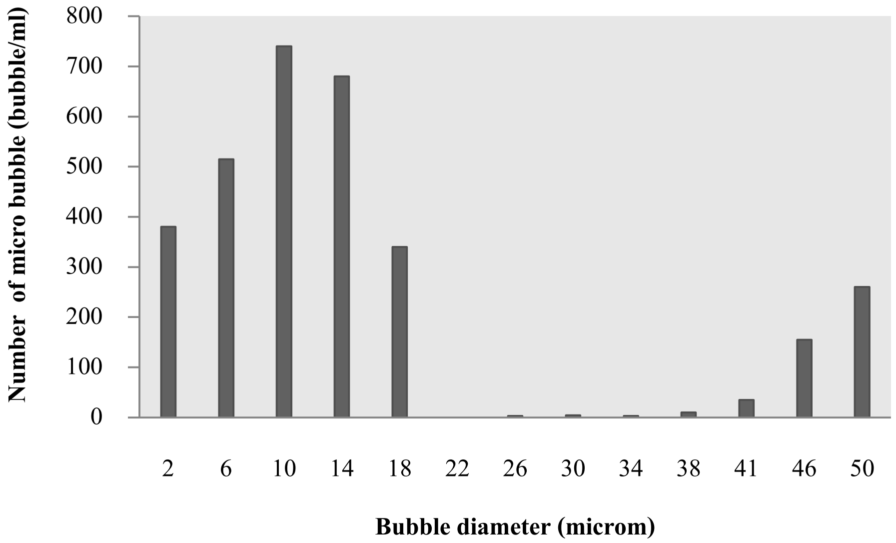
ภาพที่ 4-23 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศที่ความดันเกจต่างๆ ที่ความสูง 10 และ 60 เซนติเมตร

จากภาพที่ 4-23 พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่เคลื่อนที่ขึ้น และในช่วงความดันอากาศ 2-6 บาร์ พบว่าความดันอากาศที่ 4 บาร์ ทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศที่ระยะความสูง 60 เซนติเมตร มีค่าต่ำที่สุด คือ 48 ไมครอน และที่ระยะความสูง 10 เซนติเมตร ที่ความดันอากาศต่างๆ ฟองอากาศมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 ไมครอน

จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศที่เหมาะสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีขนาดอยู่ในช่วง 10-100 ไมครอน แสดงให้เห็นว่าความดันอากาศในช่วง 2-6 บาร์ สามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็กได้ แต่ความดันอากาศที่ 4 บาร์สามารถสร้างฟองอากาศให้มีขนาดเล็กที่สุด และส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะของฟองอากาศสำหรับดักจับอนุภาคมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นความดันอากาศที่เลือกใช้สำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย คือ 4 บาร์ เนื่องจากให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับความดันอากาศอื่นๆ และฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นที่ระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปรากฏการณ์การรวมตัวกันของฟองอากาศขนาดเล็ก (Coalescence phenomena) นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดและจำนวนฟองอากาศจะมีความสัมพันธ์กับค่าความปั่นป่วน (G) และส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค โดยระบบควรมีค่าความปั่นป่วนที่เหมาะสมประมาณ 20-25 ต่อวินาที (Metcalf & Eddy, 2004) หากระบบมีค่าความปั่นป่วนสูงจนเกินไปจะส่งผลเพิ่มโอกาสในการชนและรวมตัวกันของฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่จนเกินไป แต่หากค่าความปั่นป่วนต่ำเกินไปจะลดโอกาสการสัมผัสกันของฟองอากาศกับอนุภาคสาหร่าย ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับสาหร่ายออกจากเฟสน้ำต่ำ ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ค่าความปั่นป่วนที่เหมาะสมกับระบบ

อนุภาคสาหร่ายเซลล์เดียวมีอนุภาคขนาดเล็กระดับไมครอน ความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ และมีค่าซีต้าโพแทนเชียลติดลบ ส่งผลให้อนุภาคมีแนวโน้มที่จะแขวนลอยอยู่ในน้ำ จากการศึกษาลักษณะของอนุภาคสาหร่ายเซลล์เดียวสายพันธุ์คลอเรลลาออกจากเฟสน้ำ พบว่าสาหร่ายมีแนวโน้มที่จะลอยตัว ดังนั้นจึงยากที่แยกออกด้วยกระบวนการตกตะกอน ซึ่งมีอัตราการไหลที่เหมาะสมไม่เกิน 2 เมตร/ชั่วโมง (Gregory และคณะ, 1999) งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายแทนกระบวนการตกตะกอน ดังนั้นกระบวนการที่เลือกใช้สำหรับแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำ ประกอบด้วย กระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และกระบวนการกรอง

จากการทดลองในส่วนนี้พบว่าความดันอากาศที่เหมาะสมสำหรับสร้างฟองอากาศขนาดเล็กเพื่อใช้ในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย คือ 4 บาร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อุปกรณ์สร้างฟองอากาศขนาดเล็กที่ความดันอัดอากาศที่ 4 บาร์ และอัตราการไหลสูงสุด 4 ลิตร/นาที จากบริษัท ซาย แอนด์ เทคโนโลยี เซอร์วิส จำกัด



ภาพที่ 4-24 การกระจายตัวของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศขนาดเล็กที่ผลิตจากเครื่องผลิตฟองอากาศขนาดเล็กจากบริษัท ซาย แอนด์ เทคโนโลยี เซอร์วิส จำกัด

ภาพที่ 4-25 เครื่องสร้างฟองอากาศขนาดเล็กด้วยความดัน 4 บาร์

จากภาพที่ 4-25 พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศขนาดเล็กที่ได้จากเครื่องผลิตฟองอากาศ บริษัท ซาย แอนด์ เทคโนโลยี เซอร์วิส จำกัด มีขนาดกระจายอยู่ในช่วง 2-50 ไมครอน และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 10 ไมครอน ซึ่งมีจำนวนฟองอากาศประมาณ 750 ฟอง/มิลลิลิตร และมีปริมาณฟองอากาศรวมทั้งหมดประมาณ 3500 ฟอง/มิลลิลิตร

4.3.4 ผลการศึกษาลักษณะของถังปฏิกิริยา

a. ผลการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design

การศึกษาเวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยา และการกวนผสมภายในถัง โดยออกแบบการทดลองวิธี Central Composite Design (CCD) กำหนดตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อเวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยา และการกวนผสมภายในถัง 3 พารามิเตอร์ คือ อัตราการไหลน้ำสังเคราะห์สาหร่าย อัตราการไหลน้ำฟองอากาศขนาดเล็ก และตำแหน่งหัวจ่ายฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งการออกแบบการทดลองที่ 5 ระดับ คือ -1.6 -1 0 1 และ 1.6 ตามลำดับ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปมินิแทบ (Minitab) ได้ดังแสดงตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ปัจจัยการออกแบบการทดลอง 3 ปัจจัยที่ 5 ระดับ

ปัจจัย	-1.6	-1	0	1	1.6
raw flow (L/min)	3	4.4	6.4	8.4	10
pressurized flow (L/min)	1	1.6	2.5	3.3	4
Position (cm) from top tank	100	110	125	140	150

จากตารางที่ 4-6 แสดงปัจจัยที่ศึกษาเวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยา และการกวนผสมภายในถังประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ อัตราการไหลน้ำสังเคราะห์สาหร่ายในช่วง 3-10 ลิตร/นาที อัตราการไหลน้ำฟองอากาศขนาดเล็กช่วง 1-4 ลิตร/นาที และตำแหน่งหัวจ่ายฟองอากาศขนาดเล็กช่วง 100-150 เซนติเมตรจากด้านบนถัง ซึ่งออกแบบการทดลองแบ่งออกเป็นปัจจัยละ 5 ระดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-7 การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design

ชุดการ ทดลอง	flow raw (ลิตร/นาที)	flow pressurized (ลิตร/นาที)	Position (เซนติเมตร)
1	8.4	1.6	110
2	6.4	2.5	125
3	6.4	2.5	125
4	6.4	2.5	125
5	8.4	3.3	110
6	4.4	1.6	140
7	8.4	3.3	140
8	8.4	1.6	140
9	4.4	3.3	140
10	4.4	3.3	110
11	6.4	2.5	125
12	4.4	1.6	110
13	6.4	2.5	100
14	6.4	4	125
15	3	2.5	125
16	6.4	2.5	150
17	6.4	2.5	125
18	10	2.5	125
19	6.4	2.5	125
20	6.4	1	125

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 4-7 แสดงการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design (CCD) ด้วยโปรแกรมมินิแทบ (Minitab) กรณี 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ซึ่งมีความเหมาะสำหรับการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ แต่อนุโลมให้สำหรับกรณีทำการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ 2 ปัจจัยและปัจจัยเชิงคุณภาพ 1 ปัจจัย ยังคงสามารถใช้การออกแบบการทดลองแบบ CCD แบบกรณี 3 ปัจจัยที่ 5 ระดับได้ ทำให้ได้การทดลองทั้งหมด 20 ชุด เพื่อศึกษาเวลากักเก็บภายในถัง และการกวนผสมภายในถังปฏิกิริยา

b. ผลการศึกษาเวลากักเก็บภายในถัง และการกวนผสมภายในถัง

การศึกษาเวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยา และการกวนผสมภายในถังปฏิกิริยามีความสัมพันธ์ต่อแนวทางการไหลภายในถัง ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยก ดังนั้นงานวิจัยในส่วนนี้จึงศึกษาเวลากักเก็บ และการกวนผสม ด้วยวิธีการการกระจายเวลาในถังปฏิกิริยา (Residence Time Distribution; RTD) (Fogler, 2005) เพื่อวิเคราะห์แนวทางการไหลภายในถังปฏิกิริยาอย่างคร่าวๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-8 เวลากักเก็บน้ำในถังปฏิกิริยาที่ตำแหน่งท่อน้ำทิ้งตะกอน และท่อน้ำใส

	เวลากักเก็บในถัง							
การทดลอง	ท่อทิ้งน้ำตะกอน				ท่อทิ้งน้ำใส			
	การทดลอง	การทำนาย	RMSE	NRMSE	การทดลอง	การทำนาย	RMSE	NRMSE
1	35.92	32.86	2.16	0.09	45.92	44.45	1.04	0.04
2	33.19	34.22	0.73	0.03	45.41	47.85	1.72	0.05
3	34.31	34.22	0.07	0.00	46.08	47.85	1.25	0.05
4	31.74	34.22	1.75	0.01	45.92	47.85	1.36	0.05
5	29.04	26.34	1.91	0.08	40.68	39.58	0.78	0.03
6	41.20	42.10	0.63	0.03	55.38	56.12	0.52	0.02
7	27.00	25.21	1.27	0.05	41.47	38.68	1.97	0.08
8	33.39	31.74	1.17	0.05	41.57	43.56	1.41	0.06
9	34.33	35.57	0.88	0.04	49.27	51.24	1.39	0.06
10	37.00	36.70	0.21	0.01	52.39	52.14	0.18	0.01
11	27.99	34.22	4.40	0.01	44.13	47.85	2.63	0.02
12	43.71	43.22	0.34	0.01	58.59	57.01	1.11	0.04
13	30.59	35.14	3.22	0.13	44.28	48.58	3.04	0.12
14	29.38	28.89	0.35	0.01	42.91	43.86	0.67	0.03
15	51.37	42.67	6.15	0.25	65.96	58.10	5.56	0.22
16	31.95	33.29	0.95	0.04	46.70	47.12	0.30	0.01
17	29.18	34.22	3.56	0.01	45.84	47.85	1.42	0.02
18	28.01	25.76	1.59	0.07	42.82	37.59	3.70	0.15
19	36.48	34.22	1.60	0.01	49.41	47.85	1.10	0.02
20	39.57	39.55	0.02	0.00	51.99	51.83	0.11	0.00
Sum NRMSE				0.10				0.11

จากตารางที่ 4-8 แสดงเวลากักเก็บภายในถังที่ได้จากผลการทดลองพบว่าการทำนายเวลากักเก็บน้ำในถังปฏิกิริยาที่ตำแหน่งท่อน้ำทิ้งตะกอนดังสมการที่ 4-6 มีค่าคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) (Normalized Root Mean Square Error; NRMSE) รวมเท่ากับ 0.10 ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่รับได้

$$t_{m1} = 64.9 - 2.59\ A - 3.84\ B - 0.0376\ C \qquad 4\text{-}6$$

โดยที่ t_{m1} = เวลากักเก็บน้ำในถังปฏิกิริยาที่ตำแหน่งท่อน้ำทิ้งตะกอน

A = อัตราการไหลน้ำดิบ

B = อัตราการไหลน้ำฟองอากาศขนาดเล็ก

C = ตำแหน่งหัวจ่ายฟองอากาศขนาดเล็ก

จากตารางที่ 4-8 พบว่าการทำนายเวลากักเก็บน้ำในถังปฏิกิริยาที่ตำแหน่งท่อน้ำใสดังสมการที่ 4-7 มีค่า Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) รวมเท่ากับ 0.11 ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่รับได้

$$t_{m2} = 78.7 - 3.14\ A - 2.87\ B - 0.0298\ C \qquad 4\text{-}7$$

โดยที่ t_{m2} = เวลากักเก็บน้ำในถังปฏิกิริยาที่ตำแหน่งท่อน้ำใส

จากการศึกษาเวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยาจนถึงตำแหน่งทั้งสองพบว่าอัตราการไหลน้ำสังเคราะห์สาหร่ายและน้ำอัดความดันมีผลกระทบต่อเวลากักเก็บในถัง ส่วนตำแหน่งหัวจ่ายฟองอากาศมีผลกระทบต่อเวลากักเก็บน้อยมาก จากนั้นพิจารณาเวลากักเก็บภายในถังที่ได้จากสมการซึ่งถือเป็นเวลากักเก็บจริงภายในถังปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับเวลากักเก็บที่ได้จากการออกแบบดังตารางที่ 4-9

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-9 เวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยาจนถึงบริเวณท่อทิ้งน้ำตะกอน และท่อทิ้งน้ำใส

การทดลอง	เวลาท่อทิ้งน้ำตะกอน		เวลาท่อทิ้งน้ำใส	
	จากสมการ	จากออกแบบ	จากสมการ	จากออกแบบ
1	32.9	22.5	44.5	32.5
2	34.2	25.3	47.8	36.5
3	34.2	25.3	47.8	36.5
4	34.2	25.3	47.8	36.5
5	26.3	19.2	39.6	27.8
6	42.1	37.5	56.1	54.2
7	25.2	19.2	38.7	27.8
8	31.7	22.5	43.6	32.5
9	35.6	29.2	51.2	42.2
10	36.7	29.2	52.1	42.2
11	34.2	25.3	47.8	36.5
12	43.2	37.5	57.0	54.2
13	35.1	25.3	48.6	36.5
14	28.9	21.6	43.9	31.3
15	42.7	40.9	58.1	59.1
16	33.3	25.3	47.1	36.5
17	34.2	25.3	47.8	36.5
18	25.8	18.0	37.6	26.0
19	34.2	25.3	47.8	36.5
20	39.5	30.4	51.8	43.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ 4-9 พบว่าเวลากักเก็บจริงที่ได้จากสมการมีค่าสูงกว่าเวลาที่ได้จากการออกแบบ แสดงให้เห็นว่าถังปฏิกิริยาที่ได้เกิดบริเวณจุดอับ (dead zone) ส่งผลให้อนุภาคสาหร่ายบางส่วนตกค้างอยู่ในระบบได้

ตารางที่ 4-10 การกวนผสมในถังปฏิกิริยาที่ตำแหน่งท่อน้ำทิ้งตะกอน และท่อน้ำใส

การกวนผสมในถังปฏิกิริยา (Peclet number, Pe)								
	ท่อทิ้งน้ำตะกอน				ท่อทิ้งน้ำใส			
การทดลอง	การทดลอง	การทำนาย	RMSE	NRMSE	การทดลอง	การทำนาย	RMSE	NRMSE
1	2.37	3.93	1.10	0.19	6.57	11.87	3.75	0.25
2	7.12	5.59	1.08	0.19	18.86	13.47	3.81	0.25
3	8.15	5.59	1.81	0.31	12.83	13.47	0.46	0.03
4	7.12	5.59	1.08	0.19	11.78	13.47	1.19	0.08
5	3.55	5.22	1.18	0.20	15.87	14.92	0.68	0.05
6	7.11	5.96	0.81	0.14	13.82	12.03	1.27	0.08
7	5.84	5.57	0.19	0.03	11.57	14.21	1.86	0.12
8	3.58	4.29	0.50	0.09	8.56	11.17	1.84	0.12
9	5.85	7.25	0.99	0.17	14.44	15.07	0.44	0.03
10	6.07	6.89	0.58	0.10	13.37	15.78	1.70	0.11
11	8.20	5.59	1.85	0.32	21.57	13.47	5.73	0.38
12	5.56	5.61	0.03	0.01	15.02	12.73	1.62	0.11
13	4.99	5.30	0.22	0.04	11.82	14.05	1.58	0.11
14	7.94	6.64	0.92	0.16	18.52	15.96	1.81	0.12
15	5.30	6.96	1.18	0.20	11.31	14.17	2.03	0.14
16	3.49	5.88	1.69	0.29	10.42	12.90	1.75	0.12
17	7.46	5.59	1.32	0.23	13.77	13.47	0.21	0.01
18	4.11	4.22	0.08	0.01	16.42	12.77	2.58	0.17
19	3.55	5.59	1.44	0.25	10.60	13.47	2.03	0.14
20	4.33	4.54	0.15	0.03	12.98	10.99	1.41	0.09
	Sum NRMSE			0.26	Sum NRMSE			0.21

จากตารางที่ 4-10 พบว่าทุกการทดลองให้ค่าเลขเพคเลต์มีค่ามากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทางด้านการพาด้วยของเหลวมีผลกระทบต่อการไหลในถังปฏิกิริยามากกว่าปัจจัยทางด้านการ

แพร่กระจายของอนุภาค ดังนั้นถังปฏิกิริยาร่วมมีรูปแบบการไหลเป็นแบบในเส้นท่อ (Plug flow reactor) นอกจากนี้ได้ทำนายการกวนผสมในถังปฏิกิริยาด้วยโปรแกรมมินิแทบ (minitab) ที่ตำแหน่งท่อน้ำทิ้งตะกอนดังสมการที่ 4-8 ค่า Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) รวมเท่ากับ 0.20 ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่รับได้

$$Pe_1 = 4.93 - 0.419\ A + 0.757\ B + 0.0119\ C \qquad 4\text{-}8$$

โดยที่ P_{e1} = การกวนผสมในถังปฏิกิริยาที่ตำแหน่งท่อน้ำทิ้งตะกอน

จากตารางที่ 4-10 พบว่าการกวนผสมในถังปฏิกิริยาที่ตำแหน่งท่อน้ำใสดังสมการที่ 4-9 มีค่า Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) รวมเท่ากับ 0.19 ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่รับได้

$$Pe_2 = 13.4 - 0.215\ A + 1.79\ B - 0.0235\ C \qquad 4\text{-}9$$

โดยที่ P_{e2} = การกวนผสมในถังปฏิกิริยาที่ตำแหน่งท่อน้ำใส

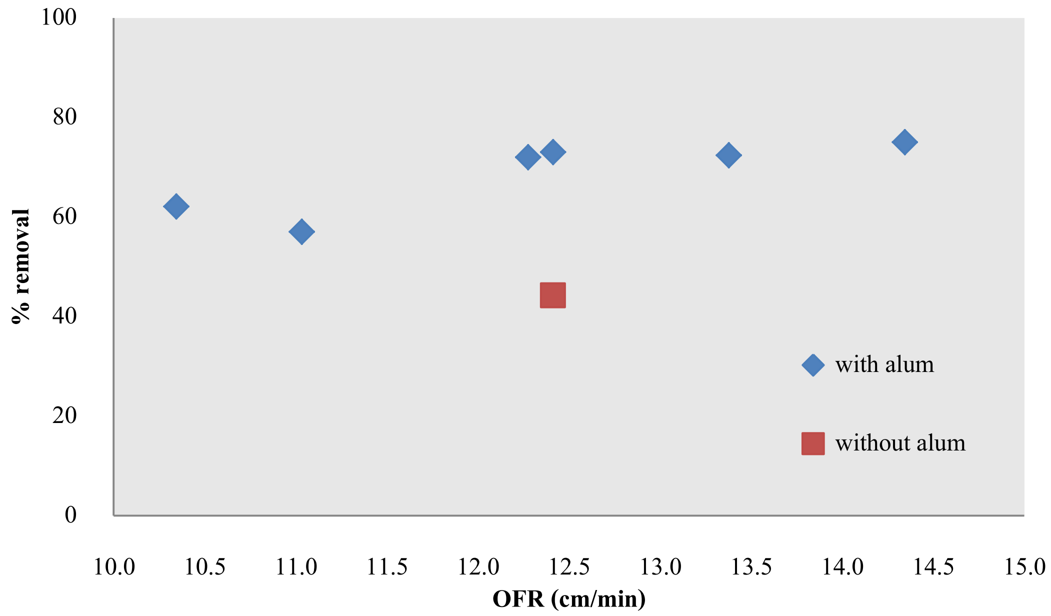
จากการศึกษาในส่วนนี้พบว่าอัตราการไหลน้ำฟองอากาศขนาดเล็กมีผลต่อการกวนผสมในถังปฏิกิริยามากที่สุด รองลงมา คือ อัตราการไหลน้ำสังเคราะห์**สาหร่าย** และตำแหน่งหัวจ่ายฟองอากาศมีผลต่อการกวนผสมภายในถังน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามควรวางหัวจ่ายให้สูงกว่ากว่าก้นถังปฏิกิริยาอย่างน้อย 35 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของน้ำฟองอากาศขนาดเล็กเข้าสู่ส่วนฟล็คคูเลชันและไม่ควรจ่ายสูงเกินกว่า 60 เซนติเมตร เพราะจะส่งผลให้เวลาในการสัมผัสน้อย ดังนั้นควรวางตำแหน่งหัวจ่ายที่ระยะ 100 ถึง 125 เซนติเมตรจากด้านบนถังปฏิกิริยา

4.4 ผลการศึกษาการแยกสาหร่ายออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการ MDAF

สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลามีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.3 ไมครอน มีความหนาแน่นใกล้เคียงน้ำ และมีค่าซีต้าโพแทนเชียลติดลบ ดังนั้นอนุภาคสาหร่ายจึงแขวนลอยอยู่ในเฟสน้ำได้อย่างมีเสถียรภาพ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำด้วยวิธีการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันแล้วทำการแยกด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราน้ำล้นผิวและอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งต่างดังนี้

4.4.1 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

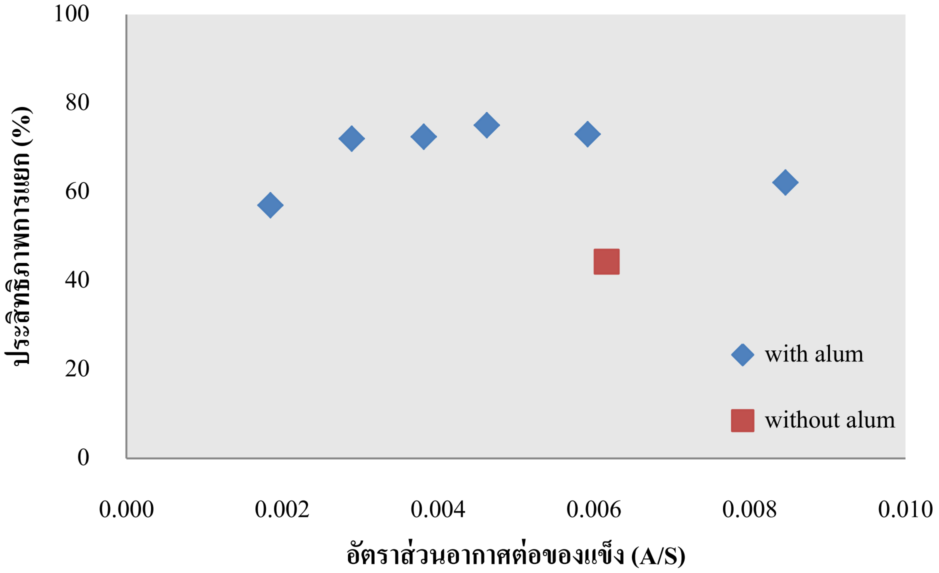
การศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายในถังปฏิกิริยารวมเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบที่อัตราการไหลน้ำสังเคราะห์สาหร่าย 3.5-6.4 ลิตร/นาที อัตราการไหลน้ำฟองอากาศที่ 1.6-4 ลิตร/นาที ส่งผลให้การเดินระบบมีอัตราน้ำล้นผิวในช่วง 10.3-14.3 เซนติเมตร/นาที และตำแหน่งหัวจ่ายสูงจากด้านบนถัง 110 เซนติเมตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายเป็นดังภาพที่ 4-26



ภาพที่ 4-26 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ

จากภาพที่ 4-26 พบว่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราน้ำล้นผิวช่วง 10.3-14.3 เซนติเมตร/นาที พบว่าที่อัตราน้ำล้นผิวมากกว่า 12 เซนติเมตร/นาที มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสูงประมาณ 75% ซึ่งมีค่าสัมพันธ์กับค่าอัตราน้ำล้นผิวสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันที่ Edzwald (2010) แนะนำ คือ 8-25 เซนติเมตร/นาที แต่หากทำการแยกด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายโดยไม่จ่ายสารโคแอกกูแลนท์ (สารส้ม) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกต่ำลงเหลือ 44% ดังนั้นการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการแยกอนุภาคสาหร่ายควรแยกด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันที่อัตราน้ำล้นผิวมากกว่า 12 เซนติเมตร/นาที

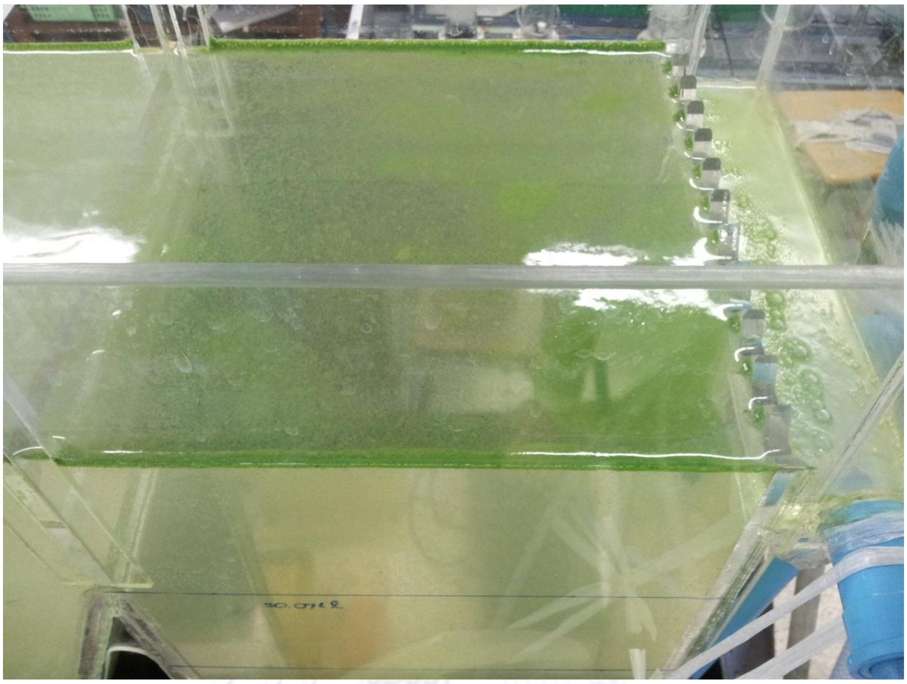
นอกจากค่าอัตราน้ำล้นผิว (OFR) ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกของระบบแล้ว ค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง (A/S ratio) ก็ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกดังรูปภาพที่ 4-27



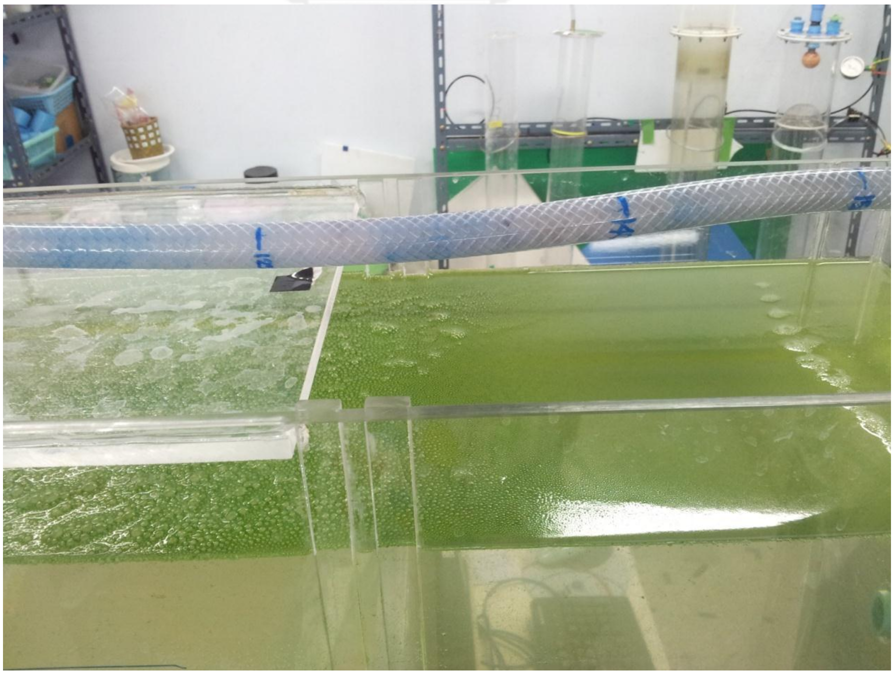
ภาพที่ 4-27 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งต่างๆ

จากภาพที่ 4-27 พบว่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งช่วง 2×10^{-3}-8×10^{-3} มิลลิลิตรของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง มีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 75% ที่อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งช่วง 3×10^{-3} -6×10^{-3} มิลลิลิตรของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง ซึ่งอยู่ในช่วงที่ Metcalf & Eddy แนะนำว่าเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และหากเดินระบบโดยไม่จ่ายสารโคแอกกูแลนท์ (สารส้ม) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกลดต่ำลง

นอกจากนี้อัตราการไหลน้ำสุทธิเข้าสู่ถังปฏิกิริยาไม่ควรเกิน 9 ลิตร/นาที เพราะหากเกินจะส่งผลให้ระดับน้ำในถังสูงกว่าระดับเวียร์ระบายน้ำทิ้ง ซึ่งระดับน้ำในถังปฏิกิริยาควรอยู่ระดับเดียวกับเวียร์ระบายน้ำทิ้ง เพื่อให้อนุภาคสาหร่ายที่ถูกดักจับด้วยฟองอากาศขนาดเล็กแล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำสามารถแยกอนุภาคออกจากถังได้ แต่หากระดับน้ำในถังสูงหรือต่ำกว่าระดับเวียร์จะส่งผลให้อนุภาคที่ลอยตัวอยู่ที่ผิวน้ำตกค้างไม่สามารถลำเลียงออกนอกถังได้ แสดงดังภาพที่ 4-28 และ 4-29



ภาพที่ 4-28 อนุภาคสาหร่ายหลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายโดยระดับน้ำอยู่ที่ระดับเดียวกับเวียร์น้ำล้น

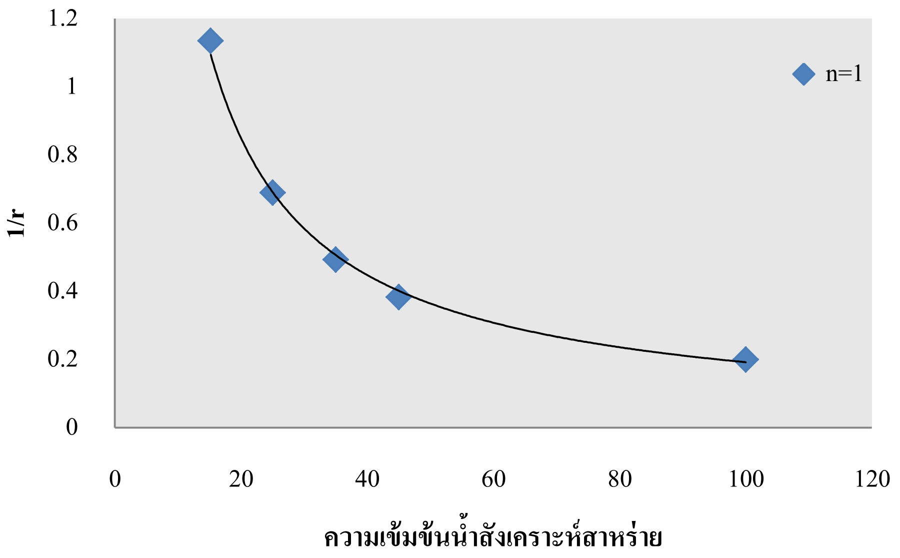


ภาพที่ 4-29 อนุภาคสาหร่ายหลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายโดยระดับน้ำอยู่ที่ระดับสูงกว่าเวียร์น้ำล้น

ดังนั้นควรทำการเดินระบบด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราน้ำล้นผิวช่วง 10.3-14.3 เซนติเมตร/นาที อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งช่วง 3×10^{-3}-6×10^{-3} มิลลิลิตรของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง และอัตราการไหลสุทธิไม่ควรเกิน 9 ลิตร/นาที เพื่อทำการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาออกจากน้ำ

4.4.2 ผลการศึกษาสัดส่วนแบบจำลองการกระจายตัว (Dispersion model)

การออกแบบและการทำงานภายในถังปฏิกิริยาจริง ไม่สามารถมีรูปแบบการไหลอุดมคติเป็นประเภทใดประเภทหนึ่งได้ร้อยเปอร์เซ็นต์ แต่จะส่งผลให้เกิดรูปแบบการไหลแบบร่วมกัน ดังนั้นการออกแบบถังปฏิกิริยาจึงควรศึกษารูปแบบการไหลภายในถัง โดยงานวิจัยในส่วนนี้ทำการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังที่การทดลองการแยกอนุภาคสาหร่ายที่อัตราน้ำล้นผิว 12.4 เซนติเมตร/นาที และอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งช่วง 6×10^{-3} มิลลิลิตรของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง โดยกำหนดให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 แล้วทำนายค่าคงที่ปฏิกิริยาและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการ



ภาพที่ 4-30 อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

จากภาพที่ 4-30 พบว่าปฏิกิริยาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีลำดับการเกิดปฏิกิริยา (n) เป็นลำดับที่ 1 และมีค่าคงที่ปฏิกิริยา (k) 4.2×10^{-2} ต่อนาที ส่งผลให้มีค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่า (r) 0.88 จากนั้นนำค่า k ที่ได้ไปคำนวณสัดส่วนแบบจำลองการกระจายตัว (Dispersion model)

2 รูปแบบ คือ สัดส่วนความเป็นถังปฏิกิริยาการไหลแบบในท่อ (X_{Plug}) และสัดส่วนความเป็นถังปฏิกิริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ (X_{CSTR}) ต่อจากผลการทดลองที่ 4.4.3 ด้วยวิธีการการกระจายเวลาในถังปฏิกิริยา (Residence Time Distribution, RTD) แสดงดังสมการที่ 4-10 และ 4-11

$$X_{Plug} = 1 - e^{(-t_m \times k)} \qquad 4\text{-}10$$

$$X_{CSTR} = \frac{t_m \times k}{1 + (t_m \times k)} \qquad 4\text{-}11$$

โดยที่ t_m = เวลากักเก็บภายในถังปฏิกิริยา
k = ค่าคงที่ปฏิกิริยาการแยกอนุภาคสาหร่าย

จากนั้นคำนวณสัดส่วนรูปแบบการกระจายตัวภายในถังปฏิกิริยาด้วยสมการที่ 4-10 และ 4-11 ที่บริเวณท่อทิ้งน้ำตะกอนและท่อทิ้งน้ำใส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-11 สัดส่วนรูปแบบการกระจายตัวภายในถังปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งท่อทิ้งน้ำตะกอนและท่อทิ้งน้ำใส

สัดส่วนการกระจายตัว (Dispersion model)				
การทดลอง	ท่อทิ้งน้ำตะกอน		ท่อทิ้งน้ำใส	
	PFR	CSTR	PFR	CSTR
1	0.88	0.68	0.93	0.73
2	0.84	0.65	0.93	0.73
3	0.86	0.67	0.93	0.73
4	0.85	0.66	0.93	0.72
5	0.81	0.63	0.91	0.70
6	0.91	0.70	0.96	0.76
7	0.79	0.61	0.91	0.71
8	0.87	0.67	0.91	0.71
9	0.86	0.67	0.94	0.74
10	0.88	0.68	0.95	0.75
11	0.88	0.68	0.94	0.74
12	0.92	0.72	0.97	0.77
13	0.83	0.64	0.92	0.72
14	0.82	0.63	0.92	0.71
15	0.95	0.75	0.98	0.79
16	0.84	0.65	0.93	0.73
17	0.80	0.62	0.92	0.72
18	0.80	0.62	0.92	0.71
19	0.82	0.63	0.93	0.73
20	0.90	0.7	0.95	0.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 4-11 พบว่าสัดส่วนรูปแบบการกระจายตัวภายในถังปฏิกิริยา ณ ตำแหน่งท่อทิ้งน้ำตะกอนและท่อทิ้งน้ำใสมีสัดส่วนความเป็นถังปฏิกิริยาการไหลแบบในท่อมากกว่าสัดส่วนความเป็นถังปฏิกิริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์

จากนั้นทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราน้ำสังเคราะห์ (A) อัตราน้ำฟองอากาศขนาดเล็ก (B) และตำแหน่งจ่ายฟองอากาศขนาดเล็ก (C) ที่มีผลกระทบต่อสัดส่วนรูปแบบการกระจายตัวภายในถังปฏิกิริยาด้วยโปรแกรมมินิแทบ เพื่อทำนายสมการการกระจายตัว (Dispersion model) ภายในถังปฏิกิริยา

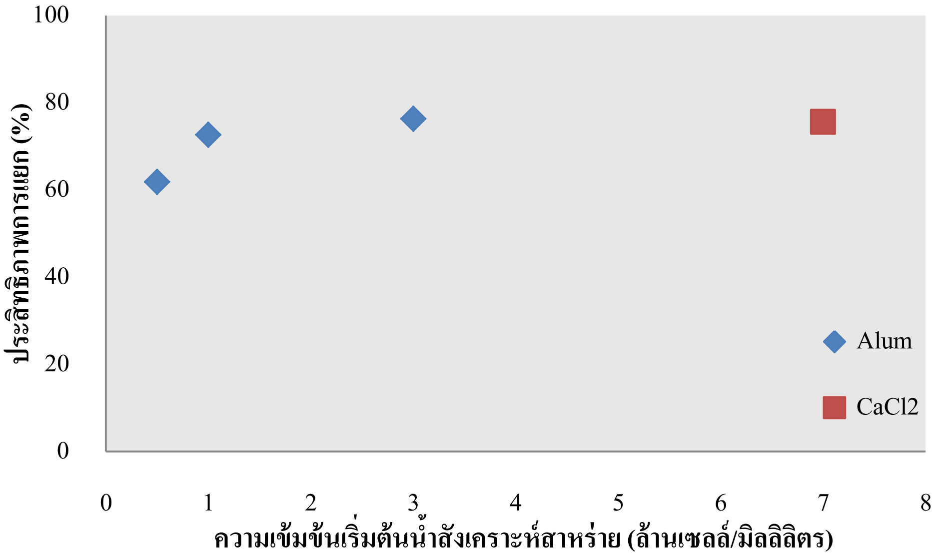
$$X_{Plug} = 1.03-9.65\times10^{-3}A-9.81\times10^{-3}B-8.0\times10^{-5}C \qquad 4\text{-}12$$

$$X_{CSTR} = 0.848-1.15\times10^{-2}A-1.12\times10^{-2}B-1.05\times10^{-4}C \qquad 4\text{-}13$$

จากสมการที่ 4-12 และ 4-13 จากนั้นนำสมการที่ได้ไปใช้แทนค่าหาค่าสัดส่วนแบบจำลองการกระจายตัว พบว่าถังปฏิกิริยารวมที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ มีค่าร้อยละการกระจายตัวเป็นถังปฏิกิริยาการไหลแบบในท่อประมาณร้อยละ 98 และการกระจายเป็นถังปฏิกิริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ประมาณร้อยละ 70 ดังนั้นแสดงว่าการกระจายตัวภายในถังปฏิกิริยามีการไหลแบบในเส้นท่อซึ่งเหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Gregory และคณะ, 1999)

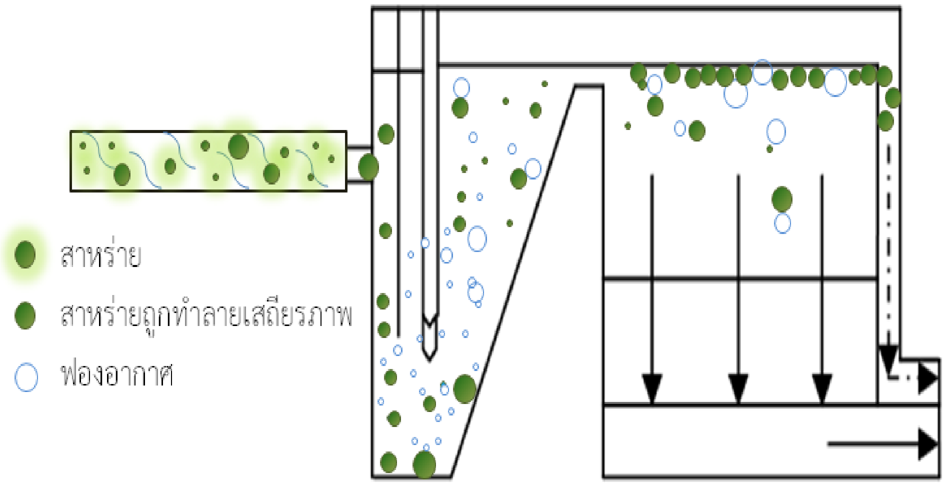
4.4.3 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นต่างๆ ออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

สาหร่ายในแต่ละระดับความเข้มข้นมีความต้องการชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นผลงานวิจัยในส่วนนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นแตกต่างกันด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราน้ำล้นผิว 12.4 เซนติเมตร/นาที และอัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง 6.0×10^{-3} มิลลิลิตรของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง โดยเลือกทำการศึกษาที่ตัวอย่างความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่าย 0.5 1 3 และ 7 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพการแยกดังรูปภาพที่ 4-30



ภาพที่ 4-31 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์เริ่มต้นต่างๆ ที่ชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสม

จากภาพที่ 4-31 พบว่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์ 0.5 1 3 และ 7 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร มีประสิทธิภาพการแยกเป็น 61.8 72.6 76.3 และ 75.6 % ตามลำดับ ซึ่งความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ 0.5 1 และ 3 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตรใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูเลชัน ส่วนที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่าย 7 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูเลชัน แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่าย 0.5 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ให้ประสิทธิภาพไม่สูงมากประมาณ 60% เนื่องจากการทดลองนี้เลือกใช้อัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง (A/S) คงที่ 6.0×10^{-3} มิลลิลิตรของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง เมื่ออนุภาคสาหร่ายหรือเป้าล่อมีปริมาณน้อย ส่งผลให้จ่ายปริมาณฟองอากาศน้อยลง ทำให้ลดโอกาสการชนและดักจับกัน ดังนั้นที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายต่ำกว่า 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ไม่เหมาะสมที่จะเดินระบบด้วยค่า A/S 6.0×10^{-3} มิลลิลิตรของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง ควรเดินระบบที่ค่า A/S สูงกว่านี้ ในขณะเดียวกันที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพการแยกเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 75% นอกจากนี้ยังพบว่าชนิดของสารโคแอกกูแลนท์ที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย



ภาพที่ 4-32 แนวทางการไหลของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายผ่านระบบการแยกอนุภาคแบบ MDAF

จากงานวิจัยในส่วนนี้พบว่ากระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราน้ำล้นผิว 12.4 เซนติเมตร/นาที และอัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง 6.0×10^{-3} มิลลิลิตรของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง เหมาะสมสำหรับแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำ 75% โดยจะแยกอนุภาคสาหร่ายขึ้นสู่ด้านบนผิวน้ำ และน้ำใสแยกออกทางด้านล่างของถังปฏิกิริยา

4.5 ผลการศึกษาการแยกสาหร่ายออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการไฮบริด

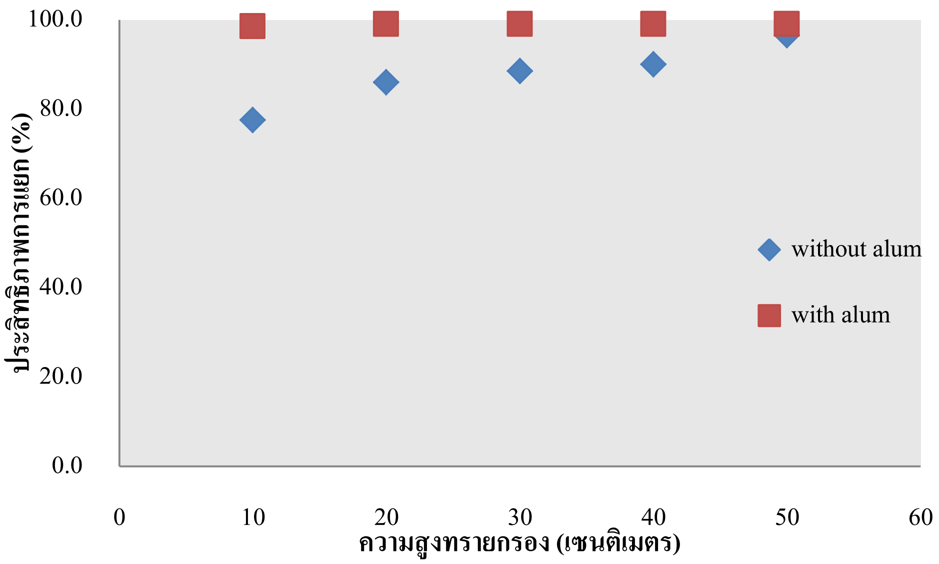
น้ำสังเคราะห์สาหร่ายประกอบด้วยอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กประมาณ 3.3 ไมครอน มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ และมีค่าซีต้าโพแทนเชียลเป็นค่าลบ ส่งผลให้อนุภาคสาหร่ายแขวนลอยในน้ำได้อย่างมีเสถียรภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษากระบวนการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชัน และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย มีประสิทธิภาพการแยกสูงประมาณ 75% โดยตะกอนอนุภาคสาหร่ายจะลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำแล้วแยกออกจากถัง ส่วนน้ำใสจะไหลลงสู่ด้านล่าง งานวิจัยในส่วนนี้ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำ ดังนั้นจึงเพิ่มกระบวนการกรองในส่วนท้ายของถังปฏิกิริยา โดยเลือกใช้ทรายกรองขนาด 0.45-0.55 มิลลิเมตร เพื่อกรองอนุภาคสาหร่ายที่ไม่ถูกดักจับด้วยฟองอากาศขนาดเล็กแล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำให้ติดอยู่ในชั้นกรองทรายไม่ให้หลุดไปกับน้ำใส

4.5.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรอง

การศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองตรง และกระบวนการกรองภายหลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันที่ระดับความสูงทรายกรองต่างๆ โดยใช้ทรายกรองขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size, $d_{10\%}$) 0.43 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Non Uniformity Coefficient, $\frac{d_{60\%}}{d_{10\%}}$) 1.18 ดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 การกระจายตัวของอนุภาคทรายกรอง

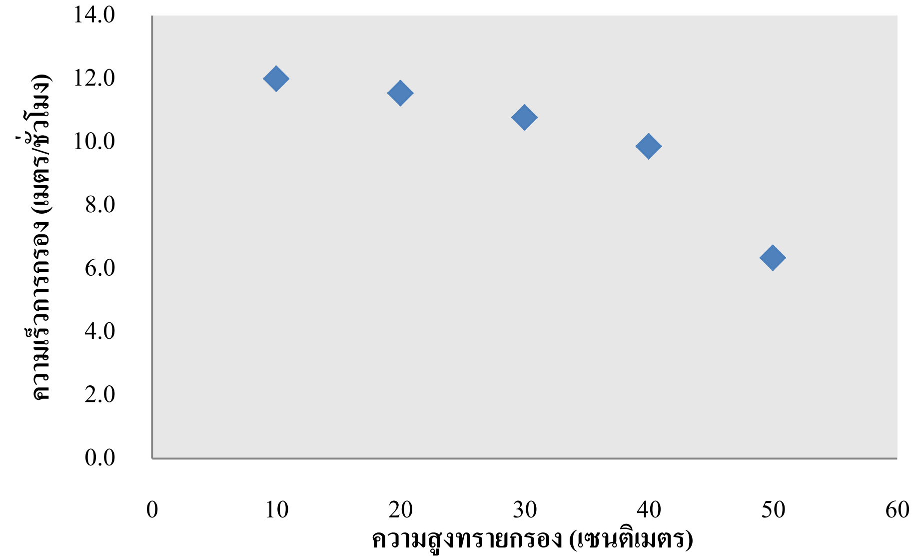
No. sieve	ขนาดรู (mm)	น้ำหนักบนตะแกรง		% สะสม
		กรัม	%	
100	0.15	2.7	0.54	0.54
70	0.21	2.7	0.54	1.08
60	0.25	20.2	4.04	5.12
40	0.43	21.9	4.38	9.50
35	0.50	259.0	51.80	61.30
30	0.59	170.9	34.18	95.48
25	0.71	20.0	4.00	99.48
20	0.84	2.6	0.52	100.00
sum		500.0	100.00	



ภาพที่ 4-33 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการกรองที่ความสูงทรายกรองต่างๆ

จากภาพที่ 4-33 พบว่าน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์/มิลลิลิตร ภายหลังผ่านกระบวนโคแอกกูเลชันแล้ว มีประสิทธิภาพการแยกด้วยกระบวนการกรองด้วยทรายกรองขนาด (Effective size) 0.43 มิลลิเมตร และความสูง 10 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพประมาณ 99% และหากเพิ่มความสูงทรายกรองจะส่งผลให้ประสิทธิภาพคงเดิม แต่หากเดินระบบด้วยน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ไม่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันส่งผลให้ที่ความสูงทรายกรอง 10 20 30 40 และ 50 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการแยกเป็น 77.5 86.0 88.5 90.0 และ 96.5 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ความสูงทรายกรอง 50 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายจากน้ำสังเคราะห์โดยตรง และจากน้ำสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันมาแล้ว

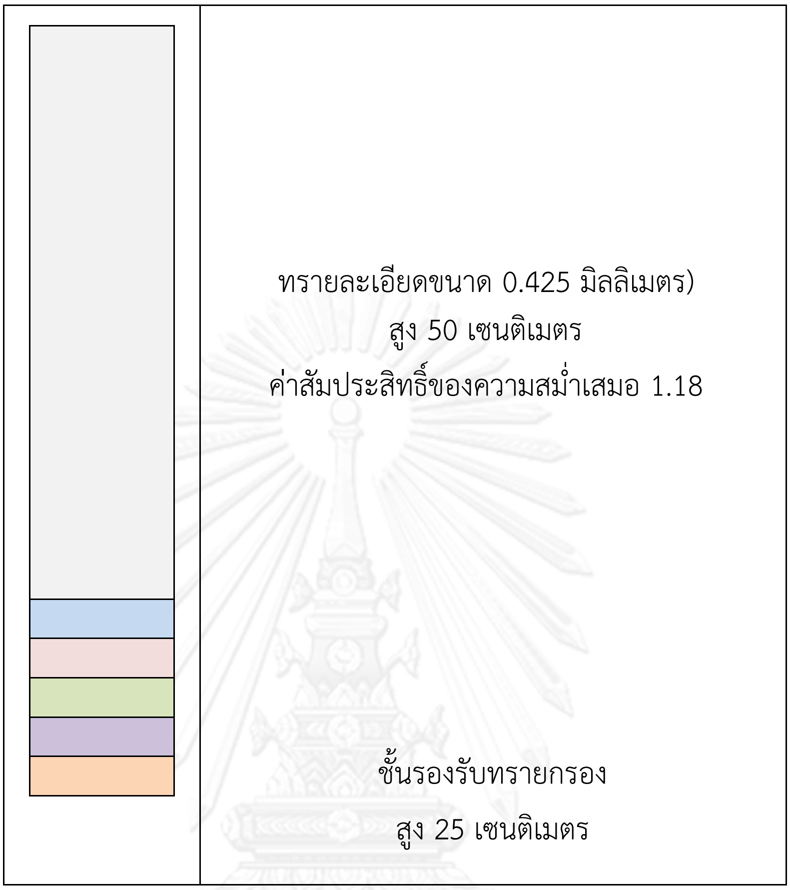
นอกจากการศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคแล้วยังควรศึกษาความเร็วการกรองน้ำผ่านทรายกรองที่ระดับความสูงสารกรองต่างๆ



ภาพที่ 4-34 ความเร็วการกรองน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นหนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตรที่ความสูงชั้นทรายกรองต่างๆ

จากภาพที่ 4-34 พบว่าระดับความสูงสารกรองที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความเร็วการกรองน้ำลดลง เนื่องจากการไหลของมวลน้ำผ่านอุปสรรคเพิ่มมากขึ้น โดยที่ระดับความสูงทรายกรอง 10 เซนติเมตร น้ำทีความเร็วการกรองมีค่า 12 เมตร/ชั่วโมง และลดลงเรื่อยๆ จนที่ระดับความสูงทรายกรอง 50 เซนติเมตร มีความเร็วการกรองน้ำลดลงเหลือ 6.3 เมตร/ชั่วโมง

จากการทดลองในส่วนนี้พบว่าระดับความสูงทรายกรอง 50 เซนติเมตร มีความเหมาะสำหรับกรองแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรให้ความเร็วการกรองน้ำผ่านสารกรอง 6.3 เมตร/ชั่วโมง และให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายในน้ำสังเคราะห์โดยตรง 96.5% และอนุภาคสาหร่ายในน้ำสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันมาแล้ว 99% ซึ่งชั้นกรองประกอบด้วยชั้นทรายกรองละเอียดหนา 50 เซนติเมตร และวัสดุรองรับทรายกรองหนา 25 เซนติเมตร ประกอบด้วยกรวดหยาบขนาด 5-10 มิลลิเมตร สูง 5 เซนติเมตร กรวดละเอียด 3-5 มิลลิเมตร สูง 5 เซนติเมตร ทรายหยาบขนาด 0.5-0.8 มิลลิเมตร สูง 5 เซนติเมตร กรวดละเอียด 3-5 มิลลิเมตร สูง 5 เซนติเมตร และกรวดหยาบขนาด 5-10 มิลลิเมตร สูง 5 เซนติเมตรโดยเรียงลำดับดังภาพที่ 4-35

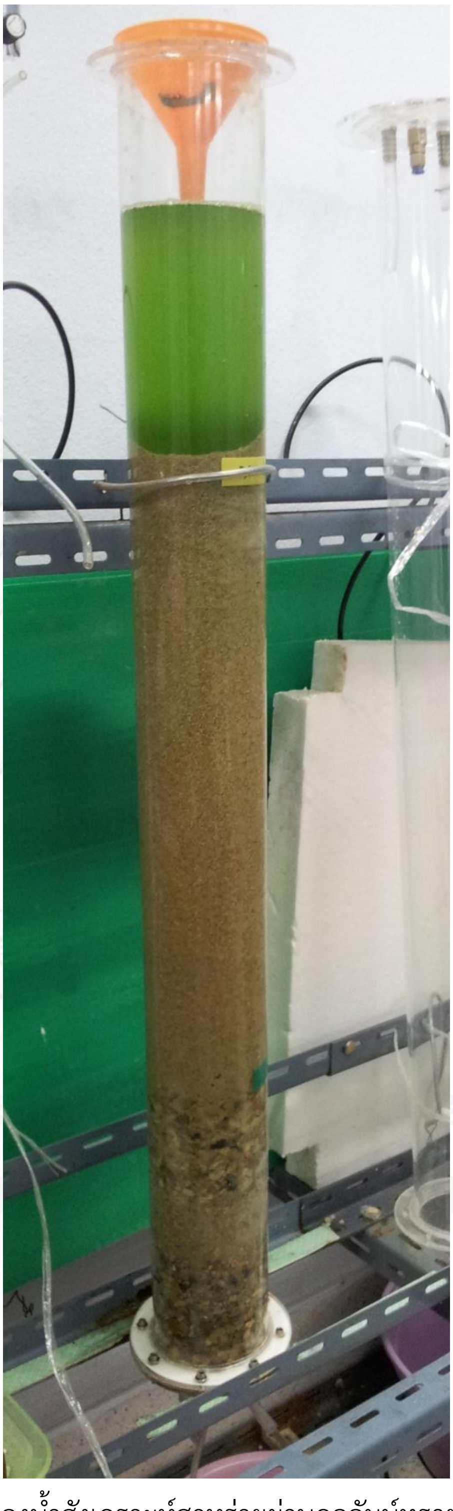


ภาพที่ 4-35 การลำดับขนาดทรายกรองในถังปฏิกิริยา

จากนั้นทำการคำนวณการสูญเสียความดัน (Head loss) จากชั้นทรายกรองและกรวดรองรับ โดยพิจารณาที่ความเร็วการกรอง 6.4 เมตร/ชั่วโมง พบว่ามีการสูญเสียความดันจากชั้นทรายกรอง 71.38 เซนติเมตร และมีการสูญเสียความดันจากชั้นกรวด 6.67 เซนติเมตร ดังจากสมการที่ 4-14 และ 4-15 ตามลำดับ เนื่องจากถังปฏิกิริยาควรมีความสูงประมาณ 160 เซนติเมตร สามารถรองรับการสูญเสียความดันรวมจากกระบวนการกรองที่เพิ่มขึ้นมา

$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{\left(5 \times \mu \times V_F \times (1-\varepsilon)^2 \times (6/\psi)^2 \times \sum (x/d^2)\right)}{\varepsilon^3} \qquad 4\text{-}14$$

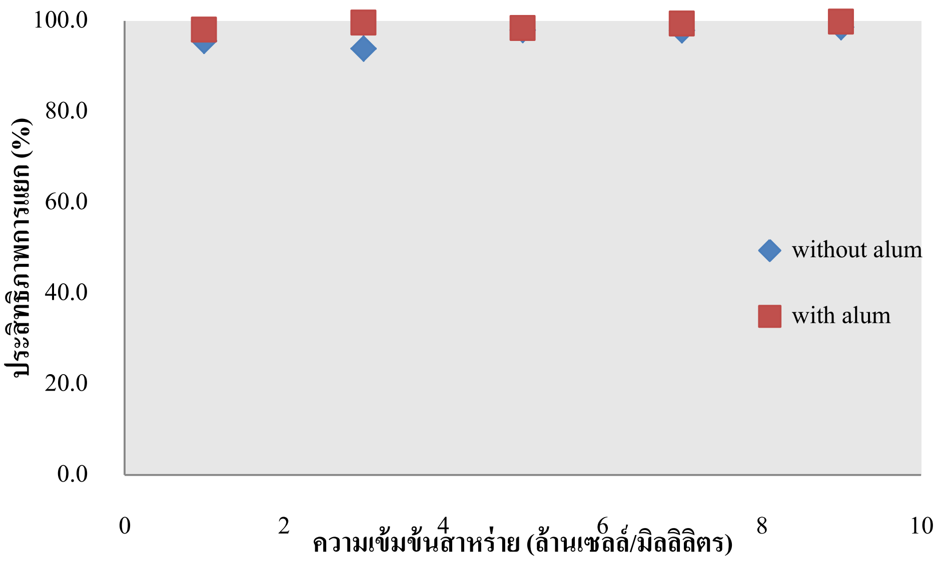
$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{\left(150 \times \upsilon \times V_F \times (1-\varepsilon)^2 \times \sum (x/d^2)\right)}{g \times \psi^2 \times \varepsilon^2} + \frac{1.75 \times V_F^2 \times (1-\varepsilon) \times \sum (x/d)}{\varepsilon^3 \times \psi \times g} \qquad 4\text{-}15$$



ภาพที่ 4-36 กระบวนการกรองน้ำสังเคราะห์สาหร่ายผ่านคอลัมน์ทรายกรองขนาด 0.43 มิลลิเมตร ชั้นทรายกรองหนา 50 เซนติเมตร

จากนั้นคำนวณอัตราการไหลน้ำล้างย้อนโดยวิธีของ Amirtharajar (วิศวกรรมการประปาเล่ม 2, 2538) ที่ขนาดทรายกรอง ($d_{60\%}$) 0.5 มิลลิเมตร และค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ 1.18 พบว่ามีอัตราการไหลน้ำล้างย้อน เพื่อทำให้ชั้นกรองทรายขยายตัว 30%

การศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายในน้ำสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้ทรายกรองสูง 50 เซนติเมตร เป็นสารกรอง ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการแยก และความเร็วการกรองดังนี้



ภาพที่ 4-37 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการกรองที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายเริ่มต้นต่างๆ ที่ความหนาทรายกรอง 50 เซนติเมตร

จากภาพที่ 4-37 พบว่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาออกจากน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 3 5 7 และ 9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ด้วยทรายกรองขนาด (Effective size) 0.43 มิลลิเมตร และสูง 50 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำสังเคราะห์โดยตรง 95.5 93.8 97.9 97.9 และ 98.6 % ตามลำดับ ส่วนการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันแล้วมีประสิทธิภาพ 98 99.5 98.3 99.3 และ 99.7 % ตามลำดับ

แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความสูงทรายกรอง 50 เซนติเมตร สามารถกรองอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นในช่วง 1-9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพสูงกว่า 95% โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน แต่งานวิจัยนี้เลือกที่จะเตรียมน้ำสังเคราะห์ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันเพราะเมื่ออนุภาคสาหร่ายถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายจะส่งผลให้อนุภาคสาหร่ายถูกดักจับด้วยฟองอากาศขนาดเล็กแล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำเพื่อทำการแยกออก

ส่วนสาหร่ายที่เหลือยังคงแขวนลอยอยู่ในเฟสน้ำจะมีปริมาณน้อยลง ส่งผลให้สารกรองอุดตันช้าลง และสามารถใช้งานได้นานขึ้นกว่าการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองตรงถึง 6 เท่า แต่อย่างไรก็ตามควรล้างย้อนระบบอย่างน้อยวันละ 1 ครั้ง เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของสาหร่ายบนสารกรองแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพขึ้น

จากนั้นทำการศึกษาอัตราการกรองน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ ผ่านทรายกรองที่ขนาด 0.425 มิลลิเมตร และสูง 50 เซนติเมตร

ภาพที่ 4-38 ความเร็วการกรองน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความสูงชั้นทรายกรอง 50 เซนติเมตร

จากภาพที่ 4-38 พบว่าน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 3 5 7 และ 9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร มีความเร็วไหลผ่านสารกรองขนาด 0.43 ที่ความสูง 50 เซนติเมตร คือ 6.3 6.0 6.6 6.5 และ 6.4 เมตร/ชั่วโมง ซึ่งความเข้มข้นสาหร่ายช่วง 1-9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร มีความเร็วการกรองเฉลี่ยประมาณ 6.4 เมตร/ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายช่วง 1-9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการกรองน้ำผ่านทรายกรอง แต่ปัจจัยความสูงของสารกรองทรายมีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการกรองน้ำ

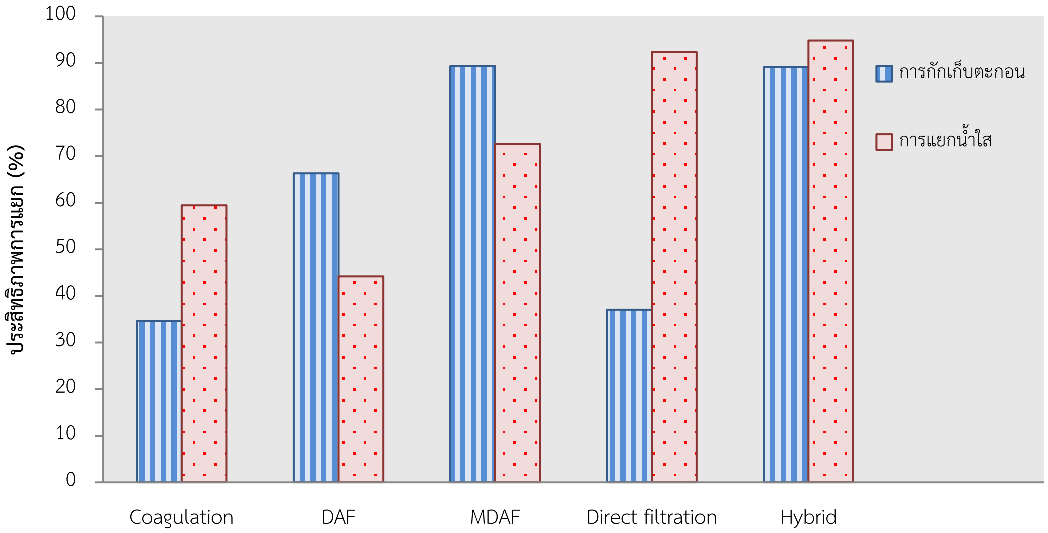
นอกจากนี้อัตราการไหลน้ำล้างย้อนสำหรับทำความสะอาดสารกรองที่ตันแล้วสามารถคำนวณได้จากสมการของ Amirtharajar ในบทที่ 2.5.3 พบว่าอัตราการไหลน้ำล้างย้อนมีค่า 31 เมตร/ชั่วโมง อยู่ในช่วงที่หนังสือวิศวกรรมการประปา เล่ม 2 แนะนำ 36-50 เมตร/ชั่วโมง เป็นเวลา

ประมาณ 6 นาที และควรทำการล้างย้อนวันละ 1 ครั้ง เพื่อป้องกันสาหร่ายเจริญเติบโตบนผิวทรายกรองแล้วส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางชีวภาพขึ้น

จากการศึกษาในส่วนนี้ทำให้ทราบว่า ทรายกรองขนาด 0.43 มิลลิเมตร สามารถกรองน้ำสังเคราะห์สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาช่วงความเข้มข้น 1-9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันแล้วได้ประสิทธิภาพสูงประมาณ 99% ด้วยความสูงสารกรอง 50 เซนติเมตร และมีความเร็วการกรองเฉลี่ย 6.4 เมตร/ชั่วโมง ดังนั้นจึงนำความสูงทรายกรองขนาด 0.43 มิลลิเมตร 50 เซนติเมตร ไปใช้ในถังปฏิกิริยาร่วมเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำ

4.5.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการต่างๆ

การศึกษาผลการเปรียบเทียบการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการดังนี้ กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF) กระบวนการร่วมระหว่างทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (MDAF) กระบวนการกรองตรง (Filtration) และกระบวนการไฮบริดจ์ (MDAF+Filtration) ภายในถังปฏิกิริยารวมมีประสิทธิภาพการแยกดังนี้



ภาพที่ 4-39 ประสิทธิภาพการแยกและการกักเก็บอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์หนึ่งล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการต่างๆ

จากภาพที่ 4-39 พบว่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย กระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย กระบวนการกรองตรง และกระบวนการไฮบริดจ์ คือ 59.4 44.2 72.6 92.3 และ 94.8% ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการกักเก็บตะกอนสาหร่ายออกจาก

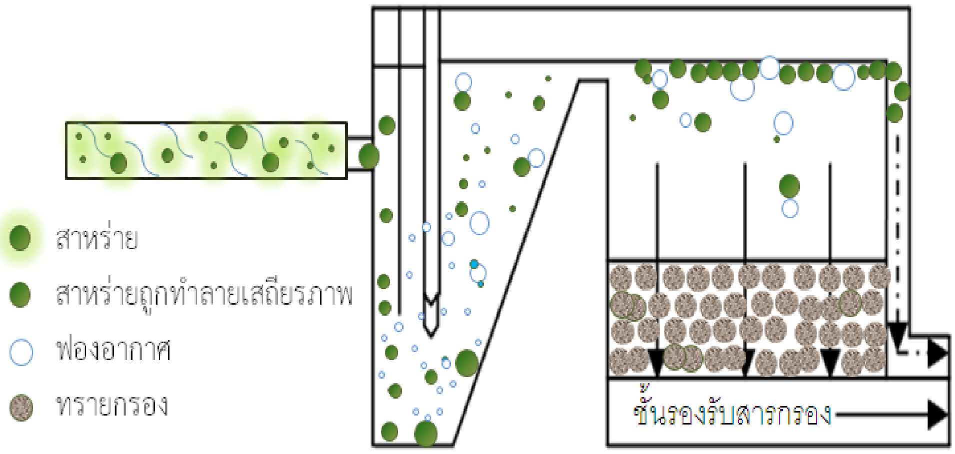
น้ำ สังเคราะห์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย กระบวนการร่วมระหว่างทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย กระบวนการกรองตรง และกระบวนการไฮบริด มีดังนี้ 34.6 66.3 89.3 37 และ 89.1% ตามลำดับ จากผลการศึกษาทำให้ทราบว่ากระบวนการกรองตรง และกระบวนการไฮบริดจ์มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำสูง แต่กระบวนการกรองตรงมีประสิทธิภาพการรวบรวมตะกอนสาหร่ายออกจากน้ำสังเคราะห์ต่ำประมาณ 37% แสดงให้เห็นว่าอนุภาคสาหร่ายถูกดัดจับอยู่ภายในสารกรองไม่สามารถแยกออกจากเฟสของเหลวได้ นอกจากการล้างย้อน (backwash) และการดักจับอนุภาคสาหร่ายส่วนใหญ่ไว้ในสารกรองจะส่งผลให้สารกรองอุดตันเร็วยิ่งขึ้น ทำให้ระบบต้องทำการการล้างย้อนบ่อยขึ้น ซึ่งต่างจากกระบวนการไฮบริดจ์ที่ตะกอนสาหร่ายส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 72.6 ลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำแล้วถูกแยกไหลออกจากถังปฏิกิริยาส่งผลให้มีตะกอนไหลเข้าสู่สารกรองเพียงร้อยละ 27.4 ทำให้สารกรองอุดตันช้าลงและสามารถเดินระบบได้นานกว่าถึง 3 เท่าของกระบวนการกรองตรง

ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและการรวบรวมอนุภาคสาหร่ายดังนี้

- กระบวนการโคแอกกูเลชันทำลายเสถียรภาพบนอนุภาคสาหร่ายทำให้สาหร่ายรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะตกตะกอนตกค้างอยู่ในระบบ ทำให้มีประสิทธิภาพการแยกประมาณ 60% และมีประสิทธิภาพการกักเก็บตะกอนต่ำประมาณ 34.6%
- กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายจ่ายฟองอากาศขนาดเล็กเพื่อทำการดักจับอนุภาคสาหร่ายให้ลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ แต่เนื่องจากผิวอนุภาคสาหร่ายและฟองอากาศมีประจุลบทั้งคู่จึงมีแนวโน้มที่จะดักจับกันต่ำ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการแยก 44.2% และมีประสิทธิภาพการกักเก็บตะกอน 66.3%
- กระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเป็นกระบวนการร่วมที่ทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสาหร่ายก่อน แล้วจึงจ่ายเข้าสู่กระบวนการดักจับด้วยฟองอากาศส่งผลให้อนุภาคสาหร่ายมีแนวโน้มที่จะถูกดักจับด้วยฟองอากาศ จากนั้นลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำส่งผลให้ประสิทธิภาพการรวบรวมตะกอนสูงประมาณ 89.3% แต่ยังมีอนุภาคบางส่วนที่ไม่ถูกดักจับด้วยฟองอากาศจึงไม่ถูกแยกออกจากน้ำส่งผลให้มีประสิทธิภาพการแยก 72.6%
- กระบวนการกรองตรงเป็นกระบวนการที่ดักจับอนุภาคสาหร่ายติดค้างในชั้นทรายกรองที่มีความหนาที่เหมาะสม 50 เซนติเมตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกสูงถึง 92.3 % แต่ไม่สามารถแยกอนุภาคสาหร่ายออกทางผิวน้ำได้จึงมีประสิทธิภาพการรวบรวมเพียงแค่ 37%

- กระบวนการไฮบริดเป็นกระบวนการที่รวมการทำลายเสถียรภาพที่ผิวอนุภาคสาหร่ายเพื่อให้ถูกดักจับด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก แล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำเพื่อทำการกักเก็บ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยส่วนกรองเพื่อดักจับอนุภาคที่เหลือให้ติดค้างอยู่ในสารกรอง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกสูง 94.8% และสามารถกักเก็บอนุภาคสาหร่ายได้ 89.1%

จากงานวิจัยในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการไฮบริดให้ประสิทธิภาพการกักเก็บตะกอนสาหร่าย และประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสของเหลวได้สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ



ภาพที่ 4-40 การแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และการกรอง

4.5.3 ผลการศึกษาค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเพื่อแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการไฮบริด

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาสละลาย และการกรอง มีต้นทุนของการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ ด้านการก่อสร้างระบบ ด้านพลังงาน และด้านสารเคมี ดังนี้

1) ต้นทุนด้านการก่อสร้างระบบ

ต้นทุนด้านการก่อสร้างประกอบด้วย 2 อุปกรณ์หลัก คือ ท่อกวนเร็วสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันแบบในเส้นท่อ และถังปฏิกิริยาสำหรับหระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายและการกรอง ส่วนวัสดุและอุปกรณ์ประกอบต่างๆ ไม่ได้กล่าวไว้ในที่นี้

ตารางที่ 4-13 รายการค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์

รายการ	ราคาค่าก่อสร้าง (บาท)
ท่อกวนเร็ว (static mixer)	8.9×10^{3}
ถังปฏิกิริยา	3.2×10^{4}

จากตารางที่ 4-13 พบว่าต้นทุนด้านการก่อสร้างระบบมีค่าประมาณ 40900 บาท นอกจากนี้อาจมีค่าใช้จ่ายในส่วนของวัสดุกรอง และระบบท่อลำเลียงน้ำ ซึ่งต้นทุนด้านการก่อสร้างระบบจะมีราคาปรับเปลี่ยนตามขนาดของระบบ และการลงทุนด้านนี้จะลงทุนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น

2) ต้นทุนด้านพลังงาน

ต้นทุนทางด้านพลังงานอ้างอิงอัตราค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยมีราคาต่อยูนิตเป็น 2.978 บาท สามารถคำนวณต้นทุนด้านพลังงานได้จากสมการที่ 4-16

ต้นทุน$_{\text{ด้านพลังงาน}}$ =Power × ราคาค่าไฟ/ยูนิต × เวลาเดินระบบ × ภาษี 4-16

ตารางที่ 4-14 รายการอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินระบบการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำ

รายการอุปกรณ์ใช้ไฟฟ้า	กำลัง(kw)
ปั๊มน้ำ	6.0×10^{-2}
ปั๊มสารเคมี	1.1×10^{-2}
เครื่องฟอง	9.0×10^{-2}
รวม	0.161

ตารางที่ 4-15 รายการค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ระดับความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้นต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (10^{6}cell/mL)	อัตราการไหล (L/min)	เวลาเดินระบบ (hr/m^{3})	กำลังไฟที่ใช้ (kw)	ราคาต่อหน่วย (บาท/หน่วย)	ภาษี	ต้นทุน (บาท/m^{3})
0.5	6.70	2.49	0.16	2.98	1.07	1.28
1	4.80	3.47	0.16	2.98	1.07	1.78
3	2.00	8.33	0.16	2.98	1.07	4.28
5	1.89	8.82	0.16	2.98	1.07	4.52
7	1.40	11.90	0.16	2.98	1.07	6.11
9	1.10	15.15	0.16	2.98	1.07	7.77

จากตารางที่ 4-15 พบว่าต้นทุนทางด้านพลังงานในการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น 0.5 1 3 5 7 และ 9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร มีค่าใช้จ่าย 1.28 1.78 4.28 4.52 6.11 และ 7.77 บาท ตามลำดับ

3) ต้นทุนด้านสารเคมี

การแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากน้ำจำเป็นต้องใช้สารเคมีเพื่อทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้สารเคมี 2 ชนิด คือ สารส้ม และสารแคลเซียมคลอไรด์

ตาราง 4-16 รายการค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีที่ระดับความเข้มข้นสาหร่ายต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (10^6cell/mL)	ชนิดสาร โคแอกกูแลนท์	ราคา (บาท/kg)	ความเข้มข้นสาร (mg/L)	ปริมาณสาร (g/m^3)	ต้นทุน (บาท/m^3)
0.5	สารส้ม	9.7	6	6	0.06
1	สารส้ม	9.7	8	8	0.08
3	สารส้ม	9.7	50	50	0.48
5	แคลเซียมคลอไรด์	12	100	100	1.20
7	แคลเซียมคลอไรด์	12	140	140	1.68
9	แคลเซียมคลอไรด์	12	100	100	1.20

จากตารางที่ 4-16 พบว่าต้นทุนทางด้านสารเคมีที่ใช้เพื่อการแยกอนุภาคสาหร่ายออกจากเฟสน้ำปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น 0.5 1 3 5 7 และ 9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร มีค่าใช้จ่าย 0.06 0.08 0.48 1.20 1.68 และ 1.20 บาท ตามลำดับ

ตารางที่ 4-17 รายการค่าใช้จ่ายรวมด้านพลังงาน และด้านสารเคมี

ความเข้มข้นเริ่มต้น (ล้านเซลล์/มิลลิลิตร)	ต้นทุนด้านพลังงาน (บาท/ลูกบาศก์เมตร)	ต้นทุนด้านสารเคมี (บาท/ลูกบาศก์เมตร)	ต้นทุนรวม (บาท/ลูกบาศก์เมตร)
0.5	1.28	0.06	1.33
1	1.78	0.08	1.86
3	4.28	0.48	4.76
5	4.52	1.20	5.72
7	6.11	1.68	7.79
9	7.77	1.20	8.97

จากนั้นทำการคำนวณค่าใช้จ่ายรวมด้านพลังงาน และด้านสารเคมี เพื่อแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาออกจากเฟสน้ำที่ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายเริ่มต้น มีต้นทุนดังตารางที่ 4-17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และการกรอง

งานวิจัยนี้พบว่าการแยกอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และการกรองมีประสิทธิภาพการแยกและการรวบรวมอนุภาคสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ ที่ได้ทำการศึกษา นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเดินระบบประกอบด้วย 2 ปัจจัยหลักคือ ปัจจัยด้านลักษณะของน้ำสังเคราะห์ และปัจจัยด้านพลศาสตร์การไหล ดังนี้

I. ปัจจัยด้านลักษณะของน้ำสังเคราะห์

น้ำสังเคราะห์สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาในแต่ละช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นมีความต้องการสารโคแอกกูแลนท์สำหรับการทำลายเสถียรภาพที่แตกต่างกัน ดังนั้นควรพิจารณาชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ให้เหมาะสม นอกจากนี้ในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย น้ำสังเคราะห์สาหร่ายมีความต้องการปริมาณอากาศต่อของแข็งที่เพียงพอในการดักจับอนุภาคแล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ ส่วนปัจจัยด้านลักษณะของน้ำสังเคราะห์แทบจะไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการกรองที่ใช้ขนาดและความหนาชั้นกรองที่เหมาะสมแล้ว แต่จะส่งผลกระทบในด้านระยะเวลาการใช้สารกรองที่น้อยลง

ตารางที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายเริ่มต้นกับกระบวนการโคแอกกูเลชันที่เหมาะสม

ความเข้มข้นเริ่มต้น (ล้านเซลล์/มิลลิลิตร)	กระบวนการโคแอกกูชัน
0.5	ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มขนาดอนุภาค (สารส้ม)
1	ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มขนาดอนุภาค (สารส้ม)
3	ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มขนาดอนุภาค (สารส้ม)
5	ดูดติดและทำลายประจุ (แคลเซียมคลอไรด์)
7	ดูดติดและทำลายประจุ (แคลเซียมคลอไรด์)
9	ดูดติดและทำลายประจุ (แคลเซียมคลอไรด์)

II. ปัจจัยด้านพลศาสตร์การไหล

งานวิจัยนี้พบว่าอัตราการไหลรวมระหว่างน้ำสังเคราะห์สาหร่ายและน้ำฟองอากาศขนาดเล็ก (net Flow) มากสุดที่ถังปฏิกิริยารับได้ไม่ควรเกิน 9 ลิตร/นาที เพราะจะส่งผลกระทบต่อการรวบรวมตะกอนสาหร่าย นอกจากนี้อาจกล่าวในเทอมของอัตราน้ำล้นผิว (Overflow rate, OFR) ที่มีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลภายในถัง ซึ่งพบว่ารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับ DAF คือ การไหลแบบในเส้นท่อ (Plug flow) (Schers และคณะ, 1992)

จากการวิจัยนี้สามารถสรุปประสิทธิภาพการแยกและการรวบรวมตะกอนสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาได้ดังดังตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 ประสิทธิภาพการแยกและการรวบรวมอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการต่างๆ

ประสิทธิภาพ	การแยก (%)	การรวม (%)
การตกตะกอนตามธรรมชาติ	9	-
จาร์เทส	85	-
โคแอกกูเลชัน	60	34.6
การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	44	66.3
กระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	75	125.1
กรองตรง	92	37
ไฮบริด	95	89.1

หมายเหตุ สัญลักษณ์ (-) หมายถึง ไม่ได้ทำการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5-3 เกณฑ์การออกแบบถังปฏิกิริยาร่วมระหว่างการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และการกรอง (Fawcett, 1997)

กระบวนการ	พารามิเตอร์	เกณฑ์การออกแบบ	ช่วงที่เลือกใช้
ส่วนฟล็อคคูเลชัน	เวลากักเก็บ (นาที)	5-45	7.5-25
	Velocity gradient × time (G×t)	4.0×10^{4}-6.0×10^{4} DAF < 2.0×10^{4} OK	~5.0×10^{3}
ส่วนทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	อัตราน้ำล้นผิว (OFR) (เซนติเมตร/นาที)	13-20	12-15
	เวลากักเก็บ(ส่วนสัมผัส) (นาที)	1-2.5	> 1.5
	ความดันอัดอากาศ (บาร์)	4-6	4
	ความเร็วเข้าสู่ส่วนแยก (เมตร/ชั่วโมง)	> 37	37-48 ช่องผ่านลึก 5 เซนติเมตร
	ความลึกถัง (เมตร)	1.5-3.5	1.5
	ความเอียงแผ่นกั้น (องศา)	60-70	60
ส่วนกรอง	ความเร็วการกรอง (เมตร/ชั่วโมง)	5-15	6.4-12
	ความหนาสารกรอง (เซนติเมตร)	50-80	10-50

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และการกรองทำให้ทราบว่าควรเดินระบบและในอนาคตอาจมีพัฒนาระบบดังนี้

5.2.1 น้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ควรเดินระบบด้วยค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง (A/S) ช่วง 3.0×10^{-3}-6.0×10^{-3} มิลลิลิตรของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง แต่ที่ความเข้มข้นสาหร่ายอื่นๆ อาจทำการศึกษาหาปริมาณ A/S เหมาะสมกว่านี้ งานวิจัยนี้ไม่สามารถทำได้เนื่องจากมีขอบเขตของอัตราการไหลน้ำฟองอากาศสูงสุดเพียง 4 ลิตร/นาที

5.2.2 ระบบสามารถรองรับอัตราน้ำสุทธิสูงสุด 9 ลิตร/นาที หากต้องการเพิ่มอัตราน้ำสุทธิให้สูงขึ้นควรปรับขนาดท่อน้ำทิ้งให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อรักษาระดับน้ำที่ระดับเวียร์น้ำล้นพอดี

5.2.3 น้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ควรเดินระบบด้วยค่าอัตราน้ำล้นผิวมากกว่า 12 เซนติเมตร/นาที อาจทำการศึกษาที่อัตราน้ำล้นผิวสูงกว่านี้ หากทำการเพิ่มขนาดท่อน้ำขาออก

5.2.4 ควรศึกษาชนิดสารโคแอกกูแลนท์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทำลายเสถียรภาพอนุภาคแบบดูดติดและทำลายประจุที่ใช้ปริมาณสารโอแอกกูแลนท์ต่อจำนวนเซลล์ที่ลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

Amirtharaja, A., and Mills, K. M. (1982). Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. *American Water Works Association, 74*, 210-216.

Barrett, F. (1975). Electroflotation-Development and application. *Water Pollution Control, 74*, 59.

Clasen, J., Mischke, U., Drikas, M., and Chow, C. (2000). An improved method for detecting electrophoretic mobility of algae during the destabilisation process of flocculation: flocculant demand of different species and the impact of DOC. *Water services resource technology, 49*, 89-101.

Drikas, M., Chow, C. W. K., House, J., and Burch, M. D. (2001). Using coagulation, flocculation and settling to remove toxic cyanobacteria. *Water Works Associate, 93*, 100-111.

Edzwald, J. K. (1995). Principles and applications of dissolved air flotation. *Water Science and Technology, 31*, 1-23.

Edzwald, J. K. (2010). Review : Dissolved air flotation and me. *water research* (Vol. 44, pp. 2077-2106).

Edzwald, J. K., Malley, J., and Yu, C. (1990). A conceptual model for dissolved air flotation in water treatment. *Water supply, 8*, 141-150.

Edzwald, J. K., Wingler, B.J. (1990). Chemical and physical aspects of dissolved air flotation for the removal of algae. *Aqua, 39*, 24-35.

Fawcett, N. S. J. (1997). *In Dissolved Air Flotation*. London U.K.: Proc. Int. Conf.

Fogler, H. S. (2005). *Elements of Chemical Reaction Engineering*. USA: Pearson Higher Ed.

Gregory, R., Zabel, T. F., And Edzwald, J. K. (1999). *From Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies*: McGraw-Hill, Inc.

Henderson, R., Parsons, S. A., and Jefferson, B. (2008). The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae. *water research, 42*, 1827-1845.

Jiang, J., and Graham, N. J. D. (1998). Preliminary evaluation of the performance of new pre-polymerised inorganic coagulants for lowland surface water treatment. *Water Science and Technology, 37*(2), 121-128.

Jiang, J., Graham, N. J. D., and Harward, C. (1993). Comparison of polyferric sulphate with other coagulants for the removal of algae-derived organic matter. *Water Science and Technology, 27*(11), 221-230.

Jun, H. B., Lee, Y. J., Lee, B. D., and Knappe, D. R. U. (2001). Effectiveness of coagulants and coagulant aids for the removal of filter clogging Synedra. *Water supply, 50*(135-148).

Kawamura, S. (2000). *Integrated design and operation of water treatment facilities*. United States of America: John Wiley & Sons. Inc.

Kempeneers, S., Menxel, F.V.,, and Gille, L. (2001). A decade of large scale experience in dissolved air flotation. *Water Science and Technology, 43*, 27-34.

Liu, J. C., Chen, Y. M., and Ju, Y. (1999). Separation of algal cells from water by column flotation. *Technology, 34*, 2259-2272.

Lundgren, H. (1976). Theory and practice of dissolved-air flotation *Filtration and Separation, 13*, 24.

Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* Singapore: McGraw-Hill.

Mouchet, P., and Bonnelye, V. (1998). Solving algae problems: French expertise and world-wide applications. *Water services resource technology, 47*, 125-141.

Painmanakul, P., Sastaravet, P., Lersjintanakarn, S., and Khaodhiar, S. (2010). Effect of bubble hydrodynamic and chemical dosage on treatment of oily wastewater by induced air flotation (IAF) process. *Chemical engineering research and design, 88*, 693-702.

Petrusevski, B., Vlaski, A., van Breenham, A. N., and Alaerts, G. J. (1993). Influence of algal species and cultivation canditions on algal removal in direct filtration. *Water Science and Technology, 27*, 211-220.

Reynolds, T. D., and Richards, P. A. (1996). *Coagulation and Flocculation. In Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*. Boston, USA PWS Publishing Company.

Schers, G. J., and van Dijk, J. C. (1992). Dissolved-air flotaion: Theory and practice., 223-246.

Sherfold, H. L. (1984). *Flotation in mineral processing*. Netherlands: Martinus Nijhoff

Show, K. Y., Lee, D. J., and Chang, J. S. (2012). Algae biomass dehydration. *Bioresource Technology, 135*(720-729).

Tambo, N., Matsui, Y., and Fukushi, K. (1986). *A kinetic study of dissolved air flotation* Tokyo: World congress of chemical engineering.

Vlaski, A., Van, A. N., and Alaerts, G. J. (1996). Optimisation of coagulation conditions for the removal of cyanobacteria by dissolved air flotation or sedimentation. *Aqua, 45*, 253-261.

ทันดาว ทองตัน. (2545). สาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด.

พิสุทธิ์ เพียรมนกุล. (2556). เอกสารคำสอน : หน่วยกระบวนการสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. (2538). วิศวกรรมการประปา เล่ม *2*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. (2542). วิศวกรรมการประปา เล่ม *1*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ลัดดา วงศ์รัตน์. (2543). คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)

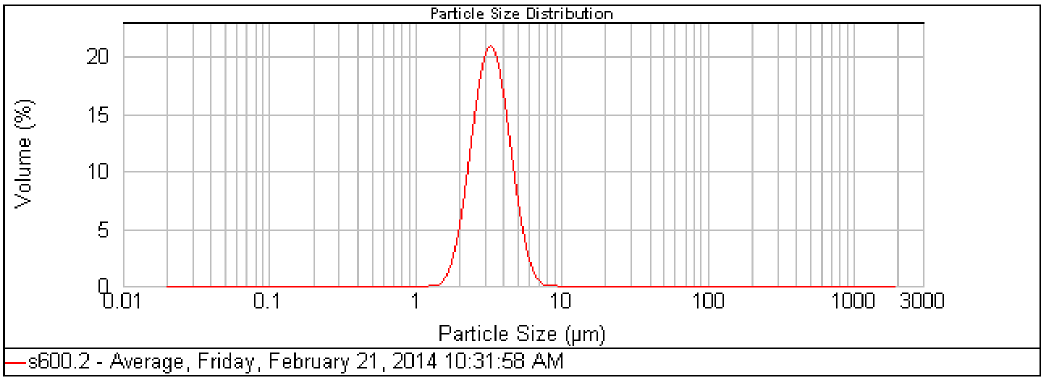
ตาราง ก-1 ผลการวัดขนาดอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค

Mastersizer 2000 - [A1-1v]

File Edit View Measure Configure Tools Window Help

Sieve BS 410 1986 - ISO565 1990 (M) | Sieve ASTM E11 61 (M) | Result Statistics (M) | Parameter report (M) | Trend (M) | Tul2
Records | Result Analysis (M) | Data (M) | Fit (M) | Result Difference (M)

Sample Name: s600.2 - Average	**SOP Name:**	**Measured:** Friday, February 21, 2014 10:31:58 AM	
Sample Source & type: Factory = scale box	**Measured by:** Defult	**Analysed:** Friday, February 21, 2014 10:31:59 AM	
Sample bulk lot ref:	**Result Source:** Averaged		
Particle Name: Default	**Accessory Name:** Hydro 2000MU (A)	**Analysis model:** General purpose	**Sensitivity:** Enhanced
Particle RI: 1.520	**Absorption:** 0.1	**Size range:** 0.020 to 2000.000 um	**Obscuration:** 3.67 %
Dispersant Name: Water	**Dispersant RI:** 1.330	**Weighted Residual:** 2.359 %	**Result Emulation:** Off
Concentration: 0.0015 %Vol	**Span :** 0.741	**Uniformity:** 0.232	**Result units:** Volume
Specific Surface Area: 1.88 m²/g	**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 3.185 um	**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 3.443 um	
d(0.1): 2.308 um	**d(0.5):** 3.307 um	**d(0.9):** 4.758 um	



ภาพที่ ก-1 กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา

ตาราง ก-2 ข้อมูลดิบการวัดขนาดอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.022	0.00
0.025	0.00
0.028	0.00
0.032	0.00
0.036	0.00
0.040	0.00
0.045	0.00
0.050	0.00
0.056	0.00
0.063	0.00
0.071	0.00
0.080	0.00
0.089	0.00
0.100	0.00
0.112	0.00
0.126	0.00
0.142	

Size (µm)	Volume In %
0.142	0.00
0.159	0.00
0.178	0.00
0.200	0.00
0.224	0.00
0.252	0.00
0.283	0.00
0.317	0.00
0.356	0.00
0.399	0.00
0.448	0.00
0.502	0.00
0.564	0.00
0.632	0.00
0.710	0.00
0.796	0.00
0.893	0.00
1.002	

Size (µm)	Volume In %
1.002	0.00
1.125	0.00
1.262	0.00
1.416	0.14
1.589	0.78
1.783	2.33
2.000	5.00
2.244	8.59
2.518	12.30
2.825	15.01
3.170	15.78
3.557	14.34
3.991	11.28
4.477	7.57
5.024	4.25
5.637	1.90
6.325	0.62
7.096	

Size (µm)	Volume In %
7.096	0.09
7.962	0.01
8.934	0.00
10.024	0.00
11.247	0.00
12.619	0.00
14.159	0.00
15.887	0.00
17.825	0.00
20.000	0.00
22.440	0.00
25.179	0.00
28.251	0.00
31.698	0.00
35.566	0.00
39.905	0.00
44.774	0.00
50.238	

Size (µm)	Volume In %
50.238	0.00
56.368	0.00
63.246	0.00
70.963	0.00
79.621	0.00
89.337	0.00
100.237	0.00
112.468	0.00
126.191	0.00
141.589	0.00
158.866	0.00
178.250	0.00
200.000	0.00
224.404	0.00
251.785	0.00
282.508	0.00
316.979	0.00
355.656	

Size (µm)	Volume In %
355.656	0.00
399.052	0.00
447.744	0.00
502.377	0.00
563.677	0.00
632.456	0.00
709.627	0.00
796.214	0.00
893.367	0.00
1002.374	0.00
1124.683	0.00
1261.915	0.00
1415.892	0.00
1588.656	0.00
1782.502	0.00
2000.000	

ภาคผนวก ก.2 ผลการศึกษาการตกตะกอนแบบโดดของอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา

ตารางที่ ก-3 ผลการตกตะกอนแบบโดดของอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา

เวลา	ความขุ่น (NTU)		Ut (cm./min)			C/Co		
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 1	จุดที่ 2	ค่าเฉลี่ย	จุดที่ 1	จุดที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0	114.0	114.0	-	-	-	1.0	1.0	1.0
10	114.0	93.0	8.9	2.8	5.8	1.00	0.82	0.91
20	108.0	88.0	4.5	1.4	2.9	0.95	0.77	0.86
30	95.0	85.0	3.0	0.9	1.9	0.83	0.75	0.79
60	93.0	79.0	1.5	0.5	1.0	0.82	0.69	0.75
90	82.0	67.0	1.0	0.3	0.6	0.80	0.59	0.69
120	83.0	62.0	0.7	0.2	0.5	0.73	0.54	0.64
1020	81.0	52.0	0.1	0.0	0.1	0.71	0.46	0.58

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราน้ำล้นผิวกับประสิทธิภาพการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยการตกตะกอน

OFR (cm/min)	Eff%
15	6
10	7
5.82	9.2
2.91	14
1.94	19
0.97	27
0.64	32
0.48	36.4
0.06	41.6

ภาคผนวก ก.3 ผลการศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทส

ตาราง ก-5 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.3 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทส

Alum dose(mg/l)	pH	cells		ave	cell removal	%removal
		top	bottom			
0	7.77			34	0.0	0.0
1	7.75	17	20	19	15.5	45.6
2	7.74	10	13	12	22.5	66.2
3	7.73	3	3	3	31.0	91.2
4	7.71	4	3	4	30.5	89.7
5	7.72	2	5	4	30.5	89.7
6	7.73	3	4	4	30.5	89.7
7	7.63	7	1	4	30.0	88.2
8	7.6	1	4	3	31.5	92.6

ตาราง ก-6 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.5 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยสารส้ม

Alum dose(mg/l)	pH	cells		ave	cell removal	%removal
		top	bottom			
0	7.96	67	59	63	0.0	0.0
1	7.92	17	10	14	49.5	50.0
2	7.89	19	9	14	49.0	60.0
3	7.93	24	23	24	39.5	62.7
4	7.87	17	26	22	41.5	65.9
5	7.79	13	20	17	46.5	73.8
6	7.88	11	14	13	50.5	80.2
7	7.49	10	9	9.5	53.5	81.2
8	7.47	4	8	6	57.0	88.1
9	7.46	2	8	5	58.0	90.1

ตาราง ก-7 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.5 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยแคลเซียมคลอไรด์

CaCl2 dose(mg/l)	pH	cells		ave	cell removal	%removal
		top	bottom			
0	7.81	48	64	56	0.0	0.0
6	7.79	50	40	45	11.0	19.6
8	7.78	55	55	55	1.0	1.8
10	7.81	48	40	44	12.0	21.4
40	7.73	47	43	45	11.0	19.6
60	7.72	56	40	48	8.0	14.3
80	7.73	50	40	45	11.0	19.6

ตาราง ก-8 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยสารส้ม

Alum dose(mg/l)	pH	cell removal			%removal		
		top	bottom	medium	top	bottom	medium
0	7.78	0	0	0	0.0	0.0	0.0
5	7.5	75	50	62.5	53.6	38.5	46.3
8	7.53	120	115	117.5	85.7	88.5	87.0
10	7.43	114	116	115	81.4	89.2	85.2
13	7.43	129	121	125	92.1	93.1	92.6
15	7.4	115	113	114	82.1	86.9	84.4
18	7.32	131	117	124	93.6	90.0	91.9

ตาราง ก-9 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยแคลเซียมคลอไรด์

CaCl2 dose(mg/l)	pH	cells		ave	cell removal	%removal
		top	bottom			
0	7.8	89	121	105	0.0	0.0
2	7.71	71	80	76	29.5	28.1
4	7.69	75	125	100	5.0	30.0
6	7.67	70	64	67	38.0	36.2
7	7.69	86	81	84	21.5	20.5
8	7.7	80	78	79	26.0	24.8
9	7.74	112	78	95	10.0	20.0

Chulalongkorn University

ตาราง ก-10 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 3 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยสารส้ม

Alum dose(mg/l)	pH	cells		ave	cell removal	%removal
		top	bottom			
0	7.93	355	355	355	0	0.0
20	7.84	136	120	128	227	63.9
24	7.89	98	117	108	247	69.7
28	7.87	120	105	113	242	68.3
30	7.83	111	109	110	245	69.0
35	7.82	172	118	145	210	59.2
40	7.97	144	150	147	208	58.6
50	7.29	36	35	35.5	201	84.9
100	6.91	25	18	21.5	215	90.9
150	6.69	23	18	20.5	216	91.3
200	6.55	13	6	9.5	227	95.9
250	6.32	1	4	2.5	234	98.9
300	6.19	7	6	6.5	230	97.2

ตาราง ก-11 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 3 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยแคลเซียมคลอไรด์

CaCl2 dose(mg/l)	pH	cells		ave	cell removal	%removal
		top	bottom			
0	7.91	288	287	288	0	0.0
20	7.89	189	189	189	98	34.3
40	7.85	189	173	181	106	37.0
50	7.82	114	115	115	173	60.2
60	7.81	99	97	98	189	65.9
70	7.79	35	43	39	248	86.4
80	7.76	32	34	33	254	88.5

ตาราง ก-12 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยสารส้ม

Alum dose(mg/l)	pH	cells		ave	cell removal	%removal
		top	bottom			
0.0	8.1	500	580	540	0	0.0
5.0	8.0	480	500	490	50	9.3
8.0	8.0	485	580	532	7	1.4
10.0	8.0	480	520	500	40	7.4
13.0	7.9	450	505	477	62	11.6
15.0	8.0	400	440	420	120	22.2
18.0	7.9	315	495	405	135	25.0
25.0	7.8	313	390	351	188	34.9
30.0	7.8	395	265	330	210	38.9
35.0	7.8	325	370	347	192	35.6
40.0	7.8	285	320	302	237	44.0
45.0	7.7	325	260	292	247	45.8
50.0	7.4	142	134	138	304	68.8
100.0	7.2	126	124	125	317	71.8
150.0	6.9	94	91	92	350	79.1
200.0	6.7	65	70	67	375	84.7
250.0	6.3	6	9	7	435	98.3
300.0	5.9	5	4	4	438	99.0

ตาราง ก-13 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยแคลเซียมคลอไรด์

CaCl2 dose(mg/l)	pH	cells		ave	cell removal	%removal
		top	bottom			
0	7.96	490	480	485	0	0.0
40	7.96	385	435	410	75	15.5
60	7.9	295	276	286	199	41.1
80	7.85	130	111	121	364	75.2
100	7.82	59	81	70	415	85.6
110	7.77	57	61	59	426	87.8
120	7.69	29	36	33	452	93.3

ตาราง ก-14 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 7 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยสารส้ม

Alum dose(mg/l)	pH	cells		ave	cell removal	%removal
		top	bottom			
0.0	8.0	540	830	685	0	0.0
55.0	7.7	435	515	475	210	30.7
60.0	7.7	560	435	497	187	27.4
70.0	7.6	360	375	367	317	46.4
80.0	7.6	455	490	472	212	31.0
85.0	7.6	430	455	442	242	35.4
90.0	7.6	505	500	502	182	26.6
100.0	7.5	355	455	405	307	43.2
150.0	7.3	380	340	360	352	49.5
200.0	7.1	315	355	335	377	53.0
250.0	6.8	295	305	300	412	57.9
300.0	6.6	170	200	185	527	74.0
350.0	6.5	126	117	121	591	82.9
400.0	6.1	53	49	51	661	92.8

ตาราง ก-15 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 7 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยแคลเซียมคลอไรด์

CaCl2 dose(mg/l)	pH	cells		ave	cell removal	%removal
		top	bottom			
0	8.23	730	790	760	0	0.0
20	8.25	685	570	628	132	17.4
40	8.2	440	390	415	345	45.4
60	8.16	440	360	400	360	47.4
80	8.11	245	295	270	490	64.5
100	8.03	211	200	206	554	73.0
120	7.99	166	198	182	578	76.1
140	7.82	123	130	127	633	83.4

ตาราง ก-16 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 9 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยสารส้ม

Alum dose(mg/l)	pH	cells		ave	cell removal	%removal
		top	bottom			
0	8.5	930	915	923	0	0.0
100	7.75	525	735	630	292	31.7
150	7.55	550	555	553	370	40.1
200	7.36	585	440	513	410	44.4
250	7.19	455	410	433	490	53.1
300	6.99	320	385	353	570	61.8
350	6.89	360	300	330	592	64.2
400	5.98	110	155	133	790	85.6
425	6.13	78	91	85	838	90.8
450	5.97	29	33	31	891	96.6
500	5.43	7	10	9	914	99.1

ตาราง ก-17 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 7 ล้านเซลล์/มิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยแคลเซียมคลอไรด์

$CaCl_2$ dose(mg/l)	pH	cells		ave	cell removal	%removal
		top	bottom			
0	8.28	820	980	900	0	0.0
60	8.10	595	700	648	252	28.1
80	8.00	301	330	316	584	64.9
100	8.00	190	172	181	719	79.9
120	7.91	81	86	84	816	90.7
140	7.87	52	80	66	834	92.7
160	7.80	65	48	57	843	93.7
180	7.75	29	51	40	860	95.6
200	7.73	43	37	40	860	95.6

ตาราง ก-18 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยสารส้ม

conc. Algae (million cell/ml)	%removal	alum dose(mg/l)	ng Al/cell
0.3	87.0	3	1.0×10^{-2}
0.5	80.2	6	1.2×10^{-2}
1	87.1	8	8.0×10^{-3}
3	85.0	50	1.7×10^{-2}
5	85.0	200	4.0×10^{-2}
7	83.0	300	4.3×10^{-2}
9	85.6	400	4.4×10^{-2}

ตาราง ก-19 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนแบบจาร์เทสด้วยแคลเซียมคลอไรด์

conc. Algae (million cell/ml)	%removal	$CaCl_2$ dose(mg/l)	ng Al/cell
0.3	-	-	0.0
0.5	21	-	0.0
1	25	-	0.0
3	86	70	2.3×10^{-2}
5	85	100	2.0×10^{-2}
7	83	140	2.0×10^{-2}
9	80	100	1.1×10^{-2}

ภาคผนวก ก.4 ผลการศึกษาการตกตะกอนของอนุภาคสาหร่ายหลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ตารางที่ ก-20 ผลการศึกษาการตกตะกอนของอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร หลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

Time	Final Turbidity (NTU)				Removal efficiency, %Re			
(min)	D = 89 cm.	D = 68.5 cm.	D = 48 cm.	D = 27.5 cm.	D = 89 cm.	D = 68.5 cm.	D = 48 cm.	D = 27.5 cm.
0	97.0	94.0	92.0	81.0	0	0	0	0
10	94.0	91.0	79.0	78.0	18	20	31	32
20	90.0	88.0	83.0	93.0	21	23	27	18
30	96.0	87.0	89.0	92.0	16	24	22	19
60	105.0	105.0	98.0	125.0	8	8	14	-10
90	116.0	93.0	100.0	98.0	-2	18	12	14
150	91.0	85.0	101.0	74.0	20	25	11	35
210	84.0	71.0	98.0	79.0	26	38	14	31
270	70.0	65.0	79.0	71.0	39	43	31	38
330	65.0	53.0	103.0	72.0	43	54	10	37

ตารางที่ ก-21 ผลการศึกษาการตกตะกอนของอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร หลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยแคลเซียมคลอไรด์

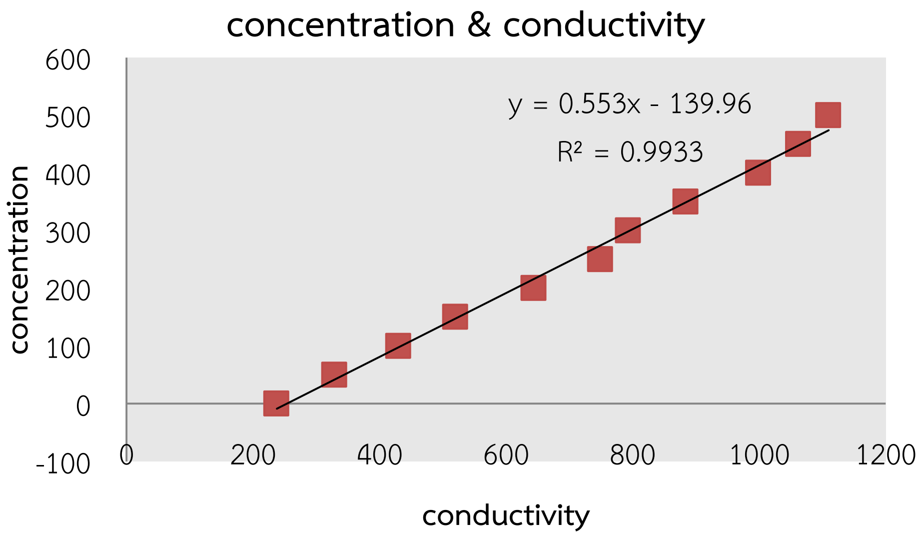
Time	Final Turbidity (NTU)				Removal efficiency, %Re			
(min)	D = 89 cm.	D = 68.5 cm.	D = 48 cm.	D = 27.5 cm.	D = 89 cm.	D = 68.5 cm.	D = 48 cm.	D = 27.5 cm.
0	280.5	234.5	197.5	191.0	0	0	0	0
10	312.0	317.5	192.5	195.0	27	26	55	54
20	267.0	302.0	235.0	159.0	37	29	45	63
30	292.0	277.0	336.0	144.0	32	35	21	66
60	283.5	287.5	291.0	303.5	34	33	32	29
90	246.5	179.0	237.0	214.0	42	58	44	50
150	267.5	153.0	189.0	134.0	37	64	56	69
210	152.0	108.5	168.5	167.5	64	75	60	61
270	84.5	110.5	121.0	87.5	80	74	72	79
330	117.5	85.5	139.5	53.0	72	80	67	88
390	46.0	42.5	49.5	37.0	89	90	88	91

ภาคผนวก ก.5 การออกแบบและการศึกษาลักษณะของถังปฏิกิริยา

ตารางที่ ก-22 ตารางแสดงการตัวอย่างการคำนวณปริมาณ G×t ที่อัตราการไหล 3 ลิตร/นาที โดยใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 0.5 นิ้ว

2 stage=2element	D	0.0127	m	Gxt
SM L	3.2×10^{-2}	m		
Velocity act	0.39	m/s		
Detention time	8.0×10^{-2}	s		256.71
Head loss	7.5×10^{-2}	m		
G	3.2×10^{3}			
3 stage=3element	D	0.0127	m	Gxt
SM L	4.4×10^{-2}	m		
Velocity act	0.39	m/s		
Detention time	0.11	s		429.56
Head loss	0.15	m		
G	3.8×10^{3}			
4 stage=4element	D	0.0127	m	Gxt
SM L	5.7×10^{-2}	m		
Velocity act	0.39	m/s		
Detention time	0.14	s		487.08
Head loss	0.15	m		
G	3.3×10^{3}			
5 stage=5element	D	0.0127	m	Gxt
SM L	7.0×10^{-2}	m		
Velocity act	0.39	m/s		
Detention time	0.18	s		538.49
Head loss	0.15	m		
G	3.0×10^{3}			
6 stage=6element	D	0.0127	m	Gxt
SM L	8.3×10^{-2}	m		
Velocity act	0.39	m/s		
Detention time	0.21	s		585.40
Head loss	0.15	m		
G	2.8×10^{3}			
7 stage=7element	D	0.0127	m	Gxt
SM L	9.5×10^{-2}	m		

Velocity act	0.39	m/s		
Detention time	0.24	s		628.82
Head loss	0.15	m		
G	2.6×10^{3}			
8 stage=8element	D	0.0127	m	Gxt
SM L	0.11	m		
Velocity act	0.39	m/s		
Detention time	0.27	s		669.43
Head loss	0.15	m		
G	2.4×10^{3}			
9 stage=9element	D	0.0127	m	Gxt
SM L	0.12	m		
Velocity act	0.39	m/s		
Detention time	0.31	s		707.71
Head loss	0.15	m		
G	2.3×10^{3}			



ภาพที่ ก-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ตารางที่ ก-23 ตัวอย่างการคำนวณตัวแปรเชิง RTD

time (min)	404	micros/cm	83.4	C	concentration			net concentration		
volume	153.7	238.7	326.2	l				0	0	0

t design	20.7	32.2	44.0	min						
2	404	404			83.45	83.45		0.00	0	0
4	404	404			83.45	83.45		0.00	0	0
6	405	404			84.01	83.45		0.55	0	0
8	412	407			87.88	85.11		4.42	1.65	0
10	416	414	start		90.09	88.98	start	6.64	5.53	0
12	422	420	404		93.41	92.3	83.452	9.95	8.84	0
14	429	430	404		97.28	97.83	83.452	13.83	14.37	0
16	439	440	404		102.81	103.36	83.452	19.36	19.90	0
18	445	442	404		106.13	104.466	83.452	22.67	21.01	0
20	446	445	406		106.68	106.125	84.558	23.23	22.67	1.10

ตารางที่ ก-24 ตัวอย่างการคำนวณตัวแปรเชิง RTD (ต่อ)

time (min)	พื้นที่ใต้กราฟ	861.57	20.77	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
	net conc(mg/l)	E(t)	E(t)*(V/Q)				
0	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	-38.9474	0.0000	0.0000
2	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	-36.9474	0.0000	0.0000
4	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	-34.9474	0.0000	0.0000
6	0.6	0.0006	0.0133	0.0039	-32.9474	0.6967	0.0231
8	4.4	0.0051	0.1067	0.0411	-30.9474	4.9178	0.3286
10	6.6	0.0077	0.1600	0.0770	-28.9474	6.4540	0.7702
12	10.0	0.0116	0.2400	0.1386	-26.9474	8.3895	1.6637
14	13.8	0.0160	0.3334	0.2246	-24.9474	9.9867	3.1451
16	19.4	0.0225	0.4667	0.3594	-22.9474	11.8295	5.7510
18	22.7	0.0263	0.5467	0.4737	-20.9474	11.5472	8.5263
20	23.2	0.0270	0.5601	0.5392	-18.9474	9.6779	10.7831

ภาคผนวก ก.4 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

ตารางที่ ก-25 ตัวอย่างการผลการการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายที่ความเข้มข่นเริ่มต้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

time	0	10	20	30	35	40	45	50	55	60	t_m	min	average
white	0	3	5	12	12	17	12	19	18	12	36		15.3
green	0	1.5	21	31	29	25	15	19	25	306	25		
Separation	100	95	91	79	79	69	79	67	69	78			72.5
Collection	0	3	37	56	51	44	26	33	45	551			40.0
Collection	0	4	23	45	56	100	37	100	100	100			

ตารางที่ ก-26 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการร่วมระหว่างโคแอกกูเลชัน และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่ OFR และ A/S ต่างๆ

raw flow	air flow	Air (g/ml*l/min)	Solid (g/ml*l/min)	A/S (g air/g s)	%separa	%collect	OFR (cm/min)
6.4	2.5	4.5×10^{-7}	1.3×10^{-4}	3.0×10^{-3}	72	101	12.3
6.4	3.3	5.9×10^{-7}	1.3×10^{-4}	5.0×10^{-3}	72.4	98	13.4
6.4	1.6	2.9×10^{-7}	1.3×10^{-4}	2.0×10^{-3}	57	121	11.0
5	4	7.2×10^{-7}	1.0×10^{-4}	7.0×10^{-3}	73	141	12.4
6.4	4	7.2×10^{-7}	1.3×10^{-4}	6.0×10^{-3}	75	33.3	14.3
3.5	4	7.2×10^{-7}	7.0×10^{-5}	1.0×10^{-2}	62.1	138.1	10.3
5	4	7.2×10^{-7}	1.0×10^{-4}	7.0×10^{-3}	44.2	66.3	12.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-27 ค่าอัตราการไหลที่ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้นต่างๆ กำหนดให้ A/S = 0.005

conc. Algae	algae(mg/l)	A/S	G/H=Qair	Q solid	alum(mg/l)
50	10.06	5.0×10^{-3}	2.0	6.70	4
100	20.12	5.0×10^{-3}	3.2	4.80	8
300	60.37	5.0×10^{-3}	4.0	2.00	24
500	100.62	5.0×10^{-3}	4.0	1.89	40
700	140.86	5.0×10^{-3}	4.0	1.40	56
900	181.11	5.0×10^{-3}	4.0	1.10	72

ภาคผนวก ก.5 ผลการแยกอนุภาสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองผ่านทรายกรอง

ตารางที่ ก-28 ผลการแยกอนุภาสาหร่ายที่ความเข้มข้น 1 ล้านเซลล์/มิลลิลิตร ด้วยกระบวนการกรองผ่านทรายกรองที่ความสูงต่างๆ (ไม่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน 2.ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน)

ความสูง (ซม)	Eff		Eff%		L/min	m/hr
	no alum	with alum	no alum	with alum		
10	22.5	1.5	77.5	98.5	1.57	12.0
20	14	1	86.0	99.0	1.51	11.5
30	11.5	1	88.5	99.0	1.41	10.8
40	10	1	90.0	99.0	1.29	9.9
50	3.5	1	96.5	99.0	0.83	6.3

ตารางที่ ก-29 ผลการแยกอนุภาสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยทรายกรอง $d_{10\%}$=0.43 มิลลิเมตร ความหนา 50 เซนติเมตร

conc. (ล้านเซลล์/มล)	Eff		Eff%		L/min	m/hr
	no alum	with alum	no alum	with alum		
1	4.5	2	95.5	98.0	0.83	6.3
3	18.5	1.5	93.8	99.5	0.79	6.0
5	10.5	8.5	97.9	98.3	0.86	6.6
7	15	5	97.9	99.3	0.85	6.5
9	13	2.5	98.6	99.7	0.84	6.4

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอรภา ปรีชาวาท เกิดเมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555

ได้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการสาหร่ายและแพลงก์ตอนแห่งชาติครั้งที่ 6 วันที่ 28-30 มีนาคม พ.ศ. 2556 ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติเอ็มเพรส โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่ และงานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13 วันที่ 26-28 มีนาคม พ.ศ. 2557 ณ โรงแรมเดอะทวินทาวเวอร์ กรุงเทพฯ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY