การศึกษากระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำ เพื่อกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำดิบ

นายพิษณุพล สงวนนวล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0522-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF DISSOLVED AIR FLOTATION PROCESS
FOR ALGAE REMOVAL FROM RAW WATER

Mr. Pisanupon Sanguannual

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2000
ISBN 974-13-0522-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำเพื่อกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำดิบ
โดย	นายพิษณุพล สงวนนวล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

………………………………………….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล สายพานิช)

…………………………………………... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

…………………………………………… กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีระ เกรอต)

…………………………………………… กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิษณุพล สงวนนวล : การศึกษากระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำเพื่อกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำดิบ. (A STUDY OF DISSOLVED AIR FLOTATION PROCESS FOR ALGAE REMOVAL FROM RAW WATER)
อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 142 หน้า. ISBN 974-13-0522-2

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำดิบ โดยใช้กระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำหรือดีเอเอฟ โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการดีเอเอฟ ใน 2 กรณี คือ กรณีใช้ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ซึ่งเตรียมให้มีปริมาณของสาหร่ายพันธุ์คลอเรลลาที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการประมาณ 10^5 เซลล์/มล. กับกรณีใช้ตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำซึ่งมีปริมาณสาหร่ายสูง

ส่วนการทดลองในส่วนที่สองเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่อาจมีต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการดีเอเอฟ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ความดันที่ใช้ , ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาหร่าย , ความขุ่น, กรดฮิวมิก และโซเดียมลอรีลซัลเฟต และทำการทดลองศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการดีเอเอฟในการกำจัดสาหร่าย

จากผลการทดลองพบว่าอัตราการเวียนกลับที่เหมาะสมทั้งของตัวอย่างน้ำสังเคราะห์และน้ำจากแหล่งน้ำ (ในที่นี้ใช้น้ำจากบ่อโพลิชชิง) มีค่าประมาณ 10% และเมื่อใช้ค่าอัตราการเวียนกลับ 10% ความดัน 4 บาร์ ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสำหรับตัวอย่างน้ำสังเคราะห์เท่ากับ 28.50% ส่วนตัวอย่างน้ำจากบ่อโพลิชชิง จะได้ประสิทธิภาพสูงกว่าน้ำสังเคราะห์ โดยมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยเท่ากับ 42.24% ส่วนการทดลองศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ พบว่าการเพิ่มความดันมีผลทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการดีเอเอฟสูงขึ้น แต่เมื่อความดันสูงกว่า 5 บาร์ ประสิทธิภาพไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพของดีเอเอฟมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสาหร่ายเพิ่มขึ้น ในขณะที่กรดฮิวมิกน่าจะมีผลทำให้ดีเอเอฟมีประสิทธิภาพดีขึ้นเล็กน้อย ส่วนการเพิ่มความขุ่น (ไม่เกิน 130 เอ็นทียู) และโซเดียมลอรีลซัลเฟตไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดีเอเอฟ

และจากการทดลองปรับสภาพน้ำเบื้องต้นโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่าทำให้ดีเอเอฟมีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าการใช้กระบวนการดีเอเอฟอย่างเดียว โดยเมื่อใช้ความดันเท่ากับ 5 บาร์ อัตราการเวียนกลับเท่ากับ 10% ในการกำจัดสาหร่ายคลอเรลลาเข้มข้น 10^5 เซลล์/มล. พบว่าเมื่อใช้ดีเอเอฟอย่างเดียวประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายเท่ากับ 28.5 % ในขณะที่เมื่อใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์ ปริมาณที่เหมาะสมคือ 40 มก./ล. ค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 7 ได้ประสิทธิภาพ 82.4 % ส่วนกรณีที่ใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์ ปริมาณที่เหมาะสมคือ 40 มก./ล. ค่าพีเอชที่เหมาะสม คือ 5 ได้ประสิทธิภาพ 78%

ส่วนการทำฟล้อคคูเลชันก่อนใช้กระบวนการดีเอเอฟ โดยใช้เวลาทำฟล้อคคูเลชัน 5 นาที พบว่าไม่ทำให้ประสิทธิภาพของดีเอเอฟดีขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต..............................

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..............................

ปีการศึกษา 2543

##4070357721 :MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEY WORDS : DISSOLVED AIR FLOTATION / COAGULATION / ALGAE REMOVAL

PISANUPON SANGUANNUAL : A STUDY OF DISSOLVED AIR FLOTATION PROCESS FOR ALGAE REMOVAL FROM RAW WATER. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHAVALIT RATANATAMSAKUL, Ph.D., 142 pp. ISBN 974-13-0522-2

This research is study on efficiency and optimum condition for algae removal from raw water by Dissolved Air Flotation (DAF) Process. The study was done by using bench-scale DAF model and performed by spiking Chlorella species (unicellular green algae) with initial cell concentration of 10^5 cells/mL into tap water, and the other experiment was sampling water from pond containing high algae laden. Both of water types were investigated to find optimum recycle ratio and removal efficiency. For synthetic water, some variables that might affect DAF efficiency (pressure, initial feed concentration, turbidity , humic acid and sodium lauryl sulfate) and pre treatment by coagulation process were studied.

The result of experiment indicated that optimum recycle ratio was about 10% and removal efficiency was 28.50% for synthetic water, higher performance was found with polishing pond water where the removal efficiency was about 42.24%.

The variable parameters in this study showed that pressure change did obviously influence on DAF performance, higher pressure had the higher efficiency, but little change of efficiency could be seen when operated with higher pressure than 5 bars. The study also found that removal efficiency increased with initial feed concentration, and present of humic acid may be beneficial for DAF performance, while turbidity (not excess 130 NTU) and sodium lauryl sulfate did not affect on DAF.

Pre treatment by coagulation was necessary to obtain high efficiency. Coagulant dosage and pH adjustment improved DAF performance. From the experiment operated with pressure of 5 bars, 10% recycle and 10^5 cells/mL of Chlorella as initial feed concentration, removal efficiency was only 28.5% without pre treatment, while the efficiency was 82.4% when used alum at optimum dose of 40 mg/L and adjusted to optimum pH as 7, in case of ferric chloride was used as coagulant, the optimum dose was 40mg/L, pH as 5, the efficiency was 78% . While flocculation process with 5 minutes of flocculation time showed no improvement of removal efficiency.

Department Environmental Engineering Student's signature..........................
Field of study Environmental Engineering Advisor's signature..........................
Academic year 2000

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆท่าน ซึ่งผู้ทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ รวมทั้งขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่กรุณาอบรมและถ่ายทอดความรู้

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมูลนิธิชิน โสภณพนิช ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่อนุเคราะห์สาหร่ายพันธุ์คลอเรลลามาใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัท เมืองไทยอุตสาหกรรม จำกัด ที่อนุญาตให้ใช้ตัวอย่างน้ำภายในโครงการของบริษัท มาใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณมาลี อารีกุล กรรมการผู้จัดการ บริษัท อินเตอร์เนชั่นแนล ควอลิตี้ เทคโนโลยี่ จำกัด และขอขอบคุณ คุณวรวรรณ ประชาเกษม วิศวกรสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงาน บริษัท ไอคิวเอ จำกัด และบริษัท พรีเมียร์โพรดักส์ จำกัด ตลอดจนเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์นี้

และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ของผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้การสนับสนุนส่งเสริมและเป็นกำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฐ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ความเป็นมา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 กระบวนการทำให้ลอย 4

2.1.1 การทำให้ลอยตัวด้วยอากาศ 4

2.1.2 การทำให้ลอยตัวด้วยสูญญากาศ 4

2.1.3 การทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลาย 5

2.2 กระบวนการโคแอกกูเลชัน 22

2.2.1 พฤติกรรมของคอลลอยด์ 22

2.2.2 เสถียรภาพของคอลลอยด์ 23

2.2.3 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ 23

2.2.4 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน 26

2.2.5 กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและสารประกอบเหล็ก 27

2.2.6 กลไกโคแอกูเลชันที่เกิดจากการใช้โพลีเมอร์และโคแอกกูเลชันเอด อื่นๆ 30

2.2.7 การสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เพื่อให้เกิดฟล้อคคูเลชัน 31

2.2.8 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน 33

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสาหร่าย 36

2.3.1 บทบาทของสาหร่ายต่อสิ่งแวดล้อม 37

2.3.2 บทบาทของสาหร่ายในระบบประปา 38

2.3.3 เสถียรภาพของสาหร่ายในแหล่งน้ำ 40

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 41

3. แผนงานการวิจัยและการดำเนินงาน 47

3.1 แผนงานการวิจัย 47

3.1.1 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการวิจัย 47

3.1.2 การทำการทดลอง 47

3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง 48

3.2.1 การทดลองหาค่าอัตราการเวียนกลับและอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็งที่เหมาะสม 48

3.2.2 การทดลองหาค่าความดันที่เหมาะสม 52

3.2.3 การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของสาหร่าย 54

3.2.4 การทดลองศึกษาผลของความขุ่นและกรดฮิวมิก 56

3.2.5 การทดลองศึกษาผลของ Sodium Lauryl Sulfate 60

3.2.6 การทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน ร่วมกับกระบวนการ DAF 62

3.2.7 การทดลองศึกษาผลของกระบวนการฟล้อคคูเลชันที่มีต่อ DAF 64

3.3 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา 66

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 66

3.5 วิธีวิเคราะห์ปริมาณสาหร่าย 66

3.6 วิธีใช้ระบบ DAF ในระดับห้องปฏิบัติการ 67

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ 69

4.1 การทดลองหาค่าอัตราการเวียนกลับและอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็งที่เหมาะสม 69

4.2 การทดลองหาค่าความดันที่เหมาะสม 76

4.3 การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของสาหร่าย 79

4.4 การทดลองศึกษาผลของความขุ่นและกรดฮิวมิก 81

4.5 การทดลองศึกษาผลของ Sodium Lauryl Sulfate 87

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4.6 การทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน ร่วมกับกระบวนการ DAF 90

4.7 การทดลองศึกษาผลของกระบวนการฟล้อคคูเลชันที่มีต่อ DAF 99

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 104

5.1 สรุปผลการทดลอง 104

5.2 ข้อเสนอแนะ 106

รายการอ้างอิง 107

ภาคผนวก 111

ภาคผนวก ก การเพาะเลี้ยงสาหร่าย Chlorella 112

ภาคผนวก ข วิธีการนับเซลล์สาหร่าย 115

ภาคผนวก ค การหาค่า s_a และ A/S ratio 120

ภาคผนวก ง ข้อมูลผลการทดลอง 125

ภาคผนวก จ การปรับแก้ค่าปริมาณสาหร่ายที่วัดได้เนื่องจากผลการเจือจาง 140

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 142

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	ปริมาณอากาศที่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ณ. ความดันบรรยากาศ	7
ตารางที่ 2.2	แสดงผลของอนุภาคที่มีต่อความเร็วลอยขึ้น	20
ตารางที่ 4.1	ผลการทดลองหาค่าอัตราการเวียนกลับและ A/S ratio ที่เหมาะสม กรณีใช้น้ำสังเคราะห์	69
ตารางที่ 4.2	ปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นและสาหร่ายที่เหลือ ในตัวอย่างน้ำ จาก polishing pond หลังจากผ่านกระบวนการ DAF	72
ตารางที่ 4.3	แสดงประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่าย ในกรณีใช้ตัวอย่างน้ำ จากpolishing pond	73
ตารางที่ 4.4	ผลการทดลองหาค่าความดันที่เหมาะสม	76
ตารางที่ 4.5	ผลการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของสาหร่าย	79
ตารางที่ 4.6	ผลการทดลองศึกษาผลของความขุ่น	81
ตารางที่ 4.7	ผลการทดลองศึกษาผลของกรดฮิวมิก	84
ตารางที่ 4.8	ผลการทดลองศึกษาผลของ Sodium Lauryl Sulfate	87
ตารางที่ 4.9	ผลการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมเมื่อใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์	90
ตารางที่ 4.10	ผลการทดลองใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์	92
ตารางที่ 4.11	ผลการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ เป็นโคแอกกูแลนด์	94
ตารางที่ 4.12	ผลการทดลองใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์	95
ตารางที่ 4.13	ผลการทดลองศึกษาผลของกระบวนการฟล้อคคูเลเซ้นที่มีต่อ DAF	99

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 2.1 ระบบ DAF ชนิดที่ไม่มีการหมุนเวียน 5
รูปที่ 2.2 ระบบ DAF ชนิดที่มีการหมุนเวียน 6
รูปที่ 2.3 ผลของ A/S ที่มีต่อคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว 9
รูปที่ 2.4 ผลของความดันที่มีต่อขนาดของฟองอากาศ 10
รูปที่ 2.5 กลไกการเคลื่อนที่เข้าหากันระหว่างอนุภาคแขวนลอยและฟองอากาศ 12
รูปที่ 2.6 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อ SCCE 14
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ_b กับอัตราการเวียนกลับ 15
รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ ϕ_b 16
รูปที่ 2.9 แสดงความแตกต่างของขนาดและระยะห่างระหว่างฟองอากาศ
กับอนุภาคซึ่งทำให้เกิดการชนกัน 18
รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับความเร็วการลอยขึ้น 19
รูปที่ 2.11 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อความเร็วลอยขึ้น 20
รูปที่ 2.12 กลไกการใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม 25
รูปที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกระบวนการ DAF
กับการตกตะกอน 43
รูปที่ 3.1 แผนผังการทดลองหาอัตราการเวียนกลับและค่า A/S ratio
ที่เหมาะสมกรณีใช้น้ำสังเคราะห์ 49
รูปที่ 3.2 แผนผังการทดลองหาอัตราการเวียนกลับและค่า A/S ratio
ที่เหมาะสมกรณีใช้น้ำจาก polishing pond 51
รูปที่ 3.3 แผนผังการทดลองหาค่าความดันที่เหมาะสม 53
รูปที่ 3.4 แผนผังการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของสาหร่าย 55
รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลลองศึกษาผลของความขุ่น 57
รูปที่ 3.6 แผนผังการทดลองศึกษาผลของกรดฮิวมิก 59
รูปที่ 3.7 แผนผังการทดลองศึกษาผลของ Sodium Lauryl Sulfate 61
รูปที่ 3.8 แผนผังการทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับ DAF 63
รูปที่ 3.9 แผนผังการทดลองศึกษาผลของกระบวนการฟล้อคคูเลชันที่มีต่อ DAF 65
รูปที่ 3.10 แสดงส่วนประกอบของชุดเครื่องมือระบบ DAF 68

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ที่อัตราการเวียนกลับค่าต่างๆ สำหรับน้ำสังเคราะห์ ____ 70

รูปที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายที่ A/S ค่าต่างๆ สำหรับน้ำสังเคราะห์ ____ 71

รูปที่ 4.3 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ที่อัตราการเวียนกลับค่าต่างๆ สำหรับตัวอย่างน้ำจาก polishing pond ____ 73

รูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายที่ A/S ค่าต่างๆ สำหรับน้ำจาก polishing pond ____ 74

รูปที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างน้ำสังเคราะห์กับน้ำจาก polishing pond ____ 75

รูปที่ 4.6 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ที่ความดันต่างๆ ____ 77

รูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF ที่ความดันค่าต่างๆ ____ 77

รูปที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF ที่ปริมาณเริ่มต้นต่างๆ ของสาหร่าย ____ 80

รูปที่ 4.9 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ของตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณความขุ่น ค่าต่างๆ ____ 82

รูปที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF จากตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณความขุ่น ค่าต่างๆ ____ 83

รูปที่ 4.11 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ของตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณกรดฮิวมิกค่าต่างๆ ____ 85

รูปที่ 4.12 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF จากตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณกรดฮิวมิกค่าต่างๆ ____ 86

รูปที่ 4.13 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ของตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณ Sodium Lauryl Sulfate ค่าต่างๆ ____ 88

รูปที่ 4.14 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF จากตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณ Sodium Lauryl Sulfate ค่าต่างๆ ____ 89

รูปที่ 4.15 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ซึ่งใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์ที่ค่า pH ต่างๆ ____ 91

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.16 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ซึ่งใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์ และปรับค่า pHเท่ากับ 7 ____ 92

รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ซึ่งใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์ที่ค่า pH ต่างๆ ____ 94

รูปที่ 4.18 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ซึ่งใช้ $FeCl_3$ เป็นโคแอกกูแลนท์ และปรับค่า pH เท่ากับ 5 ____ 96

รูปที่ 4.19 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยใช้สารเคมีเป็นโคแอกกูแลนท์ร่วมกับ DAF ____ 97

รูปที่ 4.20 แสดงรูปร่างและลักษณะเซลล์ของสาหร่าย Chlorella กำลังขยาย 2000 เท่า ____ 100

รูปที่ 4.21 แสดงรูปร่างและลักษณะเซลล์ของสาหร่าย Chlorella กำลังขยาย 5000 เท่า ____ 100

รูปที่ 4.22 ชุดการทดลอง DAF ในระดับห้องปฏิบัติการ ____ 101

รูปที่ 4.23 แสดงส่วนของสาหร่ายซึ่งถูกพาให้ลอยขึ้นมาโดยฟองอากาศจากกระบวนการ DAF ____ 102

รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายระยะใกล้ถังทำให้ลอย แสดงให้เห็นการลอยขึ้นของฟองอากาศและอนุภาคสาหร่าย ____ 103

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันการจัดหาแหล่งน้ำดิบ เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาสำหรับเมืองหรือชุมชนต่างๆ ในประเทศไทย เริ่มที่จะมีปัญหามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเพิ่มของประชากรย่อมส่งผลทำให้ความต้องการการใช้น้ำในแต่ละชุมชนเพิ่มสูงขึ้น การจัดหาแหล่งน้ำดิบเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการของชุมชน จึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญ ทั้งในด้านของปริมาณและคุณภาพของน้ำดิบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งน้ำผิวดิน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบที่สำคัญของการผลิตน้ำประปา

เทคโนโลยีในการผลิตน้ำประปาในปัจจุบันจะเน้นในส่วนของกระบวนการตกตะกอน (sedimentation) และการกรอง (filtration) ซึ่งสามารถให้คุณภาพของน้ำประปาที่ดีในระดับหนึ่ง แต่ก็พบว่าการตกตะกอนและการกรองน้ำมีข้อจำกัดบางประการในกรณีที่สิ่งสกปรกหรืออนุภาคแขวนลอยบางชนิด ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ การทำงานโดยกลไกของการตกตะกอนอาจไม่ดีนัก ซึ่งเป็นผลให้ระบบการกรองต้องรับภาระมากขึ้น ทำให้อายุการใช้งานน้อยลง หรือในกรณีที่มีการใช้สารเคมีช่วยให้ตกตะกอนได้ดีขึ้นก็ต้องใช้สารเคมีในปริมาณมากทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ดังนั้นการพัฒนากระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อกำจัดอนุภาคซึ่งตกตะกอนได้ยากนี้จึงมีความจำเป็นเพื่อให้ได้คุณภาพของน้ำประปาที่ดีขึ้น

การทำให้ลอย (flotation) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำโดยที่สารแขวนลอยอาจเป็นของแข็งหรือของเหลว ซึ่งมีลักษณะที่ตกตะกอนได้ยาก น้ำเสียจากอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น โรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ, โรงกลั่นน้ำมัน, โรงงานสกัดน้ำมันพืช, โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมดังกล่าวจะมีสารหรืออนุภาคแขวนลอยปะปนอยู่ ซึ่งวิธีการหรือระบบที่ใช้ในการแยกสารแขวนลอยเหล่านี้ ระบบที่นิยมใช้กันแพร่หลาย คือ ระบบการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำ (Dissolved Air Flotation, DAF) โดยมีหลักการคือการอัดอากาศเข้าไปในน้ำเสียภายใต้ความดันสูง แล้วลดความดันของน้ำสู่ความดันบรรยากาศ อากาศส่วนเกินจะแยกตัวออกจากน้ำกลายเป็นฟองอากาศเข้าไปยึดเกาะกับอนุภาคแขวนลอยพาอนุภาคนั้นให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำทำให้สามารถกำจัดออกจากน้ำได้โดยสะดวก

สำหรับในงานปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ กระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำก็นำมาใช้ในงานด้านนี้เช่นเดียวกัน เนื่องจากสิ่งเจือปนต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในน้ำดิบ เช่น ความขุ่นหรือพืชน้ำขนาดเล็กๆ เช่น สาหร่าย มักจะก่อให้เกิดปัญหาในด้านของกระบวนการผลิตน้ำประปา ปัญหาด้านทัศนียภาพ และปัญหาด้านสุขภาพอนามัยของผู้ใช้น้ำ

นอกจากนี้ มีรายงานในปัจจุบันพบว่า สาหร่ายบางชนิดยังผลิตสารพิษ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของผู้ใช้น้ำอีกด้วย น้ำดิบที่มีการเจริญเติบโตของสาหร่ายในปริมาณมาก (เกิด algae bloom) จะก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิตน้ำประปา เช่น กระบวนการทำงานของโคแอกกูเลชัน และการตกตะกอน , ทำให้เกิดการอุดตันของถังทรายกรองและอุดตันท่อส่งน้ำ และทำให้เกิดปัญหาเรื่องของกลิ่นและรสของน้ำ และด้วยคุณสมบัติของสาหร่าย ซึ่งเป็นพืชน้ำขนาดเล็กที่มีความหนาแน่นต่ำ มีน้ำหนักเบา การกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำโดยวิธีการตกตะกอนจึงเป็นเรื่องยาก การใช้กระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำ หรือ DAF จึงน่าที่จะเป็นวิธีที่เหมาะสม

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการใช้กระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำ สำหรับกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำดิบ โดยจะเน้นการศึกษาประสิทธิภาพและการหาสภาวะที่เหมาะสมของ DAF โดยทำการศึกษาทั้งในกรณีที่ใช้กระบวนการ DAF อย่างเดียว และกรณีที่ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการปรับสภาพน้ำเบื้องต้นก่อนที่จะใช้ DAF

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำดิบ โดยกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำ (Dissolved Air Flotation ; DAF)
2. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ DAF
3. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดร่วมของกระบวนการ โคแอกกูเลชัน และกระบวนการ DAF ในการกำจัดสาหร่าย
4. เพื่อศึกษาผลของความขุ่น , กรดฮิวมิก และ sodium lauryl sulfate ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 **ขอบเขตการวิจัย**

1. เป็นการศึกษาวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ
2. ตัวอย่างน้ำและสาหร่ายที่ใช้ในการทดลอง แบ่งเป็น
   2.1 ตัวอย่างน้ำซึ่งใช้สาหร่ายที่เลี้ยงในห้องปฏิบัติการเป็นสาหร่าย mono culture สายพันธุ์ Chlorella
   2.2 ตัวอย่างน้ำซึ่งมีสาหร่ายที่เกิดขึ้นเองในแหล่งน้ำ
3. การหาปริมาณของสาหร่าย ใช้วิธีการนับเซลล์ โดยใช้ counting chamber
4. ใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์ สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน
5. ชุดอุปกรณ์ DAF ที่ใช้เป็นระดับห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วย
   5.1 เครื่องอัดอากาศ (air compressor)
   5.2 ถังความดัน (pressure tank) ขนาด 3 ลิตร
   5.3 ถังทำให้ลอย (flotation vessel) ขนาด 5 ลิตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการทำให้ลอย (flotation process)

กระบวนการทำให้ลอยมีหลักการคือ แยกอนุภาคหรือสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียด้วยวิธีทำให้อนุภาคหรือสารแขวนลอยต่างๆ ในน้ำเสียลอยขึ้นสู่บริเวณชั้นบนของผิวน้ำ เพื่อทำการกวาดทิ้งออกไป วิธีนี้นิยมใช้กับสารแขวนลอยประเภทที่ยากแก่การตกตะกอน เช่น พวกไขมันสัตว์ ตะกอนเบาต่างๆ เป็นต้น ระบบนี้จะใช้พื้นที่น้อยกว่าวิธีตกตะกอน เพราะใช้เวลาน้อยกว่าในการแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำเสีย แต่ระบบนี้จะต้องใช้เครื่องมือจักรกลและพลังงานมากกว่าของวิธีตกตะกอน และอาจจำเป็นต้องเติมสารเคมีเข้าช่วยในการแยกตะกอนด้วย เช่น สารส้ม , เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) เป็นต้น

วิธีการทำให้ลอยมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธีดังนี้

1) การทำให้ลอยตัวด้วยอากาศ (air flotation)
2) การทำให้ลอยตัวด้วยสูญญากาศ (vacuum flotation)
3) การทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลาย (dissolved-air flotation)

2.1.1 การทำให้ลอยตัวด้วยอากาศ (air flotation)

หลักการของวิธีนี้คือ การเติมอากาศหรือเป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง ณ ความดันบรรยากาศ ในการเป่าอากาศจะทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศประมาณ 2-3 มม. ได้พาสารแขวนลอยต่างๆ ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จากนั้นสารแขวนลอยที่ลอยขึ้นมาจะถูกกวาดทิ้งออกไป วิธีลอยตัวด้วยอากาศนี้ ไม่เป็นที่นิยมใช้กันในการแยกตะกอนต่างๆ ออกจากน้ำเสีย เพราะ ประสิทธิภาพในการแยกสารแขวนลอยมีต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น วิธีนี้เหมาะสำหรับแยกสิ่งสกปรกที่เบามากและมีแนวโน้มที่จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอยู่แล้ว โดยที่ฟองอากาศจะช่วยทำให้ลอยได้เร็วขึ้น

2.1.2 การทำให้ลอยตัวด้วยสูญญากาศ (vacuum flotation)

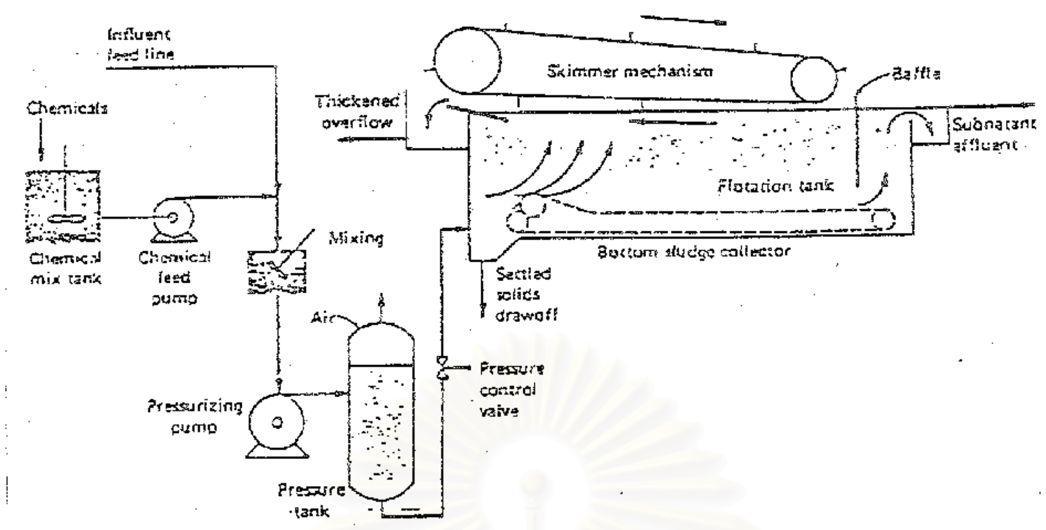
หลักการของวิธีนี้คือ เป่าอากาศลงในน้ำเสียจนถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งมีอยู่ 2 วิธีคือ เป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง หรืออีกวิธีคือ ปล่อยให้อากาศเข้าไปในเครื่องสูบน้ำเอง ระบบนี้จะใช้ถังปิด ซึ่งจะเก็บน้ำที่ถูกเป่าอากาศลงไปจนถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งขณะนี้ภายในถังจะมีสภาพเป็นสูญญากาศ เมื่อถังนี้ได้ถูกเปิดออกโดยใช้ตัวควบคุมวาล์ว อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำจะแยกออกมาจากน้ำในลักษณะของฟองอากาศเล็กๆ ซึ่งพวกอากาศเล็กๆ เหล่านี้จะพาตะกอนต่างๆ ในน้ำเสียลอยขึ้นมาบนผิวน้ำในลักษณะฝ้าไข (scum) ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการกวาดและหรือการสูบออก

2.1.3 การทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลาย (dissolved-air flotation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันแพร่หลายมากที่สุด หลักการของวิธีนี้คือ อัดอากาศเข้าไปในน้ำเสียภายใต้ความดันสูงกว่าบรรยากาศ เพื่อให้อากาศละลายในน้ำได้มากขึ้น จากนั้นจึงปล่อยความดันให้เข้าสู่สภาวะความดันบรรยากาศ ทำให้อากาศละลายน้ำได้น้อยลง เกิดเป็นฟองอากาศพาอนุภาคแขวนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ระบบนี้จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ ระบบไม่มีการหมุนเวียน และระบบมีการหมุนเวียน

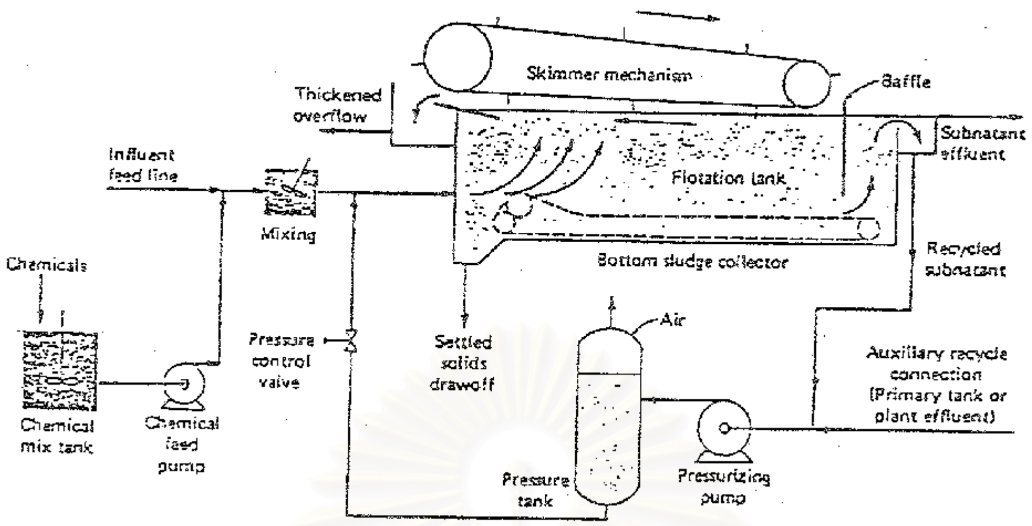
ระบบไม่มีการหมุนเวียน (รูปที่ 2.1) ความดันภายในถังความดันมีประมาณ 40 ถึง 50 ปอนด์ต่อตร.นิ้ว ซึ่งให้เวลาเก็บกักของน้ำในถังความดันประมาณ 2 ถึง 4 นาที เพื่อปล่อยให้อากาศละลายอยู่ในน้ำ จากนั้นปล่อยน้ำออกจากถังความดันไปยังถัง flotation โดยมี back pressure valve เพื่อควบคุมความดันน้ำที่ไหลเข้าสู่ถังลอยตัว (flotation) ซึ่งจะมีฟองอากาศจำนวนมากลอยอยู่ทั่วทั้งถัง ระบบนี้เป็นระบบที่ไม่มีการหมุนเวียน นิยมใช้กับน้ำที่มีตะกอนชนิดไม่แตกง่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ระบบ DAF ชนิดที่ไม่มีการหมุนเวียน

ระบบมีการหมุนเวียน (รูปที่ 2.2) สำหรับระบบมีการหมุนเวียนจะนิยมใช้กับน้ำที่มีตะกอนชนิดเปราะแตกง่าย ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะให้น้ำตะกอนไหลเข้าสู่ถังความดันโดยตรง เพราะตะกอนอาจแตกกระจายไป ลักษณะการทำงานของระบบนี้คือ จะนำน้ำจากถังลอยตัว ไปยังถังความดันแล้วจึงปล่อยออกไปรวมกับน้ำที่จะเข้าสู่ระบบ เพื่อนำไปเข้าสู่ถังลอยตัว



รูปที่ 2.2 ระบบ DAF ชนิดที่มีการหมุนเวียน

ประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้ลอยจะสูงยิ่งขึ้น เมื่อมีการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปเพื่อให้อนุภาคที่แขวนลอยอยู่มีการจับตัวกัน และเกาะกับฟองอากาศได้ดียิ่งขึ้น สารเคมีที่นิยมใช้สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้ลอย เช่น สารส้ม, $FeCl_3$, activated cilica, $Fe_2(SO_4)_3$ เป็นต้น

สำหรับกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำหรือ DAF นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานบำบัดน้ำเสียต่างๆ (Kalinske, 1957) เช่น

1. แยกน้ำมันจากน้ำเสียของโรงกลั่นน้ำมัน
2. แยกเศษเยื่อกระดาษหรือเส้นใยจากน้ำเสียของโรงงานผลิตกระดาษ
3. แยกสารเคมีหรือตัวทำละลายในน้ำเสียจากน้ำล้างสีเครื่องบิน และน้ำล้างทำความสะอาดเครื่องยนต์
4. แยกน้ำมันและไขมันจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร
5. แยกน้ำมันจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ
6. แยกตะกอนและสิ่งสกปรกในกระบวนการผลิตน้ำประปา

7. ใช้เพิ่มความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated Sludge

8. แยกตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะต่างๆ ในน้ำทิ้งของโรงงานบางชนิด

จากหลักการของระบบ DAF ที่ให้อากาศละลายในน้ำภายใต้ความดันแล้วจึงลดความดันของน้ำลงสู่ภาวะความดันบรรยากาศนั้น ซึ่งปริมาณของอากาศที่ละลายในน้ำจะแปรผันโดยตรงกับความดัน ตามกฎของเฮนรี่ โดยปริมาณอากาศที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความดันบรรยากาศ จะมีความสัมพันธ์ดังแสดงในตารางที่ 2.1

Air characteristics and solubilities

Temperature		Volume solubility		Weight solubility		Density	
°C	°F	ml/l	CF/thousand gal	mg/l	lb/thousand gal	g/l	lb/CF
0	32	28.8	3.86	37.2	0.311	1.293	0.0808
10	50	23.5	3.15	29.3	0.245	1.249	0.0779
20	68	20.1	2.70	24.3	0.203	1.206	0.0752
30	86	17.9	2.40	20.9	0.175	1.166	0.0727
40	104	16.4	2.20	18.5	0.155	1.130	0.0704
50	122	15.6	2.09	17.0	0.142	1.093	0.0682
60	140	15.0	2.01	15.9	0.133	1.061	0.0662
70	158	14.9	2.00	15.3	0.128	1.030	0.0643
80	176	15.0	2.01	15.0	0.125	1.000	0.0625
90	194	15.3	2.05	14.9	0.124	0.974	0.0607
100	212	15.9	2.13	15.0	0.125	0.949	0.0591

Values presented in absence of water vapor and at 14.7 lb/in^2 abs pressure (1 atm)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณอากาศที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความดันบรรยากาศ (1 atm) (Eckenfelder, 1989)

ในทางทฤษฎีเมื่อลดความดันของน้ำลงสู่ภาวะความดันบรรยากาศปริมาณอากาศที่ละลายในน้ำก็จะลดลงตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.1) (Eckenfelder, 1989)

$$s = s_a (P/P_a) - s_a \text{---------------------} (2.1)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย s = ปริมาตรอากาศที่ปล่อยออกมาจากการลดความดันมาที่ความดันบรรยากาศต่อปริมาตรของเหลว, มล./ล.

s_a = ปริมาณอากาศที่ละลายในของเหลวที่ความดันบรรยากาศ, มล./ล.

P_a= ความดันบรรยากาศ

P = ความดันสัมบูรณ์

ในทางปฏิบัติปริมาณอากาศละลายในน้ำที่ลดลงขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนจากการผสม ณ สภาวะที่ความดันลดลง และขึ้นอยู่กับความอิ่มตัวที่ได้จากระบบอัดอากาศ และเนื่องจากความสามารถในการละลายของอากาศในน้ำเสียอาจจะน้อยกว่าในน้ำสะอาด ดังนั้นจึงควรมีการปรับแก้ความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.1) เป็นสมการที่ (3.2) (Eckenfelder, 1989) ดังนี้

$$s = s_a (fP/P_a) - s_a \text{---------------------}(2.2)$$

หลักการที่สำคัญของระบบ DAF คือ อัตราส่วนของปริมาณอากาศที่ต้องการใช้ในระบบกับความเข้มข้นของของแข็งในน้ำเสีย (A/S ratio) กล่าวคือ ปริมาณอากาศหรือฟองอากาศที่พ่นลงในน้ำเสียจะต้องมีปริมาณที่เหมาะสมกับความเข้มข้นของของแข็งในน้ำเสีย ซึ่งอัตราส่วนนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของสลัดจ์ และหาได้โดยการทดลองในห้องปฏิบัติการซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแทนได้ด้วยสมการ 2.3 (Tchobanoglous, 1991)

$$A/S = 1.3s_a(fP-1) R / S_aQ \text{---------------------}(2.3)$$

โดย A/S = อัตราส่วนของปริมาณอากาศกับปริมาณของแข็ง, มก.ของอากาศ/มก. ของแข็ง

s_a = ปริมาณอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำ, มล./ลิตร

S_a = ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย, มก./ลิตร

f = การละลายน้ำของอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการอัด

อากาศ

โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.7 – 0.9

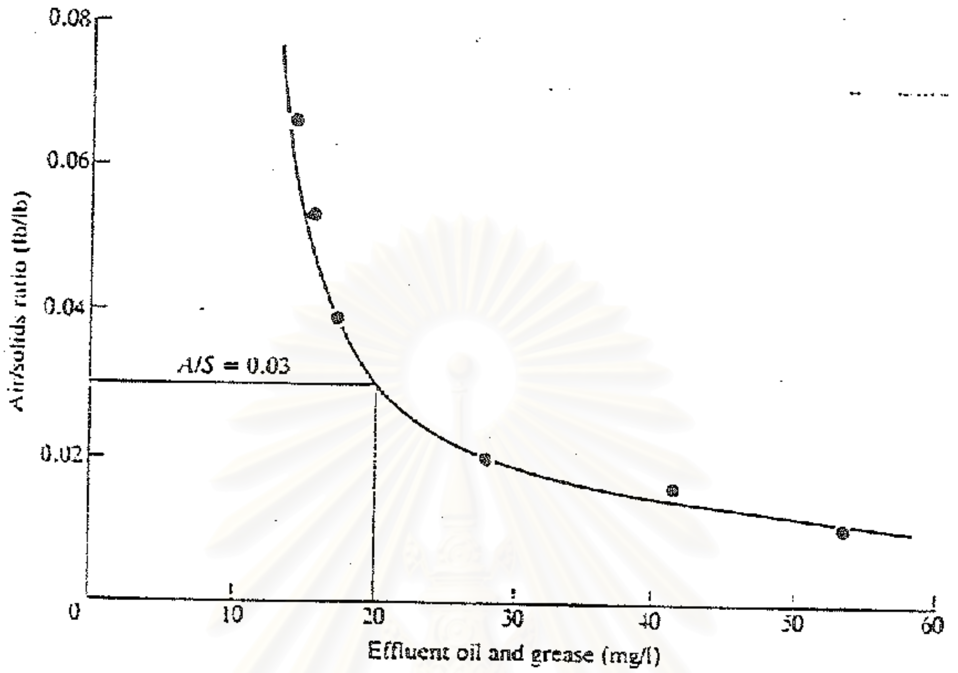
P = ความดัน, บาร์

R = อัตราไหลกลับสู่ระบบ, ลบ.ม./วัน หรือลบ.ม. กรณีถังปฏิกรณ์แบบแบตช์

Q = อัตราไหลเข้าของน้ำเสีย, ลบ.ม./วัน หรือลบ.ม. กรณีถังปฏิกรณ์แบบแบตช์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

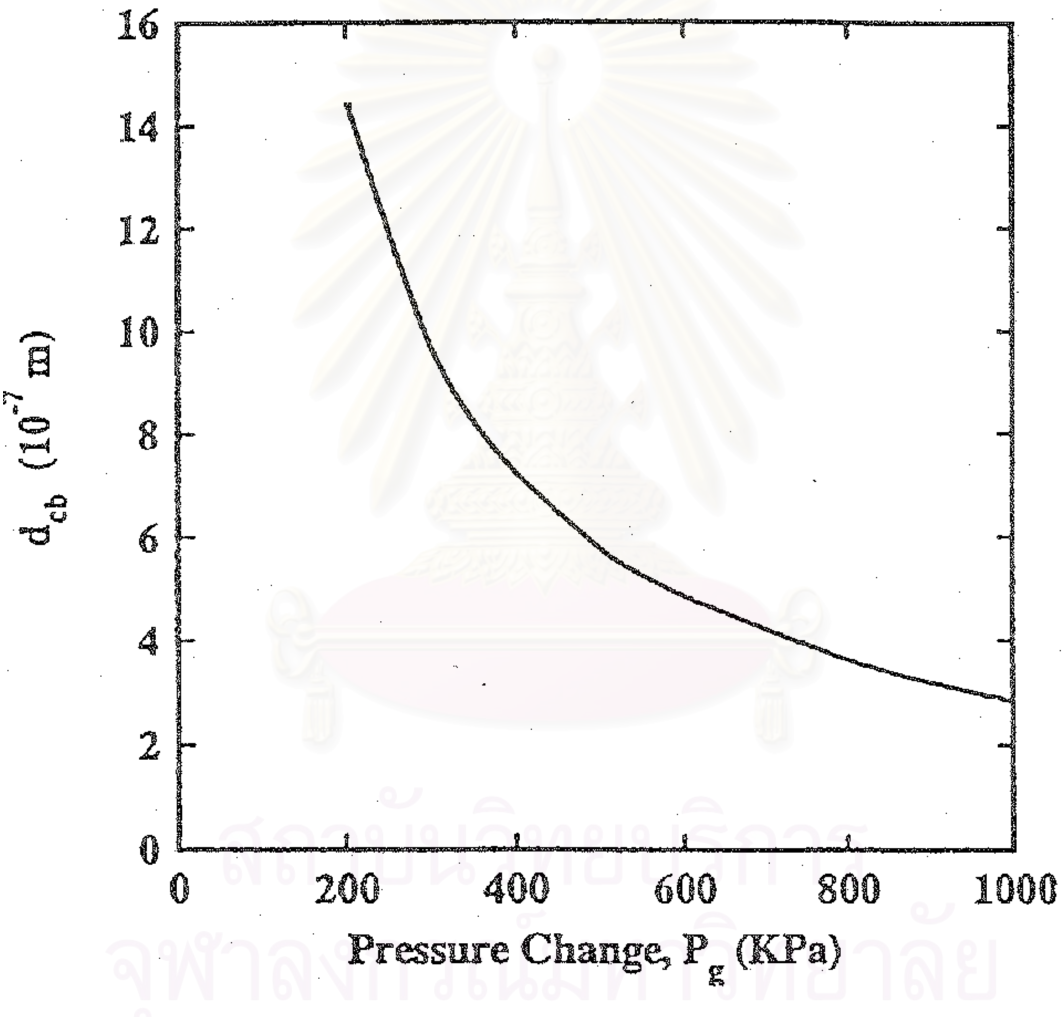
โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณอากาศกับปริมาณของแข็ง และคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผลของ A/S ต่อคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว (Eckenfelder, 1989)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเติมอากาศที่มากเกินพอและฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก จะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ DAF จากการศึกษาวัดขนาดฟองอากาศสำหรับกระบวนการ DAF พบว่าขนาดของฟองอากาศจะอยู่ในช่วง 10-100 μm. (Takahashi และคณะ, 1979 ; Zabel,1984; De Rijk และคณะ, 1994) และโดยเฉลี่ยแล้วจะมีขนาดประมาณ 30-40 μm. ขนาดของฟองอากาศนี้จะขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้และชนิดของ nozzle ความดันที่สูงขึ้นจะทำให้ขนาดของฟองอากาศเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แต่ Heinnanent และคณะ (1992), De Rijk และคณะ (1994) พบว่า ที่ความดันมากกว่า 500 kPa การเพิ่มความดันจะมีผลต่อขนาดของฟองอากาศน้อยมาก



รูปที่ 2.4 ผลของความดันที่มีต่อขนาดของฟองอากาศ (Edzwald , 1995)

สำหรับความดันและค่าอัตราการเวียนกลับที่ใช้ในกระบวนการ DAF ได้มีการวิจัยแนะนำค่าที่เหมาะสมสามารถใช้งานได้ดี เช่น Haarhoff และ Vuuren (1993,1994) แนะนำให้ใช้ความดัน 400-600 kPa อัตราการเวียนกลับ 6%-10% , Edzwald และคณะ (1994) แนะนำค่าความดันที่ใช้ 400-550 kPa อัตราการเวียนกลับ 5%-10% , Schers and Dijk (1992) แนะนำให้ใช้ความดันในช่วง 500-800 kPa อัตราการเวียนกลับ 5%-10% ซึ่งขนาดของฟองอากาศที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 30 - 80 ไมครอน ทั้งนี้ เวลาในการเก็บกักน้ำเสียของระบบ DAF ประมาณ 20-30 นาที

ระบบ DAF นิยมใช้เพื่อแยกอนุภาคของแข็งหรือของเหลวที่มีน้ำหนักเบา หรือที่มีแนวโน้มลอยขึ้นมา เช่น อนุภาคคอลลอยด์ น้ำมันและไขมันต่างๆ ซึ่งถ้าใช้วิธีการตกตะกอนจะไม่สามารถกระทำได้ดีเท่าที่ต้องการ นอกจากนี้ยังใช้กับการทำข้น (thickening) สลัดจ์ชีวภาพ และอาจใช้ในการกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำเสียได้อีกด้วย

ในยุคแรกที่มีการออกแบบและใช้กระบวนการ DAF นั้น การออกแบบหรือการใช้งานโดยมากแล้วจะมาจากการสังเกตุที่ได้จากโครงการนำร่อง (pilot plant) หรืออาศัยผลที่ได้จากการใช้งานจริง ซึ่งได้ผลดี มาใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบ โดยที่ยังไม่มีรูปแบบหรืองานวิจัยทางทฤษฎีมากนัก จนกระทั่งเมื่อไม่นานมานี้จึงได้มีงานศึกษาวิจัยทางทฤษฎีโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อธิบายการทำงานของกระบวนการ DAF จึงทำให้การออกแบบและใช้งาน DAF ได้รับการพัฒนาให้ได้ผลดียิ่งขึ้นในเวลาต่อมา

ในการอธิบายกลไกการทำงานของกระบวนการ DAF จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนซึ่งต่อเนื่องกัน คือ ในส่วนแรกเรียกว่า ส่วนสัมผัส หรือ ส่วนปฏิกิริยา (contact zone or reaction zone) หรืออาจเรียกว่า ส่วนการกรอง (filtration zone) และในส่วนที่ 2 เรียกว่า ส่วนแยก (separation zone)

ในส่วนแรกซึ่งเป็นส่วนสัมผัสหรือเกิดปฏิกิริยาจะเป็นการอธิบายถึงทฤษฎีของการเกิดการชนกันระหว่างฟองอากาศกับอนุภาค ขณะที่ในส่วนแยกจะอธิบายถึงการลอยตัวขึ้นไปด้วยกันของฟองอากาศและอนุภาค (bubble-particle agglomerates) ขึ้นสู่ผิวน้ำ

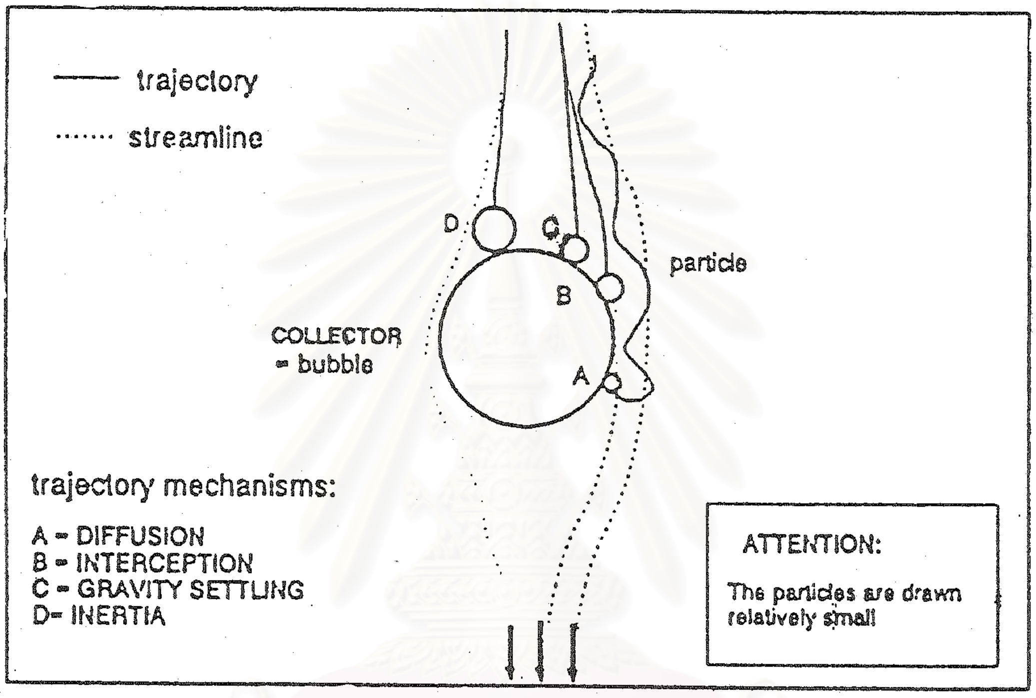
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนสัมผัสหรือส่วนปฏิกิริยา (contact zone or reaction zone)

ส่วนสัมผัสหรือส่วนปฏิกิริยาเป็นส่วนที่การชนกันและเกาะติดกันระหว่างฟองอากาศกับอนุภาค Edzwald และคณะ (1990) ได้อธิบายทฤษฎีการเกิดการชนกันของฟองอากาศและอนุภาคในส่วนของ reaction zone ไว้ดังนี้

1.1 Single – Collector Collision Efficiency (SCCE, η)

เป็นประสิทธิภาพของการเกิดการชนกันระหว่างฟองอากาศกับอนุภาค ซึ่งถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของอัตราการชนกันของฟองอากาศและอนุภาค กับอัตราการเข้าใกล้กันของฟองอากาศและอนุภาค โดยกระบวนการนี้มีกลไกที่เกี่ยวข้อง (ดังแสดงในรูปที่ 2.5) ได้แก่



รูปที่ 2.5 กลไกการเคลื่อนที่เข้าหากันระหว่างอนุภาคแขวนลอยและฟองอากาศ (Schers และ Dijk,1992)

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. การแพร่ (Diffusion , η_D)

เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยการแพร่แบบสุ่ม (Random Brownian) ของอนุภาคเข้าหาฟองอากาศ

2. การดัก (Interception , η_I)

จะเกิดการชนกันของอนุภาคและฟองอากาศ เมื่ออนุภาคซึ่งเคลื่อนที่มาตาม streamline และเคลื่อนเข้ามาใกล้พอ จนกระทั้งสามารถเกาะติดไปกับฟองอากาศได้

3. การตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วง (Gravity settling , η_S)

เกิดการตกของอนุภาคลงมาบนฟองอากาศ โดยกลไกของการตกตะกอน เนื่องจากแรงโน้มถ่วงและความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค ทำให้อนุภาคเคลื่อนผ่าน streamline และเข้าถึงฟองอากาศได้

4. ความเฉื่อย (Inertia , η_{TA})

เกิดการชนกันเนื่องมาจากแรงเฉื่อยของอนุภาคซึ่งไม่สามารถที่จะเคลื่อนไปตาม streamline ได้เนื่องจากน้ำหนักของอนุภาคเอง

SCCE จะขึ้นอยู่กับกลไกหลักทั้ง 4 แบบนี้ ซึ่งถูกกำหนดโดย

$$\eta_D = 6.18 \, (k_b T / g\rho_w)^{2/3} \, (1/d_p)^{2/3} \, (1/d_b)^2 \quad \ldots(2.4)$$

$$\eta_I = 3/2 \, (d_p/d_b)^2 \quad \ldots(2.5)$$

$$\eta_S = (\rho_p - \rho_w)/\rho_w \, (d_p/d_b)^2 \quad \ldots(2.6)$$

$$\eta_{TA} = \frac{g\rho_p d_b d_p^2}{324 \nu^2 \rho_w} \quad \ldots(2.7)$$

โดย

$$\eta_T = \eta_D + \eta_I + \eta_S + \eta_{TA} \quad \ldots(2.8)$$

η_T = Total SCCE

k_b = ค่าคงที่โบลทซ์มาน (Boltzman's constant = 1.38 x10 $^{-23}$ จูล/องศาเคลวิน

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของน้ำ (องศาเคลวิน)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.81 ม/วินาที^{2})

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ (ก/ม^3)

d_p = ขนาดของอนุภาค (ม.)

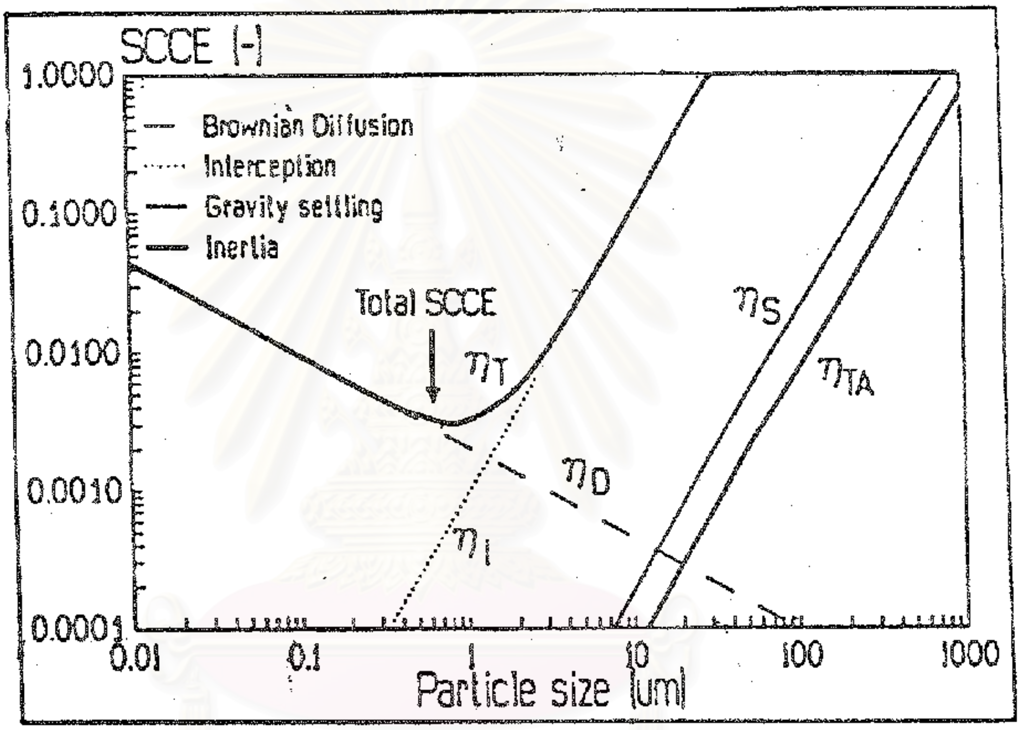
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

d_b = ขนาดของฟองอากาศ (ม.)

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาค (ก/ม^3)

ν = ความหนืดของน้ำ (ม^2/วินาที)

จากกลไกดังกล่าวจะเห็นได้ว่าขนาดของอนุภาคก็มีส่วนสำคัญต่อ SCCE ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.6



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

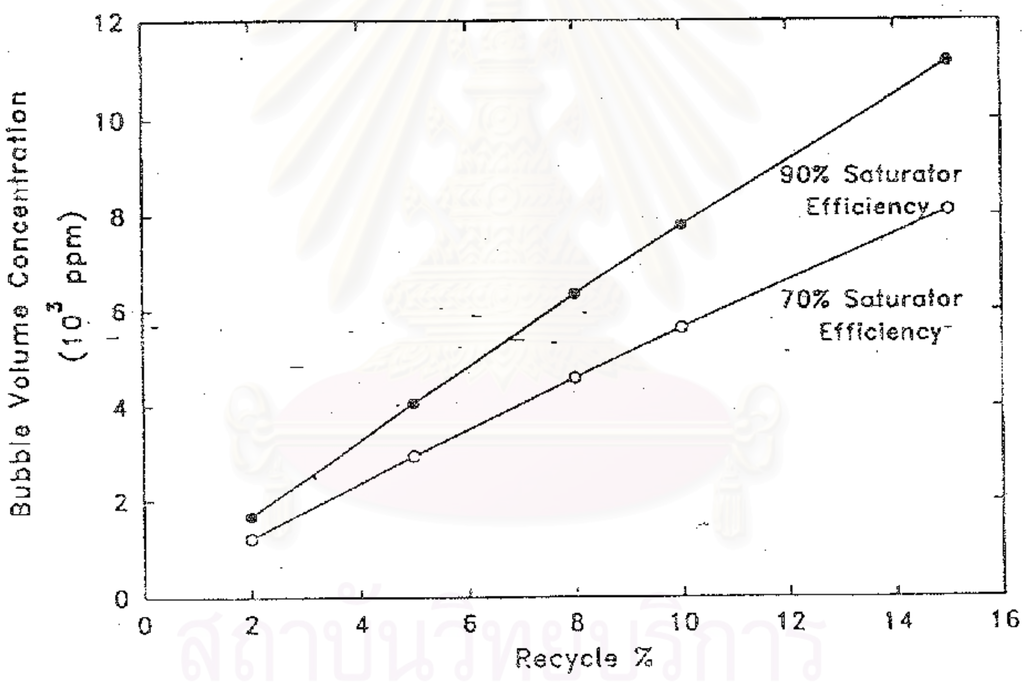
รูปที่ 2.6 ผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อ SCCE (Schers และ Dijk, 1992)

1.2 Bubble – Particlc Attachment Efficiency (α_{pb})

เป็นการเกิดการชนกันที่เกิดผลสำเร็จระหว่างฟองอากาศกับอนุภาค เป็นผลทำให้เกิดการเกาะติดกันอย่างถาวร ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาต่อกันระหว่างอนุภาคและฟองอากาศ โดยที่การชนกันที่มีประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าระหว่างฟองอากาศกับอนุภาค และชั้นของน้ำ (water bound layer) ที่ล้อมรอบอนุภาคอยู่

1.3 Bubble Volume Concentration (ϕ_b)

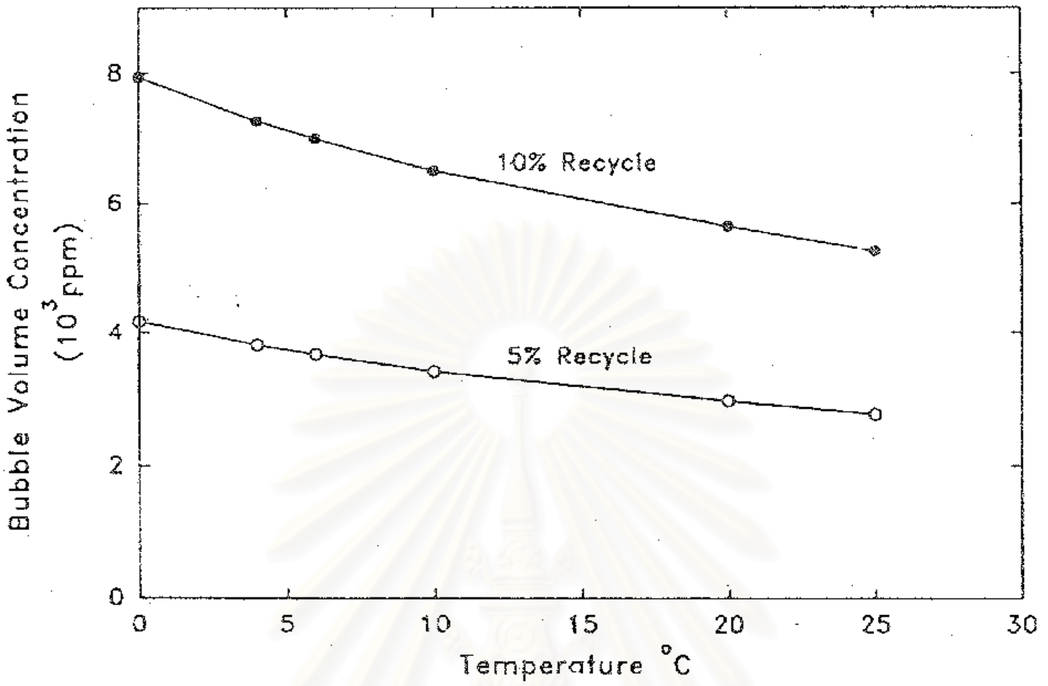
เป็นค่าซึ่งแสดงถึงปริมาณของฟองอากาศ ที่เกิดขึ้นในถังทำให้ลอย (flotation tank)ϕ_b สามารถปรับหรือควบคุมได้ โดยความดันที่ใช้ในการอัดอากาศ (saturature pressure) หรืออัตราส่วนการเวียนน้ำกลับมาอัดอากาศ (recycle ratio) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ_b กับอัตราการเวียนกลับ ที่ประสิทธิภาพของถังความดัน 70% และ 90% (Edzwald, 1993)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่า ϕ_b ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ ϕ_b ที่อัตราการเวียนกลับ 5% และ 10% (Edzwald, 1993)

ค่า ϕ_b สามารถคำนวณได้จาก

$$\phi_b = C_r/\rho sat. \quad \text{..............................(2.9)}$$

โดย C_r = ปริมาณความเข้มข้นของอากาศซึ่งเกิดขึ้นในถังทำให้ลอย (flotation tank)

ρsat = ความหนาแน่นของอากาศอิ่มตัวมีค่าประมาณ 1.17 มก/ซม.^{3} ที่อุณหภูมิ 20^{0}C

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 Bubble-Filter Efficiency (BFE)

BFE เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกค่าหนึ่ง โดยแสดงถึงส่วนของอนุภาคที่จะถูกกำจัดออกโดยฟองอากาศซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$BFE = 1-\exp\left(-\frac{\alpha_{pb}\eta_T d_b \phi_b g T}{12\nu}\right) \qquad (2.10)$$

โดย αpb = bubble-particle attachment efficiency

η_T = total SCCE

d_b = ขนาดของฟองอากาศ

ϕ_b = bubble volume concentration

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

T = เวลาสัมผัสทั้งหมด (contact time)

ν = ความหนืดของน้ำ

ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำหรือ DAF ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หรือกลไกต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถจะกล่าวได้ว่า การกำจัดอนุภาคโดยกระบวนการ DAF จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ เกิดการชนกันระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งโอกาสของการชนกันดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ดีก็ต่อเมื่อ

- จำนวนฟองอากาศ (bubble number concentration, N_b) มีมากกว่าจำนวนของอนุภาค (particle number concentration, N_p)
- ระยะห่างระหว่างฟองอากาศมีระยะน้อยกว่าขนาดของอนุภาค (d_p)

ดังนั้นเมื่อเป็นเช่นนี้แล้ว การเกิดการชนกันระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคจึงเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

2. ส่วนแยก (separation zone)

อนุภาคจะถูกกำจัดออกจากน้ำในส่วนแยกนี้ สภาวะซึ่งจะเกิดการกำจัดอนุภาคออกไปได้ก็ต่อเมื่อ

$$\frac{t_b}{t_{st}} > 1$$

เมื่อ t_b คือ เวลาที่อนุภาคอยู่ในส่วนแยก

t_{st} คือ เวลาที่เกิดการลอยของอนุภาคขึ้นมาถึงผิวน้ำ

ประสิทธิภาพของการแยก (y) ขึ้นอยู่กับความเร็วในการลอยขึ้นของฟองอากาศกับอนุภาค (bubble-particle rise velocity , V_{st}) และอัตราภาระน้ำล้น

ความเร็วในการลอยขึ้นนั้นจะถูกกำหนดโดยสมการของ Stokes ดังนี้

- สำหรับการไหลแบบ laminar (Re < 1)

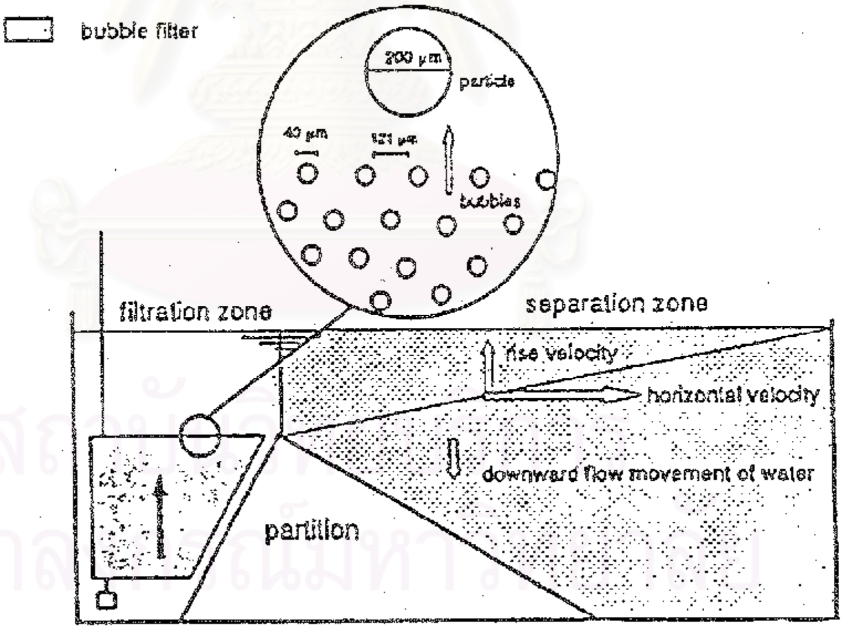
$$V_{st} = \frac{1}{18}\frac{g}{\nu} \left((\rho_w - \rho_a)/\rho_w \right) d_a^2 \quad \text{......................(2.11)}$$

- สำหรับการไหลแบบ laminar – turbulent (1< Re < 50)

$$V_{st} = \frac{1}{10} \frac{g^{0.8}}{\nu^{0.6}} \left(((\rho_w - \rho_a)/\rho_w)^{0.8} \right) d_a^{1.4} \quad \text{........(2.12)}$$

เมื่อ ρa คือ ความหนาแน่นของฟองอากาศและอนุภาค (ก./ม.^{3})

d_a คือ ขนาดของฟองอากาศและอนุภาค (ม.)

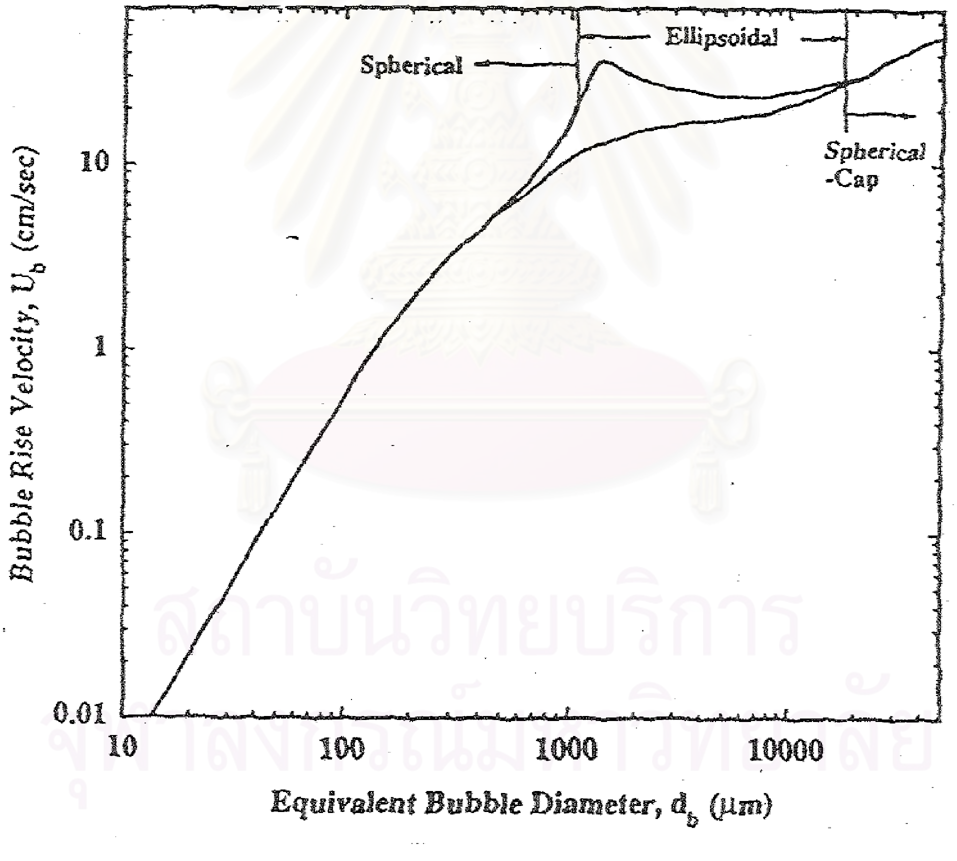


รูปที่ 2.9 แสดงความแตกต่างของขนาดและระยะห่างระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคซึ่งทำให้เกิดการชนกัน (Schers and Dijk , 1992)

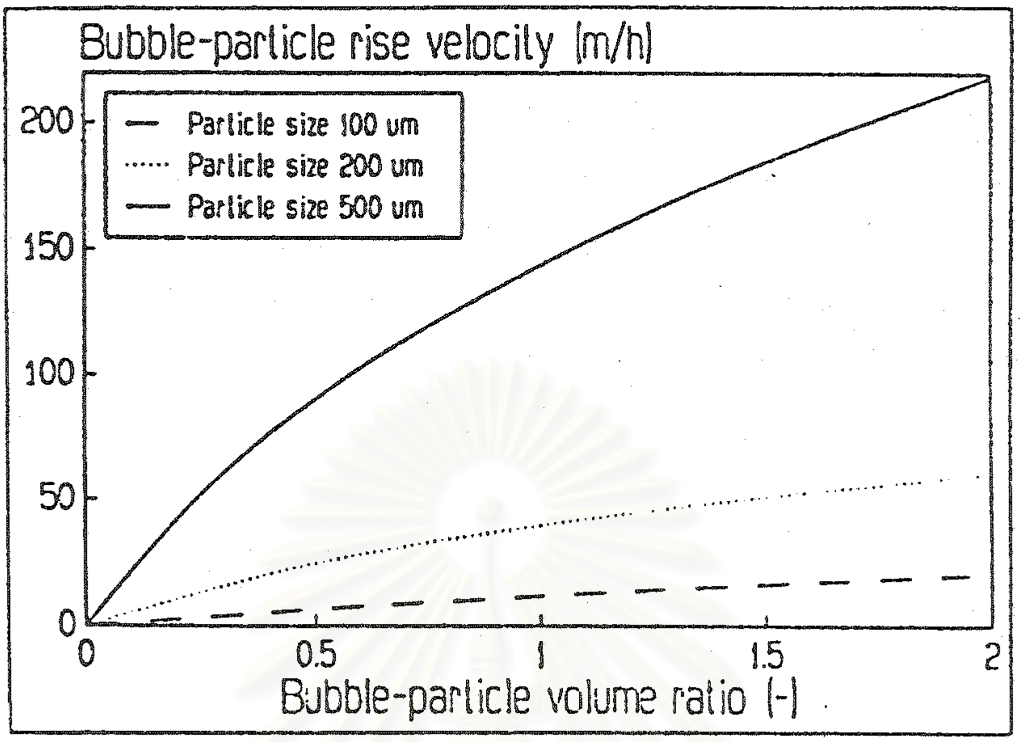
นอกจากนี้ ขนาดฟองอากาศและขนาดของอนุภาคก็มีผลต่อความเร็วในการลอยขึ้น (V_{st}) ด้วย โดยที่เมื่อฟองอากาศเล็กลงจะทำให้ความเร็วในการลอยขึ้นต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะทำให้มีความเร็วในการลอยขึ้นสูงกว่าอนุภาคขนาดเล็ก (Schers and Dijk, 1992)

ตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.11 แสดงผลของขนาดอนุภาคต่อความเร็วในการลอยขึ้น (V_{st})

อย่างไรก็ตามอนุภาคหรือฟล้อคที่มีขนาดใหญ่เกินไปก็ไม่เป็นผลดี แม้ว่าขนาดที่ใหญ่จะทำให้มีโอกาสที่มีฟองอากาศจำนวนมากมาชนหรือเกาะติด ซึ่งจะทำให้เกิดความเร็วในการลอยขึ้นสูง แต่ถ้าหากไม่เกิดการชนโดยฟองอากาศ, ฟองอากาศมาเกาะน้อยหรือการชนไม่มีประสิทธิภาพ อนุภาคหรือฟล้อคขนาดใหญ่ ซึ่งมีความหนาแน่นสูงเหล่านั้นก็จะเกิดการตกตะกอน ส่วนฟองอากาศซึ่งมีขนาดใหญ่ แม้จะมีความเร็วในการลอยขึ้นสูง (รูปที่ 2.10) แต่จะทำให้ประสิทธิภาพในส่วนสัมผัสหรือส่วนปฏิกิริยาต่ำลง เนื่องจากทำให้ค่า BFE ต่ำลง



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของฟองอากาศกับความเร็วของการลอยขึ้น (Clift และคณะ , 1978)



รูปที่ 2.11 ผลของขนาดของอนุภาคที่มีต่อความเร็วลอยขึ้น (Schers และ Dijk , 1992)

ตารางที่ 2.2 แสดงผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อความเร็วลอยขึ้น (Schers และ Dijk , 1992)

จำนวนฟองอากาศที่เข้าสัมผัสหรือชน	ความหนาแน่นของฟองอากาศ-อนุภาค ρ_a (kg/m^3)	ความเร็วลอยขึ้นของฟองอากาศและอนุภาค V_{st} (m/h.)
(d_d = 100 μm) 1	942	0.9
5	760	4.3
10	612	8.1
50	239	29.9
(d_d = 200 μm) 1	995	0.3
5	964	2.2
10	864	9.0
50	716	21.4
100	557	34.4
(d_d = 500 μm) 5	1000	0.0
10	998	0.8
50	976	8.5
100	953	15.9
200	909	28.0
400	850	47.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทฤษฎีดังกล่าวของกระบวนการ DAF ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปตลอดจนได้มีการทำวิจัยกันอย่างกว้างขวางโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและระดับโรงงานนำร่อง ตลอดจนทดสอบกับการใช้งานจริงในหลายๆ ประเทศ เช่น เนเธอร์แลนด์ อังกฤษ เบลเยี่ยม สหรัฐอเมริกา แอฟริกาใต้ เป็นต้น ทั้งในด้านของการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบสำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปา หรือในกระบวนการทำให้สลัดจ์เข้มข้น (sludge thickening) ซึ่งการใช้งาน DAF ในวัตถุประสงค์ต่างๆ จะใช้ข้อกำหนดที่แตกต่างกันไปบ้างในการออกแบบและควบคุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation process)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน หมายถึง กระบวนการทั้งหมดในการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ (ขนาดโดยประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-3}มม.) มารวมกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล้อค (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538) การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ มารวมตัวและจับกันเป็นฟล้อค (floc)ประกอบด้วยกระบวนการ 2 ขั้นตอนคือ

1. ทำลายเสถียรภาพ (destabilization) ของคอลลอยด์ เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่ง เป็นต้น

2. ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสให้มากที่สุด (transport of colloidal particles) เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว การสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาค ย่อมเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเดิม สิ่งที่เป็นความต้องการอีกอย่างหนึ่งคือ เมื่ออนุภาคต่างๆ สัมผัสกันแล้ว ควรเกาะติดกันแน่นและหลุดจากกันได้น้อยที่สุด

ความสำคัญของขั้นตอนทั้งสองมีเท่าเทียมกัน และต้องมีทั้งสองขั้น จึงจะเกิดโคแอกกูเลชันที่สมบูรณ์

2.2.1 พฤติกรรมของคอลลอยด์

การที่คอลลอยด์สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานานๆ โดยไม่ตกตะกอน เรียกได้ว่า เป็นระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพ ในทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไม่ต้องการให้ระบบคอลลอยด์มีเสถียรภาพเพราะอนุภาคคอลลอยด์ทำให้น้ำขุ่น และสกปรก ดังนั้นจึงต้องทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์เพื่อทำให้อนุภาคสามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดและน้ำหนักมากขึ้น จนสามารถตกตะกอนได้

ระบบคอลลอยด์ หมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไปในสารตัวกลาง ซึ่งมีสถานะเป็นเนื้อเดียว (continuous medium) อนุภาคต่างๆ นั้นเรียกว่า dispersed phase ส่วนสารตัวกลางเรียกว่า dispersing phase หรือ dispersed medium

ลักษณะที่สำคัญที่สุดของระบบคอลลอยด์ คือ บทบาทของผิวสัมผัสระหว่าง dispersed phase และ dispersing phase ขนาดที่เล็กมากของ dispersed phase ทำให้น้ำหนักไม่มีความสำคัญเทียบเท่ากับพื้นที่ผิวของสาร (ด้วยเหตุนี้ เคมีที่เกี่ยวข้องกับระบบคอลลอยด์ จึงเรียกว่า surface chemistry ซึ่งใช้ในการอธิบายพฤติกรรมต่างๆ ของสารต่างๆ ของระบบคอลลอยด์) การแพร่กระจายของหยดน้ำมันในน้ำหรือการระเหยเป็นไอของผิวน้ำ ถือเป็นตัวอย่างของระบบคอลลอยด์ที่ประกอบด้วย ของเหลว-ของเหลว และของเหลว-ก๊าซ ระบบคอลลอยด์ที่อยู่ในความสนใจของ

วิศวกรสิ่งแวดล้อม ได้แก่ระบบที่ประกอบด้วย ของแข็งและของเหลวตัวอย่างคือสารแขวนลอยในน้ำซึ่งถือเป็นปัญหาทั้งในทางวิศวกรรมประปาและวิศวกรรมน้ำเสีย

ระบบคอลลอยด์ อาจจำแนกตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง dispersed phase และ dispersing phase ถ้าแรงยึดเหนี่ยวมีกำลังอ่อน ระบบเรียกว่า hyophobic แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวมีกำลังแรง ระบบเรียกว่า hyophilic ในกรณีที่ dispersing phase เป็นน้ำ ศัพท์ที่ใช้จะเป็น hydrophobic และ hydrophilic แทนตัวอย่างของอนุภาคแบบไฮโดรโฟบิค ได้แก่ ดินเหนียว, ทอง, และโลหะอื่นๆ ส่วนตัวอย่างของอนุภาคแบบไฮโดรฟิลิค ได้แก่ โปรตีน, สบู่ และผงซักฟอง คอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิคสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่าคอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิค เหตุผลอย่างง่ายๆ คือ คอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิค (ชอบน้ำ) มีโมเลกุลของน้ำหุ้มอยู่ จึงต้องใช้แรงมากในการบังคับให้อนุภาคต่างๆ เกาะจับกันเป็นกลุ่มก้อนเพราะโมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนสิ่งกีดขวางที่ป้องกันมิให้อนุภาคต่างๆ เข้าใกล้และจับตัวกัน

2.2.2 เสถียรภาพของคอลลอยด์

ระบบคอลลอยด์อาจมีเสถียรภาพหรือไม่มีก็ได้ คอลลอยด์นั้นถือว่ามีเสถียรภาพเมื่อสามารถดำรงสถานะแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนภายในเวลาสั้น เมื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์ตกตะกอนและแยกตัวจากน้ำก็ถือว่า เสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกทำลายและไม่มีเสถียรภาพอีกต่อไป ด้วยเหตุนี้เสถียรภาพ ของคอลลอยด์จึงขึ้นอยู่กับแรงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงผลักจะต้องสูงกว่าแรงดูดจึงจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดูดมากกว่าแรงผลัก อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ สามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อคได้ทำให้คอลลอยด์ไม่มีเสถียรภาพ แรงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า Van Der Waals force เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิด ขึ้นอยู่กับระยะระหว่างอนุภาค

2.2.3 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

เสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงผลักและแรงดูดระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ แรงผลักเกิดขึ้นจากศักย์ไฟฟ้าซึ่งชักนำโดยประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ ส่วนแรงดูดเป็น Van Der Waals force ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของอนุภาคขนาดเล็กและของโมเลกุล แรงผลักซึ่งมากกว่าแรงดูดทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพ และแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ถ้าแรงดูดสูงกว่าแรงผลักอนุภาคคอลลอยด์จะไม่มีเสถียรภาพ และไม่สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถกระทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบคือ

(1) โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย (diffuse layer)

(2) โดยการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอดยด์ (adsorption and charge neutralization)

(3) โดยใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (ห่อหุ้มอนุภาค)

(4) โดยใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (polymer bridging)

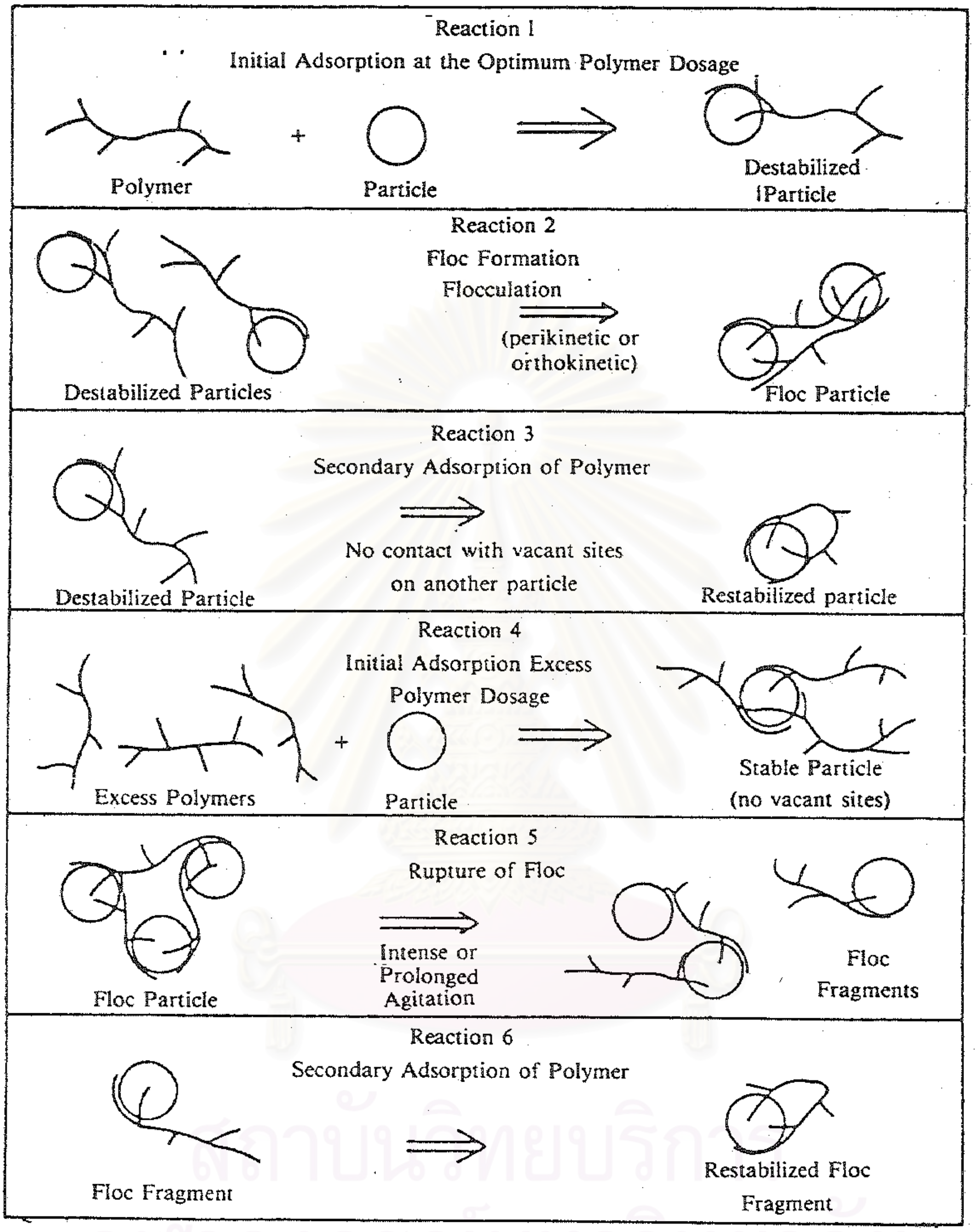
การลดความหนาของชั้นกระจาย (diffuse layer) เป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยการลดค่าซีตาโพเทนเชียน (zetapotential) ทำโดยการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค ผลที่ได้คือชั้นกระจายที่มีความหนาลดลงและทำให้ค่าซีตาโพเทนเชียนลดลงด้วย โดยไม่มีการเปลี่ยนประจุของอนุภาคเป็นตรงกันข้าม

การดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (adsorption and charge neutralization) เป็นการทำลายเสถียรภาพของอนภาพคอลลอยด์ โดยการเติมสารเคมีที่มีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับประจุอนุภาคคอลลอยด์และสามารถดูดติดผิวบนอนุภาคคอลลอยด์ได้ สารเคมีดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับประจุอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้ประจุอนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนเป็นประจุตรงกันข้ามได้

การใช้กลไกการกวาด (sweep coagulation) เป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยการเติมสารเคมีบางชนิดลงไป ทำให้เกิดผลึกของสารประกอบซึ่งมีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้ได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้นทำให้ตกตะกอนได้ง่ายขึ้น

การใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (polymer bridging) อธิบายโดยแบบจำลองที่เรียกว่า polymer bridging model ในขั้นแรกอนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่ โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว ขั้นตอนต่อมาคืออนุภาคดังกล่าวจะไปจับตัวกับอนุภาคอื่นๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมซึ่งทำให้เกิดฟล็อกที่มีขนาดใหญ่และสามารถแยกตัวจากน้ำได้ง่าย ถ้าใช้โพลีเมอร์มากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสีย เนื่องจากโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะบนอนุภาคคอลลอยด์จนไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่นๆ ซึ่งเรียกว่าอนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (restabilized paticles) การกวนน้ำแรงเกินไปก็จะทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์กลับคืนมาเช่นกัน เนื่องจากฟล็อกที่เกิดแตกเป็นส่วนๆ และทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับอนุภาคอันเดิม

กลไกการใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กลไกการใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Weber, 1972)

2.2.4 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

สารเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน เรียกว่า โคแอกกูแลนท์ (coagulant) หรืออาจเรียกว่า ฟล้อคคูแลนท์ (flocculant) สารเคมีซึ่งช่วยทำให้โคแอกกูแลนท์มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นเรียกว่า โคแอกกูแลนท์เอด (coagulant aid) หรือฟล้อคคูแลนท์เอด (flocculant aid) สารเคมีประเภทนี้ใช้เพียงลำพังไม่ได้

โคแอกกูแลนท์ที่นิยมกันมากที่สุด ได้แก่ สารส้ม ซึ่งเป็นสารประกอบของอะลูมิเนียม ที่มีสูตรเคมี คือ $Al_2(SO_4)_3 18H_2O$ (Aluminium Sulfate) สารเคมีที่ได้รับความนิยมรองลงมาได้แก่ สารประกอบของเหล็ก เช่น $FeCl_3$ เป็นต้น โคแอกกูแลนท์เอดที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันได้แก่ สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ ซึ่งเรียกว่า โพลีอีเล็กโตรไลต์ (polyelectrolyte) หรือบางครั้งเรียกสั้นๆ ว่า โพลีเมอร์ (Polymer) สารชนิดนี้มีราคาต่อหน่วยน้ำหนักแพงกว่าสารส้มหรือโคแอกกูแลนท์อื่นเป็นอันมาก

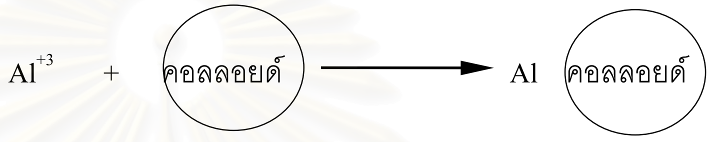
เมื่อเติมสารโคแอกกูแลนท์ลงไปในน้ำจะแตกตัวกลายเป็นอิออนบวกและลบ ที่มีวาเลนซ์สูง อิออนบวกสามารถทำปฏิกิริยากับ OH^- ทำให้เกิดคอลลอยด์ของสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งมีประจุบวก สารไฮดรอกไซด์นี้สามารถจับตัวกับอนุภาคความขุ่นซึ่งมีประจุลบ ทำให้ความขุ่นกลายเป็นกลางซึ่งเท่ากับเป็นการทำลายเสถียรภาพให้กับความขุ่นนั่นเอง

2.2.5 กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและสารประกอบเหล็ก

สารส้มใช้มากในการบำบัดน้ำเสียโดยการกำจัดสารแขวนลอยออกจากน้ำ สารส้มมีสูตรทางเคมีว่า $Al_2(SO_4)_3$ 18 H_2O มีขายทั้งในรูปของสารละลายและของแข็ง เมื่อเติมสารส้มลงไปในน้ำ สารส้มจะสลายตัวให้ Al^{+3} ดังสมการ

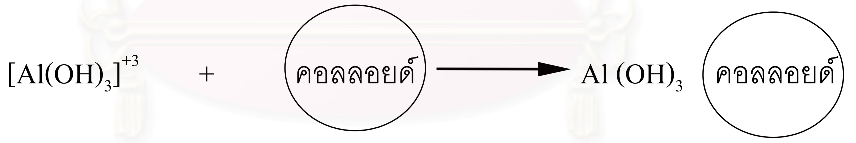
$$Al_2(SO_4)_3\ 18\ H_2O \longrightarrow 2\ Al^{+3} + 3SO_4^{-2} + 18\ H_2O$$

Al^{+3} จะรวมกับอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์จนอนุภาคคอลลอยด์สามารถจับกันเป็นอนุภาคใหญ่ได้



นอกจากนี้ Al^{+3} ยังทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็น $Al(OH)_3$ ซึ่งเป็นตะกอนเล็กๆ สามารถรวมกับอนุภาคอื่นๆ ที่มีประจุบวกเกิดเป็นตะกอนที่มีประจุบวกไปจับกับอนุภาคคอลลอยด์กลายเป็นตะกอนใหญ่ได้เช่นกัน

$$Al(OH)_3 + \text{positive ions} \longrightarrow [Al(OH)_3]^{+}$$



$[Al(OH)_3]^{+}$ ที่เหลืออยู่ก็จะทำปฏิกิริยากับอนุภาคลบอื่น เช่น SO_4^{-2}

$$[Al(OH)_3]^{+} + SO_4^{-2} \longrightarrow Al(OH)_3 + \text{absorbed sulphate}$$

เนื่องจาก Al^{+3} ประสิทธิภาพสูงกว่า $[Al(OH)_3]^{+}$ ในการทำลายประจุไฟฟ้าลบของคอลลอยด์ ดังนั้นเมื่อเติมสารส้มลงไปจะต้องผสมอย่างรวดเร็วโดยทันที เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดี เมื่ออนุภาคคอลลอยด์เริ่มจับตัวกันเป็นตะกอนเล็กๆ (flocs) ที่มองเห็นได้ชัด จะต้องเปลี่ยนจากการผสมอย่างรวดเร็วมาเป็นการกวนอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้ตะกอนเล็กๆ ที่เกิดขึ้นแตกตัว และเพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสจับกันเป็นตะกอนใหญ่ โดยทั่วไปเวลาที่ใช้ในการกวนเร็ว (flash or rapid

mix) ประมาณ 1-3 นาที และเวลาในการกวนช้า (slow mix or flocculation) ประมาณ 10-30 นาที ตะกอนที่เกิดขึ้นแยกออกได้โดยการตกตะกอนหรือโดยการทำให้ลอย

สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นเป็นดังนี้

$$Al_2(SO_4)_3 + 6H_2O \rightarrow 2Al(HO)_3 + 6H^+ + 3SO_4^{-2}$$

$$HCO^-_3 + H^+ \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow CO_2 + H_2O$$

เมื่อสารส้มละลายน้ำจะเกิด H^+ ขึ้น ซึ่งทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดคือมีค่า pH ลดลง สารประกอบไบคาร์บอเนต (HCO^-_3) ที่มีอยู่ในน้ำจะช่วยไม่ให้ pH ลดลง โดยทำปฏิกิริยากับ H^+

coagulation จะได้ผลดีที่สุด ที่ค่า pH พิสัยหนึ่งขึ้นกับ coagulant ที่ใช้ สำหรับสารส้ม ค่า pH ที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 5-6.5

สำหรับเฟอร์ริคคลอไรด์ ($FeCl_3$) มีขายอยู่ในท้องตลาด 3 รูปคือ เป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ (anhydrous) เป็นของเหลว และเป็นผลึก การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการรวมตะกอนคล้ายกับสารส้ม โดยจะทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างในน้ำเสียเกิดเป็นตะกอนของ hydroxide ตามสมการ

$$2FeCl_3 + 3Ca(HO_3)_2 \rightarrow 2FeCl_3 \downarrow + 3CaCl_2 + 6CO_2$$

$$2FeCl_3 + 3NaOH \rightarrow 2Fe(OH)_3 \downarrow + 3NaCl$$

หากความเป็นด่างในน้ำเสียมีไม่เพียงพอก็จะต้องเติมปูนขาวหรือ soda ash ค่า pH ที่สามารถทำงานได้ดีสำหรับ $FeCl_3$ อยู่ในช่วง 5.0-8.5

สารส้มหรือสารประกอบเหล็ก สามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จนเกิดโคแอกกูเลชันได้ด้วยกลไกหลัก 2 ประการ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของโคแอกกูแลนท์และพีเอชของน้ำ กลไกดังกล่าวคือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ และกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึกหรือ sweep coagulation ในการทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มหรือเหล็กของน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่มักมีกลไกแบบ sweep coagulation เป็นกลไกหลัก โดยอาจมีกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุเป็นกลไกร่วมซึ่งมีบทบาทด้อยกว่า

2.2.5.1 กลไกโคแอกกูเลชันแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ

สารส้มสร้างกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุโดยการแตกตัวเป็นอิออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่างๆ เช่น $Al(OH)^{+2}$, $Al_8(OH)_{20}^{+4}$ ซึ่งสามารถดูดติดบนผิว ของอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุของคอลลอยด์ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและพร้อมที่จะรวมตัวกันหลายๆ อนุภาคจนกลายเป็นฟล้อค กลไกนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อปริมาณของสารส้มมีน้อยจนกระทั่งผลคูณของ (Al^{+3}) และ $(OH^{-})^3$ ต่ำกว่า K_{sp} และพีเอชต้องไม่สูงหรือต่ำเกินไป กลไกแบบนี้มีข้อดีคือเปลืองสารส้มน้อยและให้สลัดจ์ที่มีคุณสมบัติดีคืออัดตัวได้แน่นและทำให้แห้งหรือดึงเอาน้ำออกจากสลัดจ์ได้ง่าย ถึงแม้ว่ากลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุจะมีข้อดีดังกล่าว แต่ในทางปฏิบัติการออกแบบและควบคุมให้โคแอกกูเลชันมีกลไกแบบนี้มักไม่สามารถทำได้ ดังนั้น จึงปรากฏว่าโคแอกกูเลชันส่วนใหญ่มีกลไกเป็นแบบ sweep coagulation ซึ่งเกิดได้ง่ายกว่ามาก เหตุผลที่เป็นดังกล่าวอาจเนื่องมาจากว่ากลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุต้องเกิดขึ้นและเสร็จสิ้นภายในเวลา 10^{-4}-1 วินาที อิออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวกต่างๆ ต้องดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์ภายในเวลาดังกล่าว มิฉะนั้นแล้ว อิออนคอมเพล็กซ์จะไฮโดรไลซ์ต่อไปจนเกิดผลึก $Al\ (OH)_3$ ทำให้เกิด sweep coagulation ปัจจัยที่ขัดขวางกลไกแบบแรกและสนับสนุนกลไกแบบที่สอง คือการสัมผัสระหว่างอิออนคอมเพล็กซ์และอนุภาคคอลลอยด์ ยากที่จะทำให้เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 10^{-4}-1 วินาที และความสามารถในการละลายของ $Al\ (OH)_3$ อยู่ในระดับต่ำ (เช่น $Al\ (OH)_3$ จะตกผลึกเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า $7.8 \times 10^{-5.6}$ มก./ล. ที่พีเอช 7)

2.2.5.2 กลไกแบบโคแอกกูเลชันแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก

สารส้มสร้างกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึกหรือ sweep coagulation โดยการสร้างผลึก $Al\ (OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นปุย เมื่ออนุภาคคอลลอยด์สัมผัสกับผลึก $Al\ (OH)_3$ ก็จะเกาะตัวจับอยู่บนผลึกนั้น เมื่อเกิดขึ้นมากๆ จะได้ฟล้อคขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย สารส้มที่ใช้ต้องมีปริมาณสูงพอจนทำให้ผลคูณของ Al^{+3} และ $(OH^{-})^3$ มีค่าเกินกว่า K_{sp} นอกจากนี้พีเอชของน้ำควรอยู่ในช่วง 6-7.5 จึงจะได้ผลดีที่สุด กลไกแบบนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าแบบแรกมากแต่มีข้อเสียคือ เปลืองสารส้มและให้สลัดจ์จำนวนมากที่มีคุณภาพต่ำ คืออัดตัวไม่แน่นและดึงน้ำออกยาก

2.2.6 กลไกโคแอกกูเลชันที่เกิดจากการใช้โพลีเมอร์และโคแอกกูเลชันเอดอื่นๆ

โคแอกกูเลชันเอด (coagulation aid) หรือโคแอกกูแลนท์เอด (coagulant aid) หมายถึงสารที่ช่วยทำให้โคแอกกูแลนท์สร้างโคแอกกูเลชันได้ดียิ่งขึ้น ได้แก่ สารอินทรีย์ธรรมชาติหรือสังเคราะห์, แอ็คติเว้ตเต็ด ซิลิกา (activated silica), ดินเหนียวชนิดต่างๆ, ปูนขาว, ฯลฯ ในปัจจุบันโคแอกกูเลชันเอดที่นิยมใช้กันมากที่สุดจะเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์แบบต่างๆ ซึ่งเรียกว่า โพลีเมอร์ (polymer) หรือโพลีอิเล็กโตรไลต์

ในบางครั้งการใช้โคแอกกูแลนท์เพียงอย่างเดียวอาจสิ้นเปลืองมากดังเช่นในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูงมาก เป็นต้น กรณีเช่นนี้การใช้โคแอกกูเลชันเอดเพียงเล็กน้อยอาจช่วยประหยัดค่าโคแอกกูแลนท์ได้มาก

โคแอกกูเลชันเอด (coagulation aid) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโคแอกกูแลนท์ได้หลายทาง ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเติมแอ็คติเว้ตเต็ดซิลิกา (activated cilica) ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ที่มีประจุลบก่อนการเติมสารส้ม จะทำให้โคแอกกูเลชันของน้ำที่มีความขุ่นน้อยเกิดขึ้นได้ดี ทั้งนี้เพราะ แอ็คติเว้ตเต็ดซิลิกาจะเป็นเป้าสัมผัสเพิ่มเติมให้กับน้ำซึ่งมีเป้าสัมผัสไม่พอเพียง การใช้ซิลิกาในกรณีนี้มักช่วยลดปริมาณสารส้มที่ต้องใช้ด้วย นอกจากนี้ยังทำให้ฟล็อคที่เกิดขึ้นมีน้ำหนักและตกตะกอนได้ง่าย ถ้าเติมแอ็คติเว้ตเต็ดซิลิก้าหลังจากการเกิดโคแอกกูเลชันของสารส้ม ก็จะช่วยให้ฟล้อคมีขนาดใหญ่มากขึ้นและตกตะกอนได้ง่าย ฟล้อคสารส้มมีประจุบวกเล็กน้อยที่ระดับพีเอชต่ำกว่า 7 ทำให้สามารถใช้ซิลิกา (ซึ่งมีประจุลบ) เพื่อประโยชน์ดังกล่าวได้ การเติมแอ็คติเว้ตเต็ดซิลิกาพร้อมๆ กับสารส้มจะไม่ได้รับประโยชน์ เนื่องจากสารทั้งสองชนิดสามารถทำปฏิกิริยากันจนเป็นกลางและสูญเสียคุณสมบัติในด้านโคแอกกูเลชัน

สารประกอบชนิดอื่นก็อาจใช้เป็นโคแอกกูเลชันเอดได้ด้วยจุดประสงค์เดียวกัน การเติมดินเหนียวเพื่อเป็นเป้าจะทำให้ได้ฟล้อคที่มีน้ำหนักมากขึ้น สารอินทรีย์โพลีเมอร์สังเคราะห์อาจใช้ในการทำลายเสถียรภาพของฟล้อคสารส้ม ลำดับของการเติมสารเคมีมีความสำคัญมาก ต้องไม่เติมโคแอกกูเลชันเอดพร้อมๆ กับสารส้มลงในถังกวนเร็วใบเดียวกัน กรณีเช่นนี้มักต้องการถังกวนเร็วอย่างน้อย 2 ใบต่อกันอย่างอนุกรม สารที่เป็นเป้าควรต้องเติมก่อนการเติมสารส้ม ส่วนโพลีเมอร์ที่ใช้ทำลายเสถียรภาพของฟล้อคสารส้ม ควรจะต้องเติมภายหลังการเติมสารส้ม

สารโพลีเมอร์อาจนำมาใช้เป็นตัวโคแอกกูแลนท์เลยก็ได้ แต่เนื่องจากมันมีราคาแพงกว่าสารส้มหรือโคแอกกูแลนท์สามัญอื่นๆมาก ในทางปฏิบัติจึงใช้โพลีเมอร์เป็นตัวช่วยเหลือหรือสนับสนุนสารส้ม หรือสารอื่นในการสร้างโคแอกกูเลชัน อีกประการหนึ่งแม้ว่าโพลีเมอร์สามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ได้ แต่ก็ไม่เหมาะสำหรับใช้ตามลำพังกับน้ำที่มีความขุ่นต่ำ เนื่องจากโพลีเมอร์ไม่สร้างเป้าสัมผัสเพิ่มขึ้น น้ำที่มีความขุ่นต่ำจึงมีโอกาสสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้อย และไม่อาจสร้างฟล้อคขนาดใหญ่ได้

โพลีเมอร์ที่ใช้เป็นโคแอกกูแลนท์ ต้องสามารถเกาะติดผิวของอนุภาคความขุ่นดังนั้นจึงมักปรากฏว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างความเข้มข้นของความขุ่นกับปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ในการสร้างโคแอกกูเลชัน กล่าวคือ ถ้าความขุ่นสูงก็ต้องการโพลีเมอร์มาก แต่ถ้าความขุ่นต่ำก็ต้องการโพลีเมอร์น้อยเป็นต้น โพลีเมอร์สร้างโคแอกกูเลชันให้กับน้ำขุ่นได้ 2 วิธี ซึ่งล้วนต้องอาศัยคุณสมบัติในการเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์ วิธีแรกเป็นการทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยโพลีเมอร์ที่มีประจุบวก ทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์หมดสิ้นไป กรณีเช่นนี้อาจใช้โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำก็ได้ เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลไม่ได้เป็นปัจจัยที่สำคัญในการสร้างโคแอกกูเลชัน วิธีที่สองเป็นการสร้างโคแอกกูเลชัน โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคคอลลอยด์หลายๆตัว ประจุของโพลีเมอร์ในกรณีนี้ไม่ใช่เรื่องสำคัญ เพราะไม่จำเป็นต้องทำให้คอลลอยด์เป็นกลาง แต่สิ่งที่สำตัญคือ โพลีเมอร์ต้องมีขนาดใหญ่เพื่อให้สามารถใช้เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคความขุ่นต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง สะพานดังกล่าวต้องแข็งแรงและสามารถต้านทานแรงผลักระหว่างอนุภาคและความปั่นป่วน ที่เกิดจากการกวนน้ำ ด้วยเหตุนี้โคแอกกูเลชันที่เกิดจากวิธีสังเคราะห์สะพานนี้จึงต้องการโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ ซึ่งมักเป็นชนิดลบหรือไม่มีประจุ

2.2.7 การสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เพื่อให้เกิดฟล้อคคูเลชัน

ขั้นตอนแรกของการทำโคแอกกูเลชันคือการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ส่วนขั้นตอนต่อไปคือ การทำฟล้อคคูเลชัน ซึ่งเป็นการทำให้อนุภาคต่างๆ เคลื่อนที่มาสัมผัสหรือกระทบกัน อนุภาคที่สัมผัสกันแล้วจะต้องเกาะติดกันจนเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล้อค จึงจะถือว่าเกิดฟล้อคคูเลชัน ถ้ามีการสัมผัสระหว่างอนุภาคแต่ไม่จับตัวกัน ก็ไม่ถือว่าเกิดฟล้อคคูเลชัน กรณีหลังนี้มักเป็นเครื่องสะท้อนให้เห็นว่าการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ยังไม่ได้ผลเท่าที่ควร โดยปกติ ถือว่าระบบคอลลอยด์ที่มีการทำลายเสถียรภาพอย่างสมบูรณ์ จะมีประสิทธิภาพหรือความสำเร็จในการสร้างสัมผัส เท่ากับ 100% แต่ถ้ามีการเติมสารส้มหรือโคแอกกูแลนท์อื่นๆ ไม่พอเพียงหรือพีเอชไม่เหมาะ

สม หรือสาเหตุอื่นๆ ที่ทำให้มีการทำลายเสถียรภาพไม่สมบูรณ์ ความสำเร็จในการสร้างสัมผัสจะมีค่าไม่ถึง 100% ซึ่งหมายความว่าอนุภาคที่สัมผัสกันไม่จำเป็นต้องเกาะจับกันเสมอไป

อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว จะเกิดโคแอกกูเลชันได้สมบูรณ์เพียงใดจึงขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการทำให้อนุภาคเหล่านั้นสัมผัสหรือกระทบกัน วิธีสร้างสัมผัสให้กับอนุภาคต่างๆ มีหลายวิธี ดังนี้

1. ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสัมผัสเกิดขึ้น วิธีปฏิบัติที่นิยมมากที่สุดคือ การกวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆ ของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกัน เป็นเหตุให้อนุภาคต่างๆ มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่รวดเร็วจนเกินไป มิฉะนั้นแล้วฟล้อคที่เกิดขึ้นอาจแตกและหลุดออกจากกันได้ วิธีนี้เป็นวิธีธรรมดาที่นิยมใช้กันทั่วไปซึ่งอุปกรณ์ในการสร้างสัมผัสหรือสร้างฟล้อคคูเลชันเรียกว่า ถังกวนช้า (อุปกรณ์ที่ใช้ทำลายเสถียรภาพเรียกว่าถังกวนเร็ว) วิธีสร้างสัมผัสแบบนี้ มีชื่อเทคนิคว่า Orthokinetic flocculation อนุภาคคอลลอยด์ที่มีฟล้อคคูเลชันแบบออร์โธไคเนติค ควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล.

2. การสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ อาจเกิดขึ้นได้เองโดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์กระทบกันเองหรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การสัมผัสแบบนี้จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย จึงอาจกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน เป็นการเคลื่อนที่แบบอาศัยความร้อน (thermal motion) การสัมผัสระหว่างอนุภาคต่างๆที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนหรืออาศัยความร้อนนี้เรียกว่า perikinetic flocculation ในทางปฏิบัติฟล้อคคูเลชันแบบเพอริไคเนติคไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากต้องเสียเวลานานมากเกินไป นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลดังกล่าว ทำให้สามารถสร้างสัมผัสให้กับคอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า 0.1-1 ไมครอนเท่านั้น ข้อดีของการสัมผัสแบบนี้คือ ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก

3. การสัมผัสระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นเนื่องจากการตกตะกอน ที่มีอัตราไม่เท่ากันของอนุภาคขนาดต่างๆ ฟล้อคคูเลชันด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นพร้อมๆ กับการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้เลย อนุภาคที่สามารถสร้างฟล้อคคูเลชันแบบนี้ได้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล. ในทางปฏิบัติอนุภาคที่มีขนาดดัง

กล่าวอาจเกิดฟล้อคคูเลชัน มาก่อนแล้วครั้งหนึ่ง เมื่อมาถึงถังตกตะกอนจึงเกิดฟล้อคคูเลชันอีกในขณะที่มีการตกตะกอน

4. ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มก./ล. ฟล้อคคูเลชันอาจเกิดขึ้นโดยการสร้างสัมผัสแบบออร์โธไคเนติค แต่อาจเกิดขึ้นช้า เนื่องจากโอกาสสัมผัสน้อย วิธีแก้ไขอาจกระทำได้ดังนี้

ก. ใช้เครื่องกรองทรายแบบกรองเร็วหรือเครื่องกรองแบบ 2 ชั้นกรอง (ทรายและถ่านแอนทราไซต์) ชั้นกรองช่วยเพิ่มอัตราสัมผัสให้และยังบังคับให้อนุภาคต่างๆ เคลื่อนที่เข้ามาชิดกันด้วย การใช้เครื่องกรองช่วยสร้างฟล้อคคูเลชันเช่นนี้เรียกว่าการกรองสัมผัส (contact filtration) แต่เนื่องจากช่องว่างในชั้นกรองมีจำกัด วิธีนี้จึงใช้ได้กับอนุภาคที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 50 มก./ล. การใช้กรวดขนาดเล็กแทนทรายอาจเพิ่มปริมาตรช่องว่างได้ แต่เป็นการลดพื้นที่ผิวสัมผัส ดังนั้นจึงอาจได้ผลในทางฟล้อคคูเลชันได้ดีไม่เท่าชั้นทราย

ข. ใช้อนุภาคที่จับตัวกันเป็นฟล้อคแล้วเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคใหม่ ในทางปฏิบัติสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ ทำให้ฟล้อคจับตัวกันเป็นชั้นสลัดจ์ (sludge blanket) และบังคับให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ผ่านชั้นสลัดจ์ อีกวิธีหนึ่งสามารถกระทำได้โดย นำเอาฟล้อคกลับคืนมาผสมกับอนุภาคคอลลอยด์จากนั้นจึงสร้างสัมผัสตามแบบออร์โธไคเนติคไปตามปกติ

5. ในกรณีที่คอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอน แต่มีความเข้มข้นต่ำ การสร้างสัมผัสอาจใช้วิธีกรองได้เช่นกัน แต่สารกรองที่ใช้ควรมีขนาดใหญ่กว่าทราย

2.2.8 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน

การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันให้ได้ผลดี จะต้องควบคุมสภาวะต่างๆ ให้เหมาะสม ปัจจัยที่ต้องควบคุมได้แก่ ปริมาณและชนิดของสารโคแอกกูแลนท์ ระดับพีเอชของน้ำ ความเร็วแกรเดียนท์ (G) และระยะเวลากวนน้ำ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความเร็วแกรเดียนท์และระยะเวลากวนน้ำ มักกำหนดไว้ก่อนแล้วในตอนออกแบบและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ การควบคุมโคแอกกูเลชันจึงมุ่งหมายในการควบคุมปริมาณของโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมและระดับพีเอชของน้ำ เพื่อให้เกิดโคแอกกูเลชันที่ดีที่สุด การควบคุมสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดโคแอกกูเลชันสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ โดยวิธีจาร์เทสต์ (jar test) และโดยวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าซีตาโพเทนเชียล (zeta potential)

ก. การควบคุมด้วยวิธีจาร์เทสต์

วิธีควบคุมโคแอกกูเลชัน ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดและใช้กันมานานแล้วคือวิธีจาร์เทสต์ (jar test) ซึ่งเป็นวิธีทดสอบในบีคเกอร์ (beaker) เครื่องมือทดสอบเป็นเครื่องกวนที่ปรับความเร็วรอบได้ ซึ่งส่วนมากมักมีใบพัดกวนน้ำ 6 ใบ ในการทดลองแต่ละครั้งจะเลือกชนิดของสารเคมีและกำหนดสภาวะต่างๆ ซึ่งได้แก่ปริมาตรของตัวอย่างน้ำ ความเร็วรอบและระยะเวลากวนน้ำ (ทั้งกวนเร็วและกวนช้า) และระยะเวลาตกตะกอน จากนั้นจึงทดลองโดยเติมสารเคมีในปริมาณต่างๆ ลงในบีคเกอร์แต่ละใบ ระดับพีเอชอาจรักษาให้คงที่หรือแปรเปลี่ยนทั้งนี้แล้วแต่ความมุ่งหมายของการทำจาร์เทสต์

ข. การควบคุมโดยวัดซีตาโพเทนเชียล

โคแอกกูเลชันขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ การเติมโคแอกกูแลนท์ทำให้ซีตาโพเทนเชียลของอนุภาคคอลลอยด์ มีค่าเปลี่ยนแปลง เมื่อซีตาโพเทนเชียลมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ โคแอกกูเลชันจึงจะเกิดดีที่สุด ด้วยเหตุนี้ การวัดซีตาโพเทนเชียลของอนุภาคคอลลอดย์จึงอาจนำมาใช้ติดตามและควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันได้ อุปกรณ์ที่ใช้วัดซีตาโพเทนเชียล เรียกว่า zeta meter อุปกรณ์นี้ใช้วัดอัตราเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ในสนามไฟฟ้า (electrophoretic mobility) ซึ่งนำไปใช้คำนวณหาค่าซีตาโพเทนเชียลได้

การควบคุมโดยการวัดศักย์ไฟฟ้านี้ ไม่ได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากอุปกรณ์มีราคาแพงและการวัดต้องอาศัยความชำนาญมาก

ในทางปฏิบัติการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันจะต้องประกอบด้วย ถังกวนเร็ว (rapid mixing tank) และถังกวนช้า (flocculation tank)

ถังกวนเร็ว (rapid mixing tank)

ถังกวนเร็วซึ่งมีการเติมสารโคแอกกูแลนท์จะทำหน้าที่กระจายสารเคมีไปให้ส่วนต่างๆ ของน้ำอย่างรวดเร็วเพื่อให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์หรืออนุภาคแขวนลอยในน้ำนั้น การผสมกันระหว่างสารเคมีกับน้ำเกิดขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วน (turbulence) เนื่องจากการไหลหรือจากเครื่องผสม (mixer)

ถังกวนช้า (flocculation tank)

จะรับน้ำต่อจากถังกวนเร็ว มีหน้าที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีโอกาสเกาะติดหรือจับอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ในน้ำซึ่งมีผลทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น โดยในถัง

นี้จะทำการกวนอย่างช้าๆ ใช้เวลาประมาณ 15-30 นาที โดยการกวนอาจทำได้โดยใช้ผนังกั้นเป็นช่วงๆ บังคับทิศทางให้น้ำไหลวนไปมา

ในการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้น กระบวนการโคแอกกูเลชัน สามารถใช้เพื่อกำจัดสี ความขุ่น, COD และน้ำมัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงมาก กระบวนการโคแอกกูเลชัน จะไม่สามารถทำให้น้ำทิ้งมีค่า BOD ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ ดังนั้นกระบวนการโคแอกกูเลชัน จึงเป็นเพียงการบำบัดเบื้องต้นเท่านั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสาหร่าย

"สาหร่าย" หมายถึงพืชชั้นต่ำ ที่ตรงกับคำภาษาอังกฤษ "algae" (เอกพจน์ alga), ซึ่งเป็นพืชชั้นต่ำมีคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) แต่ไม่มีส่วนที่เป็นราก ลำต้นและใบที่แท้จริง , มีขนาดตั้งแต่เล็กมากประกอบด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียว ซึ่งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ต้องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์, ไปจนถึงขนาดใหญ่ ประกอบด้วยเซลล์จำนวนมาก อาจเป็นเส้นสาย (filament) หรือมีลักษณะคล้ายพืชชั้นสูง, โดยมีส่วนที่คล้ายราก ลำต้นและใบ รวมเรียกว่า ทัลลัส (thallus)

นิยามของสาหร่ายที่ง่ายที่สุด ก็คือ สาหร่ายเป็นพืชขนาดเล็ก ซึ่งสามารถสังเคราะห์แสงได้ การปล่อยก๊าซออกซิเจน จากกระบวนการสังเคราะห์แสง การปล่อยสารที่ทำให้เกิดรสและกลิ่นรวมทั้งการทำให้เครื่องกรองอุดตันทำให้สาหร่ายมีความสำคัญในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาหร่ายมีตั้งแต่เซลล์เดียว จนถึงกลุ่มใหญ่รวมตัวเป็นเส้นใย จัดเป็นพืชน้ำ แต่ก็อาจมีชีวิตอยู่ได้นานในสภาพแห้งๆ จึงอาจพบได้ในดิน, ต้นไม้, ก้อนหิน ที่มีภูมิอากาศชื้นๆ หรือใกล้ทะเล โดยทั่วไปอาศัยอยู่มากในแหล่งน้ำทั่วไปที่มีแสงแดดส่องถึง

สาหร่ายแบ่งออกเป็นชนิดใหญ่ๆ ตามสีของสาหร่ายได้ 3 ประเภท ได้แก่

1. สาหร่ายสีเขียว (green algae) มีคลอโรฟิลล์ มักอาศัยอยู่ในน้ำจืดมีทั้งเซลล์เดียว, เส้นใย และเป็นกลุ่ม (colony)

2. สาหร่ายสีน้ำตาล (brown algae) มักพบในน้ำเค็ม และบางชนิดพบมากในผิวหน้าของมหาสมุทร แต่ไดอะตอม (diatoms) ซึ่งจัดเป็นสาหร่ายสีน้ำตาล สามารถพบได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม น้ำผิวดิน และในดิน

3. สาหร่ายสีแดง (red algae) ส่วนใหญ่เป็นเส้นใย เช่น สาหร่ายทะเล ส่วนสาหร่ายสีเขียวอมน้ำเงิน (blue-green algae) นั้นปัจจุบันเรียก Cyanobacteria หรือ blue-green cyanobacteria ซึ่งเป็นพวก Procaryotic microorganisms เพราะไม่มีนิวเคลียส

สาหร่ายใช้แสงแดดเป็นแหล่งพลังงานในการเปลี่ยนแปลงสารอนินทรีย์ในน้ำให้เป็นสารอินทรีย์ในรูปของโปรโตพลาสซึม (protoplasm) ใช้คาร์บอนไดออกไซด์, แอมโมเนีย และฟอตเฟต สร้างเซลล์ใหม่ และออกซิเจน ผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการสังเคราะห์แสง คือ โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) ดังสมการต่อไปนี้

$$CO_2 + 2H_2O \xrightarrow{\text{แสงแดด}} CH_2O + O_2 + H_2O$$

สาหร่ายที่อาศัยในน้ำบางชนิดสามารถว่าย หรือเคลื่อนที่ได้ แม้ว่าสาหร่ายส่วนใหญ่จะไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วยตัวเองได้ก็ตาม ซึ่งพวกที่เคลื่อนที่ได้นี้มีโครงสร้างที่คล้ายแส้ เรียกว่าแฟลกเจลลา (flagella) บางคนจึงจัดพวกนี้ให้เป็นโปรโตซัวมากกว่าจะเป็นสาหร่าย แต่อย่างไรก็ตาม ในแง่ของทางสุขาภิบาลน่าที่จะจัดให้เป็นสาหร่ายมากกว่า เนื่องจากมีคลอโรฟิลล์และสังเคราะห์แสงได้

จุลชีพซึ่งลอยกระจายโดยอิสระ หรือเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนในกระแสน้ำ เรียกรวมกันว่า “แพลงตอน” (plankton) ซึ่งรวมถึงแพลงตอนสาหร่าย (plankton algae) และพืชอื่นๆ รวมกันเป็น “แพลงตอนพืช” (phytoplankton หมายถึง plant plankton) นอกจากนั้นยังมี “แพลงตอนสัตว์” (zooplankton) เมื่อแหล่งน้ำเป็นอ่างน้ำหรือทะเลสาบที่ลึกและกว้างใหญ่ โดยทั่วไปจะมีแพลงตอนสาหร่ายมากกว่าแบบสาหร่ายเกาะติดหรือ benthic algae

ถ้าไม่มีสารอินทรีย์ในน้ำ การเจริญเติบโตของสาหร่ายขึ้นอยู่กับปริมาณแร่ธาตุในน้ำเช่นในน้ำกระด้างจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ จากไบคาร์บอเนต จึงเป็นการลดความกระด้างและเพิ่มค่าพีเอช

จะอย่างไรก็ตาม Heukelekian ได้สรุปว่า เนื่องจากสาหร่ายต้องการสารอนินทรีย์เช่น ฟอสเฟต, ไนเตรต, แอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์ ในการสังเคราะห์แสง เปลี่ยนไปเป็นอินทรีย์สาร และออกซิเจน จึงควรจัดสาหร่ายให้เป็น “ผู้สร้าง” อินทรีย์สาร มากกว่าจะเป็น “ผู้ทำลาย”

2.3.1 บทบาทของสาหร่ายต่อสิ่งแวดล้อม

ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์แสงขณะมีแสงแดดจะมีการกำจัดก๊าคาร์บอนไดออกไซด์ ออกจากน้ำอยู่ตลอดเวลา และมักจะทำให้ (bond) monocarbonates ซึ่งแทบจะไม่ละลายน้ำเลย ตกตะกอนได้ผลดังกล่าวนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้างทั้งหมดของน้ำยิ่งถ้ามีสาหร่ายเติบโตอยู่มากๆ อาจลดความกระด้างของน้ำลงได้ถึงหนึ่งในสาม

การเปลี่ยนแปลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความกระด้าง ยังผลให้มีแนวโน้มที่จะทำให้ค่า พีเอช (pH) ของน้ำเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อสาหร่ายมีความตื่นตัวในการสังเคราะห์แสงสูงขึ้น จะทำให้ค่าพีเอช เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อสาหร่ายไม่ได้สังเคราะห์แสงในเวลากลางคืน พีเอช ก็จะ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลดลงเพราะสาหร่ายปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในระหว่างหายใจ(respiration) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้างและพีเอช เป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในระบบบำบัดน้ำ เนื่องจากจะกระทบถึงปริมาณคลอรีน, สารส้ม และสารเคมีอื่นๆ ที่จะต้องเติมในระบบนั้นๆ

เมื่อสาหร่ายเจริญเติบโตมากก็มักจะทำให้น้ำมีคุณสมบัติในทางกัดกร่อนสูงขึ้น ส่งผลกระทบกระเทือนถึงระบบส่งจ่ายน้ำ และกระบวนการทางอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมาก

2.3.2 บทบาทของสาหร่ายในระบบประปา

สาหร่ายสามารถทำให้เครื่องกรองทรายอุดตัน, ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องรสและกลิ่น นอกจากนี้ ยังสามารถทำให้พีเอช, ความเป็นด่าง, สี ความขุ่นของน้ำเปลี่ยนแปลงได้ด้วย ความสำคัญอีกประการหนึ่งของสาหร่ายก็คือไปเพิ่มปริมาณอินทรีย์สารในน้ำขึ้นอย่างมากมาย ซึ่งเป็นปัญหาที่ยุ่งยากต่อระบบบำบัดน้ำทั้งสิ้น

สาหร่ายบางชนิดแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็อาจก่อให้เกิดปัญหาขึ้นได้ เช่น พวกไดอะตอม Tabellaria, Synedra และ Melosira ทำให้ช่วงเวลาการกรองสั้นลง

สาหร่ายที่เกาะติดกับก้อนหิน, ไม้, ดิน ฯลฯ อาจเจริญเติบโตต่อเนื่องกันเป็นแผ่นเมื่อน้ำไหลแรงก็อาจชะให้แผ่นสาหร่ายหลุดร่อนไปกับกระแสน้ำได้ ซึ่งอาจไปก่อให้เกิดปัญหาอุดตันตะแกรงก่อให้เกิดเป็นแผ่นเมือก (Slime) และเป็นแหล่งของกลิ่นและรสโดยเฉพาะถ้าเกิดย่อยสลายแบบแอนแอโรบิค (anarobic decomposition) ขึ้น

สาหร่ายที่สะสม และเติบโตบนผิวของเครื่องกรองทรายช้า ในลักษณะเป็นฟิล์มบางเมือกๆ จะค่อยๆ ทำให้อัตราการไหลผ่านชั้นกรองลดลง แต่ก็อาจมีประโยชน์ในแง่ที่สามารถเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำที่ไหลผ่าน ก่อให้เกิดการย่อยสลายอินทรีย์สารภายในเครื่องกรองในสภาวะแอโรบิคได้ (aerobic) เมือกของสาหร่ายและพืชน้ำ, สัตว์น้ำอื่นๆ ที่อยู่บนผิวของเครื่องกรองทรายช้าเรียกว่า “ผิวกรอง” (filter skin) หรือ “Schmutzdecke”

เมื่อแหล่งน้ำดิบเป็นน้ำจากอ่างเก็บน้ำ ปัญหาเรื่องการกำจัดสาหร่ายถือเป็นปัญหาใหญ่เพราะถ้าผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) ที่ไม่ดี จะมีไดอะตอมมากก่อให้เกิดปัญหากับเครื่องกรองเร็ว เกิดการอุดตันในชั้นทรายกรอง และยากต่อการทำความสะอาดเม็ดทรายด้วย

ระบบล้างย้อนกลับ (backwash) เป็นการสิ้นเปลืองเวลาและปริมาณน้ำในการทำความสะอาด ทำให้ต้องเปลี่ยนชั้นทรายใหม่บ่อยๆ น้ำดิบที่มีสาหร่ายมาก จะรบกวนการทำงานของขบวนการโคแอกกูเลชัน ทำให้การตกตะกอนของฟล็อคในถังตกตะกอนไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร

สาหร่ายก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช, ความเป็นด่าง, ความกระด้างทั้งหมด, และค่าออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen, D.O.) หรืออาจเพิ่มปริมาณอินทรีย์สารของน้ำดิบได้ ดังนั้นสาหร่ายจึงมีผลรบกวนต่อกระบวนการบำบัดน้ำทางเคมี เช่น อาจจำเป็นต้องแปรปริมาณคลอรีนที่จะต้องเติม ในสัดส่วนที่สอดคล้องกับปริมาณสาหร่ายที่มีอยู่ เพื่อให้มีปริมาณคลอรีนตกค้างอยู่ในน้ำคงที่

การที่สาหร่ายสามารถเพิ่มพีเอชของน้ำได้ ที่ทำให้เกิดฟล็อคที่ไม่ดี เมื่อเติมสารส้ม เช่น พีเอชของน้ำดิบอาจเพิ่มจาก 7.0 ไปเป็น 10.0 ได้ ในช่วงที่พีเอชสูง ปริมาณสารส้มที่ใช้ปกติย่อมไม่เพียงพอที่จะลดพีเอชให้ถึงจุดที่จะทำให้เกิดฟล้อค ดีขึ้นได้

สรุปปัญหาในระบบผลิตน้ำประปาที่เกิดจากสาหร่าย

1. ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของน้ำ เช่น ค่าพีเอช ความเป็นด่าง ความกระด้าง และค่าออกซิเจนละลายน้ำ

2. รบกวนการทำงานของกระบวนการโคแอกกูเลชัน มีรายงานว่า Asterionella และ Synedra เป็นตัวขัดขวางการเกิดฟล็อคที่เหมาะสม และในบางกรณีการเพิ่มปริมาณสารเคมีก็ไม่ช่วยในการกำจัดสาหร่ายเลย

3. รบกวนการทำงานของถังตกตะกอน เนื่องจากแรงลอยตัวของสาหร่ายทำให้สาหร่ายมีแนวโน้มที่จะกระจายอยู่ทั่วไปในถังตกตะกอน จึงขัดขวางการตกตะกอนของฟล้อคทำให้ประสิทธิภาพของถังตกตะกอนลดลง

4. ทำให้ถังทรายกรองอุดตันเร็ว เนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่น ความสามารถในการเพิ่มปริมาณได้อย่างรวดเร็วของสาหร่าย ลักษณะของเซลล์ที่ประสานในเม็ดทราย เช่น ผนังเซลล์ที่แข็งของไดอะตอม เมือกที่หุ้มรอบเซลล์ของ Pamella และแนวโน้มที่จะประสานกันเป็นร่างแหในกรณีของ Fragilaria และ Tribonema

5. ทำให้เกิดการอุดตันของท่อส่งน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา เนื่องจากสาหร่ายบางชนิด และแบคทีเรียพวก iron bacteria สามารถเจริญเติบโตได้ในที่มืดเมื่อมีปริมาณมากเข้าก็จับตัวเป็นกลุ่มทำให้เกิดการอุดตัน

6. ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับ กลิ่น และรสในน้ำ สาหร่ายทำให้น้ำมีกลิ่นต่างๆ เช่น กลิ่นหญ้า กลิ่นไม้ผุ ซึ่งปัญหาเกี่ยวกับกลิ่นต่างๆ เหล่านี้ทำให้น้ำไม่น่าดื่มและใช้

2.3.3 **เสถียรภาพของสาหร่ายในแหล่งน้ำ**

สาหร่ายซึ่งเป็นพืชน้ำขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำ อาจถือได้ว่ามีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์ชนิดหนึ่ง เสถียรภาพของสาหร่ายที่เกิดขึ้นทำให้แขวนลอยอยู่ในน้ำและตกตะกอนเองได้ยากในธรรมชาติ เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของสาหร่ายได้แก่

1. surface charge

สาหร่าย เป็นเช่นเดียวกับอนุภาคคอลลอยด์โดยทั่วไปที่มีคุณสมบัติของประจุไฟฟ้า (โดยทั่วไปมีประจุลบ) คุณสมบัติทางไฟฟ้านี้ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างเซลล์ของสาหร่ายทำให้เกิดการแขวนลอยอยู่ในน้ำ

2. hydrophilic effects

เกิดจากการที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบหรือถูกดูดติดอยู่บนเซลล์ของสาหร่ายซึ่งกลไก hydrophilic effect นี้ จะมีความสำคัญมากในเรื่องของกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือ DAF เนื่องจากฟองอากาศต้องการพื้นผิวซึ่งเป็น hydrophobic ของอนุภาค (hydrophobic spots) ฟองอากาศจึงจะสามารถเกาะติดไปกับอนุภาคได้

3. **steric effects**ในช่วงการเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่าย สาหร่ายจะมีการขับ

สารบางอย่างซึ่งเรียกว่า Extracellular Origanic Matter (EOM) ออกมา โดย EOMนี้จะประกอบไปด้วยสารจำพวกpolysaccharides , pectins , lipoproteins และ polyamino acids ซึ่งสารเหล่านี้จะถูกดูดติด (adsorbed) อยู่บนผิวเซลล์ของสาหร่าย สารเหล่านี้อาจมีคุณสมบัติทำให้เซลล์สาหร่ายมีเสถียรภาพได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังกล่าว เรียกว่า steric effects

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cassell, Kaufman และ Matijevic (1974) ได้ทำการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของ ethanol และ lauric acid ที่มีต่อขนาดของฟองอากาศและต่อประสิทธิภาพในการกำจัด humic acid โดยกระบวนการ flotation ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ ethanol 0.25 - 7.50 ml/L, lauric acid 0 - 100 mg/L, ความเข้มข้นเริ่มต้นของ humic acid 50 mg/L และใช้ 0.0005 M อลูมิเนียมซัลเฟตเป็นโคแอกกูแลนท์ ทำการทดลองที่สภาพ pH 7.5 พบว่า ethanol มีผลต่อขนาดของฟองอากาศมากกว่า lauric acid โดยเมื่อเติม ethanol เพียง 1 ml/L จะมีผลทำให้ขนาดฟองอากาศเล็กลงอย่างมาก และพบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการ flotation จะลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศเกินกว่า 55-60 μm.

Abo-El Ela และ Nawar (1980) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานสกัดน้ำพืชและผลิตสบู่โดยทำการทดลองด้วยวิธี chemical coagulation ตามด้วยกระบวนการ dissolved air flotation ทำการศึกษาโดยใช้สาร โคแอกกูแลนท์ 2 ชนิดคือ สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$)

ผลการศึกษาพบว่าปริมาณของสารส้มที่เหมาะสมคือ 36 mg/L ส่วนเฟอร์ริกคลอไรด์ปริมาณที่เหมาะสมคือ 123 mg/L โดย pH ที่เหมาะสมของสารทั้ง 2 ชนิด อยู่ในช่วง 6-7 และในการบำบัดโดยกระบวนการ dissolved air flotation ได้ค่า A/S ที่เหมาะสมคือ 0.0079

สำหรับประสิทธิภาพรวมของทั้งระบบ เมื่อใช้สารส้มเป็น โคแอกกูแลนท์ พบว่า ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD, COD, ความขุ่น, น้ำมันและไขมัน เท่ากับ 94.5%, 95.9%, 99.1%, และ 99.3% ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็น โคแอกกูแลนท์ ประสิทธิภาพในการลดค่า BOD, COD, ความขุ่น, น้ำมันและไขมัน เท่ากับ 94%, 96% 99.3% และ 99.1 ตามลำดับ

Lovett และ Travers (1984) ทำการศึกษา การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฆ่าสัตว์ โดยใช้วิธี dissolved air flotation ทดลองใช้ความดัน 100-500 kPa มีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย ระหว่าง 170-2,100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ค่าอัตราส่วนของอากาศต่อปริมาณของแข็ง (0-0.17) ประสิทธิภาพสูงสุดของการบำบัด COD, ของแข็งแขวนลอยและการบำบัดไขมันคือ 70% 50% และ 90 % ตามลำดับ จากงานวิจัยพบว่าความดัน มีผลต่อขนาดของฟองอากาศหรือประ

สิทธิภาพในการบำบัดเล็กน้อยแต่ผลของอัตราส่วนระหว่างประมาณอากาศต่อของแข็ง (A/S ratio) จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่า

Ng W. J., Goh และ Tay (1988) ได้ทำการศึกษาทำการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำ โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพของถังอัดความดัน, อัตราภาระของแข็ง และอัตราน้ำล้นผิว พบว่าเมื่อใช้น้ำประปาในการอัดความดันที่ 280 kPa ที่ช่วงเวลาต่างๆ ปริมาณอากาศที่ปลดปล่อยออกมาจะอยู่ในช่วง 50-60 mg/L และปริมาณดังกล่าวเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเวลากักเก็บในถังความดันมากกว่า 3 นาที ส่วนกรณีที่ใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วหมุนเวียนมาอัดความดันพบว่าประสิทธิภาพในการอัดความดันหรือปริมาณอากาศที่ปลดปล่อยออกมาจะต่ำกว่าเมื่อใช้น้ำประปาในการอัดความดัน

สำหรับการศึกษาถึงค่าอัตราภาระของแข็ง พบว่าที่ความที่ใช้ 500 kPa ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยจะลดลงอย่างชัดเจนที่อัตราภาระของแข็งมากกว่า 1,650 kg.m.$^{-2}$h.$^{-1}$ และถ้าอัตราน้ำล้นผิวมีค่ามากกว่า 2 m.^{3}m.$^{-2}$h.$^{-1}$ ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยจะลดลงอย่างรวดเร็ว

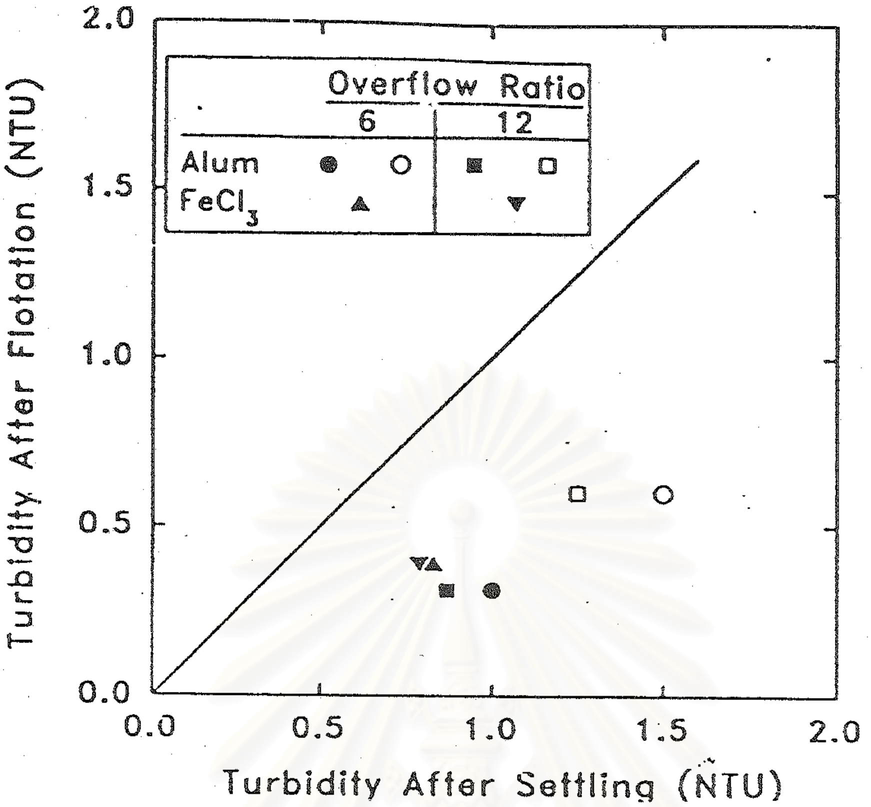
Rusten, Eikebrokk และ Thorvaldesn (1990) ได้ทำการทดสอบน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร โดยวิธีจาร์เทสต์ ระดับโรงงานนำร่อง (pilot plant) และระดับโรงงาน (full scale) พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียขึ้นกับส่วนประกอบของน้ำเสีย สภาวะที่เหมาะสมของโคแอกกูเลชัน และฟล้อกคูเลชัน โดยมีช่วงพีเอชที่เหมาะสมขึ้นกับชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ใช้จากการทดสอบ ถ้าเติมสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ 0.10 - 0.15 มก./มก. ซีโอดี หรือสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต 0.20 มก./มก. ซีโอดี ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 67-90 ขึ้นกับส่วนประกอบของน้ำเสีย

Edzwald และ Wingler (1990) ทำการทดลองการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF โดยใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำ Wachusett มาทดลองโดยอุปกรณ์ DAF ในระดับห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างน้ำที่ใช้นำมาเติมเซลส์สาหร่ายพันธุ์ Chlorella ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10^{5} cells/mL ผลการทดลองพบว่าที่ความดัน 483 KPa อัตราการเวียนกลับ 5% ประสิทธิภาพการอัดอากาศ 70% สามารถกำจัดสาหร่ายได้สูงถึง 99% แต่ทั้งนี้ต้องมีการใช้สารเคมีในการปรับสภาพของน้ำในเบื้องต้นช่วยด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าการทำฟล้อคคูเลชันโดยใช้เวลาประมาณ 5 นาที จะทำให้ประสิทธิภาพของ DAF ดีขึ้น แต่การทำฟล้อคคูเลชันที่เวลานานๆ ไม่มีผลต่อการทำงานของ DAF

Jamil (1991) ได้ทำการทดสอบเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบ DAF ในระดับห้องปฏิบัติการและระดับโรงงานของโรงงานฆ่าสัตว์ โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการเติม ฟล้อคคูแลนท์ เพื่อช่วยในการกำจัดของแข็งแขวนลอย, น้ำมันและไขมัน กับระบบที่ไม่เติมฟล้อคคูแลนท์ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 85 และ 70 ตามลำดับ และพบว่าระบบ DAF สามารถกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำเสียได้อีกด้วย ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการปรับพีเอชให้เหมาะสมเมื่อมีการเติมฟล็อกกูแลนท์

Edzwald (1992) ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกระบวนการ DAF กับการตกตะกอนโดยใช้สาหร่าย Chlorella 10^4 cells/mL เติมลงในตัวอย่างน้ำจากทะเลสาบ Whitney ซึ่งทำให้นับจำนวนเซลล์สาหร่ายได้ 2.94×10^4 cells/mL , ความขุ่น 3.3 NTU โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ ใช้ความดันสำหรับ DAF เท่ากับ 483 kPa ใช้สารส้ม 28 mg/L และ $FeCl_3$ เป็นโคแอกกูแลนท์ ใช้อัตราการเวียนกลับ 6.5% (ϕ_b = 3800) ที่ 20°C และ 5% (ϕ_b = 3700) ที่ 6°C อัตราภาระน้ำล้นของ DAF ต่อการตกตะกอนเท่ากับ 6 และ 12 ต่อ 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกระบวนการ DAF กับการตกตะกอน (Edzwald, 1992)

จากกราฟในรูปที่ 2.13 ทดลองโดยฟล้อคคูเลชัน 20 นาที ก่อนที่จะทดลอง DAF และตกตะกอน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า DAF มีประสิทธิภาพสูงกว่าการตกตะกอนไม่ว่าจะใช้สารใดเป็นโคแอกกูแลนท์ ทั้งที่อัตราภาวะน้ำล้นทั้ง 6 และ 12 ต่อ 1 และที่อุณหภูมิต่ำ ประสิทธิภาพของ DAF จะดีกว่าที่อุณหภูมิสูง

Edzwald , Walsh , Kaminski และ Dunn (1992) ได้ทำการทดลองศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของ DAF โดยใช้ตัวอย่างน้ำจากทะเลสาบ Whitney ซึ่งเคยมีปริมาณสาหร่ายสูงถึง 30,205 cells/mL การทดลองทำโดยใช้สาหร่ายพันธุ์ Chlorella ที่ความเข้มข้นประมาณ 10^4 cells/mL เติมลงในตัวอย่างน้ำจากทะเลสาบ Whitney ได้จำนวนเซลส์สาหร่ายรวม 21,000 cells/mL แล้วแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ มีการ break up และไม่มีการ break up ฟล้อคที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตาราง

ตารางแสดงสภาวะที่ทำการทดลองโดย Edzwald, Walsh, Kaminski และ Dunn (1992)

พารามิเตอร์ในการทดลอง	**Jar1**	**Jar2**
$FeCl_3$ (mg/L)	20	20
สารส้ม (mg/L)	28	28
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	5-10	5-10
กวนเร็ว (นาที)	2	2
ฟล้อคคูเลชัน (นาที)	20	20
Break up		
- ความเร็ว (รอบต่อนาที)	-	400
- G (วินาที$^{-1}$)	-	380
- เวลา (นาที)	-	2
DAF		
- อัตราการเวียนกลับ (%)	5	5
- เวลา (นาที)	10	10

ตารางแสดงผลการทดลองของ Edzwald, Walsh, Kaminski และ Dunn (1992)

โคแอกกูแลนท์	สภาวะ	ความขุ่น (NTU)			
		เริ่มต้น	หลังจากทำฟล้อคคูเลชัน	หลังจาก Break up	น้ำใสหลังผ่าน DAF
20 mg $FeCl_3$/L	ไม่ทำฟล้อค break up	2.90	19.0	-	1.0
	ทำฟล้อค break up	2.90	17.0	9.2	0.8
28 mg Alum/L	ไม่ทำฟล้อค break up	2.90	8.8	-	0.85
	ทำฟล้อค break up	2.90	9.0	5.8	0.65

จากผลที่ได้พบว่าความขุ่นมีค่าไม่เกิน 1 NTU ไม่ว่าจะมีการ break up ฟล้อคหรือไม่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการ DAF ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทำให้ฟล้อคมีขนาดใหญ่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Craenenbroeck และคณะ (1993) ทำการศึกษากระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปาของเมือง Antwerp ซึ่งแหล่งน้ำดิบประสบปัญหาเกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณสาหร่าย ทำให้เกิดปัญหาต่อกระบวนการผลิตน้ำประปา หลังจากทำการทดสอบกับระบบ DAF ในการกำจัดสาหร่ายพบว่าระบบ DAF มีผลโดยตรงต่อการทำงานของระบบกรองน้ำ โดยที่เมื่อใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชัน ร่วมกับ DAF โดยใช้สารส้มเป็น โคแอกกูแลนท์ ในปริมาณ 1.74 mg $Al^{+3/L}$ สามารถลดปริมาณสาหร่ายได้ถึง 80% ก่อนเข้าสู่การกรอง และทำให้ประสิทธิภาพการกรอง เพิ่มขึ้น 200%

Arora และคณะ (1995) ทำการศึกษากระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำในระดับนำร่อง (pilot study) โดยทำการทดลองกับน้ำจากแหล่งน้ำที่มีความขุ่นต่ำ, มีสี มี Organic Content ในปริมาณสูง และมีสาหร่ายมาก (เกิด Algal Blooms) พบว่ากระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำมีความเหมาะสมสำหรับน้ำดิบที่มีคุณสมบัติดังกล่าวโดยปริมาณความขุ่นไม่เกิน 100 NTU อย่างไรก็ตาม การบำบัดเบื้องต้นโดยใช้สารเคมีในกระบวนการโคแอกคูเลชัน / ฟล้อคคูเลชัน จะทำให้ได้ผลดียิ่งขึ้น โดยเวลากวนผสม (flocculation time) ประมาณ 10-20 นาที อัตราส่วนเวียนกลับสำหรับระบบ DAF เท่ากับ 8-12%

Bunker และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชัน ร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำ (DAF) สำหรับ water supply โดยพิจารณาถึงเวลาในการกวนผสม (flocculation time) pH และปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม โดยสารเคมีที่ใช้ คือ alum, ferric salt และ polyaluminum chloride โดยการทดสอบกับอุปกรณ์ DAF ใช้ความดัน 480 kPa, recycle ratio 8% พบว่า pH ที่เหมาะสมประมาณ 6.2 ปริมาณสารเคมีเท่ากับ 3.5 mg/L as Al^{+3} และ 12.5 mg/L as Fe^{+3} ที่เวลาการกวนผสม 5 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แผนงานการวิจัยและการดำเนินงาน

เพื่อให้งานวิจัยนี้เป็นไปตามวัตถุประสงค์และขอบเขตซึ่งได้กำหนดไว้ จึงได้จัดเตรียมแผนงานวิจัยและการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1.1 แผนงานการวิจัย

1.1.1 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการวิจัยนี้แบ่งเป็น

- ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ โดยใช้สาหร่ายสายพันธุ์ Chlorella ซึ่งเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ (วิธีการเลี้ยงแสดงในภาคผนวก ก)

  Chlorella เป็นสาหร่ายสีเขียวเซลล์เดียว ซึ่งสามารถพบได้ในแหล่งน้ำทั่วไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศเขตร้อนและเป็นสาหร่ายชนิดซึ่งสร้างปัญหาอย่างมากในกระบวนการผลิตน้ำประปา มักพบปัญหาการอุดตันของการกรองเนื่องจากสาหร่ายชนิดนี้
- ใช้ตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำที่มีสาหร่ายในปริมาณสูง

3.1.2 การทำการทดลอง

แบ่งการทดลองออกเป็น 7 ตอนดังนี้

1. การทดลองหาค่าอัตราการเวียนกลับและอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็งที่เหมาะสม
2. การทดลองหาค่าความดันที่เหมาะสม
3. การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของสาหร่าย
4. การทดลองศึกษาผลของความขุ่นและกรดฮิวมิก
5. การทดลองศึกษาผลของ Sodium Lauryl Sulfate
6. การทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการ DAF
7. การทดลองศึกษาผลของกระบวนการฟล้อคคูเลชันที่มีต่อ DAF

3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง

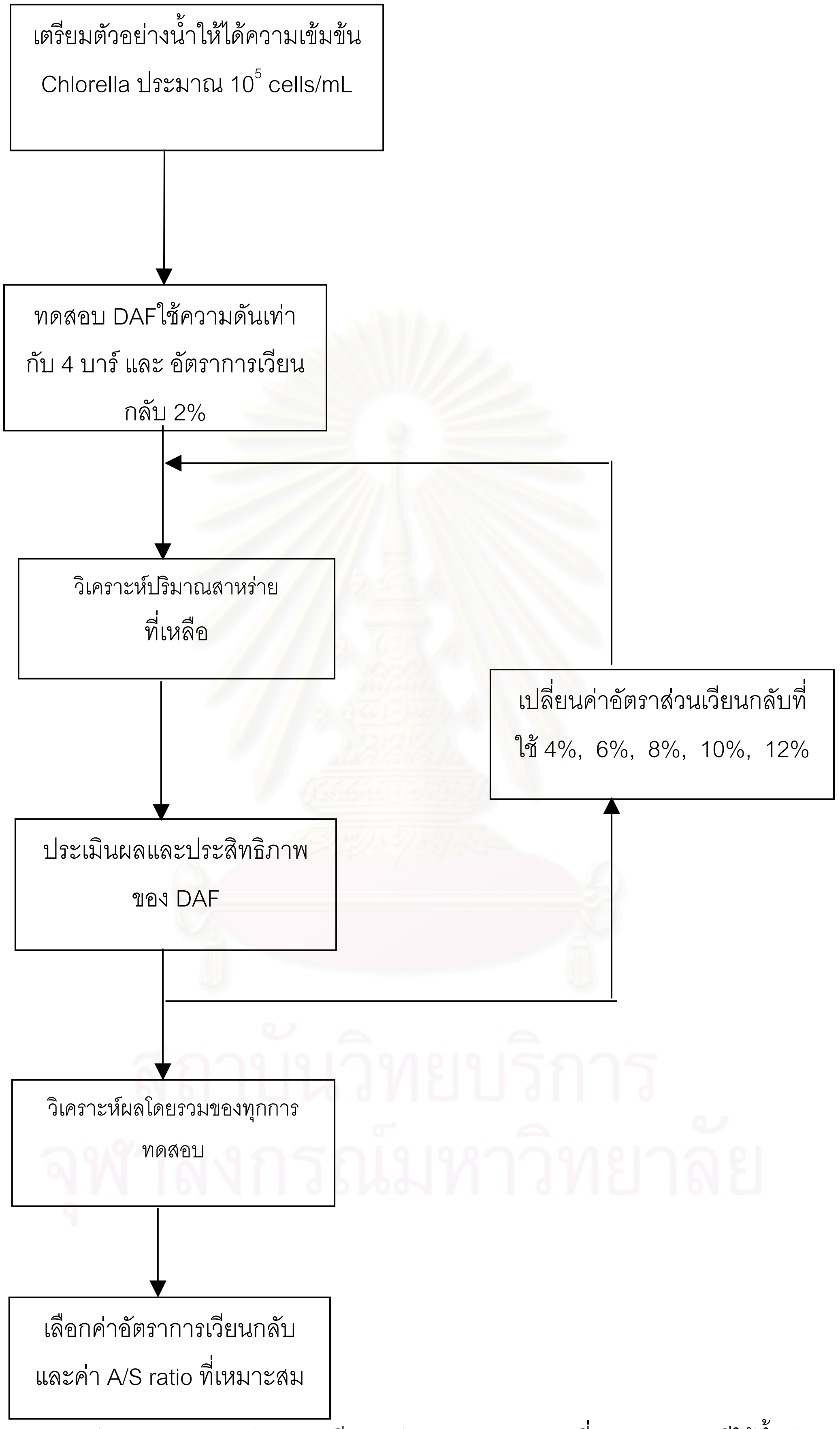
3.2.1 การทดลองหาค่าอัตราการเวียนกลับและอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็งที่เหมาะสม

3.2.1.1 กรณีใช้น้ำสังเคราะห์

มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างน้ำโดยใช้น้ำประปาผสมกับน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ โดยให้มีความเข้มข้นของสาหร่ายโดยประมาณ 10^5 cells/mL.
2. นำตัวอย่างน้ำที่เตรียมไว้มาทำการทดลอง DAF โดยใช้ความดัน 4 บาร์ และใช้อัตราการเวียนน้ำกลับมาอัดอากาศเริ่มต้นที่ 2%
3. วิเคราะห์หาปริมาณสาหร่ายที่เหลือ
4. ประเมินผลการทดลอง
5. ทำการทดลองเช่นเดิมตั้งแต่ข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนอัตราเวียนน้ำกลับมาอัดอากาศเป็น 4%, 6%, 8%, 10% และ 12% ตามลำดับ
6. คำนวณประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละการทดสอบ
7. วิเคราะห์ผลของทุกการทดสอบเพื่อพิจารณาเลือกอัตราการวียนกลับที่เหมาะสมและคำนวณหาค่า A/S ratio

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1แผนผังการทดลองหาอัตราการเวียนกลับและค่า A/S ratioที่เหมาะสม กรณีใช้น้ำสังเคราะห์

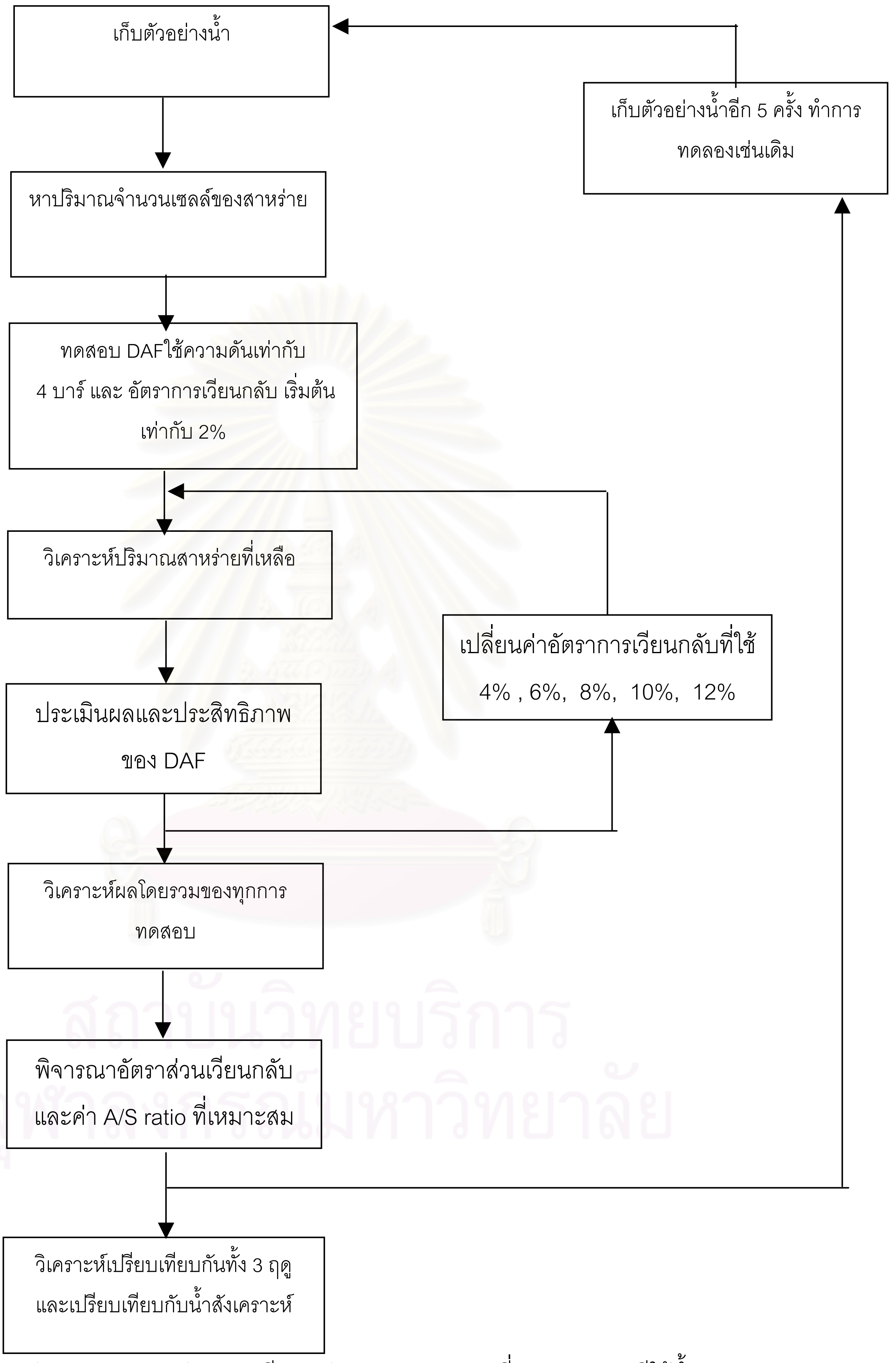
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1.2 กรณีใช้น้ำจากแหล่งน้ำที่มีสาหร่าย

มีขั้นตอนดังนี้

1. เก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำที่มีสาหร่าย (ในที่นี้ใช้น้ำจากบ่อ polishing pond) และวัดหาปริมาณจำนวนเซลล์ของสาหร่าย
2. นำตัวอย่างน้ำที่เตรียมไว้มาทำการทดลอง DAF โดยใช้ความดัน 4 บาร์ และใช้อัตราส่วนเวียนน้ำกลับมาอัดอากาศเริ่มต้นที่ 2%
3. วิเคราะห์หาปริมาณสาหร่ายที่เหลือ
4. ประเมินผลการทดลอง
5. ทำการทดลองเช่นเดิมตั้งแต่ข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนอัตราเวียนน้ำกลับมาอัดอากาศเป็น 4%, 6%, 8%, 10% และ 12% ตามลำดับ
6. คำนวณประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละการทดสอบ
7. วิเคราะห์ผลของทุกการทดสอบเพื่อพิจารณาเลือกอัตราการเวียนกลับที่เหมาะสมและคำนวณหาค่า A/S ratio

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 แผนผังการทดลองหาอัตราการเวียนกลับและค่า A/S ratioที่เหมาะสม กรณีใช้น้ำจาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

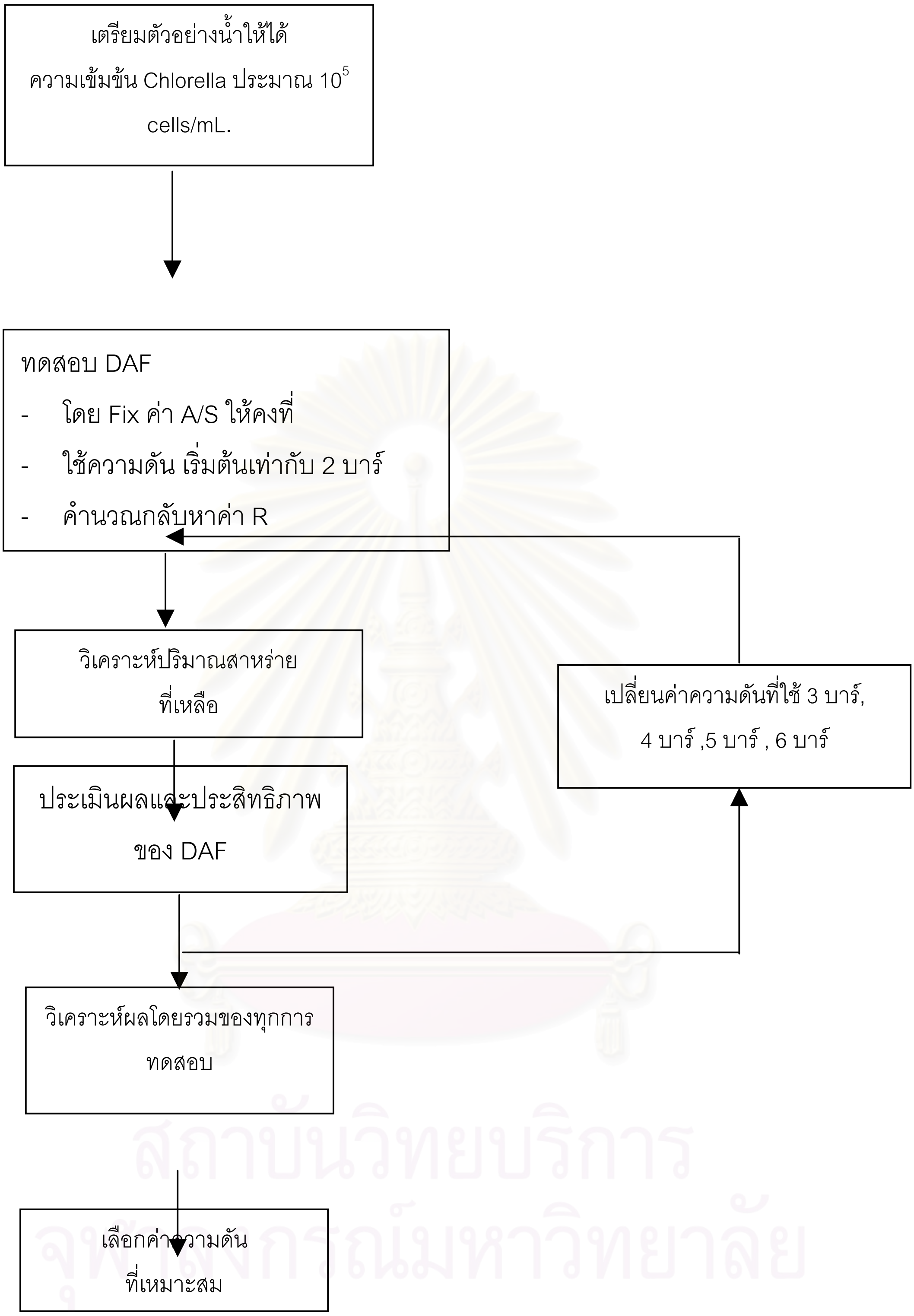
แหล่งน้ำ

3.2.2 การทดลองหาค่าความดันที่เหมาะสม

มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างน้ำโดยใช้น้ำประปาผสมกับน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ โดยให้มีความเข้มข้นของสาหร่ายโดยประมาณ 10^5 cells/mL
2. ควบคุมค่า A/S ratio ที่จะใช้ให้คงที่ โดยใช้ค่า A/S ซึ่งได้จากการทดลอง 3.2.1
3. ทำการทดสอบกับอุปกรณ์ DAF โดยใช้ความดันเริ่มต้นที่ 2 บาร์ และคำนวณกลับหาค่าอัตราการเวียนกลับที่ใช้จากสมการที่ 2.3
4. วิเคราะห์หาปริมาณสาหร่ายที่เหลือ
5. ประเมินผลการทดลอง
6. ทำการทดลองเช่นเดิมตั้งแต่ข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนค่าความดันที่ใช้ในการอัดอากาศเป็น 3, 4, 5 และ 6 บาร์ ตามลำดับ
7. คำนวณประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละการทดสอบ
8. วิเคราะห์ผลของทุกการทดสอบ พิจารณาเลือกค่าความดันที่เหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 แผนผังการทดลองหาค่าความดันที่เหมาะสม

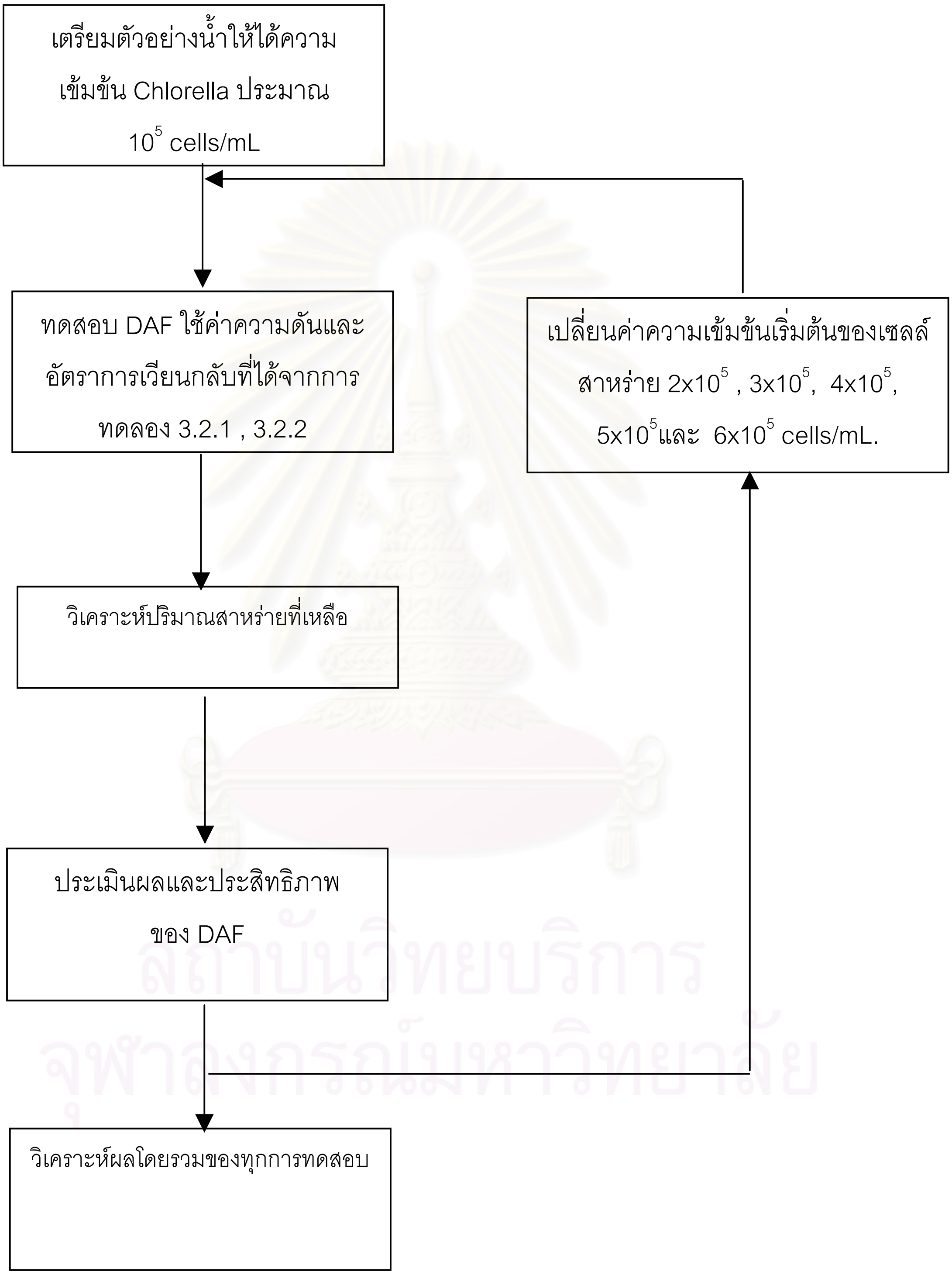
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.3 การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของสาหร่าย

มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างน้ำโดยใช้น้ำประปาผสมกับน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ โดยให้มีความเข้มข้นของสาหร่ายโดยประมาณ 10^5 cells/mL
2. ทำการทดสอบกับอุปกรณ์ DAF โดยใช้ค่าอัตราการเวียนกลับและค่าความดันที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.2.1 และ 3.2.2
3. วิเคราะห์หาปริมาณสาหร่ายที่เหลือ
4. ประเมินผลการทดลอง
5. ทำการทดลองเช่นเดิม ตั้งแต่ข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนปริมาณความเข้มเข้นของสาหร่ายเริ่มต้น (initial feed concentration) เป็น $2x10^5$, $3x10^5$, $4x10^5$, $5x10^5$ และ $6x10^5$ cells/mL
6. คำนวณประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละการทดสอบ
7. วิเคราะห์ผลของทุกการทดสอบ พิจารณาว่าปริมาณความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายมีผลต่อประสิทธิภาพกระบวนการ DAF อย่างไร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 แผนผังการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของสาหร่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

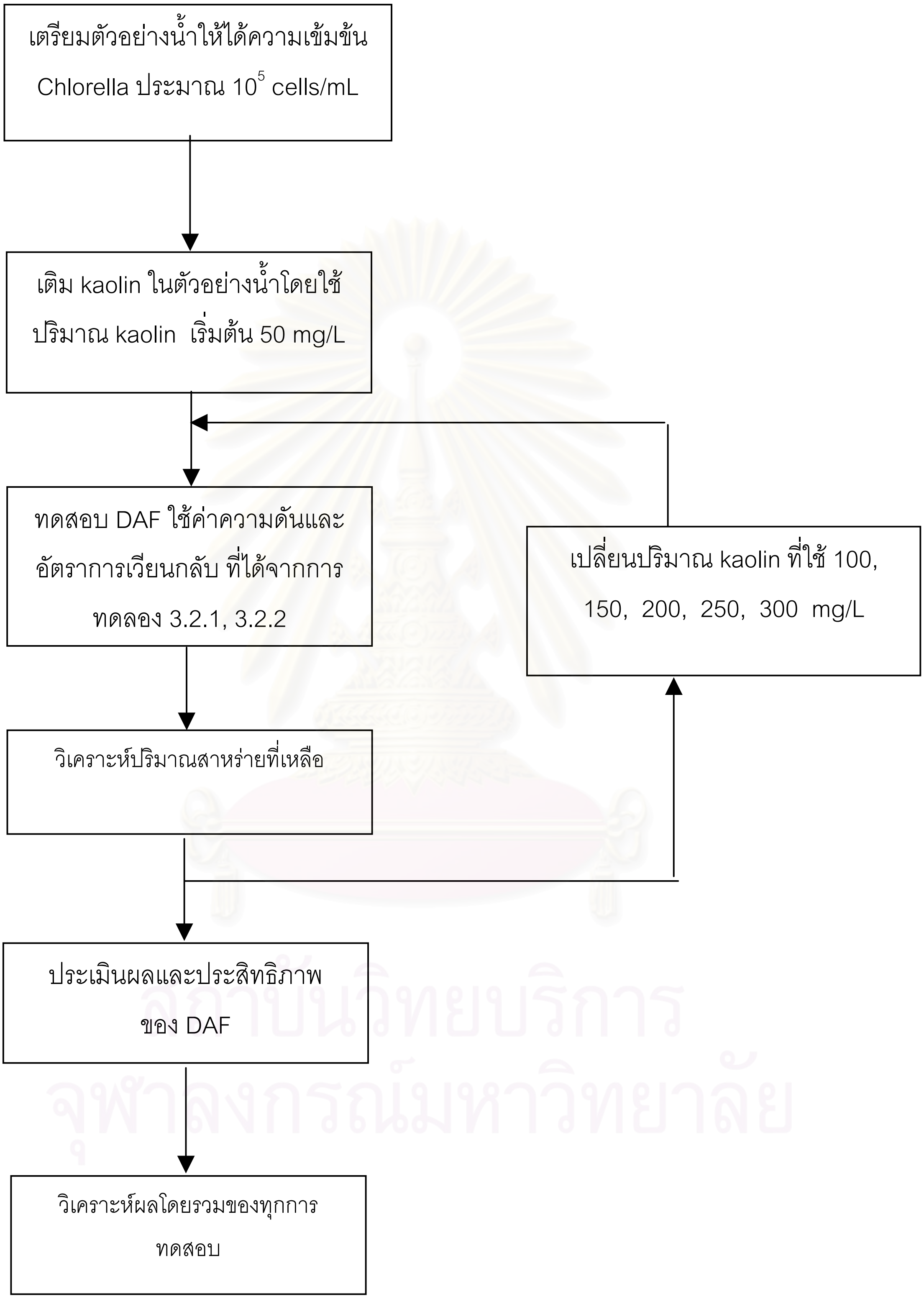
3.2.4 การทดลองศึกษาผลของความขุ่นและกรดฮิวมิก

3.2.4.1 การทดลองศึกษาผลของความขุ่น

มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างน้ำโดยใช้น้ำประปาผสมกับน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ โดยให้มีความเข้มข้นของสาหร่ายโดยประมาณ 10^5 cells/mL
2. เติม kaolin เพื่อเป็นตัวแทนของความขุ่นลงในตัวอย่างน้ำในข้อ 1 โดยใช้ปริมาณ kaolin เริ่มต้นที่ 50 mg/L
3. ทำการทดสอบกับอุปกรณ์ DAF โดยใช้ค่าอัตราการเวียนกลับและค่าความดันที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.2.1 และ 3.2.2
4. วิเคราะห์หาปริมาณสาหร่ายที่เหลือ
5. ประเมินผลการทดลอง
6. ทำการทดลองเช่นเดิมตั้งแต่ข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนปริมาณ kaolin ที่ใช้เป็น 100, 150, 200, 250 และ 300 mg/L ตามลำดับ
7. คำนวณประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละการทดสอบ
8. วิเคราะห์ผลของทุกการทดสอบ พิจารณาว่าความขุ่นมีผลต่อประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายหรือไม่อย่างไร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลองศึกษาผลของความขุ่น

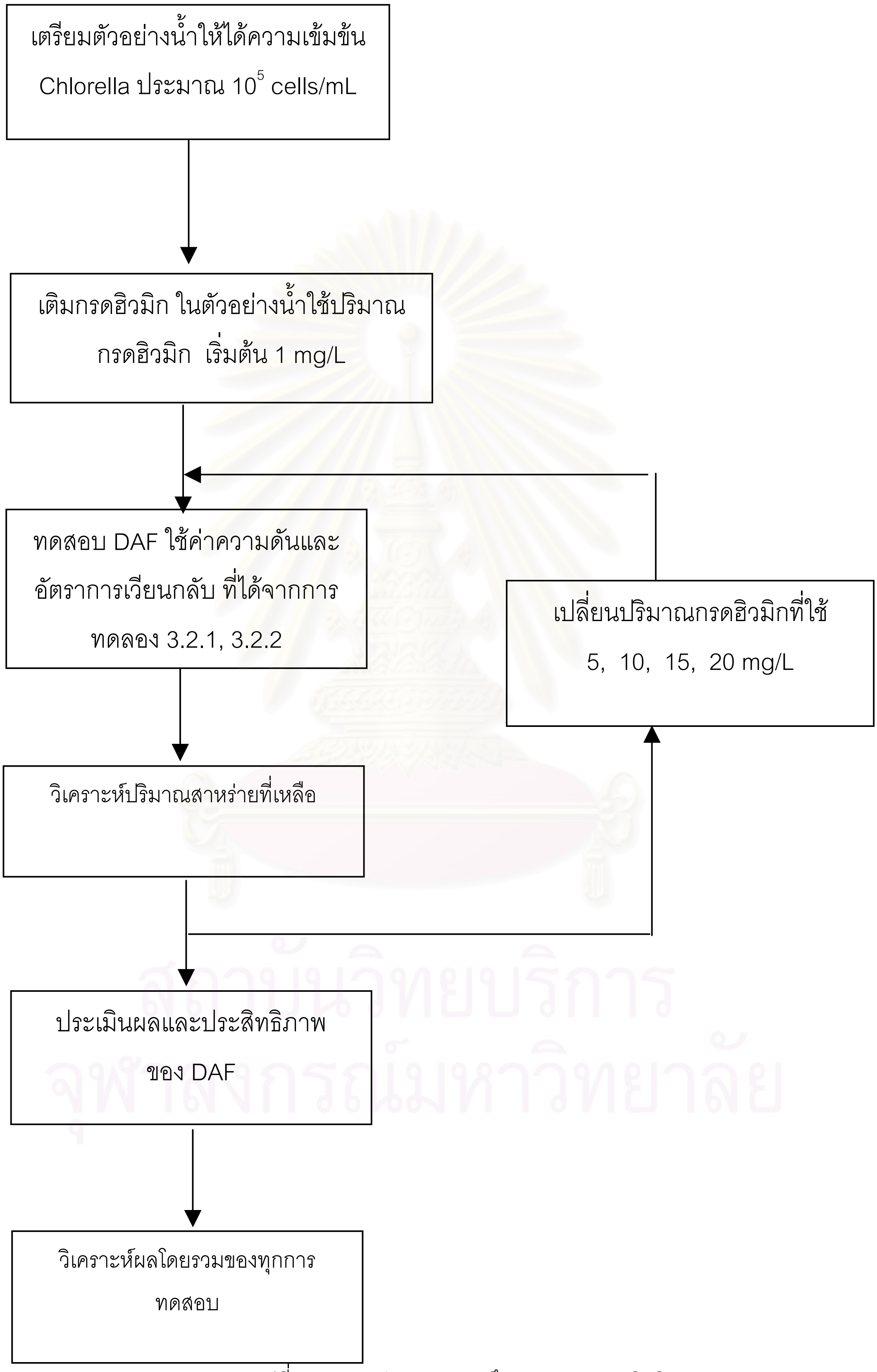
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.4.2 การทดลองศึกษาผลของกรดฮิวมิก

มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างน้ำโดยใช้น้ำประปาผสมกับน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ โดยให้มีความเข้มข้นของสาหร่ายโดยประมาณ 10^5 cells/mL
2. เติมกรดฮิวมิก ลงในตัวอย่างน้ำในข้อ 1 โดยใช้ปริมาณกรดฮิวมิก เริ่มต้นที่ 1 mg/L
3. ทำการทดสอบกับอุปกรณ์ DAF โดยใช้ค่าอัตราการเวียนกลับและค่าความดันที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.2.1 และ 3.2.2
4. วิเคราะห์หาปริมาณสาหร่ายที่เหลือ
5. ประเมินผลการทดลอง
6. ทำการทดสอบเช่นเดิมตั้งแต่ข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนปริมาณกรดฮิวมิก ที่ใช้เป็น 5, 10, 15 และ 20 mg/L ตามลำดับ
7. คำนวณประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละการทดสอบ
8. วิเคราะห์ผลของทุกการทดสอบ พิจารณาว่ากรดฮิวมิกมีผลต่อประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายหรือไม่อย่างไร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



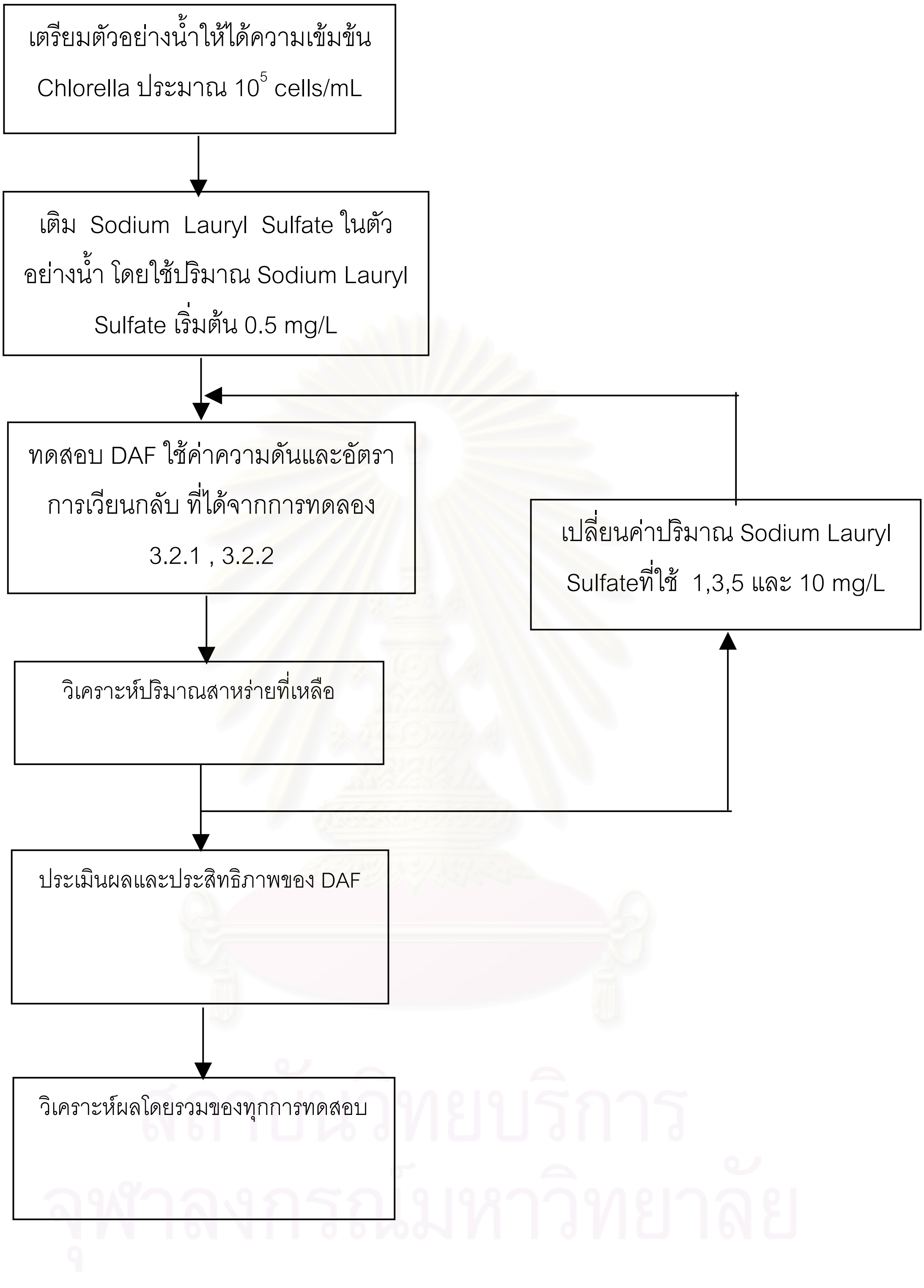
รูปที่ 3.6 แผนผังการทดลองศึกษาผลของกรดฮิวมิก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.5 การทดลองศึกษาผลของ Sodium Lauryl Sullfate
มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างน้ำโดยใช้น้ำประปาผสมกับน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ โดยให้มีความเข้มข้นของสาหร่ายโดยประมาณ 10^5 cells/mL
2. เติม Sodium Lauryl Sulfate ลงในตัวอย่างน้ำในข้อ 1 โดยใช้ปริมาณ Sodium Lauryl Sulfate เริ่มต้นที่ 0.5 mg/L
3. ทำการทดสอบกับอุปกรณ์ DAF โดยใช้ค่าอัตราการเวียนกลับและค่าความดันที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.2.1 และ 3.2.2
4. วิเคราะห์หาปริมาณสาหร่ายที่เหลือ
5. ประเมินผลการทดลอง
6. ทำการทดลองเช่นเดิมตั้งแต่ข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนปริมาณ Sodium Lauryl Sulfate ที่ใช้เป็น 1, 3, 5 และ 10 mg/L ตามลำดับ
7. คำนวณประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละการทดสอบ
8. วิเคราะห์ผลของทุกการทดสอบ พิจารณาว่า Sodium Lauryl Sulfate มีผลต่อประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายหรือไม่อย่างไร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



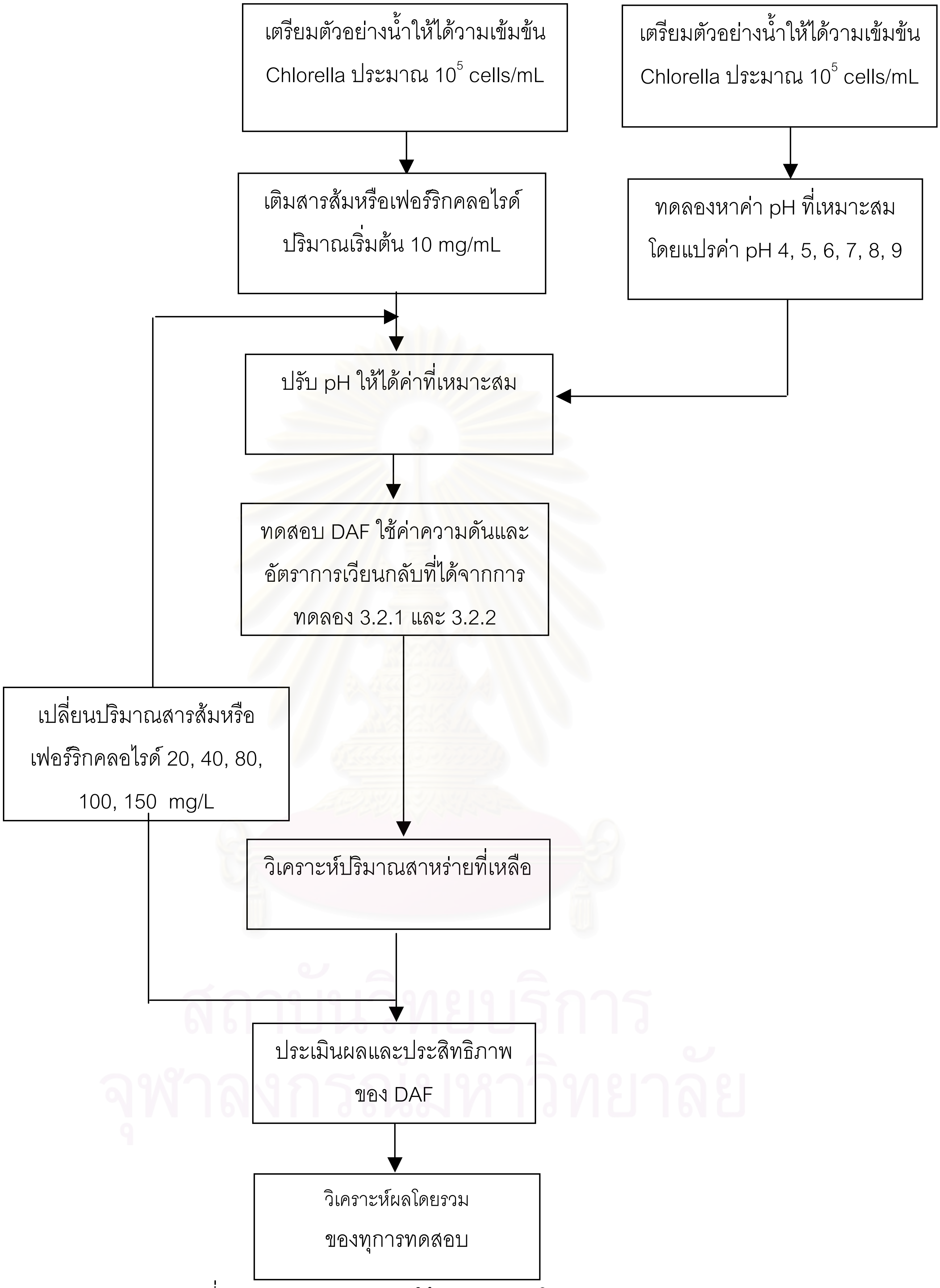
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.7 แผนผังการทดลองศึกษาผลของ Sodium Lauryl Sulfate

3.2.6 การทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน ร่วมกับกระบวนการ DAF มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างน้ำโดยใช้น้ำประปาผสมกับน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ โดยให้มีความเข้มข้นของสาหร่ายโดยประมาณ 10^5 cells/mL
2. นำตัวอย่างน้ำมาหาค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในการทดลอง คือ สารส้มโดยแปรค่า pH ที่ใช้เท่ากับ 4,5,6,7,8 และ 9 มาทำการทดสอบ และเลือก pH ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งได้ประสิทธิภาพสูงสุด
3. ใช้ตัวอย่างน้ำเช่นเดียวกับในข้อ 1 มาหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม โดยทดลองใช้ปริมาณสารส้มเริ่มต้นเท่ากับ 10 mg/L
4. ปรับ pH ให้ได้ค่า pH ที่เหมาะสมตามผลในข้อ 2
5. นำตัวอย่างน้ำซึ่งเติมโคแอกกูแลนท์และปรับ pH แล้วมาทดสอบกับอุปกรณ์ DAF
6. วิเคราะห์หาปริมาณสาหร่ายที่เหลือ
7. ประเมินผลการทดลอง
8. ทำการทดลองเช่นเดิมตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 7 โดยเปลี่ยนปริมาณสารส้มที่ใช้เป็น 20, 40, 80, 100 และ 150 mg/L ตามลำดับ
9. ทำการทดลองเช่นเดิมตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 8 โดยเปลี่ยนโคแอกกูแลนท์ที่ใช้เป็น เฟอร์ริกคลอไรด์
10. คำนวณประสิทธิภาพในแต่ละการทดสอบ
11. วิเคราะห์ผลของทุกการทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 แผนผังการทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับ DAF

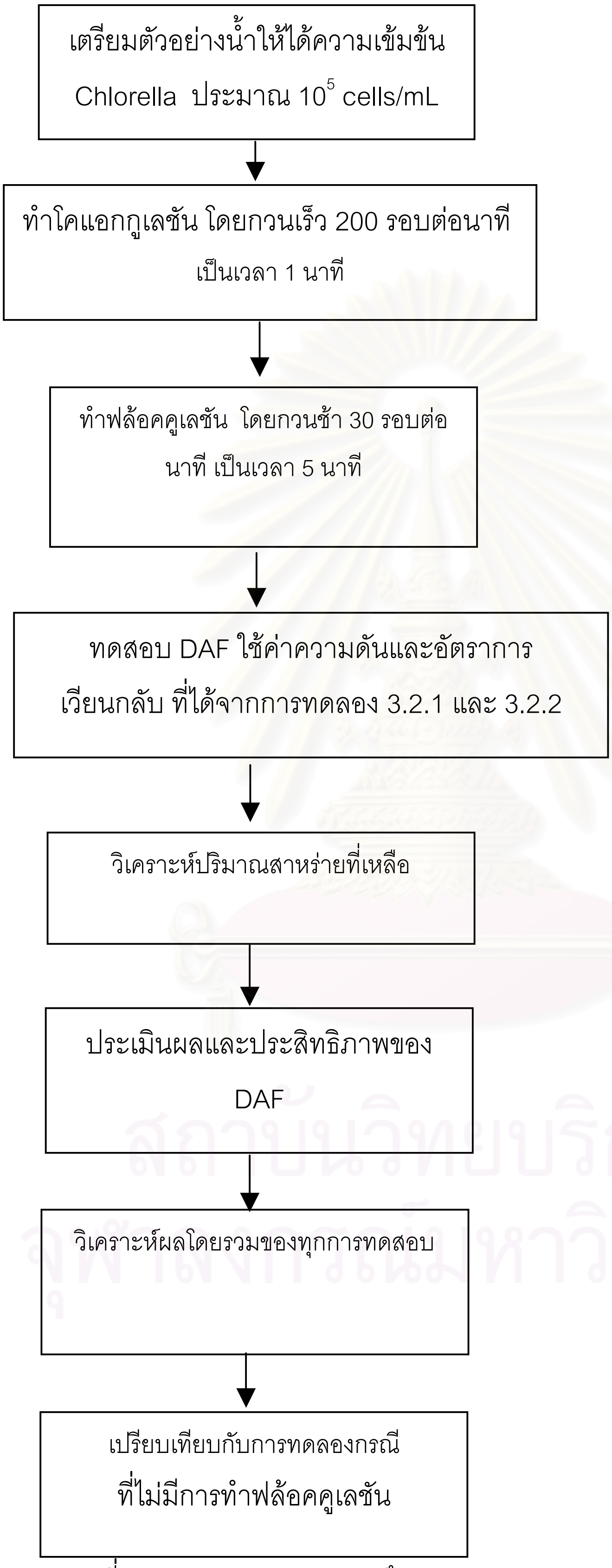
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.7 การทดลองศึกษาผลของกระบวนการฟล้อคคูเลชันที่มีต่อ DAF

มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างน้ำโดยใช้น้ำประปาผสมกับน้ำสาหร่ายที่เลี้ยงไว้ โดยให้มีความเข้มข้นของสาหร่ายโดยประมาณ 10^5 cells/mL
2. ทำโคแอกกูเลชันโดยทำการกวนเร็วโดยใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที แล้วทำฟล้อคคูเลชัน โดยการกวนช้าใช้ความเร็วรอบที่ 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
3. นำตัวอย่างน้ำจากข้อ 3 ไปทดสอบกับอุปกรณ์ DAF โดยใช้ค่าอัตราการเวียนกลับและความดันที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.2.1 และ 3.2.2
4. วิเคราะห์หาปริมาณสาหร่ายที่เหลือ
5. ประเมินผลการทดลอง
6. คำนวณประสิทธิภาพการบำบัด
7. วิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการทำฟล้อคคูเลชันในการทดลองที่ 3.2.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 แผนผังการทดลองศึกษาผลของกระบวนการฟล้อคคูเลชันที่มีต่อ DAF

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา

3.3.1 พารามิเตอร์กำหนด

- ขนาดของ Pressure tank 3 ลิตร
- ขนาดของ Flotation Vessel 5 ลิตร
- ปริมาณสาหร่ายเริ่มต้น 10^5 cells/mL

3.3.2 พารามิเตอร์อิสระ

- ปริมาณ kaolin 50, 100, 150, 200, 250, 300 mg/L
- ปริมาณกรดฮิวมิก 1, 5, 10,15 , 20 mg/L
- ปริมาณ sodium lauryl sulfate 0.5, 1, 3, 5, 10 mg/L
- สารเคมีที่ใช้เป็นโคแอกกูแลนท์ ใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์
- ความดันที่ใช้ 2, 3, 4, 5, 6 บาร์

3.3.3 พารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง

- ปริมาณสาหร่ายที่เหลือ

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- ชุดเครื่องมือทดสอบระบบ DAF ระดับห้องปฏิบัติการ (รูปที่ 3.10) ประกอบด้วย เครื่องอัดอากาศ ถังความดันความจุประมาณ 3 ลิตร และถังทำให้ลอย
  ความจุประมาณ 5 ลิตร
- มาตรวัดพีเอช
- อุปกรณ์ จาร์เทสต์ (jar test)
- กล้องจุลทรรศน์
- counting chamber
- เครื่องวัดความขุ่น
- เครื่องแก้ว

3.5 วิธีวิเคราะห์ปริมาณสาหร่าย

วัดปริมาณของสาหร่ายโดยใช้ counting chamber นับจำนวนเซลล์ของสาหร่าย (วิธีการนับแสดงในภาคผนวก ข.)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6 วิธีใช้ระบบ DAF ในระดับห้องปฏิบัติการ

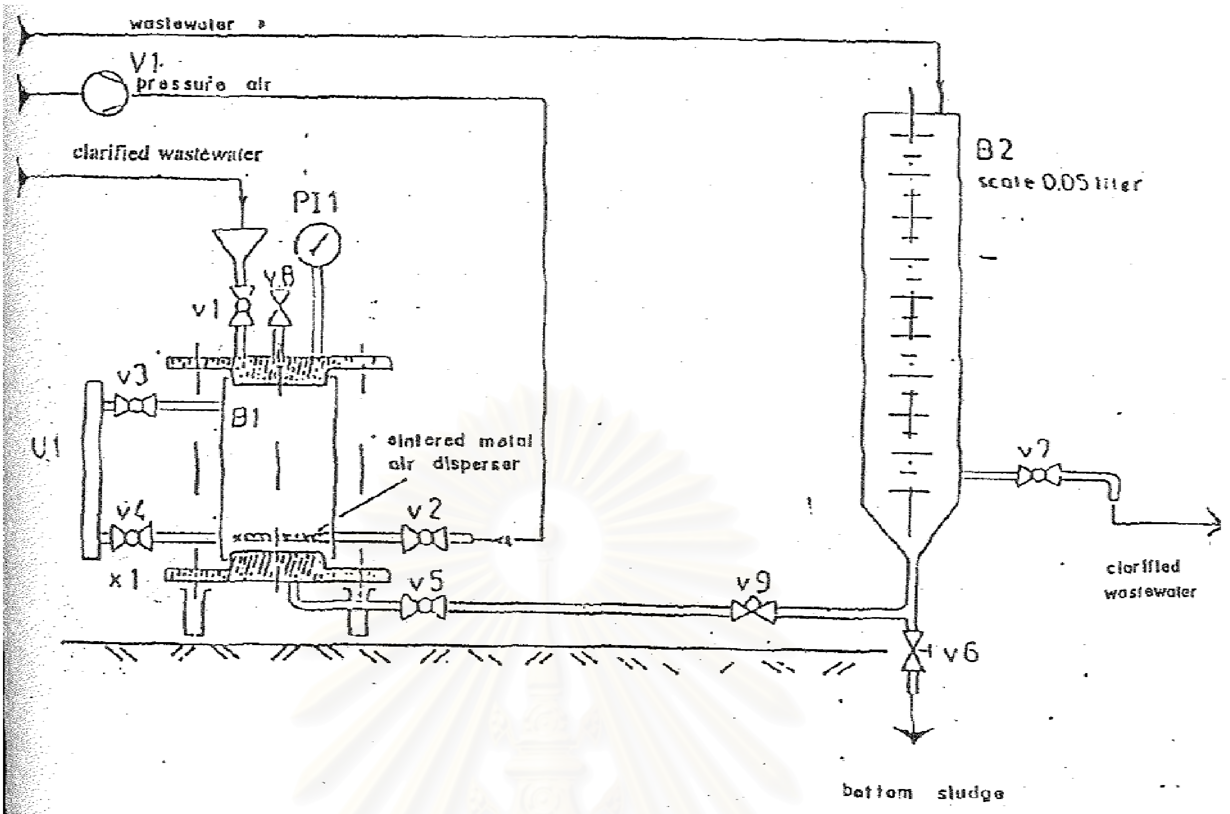
เครื่องอัดอากาศ (V1) และถังความดัน (B1)

- เปิดวาล์วน้ำเข้า v1 เปิดวาล์ว v2 เดินเครื่องอัดอากาศ V1
- ปรับวาล์วความดันของเครื่องอัดอากาศ และสังเกตอากาศที่ออกจากวาล์ว v1 และ v8
- ปิดวาล์วความดัน (v8) สังเกตความดันที่เพิ่มขึ้น (PI 1)
- ปรับความดันในเครื่องอัดอากาศในช่วงที่ต้องการควบคุม
- ปรับอัตราการไหลของอากาศเข้าถังความดันให้มีค่าต่ำๆ โดยปิดวาล์วความดัน v8 รักษาความดันอากาศในถังความดันให้ต่ำกว่าเครื่องอัดอากาศประมาณ 0.1 บาร์
- ให้น้ำอิ่มตัวด้วยอากาศประมาณ 4 นาที (ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40^0 C)
- ปิดวาล์ว v8 และปรับความดันในถังความดันให้ได้ความดันที่จะทำการทดสอบ โดยปรับวาล์วความดันเครื่องอัดอากาศ V1

ถังทำให้ลอย (B2)

- เติมน้ำเสียด้านบนถัง B2
- เปิดวาล์ว v5, v9 และปรับอัตราการไหลของน้ำอัดอากาศเท่ากับอัตราการเวียนกลับที่จะทำการทดสอบ
- ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาทีเพื่อให้ฟองอากาศพาอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ลอยขึ้นสู่ผิวหน้า
- ระบายน้ำใสออกทางวาล์ว v7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



B1 = Pressure Vessel

B2 = Floatation Vessel

V1 = Compressor

v1 = Water inlet ball valve

v2 = Air inlet ball valve

v3,v4 = Vessel

v5,v6,v7 = Wter outlet ball valve

v8 = Savety valve

v9 = Saturated water inlet dosing valve

U1 = Level Indicator

PI1 = Pressure Indicator

รูปที่ 3.10 แสดงส่วนประกอบของชุดเครื่องมือระบบ DAF

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 การทดลองหาค่าอัตราการเวียนกลับและอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็ง (A/S ratio)ที่เหมาะสม

การทดลองในขั้นตอนนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างน้ำสังเคราะห์ โดยใช้สาหร่าย mono culture สายพันธุ์ Chlorella ซึ่งเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ กับน้ำจากแหล่งน้ำที่มีสาหร่าย

4.1.1 กรณีใช้น้ำสังเคราะห์

มีขั้นตอนการทดลอง คือ ใช้ตัวอย่างน้ำที่เตรียมให้มีความเข้มข้นของ Chlorella ประมาณ 10^5 cells/mL มาทดสอบกับชุดเครื่องมือ DAF โดยใช้ความดันเท่ากับ 4 บาร์ และแปรค่าอัตราการเวียนกลับ 2%, 4%, 6%, 8%, 10% และ 12% หลังจากทดสอบกับ DAF เสร็จเรียบร้อยแล้ว วิเคราะห์หาจำนวนเซลล์ของสาหร่ายที่เหลือ เพื่อหาประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายที่อัตราการเวียนกลับหรือ A/S ratio ค่าต่างๆ รายละเอียดผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาค่าอัตราการเวียนกลับและ A/S ratio ที่เหมาะสม กรณีใช้น้ำสังเคราะห์

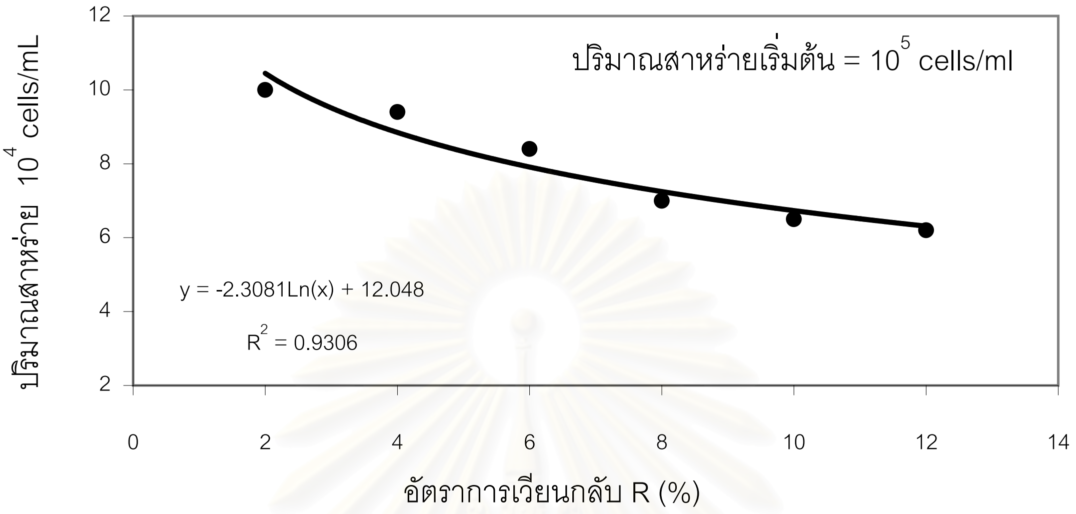
อัตราการเวียนกลับ R (%)	สาหร่ายที่เหลือ 10^4 cells/mL	A/S ratio	ประสิทธิภาพ (%)
2	10	0.055	0
4	9.4	0.110	2.24
6	8.4	0.165	10.96
8	7.0	0.220	24.40
10	6.5	0.275	28.50
12	6.2	0.329	30.56

จากผลการทดลอง พิจารณาได้ว่า เมื่อเพิ่มค่าอัตราการเวียนน้ำกลับมาอัดอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็ง (A/S ratio) เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF จะสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอัตราการเวียนน้ำกลับมาอัดอากาศ หรือการเพิ่มค่า A/S ratio ทำให้ปริมาณอากาศ หรือปริมาณความเข้มข้นของฟองอากาศ (bubble volume concentration, ϕ_b) เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพจึงสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่า ในช่วงอัตราการเวียนกลับที่ใช้ ประสิทธิภาพของ DAF ค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะที่อัตราการเวียนกลับ 2% ไม่สามารถกำจัดสาหร่ายออกได้เลย ในขณะที่อัตราการเวียนกลับ 12% มีประสิทธิภาพกำจัดสาหร่ายเพียง 30.56% หรือเหลือจำนวนเซลล์ของ Chlorella ในน้ำใส 62,000 cells/mL ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ

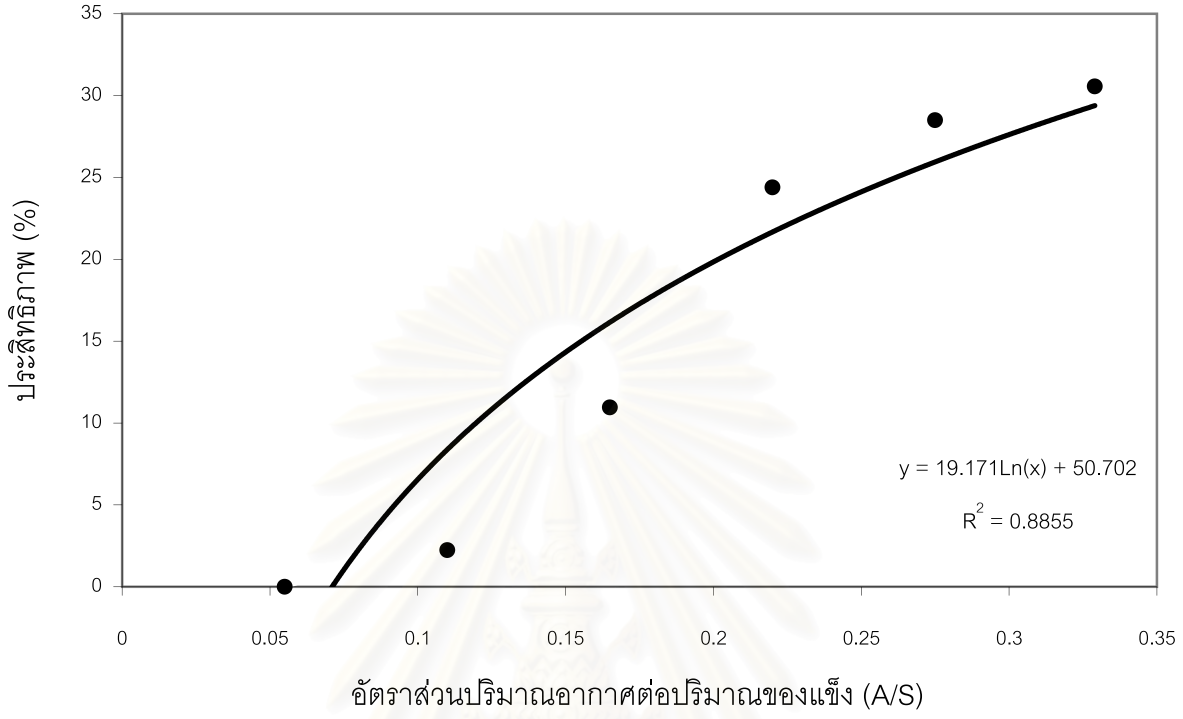
จากผลการทดลองที่ได้นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเซลล์สาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF กับอัตราการเวียนกลับค่าต่างๆ (รูปที่ 4.1) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายกับอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็ง (A/S) ดังรูปที่ 4.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ที่อัตราการเวียนกลับค่าต่างๆ สำหรับน้ำสังเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายที่อัตราการเวียนกลับค่าต่าง ๆ สำหรับน้ำสังเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาจากรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 พบว่าในช่วงอัตราการเวียนกลับตั้งแต่ 2% ถึง 8% ประสิทธิภาพของ DAF มีอัตราการเพิ่มที่ค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในช่วงอัตราการเวียนกลับในช่วงที่มากกว่า 10% พบว่ามีอัตราการเพิ่มที่เริ่มน้อยลง ดังนั้นอัตราการเวียนน้ำกลับเพื่ออัดอากาศที่เหมาะสมน่าจะอยู่ในช่วง 8% ถึง 10% หรือคิดเป็นอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็ง (A/S ratio) เท่ากับ 0.220 ถึง 0.275 ตามลำดับ

4.1.2 กรณีใช้น้ำจากแหล่งน้ำที่มีสาหร่าย

ในที่นี้เลือกเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อ polishing pond เนื่องจากพบว่ามีปริมาณสาหร่ายค่อนข้างสูง มีขั้นตอนคือ เก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อ polishing pond มาตรวจวัดปริมาณเซลล์สาหร่ายแล้วทำการทดสอบกับชุดเครื่องมือ DAF โดยใช้ความดัน 4 บาร์ และแปรค่าอัตราการเวียนกลับ 2%, 4%, 6%, 8%, 10% และ12% เช่นเดียวกันกับในกรณีของน้ำสังเคราะห์ที่ใช้สาหร่าย Chlorella ตัวอย่างน้ำจาก polishing pond นำมาหาปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นและนับปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังจากผ่านกระบวนการ DAF ที่อัตราการเวียนกลับค่าต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นและปริมาณสาหร่ายที่เหลือในตัวอย่างน้ำจาก polishing pond หลังจากผ่านกระบวนการ DAF

ครั้งที่	สาหร่ายเริ่มต้น 10^4 cells/mL	สาหร่ายที่เหลือ (10^4 cells/mL)ที่ค่า R ต่างๆ					
		2%	4%	6%	8%	10 %	12 %
1 (เมษายน)	5.2	5.2	4.4	3.6	3.0	2.8	2.4
2 (พฤษภาคม)	4.8	4.6	3.8	3.2	3.0	2.4	2.2
3 (สิงหาคม)	4.4	4.4	3.8	3.4	3.4	2.6	2.4
4 (กันยายน)	3.8	3.8	3.4	2.8	2.2	2.0	1.8
5 (ธันวาคม)	5.2	5.0	4.4	3.8	3.0	2.4	2.2
6 (มกราคม)	6.0	5.8	5.0	4.0	3.2	3.2	2.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

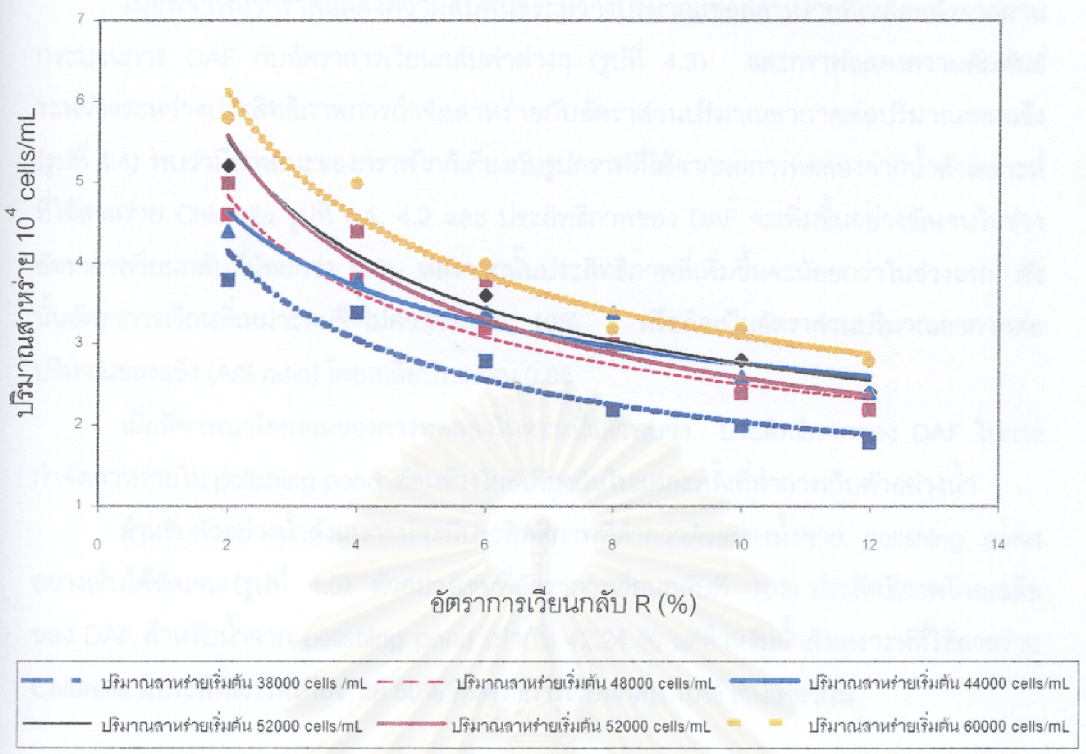
จากผลการทดลองที่ได้ คำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายที่อัตราการเวียนกลับค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็ง (A/S ratio) กับประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง ลักษณะของกราฟแสดงในรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 แสดงประสิทธิภาพ (E) ของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายในกรณีใช้ตัวอย่าง

น้ำจากpolishing pond

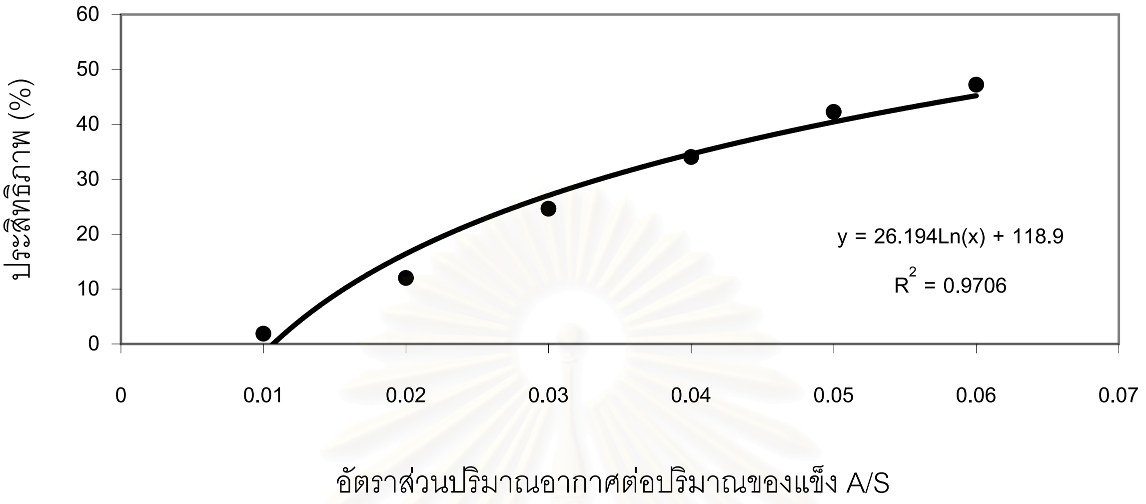
R %	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5		ครั้งที่ 6	
	A/S	E	A/S	E	A/S	E	A/S	E	A/S	E	A/S	E
2	0.01	0	0.009	2.25	0.010	0	0.011	0	0.010	1.92	0.009	1.40
4	0.019	12	0.019	17.67	0.020	10.18	0.023	6.95	0.019	12	0.018	13.33
6	0.029	26.62	0.028	29.33	0.030	18.09	0.034	21.89	0.029	22.54	0.027	29.33
8	0.039	37.69	0.037	32.50	0.041	16.55	0.045	37.47	0.039	37.69	0.036	42.4
10	0.048	40.77	0.047	44.99	0.051	35	0.057	42.10	0.049	49.23	0.045	41.33
12	0.058	48.31	0.056	48.67	0.061	38.91	0.068	46.95	0.058	52.62	0.054	47.73

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ที่อัตราการเวียนกลับค่าต่าง ๆ สำหรับตัวอย่างน้ำจาก Polishing pond

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายที่อัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็ง ค่าต่าง ๆ สำหรับตัวอย่างน้ำจาก polishing pond

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

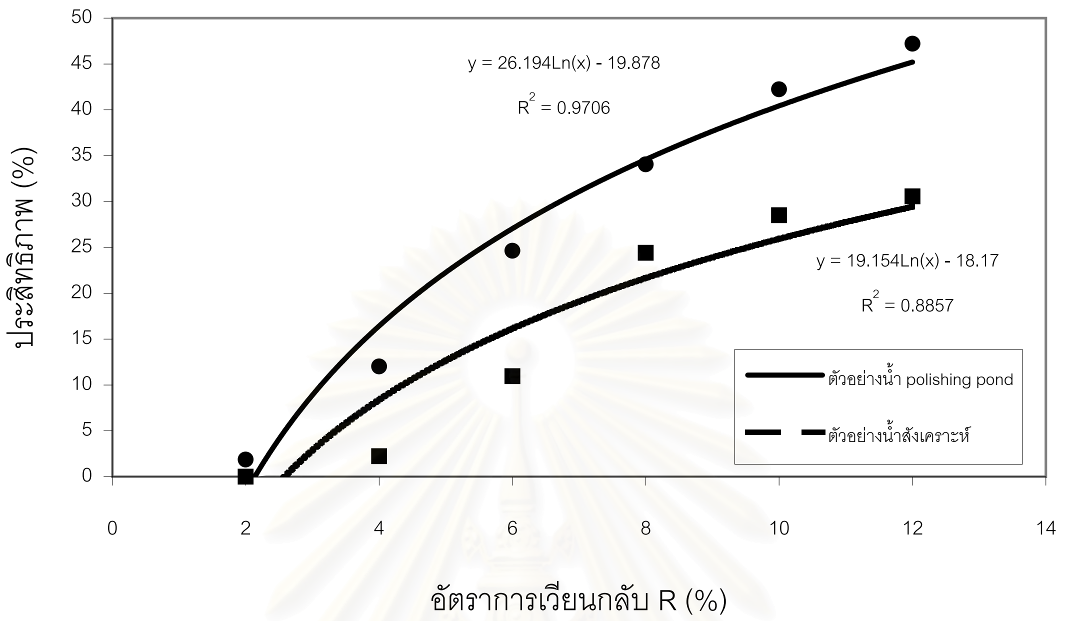
เมื่อพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลล์สาหร่ายที่เหลือหลังจากผ่านกระบวนการ DAF กับอัตราการเวียนกลับค่าต่างๆ (รูปที่ 4.3) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายกับอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็ง (รูปที่ 4.4) พบว่ามีลักษณะของกราฟใกล้เคียงกับรูปกราฟที่ได้จากผลการทดลองจากน้ำสังเคราะห์ที่ใช้สาหร่าย Chlorella รูปที่ 4.1, 4.2 และ ประสิทธิภาพของ DAF จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงอัตราการเวียนกลับที่น้อยกว่า 10% หลังจากนั้นประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจะน้อยกว่าในช่วงแรก ดังนั้นอัตราการเวียนที่เหมาะสมจึงไม่ควรต่ำกว่า 10% หรือคิดเป็นอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็ง (A/S ratio) โดยเฉลี่ยประมาณ 0.05

เมื่อพิจารณาโดยรวมของการทดลองในตอนนี้แล้วพบว่า ประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายใน polishing pond ค่อนข้างใกล้เคียงกันในแต่ละครั้งที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำ

สำหรับตัวอย่างน้ำสังเคราะห์จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าตัวอย่างน้ำจาก polishing pond อย่างเห็นได้ชัดเจน (รูปที่ 4.5) ตัวอย่างเช่นที่อัตราการเวียนกลับที่ 10% ประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของ DAF สำหรับน้ำจาก polishing pond เท่ากับ 42.24 % แต่สำหรับน้ำสังเคราะห์ที่ใช้สาหร่าย Chlorella มีประสิทธิภาพเพียง 28.50% ที่อัตราการเวียนกลับ 10% เช่นเดียวกัน

สาเหตุที่ประสิทธิภาพของ DAF เมื่อใช้น้ำสังเคราะห์ (สาหร่าย Chlorella) มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าเมื่อใช้ตัวอย่างน้ำจาก polishing pond ทั้งนี้เนื่องจากว่าขนาดและรูปร่างของ Chlorella ซึ่งมีลักษณะเป็นเซลล์กลม ขนาดไม่เกิน 10 μm. ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างน้ำจาก polishing pond ซึ่งเป็นสาหร่าย multi culture โดยสาหร่ายพันธุ์อื่น ๆที่พบในตัวอย่างน้ำจาก polishing pond มีหลายชนิด เช่น Spilurina,Uglena,Oscillatoria ซึ่งขนาดและรูปร่างของเซลล์สาหร่ายค่อนข้างหลากหลายและมีขนาดโดยเฉลี่ยใหญ่กว่า Chlorella ดังนั้นโอกาสที่จะถูกพาให้ลอยขึ้นโดยฟองอากาศจึงมีมากกว่า ประสิทธิภาพของ DAF จึงสูงกว่าในกรณีที่ใช้น้ำสังเคราะห์ซึ่งเป็นสาหร่าย mono culture

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างน้ำสังเคราะห์กับตัวอย่างน้ำจาก polishing pond

4.2 การทดลองหาค่าความดันที่เหมาะสม

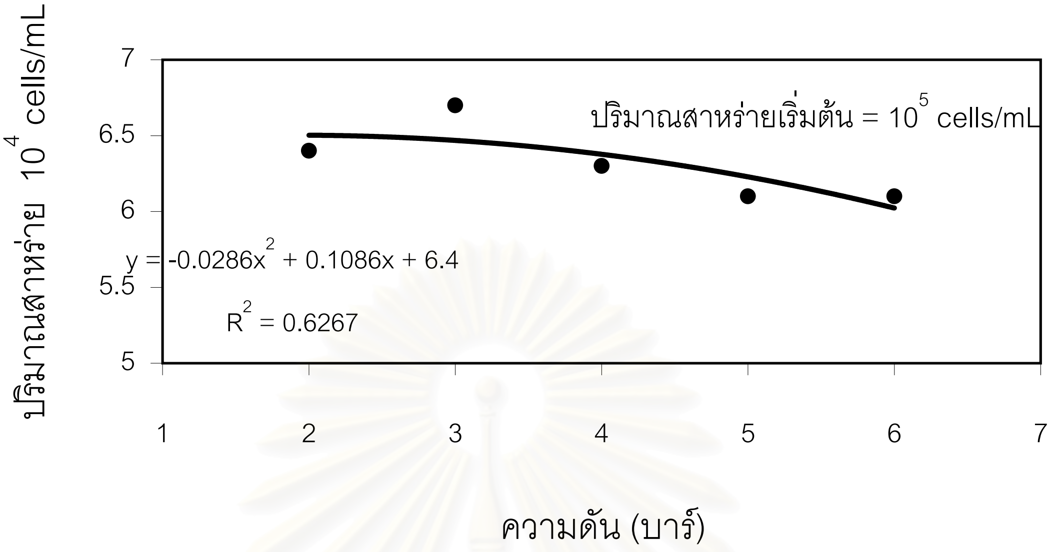
ทำการทดลองโดยใช้น้ำสังเคราะห์ โดยมีความเข้มข้นของสาหร่าย Chlorella ประมาณ 10^5 cells/mL ทดสอบกับอุปกรณ์ DAF โดยจะแปรค่าความดันที่ใช้ 2, 3, 4, 5 และ 6 บาร์ ทั้งนี้จะต้องรักษาค่า A/S ratio ให้มีค่าคงที่สำหรับในแต่ละความดันที่ใช้ในทุกการทดลอง ในที่นี้กำหนดค่า A/S ratio ที่จะใช้เท่ากับ 0.25 และจากสูตรในสมการที่ 2.3 คำนวณค่าปริมาณน้ำเวียนกลับ (R)ในแต่ละความดัน หลังจากผ่านกระบวนการ DAF แล้ว วัดปริมาณสาหร่ายที่เหลือ และหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF ที่ความดันค่าต่างๆ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองหาค่าความดันที่เหมาะสม

ความดัน (บาร์)	อัตราการเวียนกลับ (%)	สาหร่ายที่เหลือ 10^4 cells/mL	ประสิทธิภาพ (%)
2	41	6.4	9.76
3	15	6.7	22.95
4	9	6.3	31.33
5	7	6.1	34.73
6	5	6.1	35.95

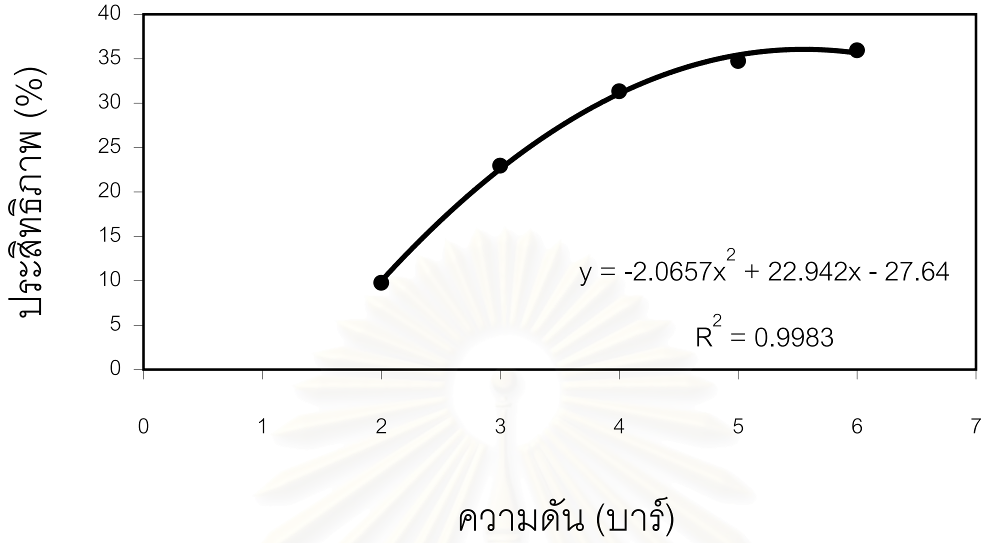
จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF ในแต่ละค่าของความดันที่ใช้จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อความดันเพิ่มขึ้น โดยมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยต่ำสุด 9.76 % ที่ความดัน 2 บาร์ และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุด 35.95 % ที่ความดัน 6 บาร์ กราฟผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ที่ความดันค่าต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF ที่ความดันต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดลองนี้ที่ความดันสูงประสิทธิภาพของ DAF จะดีกว่าที่ความดันต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากว่า เมื่อใช้ค่าความดันต่ำ ขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้เกิดความปั่นป่วน (turbulence) ในถังทำให้ลอย เป็นสาเหตุให้การลอยขึ้นของฟองอากาศและอนุภาคถูกรบกวนจากความปั่นป่วนนั้น ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคจึงต่ำและฟองอากาศซึ่งมีขนาดเล็ก (เมื่อใช้ความดันสูง) จะทำให้มีค่า Single-Collector Collision Efficiency (SCCE) และ Bubble-Filter Efficiency (BFE) สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพของ DAF เพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้ความดันในช่วงที่สูงขึ้นตั้งแต่ 5 บาร์ ถึง 6 บาร์ ประสิทธิภาพของ DAF ยังคงเพิ่มขึ้น แต่ไม่มากนัก แสดงว่าความดันที่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ มีผลทำให้เกิดกลไกบางอย่างมาเกี่ยวข้องด้วย เช่น เมื่อความดันซึ่งสูงถึงจุดหนึ่งจะทำให้เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ เป็นผลให้ฟองอากาศบางส่วนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Heinnenen และ งานวิจัยของ Edzwald (1995) ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มความดันที่ใช้ จะทำให้ขนาดของฟองอากาศเล็กลง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของ DAF สูงขึ้น แต่เมื่อใช้ความดันมากกว่า 500 kPa การเพิ่มความดันจะส่งผลต่อขนาดฟองอากาศและประสิทธิภาพของ DAF ไม่มากนัก และงานวิจัยของ Komanic (1974 : อ้างถึงใน Leininger, 1975) พบว่าเมื่อใช้ความดันสูงเกินไป ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะลอยผ่านอนุภาคขึ้นไปโดยไม่เกาะติดหรือพาอนุภาคแยกออกไปด้วย

ในการทดลองนี้ พบว่าที่ความดัน 5 บาร์ DAF มีประสิทธิภาพดีกว่าที่ความดัน 4 บาร์ ในขณะที่ความดัน 6 บาร์ ทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นกว่าเมื่อใช้ความดัน 5 บาร์ เพียงเล็กน้อย ดังนั้น ในการทดลองขั้นต่อไปจะใช้ความดันเท่ากับ 5 บาร์ ซึ่งถือว่ามีความเหมาะสมที่สุด

4.3 การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของสาหร่าย

ขั้นตอนนี้ทำการทดลองโดยใช้น้ำสังเคราะห์ โดยแปรค่าความเข้มข้นของเซลล์สาหร่าย Chlorella โดยให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นโดยประมาณ 10^5 cells/mL มาทำการทดลองกับอุปกรณ์ DAF โดยใช้ความดันเท่ากับ 5 บาร์ และอัตราการเวียนกลับ 10% ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมซึ่งหาได้จากการทดลองในตอนที่ผ่านมา หลังจากผ่านกระบวนการ DAF แล้ว วัดจำนวนสาหร่ายที่เหลือ จากนั้นทำการทดลองเช่นเดิม โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ Chlorella ให้ได้ความเข้มข้นประมาณ $2x10^5$, $3x10^5$, $4x10^5$, $5x10^5$ และ $6x10^5$ cells/mL ตามลำดับ หาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายที่ความเข้มข้นเริ่มต้นค่าต่างๆ ของสาหร่าย ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5

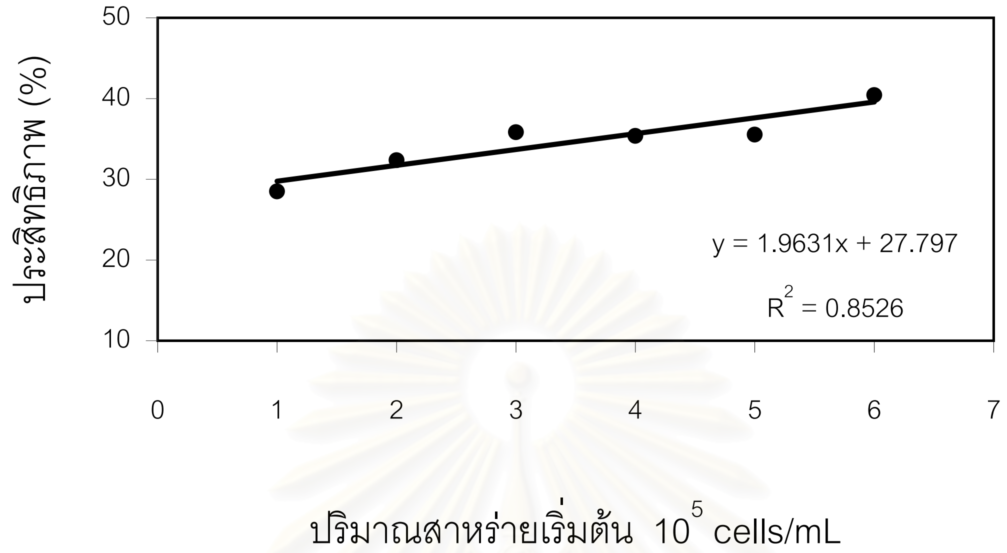
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของสาหร่าย

สาหร่ายเริ่มต้น 10^5 cells/mL	**ความดัน** (บาร์)	**อัตราการเวียน** กลับ (%)	**สาหร่ายที่เหลือ** 10^4 cells/mL	**ประสิทธิภาพ** (%)
1	5	10	6.5	28.50
2	5	10	12.3	32.35
3	5	10	17.5	35.83
4	5	10	23.5	35.37
5	5	10	29.3	35.54
6	5	10	32.5	40.42

จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น (initial feed concentration) พบว่าประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยที่เมื่อจำนวนเซลล์เริ่มต้นมีค่าต่ำสุดที่ 10^5 cells/mL จำนวนเซลล์ที่เหลือหลังจากผ่านกระบวนการ DAF เท่ากับ 6.5×10^4 cells/mL คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 28.5%ในขณะที่เมื่อเพิ่มจำนวนเซลล์เริ่มต้นจนถึงค่าสูงสุดที่ 6×10^5 cells/mL จำนวนเซลล์สาหร่ายที่เหลือโดยเฉลี่ยหลังจากผ่านกระบวนการ DAF แล้วเท่ากับ 3.25×10^5 cells/mL หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 40.42%

จากผลการทดลองนำมาเขียนกราฟแสดงประสิทธิภาพการกำจัดโดยเฉลี่ยกับจำนวนเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นได้แสดงในรูปที่ 4.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF ที่ปริมาณเริ่มต้นต่าง ๆ ของสาหร่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้นในการทดลองตอนนี้ ไม่ได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการ DAF ลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความดันที่ใช้ในการทดลองนี้ ซึ่งใช้ความดันเท่ากับ 5 บาร์ และใช้อัตราการเวียนกลับเท่ากับ 10 % จำนวนของฟองอากาศที่เกิดขึ้น (N_b) จากค่าความดันและอัตราการเวียนกลับดังกล่าวยังมีมากพอและมากกว่าจำนวนของอนุภาคของเซลล์สาหร่าย (N_p) ของทุก ความเข้มข้นที่ทำการทดลอง การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายในช่วงที่ใช้ในการทดลองจึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพของ DAF ลดลง นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์สาหร่าย จำนวนอนุภาคที่เพิ่มขึ้นย่อมที่จะทำให้โอกาสที่จะถูกชนและพาให้ลอยขึ้นโดยฟองอากาศจึงมีมากขึ้น ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น (initial feed concentration) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายสูงขึ้น

4.3 การทดลองศึกษาผลของความขุ่นและกรดฮิวมิก

การทดลองในตอนนี้เป็นการทดลองโดยพิจารณาจากสภาวะจริงของแหล่งน้ำในธรรมชาติซึ่งบางครั้งนอกจากในแหล่งน้ำที่มีปริมาณสาหร่ายสูงแล้วยังอาจประกอบด้วยอนุภาคซึ่งเป็นความขุ่นอื่นๆ หรืออาจมีสารอินทรีย์จำพวกกรดฮิวมิกและฟัลวิคเจือปนอยู่ด้วย ซึ่งอนุภาคหรือสารอินทรีย์ต่างๆ เหล่านี้ อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ DAF ในการกำจัดสาหร่ายได้

4.4.1 การทดลองศึกษาผลของความขุ่น

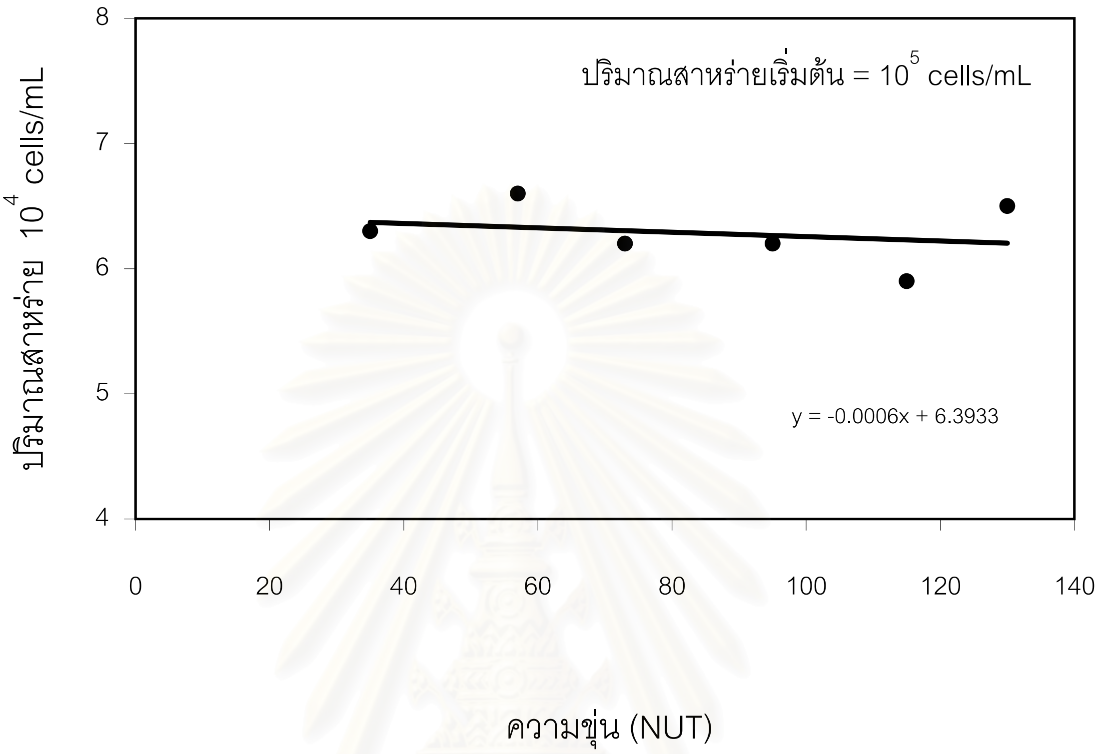
ทำการทดลองโดยใช้น้ำสังเคราะห์ โดยเตรียมให้มีความเข้มข้นของ Chlorella ประมาณ 10^5 cells/mL นำมาเติม kaolin ซึ่งใช้แทนความขุ่นที่สร้างขึ้น โดยแปรค่าปริมาณของ kaolin ตั้งแต่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 mg/L ทำการทดลองโดยอุปกรณ์ DAF โดยใช้ความดัน 5 บาร์ และอัตราเวียนกลับ 10% หลังจากผ่านกระบวนการ DAF แล้วในทุกการทดสอบวัดปริมาณเซลล์สาหร่ายที่เหลือเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการDAFที่ปริมาณ kaolin ค่าต่างๆ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองศึกษาผลของความขุ่น

ปริมาณ kaolin (mg/L)	**ความขุ่น** (NTU)	**ความดัน** (บาร์)	**อัตราการเวียนกลับ** (%)	**สาหร่ายที่เหลือ** 10^4 cells/mL	**ประสิทธิภาพ** (%)
50	35	5	10	6.3	30.70
100	57	5	10	6.6	27.40
150	73	5	10	6.2	31.80
200	95	5	10	6.2	31.80
250	115	5	10	5.9	35.10
300	130	5	10	6.5	28.50

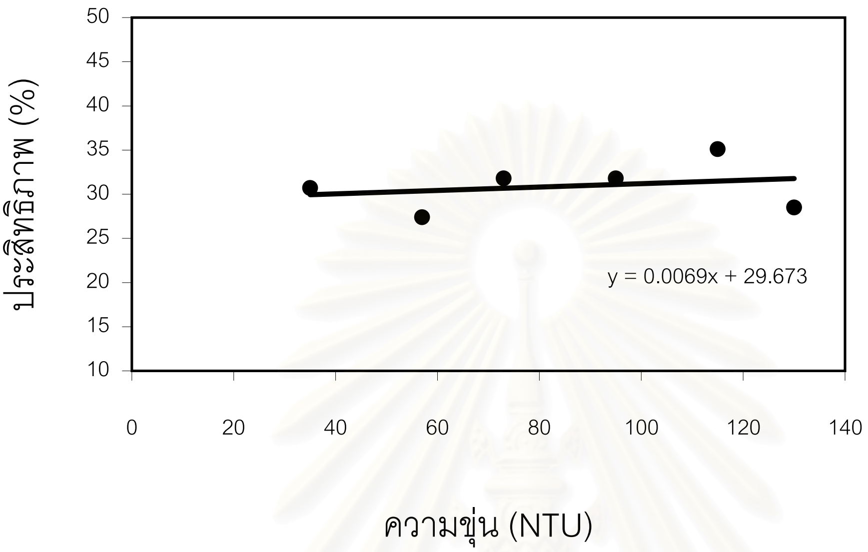
จากผลการทดลองพบว่า ในการกำจัดสาหร่ายในกรณีที่มีอนุภาคของความขุ่น (kaolin) ในปริมาณต่างๆ ประสิทธิภาพของกระบวนการ DAF พบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจนนักคือมีการเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างไม่ต่อเนื่อง โดยประสิทธิภาพลดลงในช่วงที่เพิ่มปริมาณ kaolin จาก 50 mg/L (ความขุ่น 35 NTU) เป็น 100 mg/L (ความขุ่น 57 NTU) หลังจากนั้นประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 27.40% จนกระทั่งถึง 35.10% ที่ความเข้มข้นของ kaolin เท่ากับ 250 mg/L (ความขุ่น 115 NTU) หลังจากนั้น ประสิทธิภาพกลับลดลงมาอยู่ที่ 28.5 % ที่ความเข้มข้น kaolin 300 mg/L (ความขุ่น 130 NTU) ซึ่งลักษณะกราฟแนวโน้มของผลการทดลองการศึกษาผลของความขุ่นพบว่า มีลักษณะเป็นเส้นตรงและเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ของตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณความขุ่นค่าต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF ของตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณความขุ่นค่าต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อความขุ่นหรืออนุภาคซึ่งอยู่ในน้ำ (N_p) มีปริมาณสูงขึ้น จึงมีโอกาสที่ประสิทธิภาพของ DAF จะลดลงเนื่องจากมีจำนวนฟองอากาศ (N_b) เท่าเดิม (ถ้าไม่เพิ่มความดันหรืออัตราการเวียนกลับ)

อย่างไรก็ตามสำหรับการทดลองตอนนี้พบว่า ความขุ่นสูงสุดที่ปริมาณ kaolin 300 mg/L (ความขุ่น 130 NTU) ประสิทธิภาพของ DAF ก็ไม่แตกต่างจากในช่วงที่ใช้ปริมาณ kaolin 50 mg/L หรือ 100 mg/L มากนัก จากผลที่ได้จึงกล่าวได้ว่า ความขุ่นในช่วงที่ทำการทดลอง (ซึ่งมีค่าความขุ่นสูงกว่าความขุ่นในแหล่งน้ำผิวดินโดยทั่วไปในประเทศไทย) ไม่มีผลต่อการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF

ในการศึกษาเรื่องผลของความขุ่นที่มีต่อประสิทธิภาพของ DAF มีหลายงานวิจัยในต่างประเทศซึ่งระบุตรงกันว่า ปริมาณความขุ่นสูงๆ จะทำให้ประสิทธิภาพของ DAF ไม่ดีนัก เช่น ระบบผลิตประปาที่ทะเลสาบ Nsese ประเทศ แอฟริกาใต้ ซึ่งได้รับการออกแบบสำหรับน้ำดิบที่มีปริมาณสาหร่ายสูง ปรากฏว่าในช่วงที่บริเวณพื้นที่ทะเลสาบเกิดภาวะน้ำท่วมเป็นเหตุให้มีความขุ่นในทะเลสาบ Nsese สูงกว่า 200 NTU ซึ่งมากกว่าปกติ พบว่าประสิทธิภาพของ DAF จะไม่ได้ผล (Botes และ Van Vuuren, 1990)

4.4.1 การทดลองศึกษาผลของกรดฮิวมิก

กรดฮิวมิก เป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งมีคุณสมบัติมีความคงตัวสูง ย่อยสลายยาก มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โครงสร้างประกอบไปด้วย หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl), ฟีนอลลิค (Phenolic) และ ควินนอยด์ (Quiniod) กรดฮิวมิกเกิดขึ้นในธรรมชาติจากการย่อยสลายของพืชต่างๆ การทดลองในตอนนี้ตั้งสมมุติฐานว่าในแหล่งน้ำดิบตามธรรมชาติซึ่งมักปรากฏมีกรดฮิวมิกซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของซากพืชต่างๆ นั้นอาจมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการ DAF

ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์โดยเตรียมให้มีความเข้มข้นของ Chlorella ประมาณ 10^5 cells/mL นำมาเติมกรดฮิวมิก โดยแปรค่าปริมาณของกรดฮิวมิก ตั้งแต่ 1, 5, 10, 15 และ 20 mg/L นำตัวอย่างน้ำที่เตรียมได้ในแต่ละความเข้มข้นของกรดฮิวมิกมาทำการทดสอบกับอุปกรณ์ DAF โดยใช้ค่าความดัน 5 บาร์ และอัตราการเวียนกลับเท่ากับ 10% หลังจากผ่านกระบวนการ DAF แล้ว วัดปริมาณเซลล์สาหร่ายที่เหลือ เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF ที่มีค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิกค่าต่างๆ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.7

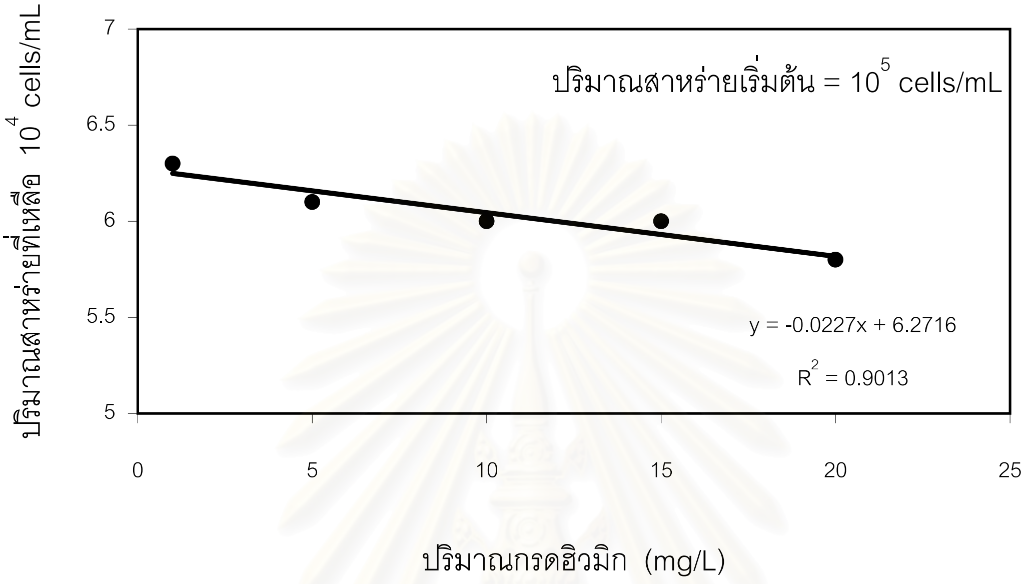
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองศึกษาผลของกรดฮิวมิก

ปริมาณกรดฮิวมิก (mg/L)	ความดัน (บาร์)	อัตราการเวียนกลับ (%)	สาหร่ายที่เหลือ 10^4 cells/mL	ประสิทธิภาพ (%)
1	5	10	6.3	30.70
5	5	10	6.1	32.90
10	5	10	6.0	34.00
15	5	10	6.0	34.00
20	5	10	5.8	36.20

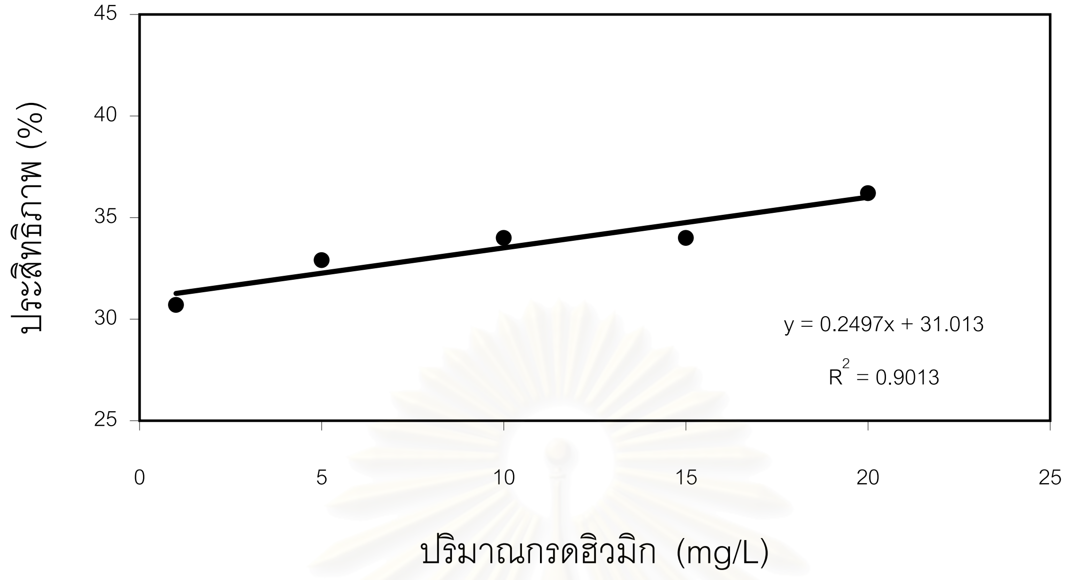
จากผลการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างต่อเนื่อง เมื่อเพิ่มปริมาณของกรดฮิวมิก คือประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 30.7% ที่ปริมาณกรดฮิวมิกที่ใช้ 1 mg/L จนมีประสิทธิภาพ 36.2% ที่ปริมาณกรดฮิวมิกที่ใช้ 20 mg/L

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้นี้กับในการทดลองซึ่งไม่มีการเติมกรดฮิวมิก โดยที่ความเข้มข้นเซลล์เริ่มต้นของ Chlorella ที่เท่ากัน และสภาวะที่ใช้ทดสอบกับอุปกรณ์สภาวะเดียวกัน คือ ที่ความดันเท่ากับ 5 บาร์ อัตราการเวียนกลับเท่ากับ 10% พบว่าในกรณีที่เติมกรดฮิวมิก ประสิทธิภาพของ DAF จะสูงกว่าในกรณีที่ไม่ได้เติมกรดฮิวมิก กราฟแสดงผลการทดลองศึกษาผลของกรดฮิวมิกต่อประสิทธิภาพของ DAF แสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ของตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณกรดฮิวมิกค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.12 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF จากตัวอย่างน้ำซึ่งมีปริมาณกรดฮิวมิกค่าต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดลอง สาเหตุของประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของ DAF สำหรับตัวอย่างน้ำที่มีกรดฮิวมิก น่าที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติของกรดฮิวมิก ซึ่งเป็นสารอินทรีย์น้ำหนักโมเลกุลสูง ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่ากรดฮิวมิกมีคุณสมบัติเป็นโพลีเมอร์ จึงเกิดการทำลายเสถียรภาพของเซลล์สาหร่ายโดยอาศัยกลไกการใช้สารอินทรีย์เป็นสะพานเชื่อม (polymer bridging) ทำให้เกิดการรวมเป็นกลุ่มของเซลล์สาหร่ายที่ใหญ่ขึ้น โอกาสถูกชนและพาให้ลอยขึ้นโดยฟองอากาศจึงมากขึ้น

อย่างไรก็ตามจากผลที่ได้จากการทดลองนี้ ที่ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกน้อยๆ ก็ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพของ DAF ดีขึ้น ส่วนในช่วงความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่ทำให้ DAF มีประสิทธิภาพดีขึ้นพอที่จะสังเกตได้ คือมีปริมาณกรดฮิวมิก 20 mg/L ความเข้มข้นดังกล่าวก็ถือว่าสูงเมื่อเทียบกับสภาพความเป็นจริงในแหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสำหรับแหล่งน้ำดิบในธรรมชาติ ซึ่งมีปริมาณของกรดฮิวมิกเป็นปกติจะไม่ส่งผลใด ๆ ต่อการทำงานของ DAF และจากผลที่ได้ก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kitchener และ Gochin (1980) ซึ่งกล่าวถึง ทฤษฎีของกระบวนการทำให้ลอยสำหรับแหล่งน้ำธรรมชาติว่า การทำงานของกระบวนการทำให้ลอยขึ้นอยู่กับสภาพของแหล่งน้ำนั้น ๆ ว่ามีสิ่งเจือปนอินทรีย์ (organic impurities) อย่างไร สารอินทรีย์บางชนิดเช่น กรดฮิวมิกมีผลทำให้กระบวนการทำให้ลอยเกิดได้ดีขึ้น

4.5 การทดลองศึกษาผลของ Sodium Lauryl Sulfate

Sodium Lauryl Sulfate มีสูตรทางเคมีคือ $NaC_{12}H_{25}SO_4$ มีคุณสมบัติเป็นสารพวก Surfactant ซึ่งมีประจุลบสามารถละลายน้ำได้ มีการใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิต สบู่ แชมพู ผงซักฟอก ในแหล่งน้ำทั่วไป มีความเป็นไปได้ที่มีโอกาสได้รับการปนเปื้อนจากน้ำทิ้งชุมชน หรือ น้ำทิ้งจากการซักล้าง ซึ่งมีสารจำพวก Surfactant ประปนอยู่ สารประเภทนี้อาจมีผลการทำงานของกระบวนการ DAF เนื่องจากว่าเป็นสารที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟอง และมีปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวสัมผัส

การทดลองในขั้นตอนนี้ ตั้งอยู่บนสมมุติฐานถึงการปนเปื้อนของ Sodium Lauryl Sulfate ในแหล่งน้ำที่จะทำการกำจัดสาหร่ายโดย DAF ทำการทดลองโดยใช้น้ำสังเคราะห์โดยเตรียมให้มีความเข้มข้นของ Chlorella ประมาณ 10^5 cells/mL มาทดสอบกับอุปกรณ์ DAF โดยแปรค่า Sodium Lauryl sulfate เท่ากับ 0.5 , 1, 3, 5 และ 10 mg/L หลังจากผ่านกระบวนการ DAF แล้ว วัดปริมาณเซลล์สาหร่ายที่เหลือ เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย โดยกระบวนการ DAF โดยมี Sodium Lauryl Sulfate ปนอยู่ในน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.8

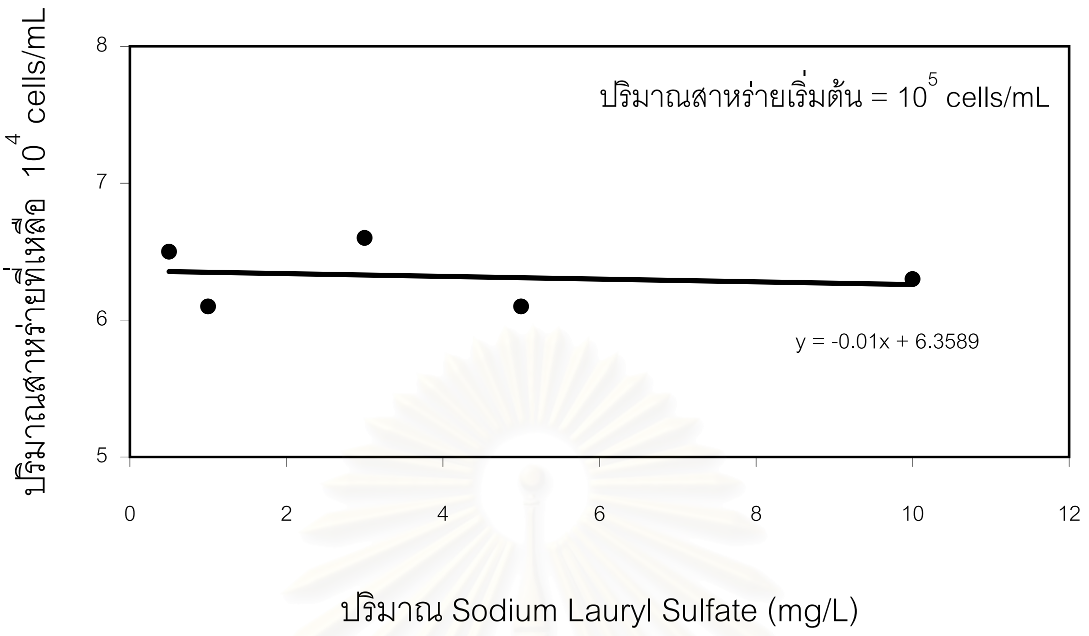
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองศึกษาผลของ Sodium Lauryl Sulfate

ปริมาณ $NaC_{12}H_2So_4$ (mg/L)	ความดัน (บาร์)	อัตราการเวียนกลับ (%)	สาหร่ายที่เหลือ 10^4 cells/mL	ประสิทธิภาพ (%)
0.5	5	10	6.5	28.50
1	5	10	6.1	32.90
3	5	10	6.6	27.40
5	5	10	6.1	32.90
10	5	10	6.3	30.70

จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพของกระบวนการ DAF เกิดขึ้นค่อนข้างน้อยในช่วงของปริมาณ Sodium Lauryl Sulfate ที่ใช้ในการทดลอง โดยมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยต่ำสุด 27.4% ที่ความเข้มข้น Sodium Lauryl Sulfate 3 mg/L และมีประสิทธิภาพสูงสุด 32.9% ที่ความเข้มข้น Sodium Lauryl Sulfate 1 mg/L และ 5 mg/L

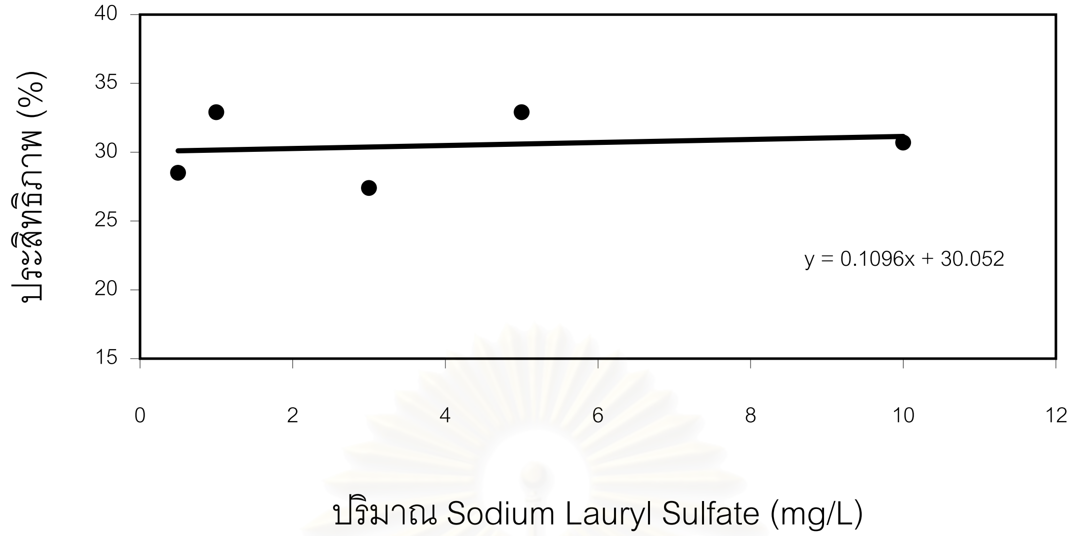
กราฟแสดงผลการทดลองศึกษาผลของ Sodium Lauryl Sulfate แสดงในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 **แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ** DAF
ของตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณ Sodium Lauryl Sulfate **ค่าต่าง ๆ**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการ DAF จากตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณ Sodium Lauryl Sulfate ค่าต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเติมสาร surfactant บางชนิด ซึ่งคุณสมบัติของ surfactant จะมีผลเกี่ยวข้องกับแรงตึงผิว และมีปฏิกิริยาต่อผิวสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคเป็นผลทำให้เกิดสภาพ hydrophobic ของอนุภาค ทำให้แยกอนุภาคออกจากน้ำได้ง่าย นอกจากนี้ surfactant ยังมีความเกี่ยวข้องกับขนาดของฟองอากาศ (ซึ่งมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของ DAF) surfactant บางชนิดสามารถป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ (coalescence) เกิดขึ้นในกระบวนการ DAF จึงเป็นผลให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก และจะทำให้สามารถแยกอนุภาคแขวนลอยได้ดี

สำหรับประสิทธิภาพของ DAF ที่ได้จากผลการทดลองนี้ ทุกตัวอย่างน้ำที่ปริมาณต่างๆ ของ sodium lauryl sulfate ที่ใช้พบว่าไม่แตกต่างจากกรณีซึ่งไม่ได้เติม sodium lauryl sulfate มากนัก ดังนั้นจากการทดลองนี้จึงไม่พบว่า sodium lauryl sulfate มีผลต่อประสิทธิภาพของ DAF แต่จากงานวิจัยของ Kitchener และ Gochin (1991) ซึ่งใช้สาร sodium oleate เป็น surfactant และเมื่อใช้ปริมาณของ sodium oleate เพียง 1.5 mg/L พบว่าทำให้ประสิทธิภาพของ DAF สูงขึ้น ทั้งนี้ผลที่แตกต่างกันอาจเป็นเพราะ อนุภาคที่ต้องการกำจัดนั้นไม่เหมือนกัน และคุณสมบัติของ surfactant แต่ละชนิดที่มีความแตกต่างกันไป ซึ่งปฏิกิริยาระหว่าง surfactant กับอนุภาคจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ประจุของอนุภาค , ส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของอนุภาค นอกจากนี้การดูดติด surfactant บนผิวอนุภาคยังขึ้นอยู่กับ แรงเนื่องจากอำนาจทางไฟฟ้า, พันธะโควาเลนท์และพันธะไฮโดรเจนอีกด้วย

4.6 การทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการ DAF

กระบวนการโคแอกกูเลชัน เป็นกระบวนการซึ่งใช้ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค ซึ่ง
แขวนลอยอยู่ในน้ำ (ในที่นี้คือ อนุภาคของเซลล์สาหร่าย) ชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ ตลอดจนค่าที่เหมาะสมของ pH มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชัน ในการทดลองตอนนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาสภาวะดังกล่าว โดยสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ คือ สารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์

4.6.1 กรณีใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์

หา pH ที่เหมาะสม

ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ โดยเตรียมให้มีความเข้มข้น Chlorella ประมาณ 10^5 cells/mL มาทำการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสม โดยใช้ปริมาณสารส้มเท่ากับ 100 mg/L และทำการปรับ pH ด้วย H_2SO_4 และ NaOH โดยใช้ค่า pH ในช่วง 4-9 ตัวอย่างที่เตรียมได้ที่ค่า pH ต่างๆ นำไปทดสอบกับอุปกรณ์ DAF ใช้ความดัน 5 บาร์ และอัตราการเวียนกลับ 10% วัดปริมาณสาหร่ายที่เหลือและคำนวณหาประสิทธิภาพของ DAF สำหรับ pH ค่าต่างๆ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.9

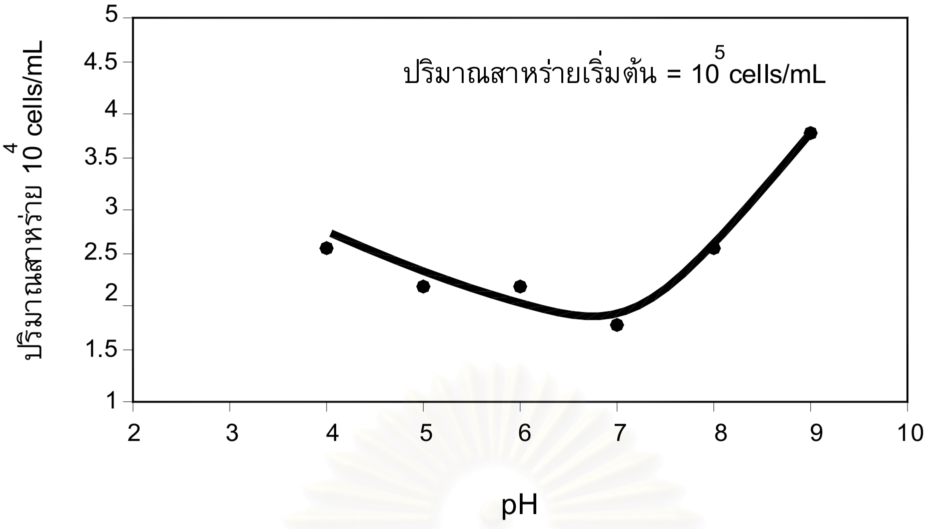
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมเมื่อใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์

PH	สาหร่ายที่เหลือ 10^4 cells/mL	ประสิทธิภาพ %
4	2.6	71.40
5	2.2	75.80
6	2.2	75.80
7	1.8	80.20
8	2.6	71.40
9	3.8	58.20

จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้สารส้ม เป็นโคแอกกูแลนท์ จะให้ประสิทธิภาพของ DAF สูงสุดในช่วง pH เท่ากับ 7 โดยประสิทธิภาพเท่ากับ 80.2%

กราฟแสดงผลการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมเมื่อใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์ แสดงในกราฟรูปที่ 4.15

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF
ซึ่งใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์ที่ค่า pH ต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม

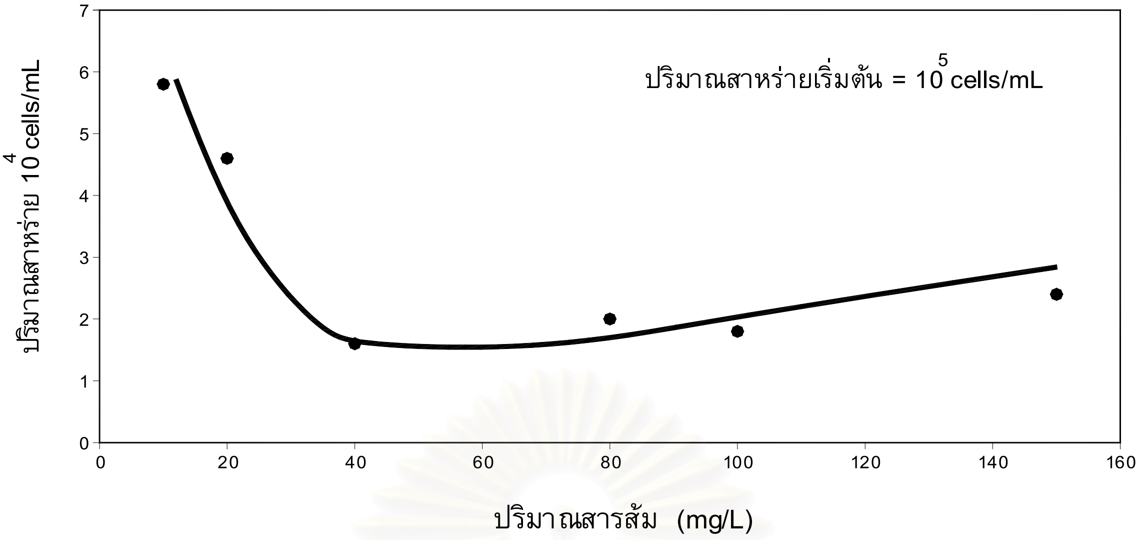
ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ ซึ่งเตรียมให้มีความเข้มข้นของ Chlorella ประมาณ 10^5 cells/mL มาเติมสารส้มโดยแปรค่าที่ปริมาณ 10, 20, 40, 80,100 และ 150 mg/L และทำการปรับ pH ให้ได้ pH เท่ากับ 7 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด หลังจากนั้น จึงนำมาทดลองกับอุปกรณ์ DAF โดยใช้ความดัน 5 บาร์ และอัตราการเวียนกลับ 10% วัดปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังจากผ่าน DAF เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย โดยกระบวนการ DAF ที่ความเข้มข้นของสารส้มค่าต่างๆ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.10 **ผลการทดลองใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์**

ปริมาณสารส้มที่ใช้ mg/L	สาหร่ายที่เหลือ 10^4 cells/mL	ประสิทธิภาพ %
10	5.8	38.40
20	4.6	49.40
40	1.6	82.40
80	2.0	78.00
100	1.8	80.20
150	2.4	73.60

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของ DAF มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารส้ม โดยที่ปริมาณสารส้มที่ใช้ 40 mg/L ให้ประสิทธิภาพการทำงานของ DAF สูงที่สุดเท่ากับ 82.4%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF ซึ่งใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์และปรับค่า pH เท่ากับ 7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีซึ่งไม่ใช้สารโคแอกกูแลนท์ ในการทดสอบกับ DAF ที่สภาวะเดียวกันคือที่ความดัน 5 บาร์ และอัตราการเวียนกลับ 10% พบว่าการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและปรับค่า pH ก่อนจะผ่าน DAF ทำให้ประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายสูงกว่าโดยที่ปริมาณสารส้ม 40 mg/L ประสิทธิภาพของ DAF สูงกว่ากรณีไม่ใช้สารโคแอกกูแลนท์ 53.9%

ประสิทธิภาพซึ่งสูงขึ้นนี้เนื่องจากการทำโคแอกกูเลชัน ซึ่งเป็นการทำลายเสถียรภาพของเซลล์สาหร่ายก่อนที่จะแยกสาหร่ายออกด้วยกระบวนการ DAF โดยที่กลไกโคแอกกูเลชันของสารส้ม จะประกอบด้วยกลไกหลัก 2 แบบ คือ กลไกแบบดูดติดผิวแล้วทำลายประจุ และกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (sweep coagulation) และโดยที่ในทางปฏิบัติแล้วมีข้อจำกัดในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งทำให้กลไกหลักที่เกิดขึ้นจะเป็นกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก

ผลึกของสารส้มที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซีสจะสามารถเกาะหรือจับตัวกับอนุภาคของเซลล์สาหร่ายซึ่งมีขนาดเล็ก (Chlorella มีขนาดโดยเฉลี่ยไม่เกิน 10 μm.) หลายอนุภาคมารวมกันเป็นฟล้อคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นโอกาสที่จะถูกชนแล้วเกาะติดโดยฟองอากาศพาลอยขึ้นสู่ผิวน้ำจึงมีมากขึ้นและในขณะเดียวกันเมื่อเซลล์ของสาหร่ายมารวมกันเป็นฟล้อคหลังจากการทำโคแอกกูเลชันจึงเปรียบเสมือนว่าจำนวนอนุภาค (N_p) ของเซลล์สาหร่ายเหลือน้อยลงในขณะที่จำนวนของฟองอากาศ (N_b) ไม่ได้ลดลง จึงเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพของ DAF สูงขึ้น

4.6.2 กรณีใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์

หา pH ที่เหมาะสม

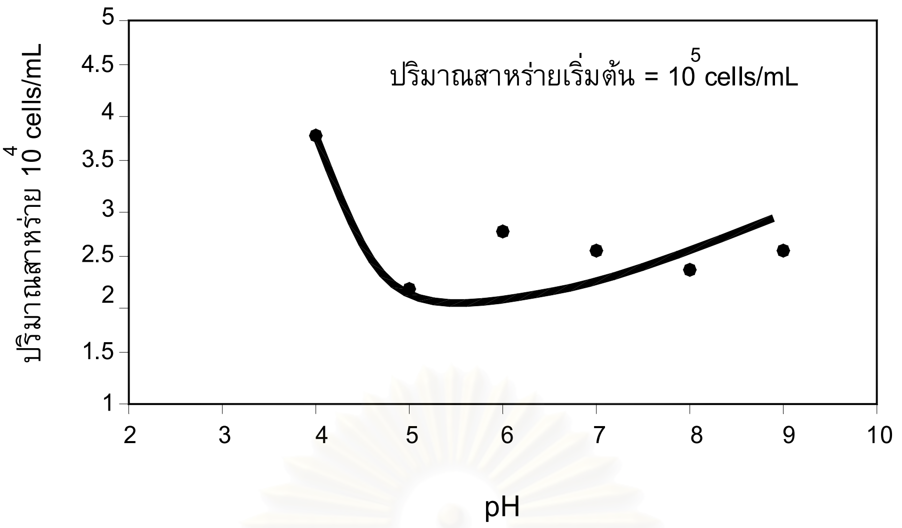
ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ โดยเตรียมให้มีความเข้มข้น Chlorella ประมาณ 10^5 cells/mL มาทำโคแอกกูเลชันด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ โดยใช้ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ เท่ากับ 100 mg/L และทำการปรับ pH ด้วย H_2SO_4 และ NaOH โดยใช้ค่า pH ในช่วง 4-9 ตัวอย่างที่เตรียมได้ที่ค่า pH ต่างๆ นำไปทดสอบกับอุปกรณ์ DAF ใช้ความดัน 5 บาร์ และอัตราการเวียนกลับ 10% วัดปริมาณสาหร่ายที่เหลือและคำนวณหาประสิทธิภาพของ DAF สำหรับ pH ค่าต่างๆ ผลการทดลองแสดงใน ตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสมเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์

PH	สาหร่ายที่เหลือ 10^4 cells/mL	ประสิทธิภาพ %
4	3.8	58.20
5	2.2	75.80
6	2.8	69.20
7	2.6	71.40
8	2.4	73.60
9	2.6	71.40

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ 100 mg/L เป็นโคแอกกูแลนท์ DAF จะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ pH เท่ากับ 5 โดยมีประสิทธิภาพ 75.8 % กราฟแสดงผลการทดลองการหาค่า pH ที่เหมาะสมเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ เป็นโคแอกกูแลนท์ แสดงในกราฟรูปที่ 4.17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF
ซึ่งใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์ที่ค่า pH ต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หาปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ที่เหมาะสม

ในการทดลองตอนนี้มีวิธีการเช่นเดียวกับในกรณีที่ใช้สารส้ม เพียงแต่เปลี่ยนโคแอกกูแลนท์ที่ใช้เป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ โดยแปรค่าปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์เท่ากับ 10, 20, 40, 80,100 และ 150 mg/L และทำการปรับ pH ให้ได้ pH เท่ากับ 5 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.12

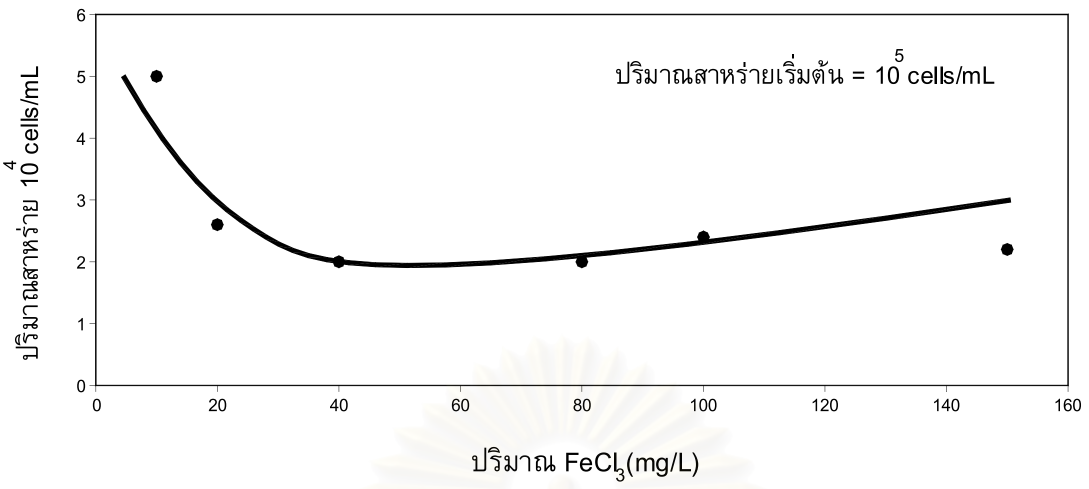
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ เป็นโคแอกกูแลนท์

ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ใช้ mg/L	สาหร่ายที่เหลือ 10^4 cells/mL	ประสิทธิภาพ %
10	5.0	45.00
20	2.6	73.40
40	2.0	78.00
80	2.0	78.00
100	2.4	73.60
150	2.2	75.80

จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ตั้งแต่ 20 mg/L ถึง 150mg/L ประสิทธิภาพของ DAF ค่อนข้างใกล้เคียงกันมากคืออยู่ในช่วง 73.4% ถึง 78% โดยปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์เท่ากับ 40 และ 80 mg/L ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากันที่ 78%

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีซึ่งไม่ใช้สารโคแอกกูแลนท์ ในการทดลองกับ DAF ที่สภาวะเดียวกัน คือ ที่ความดัน 5 บาร์ และอัตราการเวียนกลับ 10% พบว่าการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย เฟอร์ริกคลอไรด์และปรับ pH ก่อนจะผ่านกระบวนการ DAF ทำให้ DAF มีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายสูงกว่า โดยที่ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ 40 และ 80 mg/L ทำให้ประสิทธิภาพของ DAF สูงกว่ากรณีไม่ใช้โคแอกกูแลนท์ถึง 49.5 %

กราฟแสดงผลการทดลองเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์แสดงในรูปที่ 4.18



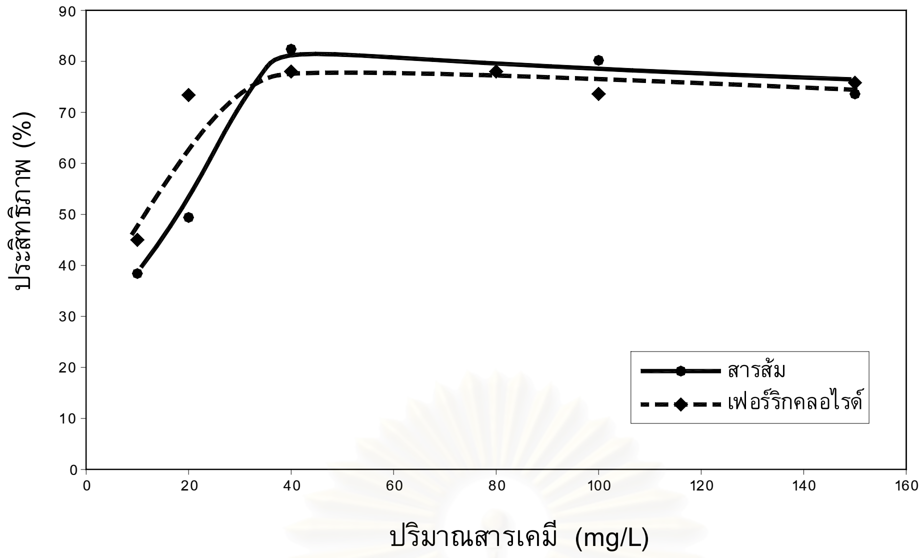
รูปที่ 4.18 แสดงปริมาณสาหร่ายที่เหลือหลังผ่านกระบวนการ DAF
ซึ่งใช้ $FeCl_3$ เป็นโคแอกกูแลนท์และปรับค่า pH เท่ากับ 5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของ DAF เมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์ เกิดขึ้นโดยกลไกเช่นเดียวกับเมื่อใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์ คือ โดยกลไกห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก โดยผลึกของสารประกอบเหล็กที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวรวมของอนุภาคของสาหร่ายให้มีขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น และเป็นการทำให้มีจำนวนอนุภาคของเซลล์สาหร่ายลดลง

กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ DAF เมื่อใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์ แสดงในรูปที่ 4.19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยใช้สารเคมี
เป็นโคแอกกูแลนท์ร่วมกับ DAF

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโคแอกกูแลนท์ทั้ง 2 ชนิด ที่ใช้ คือ สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ พบว่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมาก แต่โดยเฉลี่ยแล้วการใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์จะดีกว่าเล็กน้อย

จากการทดลอง 4.6 ทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่าย มีความจำเป็นที่จะต้องปรับสภาพน้ำเบื้องต้น (pre treatment) ก่อนที่จะทำการบำบัดโดย DAF ซึ่งแสดงได้จากผลการทดลองที่ได้กรณีซึ่งไม่มีการปรับสภาพน้ำเบื้องต้น (โคแอกกูเลชันและปรับ pH) ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของ DAF กำจัดสาหร่ายได้เพียง 28.5% ซึ่งถือว่าค่อนข้างต่ำ ขณะที่เมื่อใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์ปริมาณที่เหมาะสมคือ 40 mg/L ปรับ pH เท่ากับ 7 ได้ประสิทธิภาพของ DAF 82.4% และเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์ ปริมาณที่เหมาะสมคือ 40 mg/L ปรับ pH เท่ากับ 5 ได้ประสิทธิภาพของ DAF 78%

เนื่องจากว่าขนาดของเซลล์สาหร่าย Chlorella ซึ่งมีขนาดเล็กมากโดยเฉลี่ยไม่เกิน 10 μm. เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.6 ขนาดของอนุภาคควรมีขนาดใหญ่กว่า 32 μm. จึงจะทำให้ total single collector collision efficiency (η_T) มีค่าสูงสุด คือ เท่ากับ 1 ขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 32 μm. จะทำให้กระบวนการ DAF ไม่ได้ผลดี (Schers และ Dijk , 1992) กระบวนการโคแอกกูเลชัน เมื่อใช้ปริมาณโคแอกกูแลนท์และ pH ที่เหมาะสมจะทำให้อนุภาคที่จะกำจัดออก มีขนาดใหญ่ขึ้น ประสิทธิภาพของ DAF จึงสูงขึ้น

ทั้งนี้ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zabel (1985) , Edzwald และ Wingler (1990) ซึ่งกล่าวว่า การกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำโดยกระบวนการ DAF จะไม่ได้ผลดีถ้าไม่มีการใช้สารโคแอกกูแลนท์ในการปรับสภาพน้ำเบื้องต้นเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของเซลล์สาหร่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.7 การทดลองศึกษาผลของกระบวนการฟล้อคคูเลชันที่มีต่อ DAF

ในการปรับสภาพน้ำเบื้องต้นก่อนใช้กระบวนการ DAF โดยการทำโคแอกกูเลชัน เป็นการทำลายเสถียรภาพของเซลล์สาหร่าย หรือเป็นการลดแรงผลักของอำนาจทางไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการรวมตัวกันของเซลล์สาหร่ายได้ง่ายขึ้น ถ้าการรวมตัวของเซลล์สาหร่ายรวมกันมากขึ้นจนเป็นกลุ่มหรือฟล้อคขนาดใหญ่ ประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายอาจเปลี่ยนไปจากเดิม

การทดลองในขั้นตอนนี้ จึงทำการศึกษาผลของการทำฟล้อคคูเลชันว่ามีผลต่อการทำงานของ DAF อย่างไร โดยมีวิธีการทดลอง คือ เตรียมตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ให้มี Chlorella ประมาณ 10^5 cells/mL ทำโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้ม100 mg/L เป็นโคแอกกูแลนท์ และปรับ pH ให้เท่ากับ 7 หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาทำฟล้อคคูเลชันโดยทำการกวนช้าที่ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงนำไปทดสอบกับอุปกรณ์ DAF โดยใช้สภาวะเช่นเดิม จากนั้นจึงวัดปริมาณสาหร่ายที่เหลือและคำนวณประสิทธิภาพของ DAF ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.13

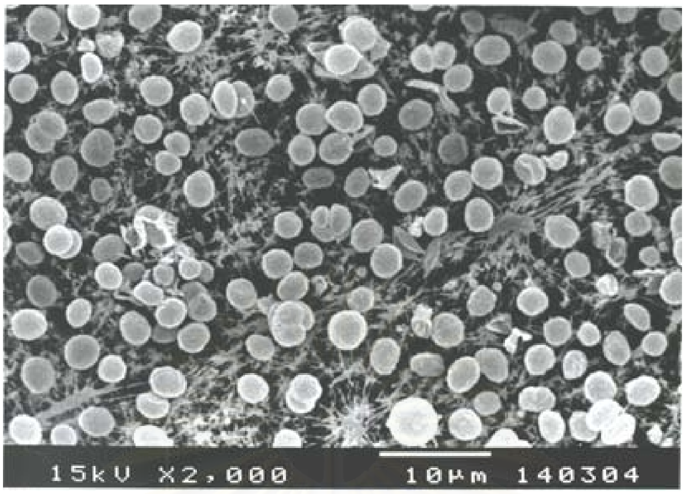
ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองศึกษาผลของกระบวนการฟล้อคคูเลชันที่มีต่อ DAF

การทดลอง	สาหร่ายที่เหลือ 10^4 cells/mL	ประสิทธิภาพ (%)
ทำฟล้อคคูเลชัน	2.1	76.90
ไม่ทำฟล้อคคูเลชัน	1.8	80.20

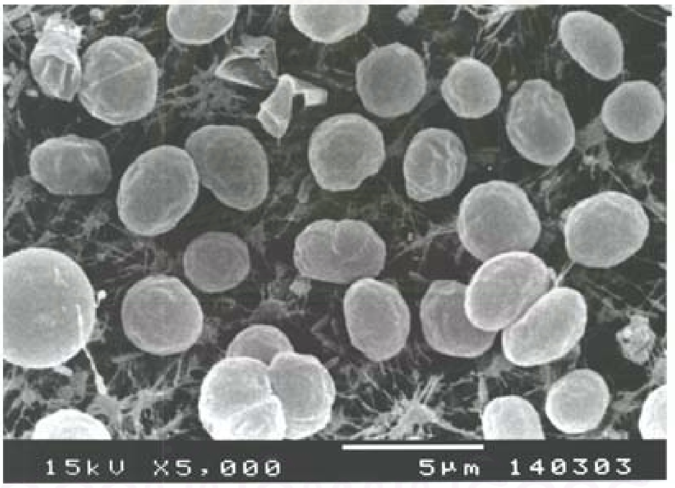
จากผลการทดลองพบว่า หลังจากการปรับสภาพน้ำโดยทำโคแอกกูเลชันด้วย 100 mg/L ของสารส้มที่ pH เท่ากับ 7 แล้ว ทำฟล้อคคูเลชันเป็นเวลา 5 นาที ก่อนที่จะทดสอบกับ DAF ผลที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการ DAF แล้ว พบว่ามีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยเท่ากับ 76.9%

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการทำฟล้อคคูเลชันไม่มีความจำเป็นนักเนื่องจากไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพของ DAF ดีขึ้น การทำโคแอกกูเลชันอย่างเดียว โดยที่ไม่ต้องทำฟล้อคคูเลชัน น่าที่จะเป็นการเพียงพอ และในทางปฏิบัติในการใช้งานจริงถ้าต้องมีถังกวนช้า (flocculator tank) โดยที่ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพของ DAF ดีขึ้นมากนักจะเป็นการไม่ประหยัด อย่างไร

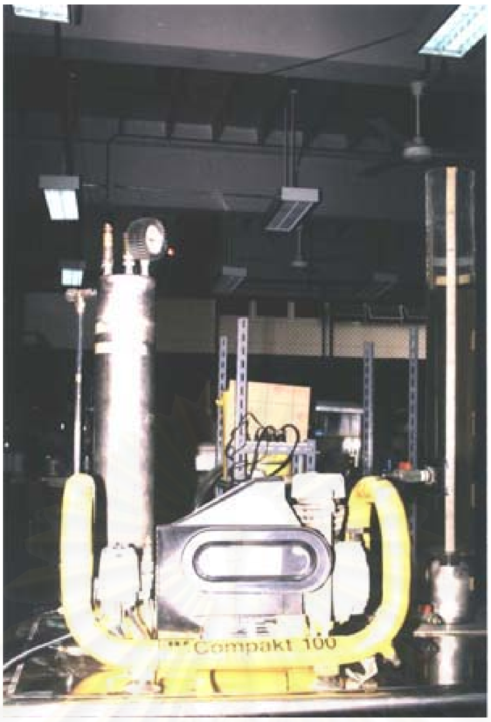
ก็ตามผลที่ได้จากการทดลองนี้ส่วนหนึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากประสิทธิภาพของการทำฟล้อคคูเลชันด้วย



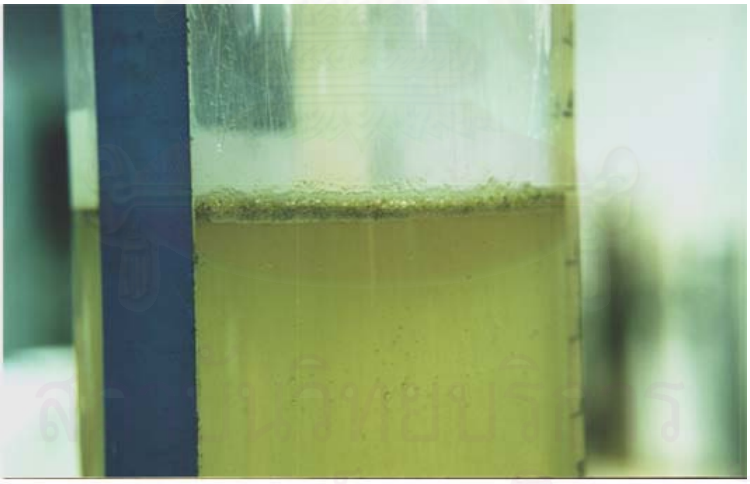
รูปที่ 4.20 แสดงรูปร่างและลักษณะเซลล์ของสาหร่าย Chlorella
ถ่ายโดยใช้กล้อง Scanning Electron Microscope กำลังขยาย 2,000 เท่า



รูปที่ 4.21 แสดงรูปร่างและลักษณะเซลล์ของสาหร่าย Chlorella
ถ่ายโดยใช้กล้อง Scanning Electron Microscope กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.22 ชุดการทดลอง DAF ในระดับห้องปฏิบัติการ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.23 แสดงส่วนของสาหร่ายซึ่งถูกพาให้ลอยขึ้นมาโดยฟองอากาศจากกระบวนการ DAF

รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายระยะใกล้ถังทำให้ลอย (flotation vessel) แสดงให้เห็นการลอยขึ้นของฟองอากาศ และอนุภาคสาหร่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษากระบวนการทำให้ลอยตัวด้วยอากาศที่ละลายน้ำเพื่อกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำดิบสามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

1. การใช้กระบวนการ DAF ในการกำจัดสาหร่ายพบว่าอัตราการเวียนกลับที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 10% เนื่องจากในช่วงที่อัตราการเวียนกลับน้อยกว่านี้ ประสิทธิภาพของ DAF ยังมีอัตราการเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก แต่หลังจากอัตราการเวียนกลับมากกว่า 10% การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับในช่วงน้อยกว่า 10%
2. ค่าอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็ง (A/S ratio) ที่น้อยที่สุดและมีความเหมาะสมสำหรับกระบวนการ DAF ในการกำจัดสาหร่ายในแหล่งน้ำมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 0.05
3. ความดันที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ DAF ในการทดลองนี้เท่ากับ 5 บาร์ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 34.73% ซึ่งสูงกว่าประสิทธิภาพซึ่งได้จากความดันในช่วง 2 บาร์ ถึง 4 บาร์ (เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็งค่าเดียวกัน) ส่วนที่ความดัน 6 บาร์ ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 35.95% ซึ่งใกล้เคียงกับเมื่อใช้ความดัน 5 บาร์ แต่ไม่เป็นการประหยัด
4. ในช่วงความเข้มข้นของสาหร่ายที่ทำการทดลอง 10^5 cells/mL ถึง $6x10^5$ cells/mL พบว่าประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสาหร่าย
5. ในสภาวะที่น้ำมีความขุ่นไม่เกิน 130 NTU ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของ DAF
6. กรดฮิวมิกมีผลทำให้ประสิทธิภาพของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายดีขึ้นเล็กน้อย โดยปริมาณกรดฮิวมิก 20 mg/L ทำให้ประสิทธิภาพของ DAF สูงขึ้นเป็น 36.2% จากประสิทธิภาพ 28.5% ในกรณีที่ไม่มีกรดฮิวมิก ภายใต้การทดลองในสภาวะเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากว่ากรดฮิวมิกมีคุณสมบัติเหมือนกับเป็นโพลีเมอร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถทำลายเสถียรภาพของสาหร่ายได้ ประสิทธิภาพของ DAF จึงสูงขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7. Sodium Lauryl Sulfate ($NaC_{12}H_{25}SO_4$) ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของ DAF ทุกความเข้มข้นของ Sodium Lauryl Sulfate ที่ใช้ในการทดลองประสิทธิภาพของ DAF ค่อนข้างใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 27.4% ถึง 32.9% ดังนั้นการปนเปื้อนของสารชนิดนี้ในแหล่งน้ำในกรณีซึ่งหากใช้กระบวนการ DAF กับแหล่งน้ำนั้น Sodium Lauryl Sulfate ซึ่งปนเปื้อนอยู่จึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ DAF

8. การใช้สารเคมีเป็นโคแอกกูแลนท์และการปรับ pH ของน้ำในเบื้องต้นก่อนใช้กระบวนการ DAF เป็นสิ่งจำเป็นที่จะทำให้ประสิทธิภาพของ DAF สูงขึ้น

ตัวอย่างน้ำซึ่งไม่ได้บำบัดหรือปรับสภาพโดยโคแอกกูแลนท์หรือปรับ pH ก่อนการใช้ DAF จะให้ประสิทธิภาพของ DAF เพียง 28.5% ในขณะที่เมื่อใช้สารส้ม 40 mg/L เป็นโคแอกกูแลนท์และปรับ pH เท่ากับ 7 ให้ประสิทธิภาพของ DAF 82.4% และเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ 40 mg/L เป็นโคแอกกูแลนท์และปรับ pH เท่ากับ 5 จะให้ประสิทธิภาพของ DAF 78%

เมื่อพิจารณาถึงสภาวะที่เหมาะสมและประหยัดที่สุดของโคแอกกูแลนท์ พบว่าสารส้มมีความเหมาะสมกว่าเฟอร์ริกคลอไรด์ เนื่องจากราคาถูกกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่า

9. จากงานวิจัยนี้พบว่า การทำฟล้อคคูเลชันก่อนการบำบัดด้วย DAF ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพของ DAF สูงขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้ตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษา เช่น ความดันที่ใช้ , อัตราการเวียนกลับ , ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ ตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรในการควบคุม DAF (operational variables) ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ (design variables) เช่น อัตราภาระทางชลศาสตร์ (hydraulic loading rate), อัตราภาระของแข็ง (solids loading rate) เป็นต้น

2. จากผลการทดลองที่ได้พบว่าประสิทธิภาพโดยรวมของ DAF ในการกำจัดสาหร่ายยังไม่ดีนัก จึงอาจทำการทดลองโดยใช้กระบวนการอื่นร่วมด้วย เช่น DAF ร่วมกับ การกรอง (Filtration)

3. ควรมีการวิจัยเพิ่มเติมโดยใช้ตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำซึ่งใช้เป็นน้ำดิบในการผลิตน้ำประปาจริงๆ เพื่อให้ทราบถึงสภาวะจริงของปัญหาเรื่องสาหร่ายสำหรับแหล่งน้ำดิบในปัจจุบันและผลที่ได้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลในการหาทางแก้ไขปัญหาได้

4. ในกรณีหากมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวัดปริมาณสาหร่าย อาจค้นคว้าหาวิธีในการวัดปริมาณเซลล์สาหร่ายวิธีอื่น นอกจากวิธีการนับเซลล์โดยตรง เนื่องจากการนับเซลล์โดยตรง แม้จะเป็นวิธีที่นิยม เนื่องจากสะดวกและรวดเร็วแต่อาจเกิดการผิดพลาดจากการนับได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กาญจนภาชน์ ลิ่วมโนมนต์. 2527. สาหร่าย, คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศน์. 2538. วิศวกรรมการประปาเล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ยุวดี พีรพรพิศาล และ ฉมาภรณ์ นิวาศะบุตร. 2531. คู่มือปฏิบัติการสาหร่ายวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

เสริมพล รัตสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2518. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน. หน่วยวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ประยุกต์แห่งประเทศไทย.

สืบศักดิ์ อยู่จุ้ย. 2531. การศึกษาแบบจำลองการเกิดแอลจีโดยใช้พลาสติกมีเดียในถังตกตะกอนแบบน้ำไหลขึ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุดา อนันทสิมานนท์. 2527. พฤติกรรมของพรีฟิลเตอร์ในการขจัดแอลจี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Abo-El Ela, S.L., and Nawar, S.S. 1980. Treatment of Wastewater from an Oil and Soap

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Factory via Dissolved Air Flotation. Environment International,.Vol. 7, pp.47-52.

Arora, H., DeWolfe, J.R.,Lee,R.G., and Grubb, T.P. 1995. Evaluation of Dissolved Air Flotation Process for Water Clarification and Sludge Thickenting. Wat. Sci Tech. Vol. 31, No.3-4, pp. 137-147.

Bunker, Jr.D.Q.,Edwzwald, J.K.,Dahlquist, J., and Gillberg, L.1995. Pretreatment Consideration for Dissolved Air Flotation : Water Type, Coagulants and Flocculation. Wat. Sci. Tech. Vol.31 , No.3-4, PP.63-71.

Cassell, E.A., Kaufman, K.m., and Matijevic. 1974. The Effect of Bubble Size on Microflotation. Water Research. Vol.9, pp. 1017-1024.

Craenenbrocek, W.V.,Bogaert, J.V., and Ceulemans,J. 1993. The Use of Dissolved Air Flotation For The Removal of Algae-The Antwerp Experience. Water Supply. Vol. 11, No.324, pp.123-133.

Eckenfelder,W.W.Jr. 1989. Industrial Water Pollution Control. second edition. McGraw-Hill.

Edzwald, J.K. 1993. Algae, Bubble, Coagulation, and Dissolved Air Flotation. Wat. Sci. Tech. Vol. 27, No. 10, pp. 61-81.

Edzwald, J.K., and Wingler, B.J. 1990. Chemical and Physical Aspects of Dissolved Air Flotation for The Removal of Algae. Aqua. Vol. 39, pp. 24-35.

Edzwald, J.K., walsh, J.P., and Kaminski, G.S. 1992. Flocculation and Air Requirements for Dissolved Air Flotation. Journal AWWA. March, pp. 92-100.

Hopkins, E.S., and Bean, E. I., 1966. Water Purification Control. The Williams and Wilkins Co., Baltimore, 4th ed. pp. 196-202.

Jamil, K. 1991. Flotation of Slaughterhouse Wastewater : Operational Optimization of a Full-Scale Unit. Thesis. Master of Engineering. Asian Institute of Technology.

Kalinske, A.A. 1957. Flotation in Waste Treatment. Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes. Vol. 2, pp. 222-231.

Kitchener, J.A., and Gochin, R.J. 1981. The mechanism of Dissolved Air Flotation for Potable Water : Basic Analysis and a Proposal. Water Research. Vol. 15, pp. 585-590.

Leininger, K.V. 1975. Factors Influencing Batch Flotation Test. Journal WPCF. Vol. 47, No. 5, pp. 1086 – 1087.

Lovett, D.A., and Travers, S.M. 1984. Dissolved Air Floatation for Abattoir Wastewater. Water Research. Vol. 20, No. 4, pp. 421-426.

Metcalf and Eddy. 1991 Wastewater Engineering : Disposal and Reuse. third edition. Revised by Tchobanoglous, G., and Burton, F.L., McGraw Hill, pp. 243-244.

Montgomery, J.M. 1985. Water Treatment Principles and Design. Awiley-Interscience, pp. 116-133.

Ng. W. J., Goh, A.C., and Tay, J.H. 1988. Palm Oil Mill Effluent Treatment-Liquid-Solid Separation With Dissolved Air Flotation. Biological Waste. pp. 257-268.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Palmer, M. C., 1962. Algae in Water Supplies. pp. 50-66. U.S. Department of Health, Education and Wefare, Washington D. C.

Rusten, B., Eikebrokk, B., and Thorusvaldese, G. 1990. Conagulation as Pretreatment of Food Industry Wastewater. Water Science and Technology. Vol. 22, No. 9, pp. 1-8.

Schers, G. J., and Dijk, J. C. Van. 1992. Dissolved Air Flotation theory and practice, Graduation Thesis, Dcpt. of Civil Engineering, Technical University Delft, Netherland.

Wasan, D.T., Ginn, M.E., and Shah, D.O. 1988. Surfactants in Chemical/ Process Engineering. New York : Marcel Dekker, Inc.

Weber, W.J.Jr. 1972. Physicochemical Process for Water Quality Control. 1st.ed, New York : Wiley interscience.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การเพาะเลี้ยงสาหร่าย Chlorella

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเพาะเลี้ยงสาหร่าย Chlorella

สาหร่ายซึ่งใช้ในการทดลองสำหรับเตรียมน้ำสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เป็นสาหร่ายพันธุ์ Chlorella Species ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ การเพาะเลี้ยงทำโดยใช้สูตรอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อ NHIII ของทางสถาบันฯ ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

ตารางที่ ก. 1 สูตรอาหาร NH III

สารเคมี	ปริมาณ (กรัม)/ 1000mL (น้ำ)	mL/1000mL ของ Media
KNO_3	101.1	10
$KH_2 PO_4$	120	2
$MgSO_4.7H_2O$	62	2
$CaCl_2.2H_2O$	7.4	2
NaCl	116.8	0.1
KBr	595	
KJ	415	
LiCl	21.2 /1000 mL	2
H_3BO_3	77	
$MnCl_2. 4H_2O$	50	2
$Fe(NO_3)_3.9H_2O$	810	
EDTA	750 /100 mL	2

การเลี้ยงทำโดยนำ stock พันธุ์สาหร่ายซึ่งเก็บไว้ในตู้เย็น นำออกมาตั้งทิ้งไว้ 1 วัน ที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงถ่ายเชื้อลงในภาชนะที่เตรียมน้ำเลี้ยงไว้ สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ขวดโหลขนาด 5 ลิตร ตั้งไว้ให้ได้รับแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ตลอดเวลา 4 หลอด และมีสายยางท่ออากาศจากเครื่องปั๊มอากาศโดยใช้หัวจ่ายอากาศให้กับสาหร่ายที่เลี้ยงในขวดโหลแต่ละใบ ดังแสดงในรูปที่ ก. 1

รูปที่ ก. 1 การเลี้ยงสาหร่ายที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

วิธีการนับเซลล์สาหร่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

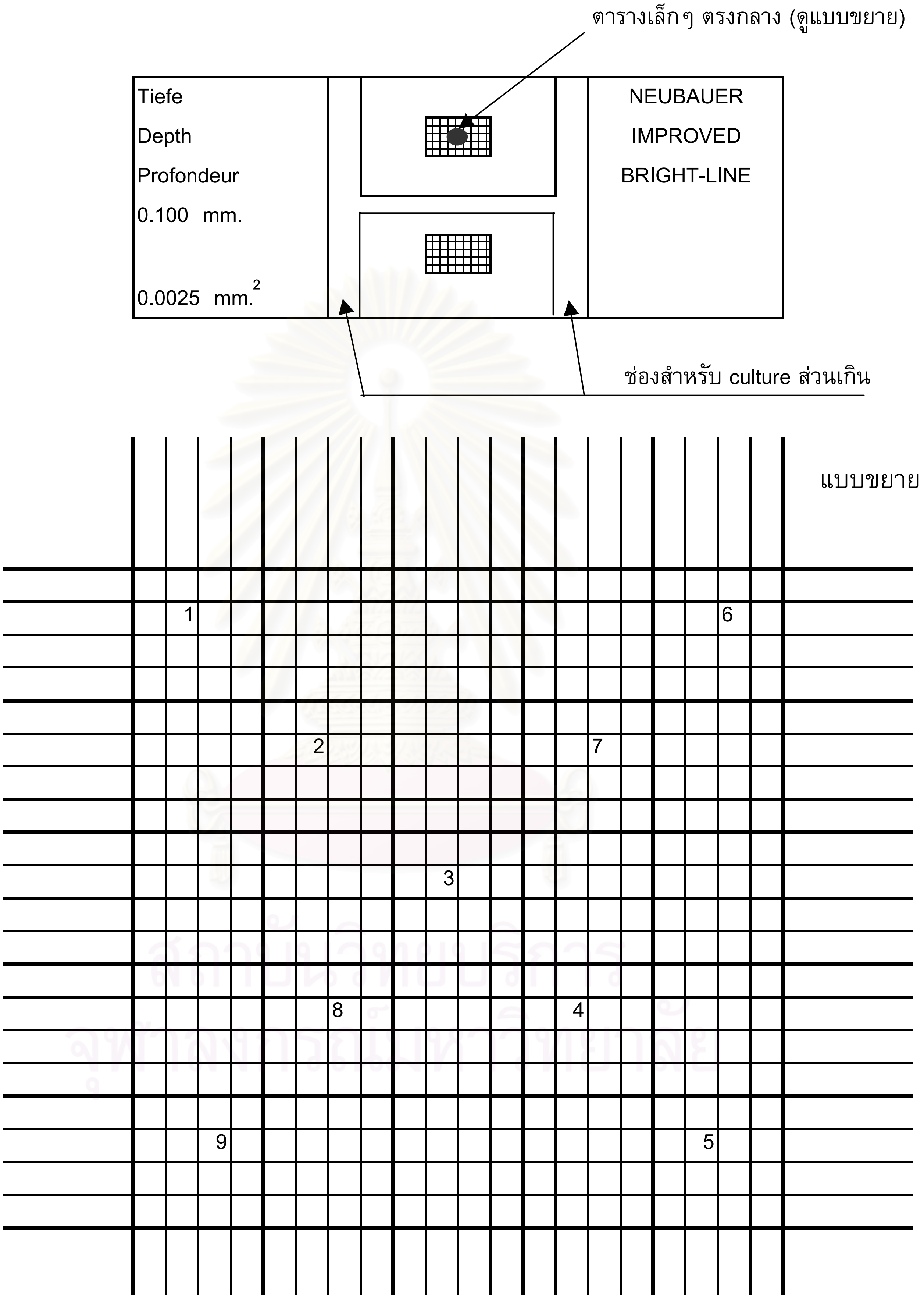
วิธีการนับเซลล์สาหร่าย

การวัดปริมาณสาหร่ายโดยวิธีการนับเซลส์โดยตรงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีซึ่งได้รับความนิยมมากในการศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตหรือปริมาณของสาหร่าย เนื่องด้วยเป็นวิธีที่ค่อนข้างมีความสะดวกและรวดเร็ว โดยในการนับเซลล์สาหร่ายจะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า counting chamber หรืออาจเรียกว่า heamacytometer เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการนับเซลล์ของเม็ดเลือดแดง ขนาดของสาหร่ายเซลล์เดียว เช่น Chlorella ซึ่งมีขนาดเซลล์ใกล้เคียงกับเซลล์เม็ดเลือดแดงจึงนิยมวัดปริมาณโดยใช้ counting chamber นี้

counting chamber ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิด Neubauer improved bright-line ซึ่งทราบขนาดของช่องที่แน่นอนคือ 0.0025 มม.^{2} และมีความลึก 0.100 มม. การนับจำนวนสาหร่ายทำโดยสุ่มตัวอย่างน้ำจากน้ำเลี้ยงสาหร่ายมาหยดลงบน counting chamber แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ แล้วนับจำนวนเซลล์โดยอาจนับแบบสุ่มบางตาราง อาจจะเป็นแนวทะแยงหรือแนวขนานก็ได้ในกรณีที่มีจำนวนเซลล์มาก หรืออาจจะนับในทุกตารางถ้ามีประมาณเซลล์ไม่มากนัก ในการนับแต่ละครั้งอาจมีการผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้น ในการนับจึงควรมีการนับมากกว่า 1 ครั้ง แล้วใช้ค่าเฉลี่ยผลในการนับ นำมาหาจำนวนเซลล์ทั้งหมดของสาหร่ายได้ในหน่วยของจำนวนเซลล์/มล.

ตัวอย่างลักษณะของตารางใน counting chamber แสดงในรูปที่ ข. 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 แสดงรายละเอียด counting chamber

หลักการมีดังนี้

ตารางสี่เหลี่ยมจตุรัสใหญ่ตรงกลางมีพื้นที่ 1 ตารางมิลลิเมตร ภายในตารางใหญ่นี้จะแบ่งย่อยออกเป็นตารางเล็ก ๆ ได้ 400 ตาราง ดังนั้น ในแต่ละตารางเล็กจะมีพื้นที่ 1/400 ตารางมิลลิเมตร

เมื่อหยด culture ที่มีสาหร่ายลงบนตารางสี่เหลี่ยมจตุรัสใหญ่ตรงกลางแล้วปิดทับด้วยกระจกปิดสไลด์ culture ที่เกินความต้องการจะไหลลงร่องเล็ก ๆ กลางสไลด์ ใช้กระดาษหรือผ้าสะอาดเช็ดออกแล้วปล่อยทิ้งไว้ 3-5 นาที เพื่อให้สาหร่ายอยู่กับที่

เมื่อเตรียมสไลด์และได้สาหร่ายกระจายตัวดีแล้ว เราจะเริ่มนับสาหร่าย ถ้าสาหร่ายมีปริมาณน้อย ควรจะนับทั้งหมดในพื้นที่ 1 ตารางมิลลิเมตร แต่ถ้าสาหร่ายมีจำนวนมากก็เลือกสุ่ม การสุ่มจะเลือกสุ่มตามแนวทะแยงหรือแนวขนานก็ได้

ตัวอย่าง ในตารางเล็ก ๆ 16 ตารางในตารางใหญ่ หมายเลข 1 นับสาหร่ายได้ 50 เซลล์

หมายเลข 2 นับสาหร่ายได้ 28 เซลล์

หมายเลข 3 นับสาหร่ายได้ 42 เซลล์

หมายเลข 4 นับสาหร่ายได้ 71 เซลล์

หมายเลข 5 นับสาหร่ายได้ 35 เซลล์

หมายเลข 6 นับสาหร่ายได้ 43 เซลล์

หมายเลข 7 นับสาหร่ายได้ 54 เซลล์

หมายเลข 8 นับสาหร่ายได้ 19 เซลล์

หมายเลข 9 นับสาหร่ายได้ 22 เซลล์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้น ใน 9 ตารางใหญ่ นับสาหร่ายได้ 50+28+42+71+35+43+54+19+22

= 364 เซลล์

เนื้อที่ในตารางใหญ่แต่ละตาราง = 16/400 ตารางมิลลิเมตร

ดังนั้น 9x16/400 ตารางมิลลิเมตรมีสาหร่าย = 364 เซลล์

ใน 1 ตารางมิลลิเมตรมีสาหร่าย $\frac{364 \times 1 \times 400}{9 \times 16} = \frac{145600}{144}$

= 1011 เซลล์

media นี้มีความลึก = 0.1 มิลลิเมตร

ใน 1 x 0.1 ลูกบาศก์มิลลิเมตรมีสาหร่าย = 1011 เซลล์

ใน 1 ลูกบาศก์มิลลิเมตรมีสาหร่าย $\frac{1011 \times 1}{1 \times 0.1}$ = 10110 เซลล์

ใน 1 มล. (ลบ.ซม.) จะมีสาหร่าย 10110×10^3 เซลล์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การหาค่า s_a และ A/S ratio

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่า s_a

s_a คือ ปริมาณอากาศซึ่งละลายอยู่ในน้ำที่ความดันบรรยากาศ มีหน่วยเป็น มิลลิลิตร/ลิตร โดยปริมาณอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ณ. ความดันบรรยากาศ แสดงอยู่ในตารางที่ 2.1 วิธีการหา s_a ทำโดยวัดอุณหภูมิของน้ำและนำไปเทียบอ่านค่า s_a จากในตาราง

การหาค่า A/S ratio

A/S ratio หมายถึง อัตราส่วนของปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็ง มีหน่วยคือ มิลลิกรัมของอากาศ/มิลลิกรัมของของแข็ง ค่า A/S ratio สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$A/S = 1.3s_a(fP-1)\,R / S_aQ \qquad \text{---------------------(2.3)}$$

โดย A/S = อัตราส่วนของปริมาณอากาศกับปริมาณของแข็ง, มก.ของอากาศ/มก. ของแข็ง

s_a = ปริมาณอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำ, มล./ลิตร

S_a = ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย, มก./ลิตร

f = การละลายน้ำของอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการอัดอากาศ

โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.7 – 0.9

P = ความดัน, บาร์

R = อัตราไหลกลับสู่ระบบ, ลบ.ม./วัน หรือลบ.ม. กรณีถังปฏิกรณ์แบบแบตช์

Q = อัตราไหลเข้าของน้ำเสีย, ลบ.ม./วัน หรือลบ.ม. กรณีถังปฏิกรณ์แบบแบตช์

ตัวอย่างการคำนวณ A/S ratio

ใช้ตัวอย่างน้ำจาก polishing pond ในฤดูฝน

ความดันที่ใช้ในการอัดอากาศ	=	4	atm
อัตราการเวียนกลับ	=	10 %	
ปริมาณของแข็งแขวนลอย	=	74	mg/L
ค่า f (สำหรับ unpacked saturator)	=	0.7	
อุณหภูมิ 30 $^{\circ}$C ค่า s_a	=	17.9	ml/L
ปริมาณน้ำเข้า	=	3.5	L

แทนค่าในสมการ A/S = $1.3s_a(fP-1)\ R\ /\ S_aQ$ ---------------------(2.3)

$$A/S = \frac{1.3(17.9)(0.7x4-1)0.35}{1.5\ (74)}$$

$$= 0.0566$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการทดลองหาค่า A/S ratio

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ : น้ำสังเคราะห์ใช้สาหร่าย Chlorella

การทดลองครั้งที่ 1 อุณหภูมิ 32^0 C , s_a = 17.60 ml/L , S_a = 15 mg/L

การทดลองครั้งที่ 2 อุณหภูมิ 32^0 C , s_a = 17.60 ml/L , S_a = 15 mg/L

: น้ำจาก polishing pond

การทดลองครั้งที่ 1 อุณหภูมิ 30^0 C , s_a = 17.90 ml/L , S_a = 87 mg/L

การทดลองครั้งที่ 2 อุณหภูมิ 32^0 C , s_a = 17.60 ml/L , S_a = 88 mg/L

การทดลองครั้งที่ 3 อุณหภูมิ 31^0 C, s_a = 17.75 ml/L , S_a = 82 mg/L

การทดลองครั้งที่ 4 อุณหภูมิ 30^0C , s_a = 17.90 ml/L , S_a = 74 mg/L

การทดลองครั้งที่ 5 อุณหภูมิ 30^0C , s_a = 17.90 ml/L , S_a = 86 mg/L

การทดลองครั้งที่ 6 อุณหภูมิ 29^0C , s_a = 18.12 ml/L , S_a = 94 mg/L

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค. 1

ข้อมูลการทดลอง : ค่า A/S ratio เมื่อใช้อัตราการเวียนกลับค่าต่างๆ ในการทดลอง 4.1

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ : น้ำสังเคราะห์

: น้ำจาก polishing pond

สภาวะการใช้งาน DAF : ความดันที่ใช้ = 4 บาร์

: ปริมาณน้ำที่ใช้ = 3.5 ลิตร

: ค่า f = 0.7

อัตราการเวียนกลับ (%)	**อัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็ง** (A/S ratio)							
	ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ : Chlorella		**ตัวอย่างน้ำจาก** polishing pond					
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่** 2	**ครั้งที่** 1	ครั้งที่ 2	**ครั้งที่** 3	**ครั้งที่** 4	**ครั้งที่** 5	**ครั้งที่** 6
2	0.055	0.055	0.010	0.009	0.010	0.011	0.010	0.009
4	0.110	0.110	0.019	0.019	0.020	0.023	0.019	0.018
6	0.165	0.165	0.029	0.028	0.030	0.034	0.029	0.027
8	0.220	0.220	0.039	0.037	0.041	0.045	0.039	0.036
10	0.275	0.275	0.048	0.047	0.051	0.057	0.049	0.045
12	0.329	0.329	0.058	0.056	0.061	0.068	0.058	0.054

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.

ข้อมูลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1

ข้อมูลการทดลองที่ 4.1 การทดลองหาค่าอัตราการเวียนกลับและค่า A/S ratio ที่เหมาะสม

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ : ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์

สภาวะการใช้งาน DAF : ความดันที่ใช้ = 4 บาร์

: ปริมาณน้ำที่ใช้ = 3.5 ลิตร

อัตราการเวียนกลับ (%)	**การทดลองครั้งที่ 1**		**การทดลองครั้งที่2**	
	สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)	**สาหร่ายที่เหลือ(cells/mL)**	**สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)**	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**
2	10^{5}	10^{5}	10^{5}	10^{5}
4	10^{5}	10^{5}	10^{5}	$9.4x10^{4}$
6	10^{5}	$8.6x10^{4}$	10^{5}	$8.2x10^{4}$
8	10^{5}	$7.0x10^{4}$	10^{5}	$7.0x10^{4}$
10	10^{5}	$6.6x10^{4}$	10^{5}	$6.4x10^{4}$
12	10^{5}	$6.2x10^{4}$	10^{5}	$6.2x10^{4}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.2

ข้อมูลการทดลองที่ 4.1 การทดลองหาค่าอัตราการเวียนกลับและค่า A/S ratio ที่เหมาะสม

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ : ตัวอย่างน้ำจาก polishing pond

สภาวะการใช้งาน DAF : ความดันที่ใช้ = 4 บาร์

: ปริมาณน้ำที่ใช้ = 3.5 ลิตร

อัตราการเวียนกลับ (%)	**การทดลองครั้งที่ 1**		**การทดลองครั้งที่2**	
	สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**	**สาหร่ายเริ่มต้น(cells/mL)**	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**
2	$5.2x10^{4}$	$5.2x10^{4}$	$4.8x10^{4}$	$4.6x10^{4}$
4	$5.2x10^{4}$	$4.4x10^{4}$	$4.8x10^{4}$	$3.8x10^{4}$
6	$5.2x10^{4}$	$3.6x10^{4}$	$4.8x10^{4}$	$3.2x10^{4}$
8	$5.2x10^{4}$	$3.0x10^{4}$	$4.8x10^{4}$	$3.0x10^{4}$
10	$5.2x10^{4}$	$2.8x10^{4}$	$4.8x10^{4}$	$2.4x10^{4}$
12	$5.2x10^{4}$	$2.4x10^{4}$	$4.8x10^{4}$	$2.2x10^{4}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.3

ข้อมูลการทดลองที่ 4.1 การทดลองหาค่าอัตราการเวียนกลับและค่า A/S ratio ที่เหมาะสม

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ : ตัวอย่างน้ำจาก polishing pond

สภาวะการใช้งาน DAF : ความดันที่ใช้ = 4 บาร์

: ปริมาณน้ำที่ใช้ = 3.5 ลิตร

อัตราการเวียนกลับ (%)	**การทดลองครั้งที่ 3**		**การทดลองครั้งที่4**	
	สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**	**สาหร่ายเริ่มต้น(ells/mL)**	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**
2	$4.4x10^{4}$	$4.4x10^{4}$	$3.8x10^{4}$	$3.8x10^{4}$
4	$4.4x10^{4}$	$3.8x10^{4}$	$3.8x10^{4}$	$3.4x10^{4}$
6	$4.4x10^{4}$	$3.4x10^{4}$	$3.8x10^{4}$	$2.8x10^{4}$
8	$4.4x10^{4}$	$3.4x10^{4}$	$3.8x10^{4}$	$2.2x10^{4}$
10	$4.4x10^{4}$	$2.6x10^{4}$	$3.8x10^{4}$	$2.0x10^{4}$
12	$4.4x10^{4}$	$2.4x10^{4}$	$3.8x10^{4}$	$1.8x10^{4}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.4

ข้อมูลการทดลองที่ 4.1 การทดลองหาค่าอัตราการเวียนกลับและค่า A/S ratio ที่เหมาะสม

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ : ตัวอย่างน้ำจาก polishing pond สภาวะการใช้งาน DAF

: ความดันที่ใช้ = 4 บาร์

: ปริมาณน้ำที่ใช้ = 3.5 ลิตร

อัตราการเวียนกลับ (%)	**การทดลองครั้งที่ 5**		**การทดลองครั้งที่ 6**	
	สาหร่ายเริ่มต้น(cells/mL)	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**	**สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)**	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**
2	$5.2x10^4$	$5.0x10^4$	$6.0x10^4$	$5.8x10^4$
4	$5.2x10^4$	$4.4x10^4$	$6.0x10^4$	$5.0x10^4$
6	$5.2x10^4$	$3.8x10^4$	$6.0x10^4$	$4.0x10^4$
8	$5.2x10^4$	$3.0x10^4$	$6.0x10^4$	$3.2x10^4$
10	$5.2x10^4$	$2.4x10^4$	$6.0x10^4$	$3.2x10^4$
12	$5.2x10^4$	$2.2x10^4$	$6.0x10^4$	$2.8x10^4$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.5

ข้อมูลการทดลองที่ 4.2 การทดลองหาค่าความดันที่เหมาะสม

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ : ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์

สภาวะการใช้งาน DAF : ค่า A/S ratio ที่ใช้ = 0.25

: ปริมาณน้ำที่ใช้ = 3.5 ลิตร

ความดัน (บาร์)	อัตราการเวียนกลับ (%)	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2	
		สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)	สาหร่ายที่เหลือ(cells/mL)	สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)	สาหร่ายที่เหลือ(cells/mL)
2	41	10^5	$6.6x10^4$	10^5	$6.2x10^4$
3	15	10^5	$6.2x10^4$	10^5	$7.2x10^4$
4	9	10^5	$6.2x10^4$	10^5	$6.4x10^4$
5	7	10^5	$6.0x10^4$	10^5	$6.2x10^4$
6	5	10^5	$5.8x10^4$	10^5	$6.4x10^4$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.6

ข้อมูลการทดลองที่ 4.3 การทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของสาหร่าย

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ : ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์

สภาวะการใช้งาน DAF : ค่าดันที่ใช้ = 5 บาร์

: อัตราการเวียนกลับ = 10 %

: ปริมาณน้ำที่ใช้ = 3.5 ลิตร

การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่2	
สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**	**สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)**	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**
$1x10^5$	$6.5x10^4$	$1x10^5$	$6.5x10^4$
$2x10^5$	$1.25x10^5$	$2x10^5$	$1.2x10^5$
$3x10^5$	$1.7x10^5$	$3x10^5$	$1.8x10^5$
$4x10^5$	$2.35x10^5$	$4x10^5$	$2.35x10^5$
$5x10^5$	$2.8x10^5$	$5x10^5$	$3.05x10^5$
$6x10^5$	$3.2x10^5$	$6x10^5$	$3.3x10^5$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.7

ข้อมูลการทดลองที่ 4.4 การทดลองศึกษาผลของความขุ่นและกรดฮิวมิก

ตัวอย่างน้ำที่ใช้	:	ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์		
สภาวะการใช้งาน DAF	:	ความดันที่ใช้	= 5 บาร์	
	:	อัตราการเวียนกลับ	= 10 %	
	:	ปริมาณน้ำที่ใช้	= 3.5 ลิตร	

ปริมาณ kaolin (mg/L)	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่2	
	สาหร่ายเริ่มต้น(cells/mL)	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**	**สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)**	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**
50	10^5	$6.4x10^4$	10^5	$6.2x10^4$
100	10^5	$6.6x10^4$	10^5	$6.6x10^4$
150	10^5	$6.0x10^4$	10^5	$6.4x10^4$
200	10^5	$6.2x10^4$	10^5	$6.2x10^4$
250	10^5	$6.0x10^4$	10^5	$5.8x10^4$
300	10^5	$6.6x10^4$	10^5	$6.4x10^4$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.8

ข้อมูลการทดลองที่ 4.4 การทดลองศึกษาผลของความขุ่นและกรดฮิวมิก

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ : ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์

สภาวะการใช้งาน DAF : ความดันที่ใช้ = 5 บาร์

: อัตราการเวียนกลับ = 10 %

: ปริมาณน้ำที่ใช้ = 3.5 ลิตร

ปริมาณกรดฮิวมิก (mg/L)	**การทดลองครั้งที่ 1**		**การทดลองครั้งที่2**	
	สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**	**สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)**	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**
1	10^5	$6.4x10^4$	10^5	$6.2x10^4$
5	10^5	$6.4x10^4$	10^5	$5.8x10^4$
10	10^5	$5.8x10^4$	10^5	$6.2x10^4$
15	10^5	$6.0x10^4$	10^5	$6.0x10^4$
20	10^5	$5.6x10^4$	10^5	$6.0x10^4$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.9

ข้อมูลการทดลองที่ 4.5 การทดลองศึกษาผลของ Sodium Lauryl Sulfate

ตัวอย่างน้ำที่ใช้	:	ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์		
สภาวะการใช้งาน DAF	:	ความดันที่ใช้	=	5 บาร์
	:	อัตราการเวียนกลับ	=	10 %
	:	ปริมาณน้ำที่ใช้	=	3.5 ลิตร

ปริมาณ Sodium Lauryl Sulfate (mg/L)	**การทดลองครั้งที่ 1**		**การทดลองครั้งที่2**	
	สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**	**สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)**	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**
0.5	10^5	6.6x10^4	10^5	6.4x10^4
1	10^5	6.0x10^4	10^5	6.2x10^4
3	10^5	6.2x10^4	10^5	7.0x10^4
5	10^5	5.8x10^4	10^5	6.4x10^4
10	10^5	6.6x10^4	10^5	6.0x10^4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.10

ข้อมูลการทดลองที่ 4.6 การทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับ DAF

ตัวอย่างน้ำที่ใช้	:	ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์	
โคแอกกูเลชัน	:	ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูเลชัน กวนเร็ว 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที	
สารปรับ pH	:	ใช้ 1N H_2SO_4 และ 1N NaOH	
สภาวะการใช้งาน DAF	:	ความดันที่ใช้	= 5 บาร์
	:	อัตราการเวียนกลับ	= 10 %
	:	ปริมาณน้ำที่ใช้	= 3.5 ลิตร

ปริมาณสารส้ม (mg/L)	**pH**	**สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)**	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**
100	4	10^5	$2.6x10^4$
100	5	10^5	$2.2x10^4$
100	6	10^5	$2.2x10^4$
100	7	10^5	$1.8x10^4$
100	8	10^5	$2.6x10^4$
100	9	10^5	$3.8x10^4$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.11

ข้อมูลการทดลองที่ 4.6 การทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับ DAF

ตัวอย่างน้ำที่ใช้	:	น้ำสังเคราะห์	
โคแอกกูเลชัน	:	ใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูเลชัน กวนเร็ว 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที	
สารปรับ pH	:	ใช้ 1N H_2SO_4 และ 1N NaOH	
สภาวะการใช้งาน DAF	:	ความดันที่ใช้	= 5 บาร์
	:	อัตราการเวียนกลับ	= 10 %
	:	ปริมาณน้ำที่ใช้	= 3.5 ลิตร

ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ (mg/L)	**pH**	**สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)**	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**
100	4	10^5	$3.8x10^4$
100	5	10^5	$2.2x10^4$
100	6	10^5	$2.8x10^4$
100	7	10^5	$2.6x10^4$
100	8	10^5	$2.4x10^4$
100	9	10^5	$2.6x10^4$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.12

ข้อมูลการทดลองที่ 4.6 การทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับ DAF

ตัวอย่างน้ำที่ใช้	:	ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์	
โคแอกกูเลชัน	:	ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูเลชัน กวนเร็ว 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที	
pH	:	7	
สภาวะการใช้งาน DAF	:	ความดันที่ใช้	= 5 บาร์
	:	อัตราการเวียนกลับ	= 10 %
	:	ปริมาณน้ำที่ใช้	= 3.5 ลิตร

ปริมาณสารส้ม (mg/L)	**สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)**	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**
10	10^5	5.8×10^4
20	10^5	4.6×10^4
40	10^5	1.6×10^4
80	10^5	2.0×10^4
100	10^5	1.8×10^4
150	10^5	2.4×10^4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.13

ข้อมูลการทดลองที่ 4.6 การทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับ DAF

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ : ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์

โคแอกกูเลชัน : ใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ เป็นโคแอกกูเลชัน กวนเร็ว 200 รอบ

/

นาที เป็นเวลา 1 นาที

pH : 5

สภาวะการใช้งาน DAF : ความดันที่ใช้ = 5 บาร์

: อัตราการเวียนกลับ = 10 %

: ปริมาณน้ำที่ใช้ = 3.5 ลิตร

ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ (mg/L)	**สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)**	**สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)**
10	10^5	$5.0x10^4$
20	10^5	$2.6x10^4$
40	10^5	$2.0x10^4$
80	10^5	$2.0x10^4$
100	10^5	$2.4x10^4$
150	10^5	$2.2x10^4$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.14

ข้อมูลการทดลองที่ 4.7 การทดลองศึกษาผลของกระบวนการฟล้อคคูเลชันที่มีต่อ DAF

ตัวอย่างน้ำที่ใช้	:	ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์
โคแอกกูเลชัน	:	ใช้สารส้ม 100 mg/L เป็นโคแอกกูแลนท์
		กวนเร็ว 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที
สารปรับ pH	:	ใช้ 1N H_2SO_4 และ 1N NaOH
ฟล้อคคูเลชัน	:	กวนช้า 30 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที
สภาวะการใช้งาน DAF	:	ความดันที่ใช้ = 5 บาร์
	:	อัตราการเวียนกลับ = 10 %
	:	ปริมาณน้ำที่ใช้ = 3.5 ลิตร

ปริมาณสารส้ม (mg/L)	pH	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่2	
		สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)	สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)	สาหร่ายเริ่มต้น (cells/mL)	สาหร่ายที่เหลือ (cells/mL)
100	7	10^5	$2.4x10^4$	10^5	$1.8x10^4$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ.

การปรับแก้ค่าปริมาณสาหร่ายที่วัดได้
เนื่องจากผลของการเจือจาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การปรับแก้ค่าปริมาณสาหร่ายที่วัดได้
เนื่องจากผลของการเจือจาง (dilution effect)

เนื่องจากในการทดลองแต่ละครั้ง อัตราการเวียนกลับของน้ำมาอัดอากาศจะมีผลทำให้มีการเจือจางเกิดขึ้น ดังนั้นปริมาณสาหร่ายที่วัดได้จึงต้องทำการปรับแก้ค่าให้ถูกต้อง ซึ่งพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ในการเวียนกลับนั้นๆ เป็นแฟคเตอร์นำมาปรับแก้จึงจะได้ข้อมูลที่ถูกต้อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิษณุพล สงวนนวล เกิดวันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2513 จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2536 และได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย