

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย  
ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน

นายพชร โพธิ์ทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

TREATMENT OF WASTEWATER CONTAINING CUTTING OIL PARTICLES AND ALGAE  
BY DISSOLVED AIR FLOTATION COMBINED WITH COAGULATION PROCESS

Mr. Potchara Pothong

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อน  
สำหรับด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย  
ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน

โดย

นายเพชร โพธิ์ทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)

..... กรรมการ

(ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. ศรายุทธ ราฐ)

พชร โพธิ์ทอง : การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายโดยกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันหรือ MDAF (Modified Dissolved Air Flotation) (Modification of Dissolved Air Flotation Treatment of Wastewater Containing Cutting Oil Particles and Algae by Dissolved Air Flotation Combined with Coagulation Process) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ, 182 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการกำจัดอนุภาคแขวนลอยออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันหรือ MDAF (Modified Dissolved Air Flotation) ด้วยน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดและน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการบำบัด คือ ชนิดของน้ำเสียและพลศาสตร์ของไหลของน้ำเสีย โดยชนิดของน้ำเสียจะส่งผลต่อความจำเป็นของกระบวนการโคแอกกูเลชัน และปริมาณอากาศที่เหมาะสมต่อการบำบัดหรือค่าสัดส่วน A/S ในขณะที่ปัจจัยทางพลศาสตร์ของไหลจะส่งผลต่อการรวมและการแยกตะกอนที่เหมาะสมซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปร G.T (ผลคูณระหว่างความปั่นป่วนและระยะเวลาพัก) และค่า OFR (อัตราน้ำล้นผิว) โดยงานวิจัยนี้พบว่าค่า G.T และ OFR ที่เหมาะสมคือ 5,500 วินาทีต่อวินาที และ 0.15 ถึง 0.25 เมตรต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งการเดินระบบที่สภาวะดังกล่าวเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ MDAF จะได้ประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 82 (ประสิทธิภาพ DAF เท่ากับร้อยละ 0) ที่อัตราส่วน  $Al_2(SO_4)_3$  100 มิลลิกรัมต่อ 1 กรัม น้ำมันตัดในน้ำเสีย และค่าอัตราส่วน A/S ในช่วง 0.024 ถึง 0.052 กรัมอากาศต่อกรัมน้ำมัน ในขณะที่การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการ DAF และ MDAF มีประสิทธิภาพการบำบัดที่เท่ากันคือ ร้อยละ 65 และ 45 สำหรับเซลล์สาหร่ายอายุ 10 วัน และ 15 วัน ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณ  $Al_2(SO_4)_3$  15 มิลลิกรัมต่อ  $10^9$  เซลล์สาหร่ายในน้ำเสีย และค่าสัดส่วน A/S เท่ากับ 0.053 กรัมอากาศต่อ  $10^9$  เซลล์ นอกจากนี้ จากการประยุกต์ใช้โมเดลการกรองและโมเดลการดูดซับพบว่า โมเดลการดูดซับมีความแม่นยำในการทำนายประสิทธิภาพสูงกว่าโมเดลการกรอง นอกจากนี้ โมเดลการดูดซับยังสามารถอธิบายลักษณะการเกาะติดระหว่างฟองอากาศและอนุภาคได้ว่าเป็นไปตามแบบจำลองของแลงมัวร์ และสามารถประมาณค่าสัดส่วน A/S หรือ A/ΔS ที่เหมาะสมได้เท่ากับ 0.028 ถึง 0.033 กรัมอากาศต่อกรัมน้ำมันตัด

ภาควิชา.วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....



## 5270402721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : CUTTING OILY WASTEWATER / ALGAE-CONTAINING WASTEWATER / DISSOLVED AIR FLOTATION (DAF) / COAGULATION PROCESS / FLUID DYNAMIC PARAMETERS

POTCHARA POTHONG : TREATMENT OF WASTEWATER CONTAINING CUTTING OIL PARTICLES AND ALGAE BY DISSOLVED AIR FLOTATION COMBINED WITH COAGULATION PROCESS. ADVISOR : ASST. PROF. PISUT PAINMANAKUL, CO-ADVISOR : ASST. PROF. CHIYAPORN PUPRASERT, 182 pp.

The aim of this research was to study the treatment of wastewater containing cutting oil and algae by the combining process of Dissolved Air Flootation (DAF) and coagulation, which was denoted as the Modified Dissolved Air Flootation (MDAF). It was found that the treatment efficiencies were affected by the wastewater types in terms of coagulation process required and the A/S ratio, and the fluid dynamic parameters (i.e. G.T and OFR values). From this study, the optimal G.T and OFR values were 5,500 s/s and 0.15 – 0.25 m/min, respectively. The treatment efficiency of the cutting oil wastewater by MDAF process in this condition was 82% with the coagulant (alum) dosage of 100 mg-alum/1 g-oil. The A/S ratio in the range of 0.024 – 0.052 g-air/g-oil was obtained. Moreover, the treatment efficiencies of DAF and MDAF processes were relatively closed at 65% and 45% for the wastewater containing algae with 10 and 15 day cell age, respectively. In this case, the ratio of alum to cell numbers was 15 mg-alum/ $10^9$  cells with the A/S ratio of 0.053 g-air/ $10^9$  cells. Furthermore, from the mathematical model application, the adsorption isotherm model provided the advantages on the filtration efficiency equation for predicting of treatment efficiency and describing the occurred mechanisms. In addition, the contact between cutting oil droplets and bubbles can be described by the Langmuir isotherm model. The  $A/\Delta S$  obtained from the isotherm model was in the range of 0.028 – 0.033 g-air/g-oil, which was similar to the experimental results.

Department : Environmental Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011 Co-advisor's Signature .....



## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้โอกาส คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ และ ดร. ศราวุธ ราชู ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำ ดิฉัน แก่ไขให้ งานวิจัยนี้เป็นไปในแนวทางที่ดี

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชา

ขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกๆ ท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ พี่ณัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและ คำแนะนำในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด และ นางสาวอรพิมพ์ ชนะปราชญ์ นางสาวอรภา ปรีชาวาท ที่ ช่วยทำการวิจัย รวมไปถึง พี่ เพื่อน และน้องทุกคน สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือ จนงานวิจัย สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปี 2552 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย และทุนสนับสนุนจากโครงการขับเคลื่อนการวิจัย ( STAR ) ในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬฯ 100 ปี) กลุ่มการวิจัยความเป็นไปได้และกำจัดจุลมลสารชนิด ใหม่ในสิ่งแวดล้อม (ปีที่ 1)

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่สนับสนุนและให้ โอกาสในการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1.บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2.เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	6
2.2 น้ำมันตัด.....	9
2.3 สากร่าย.....	10
2.4 การแยกน้ำมันตัดและสากร่ายที่มีการปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำ.....	19
2.5 กระบวนการลอยตัว.....	30
2.6 กลไกการลอยตัวด้วยอากาศละลาย.....	31
2.7 กระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	39
2.8 ทฤษฎีการตกตะกอน.....	42
2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49

บทที่	หน้า
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	58
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	58
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	62
4. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	93
4.1 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน...	93
4.2 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการลอยตัวด้วย อากาศละลาย.....	97
4.3 ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลและค่าสัดส่วน A/S.....	101
4.4 ผลการศึกษาการทำนายประสิทธิภาพด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	114
4.5 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วย กระบวนการ DAF.....	132
4.6 ผลการศึกษาค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเพื่อบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ DAF...	145
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	147
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	147
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	150
รายการอ้างอิง.....	153
ภาคผนวก.....	155
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบและตัวอย่างการคำนวณส่วนของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันตัด.....	156
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบและตัวอย่างการคำนวณส่วนของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อน สาหร่าย.....	174
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	182

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ค่าการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ.....	6
2-2	ลักษณะทางกายภาพของสาหร่ายชนิดต่างๆ.....	18
2-3	การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย.....	21
2-4	ประสิทธิภาพการออกซิเดชันของสาหร่ายชนิดต่างๆ.....	23
2-5	ประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมกับ กระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	26
2-6	ประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	28
2-7	ประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองร่วมกับกระบวนการโค แอกกูเลชัน.....	29
2-8	ผลการทดลองการตกตะกอนด้วยคอลลิมน์.....	47
2-9	การคำนวณประสิทธิภาพของถังตกตะกอนภายใต้สภาวะต่างๆ.....	48
3-1	คุณสมบัติของน้ำมันตัดที่ใช้ในการทดลอง.....	60
3-2	สูตรอาหารเหลวสำหรับเลี้ยงสาหร่าย (NHIII).....	61
3-3	คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	64
3-4	ปริมาณอากาศละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ณ ความดันอากาศ ต่างๆ.....	64
3-5	สรุปตัวแปรการออกแบบถังอัดความดัน (Pressure vessel).....	66
3-6	สรุปตัวแปรการออกแบบคอลลิมน์ลอยตะกอน.....	67
3-7	สรุปตัวแปรการศึกษาขนาดของฟองอากาศที่ได้จากชุดทดสอบ.....	71
3-8	สรุปตัวแปรการศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด.....	72
3-9	สรุปตัวแปรการศึกษาระบวนการจาร์เทส.....	74
3-10	สรุปตัวแปรการศึกษาระบวนการ DAF.....	76
3-11	สรุปตัวแปรการศึกษาระบวนการ MDAF.....	77
3-12	สรุปตัวแปรการศึกษากำหนดค่าสัณฐานวิทยาของไหล.....	80
3-13	สรุปตัวแปรการศึกษาค่าสัดส่วน A/S.....	82

ตารางที่		หน้า
3-14	ตัวแปรการศึกษาโมเดลการกรอง.....	85
3-15	สรุปตัวแปรการศึกษาโมเดลการดูดซับ.....	87
3-16	ตัวแปรการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กราฟมาตรฐานวิเคราะห์ปริมาณ สาหร่าย.....	89
3-17	ตัวแปรการศึกษากระบวนการจراثน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย.....	90
3-18	ตัวแปรการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการต่างๆ.....	92
4-1	ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียสังเคราะห์.....	93
4-2	ตัวแปรการออกแบบถังปฏิกริยา.....	132
4-3	ตัวแปรการออกแบบตามชนิดของน้ำเสีย.....	132
4-4	ลักษณะทางกายภาพของสาหร่ายคลอเรลล่า.....	133
4-5	ผลการคำนวณต้นทุนด้านพลังงาน.....	145
4-6	ผลการคำนวณต้นทุนด้านสารเคมี.....	146
5-1	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการต่างๆ.....	148
5-2	ตัวแปรการบำบัดหรือตัวแปรการออกแบบระบบ DAF และ MDAF.....	148

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	การผลัดกันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว.....	7
2-2	ความสัมพันธ์ของการลดลงของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำกับความเข้มข้น ของสารลดแรงตึงผิว.....	8
2-3	การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม.....	9
2-4	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสำหรับชนิดต่างๆด้วยกระบวนการทำให้ ให้ลอยด้วยอากาศละลาย การตกตะกอน และการกรองตรง.....	24
2-5	ส่วนสัมผัสและส่วนแยกในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย.....	32
2-6	กลไกการดักจับอนุภาคที่ปนเปื้อนในเฟสน้ำของฟองอากาศ 1 ฟอง.....	37
2-7	การแยกตัวของอนุภาคแขวนลอยที่เกาะติดกับฟองอากาศและฟองอากาศ อิสระออกจากเฟสน้ำ.....	39
2-8	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเข้มข้นที่เวลาใดๆต่อความเข้มข้นเริ่มต้น และอัตราน้ำดันผิวต่างๆ.....	43
2-9	กราฟสมมติผลการทดลองตามทฤษฎีการตกตะกอนแบบโดด.....	44
2-10	เปอร์เซ็นต์ความชุ่มที่เวลาและระดับความลึกต่างๆ.....	45
2-11	ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกอนแขวนลอยที่เวลาและความลึกต่างๆ.....	45
2-12	การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกอนแขวนลอยที่ความลึก d และเวลากัก เก็บน้ำ t.....	46
2-13	การวิเคราะห์ผลการทดลองตกตะกอนในห้องปฏิบัติการ.....	47
2-14	แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลองของ สุรารักษ์ อวณญวน.....	49
2-15	ชุดอุปกรณ์การทดลองของ Pianmanakul และคณะ.....	52
2-16	ชุดอุปกรณ์ทดสอบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายของ Al-Shamrani และ คณะ.....	53
2-17	ชุดอุปกรณ์การทดสอบกระบวนการทำให้ลอยของ Maruyama และคณะ.....	56
3-1	ชุดอุปกรณ์การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย.....	58
3-2	แสดง Flow diagram ของชุดอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัวด้วยอากาศละลาย....	63
3-3	ถังอัดความดันขนาด 500 ลิตร ที่ได้จากการออกแบบ.....	65

ภาพที่	หน้า	
3-4	ขั้นตอนการออกแบบถังอัดความดัน (Pressure vessel).....	66
3-5	ลักษณะคอลัมน์ที่ใช้ในการลอยตะกอน.....	67
3-6	ลักษณะการเดินระบบด้วยคอลัมน์ที่ได้จากการออกแบบ.....	68
3-7	แผนผังการศึกษาขนาดของฟองอากาศที่ได้จากชุดทดสอบ.....	70
3-8	ขั้นตอนการสังเคราะห์น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด.....	72
3-9	ขั้นตอนการศึกษากระบวนการจาร์เทส.....	73
3-10	ขั้นตอนการศึกษากระบวนการ DAF.....	75
3-11	ขั้นตอนการศึกษากระบวนการ MDAF.....	77
3-12	ขั้นตอนการศึกษาตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล.....	80
3-13	ขั้นตอนการศึกษาค่าสัดส่วน A/S.....	82
3-14	ขั้นตอนการศึกษาโมเดลการกรอง.....	84
3-15	ขั้นตอนการศึกษาโมเดลการดูดซับ.....	86
3-16	ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้ในการทดลอง.....	88
3-17	ขั้นตอนการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กราฟมาตรฐานวิเคราะห์ปริมาณ สาหร่าย.....	88
3-18	ขั้นตอนการจาร์เทสน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย.....	90
3-19	ขั้นตอนการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการต่างๆ.....	91
4-1	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (จาร์เทส).....	94
4-2	ประสิทธิภาพการบำบัดที่ปริมาณความเข้มข้นน้ำมันตัดและความเข้มข้น $Al_2(SO_4)_3$ ต่างๆ.....	95
4-3	ค่าสัดส่วนปริมาณ $Al_2(SO_4)_3$ ที่ใช้ต่อ 1 กรัม น้ำมันตัด ณ ความเข้มข้นน้ำเสีย ต่างๆ.....	96
4-4	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ DAF.....	98
4-5	ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเล ชันและกระบวนการ MDAF ที่อัตราการไหลน้ำเสียต่างๆ.....	99
4-6	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดกระบวนการบำบัดที่อัตราการไหลน้ำเสีย	

	0.6 ลิตรต่อนาที กับ 1.2 ลิตรต่อนาที.....	100
ภาพที่		หน้า
4-7	ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่ความดันเกจต่างๆ.....	103
4-8	ขนาดฟองอากาศที่ความดันเกจต่างๆ.....	103
4-9	ปริมาณอากาศที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ.....	105
4-10	ความปั่นป่วนของกระแสของไหลที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ.....	107
4-11	ค่าอัตราน้ำสิ้นฝิวที่ระยะเวลาต่างกันต่างๆ.....	109
4-12	ค่า G.T ที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ.....	110
4-13	ประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นน้ำเสียต่างๆ.....	112
4-14	ประสิทธิภาพการบำบัดที่ค่าสัดส่วน A/S ต่างๆ.....	113
4-15	ประสิทธิภาพการสัมผัสและเกาะติดที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ.....	116
4-16	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดกับประสิทธิภาพจากการทำนาย.....	119
4-17	แสดงลักษณะการเกาะติดฝิวของอนุภาคบนฝิวฟองอากาศ.....	124
4-18	ไอโซเทอมการดูดซับของกระบวนการ MDAF.....	125
4-19	แบบจำลองการดูดซับของแลงมัวร์.....	127
4-20	แบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช.....	127
4-21	การทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยสมการการดูดซับ.....	130
4-22	เปรียบเทียบผลการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดกับประสิทธิภาพการบำบัด จริงที่ความเข้มข้นน้ำเสียต่างๆ.....	130
4-23	กราฟมาตรฐานจำนวนเซลล์สำหรับค่าความขุ่นสาหร่าย.....	134
4-24	กราฟมาตรฐานปริมาณเซลล์สำหรับค่าการดูดกลืนแสง.....	135
4-25	ลักษณะการเจริญเติบโตของสาหร่ายคลอเรลล่า.....	137
4-26	ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยวิธีจาร์เทส.....	138
4-27	ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตที่ 2.....	139
4-28	ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตที่ 4.....	140
4-29	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายช่วงการ เจริญเติบโตที่ 2 และการเจริญเติบโตที่ 4 ด้วยวิธีการบำบัดต่างๆ.....	141

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนแหล่งน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคกำลังเป็นปัญหาที่สำคัญของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่างๆ เนื่องจากการขยายตัวของชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการทิ้งน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดหรือบำบัดไม่ได้มาตรฐานลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติมากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะน้ำเสียประเภทน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิว เช่น น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดซึ่งจะละลายปนอยู่เป็นเนื้อเดียวกับน้ำเสีย ทำให้บำบัดได้ยาก และเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และน้ำเสียประเภทที่มีสารประกอบไนเตรตและซัลเฟตละลายอยู่สูงซึ่งจะทำให้เกิดการบลูม (Bloom) ของสาหร่ายและแหล่งน้ำเกิดการเน่าเสีย การนำน้ำจากแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันตัดหรือสาหร่ายไปใช้ประโยชน์จึงจำเป็นต้องกำจัดอนุภาคของน้ำมันหรือสาหร่ายออกก่อน

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting oil) เป็นน้ำเสียที่เกิดจากการหล่อเย็นของกระบวนการตัดหรือกลึงโลหะ มีส่วนประกอบของ สารเคมีที่ก่อให้เกิดอันตราย ต่อสิ่งมีชีวิต เช่น น้ำมันแร่ สารอิมัลชันไฟเออร์ สารป้องกันการกัดกร่อน สารต้านทานการเปลี่ยนแปลงกรด-เบส และสารป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เป็นต้น (Anderson และคณะ, 2003) โดยทั่วไปมักพบน้ำมันตัดในรูปของอิมัลชันมีการเติมสารลดแรงตึงผิว ( Surfactant) ซึ่งทำให้น้ำมันตัดมีเสถียรภาพสูง และไม่สามารถบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Rosen, 1989) อย่างไรก็ตาม กระบวนการทางกายภาพยังคงเป็นกระบวนการที่นิยมใช้บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด เนื่องจากเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น เช่น กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการทางกายภาพจัดได้ว่าเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนต่ำ ใช้เวลาในการเดินระบบน้อย และมีประสิทธิภาพการบำบัดสูง ปัจจุบันจึงมีพัฒนากระบวนการทางกายภาพเพื่อใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด เช่น กระบวนการโคalescecence) กระบวนการ เมมเบรน (Membrane process) กระบวนการลอยตะกอน (Flotation) เป็นต้น โดยกระบวนการลอยตะกอนที่นิยมใช้กันมากคือกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือ DAF เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูง สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นและอัตราการไหลของน้ำเสียได้ และใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบน้อย



สาหร่าย เป็นสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่งที่อาศัยอยู่ในน้ำ สามารถสังเคราะห์แสงได้ บางชนิดเป็นต้นเหตุของ สี กลิ่น และรส ที่ไม่พึงประสงค์ และสามารถเจริญเติบโตได้ดีในน้ำที่มีปริมาณของไนเตรตและซัลเฟตละลายอยู่มาก ซึ่งทำให้แหล่งน้ำมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชอยู่ตลอดเวลา (จากกระบวนการสังเคราะห์แสงและกระบวนการหายใจ)และเป็นปัญหาต่อการเติมปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตน้ำประปาและกระบวนการบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่ายบางชนิด เช่น สาหร่ายกลุ่มไดอะตอม เป็นต้นเหตุของการอุดตันในกระบวนการกรองอีกด้วย กระบวนการกำจัดสาหร่ายที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ กระบวนการออกซิเดชัน (Pre-oxidation) เช่น การเติมคลอรีนหรือโพแตสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพื่อฆ่าเซลล์สาหร่าย เป็นต้น แต่การออกซิเดชันด้วยคลอรีนเป็นต้นเหตุของการเกิดสาร DBPs (Disinfection by products) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง จึงไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน นอกจากนี้ กระบวนการกำจัดสาหร่ายที่นิยมใช้กันมากคือ กระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) และกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF) ซึ่งมักใช้กระบวนการทั้งสองร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดจากกระบวนการทั้งสองพบว่า กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายสามารถบำบัดสาหร่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีอัตราการบำบัดที่สูงกว่า เมื่อเทียบกับกระบวนการตกตะกอน (Henderson และคณะ, 2008)

กระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลายหรือกระบวนการ DAF (Dissolved air flotation) คือ กระบวนการแยกอนุภาคออกจากเฟสน้ำเสียหรือกระบวนการทำน้ำให้ใส (Clarification) โดยการใช้อากาศที่มีขนาดเล็กประมาณ 30 ถึง 100 ไมครอน (Rachu, 2005) ที่ได้จาก การเพิ่มลดความดันอากาศ จับกับอนุภาคหรือตะกอนในน้ำเสียและจะส่งผลต่อความเร็วสุดท้ายที่เพิ่มขึ้น (Rachu, 2005) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของสโตก โดยทั่วไป การออกแบบหรือเดินระบบ DAF จะมีตัวแปรที่สำคัญ 2 ชนิดคือ ตัวแปรการออกแบบถึงปฏิริยาให้มีความเหมาะสมกับกลไก DAF หรือตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamic parameters) (Pianmanakul และ คณะ, 2010) และตัวแปรการออกแบบปริมาณอากาศที่เหมาะสมกับปริมาณและชนิดของน้ำเสียหรือค่าสัดส่วน A/S (Metcalf และ Eddy, 2004) อย่างไรก็ตาม เพื่อการเข้าใจถึงกลไกที่เกิดขึ้นหรือการออกแบบที่เหมาะสมต่อกระบวนการ DAF จึงมักใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือโมเดล ( Model) ในการคาดการณ์ผลของการออกแบบ ซึ่งโดยทั่วไปมักจะใช้สมมติฐานการกรองหรือโมเดลการกรอง (Filtration model) (Rachu, 2005) ในการศึกษา

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะใช้กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF) ในการบำบัดน้ำมันตัดและสหาร่ายที่มีการปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำ เพื่อให้สามารถเข้าใจกลไกการทำงานของระบบ และสามารถออกแบบระบบอย่างเหมาะสมทั้งในด้านประสิทธิภาพการบำบัดและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยทำการศึกษาตัวแปรของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน ตัวแปรที่น่าจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการ DAF ได้แก่ ตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล และปริมาณอากาศที่เหมาะสมกับความเข้มข้นของน้ำเสียหรือค่าสัดส่วน A/S นอกจากนี้ยังศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายและทำนายกลไกหรือประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ DAF ซึ่งในที่นี้จะศึกษาโมเดลการกรอง (Filtration model) หรือการจำลองว่าฟองอากาศเป็นตัวกลางสารกรอง และโมเดลการดูดซับหรือดูดติดผิว (Adsorption model) หรือการจำลองว่าฟองอากาศเป็นตัวกลางดูดซับ

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลาย (DAF) และกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (MDAF)

1.2.2 ศึกษา ตัวแปร การออกแบบและ เติมนระบบ ที่เหมาะสม เพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลาย ( DAF) และกระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (MDAF)

1.2.3 ศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ( Model) เพื่ออธิบายกลไกและทำนายประสิทธิภาพการบำบัด น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF) และกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (MDAF)

1.2.4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF) และกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (MDAF)

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขต ในงานวิจัย ได้แก่

1.3.1 ชนิดของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ น้ำเสียที่มีน้ำมันตัดปนเปื้อนในเฟสน้ำ และน้ำเสียที่มีสาหร่ายปนเปื้อนในเฟสน้ำ โดยน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดจะใช้น้ำมันตัดจากบริษัท Castrol ชนิด Cooledge BI ในการสังเคราะห์ และน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายจะใช้สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลล่า (*Chlorella sp.*) ในการสังเคราะห์น้ำเสีย

1.3.2 การศึกษากระบวนการ DAF และ MDAF จะทำการศึกษาด้วยคอลัมน์ลอยตะกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 1 เมตร โดยใช้ชุดอุปกรณ์ผลิตน้ำอัด อากาศที่ได้จากการออกแบบด้วยกฎของเฮนรี่ ซึ่งมีอัตราการไหลสูงสุด 50 ลิตรต่อนาที ที่ความดันอากาศ 8 บาร์ และในกระบวนการ MDAF จะใช้สารส้ม (Alum) เป็นสารโคแอกกูแลนท์

1.3.3 การศึกษา กระบวนการ DAF และ MDAF ด้วยน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด จะทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด และตัวแปรการออกแบบที่ทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ ค่าความปั่นป่วน (Velocity gradient, G) ค่าระยะเวลาตกหรือระยะเวลาสัมผัส (Contact time, T) ค่าอัตราการล้นผิว (Overflow rate, OFR) และค่าสัดส่วน A/S

1.3.4 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการ DAF และ MDAF จะใช้ค่าการออกแบบที่เหมาะสมจากการศึกษาด้วยน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดมาทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย

1.3.5 การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำการศึกษาดูด้วยน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยจะทำการศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างโมเดลการกรอง ( Filtration model) และโมเดลการดูดซับ (Adsorption model)

1.3.6 การคำนวณต้นทุนการบำบัดจะพิจารณาเฉพาะต้นทุนในการเดินระบบ (ไม่พิจารณาต้นทุนการก่อสร้าง) และพิจารณาเฉพาะสภาวะที่บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ดีที่สุด

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงแนวทางการออกแบบและการเดินระบบ DAF หรือ MDAF เพื่อบำบัดน้ำเสียชนิดต่างๆได้

1.4.2 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ DAF และ MDAF และสามารถทราบถึงแนวทางการแก้ปัญหาหรือพัฒนากระบวนการให้สามารถบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

1.4.3 ทราบถึงแนวทางในการเลือกใช้และ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการและชนิดของน้ำเสียได้

1.4.4 ทราบถึงต้นทุนเบื้องต้นในการเดินระบบ และสามารถเปรียบเทียบต้นทุนดังกล่าวกับกระบวนการบำบัดชนิดอื่นๆ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วิธีสำหรับบำบัดน้ำเสียได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

น้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ (Aurelle, 1985) ได้แก่

##### 2.1.1 น้ำมันที่ละลายน้ำ

โดยทั่วไปมักเชื่อกันว่าน้ำมันไม่ละลายน้ำหรือไม่รวมตัวกับน้ำ แต่ความจริงแล้วความสามารถในการละลายน้ำจะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติประจำตัวของน้ำมัน โดยความสามารถในการละลายน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าโพลาไรตี (Polarity) ของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ดังนั้นโมเลกุลที่ไม่อิ่มตัวจะละลายน้ำได้ดี โดยเฉพาะสารประกอบ Cyclic compounds เช่น เบนซีนละลายน้ำได้ถึง 1650 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ความสามารถในการละลายน้ำจะลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ น้ำมันที่ระเหยได้ง่าย (ซึ่งมักจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ) จึงละลายน้ำได้ดี ตารางที่ 2-1 แสดงค่าความสามารถในการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2-1 ค่าการละลายน้ำของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ

Straight chain hydrocarbons C <sub>8</sub>			Straight chain hydrocarbons C <sub>6</sub>			Cyclic hydrocarbons C <sub>6</sub>		
n-octane	0.66	mg/l	n-hexane	9.5	mg/l	cyclohexane	55	mg/l
octene-1	2.7	mg/l	hexene-1	50	mg/l	cyclohexene	213	mg/l
octyne-1	24	mg/l	hexyne-1	260	mg/l	benzene	1650	mg/l

ปัญหาของน้ำมันที่ละลายน้ำ คือจะมีลักษณะใสและละลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ จึงทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ยังทำให้เกิดกลิ่นและรสในน้ำ รวมถึงเป็นพิษ เพราะน้ำมันที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะเป็นพวกอะโรมาติก ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง

##### 2.1.2 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว

เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulence) เช่น เครื่องสูบน้ำ วาล์ว ไบพาส ข้อต่อต่างๆ ฯลฯ จะทำให้เกิดการกระจายตัวของน้ำมันกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็ก

แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยขนาดของหยดน้ำมันจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่ทำให้เกิดการปั่นป่วนและแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันกับน้ำ (Interfacial tension oil/water)

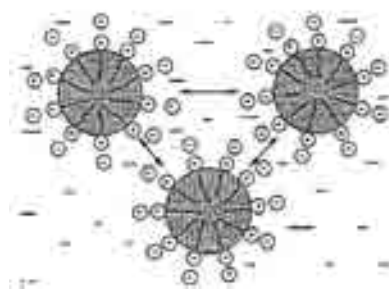
น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- อิมัลชันขั้นต้น (Primary emulsion) คือ อิมัลชันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 100 ไมครอน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็กที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า
- อิมัลชันขั้นสอง (Secondary emulsion) คือ อิมัลชันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 20 ไมครอน และจะมีลักษณะคล้ายกับน้ำมัน

แต่เหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้น เมื่อหยุดการปั่นกววน หยดน้ำมันเหล่านี้จะพยายามรวมตัวกันและกลับมาแยกชั้นเช่นเดิม เนื่องจากมีการปรับสภาพเข้าสู่จุดสมดุลโดยการลดพื้นที่ผิวที่สัมผัสกันให้น้อยที่สุด

### 2.1.3 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว

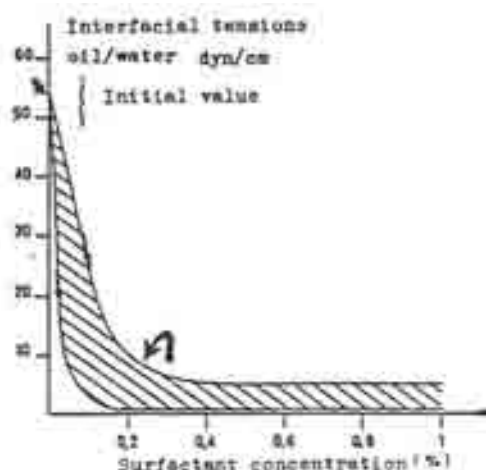
โดยทั่วไปน้ำเสียจากชุมชนหรือแม้กระทั่งอุตสาหกรรม มักจะพบว่ามีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวอยู่เสมอ เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวเป็นองค์ประกอบหลักของสารทำความสะอาดต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ โมเลกุลที่ชอบน้ำมันและโมเลกุลที่ชอบน้ำ จึงทำให้สารลดแรงตึงผิวจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 การผลักรันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว (Aurelle, 1985)

สารลดแรงตึงผิวจะทำให้แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำลดลง ถึงแม้ว่าจะมีความเข้มข้นต่ำก็ตาม ดังแสดงในภาพที่ 2-2 จะเห็นได้ว่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำจะลดลงตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้น และจะลดลงจนมีค่าต่ำมาก ซึ่งภายใต้สภาวะนี้ น้ำมันจะ

สามารถเปลี่ยนไปเป็นอิมัลชันได้เองและเกิดเป็นอิมัลชันที่มีเสถียรภาพสูงมาก จึงเรียกอิมัลชันที่เกิดขึ้นในสภาพที่มีสารลดแรงตึงผิวว่า “อิมัลชันที่มีเสถียรภาพ” (Stabilized emulsion)



ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ของการลดลงของแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (Aurelle, 1985)

อนุภาคน้ำมันที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กมาก (ดังภาพที่ 2-3) ซึ่งโดยทั่วไปมักจะมีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน ดังนั้นความเร็วในการลอยขึ้นจึงมีค่าต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) และเนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน (Electrokinetic หรือ Zeta potential) จึงทำให้ไม่เกิดการชนและการรวมตัวกันในระหว่างการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า บางครั้งน้ำเสียมีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวร่วม (Cosurfactant) ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับสารลดแรงตึงผิว คือจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ผลที่เกิดขึ้นก็คือจะทำให้อิมัลชันมีเสถียรภาพสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ขอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวร่วมจะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และจะไปลดแรงผลักระหว่างโมเลกุลที่ขอบน้ำของสารลดแรงตึงผิว (ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว) ดังแสดงในภาพที่ 2-3 อิมัลชันที่เกิดขึ้นเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวร่วมจะมีขนาดอนุภาคน้ำมันเล็กมาก โดยจะมีขนาดประมาณ 100-600 อังสตรอม



ภาพที่ 2-3 การเพิ่มเสถียรภาพของอิมัลชันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิวร่วม (Aurelle, 1985)

### 2.1.4 น้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ

น้ำมันส่วนใหญ่มักจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ จึงมักจะลอยอยู่บนผิวน้ำในลักษณะของฟิล์มบางๆ ซึ่งจะไปขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนและแสง ปัญหาของน้ำมันในลักษณะนี้ก็คือสามารถปนเปื้อนได้เป็นพื้นที่กว้าง ถึงแม้จะมีน้ำมันปริมาณน้อยก็ตาม เพราะจะมีการแพร่กระจายออกไปในลักษณะของแผ่นฟิล์มโมเลกุลเดี่ยว โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะแพร่กระจายได้เป็นพื้นที่กว้างมาก ซึ่งการปนเปื้อนในลักษณะนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า คือจะสะท้อนเป็นฟิล์มสีรุ้งลอยอยู่บนผิวน้ำ

### 2.2 น้ำมันตัด (Cutting oil)

น้ำมันตัด (Cutting oil) อยู่ในรูปของน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการตัด กลึง โลหะ มีหน้าที่ในการลดความร้อนและเพิ่มการหล่อลื่นขณะมีการตัด กลึง โลหะ โดยทั่วไปแล้วน้ำมันตัดมีส่วนผสมของน้ำมันแร่ (Mineral oil) สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) บางครั้งมีการเติมสารอื่นๆ เข้าไปด้วย เช่น กรดไขมัน สารเพิ่มคุณภาพ สารป้องกันการสึกกร่อน และสารยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Bataller และคณะ, 2004) เมื่อมีการใช้น้ำมันตัดไปนานๆ จะทำให้สมบัติการหล่อลื่นลดลงและมีสมบัติการเป็นพิษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการสะสมของเศษโลหะต่างๆ ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และเป็นพิษต่อคนที่รับสัมผัส (Burke และคณะ, 1991)

น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันตัดเป็นตัวอย่างหนึ่งของน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันและมีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ จะเป็นอิมัลชันที่มีความคงตัว (Stabilized emulsion) โดยที่สารลดแรงตึงผิวจะแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำกับน้ำมันเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับน้ำมัน ส่งผลให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กจนไม่สามารถรวมตัวกันได้ อนุภาคน้ำมันจึงมีความเสถียรเพิ่มขึ้นและยากต่อการบำบัด



## 2.3 สาหร่าย (Algae)

### 2.3.1 ลักษณะทางธรรมชาติของสาหร่าย (ทองดาว ทองตัน, 2545)

สาหร่าย (Algae) เป็นสิ่งมีชีวิตที่พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ โดยเฉพาะในน้ำ ทั้งน้ำจืด น้ำเค็ม และน้ำกร่อย นอกจากนี้ยังพบในดิน น้ำพุร้อน หรือแม้กระทั่งอากาศซึ่งพาร่วมกับสิ่งมีชีวิตอื่น เช่น รา หรือปะการังบางชนิด สาหร่ายจัดเป็นพืชชั้นต่ำที่มีโครงสร้างไม่สลับซับซ้อน เนื่องจากสาหร่ายไม่มีส่วนที่เป็นราก ลำต้น หรือใบ แม้วามีบางชนิดที่มีลักษณะคล้ายพืชชั้นสูง จึงเรียกลักษณะของสาหร่ายว่าทัลลัส (Thallus) ซึ่งมักเป็นสาหร่ายขนาดใหญ่ (Macroalgae) ที่จัดสาหร่ายเป็นพืชเนื่องจากสาหร่ายมีรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสงคือคลอโรฟิลล์ ทำให้สามารถสร้างอาหารเองได้

สาหร่ายมีรูปร่างและขนาดที่มีความหลากหลายมาก กล่าวคือ ชนิดที่มีขนาดเล็กที่สุดอาจมีขนาดใกล้เคียงแบคทีเรีย คือ ขนาดเพียง 0.2 ถึง 2 ไมครอน ส่วนชนิดที่มีขนาดใหญ่ซึ่งพบเฉพาะในมหาสมุทรแปซิฟิก อาจมีขนาดยาวถึง 200 ฟุต ส่วนรูปร่างนั้น มีรูปร่างต่างๆ เช่น รูปร่างกลมแบน ทรงกระบอก เป็นแฉก เป็นเหลี่ยม หรือรูปดาว เป็นต้น สาหร่ายสามารถแบ่งโดยดูจากลักษณะเซลล์ คือ สาหร่ายเซลล์เดียว (Unicellular) และสาหร่ายหลายเซลล์ (Multicellular) เป็นเส้นสาย (Filament) หรือเป็นกลุ่มเซลล์ (Colony) แบ่งจากการเคลื่อนที่ คือ เคลื่อนที่ได้และเคลื่อนที่ไม่ได้ เป็นต้น

การแพร่กระจายของสาหร่ายขึ้นอยู่กับที่อยู่อาศัยของสาหร่าย (Habitat) สาหร่ายที่อยู่ในน้ำไหลเอื่อยหรือนิ่ง จะมีรูปร่างและชนิดแตกต่างจากชนิดที่อยู่ในน้ำไหลแรง เช่น ในน้ำตก (น้ำไหลแรง) มักพบสาหร่ายสีเขียว เช่น Ulothrix สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เช่น Rivularia สาหร่ายสีแดง เช่น Batrachospermum และ Demania ส่วนในน้ำนิ่ง ชนิดสาหร่ายขึ้นอยู่กับแสง อุณหภูมิ และความสมบูรณ์ของอินทรีย์สาร

ในการศึกษาสาหร่าย มักศึกษาปัจจัยด้านต่างๆ ดังนี้

- 1) ชนิดของรงควัตถุ (Pigments) ในการสังเคราะห์แสง
- 2) ชนิดของอาหารสะสม
- 3) รูปร่าง ลักษณะ จำนวน รวมทั้งตำแหน่งของหนวด (Flagella)

4) องค์ประกอบของผนังเซลล์

5) วิธีการสืบพันธุ์

6) โครงสร้างของเซลล์

แต่การจำแนกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ จะจำแนกโดยใช้รงควัตถุภายในเซลล์ซึ่งจำแนกได้เป็น 9 กลุ่ม (Division) (Bold, 1985) ดังนี้

1) Division Cyanophyta (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน)

2) Division Chlorophyta (สาหร่ายสีเขียว)

3) Division Chrysophyta (สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง)

4) Division Euglenophyta (Euglenoids)

5) Division Charophyta (สาหร่ายไฟ หรือ Stoneworts)

6) Division Phaeophyta (สาหร่ายสีน้ำตาล)

7) Division Pyrrophyta (สาหร่ายสีเหลืองแกมน้ำตาล หรือ Dinoflagellates)

8) Division Cryptophyta (Cryptomanads)

9) Division Rhodophyta (สาหร่ายสีแดง)

ในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สาหร่ายทำให้เกิดปัญหาในระบบผลิตน้ำประปาและระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งกลุ่มของสาหร่าย (Division) ที่พบปัญหามีอยู่ 3 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

1) *Division Cyanophyta* (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน หรือ *Cyanobacteria*)

จัดเป็นพวกเดียวกับแบคทีเรีย (Prokaryotic Cell) เนื่องจากเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส แต่สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมี คลอโรฟิลล์-เอ จึงสามารถสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งไม่พบในแบคทีเรีย

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินพบได้ในแหล่งน้ำทั่วไป ส่วนใหญ่พบในน้ำจืด แต่ก็สามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำทะเล น้ำกร่อย หรือแม้กระทั่งน้ำพุร้อน หิมะ หรือในทะเลทราย เนื่องจากสาหร่ายชนิดนี้สามารถทนต่อสภาวะความแห้งแล้งได้ดีกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ ลักษณะที่สำคัญคือ

1. รงควัตถุในการสังเคราะห์แสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์-เอ แคโรทีนอยด์ ไฟโคบิลิโปรตีน โดยรงควัตถุไม่อยู่ในพลาสติค แต่กระจายเป็นอิสระในไซโตพลาสซึม
2. มีผนังเซลล์ 2 ชั้น คล้ายแบคทีเรียชนิดแกรมลบ ด้านนอกของผนังเซลล์มีลักษณะเป็นเมือกใส เรียกว่า Sheath
3. ไม่มีหนวด (Fragella) แต่จะเคลื่อนที่แบบเลื่อนไหล (Gliding Movement) มีทั้งแบบถอยหน้าและถอยหลัง แกวงซ้ายขวา เคลื่อนไหวเป็นคลื่น หรือหมุนเป็นเกลียว
4. ไม่มีการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ
5. สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศและเซลล์สามารถเปลี่ยนสีได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นแสง ความเข้มของแสงหรือปริมาณธาตุอาหาร แต่จะพบในบางชนิดเท่านั้น
6. อาหารสะสมคือ แป้งไซยาโนไฟซิน (Cyanophycin Starch) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตในรูปแกรนูล (Granules) กระจายอยู่ในโครโมพลาสซึม นอกจากนี้ยังมีไกลโคเจน แกรนูลและหยดน้ำมัน

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหลายชนิดทำให้เกิดการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว (Water Bloom) จนทำให้แหล่งน้ำเปลี่ยนสี เมื่อมีปริมาณมากจะทำให้สัตว์น้ำตาย น้ำมีกลิ่นเหม็น สารเคมีบางชนิดทำให้น้ำมีกลิ่นและรสชาติเปลี่ยนแปลง เช่น จีออสมิน (Geosmin) และสาร 2-Methylisoborneol (2-MIB) และสาหร่ายบางชนิดยังสร้างสารพิษ (Toxin) เช่น *Microcystis* และ *Anabaena* สารพิษนี้มีผลทำลายตับและระบบประสาท ทำให้คนซึ่งบริโภคสารพิษนี้เข้าไปถึงแก่ความตายได้ นอกจากนี้ การสัมผัสน้ำที่มีการบลูมของสาหร่ายบางชนิดในกลุ่มนี้จะทำให้ผิวหนังอักเสบ บวม และคัน ได้ เช่น *Anabaena* spp., *Oscillatoria agardhii*, *O. rubescens*, *Lyngbya majuscula* หรือ *Gloeotrichia echinulata* ซึ่งการทำลายพิษเหล่านี้ไม่สามารถทำลายให้หมดโดยการกรอง การใส่คลอรีน การต้ม หรือแม้แต่การใช้ด่าง แต่วิธีที่ดีที่สุดในการกำจัดคือการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

นอกจากนี้ยังพบว่า สารปฏิชีวนะบางชนิด เช่น สเตรปโตมัยซิน (Streptomycin) หรือ นีโอไมซิน (Neomycin) สามารถลดการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิดได้ (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2544)

## 2) Division Chlorophyta (สาหร่ายสีเขียว หรือ Green Algae)

มีเซลล์เหมือนพืชชั้นสูง (Eucaryotic Cell) พบได้ทั่วไปในน้ำจืด น้ำกร่อย น้ำทะเล หรือแม้แต่บนดิน มีลักษณะที่สำคัญคือ

1. รังควัตถุสีเขียว เนื่องจากไม่ถูกบดบังด้วยรังควัตถุอื่น มีส่วนประกอบเหมือนพืชชั้นสูง คือ มี คลอโรฟิลล์-เอ คลอโรฟิลล์-บี แคโรทีน และแซนโทฟิลล์ รังควัตถุอยู่ในคลอโรพลาสต์ โดยที่คลอโรพลาสต์มีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น มีรูปร่างแตกต่างกัน เช่น รูปถ้วย (Cup-shaped) รูปวงรอบเซลล์ (Girdle-shaped) เป็นตาข่าย (Reticulate) เป็นรูปเกลียว (Spiral) รูปดาว (Stellate) หรือเป็นแถบข้างเซลล์ (Parietal) และมีจำนวน 1 อันขึ้นไป

2. มีหรือไม่มีหนวด จะพบหนวดในกลุ่มที่เคลื่อนที่ได้ โดยพบตั้งแต่ 1 เส้น หรือมากกว่า หนวดไม่มีขน (Tubular Hair) อาจพบเกล็ด (Scale) บนหนวดได้

3. อาหารสะสมมีทั้งแป้งและไขมัน ส่วนมากอยู่ในรูปของแป้ง ที่ประกอบด้วย อะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพกติน (Amylopectin) สร้างจากไฟรีนอยด์ซึ่งอยู่ในหรือบนคลอโรพลาสต์

4. สืบพันธุ์ได้ทั้งอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ

## 3) Division Chrysophyta (สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง หรือ Golden-Brown Algae)

เป็นสาหร่ายกลุ่มใหญ่ที่รวมสาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง (Yellow-green Algae) และสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม (Diatom) เข้าไว้ด้วยกัน มีลักษณะสำคัญ คือ

1. รังควัตถุอยู่ในคลอโรพลาสต์ คือ คลอโรฟิลล์-เอ บางชนิดมี คลอโรฟิลล์-ซี แคโรทีน ได้แก่ เบต้า-แคโรทีน ( $\beta$ -Carotene) และเอบซีลอน-แคโรทีน ( $\epsilon$ -Carotene) แซนโทฟิลล์ ได้แก่ ฟุโคแซนทิน (Fucoxanthin) ไดอะโตแซนทิน (Diatoxanthin) และไฟโคบิลิโปรตีน ปริมาณ

ของแคโรทีนอยด์และแซนโทฟิลล์มีมากกว่าคลอโรฟิลล์ จึงทำให้สีของคลอโรพลาสต์มีสีตั้งแต่เหลือง เขียวแกมเหลือง เขียวมะกอก เหลืองแกมน้ำตาล น้ำตาลแกมทอง น้ำตาลอ่อน เป็นต้น

2. ผนังเซลล์เป็นเนื้อเดียวกันหรือเป็นแผ่น บางกลุ่มไม่มีผนังเซลล์แต่มีเยื่อหุ้มเซลล์
3. อาหารสะสมมีทั้งแป้ง (อยู่ในรูป Chrysolaminarin หรือ Leucosin) และไขมัน
4. เซลล์มีรูปร่างแตกต่างกัน อาจมีรูปร่าง กลมรี ทรงกระบอก หรือรูปกระสวย บางกลุ่มมีรูปร่างเฉพาะ เช่น ไดอะตอม คือมีลักษณะเป็น 2 ฝาครอบกันพอดี

สำหรับสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม อยู่ใน Class Bacillariophyceae เป็นองค์ประกอบสำคัญของกลุ่มประชากรสาหร่าย พบได้ในน้ำจืดและน้ำเค็ม อยู่เป็นเซลล์เดี่ยวและกลุ่มเซลล์ เซลล์ปกติไม่พบหนวด ผนังเซลล์ของไดอะตอมมีลักษณะพิเศษ ประกอบด้วย ฟรุสตุล (Frustule) ที่เป็นซิลิกา ล้อมด้วยสารเมือก (Mucilagenous) ฟรุสตุลมี 2 ฝา คือฝาบน (Epitheca) และฝาล่าง (Hypotheca) และมีวงคาดรอบฝาทั้งสองเรียกว่า Girdle Band อนุกรมวิธานของไดอะตอม จำแนกโดยใช้รูปร่าง จำนวน และตำแหน่งของคลอโรพลาสต์ รวมทั้งรูปร่างของเซลล์ โครงสร้าง และลวดลายบนฝา (Striae) ที่มีลวดลายแตกต่างกันมากมาย โดยมี 2 อันดับ (Order) คือ Centric Diatom และ Pennate Diatom กลุ่มของไดอะตอมในระบบนิเวศ แบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ

1. Euplanktonic Diatom เป็นกลุ่มที่เป็นแพลงค์ตอนตลอดเวลา ส่วนมากเป็น Centric Diatom มักก่อให้เกิดการบลูมในฤดูใบไม้ผลิและฤดูใบไม้ร่วงในทะเลสาบและมหาสมุทรในเขตอบอุ่น และในฤดูร้อนในเขตละติจูดที่สูงกว่า
2. Benthic Diatom สาหร่ายกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็น Pennate Diatom เป็นสาหร่ายที่จับกับสิ่งที่จมน้ำเป็นกลุ่มแรก การจับเมือกของไดอะตอมและแบคทีเรีย ทำให้เกิดฟิล์มบางบนพื้นผิวของสิ่งจมน้ำ เป็นการเตรียมพื้นผิวให้กับสาหร่ายชนิดอื่นๆ การเกาะกับพื้นผิวอาจใช้ฝาข้างหนึ่งแนบกับพื้นผิว หรือเกาะโดยเมือกเหนียวๆ ก็ได้
3. Meroplanktonic Diatom เป็นแพลงค์ตอนชั่วคราว ส่วนมากเป็น Pennate Diatom ที่เกาะพื้นผิวอย่างหลวมๆ เมื่อถูกรบกวนจะพัดพากลายเป็นแพลงค์ตอนลอยอิสระในน้ำ

ในระบบผลิตน้ำประปา สาหร่ายที่สร้างกลิ่นและรสซึ่งเป็นปัญหาในการผลิตน้ำ ได้แก่ สกุล Synura ผลิตกลิ่นแฉะกวางดิบและรสขม สกุล Dinobryon, Uroglenopsis และ Peridinium ผลิตกลิ่นคาวปลาอย่างแรง Synera ผลิตกลิ่นอับ หรือสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล Anabaena, Anacystis และ Aphanizomenon ผลิตกลิ่นสกปรกคล้ายเล้าหมู Gomphosphaeria, Cylindrospermum และ Rivularia ผลิตกลิ่นหูกู้ Chlamydomonas, Crystomonas และ Euglena ผลิตรสหวาน (อาภาวัตน์ มหาพันธ์, 2541)

กลุ่มสาหร่ายที่ผลิตเมือก (Slime) เช่น Palmella, Anacystis, Rivularia, Anabaena และ Oscillatoria เป็นสาเหตุของรสและกลิ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีเกิดการย่อยสลายในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic Decomposition)

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

### 2.3.2 ผลกระทบของสาหร่ายต่องานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาหร่ายสามารถสร้างปัญหาต่องานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นระบบผลิตน้ำประปาหรือระบบบำบัดน้ำเสีย โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

#### 1) ผลกระทบต่อลักษณะทางเคมีของน้ำ

ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายจะมีการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำตลอดเวลา ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้างทั้งหมดของน้ำ โดยเฉพาะในน้ำที่มีสาหร่ายเจริญเติบโตอยู่เป็นจำนวนมาก การเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้างอาจลดลงได้ถึงหนึ่งในสาม ซึ่งผลดังกล่าว ทำให้ค่าพีเอช (pH) ของน้ำ มีการเปลี่ยนแปลง โดยเวลากลางวัน เมื่อสาหร่ายสังเคราะห์แสง ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงจะทำให้พีเอชในน้ำสูงขึ้น และในเวลากลางคืนสาหร่ายจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาระหว่างกระบวนการหายใจ (Respiration) ทำให้พีเอชในน้ำต่ำลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความกระด้างและพีเอชเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในระบบการผลิตน้ำประปาและระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากส่งผลต่อปริมาณสารเคมี กระบวนการทำงาน และประสิทธิภาพของระบบ

## 2) ผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพของน้ำ

สาหร่ายเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้ สี กลิ่น และรส ของน้ำเปลี่ยนแปลงไป สาหร่ายบางชนิด (ไดอะตอม) สามารถสร้างเมือกมาห่อหุ้มตัวมันเอง ทำให้เกิดการอุดตันในเส้นท่อได้ ผลกระทบทางกายภาพของสาหร่ายสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. เกิดปัญหาเกี่ยวกับ สี กลิ่น และรส ในน้ำประปา ทำให้น้ำประปาไม่น่าดื่มและใช้
2. ทำให้ท่อส่งน้ำอุดตัน เนื่องจากสาหร่ายบางชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในที่มืดและเมื่อมีปริมาณมากก็จะจับตัวกันเป็นร่างแหทำให้เกิดการอุดตันในท่อ
3. ทำให้ถังกรองทรายอุดตันเร็ว เนื่องจากสาหร่ายสามารถเจริญเติบโตได้รวดเร็ว และลักษณะของเซลล์สาหร่ายที่ประสานกับเม็ดทราย เช่น สาหร่ายบางชนิดจะสร้างเมือกหุ้มรอบเซลล์ตัวเองและจะประสานตัวกันเป็นร่างแห ทำให้ถังกรองทรายอุดตันเร็ว
4. รบกวนการทำงานของถังตกตะกอน เนื่องจากแรงลอยตัวของสาหร่ายทำให้มีแนวโน้มที่จะกระจายอยู่ ทั่วไปในถังตกตะกอน จึงขัดขวางการตกตะกอนของฟล็อก ทำให้ประสิทธิภาพของถังตกตะกอนลดลง
5. รบกวนการทำงานของกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยมีรายงานว่าสาหร่ายบางชนิดเป็นตัวขัดขวางการเกิดฟล็อกที่เหมาะสม

### 2.3.3 เสถียรภาพของสาหร่ายในแหล่งน้ำ

สาหร่ายเป็นพืชน้ำขนาดเล็กซึ่งมีเสถียรภาพที่ทำให้แขวนลอยอยู่ในน้ำและตกตะกอนเองได้ยากในธรรมชาติ ความมีเสถียรภาพของสาหร่ายเกิดจากสมบัติเฉพาะตัวของสาหร่าย ได้แก่

#### 1) Surface charge

สาหร่ายมีคุณสมบัติประจุทางไฟฟ้าเป็นประจุลบเช่นเดียวกับอนุภาคคอลลอยด์โดยทั่วไป

### 2) *Hydrophilic effects*

เกิดจากโมเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบหรือถูกดูดติดอยู่บนเซลล์ของสาหร่าย ซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายหรือ DAF เนื่องจากฟองอากาศต้องการพื้นผิวในการยึดเกาะกับสาหร่ายที่เป็น hydrophobic ฟองอากาศจึงยึดเกาะกับอนุภาคสาหร่ายได้ง่าย

### 3) *Steric effects*

ในช่วงการเจริญเติบโตของสาหร่ายจะมีการขับสารเคมีที่เรียกว่า Extracellular organic matter (EOM) ออกมา และจะถูกดูดติด (Absorbed) อยู่บนผิวของสาหร่าย ซึ่งอาจทำให้เซลล์สาหร่ายมีเสถียรภาพได้ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นดังกล่าวเรียกว่า "Steric effect"

Henderson และคณะ (2008) ได้ทำการสรุปลักษณะทางกายภาพของสาหร่ายจากงานวิจัยต่างๆ ได้แก่ ขนาด (Size) ลักษณะรูปร่าง (Shape) ประจุบนพื้นผิว (Surface charge) และค่าพีเอชที่ทำให้ประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (Isoelectric point) ซึ่งมารายละเอียดดังตารางที่ 2-2



ตารางที่ 2-2 ลักษณะทางกายภาพของสาหร่ายชนิดต่างๆ (Henderson และคณะ, 2008)

Particle	Size ( $\mu\text{m}$ )	Colonial	Shape	Density ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Zeta potential, $\zeta$ (mV)	Test conditions (pH; test water)
Cyanobacteria						
<i>Microcystis aeruginosa</i>	3-7	Globular	Sphere	<1200	-25 to -30	9.5; maturation pond water
<i>Microcystis</i>	N/A	Globular	Sphere	<1200	-7.5 to -26 <sup>a</sup>	5.59-7.94; synthetic test water
<i>Synechocystis minima</i>	6	Single cell or micro-colonies	Sphere	-	-22.3; -28.5; 32.2 <sup>a</sup>	4.5; 6
<i>Synechocystis minima</i>	5	Single cell or micro-colonies	Sphere	-	-14.9 to -24.8	4.52-7.56; synthetic test water
Green algae						
<i>Chlorella vulgaris</i>	5.3	Single cell	Sphere	1070	-10.0 <sup>a</sup> -19.8 (log growth) -17.4 (stationary growth) <sup>a</sup>	7; (distilled water 6.5; reservoir water)
<i>Chlorella</i> sp.	3.5	Single cell	Sphere	1070	-10; -14.9 to -19.8 <sup>a</sup>	4-8; distilled water; 5.41-7.08; synthetic test water
<i>Skeletonema quadricauda</i>	13.1 18 (j); 25 (l)	Row(s) of 4-16 cells with spinal appendages	Ellipsoidal	-	-25 to -35	7-10; distilled water
<i>Skeletonema obliquum</i>	3-9 (d); 6-17 (l)	Row(s) of 4-16 cells with spinal appendages	Ellipsoidal	-	-23 to -25 -11.2 <sup>a</sup>	7-10; distilled water 7
<i>Skeletonema cognatum</i>	2-3 (d); 6-8 (l)	Single cell	Crescent shaped	1090	-35	6-10; 10 <sup>-5</sup> M NaClO <sub>4</sub> solution
Diatoms						
<i>Cyclotella</i> sp.	6.1	Chain	Sphere	1140	-19.8 to -22.1 <sup>a</sup>	4-10; reservoir water
<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	8-20 (d); 40 (spines)	Chain	Disc shaped with spines	-	-12.4 <sup>a</sup>	7
<i>Fragilaria crotonensis</i>	2-3 (d); 40-150 (l)	Cells joined along length	Elongated	-	-18.6 <sup>a</sup>	7
<i>Nitzschia linearis</i>	35 (l)	No	Elongated	-	-30 (initial) -35 (log growth) -28 (stationary)	-
<i>Synedra acus</i>	4.5-6 (d); 100-300 (l)	No	Needle	1100	-30 to -40	7.5-7.7

## 2.4 การแยกน้ำมันตัดและสาหร่ายที่มีการปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำ

### 2.4.1 กฎของสโตก

การแยกน้ำมันตัดและสาหร่ายที่มีการปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำ สามารถทำได้โดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างสารที่มีการปนเปื้อน (น้ำมันตัดหรือสาหร่าย) กับน้ำ ซึ่งหลักการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของสโตก และเนื่องจากรูปทรงของน้ำมันตัดและสาหร่ายมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีค่า Reynold's number น้อยกว่า 1 ดังนั้น สมการของสโตกจึงสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3-1

$$U_T = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_d^2}{18\mu_c} \quad (2-1)$$

เมื่อ  $U_T$  คือ ความเร็วลอยตัวของเฟสกระจาย (Dispersed phase)

$\Delta\rho$  คือ ผลต่างของความหนาแน่นของเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase)

$d_d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเฟสกระจาย

$\mu$  คือ ความหนืดพลศาสตร์ของเฟสต่อเนื่อง

$g$  คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ในกรณีของการแยกน้ำมันตัดและสาหร่ายที่มีการปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำ เฟสกระจายคือน้ำมันตัดและสาหร่าย เฟสต่อเนื่องคือน้ำ และจากสมการที่ 3-1 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเร็วลอยตัวของอนุภาคในเฟสกระจาย สามารถทำได้ 4 วิธี คือ

1. การเพิ่มขนาดของอนุภาคในเฟสกระจาย
2. การเพิ่มผลต่างของความหนาแน่น
3. การเพิ่มค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

4. การลดค่าความหนืดพลศาสตร์ของเฟสต่อเนื่องซึ่งนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและสาหร่ายต่อมากอีกมากมาย

#### 2.4.2 การแยกน้ำมันตัดที่มีการปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำ

การแยกน้ำมันตัดที่มีการปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำ มีหลายกระบวนการที่สามารถทำได้ อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเลือกเทคนิคที่จะใช้ในการแยกนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพการผสมกันของน้ำมันตัดและน้ำ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาคุณลักษณะของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย ก่อนที่จะตัดสินใจเลือกกระบวนการบำบัดที่เหมาะสมต่อไป

หลักการพิจารณา ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การออกแบบกระบวนการแยกน้ำมันกับน้ำเสียมี ดังนี้

1. ปริมาณน้ำมันที่มีการปนเปื้อนในเฟสน้ำ
2. ขนาดของอนุภาคน้ำมันที่กระจายอยู่ในเฟสน้ำ
3. การใช้สารลดแรงตึงผิวหรืออิมัลซิฟายเออร์
4. ความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน
5. ความถ่วงจำเพาะของน้ำ
6. อุณหภูมิของน้ำ
7. ความเข้มข้นของสารแขวนลอย

กระบวนการในการแยกน้ำมันตัดที่มีการปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำ แต่ละวิธีนั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย (Arizona Department of Environmental Quality, 1996)

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Gravity separation	ตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Decantation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กำจัดของแข็งแขวนลอยได้</li> <li>- กำจัดน้ำมันอิสระและน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำได้</li> <li>- ใช้งานง่าย และประหยัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กำจัดอนุภาคน้ำมันที่เล็กกว่า 20 ไมครอนหรือน้ำมันที่ละลายน้ำไม่ได้</li> <li>- มีข้อจำกัดในการกำจัดอิมัลชัน</li> <li>- ต้องใช้ความเร็วการไหลต่ำ</li> <li>- ต้องการถังแยกขนาดใหญ่</li> </ul>
Air Flotation	DAF, IAF	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กำจัดน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำและอิมัลชันได้ เมื่อมีการเติมสารเคมีช่วย</li> <li>- อัตราการบำบัดสูง</li> <li>- รองรับสภาวะ shock load ได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องกำจัดตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้น ถ้าใช้สารเคมีช่วยสร้างตะกอน</li> <li>- ต้นทุนการดำเนินระบบสูง</li> <li>- ต้องการผู้ชำนาญการในการเดินระบบ</li> </ul>
Chemical flocculation	ใช้ร่วมกับ gravity separation และ air flotation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องกำจัดตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้น</li> </ul>
Filtration	Sand, anthracite, multimedia, crushed graphite	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กำจัดของแข็งแขวนลอยได้</li> <li>- กำจัดน้ำมันอิสระ อิมัลชัน และน้ำมันที่แพร่กระจายในน้ำได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องทำการล้างย้อนซึ่งต้องบำบัดน้ำล้างย้อนต่อไป</li> </ul>

ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบกระบวนการแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสีย (ต่อ) (Arizona Department of Environmental Quality, 1996)

กระบวนการ	ชนิดของระบบ	ข้อดี	ข้อเสีย
Coalescence	Fibrous membrane	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภท ยกเว้นน้ำมันที่ละลายน้ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องมีการบำบัดขั้นต้น</li> <li>- เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย</li> <li>- ไม่เหมาะสมกับการดำเนินการแบบ full-scale</li> </ul>
Membrane processes	Reverse osmosis, ultrafiltration, hyper filtration	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถกำจัดน้ำมันที่มีอนุภาคขนาดเล็กและลอยน้ำได้</li> <li>- ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง</li> <li>- ใช้เวลาในการเดินระบบรวดเร็ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เกิดปัญหาการอุดตันได้ง่าย และอายุการใช้งานจำกัด</li> </ul>
Biological processes	Activated sludge	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องมีการบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มิลลิกรัมต่อลิตร</li> </ul>
Carbon adsorption	GAC และ PAC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กำจัดน้ำมันได้ทุกประเภทรวมถึงน้ำมันที่ละลายน้ำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องมีการบำบัดขั้นต้นให้ปริมาณน้ำมันต่ำกว่า 40 มิลลิกรัมต่อลิตร</li> <li>- ค่าใช้จ่ายสูง</li> <li>- ต้องมีการฟื้นฟูหรือเปลี่ยนคาร์บอน</li> <li>- ไม่เหมาะสมกับการดำเนินการแบบ full-scale</li> </ul>

### 2.4.3 การแยกสาหร่ายที่มีการปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำ

การแยกสาหร่ายหรือการควบคุมปริมาณสาหร่ายในเฟสน้ำ สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการออกซิเดชัน (Pre-oxidation) กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และ กระบวนการทำน้ำให้ใส (Clarification) ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

#### 1) กระบวนการออกซิเดชัน (Pre-oxidation)

สารเคมีที่นิยมใช้ในการออกซิเดชัน (Oxidant) ได้แก่ ก๊าซโอโซน (Ozone) ก๊าซคลอรีน (Chlorine) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) และโพแทสเซียมเฟอร์เรต (Potassium ferrate) ซึ่งสามารถสรุปประสิทธิภาพการออกซิเดชันของสาหร่ายชนิดต่างๆ ได้ดัง ตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ประสิทธิภาพการออกซิเดชันของสาหร่ายชนิดต่างๆ (Henderson และคณะ, 2008)

Species	Cell concentration	Oxidant	Dose (mg/l)	Observations
Green algae Chlamydomonas sp.	50 µg l <sup>-1</sup> as chlorophyll a	ClO <sub>2</sub>	0.8	90% improvement (ascribed to immobilisation)
Scenedesmus	2 × 10 <sup>6</sup> cells ml <sup>-1</sup>	Cl <sub>2</sub>	2	85% improvement
		O <sub>3</sub>	4.8	Coagulant demand halved
		ClO <sub>2</sub>	5	Coagulant demand quartered
Scenedesmus quadricauda	20,000 cells ml <sup>-1</sup>	Cl <sub>2</sub>	2-20	Coagulant demand increased
		O <sub>3</sub>	1.2	95% improvement
Scenedesmus sp.	3.9 × 10 <sup>6</sup> cells ml <sup>-1</sup>	Cl <sub>2</sub>	1.0	10% improvement
		K <sub>2</sub> F <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	5	Get enhanced algae removal at all coagulant dosages, ~10%
Green algae mixture	Up to 70,000 cells/ml	O <sub>3</sub>	2	Increase in removal from 75% to 93%
Diatom Cyclotella sp.	20,000 cells ml <sup>-1</sup>	O <sub>3</sub>	0-3	No improvement
		Cl <sub>2</sub>	0-3	No improvement
Euglenophyta Euglena gracilis	50 µg l <sup>-1</sup> as chlorophyll a	ClO <sub>2</sub>	0.8	90% improvement (ascribed to immobilisation)
		Cl <sub>2</sub>	2	95% improvement

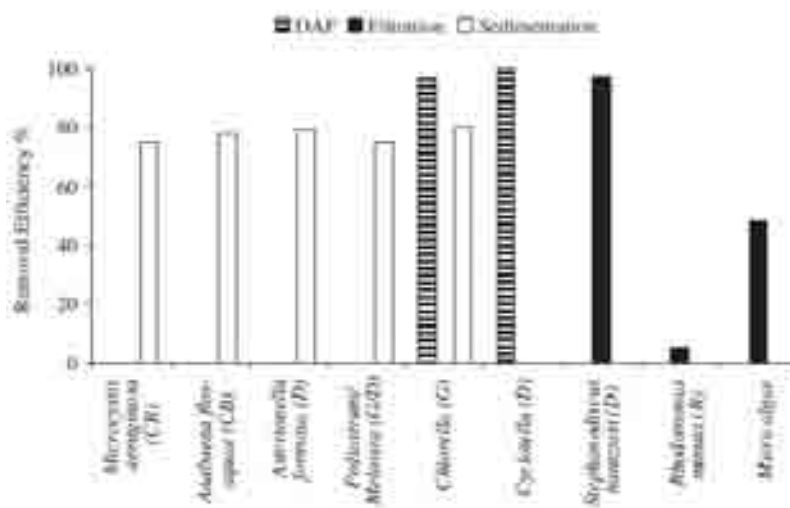
อย่างไรก็ตามการใช้คลอรีนเป็นสารออกซิเดชันที่อาจทำให้เกิด DBPs (Disinfection by products) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งได้

## 2) กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน เป็นกระบวนการทำลายเสถียรภาพของสารห่วยเพื่อให้สารห่วยสามารถจับตัวรวมกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยสารห่วยที่ผ่านการโคแอกกูเลชัน จะต้องนำไปบำบัดต่อด้วยกระบวนการทำให้ใส (Clarification) ซึ่งอธิบายต่อในหัวข้อที่ 3)

## 3) กระบวนการทำให้ใส (Clarification)

ในน้ำที่มีปริมาณสารห่วยเจริญเติบโตอยู่มาก กระบวนการทำให้ใสด้วยการตกตะกอน (Sedimentation) และการทำให้ลอย (Flotation) ก่อนกระบวนการกรอง (Filtration) เป็นสิ่งที่นิยมกันมากในปัจจุบัน เนื่องจากการนำน้ำที่มีสารห่วยเจริญเติบโตอยู่มากมาผ่านกระบวนการกรองตรง (Direct filtration) จะทำให้เกิดการอุดตันของชั้นกรองได้ง่ายและต้องทำการล้างย้อนหรือเปลี่ยนชั้นกรองบ่อยขึ้น ซึ่งกระบวนการทำให้ลอยที่นิยมใช้เพื่อบำบัดสารห่วยคือกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF) กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายและกระบวนการตกตะกอนมีประสิทธิภาพการบำบัดสารห่วยมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และ 70 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (Henderson และคณะ, 2008) (แสดงดังภาพที่ 2-4)



ภาพที่ 2-4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสารห่วยชนิดต่างๆด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย การตกตะกอน และการกรองตรง (Henderson และคณะ, 2008)

ประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอน การทำให้ลอยด้วยอากาศ  
ละลาย และการกรอง ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน แสดงดังตารางที่ 2-5 2-6 และ 2-7  
ตามลำดับ



ตารางที่ 2-5 ประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Henderson และคณะ, 2008)

Algae	Source water	Algae concentration	pH	Coagulant/flocculant dose (mg l <sup>-1</sup> )	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Settling time (min) <sup>a</sup>	Cell removal (%)
Cyanobacteria <i>Microcystis aeruginosa</i>	Reservoir water	5.0 × 10 <sup>6</sup> to 1.5 × 10 <sup>7</sup> cells ml <sup>-1</sup>	7.2	10.3 mg l <sup>-1</sup> as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	230; 60	25; 14	15	75
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Reservoir water	1 × 10 <sup>6</sup> cells ml <sup>-1</sup> ; 3–3.5 NTU	8	10 mg l <sup>-1</sup> as Fe; 1.0 mg l <sup>-1</sup> as superfloc G-573	G; 10 <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ; 30	G = 30 s <sup>-1</sup> ; >30 min	60; filtration at 10 m h <sup>-1</sup> ; 200 mm sand bed	98.9
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Growth media	5.8 × 10 <sup>6</sup> cells ml <sup>-1</sup> ; 6.1 NTU	7.5	5 mg l <sup>-1</sup> as Fe (Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	300; 60	35; 20	60	62
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Growth media	5.8 × 10 <sup>6</sup> cells ml <sup>-1</sup> ; 6.1 NTU	7.5	5 mg l <sup>-1</sup> as Fe (PPS)	300; 60	35; 20	60	81.6
<i>Anabaena flos-aquae</i>	Growth media	2 × 10 <sup>5</sup> cells ml <sup>-1</sup>	7.5	11.2 mg l <sup>-1</sup> as Fe (Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	300; 120	35; 25	120	74
<i>Anabaena flos-aquae</i>	Growth media	2 × 10 <sup>5</sup> cells ml <sup>-1</sup>	7.5	5.4 mg l <sup>-1</sup> as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	300; 120	35; 25	120	78
<i>Anabaena flos-aquae</i>	Growth media	2 × 10 <sup>5</sup> cells ml <sup>-1</sup>	7.5	11.2 mg l <sup>-1</sup> as Fe (PPS)	300; 120	35; 25	120	94
<i>Anabaena flos-aquae</i>	Growth media	2 × 10 <sup>5</sup> cells ml <sup>-1</sup>	7.5	5.4 mg l <sup>-1</sup> as Al (PACl)	300; 120	35; 25	120	68
Diatoms <i>Asterionella formosa</i>	Growth media	2 × 10 <sup>6</sup> cells ml <sup>-1</sup>	7.5	11.2 mg l <sup>-1</sup> as Fe (Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	300; 120	35; 25	120	63
<i>Asterionella formosa</i>	Growth media	2 × 10 <sup>6</sup> cells ml <sup>-1</sup>	7.5	5.4 mg l <sup>-1</sup> as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	300; 120	35; 25	120	79
<i>Asterionella formosa</i>	Growth media	2 × 10 <sup>6</sup> cells ml <sup>-1</sup>	7.5	5.4 mg l <sup>-1</sup> as Al (PAC)	300; 120	35; 25	120	68

ตารางที่ 2-5 ประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (ต่อ) (Henderson และคณะ, 2008)

Algae	Source water	Algae concentration	pH	Coagulant/flocculant dose (mg l <sup>-1</sup> )	Rapid mix	Flocculation (rpm; min)	Settling time (min) <sup>a</sup>	Cell removal
<i>Asterionella formosa</i>	Growth media	2 × 10 <sup>5</sup> cells ml <sup>-1</sup>	7.5	11.2 mg l <sup>-1</sup> as Fe (FFS)	300; 120	35; 25	120	87
<i>Synedra acus</i> / <i>Melosira</i>	Reservoir water	1500 cells ml <sup>-1</sup>	6.8	1.62 mg l <sup>-1</sup> as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	135; 60	45; 10	30	88
<i>Synedra acus</i>	Reservoir water	1040 cells ml <sup>-1</sup>	7	2.16 mg l <sup>-1</sup> as Al (PAC)	135; 60	45; 10	30	76
<i>Synedra acus</i>	Reservoir water	760 cells ml <sup>-1</sup>	7	2.16 mg l <sup>-1</sup> as Al (PAHCS)	135; 60	45; 10	30	54
<i>Synedra acus</i>	Reservoir water	1040 cells ml <sup>-1</sup>	5.3	14 mg l <sup>-1</sup> as Fe (FeCl <sub>3</sub> )	135; 60	45; 10	30	74
<i>Synedra acus</i>	Reservoir water	1480 cells ml <sup>-1</sup>	6.8	2.16 mg l <sup>-1</sup> as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ); 0.25 mg l <sup>-1</sup> cat-ionic polymer C-599A	135; 60	45; 10	30	99
Chlorophyta <i>Chlorella</i> sp.	Deionised water; 0.05M NaNO <sub>3</sub>	6.8 × 10 <sup>5</sup> cells ml <sup>-1</sup>	8	8 mg l <sup>-1</sup> as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	100; 120	25; 20	30	80
<i>Chlorella</i> sp.	Deionised water; 0.05M NaNO <sub>3</sub>	6.8 × 10 <sup>5</sup> cells ml <sup>-1</sup>	7	8 mg l <sup>-1</sup> as Al (PAC)	100; 120	25; 20	30	85
Mixture <i>Spinalina</i> , <i>oscillatoria</i> , <i>Chlorella</i>	Nutrient media and tap water; 14 mg l <sup>-1</sup> as CaCO <sub>3</sub>	55 NTU	7	5.0 mg l <sup>-1</sup> as chitosan	5 s	60; 30	30	90
<i>Pediastrum</i> <i>clathratum</i> and <i>Melosira</i>	Seine River water	1-3 × 10 <sup>4</sup> cells ml <sup>-1</sup>	-	9.5 mg l <sup>-1</sup> as Al	-	-	10	70-80

ตารางที่ 2-6 ประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Henderson และคณะ, 2008)

Algae	Source water	Algae abundance	pH	Coagulant/flocculant dose ( $\text{mg l}^{-1}$ )	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Flotation/ $R_c$ /bubble concentration (min; %, ppm)	Removal efficiency (%)
Chlorophyta								
<i>Chlorella vulgaris</i>	Reservoir water	$1.1-1.3 \times 10^5 \text{ cells ml}^{-1}$	5.5	$0.5 \text{ mg l}^{-1}$ as Al (PACl)	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	97-99
<i>Chlorella vulgaris</i>	Reservoir water	$1.1-1.3 \times 10^5 \text{ cells ml}^{-1}$	6.5	$1.6 \text{ mg l}^{-1}$ as Al ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	96.8
Diatoms								
<i>Cyclotella</i> sp.	Reservoir water	$4.7-5.3 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$	5.5	$0.5-1 \text{ mg l}^{-1}$ as Al <sup>+</sup> (PACl)	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	97-99
<i>Cyclotella</i> sp.	Reservoir water	$4.7-5.3 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$	6.5	$1.6 \text{ mg l}^{-1}$ as Al ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	99.8
Cyanophyte								
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Reservoir water	$1 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$ ; 3-3.5 NTU	8	$5 \text{ mg l}^{-1}$ as Fe; $0.5 \text{ mg l}^{-1}$ Superfloc C-573	$G = 10^3 \text{ s}^{-1}$ ; 30	$G = 10 \text{ s}^{-1}$ ; 8 min	5; 7; Pressure: 600 kPa; Filtration: $10 \text{ m h}^{-1}$	94.5
Mixture								
Melanra <i>Cyclotella</i> / <i>Stephanodiscus</i>	Reservoir water	$1.5 \times 10^5$	7.74	$1.30 \text{ mg l}^{-1}$ as Al (PACl)	Static mix	3; > 7.2	9.5; 6;	80
<i>Synedra</i>		$1.2 \times 10^6$					Pressure = 6 bar;	76
<i>Asterionella</i>		$4.0 \times 10^4$					Loading rate = $15 \text{ m h}^{-1}$	58
<i>Chlamydomonas</i>		$3.4 \times 10^4$						66
<i>Scenedesmus</i>		$4.2 \times 10^4$						46
		$2.6 \times 10^4 \text{ cells ml}^{-1}$						71

ตารางที่ 2-7 ประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการกรองร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Henderson และคณะ, 2008)

Algae	Source water	Algae abundance	Coagulant/ flocculant dose (mg l <sup>-1</sup> )	Rapid mix (rpm, s)	Flocculation (rpm; min)	Media	Loading rate (m h <sup>-2</sup> )	Removal efficiency (%)
Cyanobacteria <i>Synechococcus</i>	Reservoir water	~1.2 × 10 <sup>6</sup> clumps ml <sup>-1</sup>	Pre-chlorination 1.25-1.68 mg l <sup>-1</sup> as Al (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	Flash mixing	-	0.4 m no. 2 anthracite; 0.45 m 16/30 sand	5; run time 42 hours	95 (not consistent)
Diatom <i>Stephanodiscus hantzschii</i>	Natural water	2000 cells ml <sup>-1</sup>	1 mg l <sup>-1</sup> as Fe (FeCl <sub>3</sub> )	G: 1000 s <sup>-1</sup> ; 30 s	G = 10 s <sup>-1</sup> ; 7 min	200 mm; anthracite/sand	10	97
Green μ-algae (< 3 μm)	Natural water	3000 cells ml <sup>-1</sup>	1 mg l <sup>-1</sup> as Fe (FeCl <sub>3</sub> )	G: 1000 s <sup>-1</sup> ; 30 s	G = 10 s <sup>-1</sup> ; 7 min	200 mm; anthracite/sand	10	48
Rhodophyta <i>Rhodomonas minuta</i>	Natural water	500 cells ml <sup>-1</sup>	1 mg l <sup>-1</sup> as Fe (FeCl <sub>3</sub> )	G: 1000 s <sup>-1</sup> ; 30 s	G = 10 s <sup>-1</sup> ; 7 min	200 mm; anthracite/sand	10	5
Algae (species not specified)	-	Various algal concentration	100 mg l <sup>-1</sup> as PAC; 0.5 mg l <sup>-1</sup> as 421K (50% ionic groups)	Static mix	-	0.35 m activated carbon; 0.7 m sand; 0.1 m gravel	10	95

จากข้อมูลข้างต้น (หัวข้อ 2.4) พบว่ากระบวนการทำให้ด้วยอากาศละลายหรือ DAF มีความเหมาะสมในการใช้แยกน้ำมันตัดและสาหร่ายที่ปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำ ซึ่งนอกจากจะมีประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงแล้ว ยังสามารถบำบัดได้ในอัตราการผลิตที่สูง จึงทำให้มีความต้องการพื้นที่ในการติดตั้งระบบน้อย แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาทางด้านต้นทุนและความซับซ้อนในการเดินระบบ ยังคงเป็นปัญหาต้องมีการศึกษาและพัฒนาาร่วมไปกับแนวทางในการเดินระบบต่อไป

## 2.5 กระบวนการลอยตัว

กระบวนการทำให้ลอยเป็นกระบวนการที่ใช้แยกอนุภาคหรือสารแขวนลอยออกจากน้ำเสีย ด้วยวิธีทำให้อนุภาคหรือสารแขวนลอยในน้ำเสียนลอยขึ้นสู่บริเวณชั้นบนของผิวหน้า (กฎของสโตก) เพื่อทำการกวาดทิ้งออกไป วิธีนี้นิยมใช้กับสารแขวนลอยที่ตกตะกอนได้ยาก เช่น ตะกอนดินหรือหินเบาๆที่แขวนลอยในน้ำ ไขมันสัตว์หรือน้ำมันที่ละลายอยู่ในน้ำ สาหร่าย เป็นต้น นอกจากนี้ เวลาที่เก็บน้ำของกระบวนการทำให้ลอย (Detention time) ยังน้อยกว่ากระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) เนื่องจากสามารถแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำได้เร็วกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีปัญหาด้านความต้องการทางด้านเครื่องจักรกล พลังงาน และบุคลากรผู้เชี่ยวชาญในการเดินระบบมากกว่ากระบวนการตกตะกอน

กระบวนการทำให้ลอยสามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

### 1) Induced air flotation (IAF)

กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศหรือ IAF เป็นการสร้างฟองอากาศที่มีความดันบรรยากาศ โดยการทำให้เกิดฟองอากาศจากการทำงานของเครื่องจักรกลต่างๆ โดยการปั่นกวนน้ำเสีย หรือการพ่นอากาศผ่านหัวเติมอากาศเข้าสู่ น้ำเสียโดยตรง โดยขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 700-1,500 ไมครอน ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะเข้าไปเกาะกับน้ำมันและอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียแล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวหน้า จึงทำให้น้ำมันและอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ถูกแยกออกจากน้ำเสียโดยแรงลอยตัวที่เกิดจากฟองอากาศ ระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศแบบอินดิวิจิวแอริฟเลชันนี้จะมีขนาดเล็ก น้ำหนักน้อย การบำรุงรักษาค่อนข้างง่าย ใช้เวลาในการกำจัดน้ำมันน้อย มีประสิทธิภาพสูง และค่าใช้จ่ายต่ำ ข้อดีอีกประการหนึ่งของ

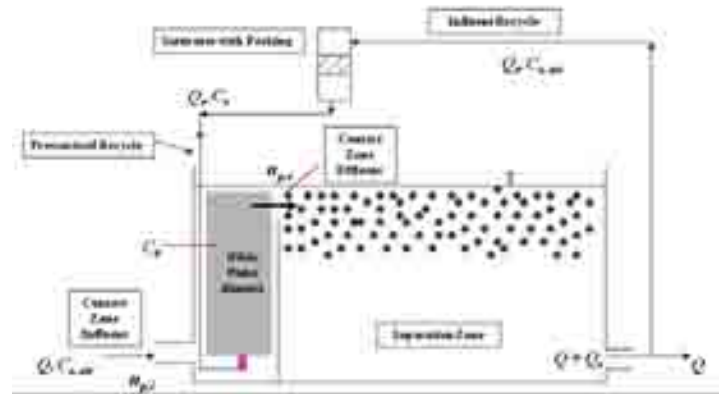
กระบวนการอินดิวิจแอริโพลเทชัน คือ เป็นการเติมอากาศสู่น้ำเสียจึงช่วยเพิ่มค่าออกซิเจนละลายให้น้ำเสียอีกทางหนึ่งด้วย

## 2) Dissolved air flotation (DAF)

กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายหรือ DAF คือการอัดอากาศให้มีความดันสูงถึงประมาณ 4-5 บรรยากาศ จากนั้นจึงปล่อยอากาศที่มีความดันสูงนี้เข้าสู่ น้ำเสีย ทำให้ความดันของอากาศที่ปล่อยเข้าไปลดลงสู่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30-100 ไมครอน ซึ่งจะเกาะและพุงสารที่เป็นของแข็งต่างๆ และอนุภาคน้ำมันให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จากนั้นเครื่องกวาดจะทำการกวาดอนุภาคต่างๆ ที่ลอยตัวแยกออกมาไปกำจัดต่อไป ระบบนี้เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงแต่มีข้อเสียเนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงมากในการเดินระบบ เพราะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อทำให้เกิดความดันตามต้องการ ปัจจุบันนิยมใช้กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพื่อแยกอนุภาคของแข็งหรือของเหลวที่มีน้ำหนักเบา หรืออนุภาคที่มีแนวโน้มจะลอยขึ้นมา เช่น อนุภาคคอลลอยด์ น้ำมันและไขมันต่างๆ ซึ่งถ้าใช้วิธีการตกตะกอนจะไม่สามารถแยกได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังใช้กับการทำข้น (Thickening) สลัดจ์ชีวภาพ และอาจใช้ในการกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำเสียได้อีกด้วย

## 2.6 กลไกการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

การอธิบายกลไกการทำงานของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายหรือ DAF จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งมีความต่อเนื่องกัน นั่นคือ ส่วนสัมผัส (Contact zone) และส่วนแยก (Separation zone) โดยฟองอากาศมีการสัมผัสและเกาะติดกับอนุภาคที่ปนเปื้อนอยู่ในเฟสน้ำ ในบริเวณส่วนสัมผัส จากนั้นก็จะลอยและแยกตัวออกจากกระแสในบริเวณส่วนแยก ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 ส่วนสัมผัสและส่วนแยกในกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย (Edzwald, 2010)

### 2.6.1 ส่วนสัมผัส (Contact zone)

ส่วนสัมผัสเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยเป็นส่วนที่อนุภาคและฟองอากาศเกิดการสัมผัสและเกาะติดกันก่อนที่จะถูกแยกออกจากเฟสน้ำ ในส่วนของการแยก (Separation zone) การบำบัดจะสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จะต้องมีปริมาณอากาศที่เหมาะสมหรือเพียงพอต่อการสัมผัส ซึ่งความสามารถในการละลายของอากาศที่ความดันอากาศต่างๆสามารถคำนวณได้จากกฎของเฮนรี (สมการ 2-2 และ 2-3) โดยที่ประสิทธิภาพการละลายจะอยู่ในช่วง 70 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับทฤษฎี (Rachu, 2005) ปัจจุบันได้มีความพยายามจะอธิบายปริมาณอากาศที่เหมาะสมต่อการบำบัดในลักษณะของค่า สัดส่วนต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณอากาศต่อปริมาณอนุภาคแขวนลอยหรือค่าสัดส่วน A/S (Metcalf และ Eddy, 2004) (สมการ 2-4) และค่าสัดส่วนปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของ ฟองอากาศต่อค่าความปั่นป่วนของน้ำหรือค่าสัดส่วน a/G (Painmanakul และคณะ, 2010) (สมการ 2-5 2-6 และ 2-7) แต่อย่างไรก็ตาม ค่าสัดส่วนดังกล่าวสามารถบอกได้แค่แนวโน้มของ ระบบเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบระบบได้

$$x = \frac{yP}{H} \quad (2-2)$$

$$C_{air} = [(P)(\%fraction)(MW)/H]_{Nitrogen} + [(P)(\%fraction)(MW)/H]_{Oxygen} \quad (2-3)$$

เมื่อ  $x$  คือ สัดส่วนโมลของอากาศที่ละลายในน้ำ (โมลต่อโมล)

$y$  คือ สัดส่วนโมลของก๊าซในอากาศ

P คือ ความดันอากาศ (บาร์)

H คือ ค่าคงที่ของเฮนรี (บาร์ต่อโมล)

$C_{air}$  คือ ค่าความเข้มข้นอากาศ (กรัมต่อลิตร)

$$\frac{A}{S} = \frac{1.3s_a(f \cdot P - 1)R}{S_a \cdot Q} \quad (2-4)$$

เมื่อ  $A/S$  คือ ค่าสัดส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณสารแขวนลอย (มิลลิลิตรอากาศต่อมิลลิกรัมสารแขวนลอย)

$s_a$  คือ ปริมาณอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำ (มิลลิลิตรต่อลิตร)

$S_a$  คือ ความเข้มข้นสารแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

f คือ ค่าประสิทธิภาพที่อากาศละลายสามารถในน้ำได้จริง

P คือ ค่าความดันอากาศ (atm)

R คือ ค่าอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (ลิตรต่อนาที)

Q คือ ค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย (ลิตรต่อนาที)

$$a = \left( \frac{Q_G}{V_B} \times \frac{H_L}{U_B} \right) \frac{(\pi D_B^2)}{(A \cdot H_L + N_B \cdot V_B)} \quad (2-5)$$

เมื่อ a คือ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศ (เมตร<sup>-1</sup>)

$Q_G$  คือ อัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

$V_B$  คือ ปริมาตรฟองอากาศ 1 ฟอง (ลูกบาศก์เมตร)

$H_L$  คือ ระดับความสูงของน้ำในคอลัมน์ (เมตร)

$U_B$  คือ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (เมตรต่อวินาที)

$D_B$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (เมตร)



A คือ พื้นที่หน้าตัดคอลัมน์ (ตารางเมตร)

$N_B$  คือ จำนวนฟองอากาศ

$$G = \sqrt{\frac{P_C}{\mu \cdot V}} \quad (2-6)$$

เมื่อ  $G$  คือ ค่าความปั่นป่วนของระบบ (วินาที<sup>-1</sup>)

$P_C$  คือ พลังงานที่ให้กับเฟสน้ำ (วัตต์) (คำนวณจากสมการ 2-7)

$\mu$  คือ ค่าความหนืดทางพลศาสตร์ของน้ำ (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)

$V$  คือ ปริมาตรน้ำทั้งหมดในคอลัมน์ (ลูกบาศก์เมตร)

$$P_C = KQ_G \ln\left(\frac{h + 10.33}{10.33}\right) \quad (2-7)$$

เมื่อ  $P_C$  คือ พลังงานที่ให้กับเฟสน้ำ (วัตต์)

$K$  คือ ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3904

$Q_G$  คือ อัตราการไหลอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อนาที)

$h$  คือ ผลต่างของระดับน้ำในคอลัมน์และหัวปล่อยน้ำเสีย (เมตร)

ปัจจุบันได้มีความพยายามจะอธิบายกลไกการสัมผัสและการเกาะติดระหว่างอนุภาคที่ปนเปื้อนในเฟสน้ำและฟองอากาศด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการอธิบายกลไกดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมมติฐานต่างกัน 2 แบบ คือ Flocculation type model และ Filtration type model ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1) Flocculation type model

Flocculation type model เป็นแบบจำลองที่อธิบายลักษณะการสัมผัสและเกาะติดระหว่างอนุภาคและฟองอากาศ โดยใช้ทฤษฎีการรวมตะกอน (Flocculation) ซึ่งเป็นการสมมติให้ฟองอากาศคืออนุภาคอย่างหนึ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ และเกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคแขวนลอยและฟองอากาศ

Dupre (1995) ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกลไกส่วนส่วนสัมผัสของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยจำลองกลไกดังกล่าวด้วยทฤษฎีการรวมตะกอน ซึ่งมีหลักการคือ ฟองอากาศจะมีการสัมผัสและเกาะติดกับอนุภาคแขวนลอยในน้ำและอนุภาค 1 อนุภาคสามารถจับฟองอากาศได้มากกว่า 1 ฟอง อนุภาคที่จับกับฟองอากาศอย่างน้อย 1 ฟอง จะสามารถลอยตัวแยกออกจากเฟสน้ำได้ ซึ่งจำนวนอนุภาคที่ไม่มีการเกาะติดด้วยฟองอากาศที่เวลาต่างๆ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2-8 และอนุภาคที่มีการเกาะติดด้วยฟองอากาศอย่างน้อย 1 ฟองจนถึง  $i$  ฟอง ที่เวลาต่างๆ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2-9

$$\frac{dn_0}{dt} = -k\beta_0 n_0 N \quad (2-8)$$

$$\frac{dn_i}{dt} = -k\beta_{i-1} n_{i-1} N - k\beta_i n_i N \quad (2-9)$$

เมื่อ  $n_0$  และ  $n_i$  คือ จำนวนอนุภาคที่มีการเกาะติดด้วยฟองอากาศ 0 ฟอง และ  $i$  ฟอง ตามลำดับ

$K$  คือ ค่าคงที่อัตราการสัมผัสระหว่างอนุภาคและฟองอากาศ

$\beta_0$  คือ ค่าคงที่ประสิทธิภาพการเกาะติดระหว่างอนุภาคและฟองอากาศ

$N$  คือ จำนวนฟองอากาศทั้งหมด ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ 2-10

$$N = \frac{\Phi}{\frac{\pi}{6} d_b^3} \quad (2-10)$$

เมื่อ  $\Phi$  คือ อัตราการไหลอากาศ

$d_b$  คือ ขนาดของฟองอากาศ

ประสิทธิภาพการบำบัดสามารถคำนวณได้จากสัดส่วนของ  $n_i/n_0$  ซึ่งได้จากการอินทิเกรตสมการที่ 2-8 และ 2-9 ด้วยวิธีการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) ได้เป็นสมการ 2-11

$$\frac{n_i}{N} = \langle x:i \rangle \cdot e^{-kT \left\{ e^{\left( \frac{kT}{d^2/d_b^2} \right)} - 1 \right\}^i} \quad (2-11)$$

$$\langle x:i \rangle = \frac{x(x-1) \dots [x-(i-1)]}{i(i-1) \dots (2)(1)} \quad (2-12)$$

$$x = \frac{d^2}{d_b^2} \quad (2-13)$$

$$k = \frac{6}{\pi} \cdot a \cdot G [1 + (d/d_b)]^3 \Phi \beta_0 \quad (2-14)$$

เมื่อ  $i = 0$  ถึง  $i = i_{\max-1}$

$d$  คือ ขนาดอนุภาคแขวนลอย

$\tau$  คือ เวลาที่กักเก็บ

$G$  คือ ค่าความปั่นป่วน

$a$  คือ ค่าคงที่

จากประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ  $n_i/n_0$  ซึ่งเท่ากับ  $n_i/N$  ในสมการที่ 2-11 ในทางกลับกัน  $n_i/N$  สามารถคำนวณได้จาก  $1 - n_0/N$  ซึ่งเมื่อแทนค่า  $i = 0$  สมการที่ 2-12 จะมีค่าเป็น 1 สมการคำนวณประสิทธิภาพสามารถเขียนได้ใหม่ ดังสมการที่ 2-15 และ 2-16

$$\frac{n_0}{N} = e^{(-kT)} \quad (2-15)$$

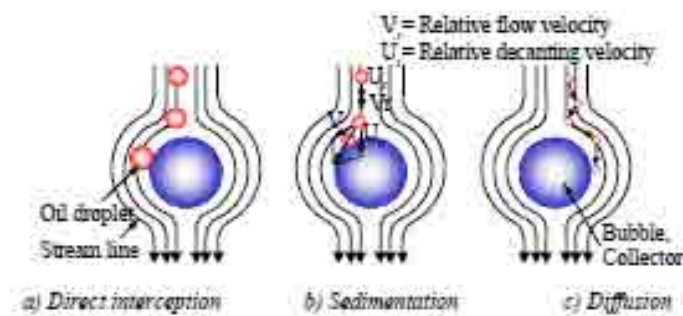
$$\eta = 1 - \frac{n_0}{N} = 1 - e^{(-kT)} \quad (2-16)$$

อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าแบบจำลองของ Dupre มีจุดบกพร่อง เนื่องจากค่า  $G$  (ความปั่นป่วน) ในสมการ แสดงให้เห็นว่าระบบยิ่งมีความปั่นป่วนมากจะยิ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งในความเป็นจริงไม่ได้เป็นเช่นนั้น แต่ในทางกลับกัน ความปั่นป่วนที่เพิ่มมากขึ้นเป็นการเพิ่มโอกาสการรวมตัวกันของฟองอากาศ ซึ่งส่งผลให้ขนาดฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นและส่งผลต่อประสิทธิภาพต่ำลงไปด้วย

## 2) Filtration type model

Filtration type model เป็นแบบจำลองที่อธิบายลักษณะการสัมผัสและเกาะติดระหว่างอนุภาคและฟองอากาศ โดยใช้ทฤษฎีการกรอง (Filtration) ซึ่งเป็นการสมมติให้ฟองอากาศคือตัวกรองหรือตัวดักจับอนุภาคที่ปนเปื้อนในเฟสน้ำ

Haarhoff และ Edzwald (2004) ได้นำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกลไกส่วนสัมผัสนี้ของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยจำลองกลไกดังกล่าวด้วยทฤษฎีการกรอง ซึ่งมีหลักการคือ ฟองอากาศจะทำหน้าที่เป็นตัวดักจับอนุภาคที่ปนเปื้อนในเฟสน้ำ การดักจับอนุภาคที่ปนเปื้อนในเฟสน้ำของฟองอากาศ 1 ฟอง เกิดขึ้นด้วยกลไกสำคัญ 3 อย่าง (แสดงดังภาพที่ 2-6) คือ การดักจับโดยตรง (Direct interception) การตกตะกอน (Sedimentation) และการแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ซึ่งอธิบายด้วยสมการดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2-6 กลไกการดักจับอนุภาคที่ปนเปื้อนในเฟสน้ำของฟองอากาศ 1 ฟอง (Rachu, 2005)

### 1. การดักจับโดยตรง (Direct interception)

$$\eta_i = \left[ \left( \frac{d_p}{d_b} \right) + 1 \right]^2 - \frac{3}{2} \left[ \left( \frac{d_p}{d_b} \right) + 1 \right] + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{d_p}{d_b} \right) + 1 \right]^{-1} \quad (2-17)$$

เมื่อ  $d_p$  คือ ขนาดของอนุภาคแขวนลอย

$d_b$  คือ ขนาดของฟองอากาศ

### 2. การตกตะกอน (Sedimentation)

$$\eta_s = \left[ \frac{(\rho_p - \rho_w)}{(\rho_w - \rho_b)} \right] \left( \frac{\rho_p}{\rho_b} \right)^2 \quad (2-18)$$

เมื่อ  $\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคแขวนลอย

$\rho_w$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ

$\rho_b$  คือ ความหนาแน่นของฟองอากาศ

### 3. การแพร่แบบบราวเนียน (Brownian diffusion)

$$\eta_D = 6.18 \left( \frac{k_b \cdot T}{g(\rho_w - \rho_b)} \right)^{2/3} \left( \frac{1}{d_p} \right)^{2/3} (1/d_p)^2 \quad (2-19)$$

เมื่อ  $k_b$  คือ ค่าคงตัวโบลทซ์มาน

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของน้ำ

$g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

ดังนั้น ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของฟองอากาศ 1 ฟอง ( $\eta_T$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2-20

$$\eta_T = \eta_I + \eta_s + \eta_D \quad (2-20)$$

ในกระบวนการจริง จะมีฟองอากาศมากมายในระบบที่ทำหน้าที่เป็นตัวดักจับอนุภาคแขวนลอยในเฟสน้ำ ดังนั้น ประสิทธิภาพของระบบหรือฟองอากาศทั้งหมดสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2-21 และ 2-22

$$\eta = 1 - \frac{n_{p,e}}{n_{p,i}} \quad (2-21)$$

$$\eta = 1 - e^{-\frac{3}{2} \alpha_{pb} \eta_T \Phi_b v_b t_{cc} / d_b} \quad (2-22)$$

เมื่อ  $\alpha_{pb}$  คือ ประสิทธิภาพการเกาะติดระหว่างอนุภาคและฟองอากาศ

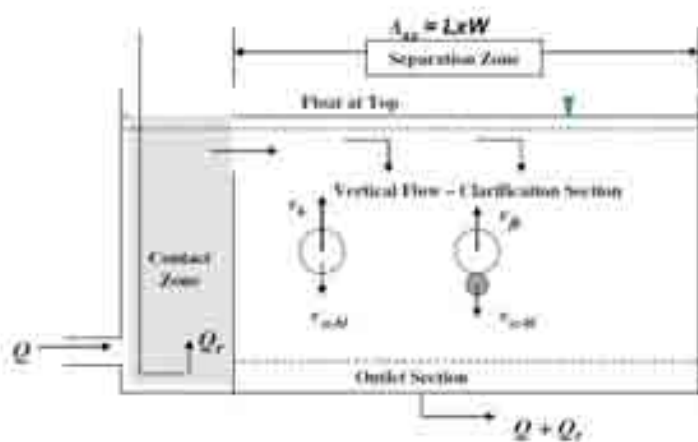
$\Phi_b$  คือ ความเข้มข้นอากาศโดยปริมาตร

$v_b$  คือ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ

$t_{oz}$  คือ ระยะเวลาที่เก็บในส่วนการสัมผัส

## 2.6.2 ส่วนแยก (Separation zone)

ส่วนแยกเป็นส่วนที่มีหน้าที่ในการแยกอนุภาคแขวนลอยที่เกาะติดกับฟองอากาศและฟองอากาศอิสระออกจากเฟสน้ำ โดยอนุภาคแขวนลอยที่เกาะติดกับฟองอากาศและฟองอากาศอิสระจะสามารถแยกออกจากเฟสน้ำได้ก็ต่อเมื่อมีความเร็วลอยตัวมากกว่าหรือเท่ากับอัตราน้ำล้นผิวของส่วนแยก (แสดงดังภาพที่ 2-7)



ภาพที่ 2-7 การแยกตัวของอนุภาคแขวนลอยที่เกาะติดกับฟองอากาศและฟองอากาศอิสระออกจากเฟสน้ำ (Edzwald, 2010)

## 2.7 กระบวนการโคแอกกูแลชัน (Coagulation) (มันสิน ตันฑุลเวศน์, 2542)

อนุภาคคอลลอยด์เป็นอนุภาคที่สร้างปัญหาให้กับกระบวนการทำน้ำให้ใส (Clarification) เนื่องจากเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง  $10^{-6}$  ถึง  $10^{-3}$  มิลลิเมตร จึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด นอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุประจำตัว โดยกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีประจุบวก เช่น สารอินทรีย์ สบู่ หรือสารจำพวกสารลดแรงตึงผิว ส่วนกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มีประจุลบ เช่น หยดน้ำมัน สหาร่าย และเนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีประจุทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันเกิดเป็นแรงผลักระหว่างอนุภาคมีเสถียรภาพสูงทำให้อนุภาคต่างๆ ไม่สามารถ รวมตัวกันและจับเป็นกลุ่มก้อน กระบวนการโคแอกกูแลชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

## 1) การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization)

เสถียรภาพของหยดน้ำมันเป็นผลมาจากแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันบนหยดน้ำมัน สามารถอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหยดน้ำมันโดยใช้ทฤษฎี Electric Double Layer Theory โดยไอออนประจุลบบนหยดน้ำมันสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้ ไอออน ประจุบวกมาแออัดอยู่ที่ใกล้ผิวหยดน้ำมัน ความหนาแน่นของ ไอออนประจุบวกจะสูงที่สุดในบริเวณที่ติดกับหยดน้ำมัน และลดลงตามระยะห่างจากหยดน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของหยดน้ำมัน มีค่าสูงสุดที่ผิวและลดน้อยลงเมื่อห่างออกไป ดังนั้นการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันจะต้องทำให้แรงดึงดูด (Van der Waals Force) ของหยดน้ำมันมีค่ามากกว่าแรงผลักระหว่างหยดน้ำมัน ซึ่งเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของหยดน้ำมันหรือค่า Zeta Potential โดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

1.1 กลไกการลดความหนาของชั้นกระจาย ( Diffuse Layer) โดยเพิ่มประจุตรงกันข้ามกับหยดน้ำมันในชั้นกระจายให้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ที่ผิวนอกสุดของน้ำมันลดตามไปด้วย

1.2 กลไกดูดติดผิวและการทำลายประจุของหยดน้ำมัน ( Adsorption and Charge Neutralization) โดยการเติมสารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถให้ประจุตรงข้ามกับหยดน้ำมัน ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงเช่นกัน

1.3 กลไกการสร้างผลึกเพื่อให้หยดน้ำมันเกาะจับ ( Sweep Coagulation) การใส่สารส้มให้เกิดผลึก  $Al(OH)_3$  เหมือนวุ้นสีขาวเพื่อเป็นเป้าสัมผัสให้น้ำมันมาเกาะและรวมตัวเป็นฟล็อก

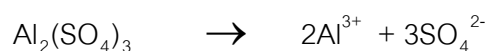
1.4 กลไกการสร้างสะพานเชื่อมต้อ ( Polymer Bridging) เมื่อใส่สารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่ลงในน้ำจะเกิดการเกาะจับกับหยดน้ำมันและยังมีแขนเพื่อเชื่อมต่อกับอนุภาคคอลลอยด์อื่นๆ เพื่อทำให้เกิดฟล็อกได้อีกด้วย

## 2) กระบวนการโคแอกกูเลชัน

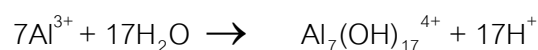
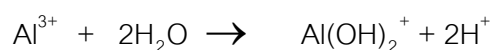
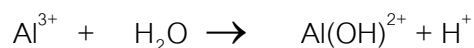
เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กเกินไปไม่สามารถแยกได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือวิธีการทำให้ลอย จึงมักต้องทำการโคแอกกูเลชันเพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในด้านการตกตะกอนให้ดียิ่งขึ้น เช่น การทำให้สารแขวนลอยมีขนาดใหญ่ขึ้น

ส่วนประกอบของกระบวนการ คือการเติมสารโคแอกกูแลนต์ที่ถึงกวนเร็ว (Rapid mixing tank) ซึ่งจะกระจายสารเคมีไปยังส่วนต่างๆ ของน้ำอย่างรวดเร็วเพื่อให้มีการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันขึ้น และที่ถึงกวนช้า (Flocculation tank) จะรับน้ำต่อจากถึงกวนเร็วเพื่อสร้างสัมผัสให้กับหยดน้ำมันเกิดการรวมตัวเป็นฟล็อก โดยสารเคมีที่ใช้ เรียกว่า โคแอกกูแลนต์ (Coagulant) หรือฟล็อกคูแลนต์ (Flocculants) เช่น สารส้ม เพอร์ริกคลอไรด์ ปูนขาว เป็นต้น

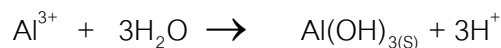
2.1 กลไกโคแอกกูแลนต์ด้วยสารส้ม นิยมใช้สารส้มเนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพง สูตรโมเลกุล  $Al_2(SO_4)_3 \cdot H_2O$  เมื่อละลายในน้ำจะเกิดการแตกตัว ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



เมื่อเติมสารส้มในน้ำอะลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์จาก  $Al_2(SO_4)_3$  จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้  $Al(H_2O)_6^{3+}$  โดยไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของ  $Al^{3+}$  จะเกิดขึ้นทันทีโดยลิแกนด์ (Ligands) ชนิดต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $OH^-$  จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex substance) ระหว่างอะลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ ไฮดรอกไซด์ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



ในกรณีความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก  $Al(OH)_3$  ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



ผลของปฏิกิริยาที่เกิดจากการดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์คือ สารคอมเพล็กซ์ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างไฮโดรไลซิสจาก  $Al^{3+}$  ถึง  $Al(OH)_3$  สารคอมเพล็กซ์อาจมีประจุลบหรือบวกก็ได้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ กล่าวคือ ถ้าพีเอชน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero point of charge) ของ  $Al(OH)_{3(s)}$  จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุลบ เช่น  $Al(OH)_4^-$  แต่ถ้าพีเอชของน้ำต่ำกว่าจุดสะเทิน



ทางไฟฟ้าของ  $\text{Al(OH)}_{3(s)}$  จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก เช่น  $\text{Al(OH)}^{2+}$  โดยสารส้มที่เติมลงในน้ำจะเกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกหลักดังนี้

- กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization) เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มที่มีประจุบวก ทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ที่มีประจุลบให้เป็นกลาง (Neutralization) เป็นการสร้างโอกาสสัมผัสให้อนุภาครวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของอนุภาคเพียงลำพัง กลไกนี้มีความเหมาะสมกับที่แคบจึงควบคุมการทำงานได้ยากเพราะสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะต้องพอเหมาะเท่านั้น ถ้าหากมีปริมาณต่ำเกินไปกระบวนการโคแอกกูเลชันจะไม่เกิด แต่ถ้าสูงเกินไปสารประกอบเชิงซ้อนจะดูดติดผิวอนุภาคมากทำให้อนุภาคเปลี่ยนเป็นประจุบวกและเกิดเสถียรภาพขึ้นอีก แต่ตะกอนที่เกิดจากกลไกนี้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

- กลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation) ในกรณีความเข้มข้นของสารส้มมากเกินไปจนปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนได้  $\text{Al(OH)}_3$  การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมสารส้มเป็นจำนวนมากพอจนมีความเข้มข้นเกินจุดอิ่มตัว ซึ่งทำให้ผลึก  $\text{Al(OH)}_3$  ที่มีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคและทำให้ผิวของอนุภาคมีความเหนียวไม่แสดงอิทธิพลทางประจุไฟฟ้า จึงทำหน้าที่สร้างเป้าสัมผัสอนุภาคคอลลอยด์จนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้เพียงลำพัง พีเอช 6.8-8.2 ให้ผลดีที่สุด

- กลไกแบบโคแอกกูเลชันแบบร่วม (Combination Coagulation) เป็นการทำลายเสถียรภาพอนุภาคร่วมกันระหว่างกลไกแบบดูดติดผิวและแบบกวาด โดยที่มีความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองมีไม่เด่นชัด

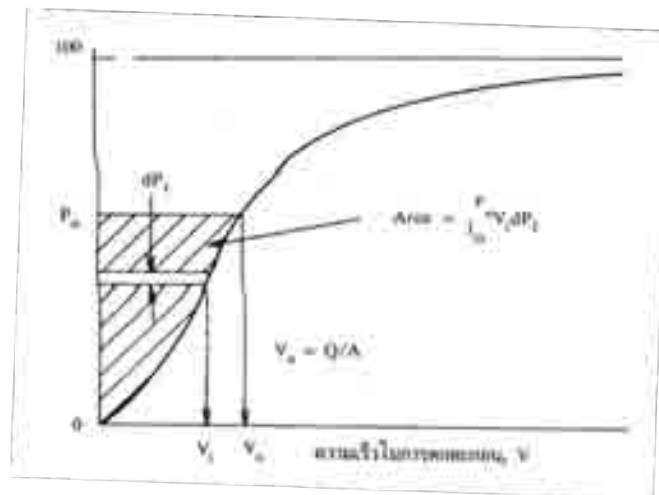
## 2.8 ทฤษฎีการตกตะกอน (มันลิน ตันจูลเวศม์, 2542)

โดยทั่วไป ลักษณะการตกตะกอนสามารถจำแนกได้ 4 แบบ ตามระดับความเข้มข้นและลักษณะสมบัติของอนุภาคที่อยู่ในน้ำ คือ การตกตะกอนแบบโดด (Discrete Settling) การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling) การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Zone Settling) และการตกตะกอนแบบอัดตัว (Compression Settling) ซึ่งน้ำมันตัดและสาหร่ายที่ปนเปื้อนอยู่ในเฟสน้ำส่วนมากจะมีความเข้มข้นต่ำและไม่มีการจับตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นจึงมีลักษณะการตกตะกอนแบบโดด แต่โดยทั่วไป การกำจัดน้ำมันตัดหรือสาหร่ายออกจากน้ำด้วยกระบวนการทำน้ำให้ใส (Clarification) ซึ่งได้แก่ กระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) กระบวนการทำ

ลอย (Flotation) และกระบวนการกรอง (Filtration) มักจะทำร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด ทำให้น้ำมันตัดหรือสาหร่ายเกิดการรวมตัวกันและมีลักษณะการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม

### 2.8.1 ทฤษฎีการตกตะกอนแบบโดด

ทฤษฎีการตกตะกอนแบบโดดสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดที่อัตราการน้ำล้นผิว (Overflow rate) ต่างๆ ของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (กรณีที่ไม่มีการโคแอกกูแลนต์) และสามารถประยุกต์ใช้ค่าอัตราการน้ำล้นผิวดังกล่าวมาออกแบบส่วนสัมผัส (Contact zone) ได้ ซึ่งการวิเคราะห์ผลตามทฤษฎีการตกตะกอนแบบโดดเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดที่อัตราการน้ำล้นผิวต่างๆ สามารถทำได้โดย เดินระบบในคอลัมน์ แล้วทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากจุดต่างๆ ( 1 หรือ 2 จุด) มาวิเคราะห์ด้วยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนความเข้มข้นที่เวลาใดๆ ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราการน้ำล้นผิว (ค่าความสูงของจุดเก็บต่อเวลาที่เก็บตัวอย่าง) ลักษณะกราฟแสดงดังรูป 2-8 ซึ่งสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดที่อัตราการน้ำล้นผิวต่างๆ ได้ด้วยสมการที่ 2-23



ภาพที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเข้มข้นที่เวลาใดๆ ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราการน้ำล้นผิวต่างๆ

$$P = (1 - P_0) + \left( \frac{1}{v_0} \right) \int_0^{P_0} v_i dP_i \quad (2-23)$$

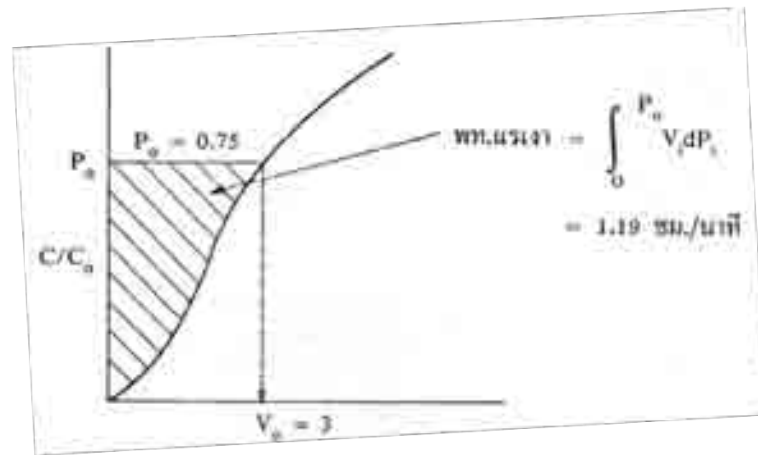
เมื่อ  $P$  คือ ประสิทธิภาพการบำบัดที่อัตราการน้ำล้น  $V_0$

$V_0$  คือ อัตราน้ำล้นผิวที่ให้ความสนใจ

$P_0$  คือ ค่าสัดส่วนปริมาณสารที่เวลาใดๆต่อปริมาณสารที่เวลาเริ่มต้น (อ่านได้จากกราฟ)

$\int_0^{P_0} v_i dP_i$  คือ พื้นที่ใต้กราฟ ณ อัตราน้ำล้นผิวที่สนใจ  $V_0$

ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดที่อัตราน้ำล้นต่างๆ โดยสมมติให้ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะดังกราฟในภาพที่ 2-9 และอัตราน้ำล้นที่สนใจคือ 3 เซนติเมตรต่อนาที จะมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้



ภาพที่ 2-9 กราฟสมมติผลการทดลองตามทฤษฎีการตกตะกอนแบบโคต

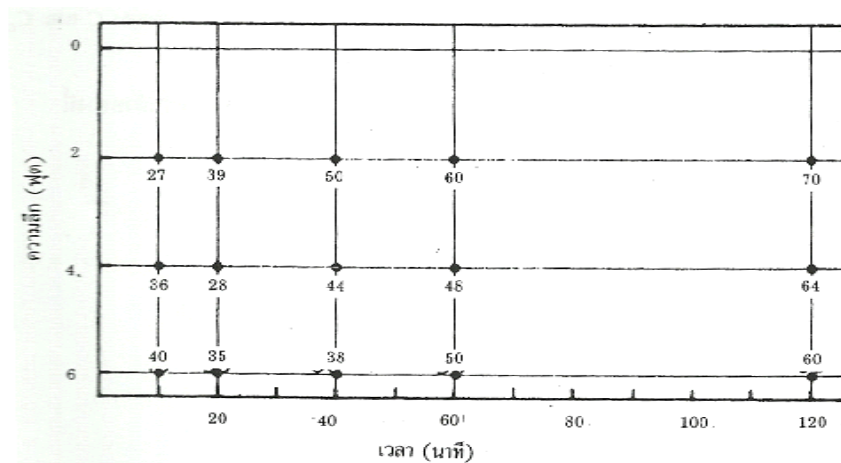
จากภาพที่ 2-9 ที่อัตราน้ำล้น 3 เซนติเมตรต่อนาที จะมีค่า  $P_0$  เท่ากับ 0.75 และมีพื้นที่เงาหรือ  $\int_0^{P_0} v_i dP_i$  เท่ากับ 1.19 เซนติเมตรต่อนาที ซึ่งเมื่อนำไปแทนค่าในสมการ 2-23 จะได้  $P = (1-0.75) + (1/3)(1.19) = 0.675$  หรือ เท่ากับ 67.5 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นที่อัตราน้ำล้นผิว 3 เซนติเมตรต่อนาที จะมีประสิทธิภาพการบำบัด 67.5 เปอร์เซ็นต์

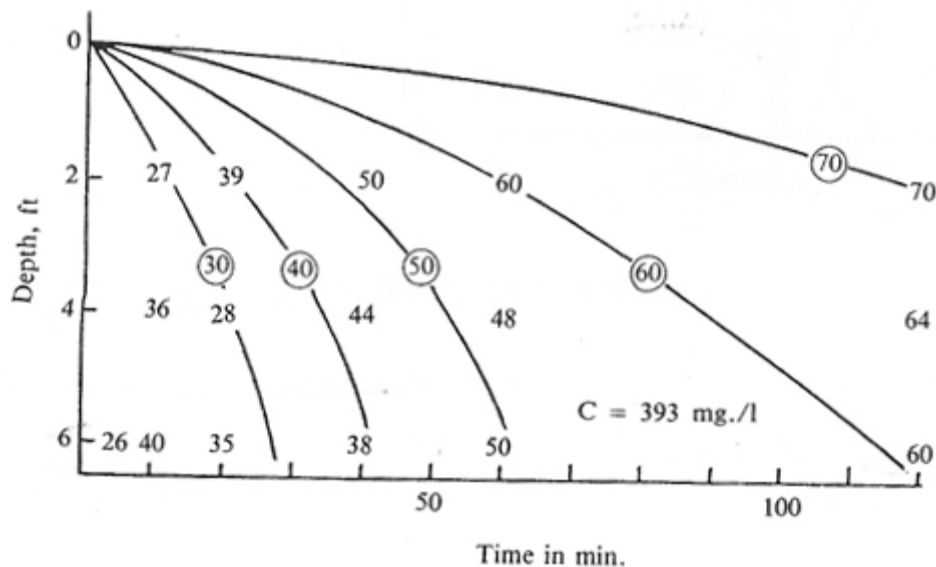
### 2.8.2 ทฤษฎีการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม

การวิเคราะห์ผลการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มกระทำได้ยากกว่าแบบโคต เนื่องจากอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเกิดขึ้นในระหว่างการตกตะกอน การเก็บข้อมูลจากคอลัมน์เพื่อหาความเข้มข้นของอนุภาค ต้องกระทำที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆ ปริมาณความเข้มข้นที่ลดลง ณ เวลา

เท่ากับ  $t$  และที่ความลึกเท่ากับ  $d$  หมายถึงปริมาณความขุ่นที่มีอัตราความเร็วในการตกตะกอนสูงกว่าหรือเท่ากับ  $d/t$  และเท่ากับความขุ่นที่ถูกกำจัด ณ เวลา และความลึกดังกล่าว เมื่อการทดลองเสร็จสิ้น เราจะได้ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขุ่น หรือตะกอนแขวนลอยที่ความลึกและเวลาต่างๆ ดังตัวอย่างในภาพที่ 2-10 เมื่อเชื่อมจุดที่มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากัน เช่น 30 เปอร์เซ็นต์ 40 เปอร์เซ็นต์ 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น จะได้ลักษณะของกราฟต่างๆแสดงดังภาพที่ 2-11

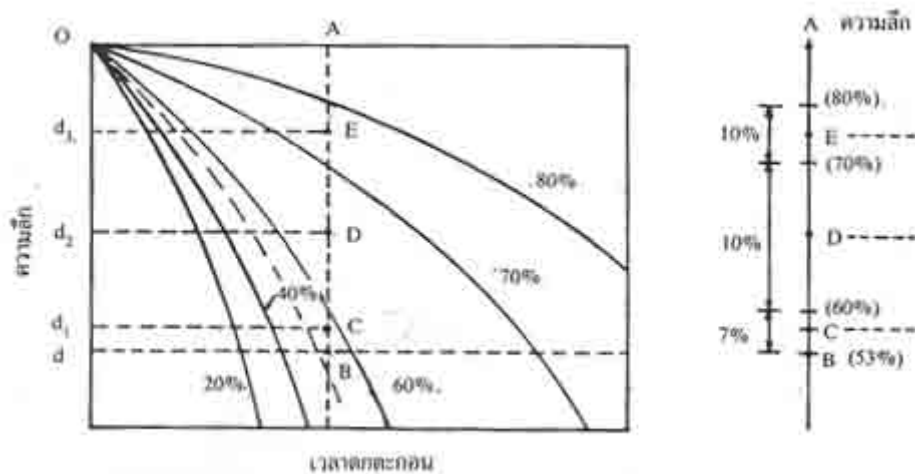


ภาพที่ 2-10 เปอร์เซนต์ความขุ่นที่เวลาและระดับความลึกต่างๆ



ภาพที่ 2-11 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกอนแขวนลอยที่เวลาและความลึกต่างๆ

จากภาพที่ 2-11 กราฟแต่ละเส้นหมายถึงวิธีการตกตะกอนของอนุภาคต่างๆ ที่มีจำนวนอนุภาคตั้งตัวเลขกำกับ เช่น กราฟ 30 เปอร์เซนต์ บอกให้รู้ว่า 30 เปอร์เซนต์ ของอนุภาคทั้งหมดเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ความลึกเท่าใดที่เวลาต่างๆ หรือที่เวลาต่างๆ จะสามารถตะกอนได้ไกลเท่าไร นอกจากนี้แต่ละจุดยังสามารถบอกอัตราเร็วในการตกตะกอนได้อีกด้วย (เนื่องจากตำแหน่งของจุดบนกราฟ กำหนดขึ้นด้วยระดับความลึกและเวลา ซึ่งเมื่อหารกันก็จะได้อัตราเร็วของการตกตะกอน)



ภาพที่ 2-12 การวิเคราะห์เปอร์เซนต์การกำจัดตะกอนแขวนลอยที่ความลึก  $d$  และเวลาก็ก็น้ำ  $t$

ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่อัตราน้ำล้น ( $V_0$ ) ต่างๆ ให้ทำการกำหนดความลึกของถัง ( $d$ ) ขึ้นมาก่อน แล้วคำนวณหาเวลาก็กน้ำของถัง ( $t$ ) จาก  $t = d / V_0$  จากนั้นลากเส้นในแนวตั้งบนกราฟที่ตำแหน่งเวลาเท่ากับ  $t$  โดยลากตั้งแต่ความลึกเท่ากับ 0 จนถึงความลึกเท่ากับ  $d$  ซึ่งจะได้เส้นตรงมาหนึ่งเส้นแทนความลึกของถังตกตะกอน โดยมีจุดที่ความลึกเท่ากับศูนย์เป็นผิวน้ำและที่ความลึกเท่ากับ  $d$  เป็นก้นถัง (แสดงดังรูป 2-12) เมื่อถึงขั้นนี้ เราสามารถหาอัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคต่างๆ ในถังตกตะกอนที่มีความลึกเท่ากับ  $d$  ได้ ดังนี้

1. จุด B บอกให้รู้ว่า 53 เปอร์เซนต์ ของอนุภาคทั้งหมดมีอัตราเร็วมากกว่าหรือเท่ากับ  $V_0$  ซึ่งเท่ากับ  $d/t$

2. จุด C ซึ่งบอกค่าความลึกเฉลี่ย ( $d_1$ ) ของอนุภาคที่อยู่ระหว่าง 53 และ 60 เปอร์เซนต์ แสดงให้รู้ว่า 7 เปอร์เซนต์ของอนุภาคทั้งหมด มีอัตราเร็วหรือมากกว่า  $d_1/t$  ซึ่งน้อยกว่า  $d/t$

3. จุด D ซึ่งบอกค่าความลึกเฉลี่ย ( $d_2$ ) ของอนุภาคที่อยู่ระหว่าง 60 และ 70 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้รู้ว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคทั้งหมด มีอัตราเร็วหรือมากกว่า  $d_2/t$

4. จุด E ซึ่งบอกค่าความลึกเฉลี่ย ( $d_3$ ) ของอนุภาคที่อยู่ระหว่าง 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้รู้ว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคทั้งหมด มีอัตราเร็วหรือมากกว่า  $d_3/t$

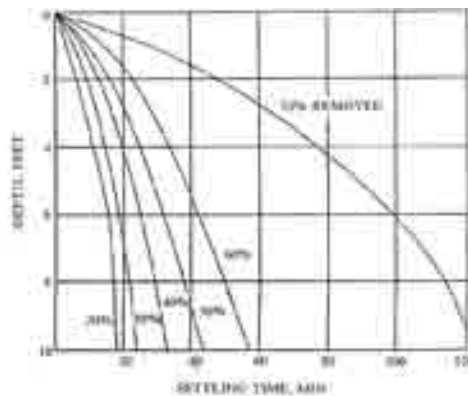
$$\text{เปอร์เซ็นต์การกำจัดสารแขวนลอย} = 53 + (7d_1/d) + (10d_2/d) + (10d_3/d)$$

ตัวอย่างการวิเคราะห์ (ทำการทดลองการตกตะกอนในคอลัมน์) โดยตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2-8 (มันซิน ตันทุลเวศน์, 2542)

ตารางที่ 2-8 ผลการทดลองการตกตะกอนด้วยคอลัมน์

Depth (ft)	Time (min)	% Suspended Solids Removed at Indicated Depth and Time					
		15	30	45	60	90	120
2		50	65	69	72	73	74
4		31	56	64	67	72	73
6		20	49	61	64	69	72
8		16	41	57	62	67	71
10		15	37	52	61	65	69

จากข้อมูลในตารางที่ 2-8 สามารถพล็อตกราฟแสดงวิธีการตกตะกอนของอนุภาค ต่างๆ ได้ดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 การวิเคราะห์ผลการทดลองตกตะกอนในห้องปฏิบัติการ

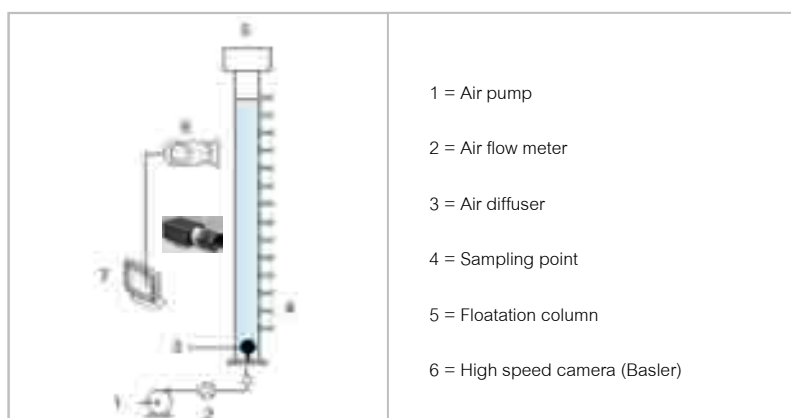
จากภาพที่ 2-13 สามารถคำนวณประสิทธิภาพในการตกตะกอนของถังลึกลับ 8 ฟุต ที่ระดับเวลาการกักเก็บน้ำ 17 21.5 29.0 37.5 50 และ 115 นาที ได้รายละเอียดดังตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-9 การคำนวณประสิทธิภาพของถังตกตะกอนภายใต้สภาวะต่างๆ

Time (min)	% SS Range	Avg. Depth of range (ft)	% (ftm)	$\frac{24}{t} \times 100$ (1/day)	$V_s/V_c$	% SS Removal
17.0	0-20	8.0	0.471	5060	1.0	20.0
	20-30	6.2	0.365		0.73	7.3
	30-40	4.0	0.236		0.50	5.0
	40-50	2.6	0.153		0.32	3.2
	50-60	1.7	0.100		0.21	2.1
	60-70	0.8	0.047		0.10	1.0
		% SS Removal (Total)				38.6
21.5	0-30	8.0	0.372	4010	1.0	30.0
	30-40	6.0	0.280		0.75	7.5
	40-50	3.8	0.177		0.48	4.8
	50-60	2.4	0.112		0.30	3.0
	60-70	1.1	0.051		0.14	1.4
		Total				46.7
29.0	0-40	8.0	0.226	2980	1.0	40.0
	40-50	6.4	0.221		0.80	8.0
	50-60	4.1	0.141		0.51	5.1
	60-70	1.8	0.062		0.22	2.2
		Total				55.3
37.5	0-50	8.0	0.213	2300	1.0	50.0
	50-60	6.2	0.191		0.78	7.8
	60-70	2.8	0.075		0.35	3.5
		Total				61.3
50	0-60	8.0	0.160	1725	1.0	60.0
	60-70	4.4	0.088		0.55	5.5
		Total				65.5
115	0-70	8.0	0.070	255	1.0	70.0
		Total				70.0

## 2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**สุรารักษ์ อวนญวน (2552)** ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นแปรรูปโลหะด้วยกระบวนการทำให้ลอย ด้วยอากาศหรือ IAF (Induced air flotation) ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เรียกว่ากระบวนการ MIAF (Modified induced air flotation) รวมถึงการประยุกต์ใช้แนวคิดการใช้ฟองอากาศเคลือบน้ำมัน โดยทำการศึกษาด้วยคอลัมน์ 2 ขนาดคือ ขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.2 เซนติเมตร และขนาดใหญ่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบบำบัดในด้านอัตราไหลอากาศ ปริมาณสารเคมี ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ และรูปแบบการกระจายของเวลากัก (Residence Time Distribution: RTD) โดยเดินระบบแบบทีละเท (Batch process) และแบบต่อเนื่อง (Continuous process) โดยออกแบบการทดลองดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลองของ สุรารักษ์ อวนญวน (2552)

จากการทดลองพบว่า ขนาดของน้ำมันหล่อลื่นแปรรูปโลหะที่มีขนาดหยดน้ำมันเฉลี่ยประมาณ 1.3 ไมครอน ซึ่งทำให้ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการตกตะกอนตามปกติ และยังเป็นข้อจำกัดสำหรับกระบวนการ IAF และกระบวนการทำให้ลอยโดยใช้ฟองอากาศเคลือบเคโรซีน ในขณะที่ สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูเลชันที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดถึง 91.23เปอร์เซ็นต์ คือ ที่ค่าพีเอช เริ่มต้น 7 โดยใช้สารส้ม 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

สำหรับกระบวนการ MIAF แบบทีละเท พบว่าสำหรับคอลัมน์ขนาดเล็กให้ประสิทธิภาพการบำบัด 94.96 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ปริมาณสารส้ม 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราไหลอากาศ 1.0 ลิตรต่อนาที ในขณะที่คอลัมน์ขนาดใหญ่ให้ประสิทธิภาพการบำบัด 82.97 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้



ปริมาณสารส้ม 255 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่อัตราไหลอากาศ 2.0 ลิตรต่อนาที นอกจากนี้ การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นแปรรูปโลหะ ไม่ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วน a/G ซึ่งเป็นตัวแปรรวมทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและทางกายภาพ (ความปั่นป่วน) ของระบบ เนื่องจากข้อจำกัดในการรวมตัวกันของหยดน้ำมันขนาดเล็กและฟองอากาศ แต่ขึ้นอยู่กับการทำลายเสถียรภาพทางเคมีของหยดน้ำมันเป็นหลัก สำหรับการเดินระบบของกระบวนการ MIAF แบบต่อเนื่องพบว่า ได้ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยประมาณที่อัตราน้ำเข้า 5 ลิตรต่อชั่วโมง และ 11 ลิตรต่อชั่วโมง สำหรับคอลัมน์เล็ก ในขณะที่การเดินระบบในคอลัมน์ใหญ่ที่ได้ประสิทธิภาพการบำบัดเพียง 25 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลจากการไหลวนของน้ำที่เป็นผลกระทบจากความแตกต่างของโมเมนต์ ซึ่งส่งผลเสียต่อการรวมตัวของฟลอคที่เกิดขึ้น

**พิษณุพล สงวนนาม (2543)** ศึกษากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพื่อกำจัดสาหร่าย โดยทำการทดลองกับน้ำเสียที่มีสาหร่ายปนเปื้อนในธรรมชาติและน้ำเสียสังเคราะห์ สาหร่ายพันธุ์คลอเรลล่า (*Chlorella sp.*) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยทำการศึกษาปัจจัยของ การใช้และไม่ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ชนิดของสารโคแอกกูแลนท์ อัตราน้ำเวียนกลับ ค่าสัดส่วน A/S ความดันอากาศ ความขุ่นของน้ำเสีย กรดฮิวมิก และ Sodium lauryl sulfate ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ซึ่งผลการศึกษาที่ได้ มีดังนี้

1) อัตราน้ำเวียนกลับที่เหมาะสมต่อการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายคือ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยที่อัตราส่วนน้ำเวียนกลับมากกว่านี้จะมีการเพิ่มของประสิทธิภาพน้อยเมื่อเทียบกับที่อัตราน้ำเวียนกลับที่น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

2) ค่าสัดส่วน A/S ที่มีความเหมาะสมต่อการบำบัดควรมีค่าอย่างน้อย 0.05

3) ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความดันอากาศ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความดันที่มากกว่า 5 บาร์ จะได้ประสิทธิภาพที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นความดันอากาศที่เหมาะสมคือ 5 บาร์ และที่ความดันอากาศ 5 บาร์ จะมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ 35.95 เปอร์เซ็นต์

4) ในช่วงของค่าความเข้มข้นเซลล์สาหร่าย  $1 \times 10^5$  ถึง  $6 \times 10^5$  เซลล์ต่อมิลลิลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นเซลล์สาหร่าย

5) ที่ความขุ่นของน้ำมากกว่า 130 NTU ความขุ่นของน้ำที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

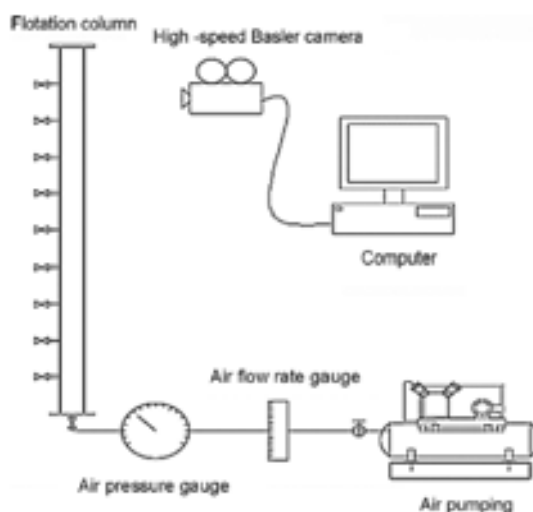
6) การมีกรดฮิวมิกในระบบหรือน้ำเสียสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดของสารห่วยได้เล็กน้อย โดยที่ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเพิ่มประสิทธิภาพจาก 28.5 เปอร์เซ็นต์ (ไม่มีกรดฮิวมิก) เป็น 36.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่ากรดฮิวมิก สามารถประพฤติตัวเป็นโพลีเมอร์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ในการทำลายเสถียรภาพของสารห่วย ทำให้ประสิทธิภาพบำบัดเพิ่มขึ้น

7) Sodium lauryl sulfate ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารห่วยด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

8) กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการที่จำเป็นสำหรับการบำบัดสารห่วยด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยที่พีเอชเท่ากับ 7 การเติมสารส้มความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 82.4 เปอร์เซ็นต์ และที่พีเอชเท่ากับ 5 การเติมเพอร์ริคคลอไรด์ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 78 เปอร์เซ็นต์ และจากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้อีกว่า สารส้มมีความเหมาะสมต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันมากกว่าเพอร์ริคคลอไรด์

9) การใช้กระบวนการฟล็อกคูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วย อากาศละลายไม่ได้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารห่วย

Pianmanakul และคณะ (2010) ศึกษาผลกระทบของลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่มีต่อการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการทำให้ลอยหรือ IAF (Induced air flotation) และกระบวนการทำให้ลอยร่วมกับกระบวนการโคแอกกูแลนต์หรือ MIAF (Modified induced air flotation) โดยทำการทดลองแบบที่ละเทด้วยชุดอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 2-15 และทำการศึกษาด้วยน้ำมันที่ผสมสารลดแรงตึงผิวประจุลบเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันด้วยกระบวนการ IAF และ MIAF รวมถึงค่าสัดส่วน a/G (พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศต่อค่าความปั่นป่วนของน้ำ) ซึ่งมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2-15 ชุดอุปกรณ์การทดลองของ Pianmanakul และคณะ (2010)

1) กระบวนการ IAF สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ดีกว่ากระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมัน 60 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และ 28 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

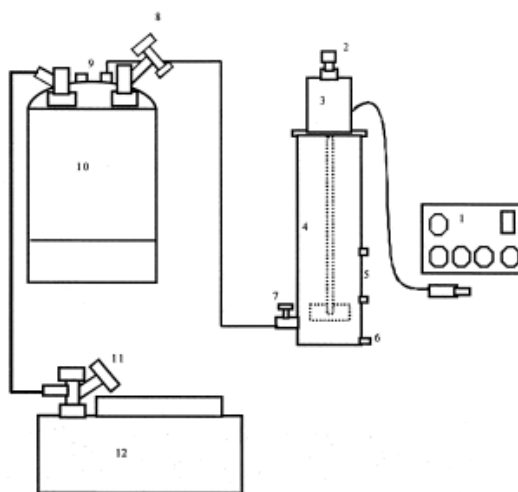
2) กระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันด้วยกระบวนการ IAF โดยจากการทดลองจาร์ทดสอบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดคือ 99 เปอร์เซ็นต์ พีเอชและความเข้มข้นสารส้มที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 8 ถึง 10 และ 800 ถึง 1400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3) กระบวนการ MIAF สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ดีกว่ากระบวนการ IAF เนื่องจากในกระบวนการ MIAF อนุภาคของหยดน้ำมันจะเกิดการรวมตัวกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราเร็วในการบำบัดด้วยกระบวนการทำให้ลอย

4) ฟองอากาศที่เกิดจากอุปกรณ์สร้างและกระจายอากาศ ( Diffuser) นอกจากจะทำหน้าที่ในการดักจับอนุภาคน้ำมันแล้ว ยังสามารถช่วยในการกวนผสมของสารเคมีที่เติมเข้าไปอีกด้วย

5) ค่าสัดส่วน a/G เป็นตัวแปรที่สามารถใช้ในการเปรียบเทียบหรือบอกแนวโน้มของประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยได้

Al-Shamrani และคณะ (2002) ศึกษาการแยกน้ำมันออกจากเฟสน้ำด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF) โดยทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัด ได้แก่ ความดันอากาศ อัตราส่วนน้ำผ้นกลับ ค่าสัดส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณน้ำมันที่เหมาะสม และชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการรวมตะกอน ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการรวมตะกอน ได้แก่ สารส้ม (Alum) และพอลิเมอร์ประจุบวกชนิดต่างๆ 4 ชนิด ทำการทดลองในระดับ Bench scale และติดตั้งอุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 2-16 ผลการศึกษามีดังต่อไปนี้



- |                                    |                                     |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1- Power pack giving four outlets  | 7- Saturated water injection valve. |
| 2- Speed adjustment panel.         | 8- Pressure gauge.                  |
| 3- Stirring motor.                 | 9- Outlets valves.                  |
| 4- Flocculation and flotation jar. | 10- 9 litres saturator.             |
| 5- Two-side sampling ports.        | 11- Pressure regulator.             |
| 6- Drainage port.                  | 12- Oil-free air compressor.        |

ภาพที่ 2-16 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายของ Al-Shamrani และคณะ (2002)

- 1) ปริมาณอากาศที่ได้จากชุดทดสอบมีประสิทธิภาพประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับปริมาณอากาศที่ได้จากทางทฤษฎี (Henry's law)
- 2) ปริมาณสารส้ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตรและอัตราน้ำเวียนกลับ 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นสภาวะที่การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด
- 3) ค่าสัดส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณน้ำมันหรือ A/S อย่างน้อยที่ทำให้ระบบสามารถบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพคือ 0.0075

4) การใช้พอลิเมอร์ประจุบวกเพื่อรวมตะกอนไม่ได้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

5) การใช้เกลือของโลหะ (Alum) เพื่อรวมตะกอนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

Zouboulis และ Avranas (2000) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันปนเปื้อนในเฟสน้ำ โดยจะทำการทดสอบกระบวนการทำให้ลอยในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ n-octane 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ ionic strength 0.02 โมลต่อลิตร (ปรับค่าด้วย NaCl) ความดันอากาศ 4 บาร์ ปัจจัยที่ทำการศึกษได้แก่

1) การใช้สารลดแรงตึงผิวไร้ประจุ (Tween 80) เพื่อปรับสภาพน้ำมันสำหรับการทดลอง

2) ค่าพีเอชของน้ำเสียที่เหมาะสมต่อการบำบัด

3) ชนิดและปริมาณสารเคมีที่เติมเพื่อช่วยในการรวมตะกอน ได้แก่ Polyacrylamide (พอลิเมอร์ประจุลบ) K-1384 (พอลิเมอร์ประจุบวก) และเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ )

4) ปริมาณ Sodium oleate ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัส และเกาะติดระหว่างน้ำมันและฟองอากาศ

5) ค่าอัตราส่วนน้ำเวียนกลับ (Recycle ratio)

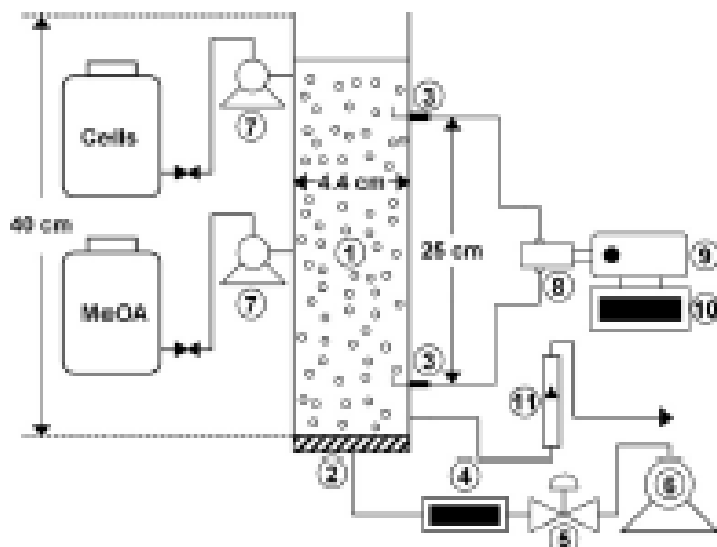
ผลการทดลองพบว่า การเติมพอลิเมอร์ประจุบวก ( K-1384) และประจุลบ (Polyacrylamide) เพื่อช่วยรวมตะกอนไม่ได้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด แต่ในทางกลับกัน การเติมสารเฟอร์ริกคลอไรด์เพื่อช่วยรวมตะกอนเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้สูงขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเติมเกลือของโลหะเพื่อช่วยรวมตะกอนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และจากการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้นเฟอร์ริกคลอไรด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร Sodium oleate 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชประมาณ 6 และค่าอัตราส่วนน้ำผันกลับ 30 เปอร์เซ็นต์ เป็นสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด ถึง 95 เปอร์เซ็นต์

Chen และคณะ (1998) ศึกษาการกำจัดสาหร่ายที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยกระบวนการทำให้ลอยให้ด้วยอากาศละลาย โดยทำการศึกษาด้วยสาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus quadricauda* เพื่อศึกษาช่วงของค่าพีเอช ชนิดของตัวดักจับ (Collector) และผลของการเติมไคโตซาน (Chitosan) ที่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ซึ่งผลการศึกษาที่ได้มีดังนี้

- 1) จากการศึกษานิตของตัวดักจับซึ่งได้แก่ ตัวดักจับประจุบวก (Cationic collector) ตัวดักจับประจุลบ (Anionic collector) และ ตัวดักจับไร้ประจุ (Nonionic collector) พบว่าการใช้ตัวดักจับประจุลบและไร้ประจุ จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย แต่ในทางกลับกัน การใช้ตัวดักจับประจุบวก สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์
- 2) การเติมไคโตซานในระบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดได้
- 3) ช่วงของพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายคือ 5.0 ถึง 8.0

Maruyama และคณะ (2009) ศึกษาการบำบัดสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศร่วมกับ MeOA (Methylate ovalbumin) โดยทำการศึกษากการทำให้ลอยด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศหรือ IAF (Induced air flotation) ร่วมกับการเติมพอลิเมอร์ MeOA เพื่อใช้บำบัดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue-green algae) ซึ่งมีการติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดสอบดังภาพที่ 2-17 และผลการศึกษาที่ได้มีดังนี้

จากการทดลอง Maruyama และคณะ พบว่าพอลิเมอร์ MeOA สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด โดยที่สัดส่วนอัตราไหลของมวล MeOA ต่ออัตราการไหลของเซลล์สาหร่ายมากกว่า 0.3 จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ยังทำการสอบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองกับโมเดลทางคณิตศาสตร์ พบว่าผลที่ได้มีความแตกต่างกัน 19 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2-17 ชุดอุปกรณ์การทดสอบกระบวนการทำให้ลอยของ Maruyama และคณะ (2009)

Bourgeois และคณะ (2004) ศึกษาผลกระทบของค่าสัดส่วนปริมาณโลหะประจุ + 1 (Monovalent cation) ต่อปริมาณโลหะประจุ +2 (Divalent cation) หรือ ค่าสัดส่วน M:D ของน้ำเสียที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอน ( Sedimentaention) และกระบวนการ ทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF) โดยทำการศึกษาระดับ Bench scale และทำการศึกษากับน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการล้างย้อมของโรงประปาเลคเมเจอร์ (Lake major) และโรงประปาวิกตอเรียปาร์ค (Victoria park) ซึ่งผลการศึกษาที่ได้มีดังนี้

1) กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF) เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของอนุภาคแขวนลอยความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ และกระบวนการตกตะกอนเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของอนุภาคแขวนลอยความหนาแน่นมากกว่าน้ำ

2) น้ำเสียที่มีปริมาณโลหะประจุ +1 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) ละลายอยู่มาก สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดอนุภาคแขวนลอย โดยการเพิ่มปริมาณโลหะประจุ +2 ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) ซึ่งค่าสัดส่วน M:D ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตกตะกอนและกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย คือ 0.5:1 และ 1:1 ตามลำดับ

จากงานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าการใช้กระบวนการ DAF เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันติดปนเปื้อนในเฟสน้ำและน้ำเสียที่มีสาหร่ายปนเปื้อนในเฟสน้ำมีความจำเป็นต้องใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้ดียิ่งขึ้น และยังพบว่าการออกแบบระบบ DAF ให้เหมาะสมกับกระบวนการบำบัดมีตัวแปรการออกแบบที่สำคัญ 2 ชนิดคือ ตัวแปรสำหรับออกแบบถังปฏิกริยาหรือตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล เช่น ค่า  $a/G$  (Painmanakul และ คณะ, 2010) เป็นต้น และตัวแปรสำหรับออกแบบปริมาณอากาศที่เหมาะสมต่อการลอยตะกอนหรือค่าสัดส่วน A/S (Metcalf และ Eddy, 2004) อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าตัวแปรการออกแบบดังกล่าวยังขาดความชัดเจนในการใช้งาน นอกจากนี้ การทำนายประสิทธิภาพการบำบัดหรือการอธิบายกลไกการบำบัดของกระบวนการ DAF ด้วยโมเดลต่างๆ ยังมีความจำเป็นในการศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันติดและน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการ DAF และศึกษาตัวแปรการออกแบบ ได้แก่ ตัวแปรการออกแบบถังปฏิกริยาลอยตะกอน และตัวแปรการออกแบบปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับการบำบัด รวมไปถึงศึกษาความเป็นไปได้ในการทำนายหรืออธิบายกลไกการบำบัดของกระบวนการ DAF ด้วยโมเดลชนิดต่างๆ



### บทที่ 3

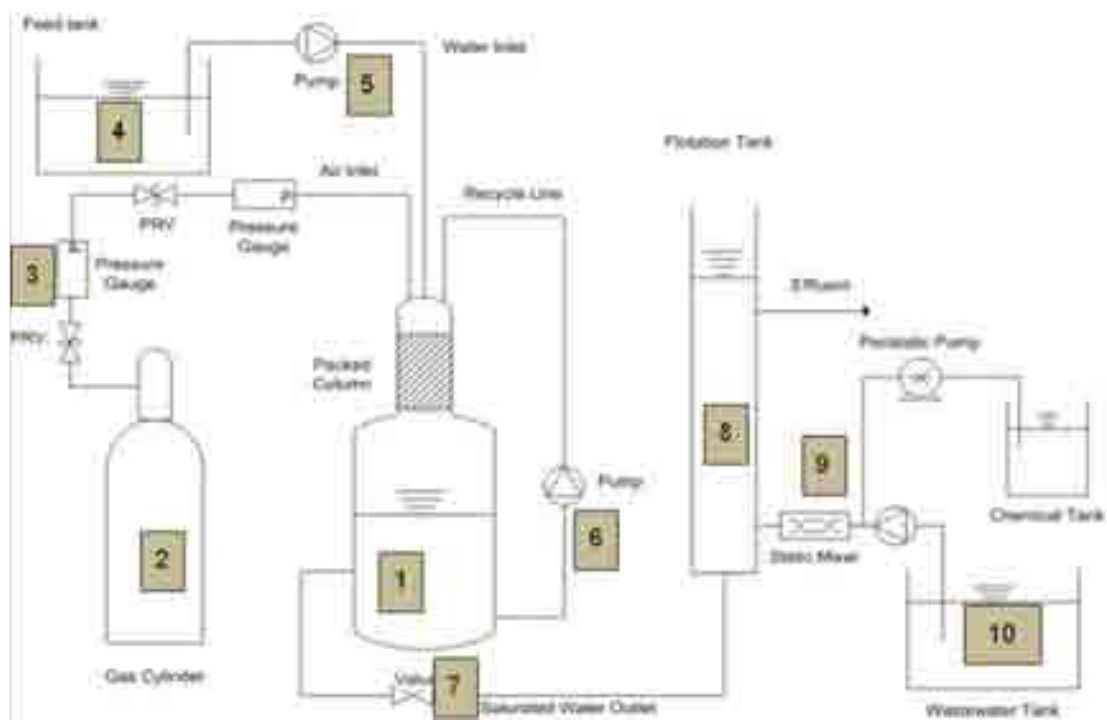
#### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1) ชุดอุปกรณ์การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

ชุดอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 3-1 ซึ่งประกอบด้วย



ภาพที่ 3-1 ชุดอุปกรณ์การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

1. ถังอัดความดัน (Pressure vessel) ขนาด 500 ลิตร
2. ถังให้ความดันอากาศ (Gas cylinder)
3. มาตรวัดความดัน (Pressure gauge)
4. ถังป้อนน้ำ (Feed tank) ขนาด 500 ลิตร

5. เครื่องสูบน้ำ (Pump) แรงดัน 80 เมตร อัตราการไหล 50 ลิตรต่อนาที
  6. เครื่องสูบน้ำ (Pump) แรงดัน 10 เมตร อัตราการไหล 15 ลิตรต่อนาที
  7. ชุดวาล์วสำหรับการป้อนและปรับอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ ประกอบด้วย วาล์วเปิด-ปิด และวาล์วปรับละเอียด (Needle valve and Metaling valve)
  8. คอลัมน์ทดลองการลอยตะกอน (Flotation column)
  9. ชุดข้อต่อและปั๊มสำหรับป้อนน้ำเสีย สารเคมี และกวนผสม (Static mixer)
- 2) อุปกรณ์การเตรียมน้ำเสียที่มีน้ำมันตัดปนเปื้อนในเฟสน้ำ
1. เครื่องขังดีเจิตอลแบบละเอียด
  2. ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
  3. ปิเปตต์ขนาด 1 5 10 และ 25 มิลลิลิตร
  4. แท่งแก้วคนสารเคมี
- 3) อุปกรณ์การเลี้ยงสาหร่าย
1. ขวดใสขนาด 5 ลิตร จำนวน 4 ใบ
  2. หลอดฟลูออเรสเซนต์
  3. หัวเป่าอากาศ
- 4) อุปกรณ์วัดปริมาณคลอโรฟิลล์เอในสาหร่าย
1. ปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
  2. แผ่นกรอง GF/F
  3. เครื่องดูด (Suction)
  4. เครื่องบดเนื้อเยื่อ (Tissue grinder)

5. เครื่องเหวี่ยงสาร (Clinical centrifuge)
6. หลอดฝาเกลียวสำหรับเหวี่ยงสาร (Screw cap tube) ความจุ 15 มิลลิลิตร
7. คิวเวทท์ (Cuvette)
8. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer)
9. อุปกรณ์วัดจำนวนเซลล์สำหรับ่าย
10. กล้องจุลทรรศน์
11. Counting chamber ชนิด Neubauer improved bright-line
12. แผ่นกระจกปิดสไลด์

5) เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100A

6) ชุดอุปกรณ์ทดสอบจาร์เทสต์

### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1) น้ำมันตัด (Cutting oil) จากบริษัท BP-Castrol ซึ่งคุณสมบัติดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของน้ำมันตัดที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของน้ำมัน	น้ำมันตัด
ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	~1
ความหนืด (cps)	9.16
แรงตึงผิว (mN/m)	47.02

2) สาหร่ายคลอเรลล่า (*Chlorella sp.*) จากสถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งทำการเพาะเลี้ยงด้วยอาหารเหลวสูตร NHIII ของทางสถาบันฯ มีส่วนประกอบดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 สูตรอาหารเหลวสำหรับเลี้ยงสาหร่าย (NHIII)

สารเคมี	ปริมาณ (มิลลิกรัมต่อ 1 ลิตรน้ำ)
$\text{KNO}_3$	101.1
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	120
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	62
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	7.4
$\text{NaCl}$	116.8
$\text{KBr}$ $\text{KI}$	595
$\text{LiCl}$	415
$\text{H}_3\text{BO}_3$	21.2/1000 mL.
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	77
$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	50
$\text{EDTA}$	810
	750/100mL.

## 3) สารเคมีสำหรับการโคแอกกูเลชัน

- สารส้ม (Alum หรือ  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ )

### 3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ จะทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ น้ำเสียที่มีน้ำมันติดปนเปื้อนในน้ำเสีย และน้ำเสียที่มีสาหร่ายปนเปื้อนในน้ำเสีย สำหรับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันติดจะมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

การทดลองที่ 1 การออกแบบ ติดตั้ง และทดสอบชุดอุปกรณ์การลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือ DAF รวมไปถึงทำการทดสอบขนาดของฟองอากาศที่ได้จากระบบและความดันอากาศที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ DAF

การทดลองที่ 2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันติดและผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันติดด้วยกระบวนการต่างๆ ได้แก่ กระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Decantation) กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยจาร์เทส (Jar-test) กระบวนการ DAF และ กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยอุปกรณ์ลอยตะกอนที่ทำการออกแบบ (Continuous Coagulation)

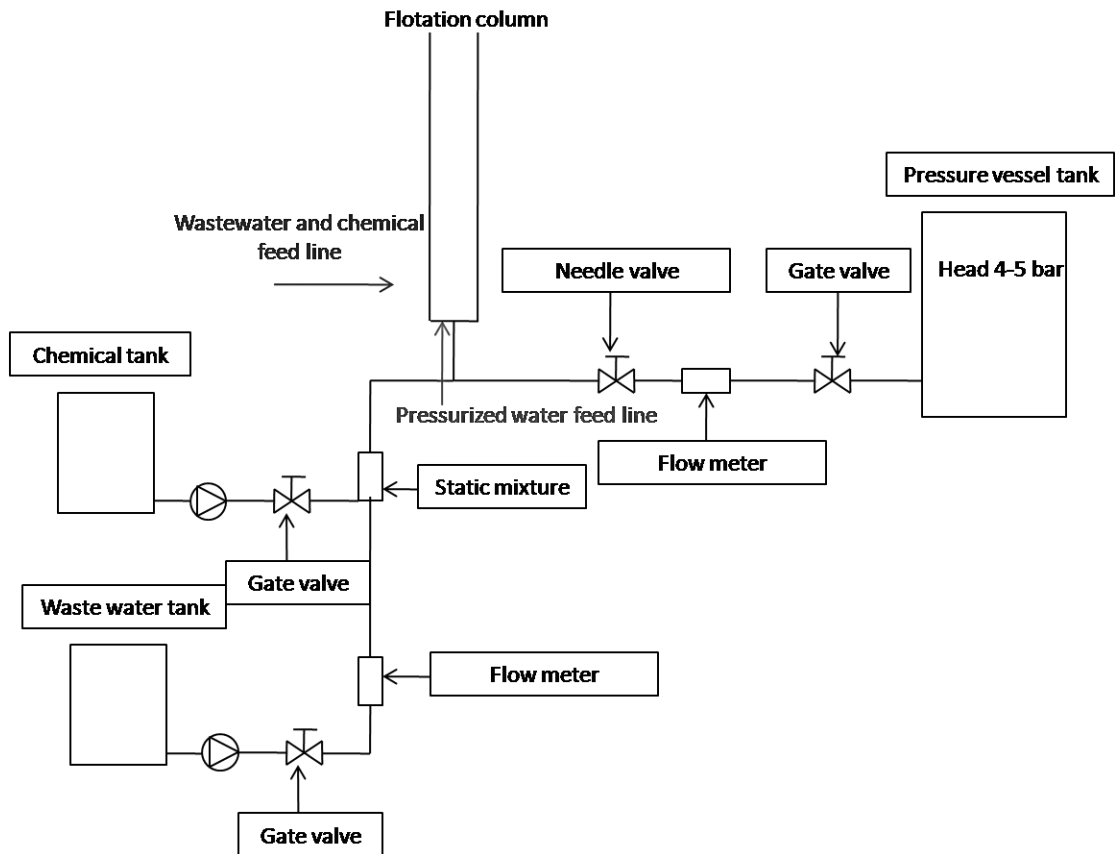
การทดลองที่ 3 การศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการผสม (Hybrid) ระหว่างกระบวนการ DAF และกระบวนการโคแอกกูเลชันหรือเรียกว่า “กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายร่วมกับ กระบวนการโคแอกกูเลชันหรือ MDAF (Modified Dissolved Air Flotation) ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันติด รวมไปถึงศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกลไกการบำบัดด้วยกระบวนการ MDAF ได้แก่ ค่าปัจจัยทางพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamic parameters) และค่าปริมาณอากาศที่สัมพันธ์กับ ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำเสียหรือค่าสัดส่วน A/S

การทดลองที่ 4 การศึกษาการประยุกต์ใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ (Model) เพื่ออธิบายและทำนายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันติดด้วยกระบวนการ MDAF

การทดลองที่ 5 การศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการ DAF

### 3.2.1 การติดตั้งและทดสอบชุดอุปกรณ์การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF)

การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดแสดงผังแผนผังการไหลของน้ำ (Flow diagram) ในภาพที่ 3-2 ซึ่งมีรายละเอียดการออกแบบดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3-2 แสดง Flow diagram ของชุดอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัวด้วยอากาศละลาย

#### 1) การออกแบบถังอัดอากาศ (Pressure vessel tank)

ทำการออกแบบถังอัดอากาศ (Pressure vessel) ด้วยกฎของเฮนรี่ (Henry's law) (แสดงดังสมการที่ 3-1) โดยสมมติให้อุณหภูมิน้ำที่ทำการทดลองคือ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Components	Fraction (%)	Henry's constant(atm/(mol/L))	MW (g/mol)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
N <sub>2</sub>	79	1600	28	1.205
O <sub>2</sub>	21	756.7	32	

$$C_{air} = K_H \cdot \bar{P} \cdot MW \quad (3-1)$$

เมื่อสมมติให้บรรยากาศประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจน 80 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซออกซิเจน 20 เปอร์เซ็นต์ แทนที่ในสมการจะได้ว่า

$$C_{air} = P [K_{H,N_2} (0.8)(28) + K_{H,O_2} (0.2)(32)] \quad (3-2)$$

เมื่อ  $K_H$  คือ ค่าคงที่ของเฮนรี (โมลต่อลิตรต่อบาร์)

$\bar{P}$  คือ สัดส่วนความดัน (Partial Pressure)

MW คือ มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)

P คือ ความดันเกจที่ใช้ควบคุมระบบ DAF (บาร์)

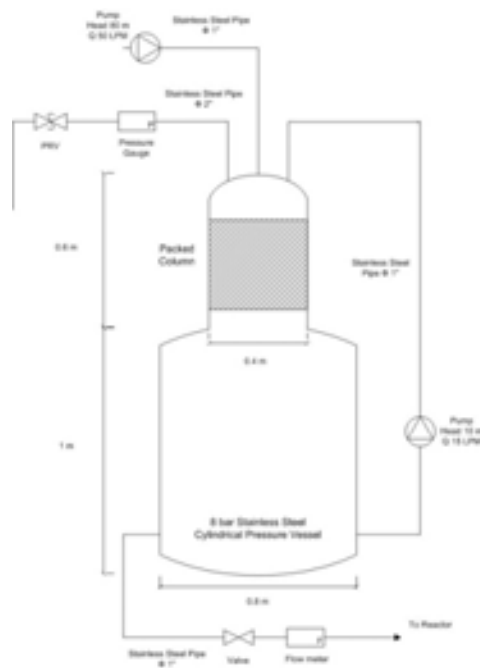
จากสมการที่ 3-1 ปริมาณอากาศที่สามารถละลายในน้ำได้ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ความดันอากาศต่างๆ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3-2 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ปริมาณอากาศละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ณ ความดันอากาศต่างๆ

Pressure <sub>absolute</sub> (atm ≈ bar)	1	2	3	4	5	6	7	8	
Dissolved air (g <sub>air</sub> /L <sub>water</sub> )	0.023	0.045	0.068	0.091	0.114	0.136	0.159	0.182	
Air release	(g <sub>air</sub> /L <sub>water</sub> )	0.000	0.023	0.045	0.068	0.091	0.114	0.136	0.159
	(L <sub>air</sub> /L <sub>water</sub> )	0.000	0.019	0.038	0.057	0.075	0.094	0.113	0.132

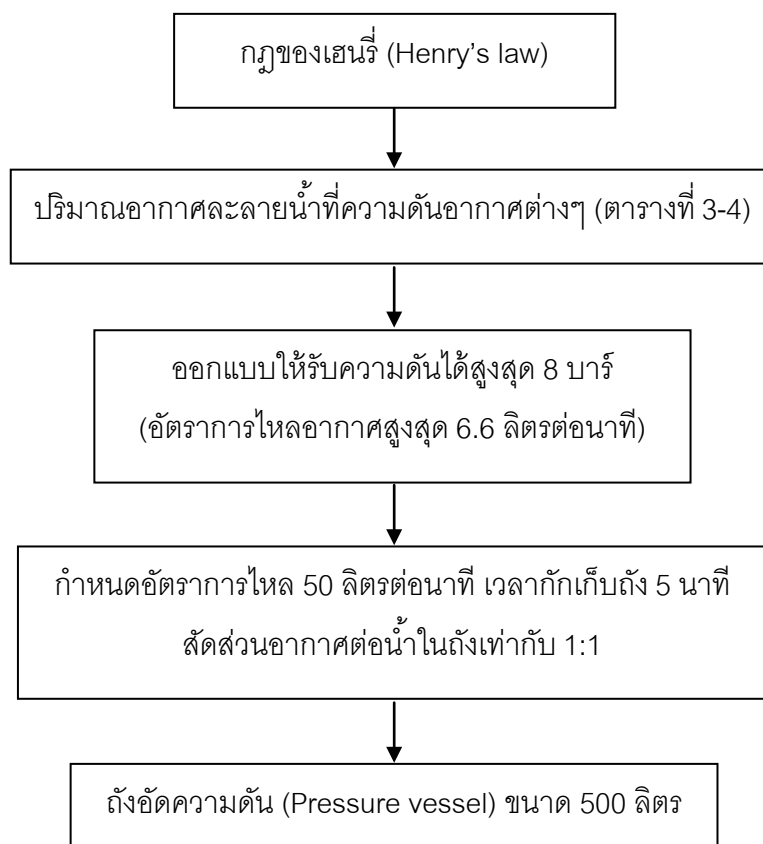
จากตารางที่ 3-4 เมื่อกำหนดอัตราไหลของน้ำสูงสุดที่ใช้ในการทดลองและเวลากักเก็บคือ 50 ลิตรต่อนาที (อัตราการไหลอากาศ 6.6 ลิตรต่อนาที ที่ความดัน 8 บาร์) และ 5 นาที ตามลำดับ

จะได้ว่า ปริมาณน้ำในถังที่ต้องการ คือ 250 ลิตร และเมื่อกำหนดให้สัดส่วนปริมาณอากาศในถังเท่ากับปริมาณน้ำในถัง (1:1) จะได้ ขนาดถัง คือ 500 ลิตร ซึ่งจากขนาดถังดังกล่าว (500 ลิตร) ทำการออกแบบโดยใช้ถังกลมทรงกระบอกความสูงถึง 1 เมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เมตร (แสดงดังภาพที่ 3-2) สรุปขั้นตอนการออกแบบถึงอัตราความดันและตัวแปรในการออกแบบแสดงดังภาพที่ 3-3 และตารางที่ 3-5 ตามลำดับ



ภาพที่ 3-3 ถึงอัตราความดันขนาด 500 ลิตร ที่ได้จากการออกแบบ





ภาพที่ 3-4 ขั้นตอนการออกแบบถังอัดความดัน (Pressure vessel)

ตารางที่ 3-5 สรุปตัวแปรการออกแบบถังอัดความดัน (Pressure vessel)

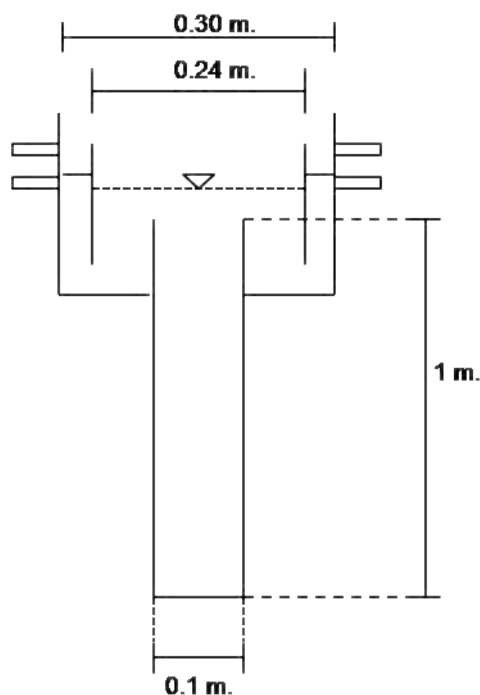
ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- ความดันอากาศ	- 2 3 4 5 6 7 และ 8 บาร์
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ปริมาณอากาศละลายน้ำที่ความดันอากาศต่างๆ	- คำนวณด้วยกฎของเฮนรี่ (Henry's law)
- ปริมาตรถังอัดอากาศ	- คำนวณที่สภาวะความดันอากาศสูงสุด 8 บาร์
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
- ความดันอากาศสูงสุดที่รับได้	- 8 บาร์
- อัตราการไหลสูงสุดที่ความดันสูงสุด	- 50 ลิตรต่อนาที
- เวลาเก็บที่อัตราการไหลสูงสุด	- 5 นาที
- ค่าสัดส่วนปริมาณอากาศต่อน้ำในถึง	- 1:1

## 2) การออกแบบคอลัมน์ลอยตะกอน (Flotation column)

คอลัมน์ที่ใช้ในการทดสอบการลอยตะกอนในขั้นนี้ จะทำการออกแบบให้มีลักษณะการไหลแบบไหลขึ้น (Up flow) โดยจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนสัมผัส และส่วนแยก ซึ่งในเบื้องต้นจะใช้เกณฑ์การออกแบบของ Edzwald (2010) ดังตารางที่ 3-6 และคอลัมน์ที่ได้จากการออกแบบและใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 3-4

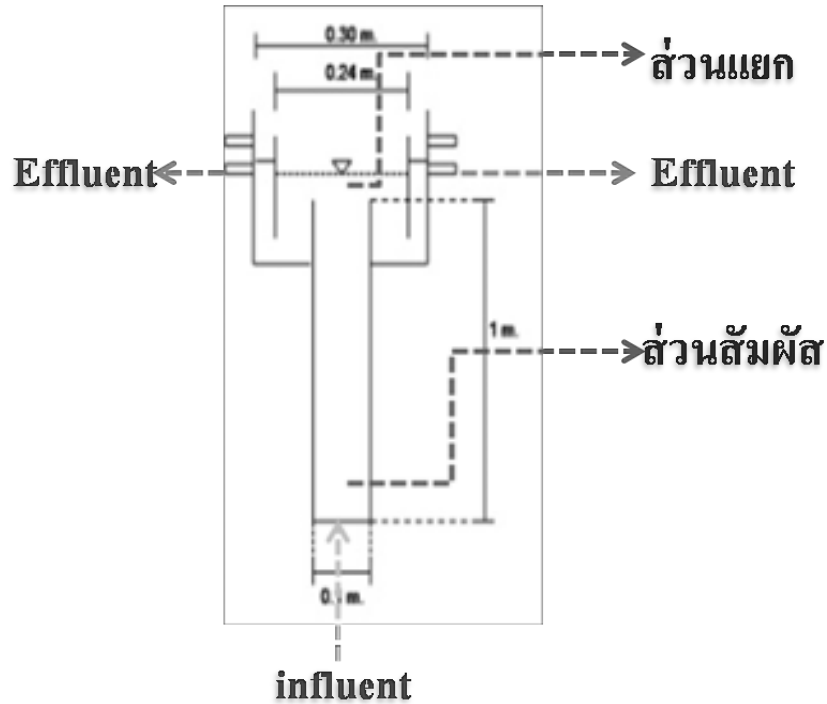
ตารางที่ 3-6 สรุปตัวแปรการออกแบบคอลัมน์ลอยตะกอน

ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ	ช่วงที่ทำการออกแบบ
Hydraulic loading rate, HLR	5-15 เมตรต่อชั่วโมง
ระยะเวลาสัมผัส	1-2.5 นาที



ภาพที่ 3-5 ลักษณะคอลัมน์ที่ใช้ในการลอยตะกอน

นอกจากนี้ สามารถสรุปลักษณะการเดินระบบผ่านคอลัมน์เพื่อการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยคอลัมน์ที่ได้จากการออกแบบ (แสดงดังภาพที่ 3-5) ซึ่งประกอบไปด้วย กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Influent =  $Q_{ww} + Q_{chemical}$ ) กระบวนการ DAF (Influent =  $Q_{ww} + Q_{PW}$ ) และ กระบวนการ MDAF (Influent =  $Q_{ww} + Q_{chemical} + Q_{PW}$ )



ภาพที่ 3-6 ลักษณะการเดินระบบด้วยคอลัมน์ที่ได้จากการออกแบบ

### 3) การทดสอบอุปกรณ์

ทำการศึกษานาฬิกาของฟองอากาศและความดันอากาศที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป โดยทำการเดินระบบด้วยชุดอุปกรณ์ที่ได้จากการออกแบบข้างขึ้น (รูป 3-1) ด้วยน้ำประปา (Tap water) ในคอลัมน์ ที่ความดันอากาศ 2 3 4 5 และ 6 บาร์ แล้วทดลองจับเวลาที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่านตามระดับความสูงคอลัมน์ที่ระดับความสูง 8.5 และ 58.5 เซนติเมตร (จากก้นคอลัมน์) จากนั้นนำค่าระยะทางและเวลาที่ฟองอากาศใช้ในการเคลื่อนที่ไปคำนวณหาความเร็วลอยตัวและขนาดของฟองอากาศได้ตามสมการที่ 3-3 และ 3-4 (สมการของสโตก) ตามลำดับ

$$U_B = \frac{\Delta H}{t} \quad (3-3)$$

$$D_B = \sqrt{\frac{18\mu U_B}{\Delta\rho g}} \quad (3-4)$$

เมื่อ  $U_B$  คือ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (เมตรต่อวินาที)

$\Delta H$  คือ ระยะทางที่ฟองอากาศเคลื่อนผ่าน (เมตร)

$t$  คือ ระยะเวลาที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่านระยะทาง  $\Delta H$  (วินาที)

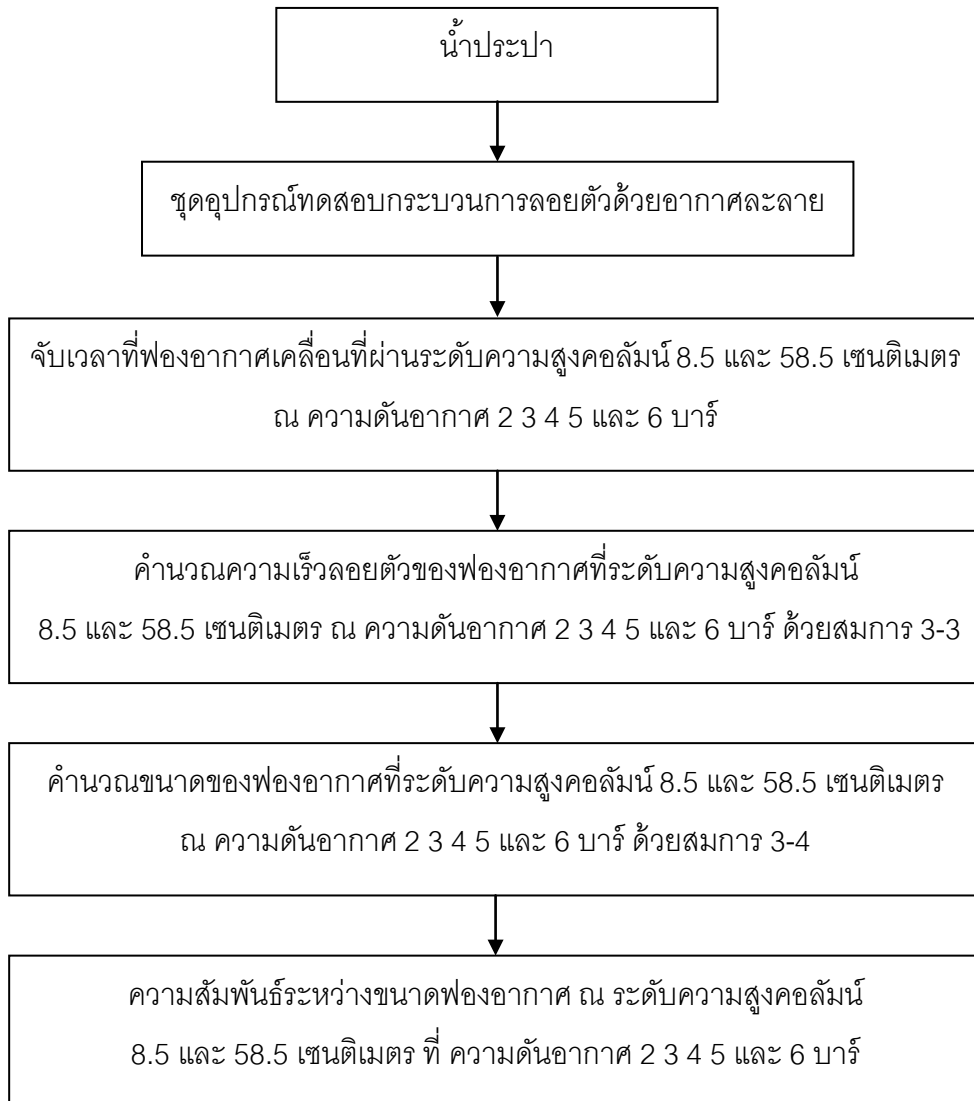
$D_B$  คือ ขนาดของฟองอากาศที่คำนวณได้ (เมตร)

$\Delta\rho$  คือ ผลต่างความหนาแน่นระหว่างน้ำและฟองอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$\mu$  คือค่าความหนืดทางพลศาสตร์ของน้ำ (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)

$g$  คือค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>)

ขั้นตอนและตัวแปรการศึกษาของการทดลองขั้นนี้สามารถสรุปเป็นแผนผังดังภาพที่ 3-6 และตารางที่ 3-7 ตามลำดับ



ภาพที่ 3-7 แผนผังการศึกษาขนาดของฟองอากาศที่ได้จากชุดทดสอบ

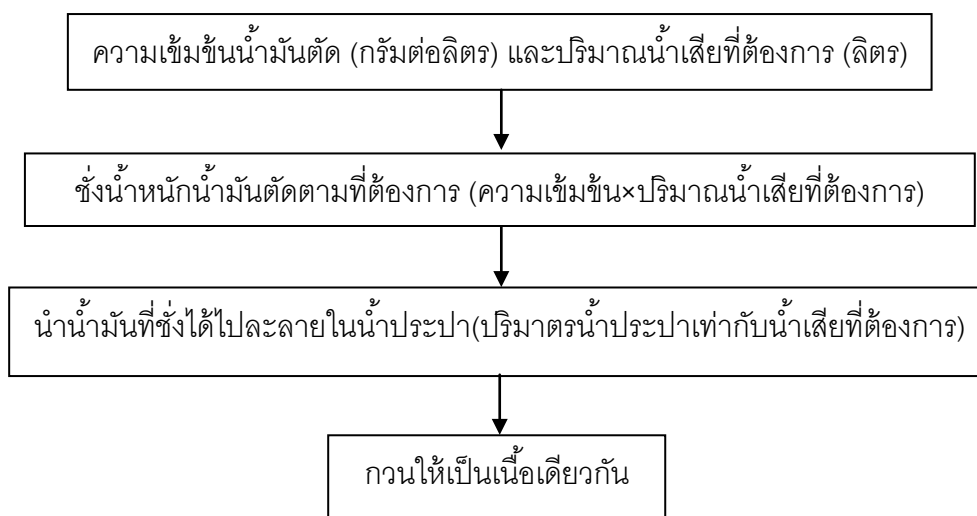
ตารางที่ 3-7 สรุปตัวแปรการศึกษาขนาดของฟองอากาศที่ได้จากชุดทดสอบ

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- ความดันอากาศ - ระดับความสูงคอลัมน์ที่ทำการศึกษา	- 2 3 4 5 และ 6 บาร์ - 8.5 และ 58.5 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- อุณหภูมิของเหลวที่ใช้ทำการทดลอง - เวลาที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ - ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ - ขนาดฟองของอากาศ - ความดันอากาศที่เหมาะสม	- ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ - ใช้นาฬิกาจับเวลา - คำนวณด้วยสมการ 3-3 - คำนวณด้วยสมการ 3-4 - ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ ณ ความดันอากาศ 2 3 4 5 และ 6 บาร์
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
- ชุดอุปกรณ์การทดสอบการทำให้ลอยด้วย อากาศละลาย - คอลัมน์ที่ใช้ศึกษาการทำให้ลอย - ของเหลวในถังอัดอากาศ	- การติดตั้งระบบแสดงดังรูป 4-1 - คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร สูง 2 เมตร - น้ำประปา

### 3.2.2 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

#### 1) การศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

ในขั้นนี้จะทำการสังเคราะห์น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสีย 1 กรัมต่อลิตร ด้วยน้ำประปา จากนั้นนำน้ำเสียที่ได้มาวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพ คือ ขนาดอนุภาค ค่าความหนืด ค่าศักย์ทางไฟฟ้า (Zeta potential) และค่าความขุ่น รวมไปถึงประสิทธิภาพจากการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Decantation) ซึ่งวิธีการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3-7 และมีตัวแปรการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-8



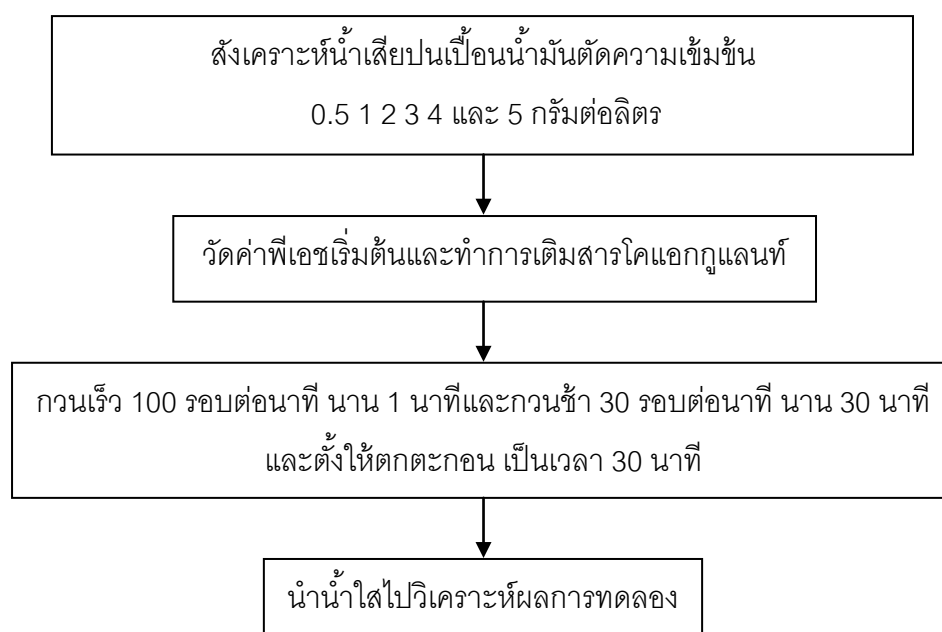
ภาพที่ 3-8 ขั้นตอนการสังเคราะห์น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

ตารางที่ 3-8 สรุปตัวแปรการศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด	- ความเข้มข้นน้ำมันตัด 1 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ขนาดอนุภาค - ค่าความหนืด - ค่าศักย์ทางไฟฟ้า - ค่าความขุ่น - ประสิทธิภาพการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Decantation)	- ถ่ายรูปจากกล้องจุลทรรศน์แล้ววัด - วัดด้วยเครื่องวัดค่าความหนืด - วัดด้วยเครื่องวัดศักย์ทางไฟฟ้า - วัดด้วยเครื่องวัดความขุ่น - ตั้งทิ้งให้ตกตะกอนแล้ววัดความขุ่นก่อนและหลัง
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
- อุณหภูมิน้ำเสีย	- อุณหภูมิห้อง

## 2) การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ในขั้นนี้ จะทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันหรือจาร์เทส (Jar-test) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน รวมไปถึงศึกษาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมต่อการบำบัดที่ความเข้มข้นน้ำมันตัดต่างๆ และพีเอชที่ปริมาณการเติมสารเคมีที่เหมาะสม ขั้นตอนการศึกษาแสดงดังภาพที่ 3-8 และสรุปตัวแปรการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 ขั้นตอนการศึกษากระบวนการจาร์เทส



ตารางที่ 3-9 สรุปตัวแปรการศึกษากระบวนการจําไรเทส

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด	- ความเข้มข้นน้ำมันตัด 0.5 1 2 3 4 และ 5 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ประสิทธิภาพการบำบัด - พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย - พีเอชสุดท้ายของน้ำเสีย - ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม	- คำนวณด้วยสมการที่ 3-5 - วัดด้วยเครื่องวัดพีเอช - วัดด้วยเครื่องวัดพีเอช - จากปริมาณสารเคมีที่ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
- ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ - อัตราการกวนเร็วและกวนช้า - ระยะเวลาในการกวนเร็ว กวนช้า และตกตะกอน	- ใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ - กวนเร็ว 100 รอบต่อนาที กวนช้า 30 รอบต่อนาที - กวนเร็ว 1 นาที กวนช้า 30 นาที และตกตะกอน 30 นาที

$$\% \text{ remove} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (3-5)$$

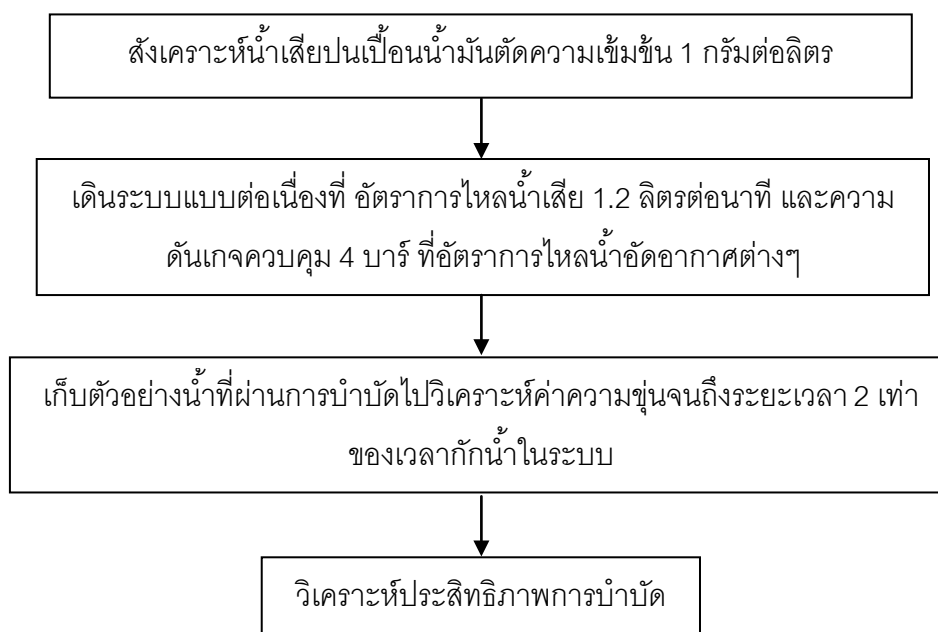
เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นน้ำเสียที่สภาวะเริ่มต้น

$C_t$  คือ ความเข้มข้นน้ำเสียเมื่อผ่านกระบวนการบำบัด

### 3.2.3 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลายและกระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน

#### 1) การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ DAF

ในขั้นนี้ จะทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลายหรือ DAF (Dissolved Air Flotation) โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) ที่ปริมาณความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสีย 1 กรัมต่อลิตร อัตราการไหลน้ำเสีย 1.2 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.83 1.30 1.73 2.12 2.50 และ 3.07 ลิตรต่อนาที และความดันเกจควบคุม 4 บาร์ (Edzwald, 2010) ขั้นตอนการศึกษาแสดงดังภาพที่ 3-9 และสรุปขั้นตอนการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-10



ภาพที่ 3-10 ขั้นตอนการศึกษากระบวนการ DAF

$$\% \text{remove} = \frac{[(C_{in} \times Q_{ww}) - C_{out} (Q_{ww} + Q_{PW})]}{C_{in} \cdot Q_{in}} \times 100 \quad (3-6)$$

เมื่อ  $C_{in}$  คือ ความเข้มข้นน้ำเสียขาเข้า

$C_{out}$  คือ ความเข้มข้นน้ำเสียขาออก

$Q_{ww}$  คือ อัตราการไหลน้ำเสีย

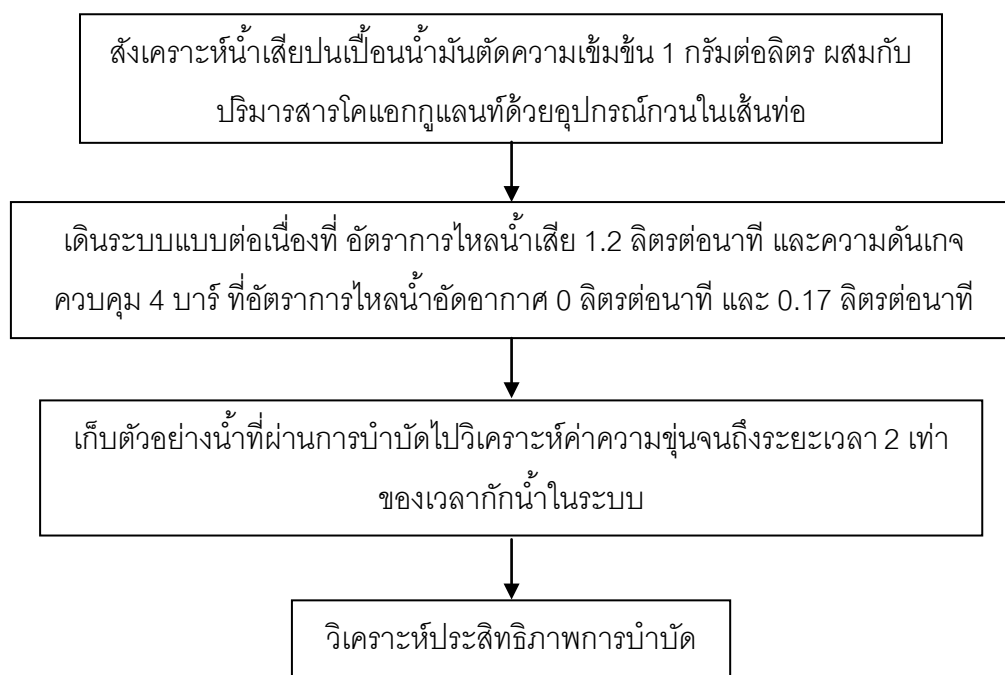
$Q_{PW}$  คือ อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ

ตารางที่ 3-10 สรุปตัวแปรการศึกษากระบวนการ DAF

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ	- 0.83 1.30 1.73 2.12 2.50 และ 3.07 ลิตรต่อ นาที
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ประสิทธิภาพการบำบัด - พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย - พีเอชสุดท้ายของน้ำเสีย	- จำนวนด้วยสมการที่ 3-6 - วัดด้วยเครื่องวัดพีเอช - วัดด้วยเครื่องวัดพีเอช
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
- น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด - อัตราการไหลน้ำเสีย - ความดันเกจควบคุม	- ความเข้มข้นน้ำมันตัด 1 กรัมต่อลิตร - 1.2 ลิตรต่อนาที - 4 บาร์

## 2) การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ MDAF

ในขั้นนี้ จะทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันหรือ MDAF (Modified Dissolved Air Flotation) โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) ด้วยปริมาณสารส้มที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2.2 ความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสีย 1 กรัมต่อลิตร ความดันเกจควบคุม 4 บาร์ อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.17 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลน้ำเสีย 0.6 1.2 1.8 และ 3.0 ลิตรต่อนาที รวมไปถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้กับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (เดินระบบแบบไม่ใช้อากาศ) ขั้นตอนการศึกษาแสดงดังภาพที่ 3-10 และสรุปตัวแปรการศึกษาดังตารางที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 ขั้นตอนการศึกษากระบวนการ MDAF

ตารางที่ 3-11 สรุปตัวแปรการศึกษากระบวนการ MDAF

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- อัตราการไหลน้ำเสีย - อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ	- 0.6 1.2 1.8 และ 3.0 ลิตรต่อนาที - 0 และ 0.17 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ประสิทธิภาพการบำบัด - พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย - พีเอชสุดท้ายของน้ำเสีย	- คำนวณด้วยสมการที่ 3-6 - วัดด้วยเครื่องวัดพีเอช - วัดด้วยเครื่องวัดพีเอช
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
- น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด - ความดันเกจควบคุม	- ความเข้มข้นน้ำมันตัด 1 กรัมต่อลิตร - 4 บาร์

### 3.2.4 การศึกษาผลกระทบของตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลและค่าสัดส่วน A/S

#### 1) การศึกษาผลกระทบของตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล

ในขั้นนี้ จะทำการศึกษผลกระทบของตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลที่ส่งผลกระทบต่อ การบำบัดด้วยกระบวนการ DAF หรือ MDAF ได้แก่ ค่าความปั่นป่วนของกระแสไหลหรือ  $G$  (Velocity gradient, วินาที<sup>-1</sup>) ค่าระยะเวลาสัมผัสหรือ  $T$  (Contact time, นาที) และค่าอัตราน้ำล้นผิวหรือ OFR (Overflow rate, เมตรต่อนาที) สำหรับการศึกษาค่าอัตราการไหลน้ำเสียคงที่คือ 1.2 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสีย 1.0 ลิตรต่อนาที ความดันเกจควบคุม 4 บาร์ และอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.83 1.30 1.73 2.12 2.50 และ 3.07 ลิตรต่อนาที โดยใช้ สมการที่ 3-7 3-8 3-9 3-10 และ 3-11 ในการคำนวณ

$$G_{Bubble} = 0.236 \frac{g\rho D}{\mu} \sqrt{\frac{V_A}{V}} \quad (3-7)$$

เมื่อ  $G_{Bubble}$  คือ ค่าความปั่นป่วนของเฟสอากาศหรือฟองอากาศที่ไหลผ่านถัง ปฏิกริยาแบบท่อ (วินาที<sup>-1</sup>)

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของเฟสอากาศหรือฟองอากาศ (กก.ต่อลบ.ม.)

$D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศ (เมตร)

$\mu$  คือ ค่าความหนืดของเฟสน้ำเสีย (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)

$V_A/V$  คือ สัดส่วนปริมาตรอากาศต่อปริมาตรทั้งหมด

$$G_{Liquid} = \sqrt{\frac{\rho g Q H}{V \mu}} \quad (3-8)$$

เมื่อ  $G_{Liquid}$  คือ ค่าความปั่นป่วนของเฟสของไหลที่ไหลผ่านถังปฏิกริยาแบบท่อ (วินาที<sup>-1</sup>)

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของเฟสของเหลวหรือน้ำเสีย (กก.ต่อลบ.ม.)

$Q$  คือ อัตราการไหลของเฟสของเหลว (ลบ.ม.ต่อวินาที)

3-9) H คือ ความดันสูญเสียซึ่งคำนวณได้จากสมการของดาร์ซี (เมตร) (สมการที่

V คือ ปริมาตรของเฟสเหลว

$\mu$  คือ ค่าความหนืดของเฟสน้ำเสีย (กก.ต่อเมตรต่อวินาที)

$$H = \frac{4fL}{d} \times \frac{v^2}{2g} \quad (3-9)$$

เมื่อ H คือ ความดันสูญเสียจากการไหลของเฟสของเหลว

f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ (ขึ้นอยู่กับชนิดท่อและค่าเรย์  
โนล (Reynold number))

L คือ ความยาวท่อ (เมตร)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เมตร)

V คือ ความเร็วของเฟสน้ำเสียที่ไหลผ่านท่อ (เมตรต่อวินาที)

$$T = \frac{V}{Q} \quad (3-10)$$

เมื่อ T คือ ระยะเวลาพัก (นาที)

V คือ ปริมาตรของถังปฏิกริยา (ลบ.ม.)

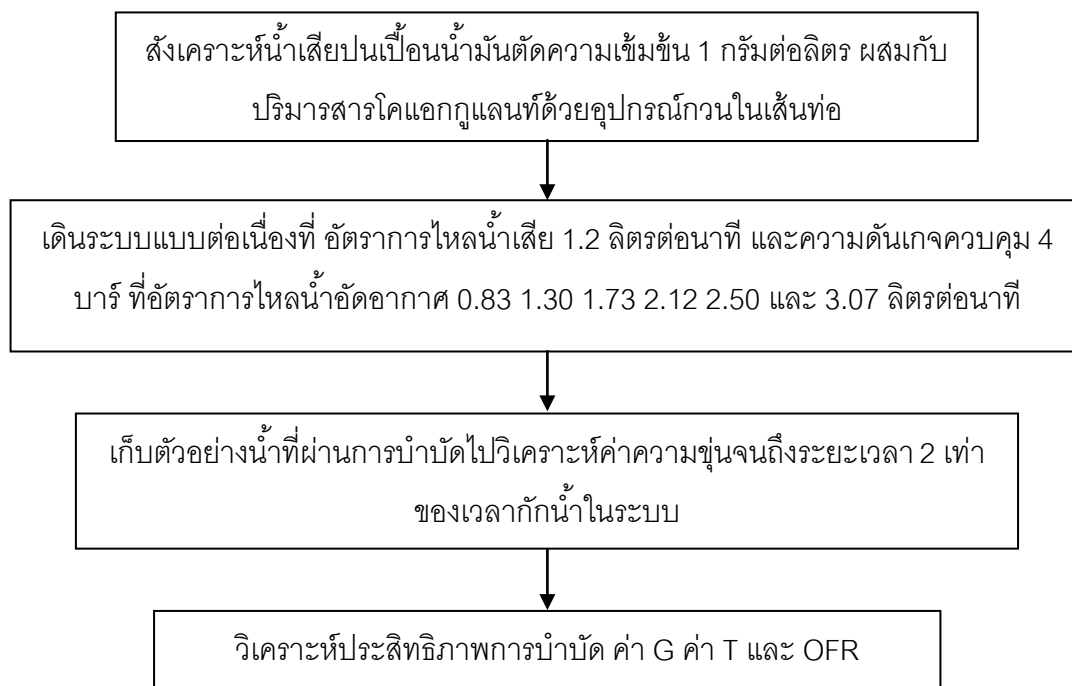
$$OFR = \frac{Q}{A} \quad (3-11)$$

เมื่อ OFR คือ อัตราน้ำล้นผิวหรือ Overflow rate (เมตรต่อนาที)

Q คือ อัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านถังปฏิกริยา (ลบ.ม.ต่อนาที)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกริยาที่ของไหลไหลผ่าน (ตร.ม.)

สรุปขั้นตอนการศึกษาและตัวแปรการศึกษาในขั้นนี้แสดงดังภาพที่ 3-11 และตารางที่ 3-12 ตามลำดับ



ภาพที่ 3-12 ขั้นตอนการศึกษาตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล

ตารางที่ 3-12 สรุปตัวแปรการศึกษาตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ	- 0.83 1.30 1.73 2.12 2.50 และ 3.07 ลิตรต่อ นาที
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ประสิทธิภาพการบำบัด	- คำนวณด้วยสมการที่ 3-6
- ค่า G	- คำนวณด้วยสมการ 3-7 3-8 และ 3-9
- ค่า T	- คำนวณด้วยสมการ 3-10
- ค่า OFR	- คำนวณด้วยสมการ 3-11
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
- น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด	- ความเข้มข้นน้ำมันตัด 1 กรัมต่อลิตร
- อัตราการไหลน้ำเสีย	- 1.2 ลิตรต่อนาที
- ความดันเกจควบคุม	- 4 บาร์

## 2) การศึกษาผลกระทบของค่าสัดส่วน A/S

ในขั้นนี้ จะทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณอากาศที่เหมาะสมต่อความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียหรือค่าสัดส่วน A/S ที่อัตราการไหลน้ำเสีย 1.2 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสีย 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 และ 3.0 กรัมต่อลิตร อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.7 ลิตรต่อนาที ความดันอากาศเกจควบคุม 4 บาร์ และใช้ปริมาณความเข้มข้นสารส้มที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมาสำหรับกระบวนการโคแอกูเลชัน โดยใช้สมการที่ 3-12 ในการคำนวณ

$$\frac{A}{S} = \frac{Q_{PW} \cdot C_a}{Q_{WW} \cdot C_0} \quad (3-12)$$

เมื่อ  $C_a$  คือ ความเข้มข้นอากาศที่ละลายในน้ำ ณ ความดันอากาศต่างๆ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3-2 (กรัมต่อลิตร)

$f$  คือ ค่าสัดส่วนการละลายของอากาศในน้ำเมื่อเทียบจากผลการคำนวณด้วยสมการของเฮนรี (สมมติให้มีค่าเท่ากับ 1)

$P$  คือ ความดันอากาศในถังอัดอากาศ (บาร์)

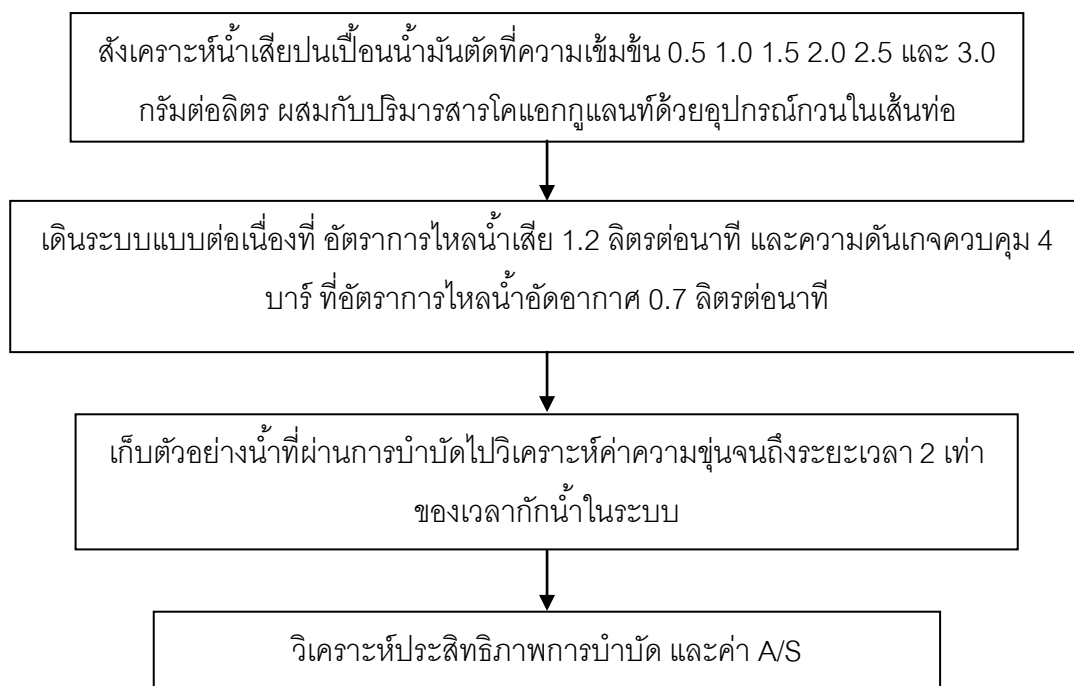
$C_0$  คือ ความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสีย (กรัมต่อลิตร)

สรุปขั้นตอนการศึกษาและตัวแปรการศึกษาในขั้นนี้แสดงดังภาพที่ 3-12 และตารางที่ 3-13 ตามลำดับ



ตารางที่ 3-13 สรุปตัวแปรการศึกษาค่าสัดส่วน A/S

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- ความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสีย	- 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 และ 3.0 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ประสิทธิภาพการบำบัด	- คำนวณด้วยสมการที่ 3-6
- ค่าสัดส่วน A/S	- คำนวณด้วยสมการที่ 3-12
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
- อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ	- 0.7 ลิตรต่อนาที
- อัตราการไหลน้ำเสีย	- 1.2 ลิตรต่อนาที
- ความดันเกจควบคุม	- 4 บาร์



ภาพที่ 3-13 ขั้นตอนการศึกษาค่าสัดส่วน A/S

### 3.2.5 การศึกษาการทำนายประสิทธิภาพด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### 1) โมเดลการกรอง (Filtration model)

การศึกษาโมเดลการกรองในขั้นนี้ จะทำการศึกษาการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยโมเดลการกรองที่ปริมาณสารกรองหรือที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศใดๆ (ปริมาณฟองอากาศใดๆ) ด้วยสมการที่ 3-13

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\frac{3}{2} \eta_T \alpha (1 - \varepsilon) \frac{H}{D_B} \quad (3-13)$$

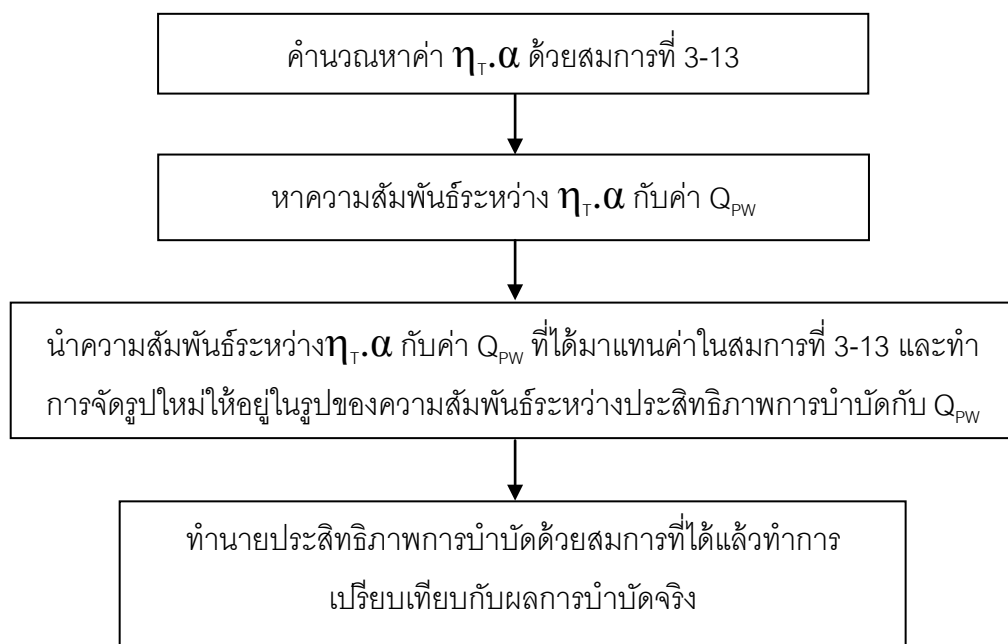
- เมื่อ  $C$  คือ ความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัด
- $C_0$  คือ ความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียหลังการผสมกับน้ำอัดอากาศ
- $\eta_T$  คือ ประสิทธิภาพการสัมผัสระหว่างมลสารกับสารกรอง
- $\alpha$  คือ ประสิทธิภาพการเกาะติดระหว่างมลสารกับสารกรอง
- $\varepsilon$  คือ ค่าความพรุนของตัวกลาง
- $H$  คือ ความหนาของชั้นกรอง
- $D_B$  คือ ขนาดสารกรอง

ซึ่งปริมาณสารกรองหรือ  $1 - \varepsilon$  ในงานวิจัยนี้สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 3-14

$$1 - \varepsilon = \frac{Q_g}{Q_{ww} + Q_{pw} + Q_g} \quad (3-14)$$

- เมื่อ  $Q_g$  คือ อัตราการไหลอากาศ
- $Q_{ww}$  คือ อัตราการไหลน้ำเสีย
- $Q_{pw}$  คือ อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ

การศึกษากำหนดค่าประสิทธิภาพการบำบัดด้วยโมเดลการกรอง จะทำนายโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการสัมผัสและเกาะติดหรือ  $\eta_T \cdot \alpha$  ที่ปริมาณสารกรองหรืออัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ ( $Q_{PW}$ ) จากนั้นนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาแทนค่าในสมการที่ 3-13 แล้วจึงใช้สมการที่ได้ในการทำนายประสิทธิภาพ สำหรับข้อมูลที่จะนำมาใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\eta_T \cdot \alpha$  กับค่า  $Q_{PW}$  จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล (หัวข้อ 3.2.4) ขั้นตอนการศึกษาในขั้นนี้แสดงดังภาพที่ 3-13 และตัวแปรการศึกษาในขั้นนี้แสดงดังตารางที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 ขั้นตอนการศึกษาโมเดลการกรอง

ตารางที่ 3-14 ตัวแปรการศึกษาโมเดลการกรอง

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- ประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทดลอง	- ผลการทดลองจากการทดลองที่ 3.2.4
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ความสัมพันธ์ระหว่าง $\eta_T \cdot \alpha$ กับค่า $Q_{PW}$	- คำนวณจากผลการทดลองที่ 3.2.4 ด้วยสมการที่ 3-13
- สมการสำหรับการทำนายประสิทธิภาพ	- ประยุกต์ความสัมพันธ์ระหว่าง $\eta_T \cdot \alpha$ กับค่า $Q_{PW}$ ร่วมกับสมการที่ 3-13
- ผลการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยโมเดลการกรอง	- ทำนายประสิทธิภาพที่ได้จากข้างต้นที่อัตราการใช้หรือน้ำอัดอากาศต่างๆ
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
- ชนิดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	- โมเดลการกรอง (สมการที่ 3-13)

## 2) โมเดลการดูดซับ (Adsorption model)

การศึกษาโมเดลการดูดซับในขั้นนี้ จะทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสียเริ่มต้นที่ปริมาณต่างๆกัน ซึ่งจะใช้ผลการทดลองจากหัวข้อ 3.2.5 มาประยุกต์ใช้ด้วยสมการที่ 3-15 เพื่อศึกษาถึงลักษณะการดูดติดระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคน้ำมัน นอกจากนี้ จากสมการดังกล่าวสามารถหาไอโซเทอมของการดูดติดผิวในกระบวนการ DAF ได้ ซึ่งจากความสัมพันธ์ของไอโซเทอมดังกล่าวจะสามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ได้ด้วยสมการที่ 3-16 (วิธีการเขียนกราฟ)

$$q_e = \frac{\Delta S}{A} = \frac{Q_{WW} \cdot C_0 - Q_{mix} \cdot C_t}{Q_{PW} \cdot C_{air}} \quad (3-15)$$

$$q_e = \frac{\Delta S}{A} = - \frac{Q_{mix}}{Q_{PW} \cdot C_{air}} (C_t - C_{mix,0}) \quad (3-16)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ความสามารถในการดูดซับของตัวกลางดูดซับ (Adsorption Capacity)

$\Delta S$  คือ ปริมาณน้ำมันตัดที่ถูกบำบัดหรือถูกแยกออกจากน้ำเสีย

$A$  คือ ปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับดูดติดผิวน้ำมันตดับปริมาณ  $\Delta S$

$Q_{mix}$  คือ ผลรวมระหว่างอัตราการไหลน้ำเสียและอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ

$Q_{pw}$  คือ อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ

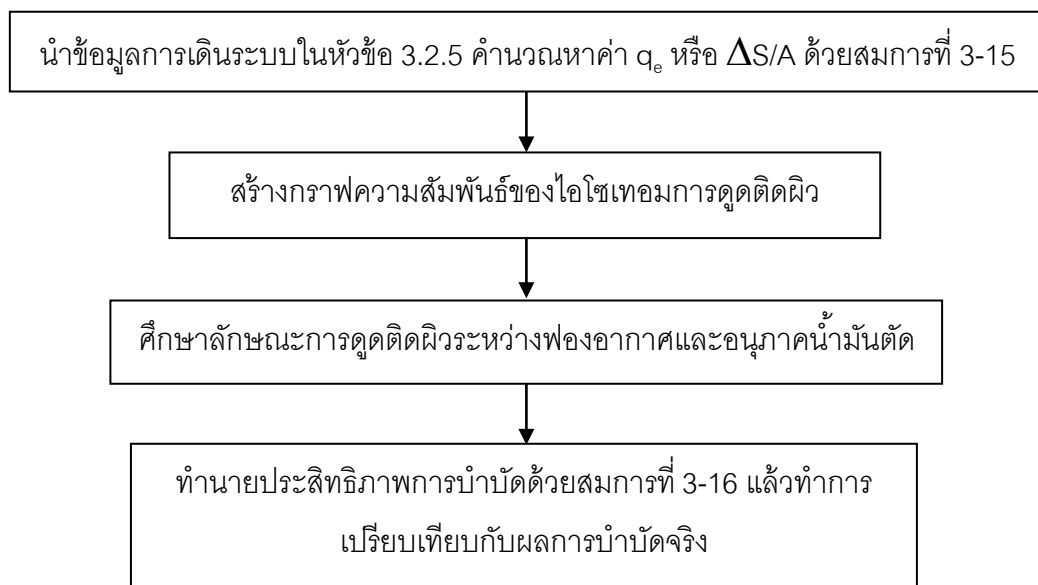
$C_{air}$  คือ ความเข้มข้นของอากาศที่ได้จากน้ำอัดอากาศซึ่งคำนวณได้จาก

สมการที่ 3-2

$C_0$  คือ ความเข้มข้นของน้ำมันตดับที่อยู่ในน้ำเสีย

$C_t$  คือ ความเข้มข้นของน้ำมันตดับในน้ำเสียหลังจากผ่านการบำบัด

สำหรับขั้นตอนและตัวแปรการศึกษาแสดงดังภาพที่ 3-14 และตารางที่ 3-15 ตามลำดับ



ภาพที่ 3-15 ขั้นตอนการศึกษาโมเดลการดูดซับ

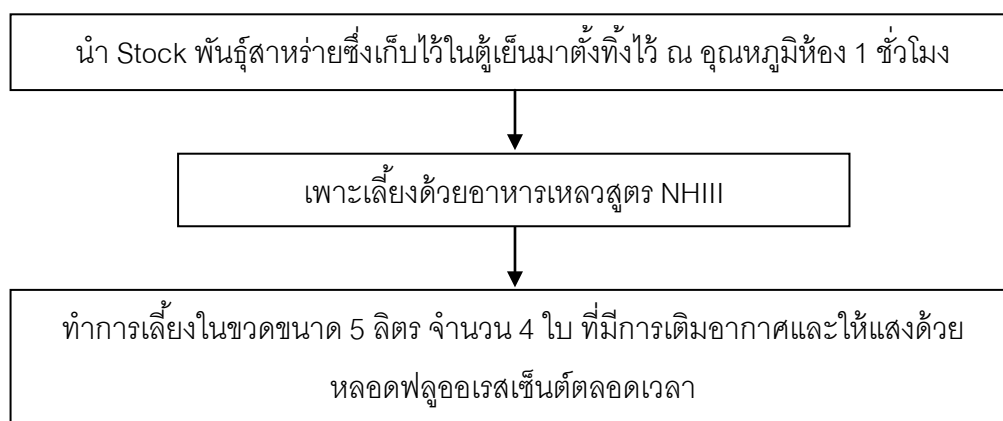
## ตารางที่ 3-15 สรุปตัวแปรการศึกษาโมเดลการดูดซับ

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- ประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทดลอง	- ผลการทดลองจากการทดลองที่ 3.2.5
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ไอโซเทอมการดูดติดผิวระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคน้ำมัน	- คำนวณจากผลการทดลองที่ 3.2.5 ด้วยสมการที่ 3-15
- ลักษณะการดูดติดผิวระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคน้ำมันตัด	- ศึกษาจากไอโซเทอมการดูดติดผิว
- ผลการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยโมเดลการดูดซับ	- ทำนายประสิทธิภาพที่ได้ด้วยสมการที่ 3-16
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
- ชนิดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	- โมเดลการดูดซับ
- คุณหมุน้ำเสีย	- คุณหมุน้ำหึ่ง
- ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล	- เท่ากับระยะเวลาพักของระบบ

### 3.2.6 การศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการ DAF

#### 1) ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

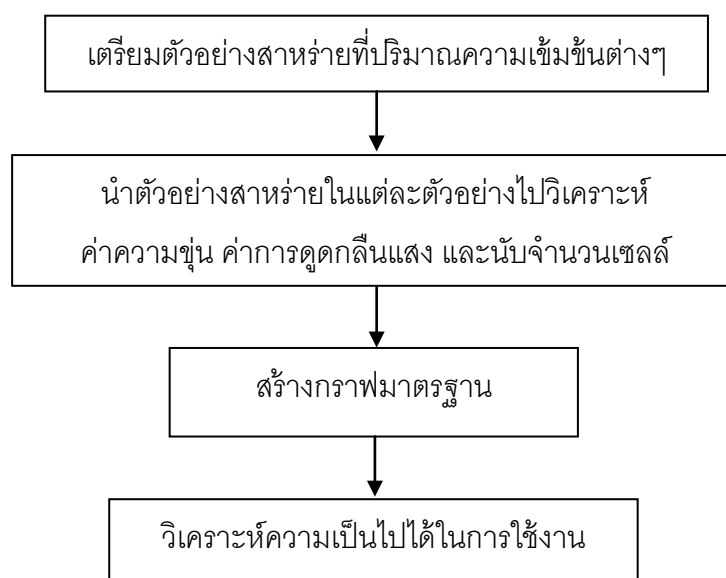
ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายพันธุ์คลอเรลล่า (*Chlorella sp.*) โดยนำ Stock พันธุ์สาหร่ายซึ่งเก็บไว้ในตู้เย็นมาตั้งทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงถ่ายเชื้อลงในอาหารเหลวที่เตรียมไว้ (สูตร NHIII) ซึ่งจะทำให้การเลี้ยงในขวดขนาด 5 ลิตร จำนวน 4 ไบ ที่มีการเติมอากาศและให้แสงสว่างด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ตลอดเวลา สรุปขั้นตอนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแสดงดังภาพที่ 3-15



ภาพที่ 3-16 ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายเพื่อใช้ในการทดลอง

## 2) การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กราฟมาตรฐาน

การศึกษาในขั้นนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายด้วยกราฟมาตรฐาน โดยกราฟมาตรฐานที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายในงานวิจัยนี้ได้แก่ กราฟมาตรฐานจำนวนเซลล์กับค่าความขุ่นของน้ำเสีย และกราฟมาตรฐานจำนวนเซลล์กับค่าการดูดกลืนแสง สำหรับวิธีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กราฟมาตรฐานมีขั้นตอนการศึกษาดังภาพที่ 3-16 และตัวแปรการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-16



ภาพที่ 3-17 ขั้นตอนการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กราฟมาตรฐานวิเคราะห์ปริมาณสาหร่าย

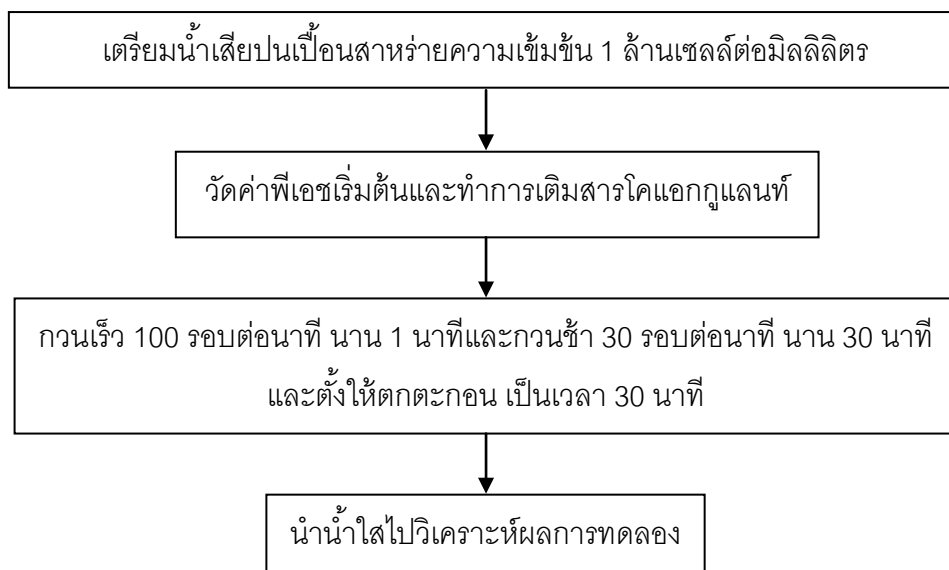
ตารางที่ 3-16 ตัวแปรการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กราฟมาตรฐานวิเคราะห์ปริมาณสาหร่าย

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- ความเข้มข้นสาหร่าย	- ตัวอย่างสาหร่ายที่ความเข้มข้น 1-10 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ค่าความขุ่น - ค่าการดูดกลืนแสง - จำนวนเซลล์สาหร่าย - กราฟมาตรฐาน	- วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความขุ่น - วิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ - นับเซลล์ - ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์กับค่าความขุ่นของน้ำเสีย และจำนวนเซลล์กับค่าการดูดกลืนแสง
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
- ชนิดของสาหร่าย	- สาหร่ายคลอเรลล่า ( <i>Chlorella sp.</i> )

### 3) การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการจาร์เทส

ในขั้นนี้ จะทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยวิธีจาร์เทส โดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ เพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน ขั้นตอนและตัวแปรการศึกษาแสดงดังภาพที่ 3-17 และตารางที่ 3-17 ตามลำดับ





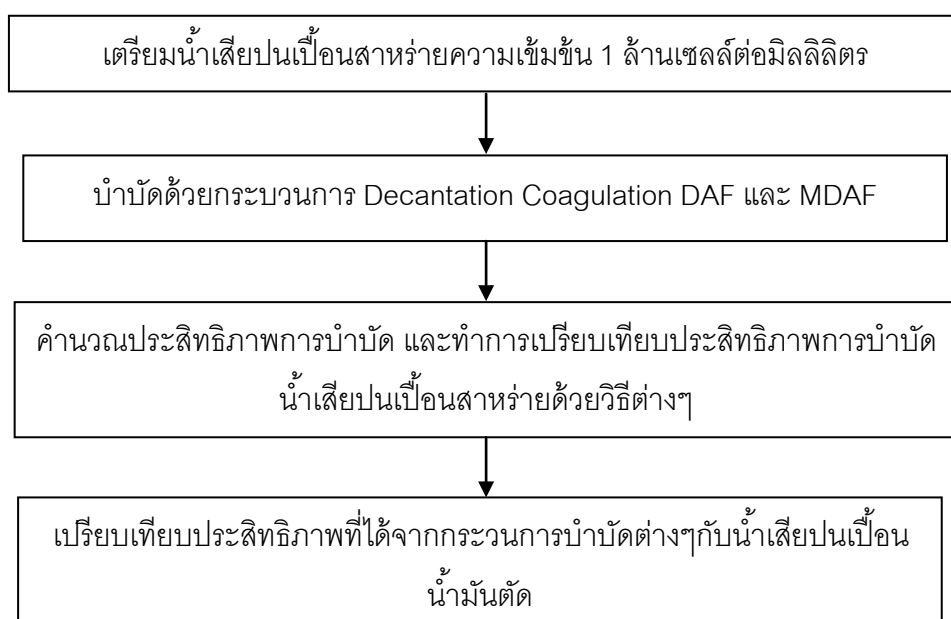
ภาพที่ 3-18 ขั้นตอนการจํารวจทดสอบน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย

ตารางที่ 3-17 ตัวแปรการศึกษากระบวนการจํารวจทดสอบน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้นสาหร่าย</li> <li>- พีเอชเริ่มต้น</li> <li>- ความเข้มข้นสารส้มที่ใช้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร</li> <li>- ตามลักษณะน้ำเสีย</li> <li>- 5 10 15 20 25 และ 30 มิลลิกรัม <math>Al_2(SO_4)_3</math> ต่อลิตร</li> </ul>
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ประสิทธิภาพการบำบัด</li> <li>- พีเอชหลังการบำบัด</li> <li>- ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- คำนวณด้วยสมการ 3-5</li> <li>- วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดพีเอช</li> <li>- ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด</li> </ul>
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ชนิดของสาหร่าย</li> <li>- ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สาหร่ายคลอเรลล่า (<i>Chlorella sp.</i>)</li> <li>- สารส้ม</li> </ul>

#### 4) การศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยถังปฏิริยาลอยตะกอน

ในขั้นนี้ จะทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยถังปฏิริยาลอยตะกอน ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง ( Decantation) กระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการ DAF และกระบวนการ MDAF ซึ่งจะเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ด้วยอัตราการไหลน้ำเสีย 1.2 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำอัดอากาศและความดันเกจควมคุม 0.7 ลิตรต่อนาที และ 4 บาร์ ตามลำดับ (สำหรับกระบวนการ DAF และ MDAF) และใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนที่ที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาที่ผ่านมา (สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการ MDAF) ขั้นตอนและตัวแปรการศึกษาในขั้นนี้แสดงดังภาพที่ 3-18 และตารางที่ 3-18 ตามลำดับ



ภาพที่ 3-19 ขั้นตอนการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการต่างๆ

ตารางที่ 3-18 ตัวแปรการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการต่างๆ

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
- ความเข้มข้นสาหร่าย	- 1 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร
ตัวแปรตาม	กระบวนการศึกษา
- ประสิทธิภาพการบำบัดกระบวนการ Decantation และ Coagulation	- คำนวณด้วยสมการที่ 3-5
- ประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการ DAF และ MDAF	- คำนวณด้วยสมการที่ 3-6
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
- ชนิดของสาหร่าย - ชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ - อัตราการไหลน้ำเสีย - อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ - ความดันอากาศ	- สาหร่ายคลอเรลล่า ( <i>Chlorella sp.</i> ) - ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมจากจาร์เทส - 1.2 ลิตรต่อนาที - 0.7 ลิตรต่อนาที - ความดันเกจ 4 บาร์

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

##### 4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำมันตัด

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้จากการสังเคราะห์น้ำเสียด้วย น้ำประปากับ น้ำมันตัด Castrol cooledge BI (มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิวประเภท) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งที่ความเข้มข้นน้ำเสีย (น้ำมันตัด) 1 กรัมต่อลิตร มีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 4-1 (ณัฐวิญญู ชวเลิศพรศิยา, 2552)

ตารางที่ 4-1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียสังเคราะห์

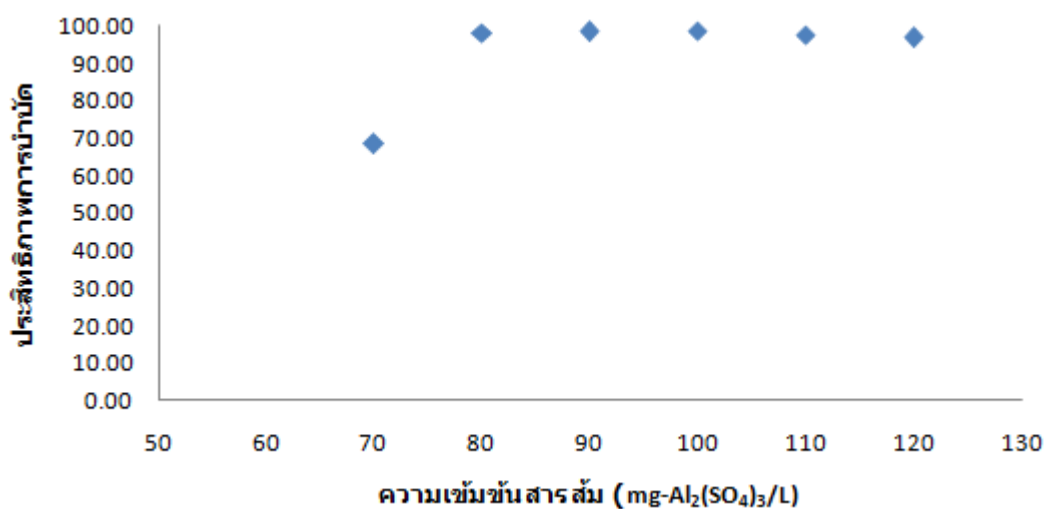
ลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด	ค่าพารามิเตอร์
ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	~1
ความหนืด (Pa·s)	0.001
Zeta Potential (mV)	- 52
ความขุ่น (NTU)	~1,600
ประสิทธิภาพในการทิ้งให้ตกตะกอน (Decantation)	0%

จากตารางที่ 4-1 พบว่าอนุภาคน้ำมันตัดมีขนาดประมาณ 1 ไมครอน และประสิทธิภาพการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง ( Decantation) มีค่าประมาณ 0 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ อนุภาคน้ำมันตัดมีเสถียรภาพในระบบและไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพ

ผลการศึกษาในขั้นนี้สรุปได้ว่า น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพเนื่องจากมีขนาดเล็กเกินไป จึงมีความจำเป็นในการทำให้อนุภาคน้ำมันตัดมีขนาดใหญ่ขึ้น (มากกว่า 10 ไมครอน) และสามารถตกตะกอนได้ ซึ่งในขั้นนี้จะใช้กระบวนการสร้างและรวมตะกอนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

#### 4.1.2 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

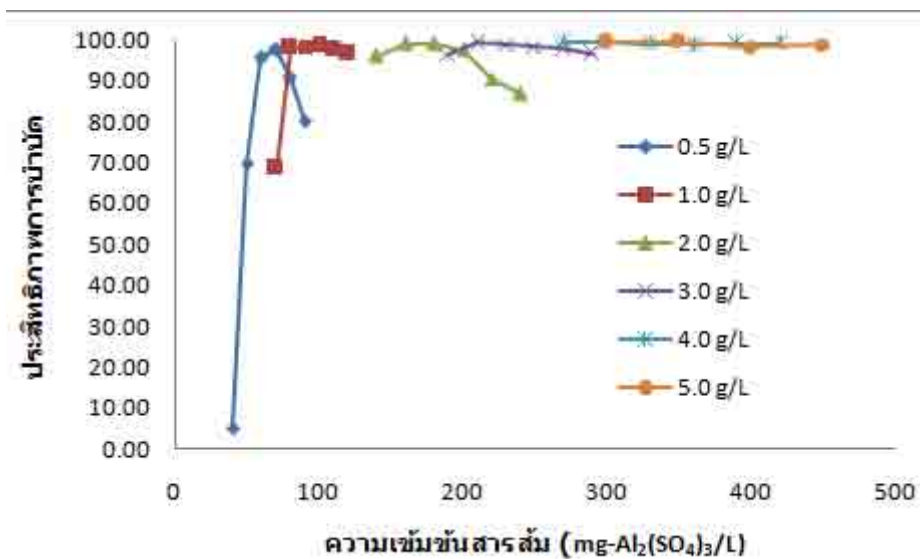
การศึกษาระบวนการโคแอกกูเลชันในขั้นนี้ จะใช้การทดลองจาร์เทส ( Jar test) สำหรับศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมต่อน้ำเสีย โดยใช้สารส้ม หรือ  $Al_2(SO_4)_3$  เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมของน้ำเสียความเข้มข้นน้ำมันตัด 1 กรัมต่อลิตร แสดงดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (จาร์เทส)

จากภาพที่ 4-1 พบว่าการทำลายเสถียรภาพน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ โดย  $Al_2(SO_4)_3$  สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดให้มีประสิทธิภาพประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ ได้ในช่วงความเข้มข้น 80 ถึง 110 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีพีเอชน้ำเสียหลังการบำบัดประมาณ 6.0

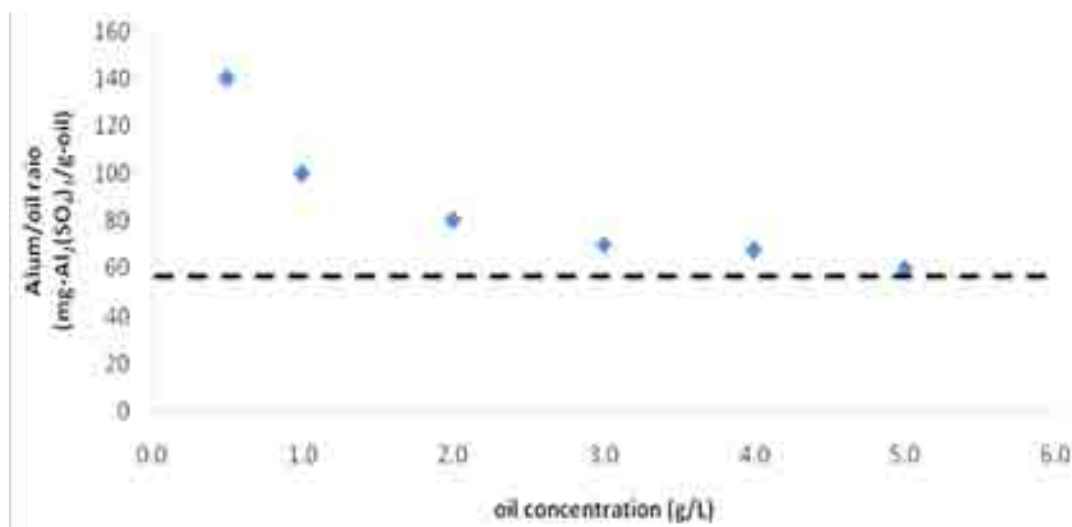
ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดที่ปริมาณความเข้มข้นน้ำมันตัดและความเข้มข้น  $Al_2(SO_4)_3$  ต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4-2



ภาพที่ 4-2 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ปริมาณความเข้มข้นน้ำมันตัดและความเข้มข้น  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ต่างๆ

จากภาพที่ 4-2 พบว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้และมีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์ในทุกๆความเข้มข้นน้ำเสีย และที่ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดของแต่ละความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสียพบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะมีค่าพีเอชประมาณ 5.0-6.0 ในทุกๆความเข้มข้นน้ำเสีย

นอกจากนี้พบแนวโน้มปริมาณความต้องการปริมาณสารเคมีที่ลดลงเมื่อความเข้มข้นน้ำมันตัดเพิ่มขึ้น และเพื่อความง่ายต่อการเข้าใจกลไกที่เกิดขึ้นจึงทำการเปรียบเทียบในลักษณะของค่าสัดส่วนปริมาณ  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ต่อปริมาณความเข้มข้นน้ำมันตัด โดยเลือกค่าปริมาณ  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละค่าความเข้มข้นน้ำเสียมาทำการเปรียบเทียบ ในที่นี้จะเรียกค่าสัดส่วนดังกล่าวว่า Alum/oil (mg-  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ /g-oil) ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ค่าสัดส่วนปริมาณ  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ที่ใช้ต่อ 1 กรัม น้ำมันตัด ณ ความเข้มข้นน้ำเสียต่างๆ จากภาพที่ 4-3 พบว่าเมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าสัดส่วน Alum/oil มีแนวโน้มลดลงและคงที่ที่ค่าสัดส่วน Alum/oil ประมาณ 60 มิลลิกรัม  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ต่อ 1 กรัม น้ำมันตัด และเพื่อการประยุกต์ใช้ค่าสัดส่วน Alum/oil ในการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดขั้นต่อไป จะทำการเลือกใช้ค่าเท่ากับ 100 มิลลิกรัม  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ต่อ 1 กรัม น้ำมันตัด

ผลการศึกษาในขั้นนี้สรุปได้ว่า กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยวิธีจาร์เทสสามารถใช้ทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียได้และมีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมสารเคมี ( Alum) ต่อปริมาณน้ำมันตัดในน้ำเสีย (มลสาร) ในรูปของค่าสัดส่วน Alum/oil ว่ามีแนวโน้มที่จะลดลงและคงที่เมื่อปริมาณน้ำมันตัดในน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในขั้นนี้จะเลือกใช้ค่าสัดส่วน Alum/oil เท่ากับ 100 มิลลิกรัม  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ต่อ 1 กรัม น้ำมันตัดสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันในการศึกษาขั้นต่อไป

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกระบวนการโคแอกกูเลชันมีข้อจำกัดในการใช้งานบางประการ กล่าวคือ มีความต้องการเวลากักหรือมีขนาดของระบบใหญ่ และไม่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณหรือความเข้มข้นน้ำเสียได้ นอกจากนี้ เนื่องจากกระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลายหรือ DAF เป็นกระบวนการที่ใช้เวลากักน้อยและสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลหรือความเข้มข้นน้ำเสียได้สูง ( Arizona Department of Environmental Quality, 1996) งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับ

กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือเรียกว่า MDAF (Modified Dissolved Air Flotation) เพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ผลการศึกษากระบวนการดังกล่าวแสดงดังหัวข้อถัดไป

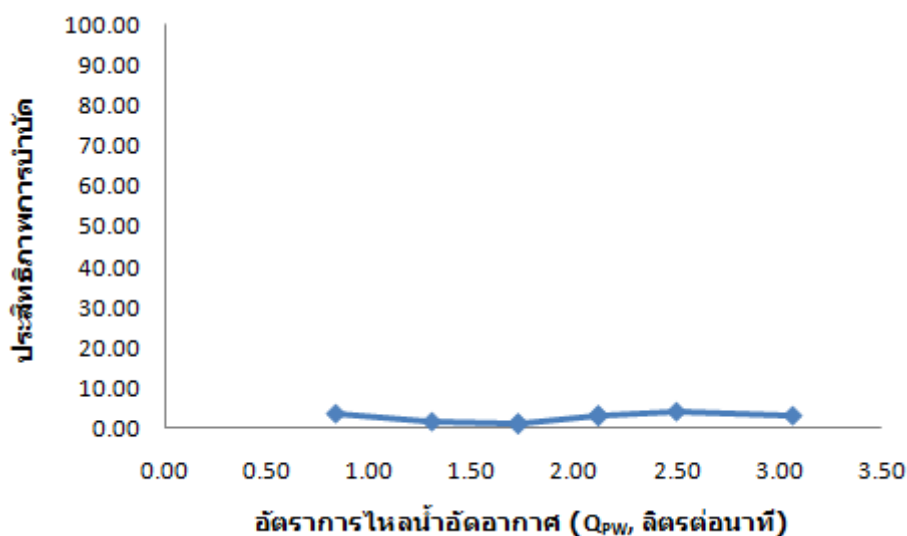
## 4.2 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย

### 4.2.1 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ DAF

กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือ DAF (Dissolved Air Flotation) เป็นกระบวนการที่ใช้กลไกการสร้างโอกาสสัมผัสและเกาะติดระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสีย เพื่อเพิ่มขนาดและลดความหนาแน่นของตะกอน ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มความเร็วสุดท้ายตามสมการของสโตก (Rachu, 2005) ทำให้ตะกอนสามารถแยกออกจากเฟสน้ำเสียหรือของเหลวได้ที่อัตราการน้ำล้นผิว (Overflow rate, OFR) ค่าหนึ่ง ในกรณีนี้ จึงทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ DAF ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4-4

ภาพที่ 4-4 แสดงการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร อัตราการไหลน้ำเสีย 1.2 ลิตรต่อนาที ด้วยกระบวนการ DAF ที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ โดยมีความดันควบคุม 4 บาร์ (เกจ) (Edzwald, 2010) จากรูปพบว่ากระบวนการ DAF ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ กล่าวคือ มีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 0 เปอร์เซ็นต์ ในทุกๆอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ ผลดังกล่าวน่าจะเกิดจาก อนุภาคน้ำมันไม่สามารถสัมผัสและเกาะติดกับฟองอากาศ เนื่องจากอนุภาคน้ำมันมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นลบ (จากตารางที่ 4-1) เช่นเดียวกับฟองอากาศ (Edzwald, 2010) ทำให้อนุภาคน้ำมันและฟองอากาศจึงไม่สามารถสัมผัสและเกาะติดกัน อนุภาคน้ำมันจึงยังคงมีเสถียรภาพในน้ำเสียและไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการ DAF



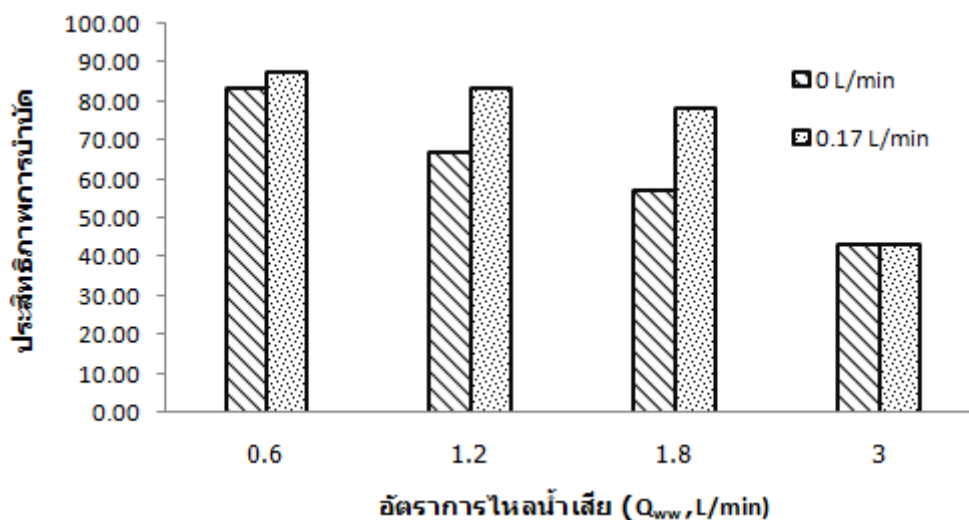


ภาพที่ 4-4 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ DAF

ผลการศึกษาในขั้นนี้สรุปได้ว่า กระบวนการ DAF ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากความมีเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย และศักย์ทางไฟฟ้าของอนุภาคน้ำมันและฟองอากาศมีค่าเป็นลบเหมือนกัน อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาในข้างต้นพบว่า กระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถใช้บำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กระบวนการทางเคมีร่วมกับกระบวนการทางกายภาพเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด กล่าวคือ ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมัน จากนั้น จึงใช้กระบวนการ DAF เพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการบำบัด ซึ่งในที่นี้จะเรียกกระบวนการดังกล่าวว่า กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันหรือ MDAF (Modified Dissolved Air Flotation)

#### 4.2.2 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ MDAF

ในขั้นนี้ ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ MDAF โดยในขั้นแรก จะทำการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างกระบวนการ โคแอกกูเลชัน (อัตราการไหลน้ำอัดอากาศเท่ากับ 0 ลิตรต่อนาที) กับกระบวนการ MDAF (อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.17 ลิตรต่อนาที) แบบต่อเนื่อง (Continuous process) ด้วยอุปกรณ์ลอยตะกอนที่ความเข้มข้นน้ำมันตัด 1 กรัมต่อลิตร และอัตราการไหลน้ำเสีย 0.6 1.2 1.8 และ 3.0 ลิตรต่อนาที ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการ MDAF ที่อัตราการไหลน้ำเสียต่างๆ

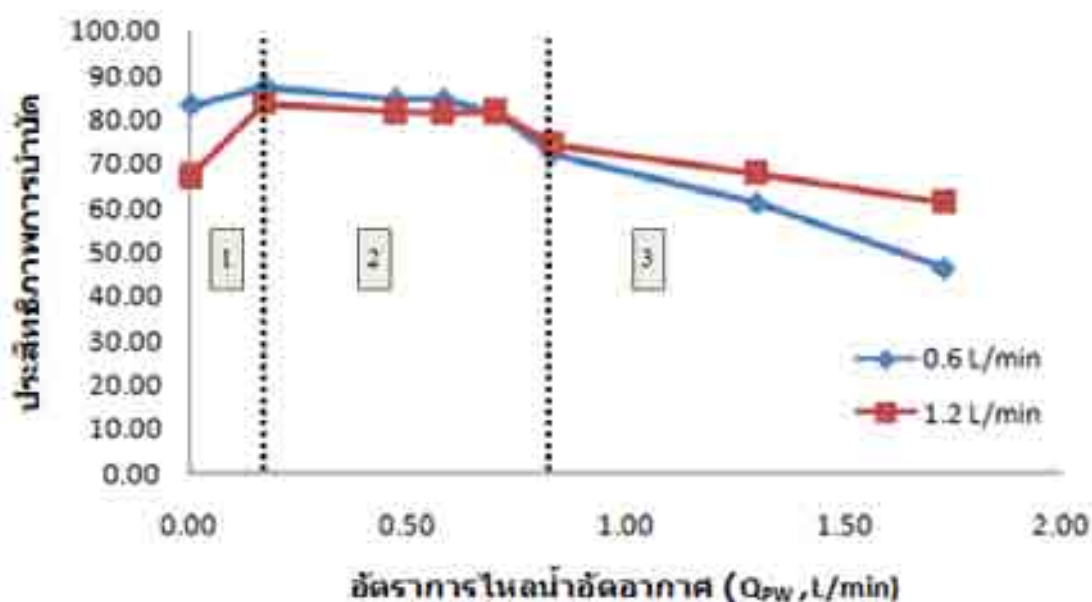
จากภาพที่ 4-5 พบว่า กระบวนการโคแอกกูเลชันและ MDAF สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ ผลดังกล่าวเป็นการยืนยันว่า สาเหตุที่กระบวนการ DAF ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ เกิดจากความไม่เสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียและศักยภาพทางไฟฟ้าของอนุภาคน้ำมันและฟองอากาศมีค่าเป็นลบ และสามารถประยุกต์ใช้กระบวนการ MDAF เพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้

นอกจากนี้ จากรูปพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดกับอัตราการไหลน้ำเสียมีลักษณะแปรผกผันกัน กล่าวคือ ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลน้ำเสีย ( $Q_{ww}$ ) ลดลง ซึ่งผลดังกล่าวน่าจะเกิดจาก ปัจจัยทางพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamic parameters) (Painmanakul และคณะ, 2010) และค่าสัดส่วนปริมาณอากาศต่อความเข้มข้นน้ำเสียที่เหมาะสมหรือ A/S (Metcalf และ Eddy, 2004) นอกจากนี้ ยังพบว่า การเติมอากาศสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้ในช่วงอัตราการไหลที่เหมาะสม กล่าวคือ ที่อัตราการไหลน้ำเสียน้อยกว่า 0.6 และมากกว่า 3.0 ลิตรต่อนาที กระบวนการ MDAF มีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน แต่ในช่วงอัตราการไหลน้ำเสีย 0.6 ถึง 3.0 ลิตรต่อนาที กระบวนการ MDAF มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชัน ผลดังกล่าวเกิดจากความสำคัญของขนาดและความหนาแน่นตะกอนต่อความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity,  $V_T$ ) ที่แตกต่างกันในแต่ละอัตราการไหล (อธิบายได้ด้วยกฎของสโตก) กล่าวคือ การรวมตัวของตะกอนทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความหนาแน่นลดลง ซึ่งการลดอัตราการไหลทำให้อนุภาคใน

เฟสน้ำ (น้ำมันและฟองอากาศ) มีเวลารวมตัวกันมากขึ้น และเมื่อตะกอนมีขนาดใหญ่ในระดับหนึ่ง การเพิ่มขนาดตะกอนจะมีผลต่อการเพิ่มความเร็วสุดท้ายมากกว่าการลดความหนาแน่นตะกอน ( $V_T \propto d_p^2$ ,  $V_T \propto \Delta\rho$ )

ดังนั้น การเติมอากาศเพื่อการสัมผัสและเกาะติดกับอนุภาคน้ำมันที่อัตราการไหลน้ำเสียต่ำๆ จึงไม่เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกัน การเพิ่มอัตราการไหลเป็นการลดระยะเวลาที่ทำให้การลดความหนาแน่นของตะกอนด้วยฟองอากาศมีผลต่อความเร็วสุดท้ายมากกว่าการเพิ่มขนาด อย่างไรก็ตาม เวลาก็ไม่ควรมีย่านเกินไปเพราะมีผลให้กลไกการรวมตะกอนเกิดขึ้นน้อยและอาจไม่เพียงพอต่อการบำบัดให้ได้ประสิทธิภาพ

ในขั้นนี้ เพื่อเป็นการพิจารณาอัตราการไหลน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในขั้นต่อไป จึงทำการพิจารณาผลของอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ ( $Q_{PW}$ ) ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยพิจารณาเปรียบเทียบที่อัตราการไหลน้ำเสีย 0.6 และ 1.2 ลิตรต่อนาที และเพื่อความง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงทำการแบ่งช่วงการพิจารณาผลการศึกษาออกเป็น 3 ช่วงตามอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ กล่าวคือ ช่วงที่ 1 คืออัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่ำกว่า 0.17 ลิตรต่อนาที ช่วงที่ 2 คืออัตราการไหลอยู่ระหว่าง 0.17 ถึง 0.8 ลิตรต่อนาที และช่วงที่ 3 คืออัตราการไหลมีค่ามากกว่า 0.8 ลิตรต่อนาที ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดกระบวนบำบัดที่อัตราการไหลน้ำเสีย 0.6 ลิตรต่อนาที กับ 1.2 ลิตรต่อนาที

จากภาพที่ 4-6 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดของอัตราการไหลน้ำเสีย 0.6 และ 1.2 ลิตรต่อนาที คือ ประมาณ 87 และ 82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.17 ลิตรต่อนาที นอกจากนี้พบว่า ช่วงอัตราการไหลน้ำอัดอากาศช่วงที่ 2 (0.17 ถึง 0.7 ลิตรต่อนาที) มีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ หรืออาจกล่าวได้ว่าช่วงดังกล่าวคือช่วงอัตราการไหลน้ำอัดอากาศที่เหมาะสม กล่าวคือ กระบวนการ MDAF ต้องการปริมาณน้ำอัดอากาศหรือปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับเดินระบบ

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชัน (อัตราการไหลน้ำอัดอากาศเท่ากับ 0) และ MDAF (อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.17 ลิตรต่อนาที) พบว่าที่อัตราการไหลน้ำเสีย 0.6 ลิตรต่อนาทีประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ MDAF มีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการโคแอกกูเลชัน แต่ที่อัตราการไหลน้ำเสีย 1.2 ลิตรต่อนาทีประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ MDAF มีค่าสูงกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชัน ดังนั้น จึงเลือกใช้อัตราการไหล 1.2 ลิตรต่อนาที สำหรับการศึกษานี้ต่อไป

ผลการศึกษานี้สรุปได้ว่า กระบวนการ DAF ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ เนื่องจากความมีเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย และศักย์ทางไฟฟ้าของอนุภาคน้ำมันและฟองอากาศมีค่าเป็นลบ และการประยุกต์ใช้กระบวนการ MDAF สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ โดยมีประสิทธิภาพมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.17 ถึง 0.7 ลิตรต่อนาที ที่อัตราการไหลน้ำเสีย 0.6 และ 1.2 ลิตรต่อนาทีและมีความเข้มข้นน้ำเสียเท่ากับ 1 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ ยังพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ MDAF น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลและค่าสัดส่วน A/S ดังนั้น ในขั้นต่อไปจึงทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลและค่าสัดส่วน A/S ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ MDAF

#### 4.3 ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลและค่าสัดส่วน A/S

ดังที่กล่าวในข้างต้น ตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลและค่าสัดส่วน A/S มีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการ MDAF โดยส่งผลกระทบต่อกลไกการรวมตะกอนระหว่างอนุภาคน้ำมันกับอนุภาคน้ำมันด้วยกัน และส่งผลกระทบต่อกลไกการสัมผัสและเกาะติดระหว่างอนุภาคน้ำมันหรือตะกอนน้ำมันกับฟองอากาศ กล่าวคือ ตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลมีผลต่อลักษณะการสัมผัสและเกาะติดที่แตกต่างกันตามสภาวะการไหลต่างๆ แต่ค่าสัดส่วน A/S มีผลต่อลักษณะการสัมผัสและ

เกาะติดที่แตกต่างกันตามปริมาณความเข้มข้นน้ำเสียและปริมาณอากาศต่างๆ ในขั้นนี้ จึงทำการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

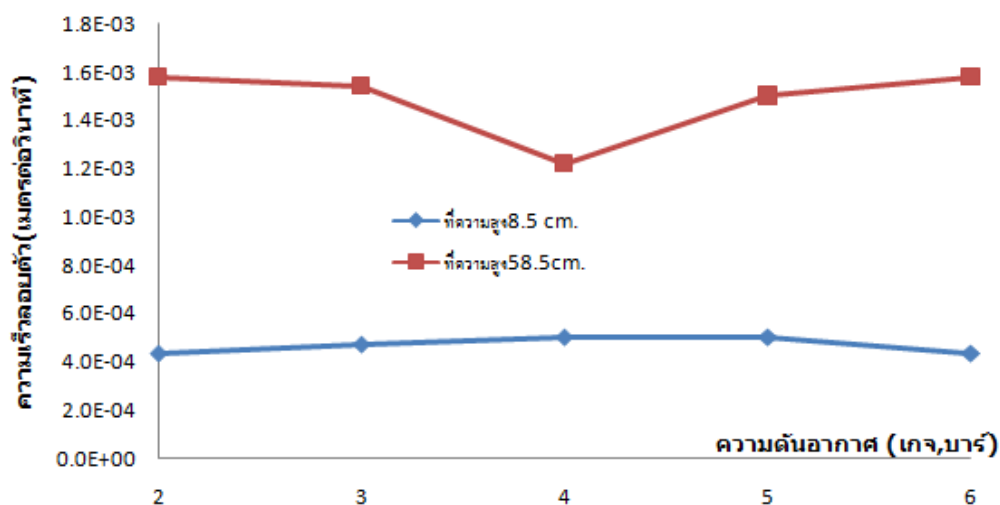
#### 4.3.1 ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล

ในกระบวนการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพ ( Physical treatment) ตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamic parameters) เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับลักษณะการไหลของเฟสของไหลภายในถังลอยตะกอน ซึ่งเฟสของไหลดังกล่าว ได้แก่ เฟสของเหลว (Hydrodynamic) และเฟสอากาศ (Aerodynamic) นอกจากนี้ ยังมีความสัมพันธ์กับลักษณะรูปทรงหรือการออกแบบถังลอยตะกอน

งานวิจัยในขั้นนี้ ให้ความสนใจกับตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล คือ ระยะเวลากักหรือ T (Detention time) ค่าความปั่นป่วนหรือค่าพลังงานของเฟสของไหลหรือ G (Velocity gradient) และค่าอัตราน้ำล้นผิวหรือ OFR (Overflow rate) กล่าวคือ ค่า G และ ค่า T ส่งผลต่อการสร้างโอกาสการสัมผัสและเกาะติดของตะกอนที่เหมาะสมหรืออาจรวมผลกระทบของทั้งสองตัวแปรในรูปของ G.T (Camp Number) (Svarovsky, 2000) ส่วนค่า OFR จะส่งผลต่อการแยกตะกอนดังกล่าวออกจากน้ำเสีย อย่างไรก็ตาม เพื่อการศึกษาผลกระทบของตัวแปรดังกล่าวอย่างถูกต้อง จึงมีความจำเป็นในการศึกษาลักษณะของฟองอากาศที่เหมาะสมต่อการศึกษารลอยตะกอน ผลการศึกษาลักษณะของฟองอากาศ มีดังนี้

##### 4.3.1.1 ผลการศึกษาลักษณะของฟองอากาศ

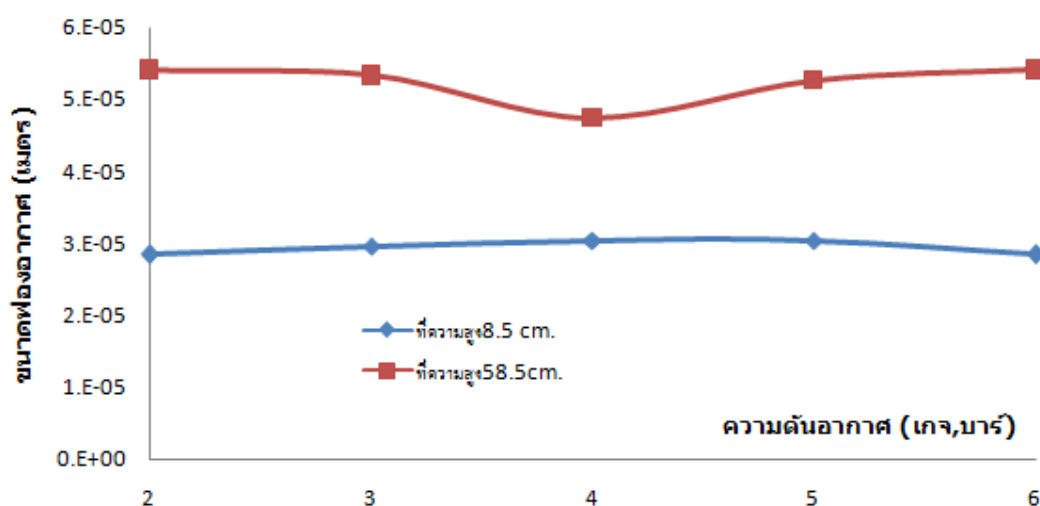
เนื่องจากกระบวนการ DAF หรือ MDAF เป็นกระบวนการที่เน้นการสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับฟองอากาศ ดังนั้น พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศทั้งหมดในระบบหรือ a (Interfacial area) (Painmanakul และคณะ, 2010) จึงมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยค่า a ดังกล่าวแปรผกผันกับขนาดของฟองอากาศ ในการนี้ การศึกษาลักษณะของฟองอากาศ จึงทำการศึกษาขนาดฟองอากาศที่ได้จากระบบ และในขั้นนี้ ทำการศึกษา ณ ระดับความสูงคอลัมน์ลอยตะกอน 8.5 ซม. และ 58.5 ซม. และความดันอากาศต่างๆ โดยภาพที่ 4-7 แสดงความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และภาพที่ 4-8 แสดงผลการคำนวณขนาดฟองอากาศ



ภาพที่ 4-7 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่ความดันเกจต่างๆ

จากภาพที่ 4-7 พบว่าฟองอากาศมีความเร็วลอยตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางการไหล และที่ความดันเกจ 4 บาร์ ระดับความสูงคอลัมน์ 58.5 ซม. พบว่ามีความเร็วลอยตัวต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับความดันเกจอื่นๆ คือ ประมาณ 0.0012 เมตรต่อวินาที

เนื่องจากฟองอากาศที่ทดสอบมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) จึงทำการคำนวณหาขนาดฟองอากาศจากความเร็วลอยตัวด้วยสมการของสโตก (Rachu, 2005) ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4-8



ภาพที่ 4-8 ขนาดฟองอากาศที่ความดันเกจต่างๆ

จากภาพที่ 4-8 พบว่าฟองอากาศมีขนาดเพิ่มขึ้นตามระยะทางการไหล โดยมีขนาดประมาณ 30 ไมครอน และ 55 ไมครอน ที่ระดับความสูงคอลัมน์ 8.5 ซม. และ 58.5 ซม. ตามลำดับ ซึ่งขนาดฟองอากาศดังกล่าวเป็นการยืนยันว่า ระบบลอยตะกอนในงานวิจัยนี้เป็นการลอยตะกอนด้วยอากาศละลายหรือ DAF (Rachu, 2005)

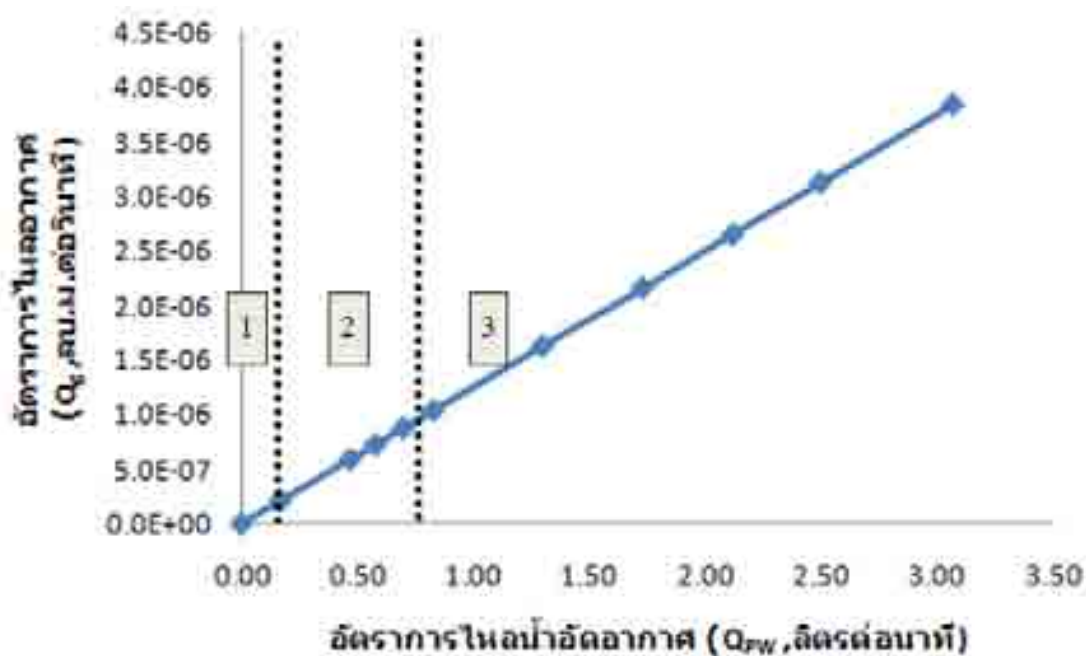
นอกจากนี้ จากการที่ฟองอากาศมีขนาดและความเร็วลอยตัวเพิ่มขึ้นตามระยะทางการไหล และที่ระดับความสูงคอลัมน์ 58.5 ซม. ความดันเกจ 4 บาร์ ฟองอากาศมีขนาดเล็กกว่าความดันเกจอื่นๆ ผลดังกล่าวเกิดจาก ปฏิกิริยาการรวมตัวกัน (Coalescence phenomena) ของฟองอากาศตามระยะทางการไหล รวมไปถึงกลไกการแตกตัวของฟองอากาศ (Bubble break-up mechanism) ที่มีความสัมพันธ์กับจำนวนและขนาดของฟองอากาศที่ความดันอากาศต่าง ๆ กล่าวคือ ขนาดและปริมาณของฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับความปั่นป่วนในเฟสน้ำหรือค่า  $G$  (Velocity gradient) ทั้งนี้ เมื่อมีค่าสูงเกินไปจะส่งผลต่อการเพิ่มโอกาสในการรวมตัวกันของฟองอากาศและทำให้ ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในทางกลับกัน ถ้ามีค่าต่ำเกินไปจะ เป็นการลดปริมาณฟองอากาศหรือลดโอกาสการสัมผัสและเกาะติดระหว่างฟองอากาศ กับอนุภาคน้ำมัน ซึ่งส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัด

ผลการศึกษาในขั้นนี้สรุปได้ว่า ความดันเกจ 4 บาร์ มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมกระบวนการ DAF หรือ MDAF อื่นๆ จากงานวิจัยอื่น ๆ กล่าวคือ Edzwald (2010) และ Rachu (2005) พบว่าความดันอากาศที่เหมาะสมต่อกระบวนการ DAF จะอยู่ในช่วง 4-5 บาร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น ดังนั้น การศึกษากระบวนการ DAF หรือ MDAF ในงานวิจัยนี้จึงใช้ความดันเกจ 4 บาร์ เป็นความดันควบคุม

#### 4.3.1.2 ผลการศึกษาผลกระทบของค่าความปั่นป่วน

ในกระบวนการบำบัดด้วยวิธีทางกายภาพ ค่าความปั่นป่วนหรือพลังงานการกวนผสมในระบบ (Velocity gradient,  $G$ ) เป็นตัวแปรชี้วัดระดับการกวนผสมของเฟสของไหล เช่น การผสมสารเคมีลงในเฟสของไหล จะทำการออกแบบให้ระบบมีค่าความปั่นป่วนสูงเพื่อให้กลไกการผสมสารเคมีสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึง หรืออย่างเช่นในกระบวนการรวมตะกอนหรือ ฟล็อกคูเลชัน (Flocculation) ระบบจะถูกออกแบบให้มีระดับความปั่นป่วนต่ำ เพื่อให้ตะกอนเกิดการรวมตัวและไม่แตกออกจากกัน อย่างไรก็ตาม ค่าระดับความปั่นป่วนดังกล่าวก็ไม่ควรมีค่าต่ำเกินไป เพราะอาจทำให้ตะกอนในระบบเกิดการชนและรวมตัวในระดับที่ต่ำเกินไป เป็นต้น

ในส่วนของการบรรเทา DAF หรือ MDAF ค่าความปั่นป่วนในระบบหรือค่า G มีผลต่อการสร้างโอกาสสัมผัสและเกาะติดระหว่างอนุภาคแขวนลอยกับฟองอากาศ และอาจรวมไปถึงการรวมตัวกันเองของอนุภาคน้ำมัน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบดังกล่าว โดยทำการศึกษาที่อัตราการไหลน้ำเสีย 1.2 ลิตรต่อวินาที ความเข้มข้นน้ำเสีย 1 กรัมต่อลิตร ความดันเกจควบคุม 4 บาร์ สัดส่วน Alum/oil เท่ากับ 100 มิลลิกรัม  $Al_2(SO_4)_3$  ต่อ 1 กรัม น้ำมันตัด ที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ ( $Q_{PW}$ , Pressurized water) ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลน้ำอัดอากาศกับอัตราการไหลอากาศหรือ  $Q_g$  แสดงดังภาพที่ 4-9 และผลการศึกษาค่าความปั่นป่วนของกระแสของไหลแสดงดังภาพที่ 4-10



ภาพที่ 4-9 ปริมาณอากาศที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ

ภาพที่ 4-9 แสดงผลการคำนวณอัตราการไหลอากาศ ณ อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ ด้วยสมการของเฮนรี่ (Henry's law) (Rachu, 2005) โดยการสมมติให้อากาศแห้ง (Dry air) ที่ใช้ประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจน 80 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซออกซิเจน 20 เปอร์เซ็นต์ และสมมติให้ค่าสัดส่วนปริมาณก๊าซที่ละลายน้ำได้จริงเทียบกับสมการของเฮนรี่มีค่าเท่ากับ 1.0

จากรูปพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นตรงทั้ง 3 ช่วงอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ (Linear relationship) ดังนั้น การพิจารณาศึกษาตัวแปรต่างๆ ในขั้นต่อไป จะแสดงในรูปความสัมพันธ์ของอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับอัตราการไหล



อากาศ และจะถูกใช้ในการคำนวณค่า  $G$  ในการศึกษาขั้นต่อไป สมการการคำนวณค่า  $G$  ในงานวิจัยนี้แสดงดังสมการที่ 4-1 และ 4-2 (Svarovsky, 2000)

$$G_{Bubble} = 0.236 \frac{g\rho D}{\mu} \sqrt{\frac{V_A}{V}} \quad (4-1)$$

เมื่อ  $G_{Bubble}$  คือ ค่าความปั่นป่วนของเฟสอากาศหรือฟองอากาศที่ไหลผ่านถึงปฏิกิริยาแบบท่อ (วินาที<sup>-1</sup>)

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของเฟสอากาศหรือฟองอากาศ (กก.ต่อลบ.ม.)

$D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (เมตร)

$\mu$  คือ ค่าความหนืดของเฟสน้ำเสีย (กก.ต่อเมตรต่อวินาที)

$V_A/V$  คือ สัดส่วนปริมาตรอากาศต่อปริมาตรทั้งหมด

$$G_{Liquid} = \sqrt{\frac{\rho g Q H}{V \mu}} \quad (4-2)$$

เมื่อ  $G_{Liquid}$  คือ ค่าความปั่นป่วนของเฟสของไหลที่ไหลผ่านถึงปฏิกิริยาแบบท่อ (วินาที<sup>-1</sup>)

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของเฟสของเหลวหรือน้ำเสีย (กก.ต่อลบ.ม.)

$Q$  คือ อัตราการไหลของเฟสของเหลว (ลบ.ม.ต่อวินาที)

$H$  คือ ความดันสูญเสียซึ่งคำนวณได้จากสมการของดาร์ซี (เมตร)

$V$  คือ ปริมาตรของเฟสเหลว

$\mu$  คือ ค่าความหนืดของเฟสน้ำเสีย (กก.ต่อเมตรต่อวินาที)

$$H = \frac{4fL}{d} \times \frac{v^2}{2g} \quad (4-3)$$

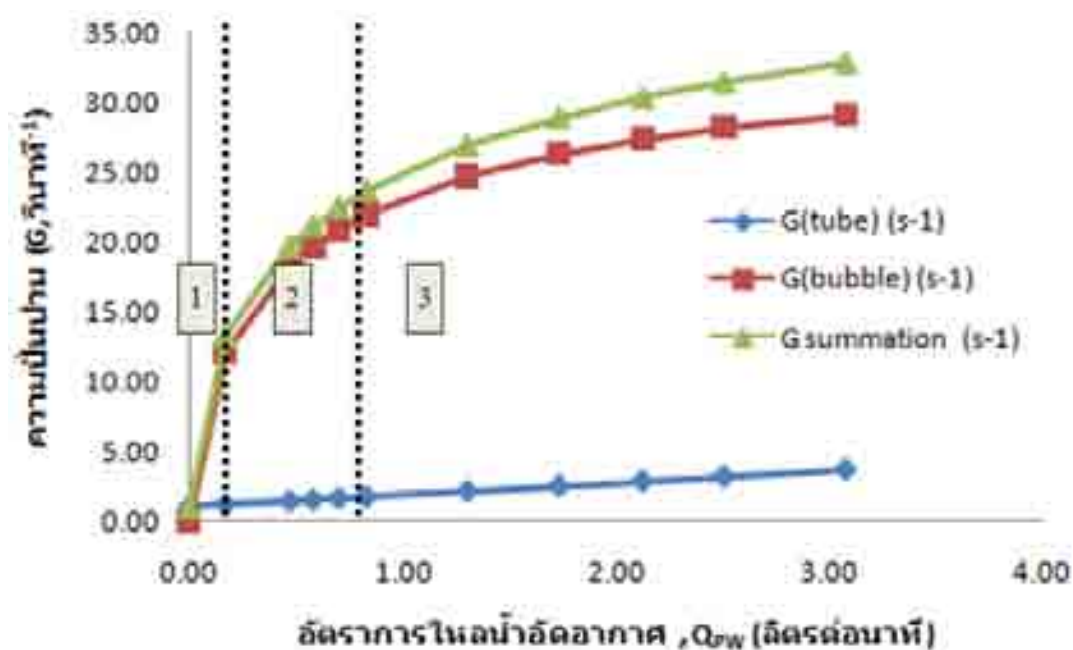
เมื่อ  $H$  คือ ความดันสูญเสียจากการไหลของเฟสของเหลว

$f$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ (ขึ้นอยู่กับชนิดท่อและค่าเรย์โนลด์ (Reynold number))

$L$  คือ ความยาวท่อ (เมตร)

$D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (เมตร)

$V$  คือ ความเร็วของเฟสน้ำเสียที่ไหลผ่านท่อ (เมตรต่อวินาที)



ภาพที่ 4-10 ความปั่นป่วนของกระแสน้ำของไหลที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ

จากภาพที่ 4-10 เฟสของไหลที่ส่งผลกระทบต่อความปั่นป่วนในระบบ ได้แก่ เฟสอากาศ (ฟองอากาศ) และเฟสน้ำ (น้ำอัดอากาศและน้ำเสีย) กล่าวคือ การไหลของน้ำเสียทำให้เกิดความปั่นป่วนในเฟสน้ำ แต่การไหลของน้ำอัดอากาศทำให้เกิดความปั่นป่วนทั้งเฟสน้ำและเฟสอากาศ

นอกจากนี้ ความปั่นป่วนของระบบเกิดจากเฟสอากาศมากกว่าเฟสน้ำ รวมถึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วคงที่เมื่ออัตราการไหลน้ำอัดอากาศเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ความปั่นป่วนมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่ 1 จากนั้นการเพิ่มขึ้นดังกล่าวจะค่อยๆ ลดลงในช่วงที่ 2 และมีแนวโน้มคงที่ในช่วงที่ 3 โดยความปั่นป่วนของช่วงที่ 2 หรือช่วงประสิทธิภาพการบำบัดสูง มีค่าความปั่นป่วนประมาณ 20 ถึง 25 วินาที<sup>-1</sup> อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับค่าความปั่นป่วนที่

เหมาะสมต่อการสัมผัสและเกาะติด คือ 50 ถึง 100 วินาที<sup>-1</sup> (Metcalf และ Eddy, 2004) พบว่าความปั่นป่วนของระบบต่ำกว่าช่วงดังกล่าว ซึ่งอาจส่งผลต่อการลดโอกาสการสัมผัสระหว่างตะกอนกับฟองอากาศและอาจส่งผลให้ระบบต้องการเวลากักสำหรับกลไกดังกล่าวมากกว่าปกติ ดังนั้น เพื่อพิสูจน์สมมติฐานดังกล่าว จึงทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลา

#### 4.3.1.3 ผลการศึกษาผลกระทบของระยะเวลา

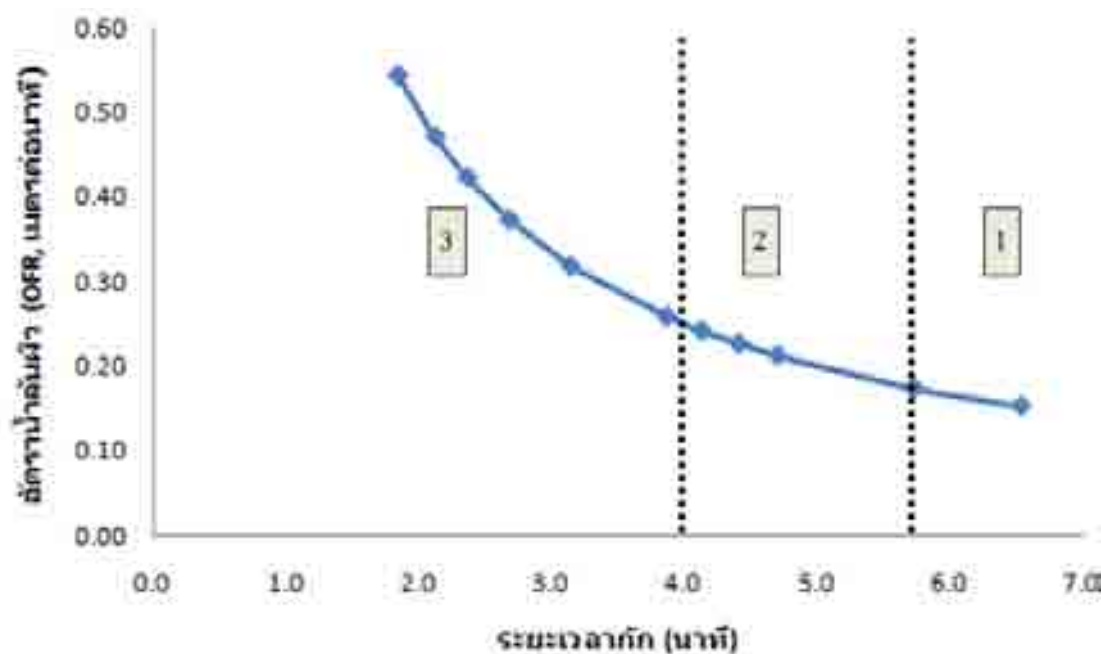
ในกระบวนการรวมตะกอนหรือกระบวนการ DAF และ MDAF ระยะเวลาเป็นตัวแปรสำคัญต่อกลไกการสัมผัสและเกาะติดที่เหมาะสม กล่าวคือ ในกรณีที่ความปั่นป่วนของระบบอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ระยะเวลาที่น้ำยิ่งมากจะยิ่งทำให้กลไกการสัมผัสและเกาะติดเกิดขึ้นได้มากเช่นกัน ในขั้นนี้ จึงทำการศึกษาระยะเวลาที่เกิดขึ้น ณ อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ หนึ่งกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาที่สภาวะอัตราการไหลน้ำเสียคงที่ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลน้ำอัดอากาศจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงอัตราน้ำล้นผิวหรือ OFR (Overflow rate) การแสดงผลการศึกษาในขั้นนี้ จึงแสดงในลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและค่าอัตราน้ำล้นผิว (คำนวณดังสมการที่ 4-4 และ 4-5) ดังแสดงในรูป 4-11

$$OFR = \frac{Q}{A} \quad (4-4)$$

- เมื่อ OFR คือ อัตราน้ำล้นผิวหรือ Overflow rate (เมตรต่อนาที)
- Q คือ อัตราการไหลของของไหลที่ไหลผ่านถังปฏิกริยา (ลบ.ม.ต่อนาที)
- A คือ พื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกริยาที่ของไหลไหลผ่าน (ตร.ม.)

$$T = \frac{V}{Q} \quad (4-5)$$

- เมื่อ T คือ ระยะเวลาที่น้ำ (นาที)
- V คือ ปริมาตรของถังปฏิกริยา (ลบ.ม.)



ภาพที่ 4-11 ค่าอัตราน้ำล้นผิวที่ระยะเวลาพักต่างๆ

จากภาพที่ 4-11 อัตราน้ำล้นผิวมีค่าแปรผกผันกับระยะเวลาพัก กล่าวคือ การเพิ่มอัตรา การไหลน้ำอัดอากาศเป็นการเพิ่มอัตราน้ำล้นผิวแต่ลดระยะเวลาพัก และอัตราน้ำล้นผิวที่ เหมาะสมกับกระบวนการ MDAF ควรอยู่ในช่วง 0.15 ถึง 0.25 เมตรต่อนาที

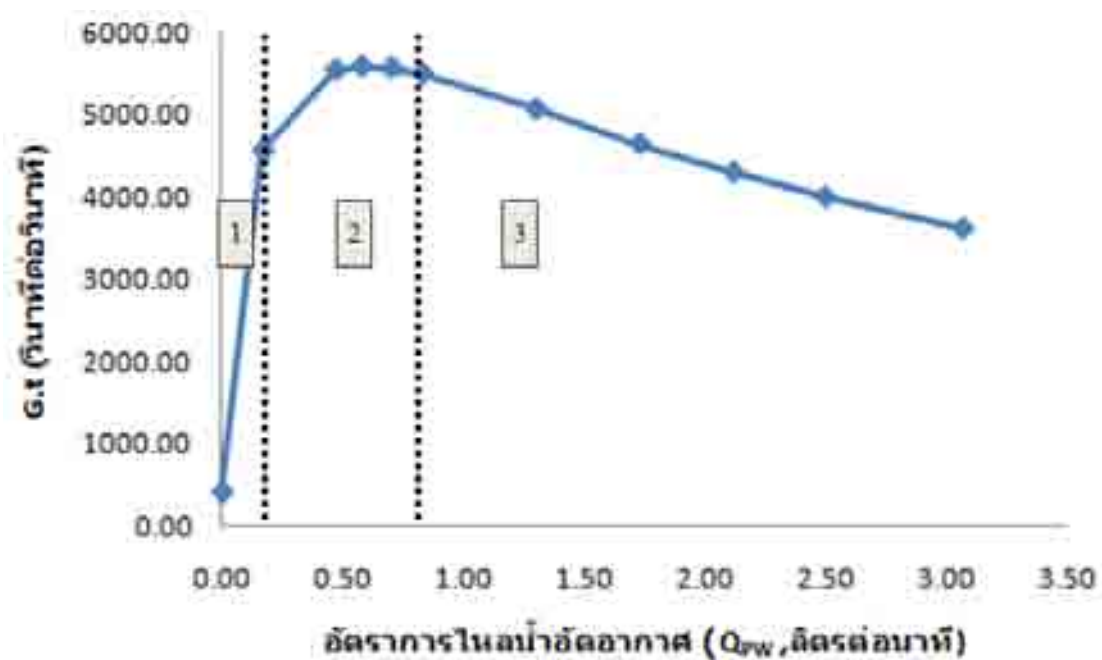
นอกจากนี้ พบว่าช่วงที่ 2 หรือช่วงประสิทธิภาพการบำบัดสูง มีระยะเวลาพักประมาณ 4 ถึง 6 นาที และเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาพักที่เหมาะสมต่อกระบวนการ MDAF คือ 2 ถึง 4 นาที (Metcalf และ Eddy, 2004) พบว่า ระยะเวลาพักของงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่า หรืออาจกล่าว ได้ว่างานวิจัยนี้ออกแบบระบบ MDAF ให้ใหญ่เกินความจำเป็น อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวมีความ สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าความปั่นป่วนในข้างต้น กล่าวคือ ค่าความปั่นป่วนของระบบ MDAF ในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าช่วงที่เหมาะสม จึงมีผลให้ระบบต้องการระยะเวลาเพื่อกลไกการสัมผัส และเกาะติดมากกว่าปกติ

จากผลการศึกษาข้างต้น จะเห็นได้ว่าตัวแปรค่าความปั่นป่วนและระยะเวลาพักมี ความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ เมื่อระบบมีค่าความปั่นป่วนน้อยเกินไปจะทำให้มีความต้องการ ระยะเวลาพักเพิ่มขึ้น หรือเมื่อระบบมีค่าความปั่นป่วนมากเกินไปก็อาจมีผลให้ต้องการระยะเวลา พักน้อยลง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลกระทบของตัวแปรค่าความปั่นป่วนและระยะเวลาพักใน

ลักษณะความสัมพันธ์ของค่า G.T หรือ Camp number (Svarovsky, 2000) ผลการศึกษาแสดงดังหัวข้อถัดไป

#### 4.3.1.4 ผลการศึกษาตัวแปร G.T

ดังที่กล่าวในข้างต้น ตัวแปร G.T มีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผกผัน แต่ด้วยช่วงที่จำกัดของค่า G ที่เหมาะสมในแต่ละกระบวนการ ค่า T จึงมีช่วงความเหมาะสมอยู่ช่วงหนึ่งๆ ตามชนิดของกระบวนการ เช่น ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน ค่า G.T ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง  $10^4$  ถึง  $10^5$  (Svarovsky, 2000) และเนื่องจากค่า G ควรอยู่ในช่วง 50 ถึง 100 วินาที<sup>-1</sup> ดังนั้น ค่า T จึงมีค่าอยู่ในช่วง 100 ถึง 2000 วินาที หรือประมาณ 2 ถึง 30 นาที เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ ผลการศึกษา ค่า G.T ของกระบวนการ MDAF ที่ได้ แสดงดังรูป 4-12



ภาพที่ 4-12 ค่า G.T ที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ

จากภาพที่ 4-12 พบว่า ในช่วงที่ 1 ค่า G.T แปรผันตามอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ ในช่วงที่ 2 ค่า G.T คงที่ตามอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ แต่มีค่ามากที่สุด โดยมีค่าประมาณ 5,500 วินาทีต่อวินาที และช่วงที่ 3 ค่า G.T แปรผกผันกับอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ ผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่ากลไกการสัมผัสและเกาะติดที่เหมาะสมในกระบวนการ MDAF มีความสัมพันธ์กับค่า G.T ที่เหมาะสม หรืออาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นอยู่กับค่า G.T ซึ่งงานวิจัยนี้พบว่าค่า G.T

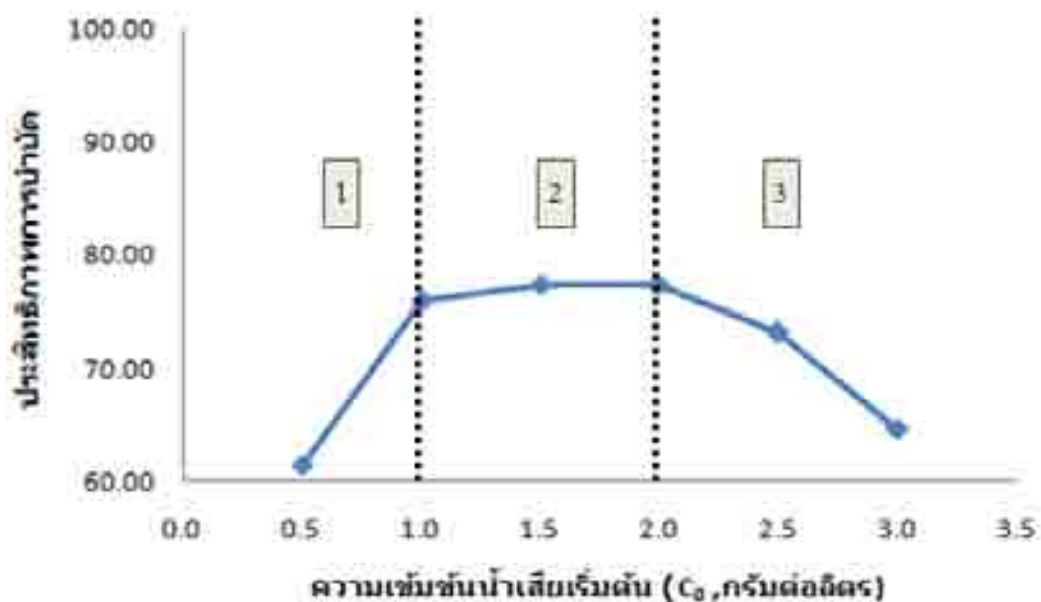
ที่เหมาะสมของกระบวนการ MDAF คือ 5,500 วินาทีต่อวินาที และเมื่อเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน คือ  $10^4$  ถึง  $10^5$  วินาทีต่อวินาที พบว่าผลจากกระบวนการ MDAF มีค่าน้อยกว่าค่าดังกล่าว ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการ MDAF มีความต้องการระยะเวลาที่หรือขนาดถึงปฏิกริยาน้อยกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันหรือกระบวนการสร้างและรวมตะกอนแบบปกติ (Conventional process)

ผลการศึกษาผลกระทบของพลศาสตร์ของไหล สรุปได้ว่า ความดันเกจ 4 บาร์ มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ เพื่อควบคุมกระบวนการ DAF หรือ MDAF และการออกแบบกระบวนการ MDAF ควรออกแบบให้มีอัตราน้ำล้นผิวในช่วง 0.15 ถึง 0.25 เมตรต่อนาที โดยมีค่า G.T ของระบบประมาณ 5,500 วินาทีต่อวินาที นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการ MDAF มีความต้องการระยะเวลาที่หรือขนาดถึงปฏิกริยาน้อยกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันหรือกระบวนการสร้างและรวมตะกอนแบบปกติ (Conventional process) (มีต้นทุนการก่อสร้างน้อยกว่า) กล่าวคือกระบวนการ MDAF ในงานวิจัยนี้ เป็นระบบที่รวมกระบวนการกวนเร็ว กวนช้า และตกตะกอนไว้ในระบบเดียว ซึ่งมีระยะเวลาทั้งหมดประมาณ 5 ถึง 7 นาที ในขณะที่กระบวนการแบบปกติจะมีระยะเวลาทั้งหมดประมาณ 1 ชั่วโมง (Metcalf และ Eddy, 2004)

#### 4.3.2 ผลการศึกษาผลกระทบของค่าสัดส่วน A/S

ดังที่กล่าวในข้างต้น ปัจจัยที่น่าจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการ MDAF ได้แก่ ค่าตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล และค่าสัดส่วน A/S ซึ่งจากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลส่งผลกระทบต่อกระบวนการ MDAF ที่เหมาะสม ในขั้นนี้ จึงทำการศึกษาผลกระทบของค่าสัดส่วน A/S ที่มีต่อกระบวนการ MDAF

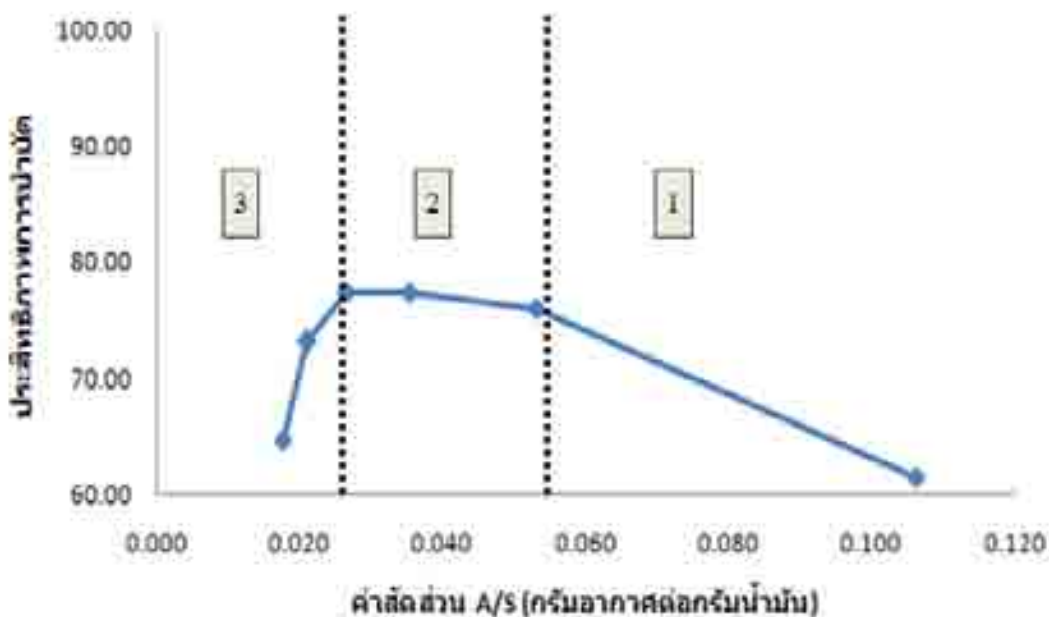
ค่าสัดส่วน A/S เป็นค่าสัดส่วนที่แสดงถึงปริมาณอากาศที่เหมาะสมต่อความเข้มข้นน้ำเสีย ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามลักษณะชนิดของน้ำเสียและขนาดของฟองอากาศ แต่เนื่องจากในกระบวนการ DAF หรือ MDAF ฟองอากาศมีขนาดเล็กมาก คือ ประมาณ 30 ถึง 100 ไมครอน (Edzwald, 2010) ผลกระทบของขนาดฟองอากาศที่แตกต่างกันจึงมีค่อนข้างน้อย สำหรับงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาค่า A/S ของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยทำการศึกษาด้วยอัตราการไหลน้ำเสีย 1.2 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.7 ลิตรต่อนาที ความดันเกจควบคุม 4 บาร์ ปริมาณ Alum/oil เท่ากับ 100 มิลลิกรัม  $Al_2(SO_4)_3$  ต่อ 1 กรัม น้ำมันตัด ที่ความเข้มข้นน้ำเสียต่างๆ ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-13



ภาพที่ 4-13 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นน้ำเสียต่างๆ

จากภาพที่ 4-13 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นน้ำมันในน้ำเสียซึ่งเป็นการยืนยันว่าค่าสัดส่วน A/S มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดในกระบวนการ DAF หรือ MDAF (Metcalf และ Eddy, 2004)

นอกจากนี้ เพื่ออำนวยความสะดวกในการเข้าใจจึงทำการแบ่งส่วนการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ความเข้มข้นน้ำมันดิบระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 กรัมต่อลิตร ช่วงที่ 2 ความเข้มข้นน้ำมันดิบระหว่าง 1.0 ถึง 2.0 กรัมต่อลิตร และช่วงที่ 3 ความเข้มข้นน้ำมันดิบมากกว่า 2.0 กรัมต่อลิตร จากรูปพบว่า ประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงที่ 1 มีค่าคงที่ในช่วงที่ 2 และมีค่าลดลงในช่วงที่ 3 โดยช่วงที่ 2 ประสิทธิภาพมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับช่วงอื่น คือ ประมาณ 77 เปอร์เซ็นต์ และจากผลดังกล่าว นำไปคำนวณค่าสัดส่วน A/S ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4-14



ภาพที่ 4-14 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ค่าสัดส่วน A/S ต่างๆ

จากภาพที่ 4-14 พบว่าค่าสัดส่วน A/S ในช่วงที่ 2 หรือช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 0.024 ถึง 0.052 กรัม -อากาศต่อกรัม-น้ำมัน ผลดังกล่าวเกิดจาก กลไกการสัมผัสและเกาะติดที่เหมาะสมจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อในระบบมีทั้งปริมาณอากาศและปริมาณน้ำเสียที่เหมาะสม กล่าวคือ ช่วงที่ 1 ประสิทธิภาพมีค่าแปรผันตามความเข้มข้นน้ำเสีย เกิดจากปริมาณอนุภาคน้ำมันในระบบมีค่าน้อยเกินไปทำให้กลไกการสัมผัสเกิดขึ้นต่ำ กลไกในช่วงนี้จึงมีความต้องการอนุภาคน้ำมันหรือความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ช่วงที่ 2 ประสิทธิภาพมีค่าสูงที่สุดและมีค่าคงที่ เกิดจากปริมาณอนุภาคน้ำมันและฟองอากาศมีความพอดีกับกลไกการสัมผัสและเกาะติด และช่วงที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าแปรผันกับความเข้มข้นน้ำมัน เกิดจากปริมาณอนุภาคน้ำมันมีมากเกินไปฟองอากาศจะสามารถสัมผัสได้

อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยของ Bensadok (2007) พบว่า ค่า A/S ที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดควรมีค่าอยู่ที่ประมาณ  $3.37 \times 10^{-4}$  กรัม-อากาศต่อกรัม-น้ำมันตัด และมีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 77 เปอร์เซ็นต์ จากค่าดังกล่าวเมื่อเทียบกับผลการศึกษานี้ พบว่า ค่า A/S ในงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่า แต่ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกัน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าสัดส่วน A/S เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการออกแบบระบบ DAF หรือ MDAF ซึ่งจากการวิจัยข้างต้นพบว่าค่าตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลมีผลต่อประสิทธิภาพ



การบำบัดและอาจเป็นไปได้ว่าค่าตัวแปรดังกล่าวในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Bensadok (2007) มีค่าที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้มีปริมาณความต้องการของค่า A/S มีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม มีความจำเป็นในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อเสนอเป็นแนวทางในการออกแบบที่เหมาะสมต่อไป

ผลการศึกษาในขั้นนี้สรุปได้ว่า ค่าสัดส่วน A/S ที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.024 ถึง 0.052 กรัม-อากาศต่อกรัม-น้ำมัน และพบว่านอกจากค่าสัดส่วน A/S แล้ว ยังมีตัวแปรอื่นที่ส่งผลต่อกระบวนการ DAF หรือ MDAF ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาข้างต้น กล่าวคือ ตัวแปร G.T และค่า OFR มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

#### 4.4 ผลการศึกษาการทำนายประสิทธิภาพด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือโมเดล ( Model) คือ สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการบำบัด ในขั้นนี้ จะทำการศึกษาและเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้สมมติฐาน 2 อย่าง คือ สมมติฐานของการกรองหรือสมการการกรอง (Filtration model) และสมมติฐานของการดูดซับหรือสมการการดูดซับ (Adsorption model) ผลการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 ผลการศึกษาสมการการกรอง (Filtration model)

สมการการกรอง เป็นสมการที่จำลองกระบวนการสัมผัสและเกาะติดระหว่างอนุภาคแขวนลอยกับฟองอากาศในลักษณะของการกรอง กล่าวคือ ฟองอากาศทำหน้าที่เป็นสารกรองในระบบและมีหน้าที่ดักจับอนุภาคแขวนลอยในน้ำเสีย ประสิทธิภาพการบำบัดของการกรองจึงขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการสัมผัส ( $\eta_T$ ) (สมการที่ 4-6 (Reynolds,1996)) และประสิทธิภาพการเกาะติดหรือ ( $\alpha$ ) ซึ่งกลไกการสัมผัสระหว่างสารกรองกับอนุภาคที่ปนเปื้อนในเฟสน้ำเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ คือ กลไกการแพร่ ( $\eta_D$ , Diffusion) กลไกการดักจับ ( $\eta_I$ , Interception) และกลไกการตกตะกอน ( $\eta_S$ , Sedimentation) (สมการที่ 4-7 4-8 และ 4-9 ตามลำดับ (Reynolds,1996)) และกลไกการเกาะติดสามารถเกิดขึ้นได้ 4 ลักษณะ คือ กลไกการดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption) กลไกการดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption) กลไกแรงดึงดูดระหว่างมวล (London-Van Der Waals Forces) และกลไกการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation)

$$\eta_T = \eta_D + \eta_I + \eta_S \quad (4-6)$$

$$\eta_D = 0.9 \left( \frac{KT}{\mu_c \cdot d_E \cdot d_p \cdot V_{stream}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (4-7)$$

$$\eta_I = \frac{3}{2} \left( \frac{d_E}{d_p} \right)^2 \quad (4-8)$$

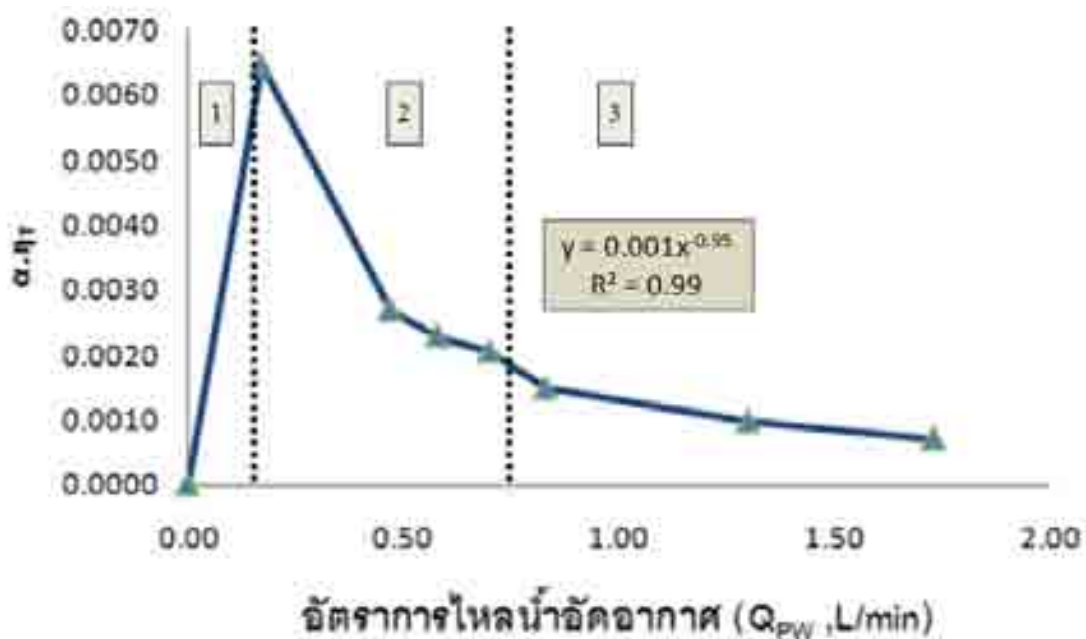
$$\eta_S = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_E^2}{18 \cdot \mu_c \cdot V_{Stream}} \quad (4-9)$$

ในสมการการกรอง ประสิทธิภาพการสัมผัสและเกาะติดของฟองอากาศ 1 ฟอง มีค่าเท่ากับ  $\eta_T \cdot \alpha$  ดังนั้น การหาประสิทธิภาพการบำบัดจึงสามารถหาได้จากการคำนวณประสิทธิภาพการสัมผัสและเกาะติดของฟองอากาศทั้งหมดในระบบด้วยวิธีการอินทิเกรต (Integral method) ผลที่ได้แสดงดังสมการที่ 4-10

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\frac{3}{2} \eta_T \alpha (1 - \varepsilon) \frac{H}{D_B} \quad (4-10)$$

จากสมการที่ 4-10 ตัวแปร  $\varepsilon$  คือ ความพรุนของตัวกลาง ดังนั้น  $1 - \varepsilon$  จึงหมายถึงปริมาตรของตัวกลางหรือฟองอากาศนั่นเอง ในกรณีนี้  $1 - \varepsilon$  จึงมีค่าเท่ากับ  $\frac{Q_g}{Q_{ww} + Q_{pw} + Q_g}$  เมื่อ  $Q_g$  คือ อัตราการไหลอากาศ  $Q_{ww}$  คือ อัตราการไหลน้ำเสีย และ  $Q_{pw}$  คือ อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ และเนื่องจาก  $Q_g$  มีความสัมพันธ์กับ  $Q_{pw}$  ตามสมการของเฮนรี (Henry's law) ดังนั้น สมการการกรองดังกล่าว จึงมีความสัมพันธ์กับปริมาณฟองอากาศและประสิทธิภาพการสัมผัสและเกาะติดของฟองอากาศ

ในการนี้ การทำนายประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ MDAF สามารถทำได้โดยการหา  $\eta_T \cdot \alpha$  ที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ จากนั้นหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $\eta_T \cdot \alpha$  กับ อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ แล้วนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปแทนค่าในสมการการกรอง ดังนั้น สมการการกรองที่ได้จึงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของอัตราการไหลน้ำอัดอากาศหรือปริมาณฟองอากาศ และด้วยสมการการกรองดังกล่าว จะสามารถทำนายประสิทธิภาพการบำบัดที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ ได้ ผลการศึกษา  $\eta_T \cdot \alpha$  ที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4-15



ภาพที่ 4-15 ประสิทธิภาพการสัมผัสและเกาะติดที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศต่างๆ

จากภาพที่ 4-15 แสดงผลการศึกษาค่า  $\eta_T \cdot \alpha$  ที่อัตราการไหลน้ำเสีย 1.2 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นน้ำเสีย 1 กรัมต่อลิตร ความดันเกจควบคุม 4 บาร์ ปริมาณ Alum/oil เท่ากับ 100 มิลลิกรัม  $Al_2(SO_4)_3$  ต่อ 1 กรัมไขมันตัด และเพื่อความง่ายแก่การทำความเข้าใจ จึงทำการแบ่งช่วงการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ค่าอัตราการไหลน้ำอัดอากาศตั้งแต่ 0 ถึง 0.17 ลิตรต่อนาที ช่วงที่ 2 ค่าอัตราการไหลน้ำอัดอากาศตั้งแต่ 0.17 ถึง 0.7 ลิตรต่อนาที และช่วงที่ 3 ค่าอัตราการไหลน้ำอัดอากาศมากกว่า 0.7 ลิตรต่อนาที

จากรูป เมื่อทำการพิจารณาผลการศึกษาดังกล่าวร่วมกับประสิทธิภาพการบำบัดดังภาพที่ 4-6 พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดมีความสัมพันธ์กับ  $\eta_T \cdot \alpha$  และอัตราการไหลน้ำอัดอากาศหรือ 1- $\epsilon$  อย่างแตกต่างกันทั้ง 3 ช่วงอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ (เหมือนภาพที่ 4-6) ผลดังกล่าวอธิบายได้ดังนี้

ช่วงที่ 1 ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าแปรตามค่า  $\eta_T \cdot \alpha$  และค่า 1- $\epsilon$  กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่มปริมาณอากาศจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น ผลดังกล่าวเกิดจาก ระบบมีปริมาณอากาศน้อยกว่าความต้องการ และปริมาณอากาศที่น้อยดังกล่าวยังทำให้ระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ซึ่งค่าความปั่นป่วนมีผลโดยตรงกับ  $\eta_T \cdot \alpha$  ดังนั้น ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าแปรตามค่า  $\eta_T \cdot \alpha$

และค่า  $1-\varepsilon$  และอาจกล่าวได้ว่า ผลในช่วงที่ 1 เกิดจากระบบมีปริมาณอากาศน้อยและอยู่ในช่วงต้องการอากาศสำหรับการบำบัด

ช่วงที่ 2 ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าคงที่ ในขณะที่ค่า  $\eta_T \cdot \alpha$  ลดลงและแปรผกผันกับค่า  $1-\varepsilon$  กล่าวคือ การเพิ่มปริมาณอากาศมีผลให้ค่า  $\eta_T \cdot \alpha$  ลดลง แต่ประสิทธิภาพที่ได้มีค่าคงที่และมีค่าสูงที่สุด ผลดังกล่าวเกิดจาก ระบบมีปริมาณอากาศหรือ  $1-\varepsilon$  และ  $\eta_T \cdot \alpha$  อยู่ในช่วงที่เหมาะสม กล่าวคือ แม้ว่าปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นจะทำให้  $\eta_T \cdot \alpha$  มีค่าลดลง แต่เนื่องจากระบบมีปริมาณอากาศเพิ่มขึ้น จำนวนฟองอากาศที่ผ่านการสัมผัสและเกาะติดด้วยอนุภาคน้ำมันจึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน (เพิ่ม  $\Delta p$ ) ดังนั้น ประสิทธิภาพจึงมีค่าคงที่และสูงที่สุดในสภาวะที่ค่า  $1-\varepsilon$  เพิ่มขึ้นและ  $\eta_T \cdot \alpha$  มีค่าลดลง ในช่วงดังกล่าว

ช่วงที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าแปรผันตามค่า  $\eta_T \cdot \alpha$  แต่แปรผกผันกับค่า  $1-\varepsilon$  กล่าวคือ การเพิ่มปริมาณอากาศหรือ  $1-\varepsilon$  มีผลให้ค่า  $\eta_T \cdot \alpha$  และประสิทธิภาพการบำบัดลดลง ผลดังกล่าวเกิดจาก ระบบอยู่ในช่วงของปริมาณอากาศมีค่าเกินความเหมาะสม กล่าวคือ โดยปกติ การเพิ่มปริมาณอากาศทำให้ค่า  $\eta_T \cdot \alpha$  ลดลง (ค่าความปั่นป่วนแปรผันตามอัตราความเร็วไหลอากาศ ดังภาพที่ 4-10) และระบบสามารถบำบัดน้ำเสียได้ก็ต่อเมื่อทั้ง 2 ค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แต่ในกรณีนี้ ปริมาณอากาศมีผลให้  $\eta_T \cdot \alpha$  ลดลงมากเกินไป ประสิทธิภาพที่ได้จึงลดลง

นอกจากนี้ จากภาพที่ 4-15 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\eta_T \cdot \alpha$  กับอัตราการไหลน้ำอัดอากาศ ( $Q_{PW}$ ) คือ

$$\eta_T \cdot \alpha = 0.001Q_{PW}^{-0.95} \quad (4-11)$$

และ จาก  $1-\varepsilon$  จึงมีค่าเท่ากับ  $\frac{Q_g}{Q_{WW} + Q_{PW} + Q_g}$  ซึ่ง  $Q_g$  มีความสัมพันธ์กับ  $Q_{PW}$  ตามสมการของเฮนรี คือ

$$Q_g = Q_{PW} \frac{C_{air}}{\rho_{air}} \quad (4-12)$$

เมื่อ  $C_{air}$  คือ ความเข้มข้นอากาศที่ได้จากน้ำอัดอากาศ (กรัมต่อลิตร) ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันด้วยปัจจัย 2 อย่าง คือ ความดันเกจที่ใช้เดินระบบน้ำอัดอากาศ และตามประสิทธิภาพ

การละลายของอากาศ ซึ่งในขั้นนี้ สมมติให้อากาศสามารถละลายในน้ำได้ 100 เปอร์เซ็นต์ หรือละลายได้เท่ากับผลการคำนวณด้วยสมการของเฮนรี จะได้ว่า

$$C_{air} = K_H \cdot \bar{P} \cdot MW \quad (4-13)$$

เมื่อ  $K_H$  คือ ค่าคงที่ของเฮนรี (โมลต่อลิตรต่อบาร์)

$P$  คือ สัดส่วนความดัน (Partial Pressure)

$MW$  คือ มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)

จากสมการที่ 4-13 เมื่อสมมติให้บรรยากาศประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจน 80 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซออกซิเจน 20 เปอร์เซ็นต์ จะได้ว่า

$$C_{air} = P[K_{H,N_2}(0.8)(28) + K_{H,O_2}(0.2)(32)] \quad (4-14)$$

เมื่อ  $P$  คือ ความดันเกจที่ใช้ควบคุมระบบ DAF (บาร์)

ทำการแทนค่าสมการที่ 4-3 ด้วยสมการที่ 4-5 จะได้

$$Q_g = \frac{Q_{PW}P}{\rho_{air}} [22.4K_{H,N_2} + 6.4K_{H,O_2}] \quad (4-15)$$

จากนั้นทำการแทนค่าสมการที่ 4-10 ด้วยสมการ 4-11 และ 4-15 จะได้

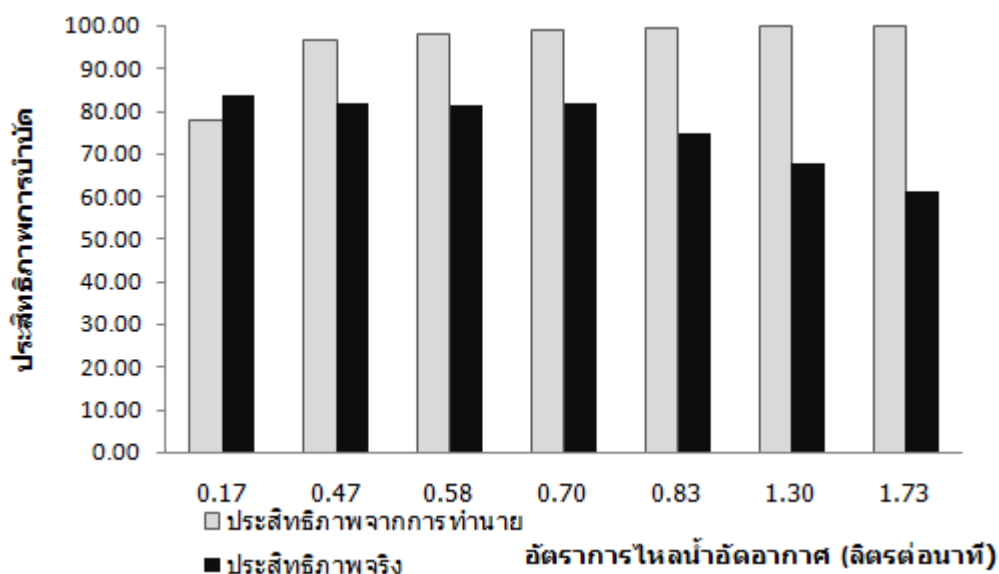
$$\ln \frac{C}{C_0} = -\frac{3}{2} (0.001Q_{PW}^{-0.95}) \left( \frac{\frac{Q_{PW}P}{\rho_{air}} [22.4K_{H,N_2} + 6.4K_{H,O_2}]}{Q_{WW} + Q_{PW} + Q_g} \right) \frac{H}{D_B} \quad (4-16)$$

หรือกรณีที่  $Q_g$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $Q_{WW}$  และ  $Q_{PW}$  จะได้

$$\ln \frac{C}{C_0} = -0.0015Q_{PW}^{0.05} \frac{P}{\rho_{air}} \left[ \frac{(22.4K_{H,N_2} + 6.4K_{H,O_2})}{Q_{WW} + Q_{PW}} \right] \frac{H}{D_B} \quad (4-17)$$

จากสมการที่ 4-17 สามารถใช้สมการดังกล่าวเพื่อทำนายประสิทธิภาพการบำบัดที่อัตราการไหลอากาศ และความดันเกจควบคุมใดๆได้ ซึ่งในขั้นนี้ จะทำการเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพ

การบำบัดที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.17 0.47 0.58 0.70 0.83 1.30 และ 1.73 ลิตรต่อนาที และมีความดันเกจควบคุม 4 บาร์ ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4-16



ภาพที่ 4-16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดกับประสิทธิภาพจากการทำนาย

จากภาพที่ 4-16 พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทำนายจะแปรผันตามอัตราการไหลน้ำอัดอากาศหรือ  $Q_{PW}$  ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า น่าจะเป็นผลมาจากปริมาณสารกรอง (จำนวนฟองอากาศ) ในระบบที่เพิ่มมากขึ้นหรือแปรผันตาม  $Q_{PW}$  ทำให้ค่าความพรุน (Porosity,  $\epsilon$ ) ลดลงและส่งผลต่อการเพิ่มสูงขึ้นของประสิทธิภาพการกรอง (บำบัด) โดยรวม

นอกจากนี้ เมื่อเทียบผลการทำนายประสิทธิภาพกับผลทดลองพบว่า มีค่าใกล้เคียงกันที่  $Q_{PW}$  ต่ำกว่า 0.7 ลิตรต่อนาที (มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์) นอกจากนี้ ที่ปริมาณสารกรองหรือ  $Q_{PW}$  เท่ากับ 0 ผลการทำนายจะเท่ากับ 0 เช่นกัน ซึ่งผลดังกล่าวต่างจากการทดลองจริง กล่าวคือ ที่  $Q_{PW}$  เท่ากับ 0 ระบบจะบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและได้ประสิทธิภาพมากกว่า 0 ผลดังกล่าวแสดงถึงข้อจำกัดบางประการของการทำนายประสิทธิภาพด้วยสมการการกรอง กล่าวคือ สมการการกรองที่ใช้ยังไม่สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลและค่าสัดส่วน A/S ที่มีต่อประสิทธิภาพการสัมผัสและเกาะติดหรือ  $\eta_{t,\alpha}$  ได้รวมไปถึง ผลจากการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันหรือกรณีไม่มีสารกรองในระบบ

อย่างไรก็ตาม จากการสังเกตพบว่า มีปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์คือการรวมตัวของฟองอากาศ (Bubble coalescence phenomena) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ค่า  $Q_{PW}$

สูงขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการเพิ่มสูงขึ้นของเทอมความพูน ( $\epsilon$ ) รวมไปถึงสามารถทำนาย ผลลัพธ์ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองยิ่งขึ้น ดังนั้น จึงควรวิเคราะห์ลักษณะของฟองอากาศโดยละเอียด (ขนาด และการกระจาย) เนื่องจากมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจถึงกลไกการบำบัด และสามารถนำเสนอโมเดลหรือสมการทำนายประสิทธิภาพได้ใกล้เคียงผลการทดลองจริงมากยิ่งขึ้น

ผลการศึกษาในขั้นนี้สรุปได้ว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้สมการการกรองเพื่อทำนาย ประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ DAF หรือ MDAF อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดในส่วนของ การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $\eta_T \cdot \alpha$  กับตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลและค่าสัดส่วน A/S รวมไปถึงข้อจำกัดในการอธิบายความสามารถของการบำบัดกรณีไม่มีสารกรองในระบบ (กระบวนการโคแอกกูเลชัน)

#### 4.4.2 การประยุกต์ใช้สมการการดูดซับ (Adsorption model) ในการทำนาย ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ

##### 4.4.2.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ Adsorption เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงอนุภาคหรือมลสาร ในเฟสของไหล (ของเหลวหรืออากาศ) มาติดบนผิว โดยเรียกดัวยกลางที่ทำหน้าที่ดูดซับว่า “สารดูดซับ (Adsorbate)” และเรียกมลสารที่ถูกดูดซับว่า “สารดูดซับ (Adsorbent)” ทั้งนี้ กลไกการดูดซับ ประกอบด้วย 2 กลไกที่สำคัญ คือ กลไกการเคลื่อนย้ายมวลสารมายังพื้นผิวดูดซับหรือการสัมผัส (Transport Mechanism) และกลไกการดูดซับหรือการเกาะติด (Adsorption Mechanism) กล่าวคือ กลไกการเคลื่อนย้ายมวลสารประกอบด้วย 3 กลไกหลักเช่นเดียวกับกระบวนการกรอง คือ กลไกการแพร่ ( $\eta_D$ , Diffusion) กลไกการดักจับ ( $\eta_I$ , Interception) และกลไกการตกตะกอน ( $\eta_S$ , Sedimentation) และในส่วนของกลไกการดูดซับประกอบด้วย 2 กลไกหลัก คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical-sorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical-sorption)

$$q_e = \frac{V \cdot (C_0 - C_s)}{m} \quad (4-18)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ความสามารถในการดูดซับของตัวกลางดูดซับ (Adsorption Capacity)

- V คือ ปริมาตรของของน้ำเสียที่ใช้ทดลอง (ลิตร)
- $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย (กรัมต่อลิตร)
- $C_s$  คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของน้ำเสีย (กรัมต่อลิตร)

โดยทั่วไป สมการการดูดซับสามารถประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายลักษณะการดูดติดผิวของมลสารบนตัวกลางดูดซับและเพื่อทำนายประสิทธิภาพการดูดซับที่ปริมาณตัวกลางดูดซับและปริมาณมลสารใดๆได้ โดยการเดินระบบแบบทีละเท (Batch system) ด้วยอุณหภูมิคงที่ ที่ปริมาณมลสารหรือปริมาณตัวกลางดูดซับต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับของตัวกลางหรือ  $q_e$  (Adsorption capacity) กับความเข้มข้นน้ำเสียที่สภาวะสมดุลหรือ  $C_s$  (Equilibrium concentration) ด้วยสมการ 4-18 อนึ่ง ความเข้มข้นน้ำเสียที่สภาวะสมดุลหมายถึงสภาวะที่ตัวกลางดูดซับมีอัตราการดูดซับมลสารเท่ากับอัตราการคายมลสารหรือหมายถึงสภาวะที่ตัวกลางมีอัตราการดูดซับมลสารคงที่ และเรียกความสัมพันธ์ดังกล่าวว่า เส้นสมดุล (Equilibrium Line) หรือเส้นไอโซเทอม (Adsorption Isotherm) จากนั้นจึงประยุกต์ใช้แบบจำลองสมดุลการดูดซับเพื่ออธิบายลักษณะการดูดติดผิวของมลสารและการทำนายประสิทธิภาพการดูดซับแบบจำลองสมดุลการดูดซับในเฟสของเหลวที่ได้รับความนิยม มีดังนี้

#### 1) แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี (Henry's Isotherm)

แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี ใช้อธิบายลักษณะการดูดซับเมื่อความสามารถในการดูดซับของตัวกลาง ( $q_e$ ) มีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นของน้ำเสียที่สภาวะสมดุล แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี แสดงดังสมการที่ 4-19

$$q_e = K_H C_s \quad (4-19)$$

เมื่อ  $K_H$  คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของเฮนรี

#### 2) แบบจำลองการดูดซับของแลงมัวร์ (Langmuir's Isotherm)

แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงมัวร์ ใช้อธิบายลักษณะการดูดซับเมื่อโมเลกุลถูกดูดซับอยู่ ณ บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ โดยมีโมเลกุลเดี่ยวหรือชั้นเดียวในบริเวณถูกดูดซับ (Mono-layer) รวมถึงพลังงานการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า



ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับการดูดซับทางเคมีหรือ Chemical-sorption แบบจำลอง สมดุลดูดซับของแลงมัวร์ แสดงดังสมการที่ 4-20

$$q_e = \frac{q_{\max} \cdot K_L \cdot C_s}{1 + K_L \cdot C_s} \quad (4-20)$$

เมื่อ  $q_{\max}$  คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของตัวกลางดูดซับ

$K_L$  คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของแลงมัวร์

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงมัวร์จะมีลักษณะการดูดติดผิวแบบสมดุลดูดซับของเฮนรีเมื่อความเข้มข้นของมลสารในของเหลวมีค่าน้อยมากๆ ผลดังกล่าวแสดงดังสมการ 4-21

$${}_c \lim_{0} q = \lim_{0} \left( \frac{q_{\max} \cdot K_L \cdot C_s}{1 + K_L \cdot C_s} \right) = q_{\max} \cdot K_L \cdot C_s \quad (4-21)$$

จากสมการที่ 4-21 ค่า  $q_{\max} \cdot K_L$  จะมีค่าเท่ากับค่า  $K_H$  ในแบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี

การประยุกต์ใช้สมการแลงมัวร์เพื่ออธิบายลักษณะการดูดติดผิวของมลสารและการทำนายประสิทธิภาพสามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้สมการที่ 4-22

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max} \cdot K_L \cdot C_s} \quad (4-22)$$

จากสมการที่ 4-22 เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/q_e$  (แกนตั้ง) กับ  $1/C_s$  (แกนนอน) ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และสามารถบอกลักษณะการดูดติดผิวของมลสารภายใต้สมมติฐานของแลงมัวร์จากค่าความเป็นเส้นตรงหรือ  $R^2$  ของเส้นความสัมพันธ์ดังกล่าว นอกจากนี้ จากความสัมพันธ์ดังกล่าว เมื่อทราบค่าคงที่ของสมการ กล่าวคือ ค่าคงที่  $q_{\max}$  และ  $K_L$  จะสามารถใช้ค่าดังกล่าวทำนายประสิทธิภาพการดูดซับได้ โดยสามารถหาค่าคงที่  $q_{\max}$  ได้จากจุดตัดแกนตั้งและ  $K_L$  ได้จากค่าความชันของเส้นตรง (Reynolds, 1996)

### 3) แบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's Isotherm)

แบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดลิช ใช้อธิบายลักษณะการดูดซับเมื่อโมเลกุลเกิดการดูดซับบนผิวตัวกลางได้หลายโมเลกุลหรือหลายชั้น (Multi-layer) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกลไกการดูด

ชั้นทางกายภาพหรือ Physical-sorption แบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรอนดลิชแสดงดังสมการที่ 4-23

$$q_e = K_F \cdot C_s^n \quad (4-23)$$

เมื่อ  $K_F$  คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของฟรอนดลิช

$n$  คือ ค่าดัชนีชี้กำลังของแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบฟรอนดลิช

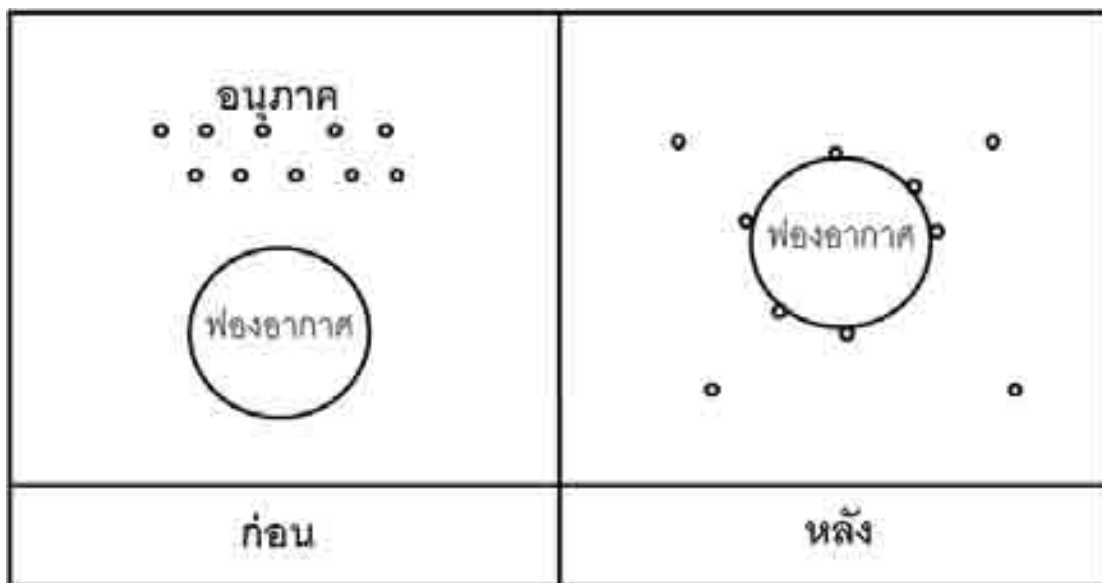
จากสมการที่ 4-23 สมการการดูดซับของฟรอนดลิชจะมีลักษณะการดูดซับตามแบบจำลองของเฮนรีเมื่อค่า  $n$  มีค่าใกล้เคียง 1 และสามารถประยุกต์ใช้สมการการดูดซับของฟรอนดลิชเพื่ออธิบายลักษณะการดูดซับของมลสารและการทำนายประสิทธิภาพการดูดซับได้โดยการประยุกต์ใช้สมการที่ 4-24

$$\ln q_e = \ln K_F + n \ln C_s \quad (4-24)$$

จากสมการที่ 4-24 เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln q_e$  (แกนตั้ง) กับ  $\ln C_s$  (แกนนอน) ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และสามารถบอกลักษณะการดูดซับของมลสารภายใต้สมมติฐานของฟรอนดลิชได้จากความเป็นเส้นตรงหรือ  $R^2$  ของเส้นตรงดังกล่าว นอกจากนี้เมื่อทราบค่าคงที่ของสมการ กล่าวคือ ค่าคงที่  $n$  และ  $K_F$  จะสามารถใช้ค่าดังกล่าวทำนายประสิทธิภาพการดูดซับ โดยค่าคงที่  $n$  หาได้จากจุดตัดแกนตั้งและ  $K_F$  หาได้จากค่าความชันของเส้นตรง (Reynolds, 1996)

#### 4.4.2.2 การประยุกต์ใช้สมการการดูดซับในกระบวนการ DAF

ในที่นี้ จะทำการประยุกต์สมการการดูดซับเพื่อศึกษากลไกการสัมผัสและเกาะติดระหว่างมลสารในน้ำเสียกับฟองอากาศ และเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยแบบจำลองการดูดซับ กล่าวคือ ภายใต้สมมติฐานการดูดซับของกระบวนการ DAF ฟองอากาศจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางดูดซับ (Adsorbate) และมลสารในน้ำเสียคือตัวถูกดูดซับ (Adsorbent) (ดังภาพที่ 4-17) ทั้งนี้ เนื่องจากกระบวนการ DAF มีการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) ดังนั้น การคำนวณความสามารถในการดูดซับ ( $q_e$ ) เพื่อศึกษาไอโซเทอมของกระบวนการ DAF จึงถูกประยุกต์ใช้จากสมการที่ 4-18 เป็นสมการที่ 4-25 โดยมีข้อจำกัดคือใช้สำหรับการศึกษาหรือเปรียบเทียบที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่เดียวกัน



ภาพที่ 4-17 แสดงลักษณะการเกาะติดผิวของอนภาคบนผิวฟองอากาศ

$$q_e = \frac{Q_{ww} C_0 - Q_{mix} C_t}{Q_{pw} C_{air}} = \frac{\Delta S}{A} \quad (4-25)$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นน้ำเสียก่อนเข้าระบบ DAF

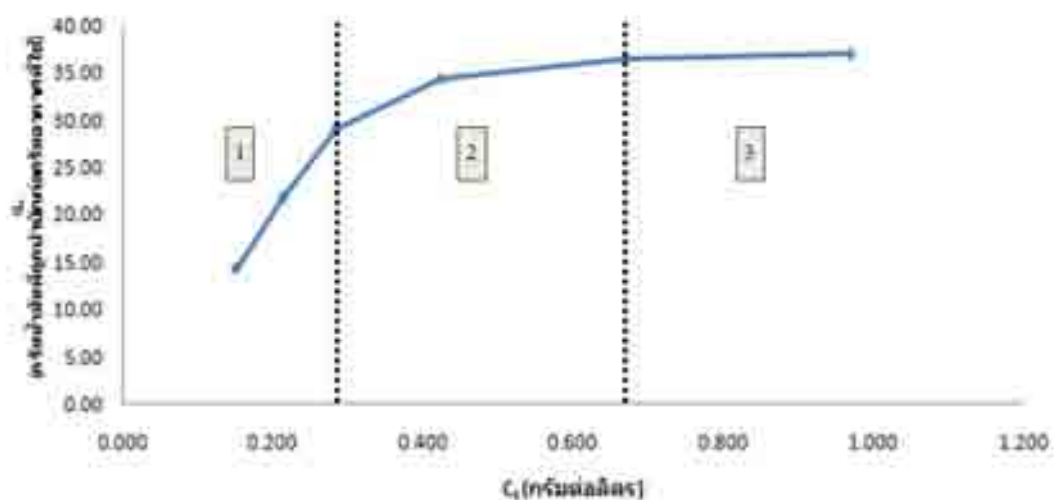
$C_t$  คือ ความเข้มข้นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ DAF ที่ระยะเวลาที่ต่างกัน

$Q_{mix}$  คือ อัตราการไหลรวมซึ่งมีค่าเท่ากับ  $Q_{ww} + Q_{pw}$

จากสมการที่ 4-25 ความสามารถในการดูดซับหรือ  $q_e$  ที่คำนวณได้จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะที่ระยะเวลากักใดๆของกระบวนการ DAF นอกจากนี้  $q_e$  ที่คำนวณได้จะมีค่าเท่ากับ  $\Delta S/A$  หรืออาจกล่าวได้ว่า  $1/q_e$  มีค่าเท่ากับ  $A/\Delta S$  ซึ่งผลดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่าสัดส่วน  $A/S$  ที่ได้กล่าวในข้างต้นในหัวข้อ 4.3.2 กล่าวคือ การหาความสามารถในการดูดซับหรือไอโซเทอมการดูดซับของกระบวนการ DAF คือการหาค่าสัดส่วนปริมาณอากาศหรือ  $A$  ที่เหมาะสมกับปริมาณมลสารที่ถูกบำบัดหรือ  $\Delta S$  ( $Q \cdot \Delta C$ ) ในทางกลับกัน การหาค่าสัดส่วน  $A/S$  ในหัวข้อ 4.3.2 จะหมายถึงปริมาณอากาศที่เหมาะสมกับมลสารทั้งหมดที่อยู่ในน้ำเสียหรือ  $Q \cdot C_0$

#### 4.4.2.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมของกระบวนการ MDAF

ในขั้นนี้ ทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของกระบวนการ MDAF ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q_e$  ( $\Delta S/A$ ) ที่  $C_t$  ใดๆ (สมการที่ 4-25) โดยมีอุณหภูมิน้ำเสีย  $30 \pm 3$  องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ สัดส่วนปริมาณ Alum/oil เท่ากับ 100 มิลลิกรัม  $Al_2(SO_4)_3$  ต่อ 1 กรัม น้ำมันตัด ความดันเกจควบคุม 4 บาร์ อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.7 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำเสีย 1.2 ลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นน้ำเสีย 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5 กรัมต่อลิตร-น้ำมันตัด ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4-18



ภาพที่ 4-18 ไอโซเทอมการดูดซับของกระบวนการ MDAF

จากภาพที่ 4-18 ลักษณะของเส้นไอโซเทอมที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงตามลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_e$  และ  $C_t$  ที่ต่างกัน กล่าวคือ ช่วงที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_e$  และ  $C_t$  มีลักษณะเป็นเส้นตรง ช่วงที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_e$  และ  $C_t$  มีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งคว่ำที่มีค่าความชันของเส้นโค้งลดลงเรื่อยๆ อยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 0 และช่วงที่ 3 คือ ส่วนที่ความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_e$  และ  $C_t$  มีลักษณะเป็นเส้นตรงขนานแกนราบหรือมีความชันเท่ากับ 0 ผลดังกล่าวเกิดจาก ความสามารถในการเกาะติดผิวหรือ  $q_e$  ของฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับปริมาณพื้นที่ผิวดูดซับและความเข้มข้นน้ำเสีย (ตามสมการที่ 4-25) กล่าวคือ การเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวดูดซับและความเข้มข้นน้ำเสียเป็นการเพิ่มโอกาสการสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคมลสารในน้ำเสีย นอกจากนี้ ปริมาณความเข้มข้นของน้ำเสียที่แตกต่างกันส่งผลต่อแรงขับเคลื่อน (Diving force) ระหว่างเฟสน้ำเสียกับเฟสฟองอากาศที่แตกต่างกัน กล่าวคือ แรงขับเคลื่อนมีค่าแปร

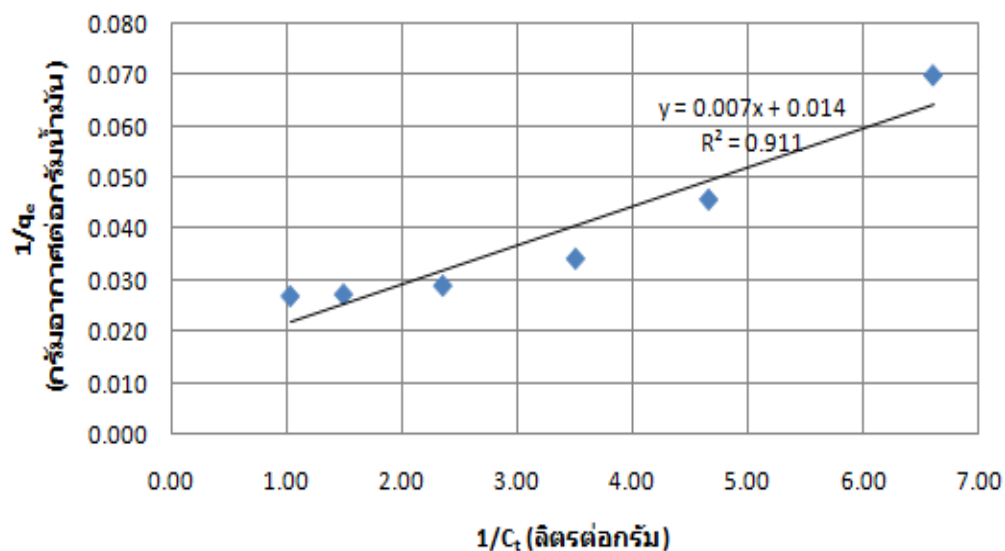
ผันตรงกับความเข้มข้นน้ำเสีย จึงแปรผันตรงกับการสร้างโอกาสการสัมผัสระหว่างอนุภาคน้ำมันกับอากาศ ซึ่งลักษณะของเส้นไอโซเทอมที่เกิดขึ้นทั้ง 3 ช่วงดังกล่าว สามารถอธิบายได้ดังนี้

ช่วงที่ 1 ความสามารถในการเกาะติดของฟองอากาศโดนจำกัดด้วยปริมาณความเข้มข้นของน้ำเสีย กล่าวคือ เนื่องจากความเข้มข้นน้ำเสียในช่วงนี้มีค่าต่ำ ระบบจึงมีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับหรือมีปริมาณฟองอากาศมากกว่าความต้องการของน้ำเสีย และเนื่องจากน้ำเสียมีแรงขับเคลื่อนต่ำ (แปรผันตามความเข้มข้นน้ำเสีย) จึงเป็นการลดโอกาสการสัมผัสระหว่างอนุภาคน้ำมันกับฟองอากาศ ในทางกลับกัน การเพิ่มความเข้มข้นน้ำเสียในช่วงนี้จึงเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนและเพิ่มโอกาสการสัมผัสระหว่างอนุภาคน้ำมันกับฟองอากาศ ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับของช่วงที่ 1 จึงเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นน้ำเสียด้วยอัตราที่คงที่

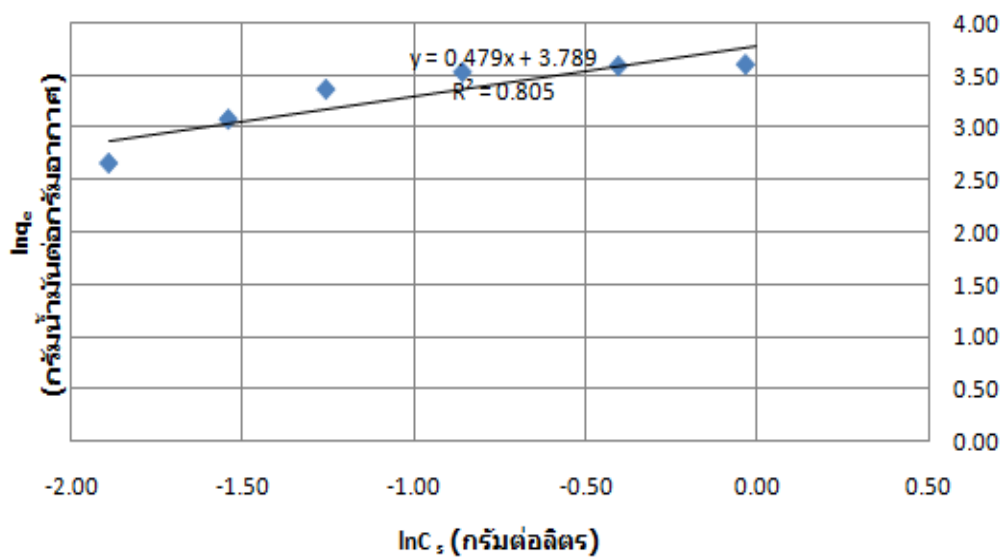
ช่วงที่ 2 ความสามารถในการเกาะติดของฟองอากาศเริ่มโดนจำกัดด้วยปริมาณพื้นที่ผิวดูดซับ กล่าวคือ ความเข้มข้นน้ำเสียในช่วงนี้มีค่าสูงเกินกว่าที่ระบบจะดูดซับได้ทั้งหมด แต่เนื่องจากแรงขับเคลื่อนสูงสามารถเพิ่มโอกาสการสัมผัสระหว่างอนุภาคน้ำมันกับฟองอากาศ ความสามารถในการดูดซับของระบบจึงยังคงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นดังกล่าวจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนถึงระดับที่การเพิ่มความเข้มข้นน้ำเสียไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับได้อีกแล้ว

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่กลไกการเกาะติดระหว่างอนุภาคน้ำมันและฟองอากาศโดนจำกัดด้วยความเข้มข้นน้ำเสียที่มากเกินไปและพื้นที่ผิวสัมผัสที่น้อยเกินไป กล่าวคือ ความเข้มข้นน้ำเสียในช่วงนี้มีค่าสูงเกินกว่าที่ระบบจะดูดซับได้ทั้งหมด และการเพิ่มแรงขับเคลื่อนไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับได้อีกแล้ว ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับจึงมีค่าคงที่ในทุกๆ ค่าความเข้มข้นน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น

จากความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับของกระบวนการ DAF ดังภาพที่ 4-18 ทำการประยุกต์ด้วยแบบจำลองการดูดซับของแลงมัวร์ และฟรุนดลิช ได้ดังนี้



ภาพที่ 4-19 แบบจำลองการดูดซับของแลงมัวร์



ภาพที่ 4-20 แบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช

จากภาพที่ 4-19 พบว่า ค่า  $R^2$  ของแบบจำลองแลงมัวร์มีค่าเท่ากับ 0.911 และจะได้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ( $q_{max}$ ) และค่าคงที่การดูดซับของแลงมัวร์ ( $K_L$ ) เท่ากับ 71.43 กรัมไขมันตต่อกรัมอากาศ และ 2 ลิตรต่อกรัม ตามลำดับ

จากภาพที่ 4-20 พบว่าค่า  $R^2$  ของแบบจำลองฟรุนดลิชมีค่าเท่ากับ 0.805 และจะได้ค่าคงที่การดูดซับของฟรุนดลิช ( $K_F$ ) และค่าดัชนีชี้กำลังของแบบจำลองฟรุนดลิช ( $n$ ) เท่ากับ 44.2 กรัม/น้ำมันต่อกรัมอากาศ และ 0.479 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4-18 และ 4-19 พบว่า  $R^2$  ของแบบจำลองแลงมัวร์มีค่าสูงกว่าแบบจำลองฟรุนดลิช ผลดังกล่าวอาจสรุปได้ว่ากลไกการเกาะติดระหว่างอนุภาคน้ำมันและฟองอากาศของกระบวนการ MDAF มีลักษณะตามสมมติฐานของแลงมัวร์ และอาจกล่าวได้ว่า ช่วงที่ 1 ของเส้นไอโซเทอมเกิดการดูดซับตามสมมติฐานของเฮนรี ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 4-21 กล่าวคือแบบจำลองของแลงมัวร์มีแนวโน้มของการดูดซับตามแบบจำลองของเฮนรีที่ความเข้มข้นต่ำๆ

จากผลการศึกษาข้างต้นอาจกล่าวได้ว่า การประยุกต์ใช้ค่าความสามารถในการดูดซับซึ่งสอดคล้องกับค่าสัดส่วน A/S ในกระบวนการ DAF ควรใช้ค่าในช่วงที่ 2 สำหรับการออกแบบปริมาณอากาศที่เหมาะสมกับความเข้มข้นน้ำเสียและควรเดินระบบที่ความเข้มข้นน้ำเสียมากกว่า 2.0 กรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นช่วงที่ระบบมีปริมาณอากาศและแรงขับเคลื่อนที่เหมาะสมและเพียงพอต่อกระบวนการดูดซับ กล่าวคือ ค่าความสามารถในการดูดซับควรอยู่ในช่วงประมาณ 30 ถึง 35 กรัม-น้ำมันตักที่ถูกกำจัดต่อกรัม-อากาศที่ใช้ หรือเท่ากับ 0.028 ถึง 0.033 กรัม-อากาศที่ใช้ต่อกรัม-น้ำมันตักที่ถูกบำบัด และเมื่อเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับค่า สัดส่วน A/S ที่เหมาะสมจากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.3.2 คือ 0.024 ถึง 0.052 กรัม -อากาศที่ต้องการต่อกรัม-น้ำมันตัก เริ่มต้นพบว่าค่าดังกล่าวใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ควรศึกษาและเปรียบเทียบผลการบำบัดด้วยค่าสัดส่วนดังกล่าว (ทั้ง 2 อย่าง) ที่สภาวะต่างๆ เพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการ DAF หรือ MDAF

#### 4.4.2.4 ผลการศึกษาการทำนายประสิทธิภาพด้วยสมการการดูดซับ

จากการศึกษาข้างต้นพบว่าลักษณะการเกาะติดของฟองอากาศกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตักเป็นไปตามแบบจำลองของแลงมัวร์ ซึ่งสามารถใช้ค่าคงที่แลงมัวร์ในการคำนวณหาความต้องการของตัวกลางดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นสุดท้ายต่างๆได้ ด้วยสมการที่ 4-26

$$q_e = \frac{Q_{ww} C_0 - Q_{mix} C_t}{Q_{pw} C_{air}} = \frac{q_{max} \cdot K_L \cdot C_t}{1 + K_L \cdot C_t} \quad (4-26)$$

หรืออาจทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นและปริมาณอากาศใดๆได้ อย่างไรก็ตาม การทำนายด้วยวิธีดังกล่าวจะเกิดความยุ่งยากใน

การแก้สมการ ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัด จึงทำการประยุกต์ใช้วิธีทางกราฟ (Graphical method) เพื่อหาความเข้มข้นสุดท้ายของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและการทำนายประสิทธิภาพ ได้ดังนี้

จากสมการที่ 4-25 ทำการจัดรูปให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราการไหลรวม ( $Q_{mix}$ ) ความเข้มข้นรวมก่อนการบำบัด ( $C_{mix,0}$ ) ความเข้มข้นรวมหลังการบำบัด ( $C_t$ ) และปริมาณอากาศ ( $Q_g$  หรือ  $Q_{PW} \cdot C_{air}$ ) ดังสมการที่ 4-27

$$q_e = -\frac{Q_{mix}}{Q_{PW} \cdot C_{air}} (C_t - C_{mix,0}) \quad (4-27)$$

เมื่อ

$$Q_{mix} = Q_{ww} + Q_{PW} \quad (4-28)$$

และ

$$C_{mix,0} = \frac{Q_{ww} \cdot C_0}{Q_{mix}} \quad (4-29)$$

จากสมการที่ 4-27 สามารถนำมาประยุกต์เพื่อหาความเข้มข้นน้ำมันตัดที่ผ่านการบำบัด โดยเริ่มต้นจากการสร้างกราฟไอโซเทอม จากนั้นลากเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $-\frac{Q_{mix}}{Q_{PW} \cdot C_{air}}$  จากจุด  $x = C_{mix,0}$  ไปตัดเส้นกราฟไอโซเทอม ซึ่ง ณ จุดตัดดังกล่าวจะได้ค่าความเข้มข้นน้ำมันตัดที่ผ่านการบำบัด (แกน x) ซึ่งสามารถนำค่าดังกล่าวมาคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดได้ด้วยสมการที่ 4-30

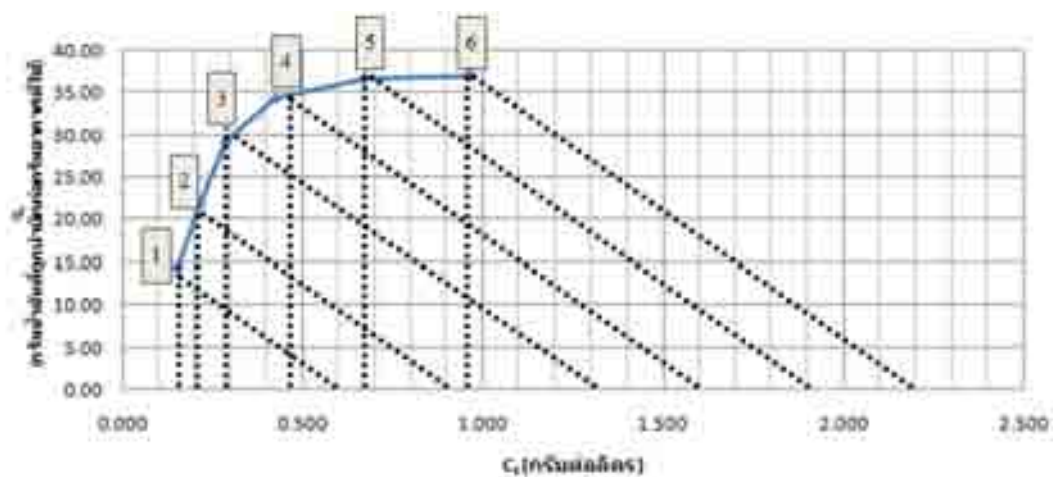
$$\% \text{ remove} = \frac{(C_{mix,0} - C_t)}{C_{mix,0}} \times 100 \quad (4-30)$$

ในขั้นนี้ ทำการทำนายประสิทธิภาพการดูดซับของกระบวนการ MDAF และเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดที่เกิดขึ้นจริง โดยมีอุณหภูมิน้ำเสีย  $30 \pm 3$  องศาเซลเซียส ระยะเวลาพัก 4 นาที สัดส่วนปริมาณ Alum/oil เท่ากับ 100 มิลลิกรัม  $Al_2(SO_4)_3$  ต่อ 1 กรัม น้ำมันตัด ความดันเกจควบคุม 4 บาร์ อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.7 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำเสีย 1.2 ลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นน้ำเสีย 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5 กรัม น้ำมันตัดต่อลิตร ทั้งนี้ การทำนาย

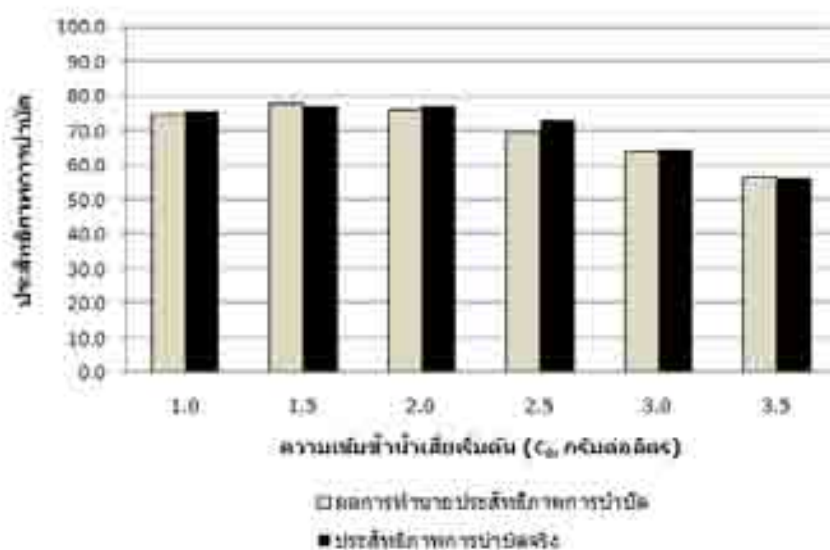


ความเข้มข้นน้ำมันตัดที่ผ่านการบำบัด และการเปรียบเทียบผลการทำนายประสิทธิภาพการบำบัด กับประสิทธิภาพการบำบัดจริง แสดงดังภาพที่ 4-21 และ 4-22 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4-21 หมายเลข 1 2 3 4 5 และ 6 แสดงการทำนายความเข้มข้นน้ำมันตัดที่ผ่านการบำบัด ณ ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5 กรัม/น้ำมันตัดต่อลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 4-21 การทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยสมการการดูดซับ



ภาพที่ 4-22 เปรียบเทียบผลการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดกับประสิทธิภาพการบำบัดจริงที่ความเข้มข้นน้ำเสียต่างๆ

จากภาพที่ 4-21 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทำนายด้วยสมการการดูดซับ มีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการบำบัดจริง กล่าวคือ มีค่าความคาดเคลื่อนน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ในทุกๆค่าความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น และเมื่อเปรียบเทียบกับการทำนายด้วยสมการการกรองพบว่า การประยุกต์ใช้สมการการดูดซับให้ผลการทำนายที่แม่นยำกว่าการใช้สมการการกรอง ดังนั้น การใช้สมการการดูดซับเพื่อทำนายประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ MDAF จึงมีความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงและเหมาะสมต่อการพัฒนาสมการเพื่อการอธิบายและทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการ DAF ต่อไปในอนาคต

อย่างไรก็ตาม การใช้สมการดูดซับเพื่อการทำนายมีข้อจำกัดบางประการ กล่าวคือ ด้วยลักษณะของสมการการดูดซับซึ่งมีความจำเพาะที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใดๆ การประยุกต์ใช้สมการดังกล่าวจึงควรศึกษาและทดสอบด้วยชนิดของน้ำเสียและถึงปฏิกิริยาที่สภาวะจริง นอกจากนี้ ยังพบข้อจำกัดเช่นเดียวกับแบบจำลองการกรอง กล่าวคือ ที่สภาวะไร้อากาศหรือไม่ มีฟองอากาศในระบบประสิทธิภาพจากการทำนายจะเท่ากับ 0 แต่จากการทดลองจริง ณ สภาวะดังกล่าวระบบจะบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 0

ผลการศึกษาในขั้นนี้สรุปได้ว่า การใช้สมการการดูดซับเพื่ออธิบายและทำนายประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ DAF หรือ MDAF มีความเป็นไปได้ในการใช้งาน และเมื่อเปรียบเทียบกับการทำนายประสิทธิภาพด้วยสมการการกรองพบว่ามีความแม่นยำกว่า อย่างไรก็ตาม เพื่อความถูกต้องของการประยุกต์ใช้งาน ควรทำการศึกษาที่ช่วงของความเข้มข้นหรือปริมาณอากาศที่กว้างกว่าการศึกษาในงานวิจัยนี้

จากการศึกษาที่ผ่านมาจนถึงขั้นนี้ สามารถสรุปได้ว่า การออกแบบและเดินระบบ DAF มีตัวแปรที่สำคัญต่อกระบวนการบำบัด ซึ่งสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภทคือ ตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับถึงปฏิกิริยาหรือการออกแบบถึงปฏิกิริยา ได้แก่ ตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล (ตารางที่ 4-2) และตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสีย ได้แก่ ความต้องการของปริมาณสารโคแอกกูแลนต์สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน และค่าสัดส่วน A/S (ตารางที่ 4-3)

ตารางที่ 4-2 ตัวแปรการออกแบบถังปฏิกรณ์

ตัวแปรการออกแบบ	ค่าการออกแบบ
ความดันอากาศ (เกจ)	4 บาร์
G	15-25 วินาที <sup>-1</sup>
G.T	5500 วินาทีต่อวินาที
OFR	0.15 - 0.25 เมตรต่อนาที

ตารางที่ 4-3 ตัวแปรการออกแบบตามชนิดของน้ำเสีย (น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด)

ตัวแปรการออกแบบ	ค่าการออกแบบ
ค่าสัดส่วนปริมาณ Alum ที่เหมาะสมกับน้ำมันตัด (Alum/oil)	100 มก. $Al_2(SO_4)_3$ ต่อกรัม-น้ำมันตัด
$A/S_{Metcalf\ and\ Eddy}$	0.024 - 0.052 กรัม-อากาศต่อกรัม-น้ำมันตัด
$A/\Delta S_{Adsorption\ model}$	0.028 - 0.033 กรัม-อากาศต่อกรัม-น้ำมันตัด

อย่างไรก็ตาม เพื่อการเข้าใจถึงกลไกการบำบัดด้วยกระบวนการ DAF มากยิ่งขึ้น ในขั้นต่อไปจึงศึกษากระบวนการ DAF ด้วยน้ำเสียชนิดอื่น คือ น้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย โดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการบำบัดด้วยกระบวนการ DAF และเพื่อเปรียบเทียบกลไกการบำบัดกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

#### 4.5 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการ DAF

ในขั้นนี้จะทำการศึกษากระบวนการ DAF ด้วยน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายเพื่อเปรียบเทียบลักษณะของกลไกที่เกิดขึ้นกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด ซึ่งในที่นี้จะทำการศึกษาดำเนินการด้วยน้ำเสียสังเคราะห์สาหร่ายคลอเรลล่า (*Chlorella sp.*) ผลการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

##### 4.5.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของสาหร่ายคลอเรลล่า

จากการศึกษาของ Henderson และคณะ (2008) พบว่าสาหร่ายคลอเรลล่ามีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ลักษณะทางกายภาพของสาหร่ายคลอเรลล่า (Henderson และคณะ, 2008)

ลักษณะทางกายภาพ	ค่าพารามิเตอร์
ขนาดเซลล์	ประมาณ 3.5 ไมครอน
ลักษณะการใช้ชีวิต	เซลล์เดี่ยว
ลักษณะรูปทรงของเซลล์	ทรงกลม
ความหนาแน่นเซลล์	1,070 กิโลกรัมต่อลบ.ม.
ศักย์ทางไฟฟ้า (Zeta potential)	-10 มิลลิโวลต์

จากตารางที่ 4-4 เห็นได้ว่าสาหร่ายคลอเรลล่ามีขนาดเซลล์ประมาณ 3.5 ไมครอน (ต่ำกว่า 10 ไมครอน) และมีค่าศักย์ทางไฟฟ้าประมาณ -10 มิลลิโวลต์ ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสาหร่ายคลอเรลล่ามีเสถียรภาพในน้ำเสีย

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (ตารางที่ 4-1) พบว่าน้ำมันตัดมีขนาดอนุภาคประมาณ 1 ไมครอน และมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นลบเช่นเดียวกับสาหร่าย ซึ่งจากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดพบว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันมีความจำเป็นต่อการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด และกระบวนการ DAF ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดได้ อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนชนิดน้ำเสียจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดมาเป็นน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายอาจทำให้กลไกการบำบัดเปลี่ยนไป เนื่องจากความมีเสถียรภาพของสาหร่ายในแหล่งน้ำหรือน้ำเสียเกิดจากปัจจัยที่สำคัญ 4 อย่าง (พิชญกุล, 2543) คือ 1) พื้นผิวเซลล์มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นประจุลบ 2) เซลล์สาหร่ายเป็นเซลล์จำพวกชอบอยู่ร่วมกับน้ำ (Hydrophilic) 3) ผลของสเตอริก (Steric effect) และ 4) อากาศภายในเซลล์สาหร่าย

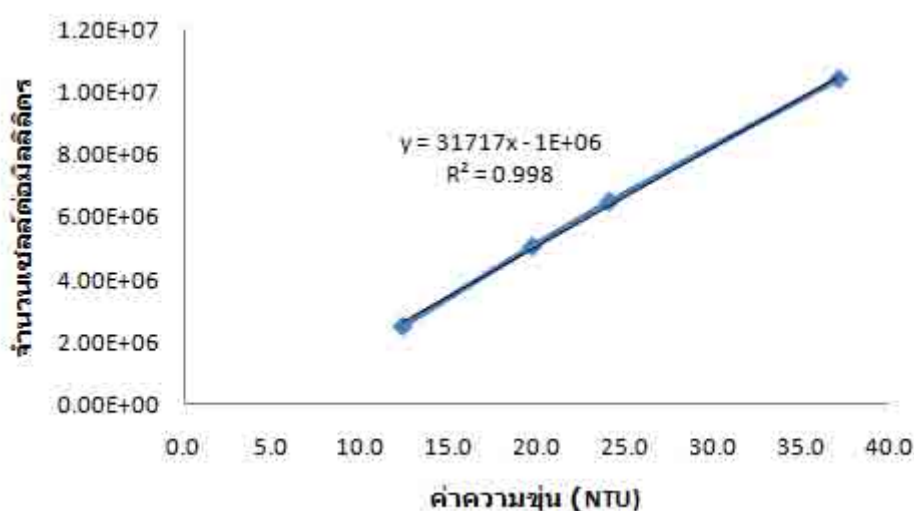
#### 4.5.2 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กราฟมาตรฐานวิเคราะห์ปริมาณสาหร่าย

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายใน 3 รูปแบบคือ ปริมาณสาหร่ายในลักษณะของจำนวนเซลล์ ปริมาณสาหร่ายในลักษณะของค่าความขุ่น และปริมาณสาหร่ายในลักษณะของค่าการดูดกลืนแสงสีเขียว ซึ่งจากการวิเคราะห์ทั้ง 3 รูปแบบ อาจกล่าวได้ว่าการนับจำนวนเซลล์เป็นผลการวิเคราะห์ทางตรง กล่าวคือ ทำให้รู้จำนวนเซลล์สาหร่ายที่มีอยู่ในน้ำเสียจริงๆ ส่วนปริมาณค่าความขุ่นและค่าการดูดกลืนแสงสีเขียวเป็นการวิเคราะห์ปริมาณเซลล์สาหร่ายทางอ้อม

ผลการศึกษากวาทมาตรฐานจึงแสดงในลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์สาหร่ายกับค่าความขุ่น และจำนวนเซลล์สาหร่ายกับค่าการดูดกลืนแสงสีเขียว

#### 4.5.2.1 กราฟมาตรฐานปริมาณเซลล์สาหร่ายกับค่าความขุ่น

ผลการศึกษากวาทความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์สาหร่ายและค่าความขุ่นแสดงดังภาพที่ 4-23 ซึ่งปริมาณจำนวนเซลล์สาหร่ายได้จากการนับเซลล์สาหร่ายและค่าความขุ่นสาหร่ายได้จากการนำตัวอย่างน้ำเสียส่งเคราะห์มาวัดค่าความขุ่น



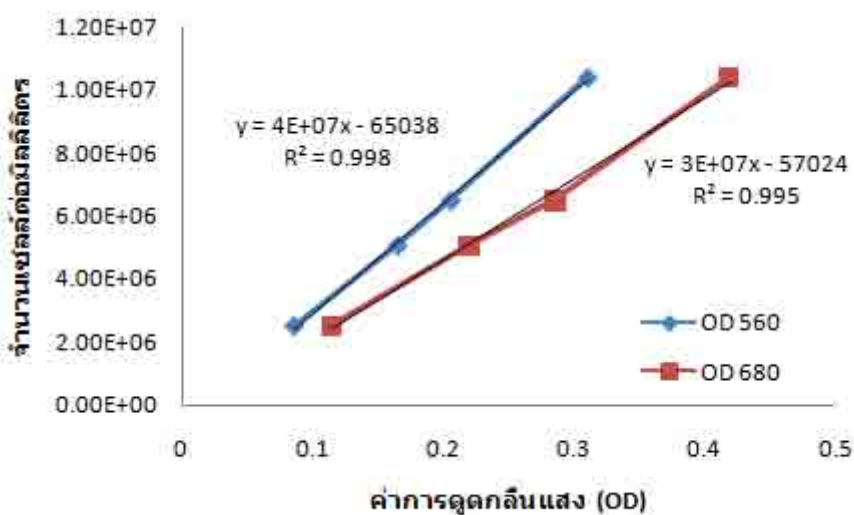
ภาพที่ 4-23 กราฟมาตรฐานจำนวนเซลล์สาหร่ายกับค่าความขุ่นสาหร่าย

จากภาพที่ 4-23 แสดงให้เห็นว่าจำนวนเซลล์สาหร่ายกับค่าความขุ่นสาหร่ายมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงในช่วงปริมาณสาหร่าย 2 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ถึง 12 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยมีค่าความขุ่นในช่วงดังกล่าวเท่ากับ 13 NTU ถึง 40 NTU

นอกจากนี้จากสมการเส้นตรงพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์สาหร่ายกับค่าความขุ่นไม่ได้มีจุดเริ่มต้นที่จุดกำเนิด ( $x=0$ ,  $y=0$ ) กล่าวคือ มีค่าจุดตัดแกนนอน (แกน  $x$ ) ประมาณ 3.2 NTU ผลดังกล่าวแสดงถึงข้อจำกัดของอุปกรณ์เครื่องวัดความขุ่น กล่าวคือ สามารถวัดปริมาณสาหร่ายได้ละเอียดมากที่สุดที่ค่าความขุ่นประมาณ 3.2 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการวิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายด้วยวิธีการวัดสามารถวิเคราะห์ได้ค่าที่ถูกต้องในช่วงหนึ่งๆเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสรุปว่าการวิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายด้วยค่าความขุ่นไม่มีความเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ปริมาณสาหร่าย

#### 4.5.2.2 กราฟมาตรฐานปริมาณเซลล์สำหรับห่ายกับค่าการดูดกลืนแสง

เนื่องจากสาหร่ายคลอโรลล่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสาหร่ายสีเขียว ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการวัดปริมาณสาหร่ายด้วยค่าการดูดกลืนแสงสีเขียวหรือแสงที่ใกล้เคียงสีเขียว ซึ่งโดยทั่วไปแสงสีเขียวจะมีค่าความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 500 ถึง 580 นาโนเมตร แต่เนื่องจากที่ความเข้มข้นต่ำๆสาหร่ายจะมีสีเขียวปนเหลืองหรืออาจเป็นสีส้ม งานวิจัยนี้จึงทดสอบการวิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายด้วยค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 560 นาโนเมตร และ 680 นาโนเมตร ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-24



ภาพที่ 4-24 กราฟมาตรฐานปริมาณเซลล์สำหรับห่ายกับค่าการดูดกลืนแสง

จากภาพที่ 4-24 พบว่าที่ปริมาณสาหร่าย 2 ล้านเซลล์ต่อมิลลิเมตร ถึง 12 ล้านเซลล์ต่อมิลลิเมตร การใช้ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 560 นาโนเมตร และ 680 นาโนเมตร เพื่อวิเคราะห์สาหร่ายจะมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยมีค่าการดูดกลืนแสงหรือค่า OD ระหว่างประมาณ 0.08 ถึง 0.3 และ 0.1 ถึง 0.42 ที่ค่าความยาวคลื่นที่ใช้วิเคราะห์ 560 นาโนเมตร และ 680 นาโนเมตร ตามลำดับ

นอกจากนี้ จากสมการเส้นตรงที่ได้พบว่าการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ 560 และ 680 นาโนเมตร ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลล์สาหร่ายกับค่าการดูดกลืนแสงไม่ได้มีจุดเริ่มต้นที่จุดกำเนิด ( $x=0, y=0$ ) และมีค่าจุดตัดแกนนอน (แกน  $x$ ) เท่ากับ 0.0016 และ 0.0019 ที่ความยาว

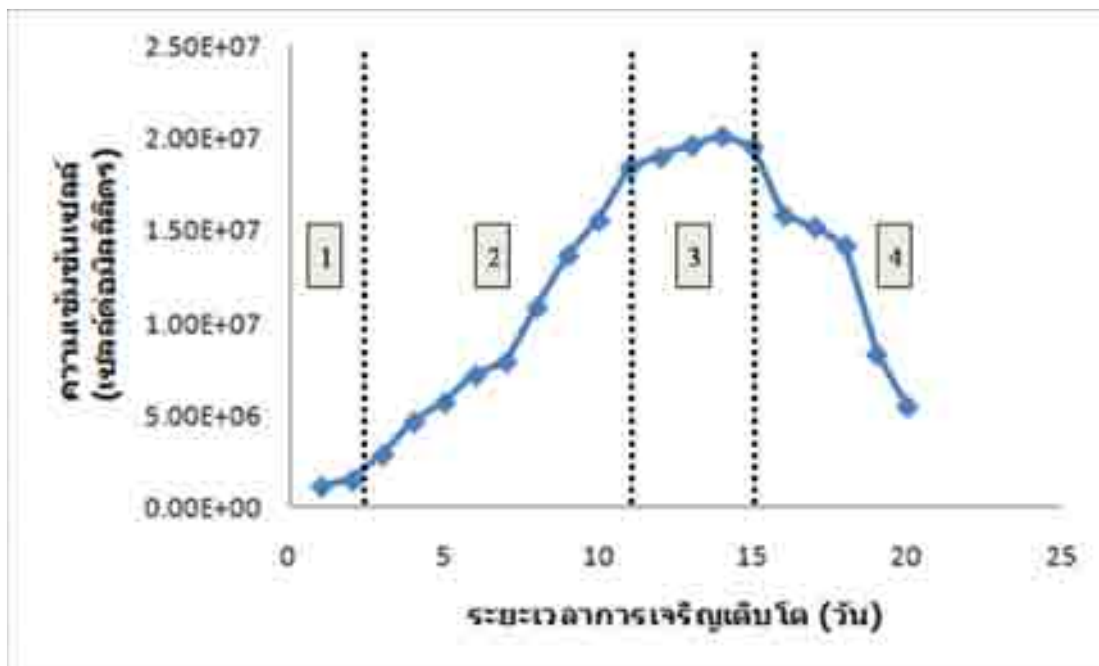
คลื่นแสง 560 และ 680 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งจากค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร น่าจะมีความละเอียดในการวัดที่สูงกว่าความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร

อย่างไรก็ตามจากค่าจุดตัดดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายด้วยค่าการดูดกลืนแสงสามารถวิเคราะห์ได้แม่นยำในช่วงที่จำกัดเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ค่าความขุ่น กล่าวคือ ถึงแม้ว่าช่วงที่ทำกรวิเคราะห์จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเส้นตรง แต่จากผลข้างต้น อาจเป็นไปได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าคลาดเคลื่อนที่ปริมาณเซลล์ต่ำๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสรุปว่าการวิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายด้วยค่าการดูดกลืนแสงไม่มีความเหมาะสมในการใช้งานจริง

ผลการศึกษาในขั้นนี้สรุปได้ว่า การวิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายด้วยปริมาณความขุ่นและค่าการดูดกลืนแสงไม่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานในขั้นนี้และควรวิเคราะห์ปริมาณสาหร่ายด้วยการนับจำนวนเซลล์

#### 4.5.3 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

เนื่องจากจากผลการศึกษาข้างต้นพบว่าสาหร่ายมีเสถียรภาพในระบบ ดังนั้นในขั้นนี้จึงทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันหรือจาร์เทส ( Jar-test) ซึ่งในเบื้องต้นได้ทำการศึกษาลักษณะการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่ระยะเวลาการเจริญเติบโตต่างๆ ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4-25



ภาพที่ 4-25 ลักษณะการเจริญเติบโตของสาหร่ายคลอเรลล่า

จากภาพที่ 4-25 สามารถแบ่งช่วงลักษณะการเจริญเติบโตออกเป็น 4 ช่วงดังนี้

ช่วงที่ 1 คือ ช่วงระยะเวลาที่สาหร่ายกำลังปรับตัวกับสภาวะแวดล้อม สาหร่ายจึงมีอัตราการแบ่งเซลล์ที่ต่ำ ซึ่งจากภาพจะอยู่ที่ช่วงระยะเวลาเริ่มเลี้ยงจนถึงวันที่ 2

ช่วงที่ 2 คือ ช่วงระยะเวลาที่สาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ในอัตราที่คงที่ ซึ่งจากภาพจะอยู่ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 2 วันจนถึงวันที่ 11

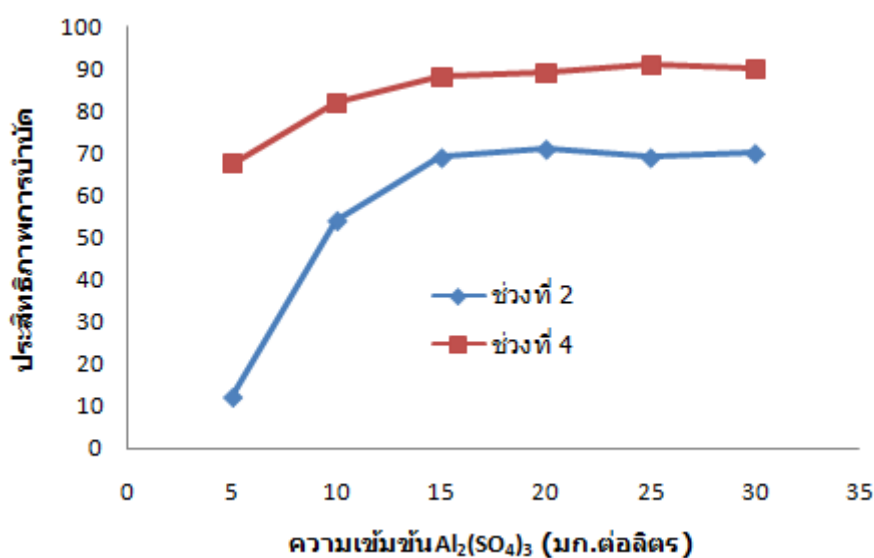
ช่วงที่ 3 คือ ช่วงระยะเวลาที่สาหร่ายมีจำนวนมากที่สุด (ประมาณ 20 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร) และมีอัตราการเกิดเท่ากับอัตราการตาย ซึ่งจากภาพจะอยู่ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่วันที่ 11 ถึงวันที่ 15

ช่วงที่ 4 คือ ช่วงระยะเวลาที่สาหร่ายมีอัตราการตายมากกว่าการเกิด ซึ่งจากภาพจะอยู่ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่วันที่ 15 เป็นต้นไป

จากภาพที่ 4-25 อาจกล่าวได้ว่าสาหร่ายคลอเรลล่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอายุเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10 ถึง 15 วัน นอกจากนี้จากผลดังกล่าว อาจเป็นไปได้ว่าสาหร่ายที่ช่วงต่างๆ น่าจะมีผลต่อกระบวนการโคเอกกูเลชันหรือการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพที่แตกต่างกัน เนื่องจาก



ในเซลล์สาหร่ายจะมีอากาศ ซึ่งปริมาณอากาศดังกล่าวเป็นผลโดยตรงจากอายุของเซลล์ กล่าวคือ ในช่วงที่ 1 และ 2 เซลล์อยู่ในช่วงที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีและน่าจะมีอากาศในเซลล์มากกว่า เซลล์สาหร่ายในช่วงที่ 3 และ 4 ซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่าความหนาแน่นของเซลล์ในแต่ละช่วง (ส่งผลต่อความเร็วสุดท้ายที่แตกต่างกัน) การศึกษาในขั้นนี้จึงทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชัน (จาร์เทส) ด้วยสาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 และสาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตที่ 4 ซึ่งใช้ปริมาณสาหร่ายเริ่มต้นที่ 1 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร และใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-26



ภาพที่ 4-26 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยวิธีจาร์เทส

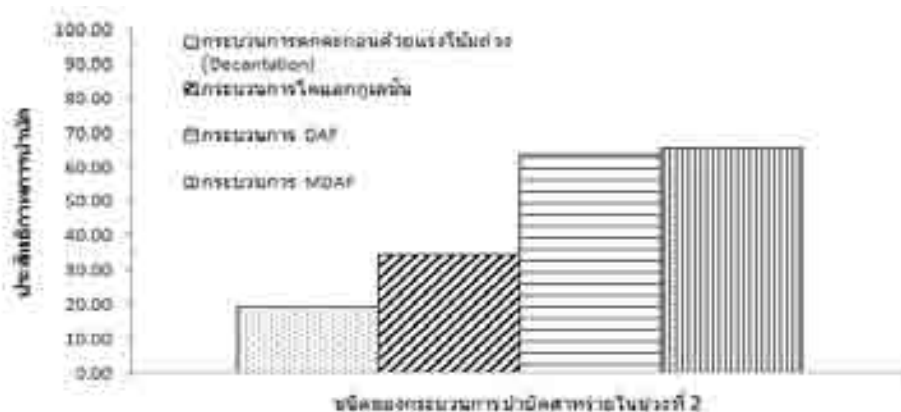
จากภาพที่ 4-26 พบว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยจาร์เทสสามารถบำบัดสาหร่าย ในช่วงของการเจริญเติบโตที่ 4 (ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์) ได้ดีกว่าในช่วงของการเจริญเติบโตที่ 2 (ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากขนาดเซลล์หลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันมีค่าใกล้เคียงกันแต่ปริมาณอากาศในเซลล์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ปริมาณอากาศในเซลล์สาหร่ายในช่วงของการเจริญเติบโตที่ 2 น่าจะมีมากกว่าในช่วงของการเจริญเติบโตที่ 4 ซึ่งส่งผลให้สาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 มีค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ต่ำกว่าช่วงการเจริญเติบโตที่ 4 และมีผลให้ผลต่างความหนาแน่น ( $\Delta\rho$ ) ระหว่างเซลล์สาหร่ายกับน้ำเสีย ( $\Delta\rho = \rho_{\text{algae}} - \rho_{\text{water}}$ ) ในช่วงของการเจริญเติบโตที่ 2 มีค่าน้อยกว่าช่วงการเจริญเติบโตที่ 4 จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนหรือการบำบัดด้วยวิธีจาร์เทสของสาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 ต่ำกว่าช่วงการเจริญเติบโตที่ 4

อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 4-26 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดด้วยวิธีจาร์เทสของสาหร่าย ทั้ง 2 ช่วงมีค่าเพิ่มขึ้นและสูงสุดที่ความเข้มข้น  $Al_2(SO_4)_3$  เท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงอาจกล่าวได้ว่าความเข้มข้น  $Al_2(SO_4)_3$  ที่เหมาะสมต่อการบำบัดสาหร่ายที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร คือ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และงานวิจัยนี้จะใช้ค่าดังกล่าวในการศึกษาขั้นต่อไป

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดพบว่า น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดจะมีลักษณะการแยกโดยลอยอยู่บนผิวน้ำเสีย แต่น้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายจะตกตะกอนอยู่บริเวณก้นของภาชนะ ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากโดยธรรมชาติน้ำมันตัดจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำเสีย (875 กิโลกรัมต่อลบ.ม.) ในขณะที่สาหร่ายมีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำเสีย ( 1070 กิโลกรัมต่อลบ.ม.) นอกจากนี้อาจกล่าวได้ว่าเซลล์สาหร่ายมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนมากกว่าที่จะลอย

#### 4.5.4 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการ DAF

การศึกษาในขั้นนี้ จะทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลจากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายของช่วง ช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 และการเจริญเติบโตที่ 4 ด้วยกระบวนการตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วง (Decantation) กระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการ DAF และกระบวนการ MDAF ซึ่งเป็นการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ด้วยอุปกรณ์ลอยตะกอนที่ได้ทำการออกแบบและจะเดินระบบภายใต้สภาวะที่เหมาะสมตามตารางที่ 4-2 คือ เดินระบบด้วยอัตราการไหลเสีย 1.2 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.7 ลิตรต่อนาที (กรณี DAF และ MDAF) ความดันอากาศควบคุม 4 บาร์ (เกจ) (กรณี DAF และ MDAF) และปริมาณความเข้มข้น  $Al_2(SO_4)_3$  เท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นสาหร่าย 1 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร ผลการศึกษาของช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 แสดงดังภาพที่ 4-27

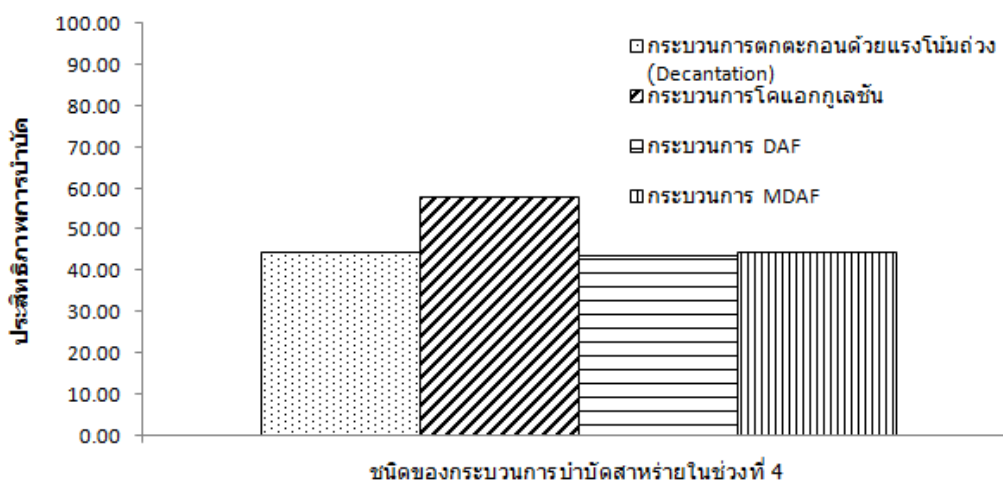


ภาพที่ 4-27 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตที่ 2

จากภาพที่ 4-27 พบว่าการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 2 ด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Decantation) กระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการ DAF และ MDAF จะมีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ 35 เปอร์เซ็นต์ 65 เปอร์เซ็นต์ และ 67 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายในช่วง ช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 ควรทำการบำบัดด้วยกระบวนการ DAF และการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของสาหร่ายอาจไม่มีความจำเป็นในขั้นนี้ เนื่องจากกระบวนการโคแอกกูเลชันมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการ DAF และประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการ MDAF มีค่าใกล้เคียงกับกระบวนการ DAF

ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตที่ 4 แสดงดังภาพที่ 4-28



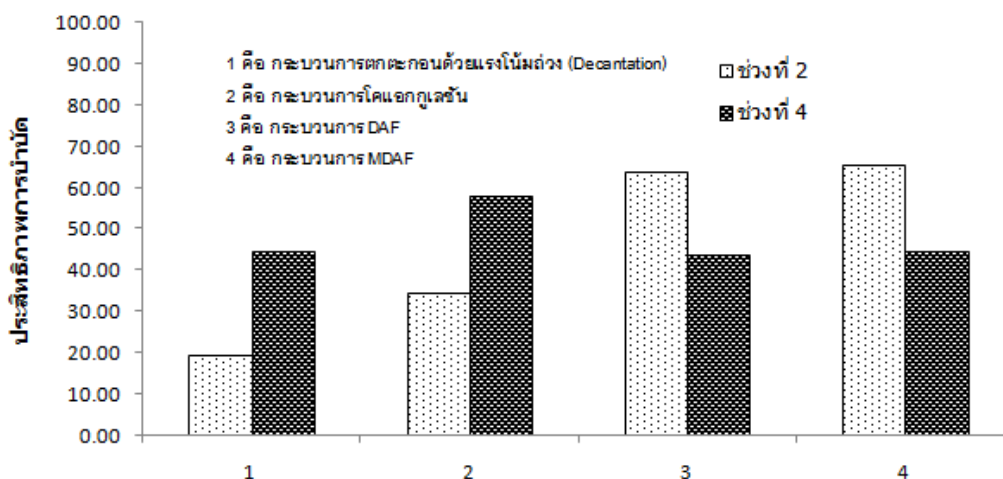
ภาพที่ 4-28 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตที่ 4

จากภาพที่ 4-28 พบว่าการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 ด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Decantation) กระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการ DAF และ MDAF จะมีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ 60 เปอร์เซ็นต์ 45 เปอร์เซ็นต์ และ 46 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 ควรทำการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน และการเติมอากาศเพื่อช่วยในการบำบัดในขั้นนี้

(DAF และ MDAF) อาจไม่มีความจำเป็น เนื่องจากประสิทธิภาพการบำบัดจากกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง กระบวนการ DAF และกระบวนการ MDAF มีค่าที่ไม่แตกต่างกัน

ผลการเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 2 และช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 ด้วยวิธีการบำบัดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4-29



ภาพที่ 4-29 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 และช่วงการเจริญเติบโตที่ 4 ด้วยวิธีการบำบัดต่างๆ

จากภาพที่ 4-29 ผลที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

#### 1) ส่วนของการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Decantation)

จากภาพพบว่าสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 จะถูกบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงได้ดีกว่าสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 2 ผลดังกล่าวน่าจะเกิดจากปริมาณอากาศในเซลล์สาหร่ายที่แตกต่างกันในช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 และช่วงการเจริญเติบโตที่ 4 โดยช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 จะมีปริมาณอากาศในเซลล์มากกว่าช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 ซึ่งส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกับน้ำเสียมากกว่าการเจริญเติบโตช่วงที่ 4 ( $\rho_{\log} < \rho_{\text{decline}}$ ) ( $\Delta\rho$  ของช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 มีค่าต่ำกว่าช่วงการเจริญเติบโตที่ 4) ดังนั้นความเร็วสุดท้ายและประสิทธิภาพการบำบัดในช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 จึงมากกว่าช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 โดยสาหร่ายจะถูกแยกตกตะกอนอยู่บริเวณก้นถังปฏิกริยาลอยตะกอน

เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดพบว่า น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งมีผลที่ได้มีความแตกต่างกับน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย ผลดังกล่าวน่าจะเกิดจากลักษณะของการมีเสถียรภาพและลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันตามชนิดของน้ำเสียดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.5.1 อย่างไรก็ตาม ควบคู่กันถึงกลไกการแยกของน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายเพิ่มเติม เนื่องจากโดยธรรมชาติสาหร่ายจัดเป็นอนุภาคของสิ่งมีชีวิต การวิเคราะห์หรือพิจารณากลไกที่เกิดขึ้นจึงมีความแตกต่างจากน้ำเสียที่มีอนุภาคของดิน หิน แร่ ปนเปื้อนอยู่

## 2) ส่วนของกระบวนการโคแอกกูเลชัน

กลไกที่เกิดกับกระบวนการโคแอกกูเลชันมีลักษณะเช่นเดียวกับกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง กล่าวคือ เซลล์สาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 2 มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงน้ำเสียมากกว่าช่วงของการเจริญเติบโตที่ 4 แต่เมื่อนำน้ำเสียทั้ง 2 มาผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันผลิต  $Al(OH)_3$  จากสารเคมีที่เติมลงไป (สารส้ม) จับตัวกับเซลล์สาหร่าย ซึ่งทำให้ความหนาแน่นโดยรวมเพิ่มขึ้น (หนักขึ้น) สาหร่ายทั้งในช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 และการเจริญเติบโตช่วงที่ 4 จึงมีความเร็วสุดท้ายและมีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (ตกลงกันดังลดยตะกอน) อย่างไรก็ตามด้วยปริมาณการเติมสารส้มที่เท่ากัน ( 15 มิลลิกรัม  $Al_2(SO_4)_3$  ต่อลิตร) ประสิทธิภาพของช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 จึงยังคงสูงกว่าช่วง การเจริญเติบโตที่ 2 และจะเห็นได้ว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดจากกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงในปริมาณที่เท่ากันทั้ง ช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 และการเจริญเติบโตที่ 4 คือประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบกับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่า น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันจะลอยตัวอยู่บนผิวคอลลอยด์ลอยตะกอน ซึ่งต่างจากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายที่ตะกอนสาหร่ายจะตกอยู่ ณ บริเวณก้นถังลอยตะกอน โดยผลดังกล่าวน่าจะเกิดจากความหนาแน่นของอนุภาคที่ส่งผลต่อแนวโน้มการลอยหรือการจมตัวอนุภาค

## 3) ส่วนของกระบวนการ DAF

จากภาพจะเห็นได้ว่าสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 2 สามารถบำบัดด้วยกระบวนการ DAF ได้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 ผลดังกล่าวเกิดจากสาหร่าย

ในช่วง การเจริญเติบโตที่ 2 มีความหนาแน่นใกล้เคียงน้ำเสียมากกว่าสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 หรืออาจกล่าวได้ว่าสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 2 มีแนวโน้มที่จะลอยมากกว่าที่จะตกตะกอน (เมื่อเทียบกับสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 4) ซึ่งเมื่อเซลล์สาหร่ายสัมผัสและเกาะติดกับฟองอากาศจะทำให้ความหนาแน่นโดยรวมของสาหร่ายมีค่าต่ำลง การบำบัดด้วยกระบวนการ DAF จะทำให้สาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 ลอยตะกอนได้ดียิ่งขึ้นในทางกลับกัน สาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตที่ 4 ซึ่งมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนมากกว่าที่จะลอยเมื่อสัมผัสและเกาะติดกับฟองอากาศด้วยปริมาณอากาศที่เท่ากับ ช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดในช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 ต่ำกว่าช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณอากาศสำหรับบำบัดสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายให้ได้ใกล้เคียงกับ ช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 ได้ ซึ่งผลดังกล่าวจะแสดงในรูปของค่าสัดส่วน A/S ที่เหมาะสมต่อการบำบัด หนึ่ง ค่า A/S ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายในขั้นนี้เท่ากับ 0.053 กรัมอากาศต่อ  $10^9$  เซลล์สาหร่าย หรือ 1.869 กรัมอากาศต่อกรัมสาหร่าย (เซลล์เปียก)

และเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของสาหร่ายในช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 ด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง กระบวนการโคแอกกูเลชัน และกระบวนการ DAF พบว่ากระบวนการ DAF มีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง แต่มีประสิทธิผลการบำบัดต่ำกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชัน ผลดังกล่าวน่าจะเกิดจากเซลล์สาหร่ายในช่วงการเจริญเติบโตที่ 4 มีแนวโน้มที่จะตกตะกอนมากกว่าที่จะลอย ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าปริมาณอากาศที่เกาะติดกับเซลล์สาหร่ายในขั้นนี้มีค่าน้อยเกินไปที่จะทำให้เซลล์สาหร่ายสามารถลอยแยกออกจากรน้ำเสียได้ (มีค่าสัดส่วน A/S ที่ไม่เหมาะสมต่อการบำบัด)

เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดพบว่า โดยทั่วไปการสัมผัสและการเกาะติดระหว่างอนุภาคที่มีศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวเป็นประจุเดียวกัน (ประจุลบ) จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ และมีความจำเป็นในการปรับประจุบนพื้นผิวของอนุภาคตัวใดตัวหนึ่ง ดังแสดงให้เห็นในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด (อนุภาคน้ำมันตัดกับฟองอากาศมีศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวเป็นลบทั้งคู่) ที่มีความจำเป็นต้องผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน แต่ในกรณีการสัมผัสและเกาะติดระหว่างสาหร่ายกับฟองอากาศกลับมีลักษณะที่ต่างออกไป กล่าวคือ อนุภาค 2 ชนิด (สาหร่ายและฟองอากาศ) ที่มีศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวเป็นลบสามารถสัมผัสและเกาะติดกันได้ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากสาหร่ายเป็นอนุภาคสิ่งมีชีวิตที่มีการขับเมือกมาห่อหุ้มเซลล์หรือที่เรียกว่า EOM (Extracellular organic

matter) (พิษณุพล, 2543) ผลดังกล่าวมีความเป็นไปได้ว่าจะทำให้ฟองอากาศสามารถเกาะติดผิวเซลล์สำหรับ (Adsorbed) ได้เช่นเดียวกับกลไกการกวาดตะกอนของผลึกเกลือของโลหะในกระบวนการโคแอกกูเลชัน อย่างไรก็ตามเพื่อความชัดเจนของกลไกการบำบัดที่เกิดขึ้นควรทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

#### 4) ส่วนของกระบวนการ MDAF

จากการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงกับกระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดจากกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงทั้ง 2 ช่วงของการเจริญเติบโต (ช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 และการเจริญเติบโตที่ 4) และจากการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงกับกระบวนการ DAF พบว่ากระบวนการ DAF สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดจากกระบวนการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงในช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 แต่ช่วงการเจริญเติบโตที่ 4 มีประสิทธิภาพการบำบัดเท่าเดิม ซึ่งจากผลดังกล่าวมีแนวโน้มว่ากระบวนการ MDAF น่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการ DAF ได้

แต่จากผลการศึกษาในขั้นนี้พบว่า ประสิทธิภาพจากกระบวนการ MDAF มีค่าใกล้เคียงกับกระบวนการ DAF ซึ่งน่าจะมีผลมาจาก โดยปกติสาหร่ายมีค่าความหนาแน่นมากกว่าหรือใกล้เคียงกับน้ำ (จากตารางที่ 4-4 สาหร่ายมีค่าความหนาแน่นประมาณ 1070 กิโลกรัมต่อลบ.ม.) ทำให้โดยธรรมชาติสาหร่ายจึงมีแนวโน้มที่จะตกตะกอนมากกว่าที่จะลอย แต่จากกระบวนการ MDAF เป็นกระบวนการที่ผสมระหว่างการลดความหนาแน่นด้วยฟองอากาศและการเพิ่มความหนาแน่นด้วยการรวมตัวกับเกลือของโลหะหรือกลไกการกวาดตะกอน จึงเป็นไปได้ว่าปริมาณอากาศที่ใช้ในการลอยตะกอนมีค่าน้อยเกินไปและถ้าเพิ่มปริมาณอากาศน่าจะทำให้การบำบัดด้วยกระบวนการ MDAF มีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่า DAF ได้ แต่ในทางปฏิบัติการใช้กระบวนการ DAF เพียงกระบวนการเดียวก็สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายได้แล้ว และไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการผสมหรือกระบวนการ MDAF

จากการศึกษาในขั้นนี้สรุปได้ว่า เซลล์สาหร่ายเป็นอนุภาคของสิ่งมีชีวิตที่มีแนวโน้มที่จะตกตะกอนมากกว่าที่จะลอย และสามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการ DAF โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันมาก่อนซึ่งแตกต่างไปจากการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด นอกจากนี้พบว่า อายุของสาหร่ายมีผลต่อค่าสัดส่วน A/S ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ สาหร่ายที่มีอายุ

ในช่วง ช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 จะมีแนวโน้มในการทำให้ลดยหรือมีค่าความต้องการค่าสัดส่วน A/S ที่เหมาะสมต่ำกว่าสาขาที่มีอายุในช่วง การเจริญเติบโตที่ 4 (ช่วงการเจริญเติบโตที่ 2 ต้องการอากาศเพื่อลยตะกอนน้อยกว่าช่วงการเจริญเติบโตที่ 4)

#### 4.6 ผลการศึกษาค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเพื่อบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการ DAF

ในเบื้องต้นจะทำการศึกษาเฉพาะในส่วนของต้นทุนในการเดินระบบ (ไม่สนใจต้นทุนการก่อสร้าง) เพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดให้ได้ 1ลบ.ม. ภายใต้สภาวะเดินระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์) คือ ความเข้มข้นน้ำมันตัด 1 กรัมต่อลิตร อัตราการไหลน้ำเสีย 1.2 ลิตรต่อนาที่ อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.7 ลิตรต่อนาที่ ความดันเกจควบคุม 4 บาร์ และใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่มีความเข้มข้น  $Al_2(SO_4)_3$  100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต้นทุนในการเดินระบบจะประกอบไปด้วยต้นทุนของพลังงานที่ใช้หรือค่าไฟฟ้าและต้นทุนของสารเคมี โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.6.1 ต้นทุนพลังงาน

ต้นทุนทางด้านพลังงานได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 4-31 ซึ่งผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4-5

$$Cost_{energy} = Power(kw) \times 2.8095 \left( \frac{baht}{unit} \right) \times time_{operate} (hr.) \times vat.(7\%) \quad (4-31)$$

ตารางที่ 4-5 ผลการคำนวณต้นทุนด้านพลังงาน

รายการ		กำลัง (kw)	Cost (บาทต่อยูนิต)	ระยะเวลา (ชม.)	ภาษี(7%)	ต้นทุนรวม (บาทต่อลบ.ม.)
ปั๊ม	น้ำเสีย	0.06	2.8095	13.9	1.07	28.46
	สารเคมี	0.05		13.9		
	ผลิตน้ำอัดอากาศ	1.1		5.4		
		0.37		5.4		



จากตารางที่ 4-5 ต้นทุนทางด้านพลังงานไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ให้ได้ 1 ลบ.ม. จะต้องใช้พลังงานซึ่งคิดเป็นจำนวนเงินเท่ากับ 28.46 บาท

#### 4.6.2 ต้นทุนทางด้านสารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ MDAF ได้แก่ สารส้ม และอากาศให้ความดัน ซึ่งมีราคาตามท้องตลาด คือ สารส้มราคา 7500 บาทต่อตัน และถังให้แรงดันอากาศ (Air zero) ราคา 2000 บาทต่อ 8 ลบ.ม. โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 4-32 และผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4-6

$$Cost_{chemical} = Usage\_rate \left( \frac{Unit}{hr.} \right) \times Unit\_Cost \left( \frac{baht}{unit} \right) \times time_{operate} (hr.) \times vat.(7\%) \quad (4-32)$$

ตารางที่ 4-6 ผลการคำนวณต้นทุนด้านสารเคมี

รายการ	อัตราการใช้ (ยูนิตต่อชม.)	ต้นทุน (บาทต่อยูนิต)	ระยะเวลา (ชม.)	ภาษี (7%)	ต้นทุนรวม (บาทต่อลบ.ม.)
สารส้ม	0.014	7.5	13.9	1.07	6.11
ถังให้แรงดันอากาศ	3.15	0.25	5.4		

จากตารางที่ 4-6 ต้นทุนทางด้านสารเคมีในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ให้ได้ 1 ลบ.ม. จะต้องใช้สารเคมีซึ่งคิดเป็นจำนวนเงินเท่ากับ 6.11 บาท

รวมต้นทุนทั้งหมดจะได้ว่ากระบวนการ DAF (MDAF) จะมีต้นทุนการเดินระบบเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร คือ ประมาณ 34.57 บาทต่อลบ.ม.

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือ DAF

งานวิจัยนี้พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือ DAF (Dissolved Air Flotation) สามารถสรุปได้ 2 ชนิด คือ ปัจจัยจากชนิดของน้ำเสีย และปัจจัยจากลักษณะการไหลของเฟสของไหลหรือตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamic parameters) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

##### 1) ปัจจัยจากชนิดของน้ำเสีย

งานวิจัยนี้พบว่าชนิดของน้ำเสียที่แตกต่างกันส่งผลต่อกลไกการบำบัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ชนิดน้ำเสียบางชนิด เช่น น้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายจะไม่ต้องการกระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัดร่วมกับกระบวนการ DAF แต่น้ำเสียบางชนิด เช่น น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด จะต้องการกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการลอยตะกอน นอกจากนี้ จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายพบว่าอายุของสาหร่ายมีผลต่อความต้องการอากาศในการลอยตะกอนที่แตกต่างกันหรือส่งผลต่อค่าสัดส่วน A/S ในการบำบัดที่แตกต่างกัน

##### 2) ปัจจัยตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล

งานวิจัยนี้พบว่าลักษณะการไหลของของไหลในถังปฏิกรณ์ (น้ำและอากาศ) ส่งผลต่อกลไกการบำบัดที่ต่างกัน กล่าวคือ การไหลที่แตกต่างกันส่งผลต่อความปั่นป่วน (Velocity gradient : G) ระยะเวลาพัก (Detention time : T) และอัตราการน้ำล้นผิว (Overflow rate : OFR) ที่แตกต่างกัน ซึ่งก่อให้เกิดการรวมตะกอนและการแยกตะกอนในลักษณะต่างๆ นอกจากนี้ ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความปั่นป่วนและระยะเวลาพักในลักษณะของการแปรผกผันคือค่า  $G \cdot T$  โดยพบว่าระบบ DAF จะบำบัดได้ดีที่ค่า  $G \cdot T$  ค่าหนึ่งๆ

สรุปประสิทธิภาพการบำบัดและตัวแปรการบำบัดหรือการออกแบบแสดงดังตารางที่ 5-1 และ 5-2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-1 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการต่างๆ

ประสิทธิภาพการ บำบัด	ชนิดน้ำเสีย		
	น้ำเสียปนเปื้อน น้ำมันตัด	น้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย	
		อายุ 10 วัน	อายุ 15 วัน
Decantation	0%	20%	40%
Coagulation (Jar-test)	98%	70%	90%
Coagulation	68%	30%	60%
DAF	0%	65%	40%
MDAF	82%	65%	40%

ตารางที่ 5-2 ตัวแปรการบำบัดหรือการออกแบบระบบ DAF และ MDAF

ชนิดของตัวแปร	ตัวแปรการออกแบบ	ค่าการออกแบบ
ชนิดน้ำเสีย	$A/S_{\text{Metcalf\&Eddy}}$	0.024 - 0.052 กรัมอากาศต่อกรัมน้ำมันตัด
	$A/S_{\text{Adsorption model}}$	0.028 - 0.033 กรัมอากาศต่อกรัมน้ำมันตัด
	$A/S_{\text{Algae}}$	0.053 กรัมอากาศต่อ $10^9$ เซลล์ หรือ 1.869 กรัมอากาศต่อกรัมสาหร่าย (เซลล์เปียก)
	Alum/oil	100 มิลลิกรัม $Al_2(SO_4)_3$ ต่อกรัมน้ำมันตัด
	Alum/Algae	15 มิลลิกรัม $Al_2(SO_4)_3$ ต่อ $10^9$ เซลล์ 0.536 กรัม $Al_2(SO_4)_3$ ต่อกรัมสาหร่าย
พลศาสตร์ของไหล	G	$15-25 \text{ วินาที}^{-1}$
	G.T	5500 วินาทีต่อวินาที
	OFR	0.15 - 0.25 เมตรต่อนาที

### 5.1.2 การประยุกต์ใช้โมเดลในกระบวนการ DAF

โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ โมเดลการกรอง (Filtration model) และโมเดลการดูดซับ (Adsorption model) สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

#### 1) โมเดลการกรอง (Filtration model)

สมการการกรองที่ใช้สำหรับทำนายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศใดๆในงานวิจัยนี้ แสดงดังสมการที่ 5-1

$$\ln \frac{C}{C_0} = -0.0015 Q_{PW}^{0.05} \frac{P}{\rho_{air}} \left[ \frac{(22.4 K_{H,N_2} + 6.4 K_{H,O_2})}{Q_{WW} + Q_{PW}} \right] \frac{H}{D_B} \quad (5-1)$$

งานวิจัยนี้พบว่าการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยสมการการกรอง 5-1 จะมีค่าถูกต้องในช่วงที่จำกัด กล่าวคือ จะมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการบำบัดจริงโดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ผลการทำนายน้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดตะกอนและฟองอากาศในถังปฏิกรณ์

#### 2) โมเดลการดูดซับ (Adsorption model)

งานวิจัยนี้พบว่าสมการการดูดซับสามารถประยุกต์ใช้เพื่อการทำนายประสิทธิภาพคำนวณค่าสัดส่วน A/S ที่เหมาะสม และอธิบายลักษณะการเกาะติดผิวระหว่างฟองอากาศและตะกอนได้ โดยการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยวิธีทางกราฟมีความคลาดเคลื่อนในการทำนายน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ในทุกๆความเข้มข้นน้ำเสีย นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะการเกาะติดระหว่างฟองอากาศและตะกอนมีแนวโน้มในการเกาะติดตามแบบจำลองของแลงมัวร์ และค่า A/S จากโมเดลการดูดซับแสดงดังตารางที่ 5-2

### 5.1.3 สรุปต้นทุนในการเดินระบบ DAF

งานวิจัยนี้พบว่าต้นทุนการเดินระบบ DAF เพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด โดยพิจารณาสถานะการเดินระบบที่สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสีย 1 กรัมต่อลิตรได้มากที่สุด มีต้นทุนในการเดินระบบประมาณ 34.57 บาทต่อลบ.ม.

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 การออกแบบระบบ DAF

- การออกแบบระบบด้วยค่าความปั่นป่วนหรือค่า G ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในช่วงต่างๆ เพื่อศึกษาค่า G ที่เหมาะสมที่แท้จริงของระบบ DAF อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยนี้พบความเป็นไปได้ว่าค่า G ที่เหมาะสมต่อการออกแบบควรอยู่ในช่วง 50-100 วินาที<sup>1</sup>

- ตัวแปรการออกแบบค่าสัดส่วน A/S มีความสัมพันธ์กับการออกแบบระบบด้วยตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหลที่เหมาะสม ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าการออกแบบให้ระบบมีพลศาสตร์ของไหลที่เหมาะสมจะทำให้ค่าสัดส่วน A/S ลดลงหรือมีความต้องการอากาศลดลง

- ค่า A/S ของการบำบัดสาหร่ายในตารางที่ 5-2 เป็นค่าสัดส่วนจากการบำบัดในตารางที่ 5-1 ซึ่งค่า A/S ที่เหมาะสมต่อการบำบัดสาหร่ายควรทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

- การบำบัดสาหร่ายด้วยกระบวนการทางกายภาพควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงกลไกการบำบัดที่เหมาะสม เนื่องจากสาหร่ายมีลักษณะการมีเสถียรภาพแบบสิ่งมีชีวิตซึ่งแตกต่างจากอนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดจากดิน หิน หรือแร่ธาตุ (น้ำมันตัด)

### 5.2.2 การทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยโมเดล

- การใช้โมเดลการกรองและโมเดลการดูดซับในการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการ MDAF มีข้อจำกัดในการทำนายที่สภาวะไรต์วกลาง ซึ่งระบบจะสามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการแอกกูเลชัน

- ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยโมเดลการกรองและโมเดลการดูดซับว่ามีผลที่สอดคล้องกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดหรือไม่ เนื่องจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดมีลักษณะการมีเสถียรภาพที่แตกต่างจากน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย

- ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยโมเดลการกรองที่ความเข้มข้นน้ำเสียต่างๆ กัน แล้วเปรียบเทียบกับผลทำนายที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศใดๆ และควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยโมเดลการดูดซับที่อัตราการไหลน้ำอัดอากาศใดๆ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทำนายที่สภาวะความเข้มข้นน้ำเสียใดๆ

- การประยุกต์ใช้โมเดลการดูดซับเพื่ออธิบายกลไกการดูดติดผิวและการประมาณค่าสัดส่วน A/S ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมกับน้ำเสียชนิดอื่นๆ

### 5.2.3 ต้นทุนการเดินระบบ DAF

- ต้นทุนที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ไม่ได้รวมต้นทุนการก่อสร้างระบบ ซึ่งต้นทุนดังกล่าวมีค่าแตกต่างกันไปตามขนาดของระบบ

- ต้นทุนการบำบัดในงานวิจัยนี้เป็นต้นทุนการบำบัดเบื้องต้นที่คำนวณภายใต้สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมจากงานวิจัย ซึ่งอาจมีค่าลดลงในกรณีที่ค้นพบการเดินระบบที่เหมาะสมกว่างานวิจัยนี้

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กอกช ก้องกังวาลย์. 2552. การปรับปรุงประสิทธิภาพโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ , ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐวิญญู ชวลิตพรศิยา. 2552. การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำมันจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดโดยกระบวนการโคอะเลสเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ , ภาควิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทันดาว ทองตัน. 2545. สาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ , สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชา วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประจักษ์ ศาสตรเวช . 2551. การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการอินดิคซ์แอร์โฟลเทชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ , ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิษณุพล สงวนนาม. 2543 . การศึกษากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศที่ละลายน้ำเพื่อกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำดิบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ , ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตัณฑุลเวศน์. 2539. วิศวกรรมประปา. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรารักษ์ อวณวณ. 2552. การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศร่วมกับกระบวนการโคแอกูเลชัน และแนวความคิดการใช้ฟองอากาศเคลือบน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ , สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรทัย ชวาลภาฤทธิ์. 2545. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

## ภาษาอังกฤษ

- Al-Shamrani, A.A., James, A. and Xiao, H. 2002. Separation of oil from water by dissolved air flotation. Colloid and Surfaces A 2002: 15-26.
- Aurette, Y. 1985. Treatment of oil-containing wastewater. Bangkok: Chulalongkorn.
- Battaler, H., Lamaallam, S., Lachaise, J., Graciaa, A., and Dicharry, C. 2004. Cutting fluid emulsions produced by dilution of a cutting fluid concentrate containing a cationic/nonionic surfactant mixture. Journal of Material Processing Technology 152: 215-220.
- Bensadok, K., Belkacem, M. and Nezzal, G. 2007. Treatment of cutting oil/water emulsion by coupling coagulation and dissolved air flotation. Deslination 206: 440-448.
- Bourgeois, J.C., Walsh, M.E. and Gagnon, G.A. 2004. Treatment of drinking water residuals: comparing sedimentation and dissolved air flotation performance with optimal cation ratios. Water research 2004: 1173-1182.
- Chen, Y.M., Liu, J.C. and Ju, Y.H. 1998. Flotation removal of algae from water. Colloids and Surfaces B 1998: 49-55.
- Dupre, V. 1995. Etude des mecanismes et de la modilisation procedes de flottation a air dissous. Thèse de doctorat, INSA-Toulouse.
- Edzwald, J.K. 2010. Review : Dissolved air flotation and me. Water research 2010 : 2077-2106.
- Haarhoff, J. and Edzwald, J.K. 2004. Dissolved air flotation modeling : insights and shortcomings. Journal of Water Supply : Research and Technology 53 : 127-150.
- Henderson, R., Parson, S.A. and Jefferson, B. 2008. The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae. Water research 2008 : 1827-1845.
- Maruyama, H., Seki, H. and Suzuki, A. 2009. Flotation of blue green algae using methylated egg ovalbumin. Chemical Engineering Journal 2009: 49-54.



- Metcalf & Eddy, Inc. 2004. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Painmanakul, P., Sastaravet, P., Lersjintanakarn, S. and Khaodhiar, S. 2010. Effect of bubble hydrodynamic and chemical dosage on treatment of oily wastewater by induced air flotation (IAF) process. Chemical engineering research and design 88 : 693-702.
- Rachu, S. 2005. Computer program development for oily wastewater treatment process selection, design and simulation. Doctoral dissertation Department of Environment The Institut National des Sciences Appliquées of Toulouse.
- Reynold, T.D. 1996. Unit operations and process in environmental engineering. Boston : FWS Publishing.
- Svarovsky, L. 2000. Solid-liquid separation. 4<sup>th</sup> ed. England : Butterworth-Heinemann.
- Water Quality Division Aquifer Protection Program. 1996. BADCT Guidance document for Pretreatment with oil/water separators draft. Arizona : Arizona Department of Environmental Quality.
- Zouboulis, A.I. and Avranas, A. 2000. Treatment of oil in water emulsions by coagulation and dissolved air flotation. Colloid and Surface 2000: 153-161.

ภาคผนวก

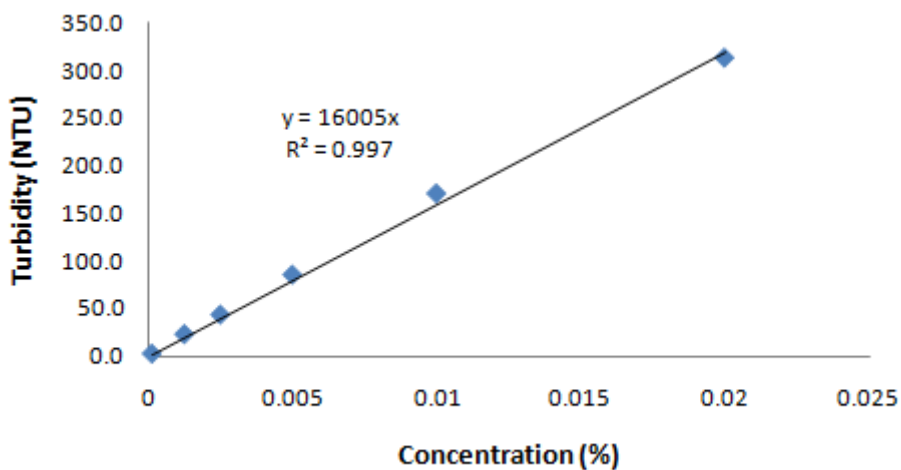
ภาคผนวก ก  
ข้อมูลดิบและตัวอย่างการคำนวณ  
ส่วนของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัด

## ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก .1 กราฟมาตรฐานความขุ่นของน้ำเสียที่ความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสีย  
ต่างๆ

ตารางที่ ก-1 ผลกราฟมาตรฐานความขุ่นของน้ำเสียที่ความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสียต่างๆ

Conc. (%)	NTU				
	1	2	3	4	Average
0.000125	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3
0.00125	23	22	23	23	23
0.0025	44	43	43	43	43
0.005	85	85	85	86	85
0.01	170	171	171	170	171
0.02	312	314	313	313	313



ภาพที่ ก-1 กราฟมาตรฐานความขุ่นของน้ำเสียที่ความเข้มข้นน้ำมันตัดในน้ำเสียต่างๆ

ภาคผนวก ก.2 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการจาร์เทส (โคแอกกูเลชัน)

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการจาร์เทส

ความเข้มข้นน้ำมัน (g/L)	ความเข้มข้นสารส้ม (mg- $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ /L)	สัดส่วนปริมาณสารส้มต่อน้ำมัน (mg- $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ /g-oil)	ความขุ่นสุดท้าย (NTU)	ความเข้มข้นน้ำมันสุดท้าย (g/L)	ประสิทธิภาพการบำบัด
0.5	40	80	760.0	0.475	5.03
	50	100	241.0	0.151	69.88
	60	120	33.6	0.021	95.80
	70	140	20.0	0.012	97.50
	80	160	73.8	0.046	90.78
	90	180	159.0	0.099	80.13
1.0	70	70	504.0	0.315	68.51
	80	80	30.1	0.019	98.12
	90	90	25.7	0.016	98.39
	100	100	21.6	0.013	98.65
	110	110	40.7	0.025	97.46
	120	120	51.4	0.032	96.79
2.0	140	70	121.0	0.076	96.22
	160	80	26.8	0.017	99.16
	180	90	32.2	0.020	98.99
	200	100	81.1	0.051	97.47
	220	110	305.0	0.191	90.47
	240	120	421.0	0.263	86.85
3.0	190	63.3	176.0	0.110	96.33
	210	70.0	37.8	0.024	99.21
	230	76.7	52.3	0.033	98.91
	250	83.3	76.6	0.048	98.40
	270	90.0	110.0	0.069	97.71
	290	96.7	161.0	0.101	96.65

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการจาร์เทส (ต่อ)

ความเข้มข้นน้ำมัน (g/L)	ความเข้มข้นสารส้ม (mg-Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /L)	สัดส่วนปริมาณสารส้มต่อน้ำมัน (mg-Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> /g-oil)	ความขุ่นสุดท้าย (NTU)	ความเข้มข้นน้ำมันสุดท้าย (g/L)	ประสิทธิภาพการบำบัด
4.0	270	67.5	36.3	0.023	99.43
	300	75.0	51.9	0.032	99.19
	330	82.5	60.3	0.038	99.06
	360	90.0	81.0	0.051	98.73
	390	97.5	58.3	0.036	99.09
	420	105.0	66.4	0.041	98.96
5.0	200	40	-	0.000	-
	250	50	-	0.000	-
	300	60	32.4	0.020	99.60
	350	70	37.3	0.023	99.53
	400	80	134	0.084	98.33
	450	90	93.4	0.058	98.83

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด

จากกราฟมาตรฐาน

$$[Oil](g/L) = \frac{[Oil, NTU]}{1600.5} \quad (ก-1)$$

จากผลการทดลองจาร์เทสที่ความเข้มข้นน้ำมันตัด 4 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้น Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> เท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ความขุ่นน้ำเสียขาออกเท่ากับ 51.9 NTU

$$[Oil](g/L) = \frac{51.9}{1600.5} = 0.032 g/L$$

$$\% \text{ remove} = \left( \frac{4.000 - 0.032}{4.000} \right) \times 100 = 99.19\%$$

ภาคผนวก ก.3 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการ DAF

ตารางที่ ก-3 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการ DAF

$Q_w$ (L/min)	$Q_{PW}$ (L/min)	Turbidity (NTU)	$Q_{mix}$ (L/min)	ความเข้มข้น น้ำมันที่เหลือ (g/L)	%Remove
1.2	0.83	912	2.03	0.570	3.61
	1.30	756	2.50	0.472	1.59
	1.73	649	2.93	0.405	0.99
	2.12	561	3.32	0.351	3.02
	2.50	498	3.70	0.311	4.06
	3.07	435	4.27	0.272	3.29

ที่มาของสูตรการคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดกรณีเดินระบบแบบต่อเนื่อง

จากสมการสมดุลมวล (Mass balance)

$$Q_{in} \cdot C_{in} = Q_{out} \cdot C_{out}$$

$$Q_{ww} \cdot C_{ww} + Q_{PW} \cdot C_{PW} = Q_{mix} \cdot C_{out}$$

กรณี  $C_{PW}$  เท่ากับ 0 กรัมต่อลิตร (น้ำประปา) จะได้ว่า

$$Q_{ww} \cdot C_{ww} = Q_{in} \cdot C_{in} \quad \text{และ} \quad Q_{mix} \cdot C_{out} = Q_{out} \cdot C_{out}$$

ดังนั้นสมการคำนวณประสิทธิภาพสามารถเขียนได้ว่า

$$\% \text{remove} = \left( \frac{Q_{in} \cdot C_{in} - Q_{out} \cdot C_{out}}{Q_{in} \cdot C_{in}} \right) \times 100 = \left( \frac{Q_{ww} \cdot C_{ww} - Q_{mix} \cdot C_{out}}{Q_{ww} \cdot C_{ww}} \right) \times 100$$

$$\% \text{remove} = \left( \frac{Q_{ww} \cdot C_{ww} - Q_{mix} \cdot C_{out}}{Q_{ww} \cdot C_{ww}} \right) \times 100 \quad (\text{ก-2})$$

**ภาคผนวก ก.4 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการลอยตัว  
ด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (MDAF)**

ตารางที่ ก-4 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรด้วยกระบวนการ  
ลอยตัวด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (MDAF)

Q <sub>w</sub> (L/min)	Q <sub>PW</sub> (L/min)	Turbidity (NTU)	pH	ความเข้มข้นน้ำมันที่เหลือ (g/L)	%Remove
3	0	905	-	0.5654	43.46
	0.17	605	5.90	0.3780	60.06
	0.47	418	6.10	0.2612	69.79
	0.58	343	6.15	0.2143	74.43
	0.70	338	6.23	0.2112	73.95
	0.83	450	6.00	0.2812	64.10
	1.30	492	6.01	0.3074	55.94
	1.73	476	6.30	0.2974	53.11
	2.12	521	6.57	0.3255	44.44
	2.50	540	6.58	0.3374	38.14
	3.07	581	6.64	0.3630	26.55
1.8	0.00	685	-	0.4280	57.20
	0.17	316	6.05	0.1974	78.39
	0.47	237	6.23	0.1481	81.33
	0.58	242	6.25	0.1512	80.01
	0.70	258	6.26	0.1612	77.61
	0.83	310	5.88	0.1937	71.70
	1.30	393	6.17	0.2455	57.71
	1.73	428	6.46	0.2674	47.56
	2.12	433	6.6	0.2705	41.08
	2.50	495	6.59	0.3093	26.12
	3.07	512	6.74	0.3199	13.45



ตารางที่ ก-4 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรด้วยกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (MDAF) (ต่อ)

$Q_w$ (L/min)	$Q_{PW}$ (L/min)	Turbidity (NTU)	pH	ความเข้มข้นน้ำมันที่เหลือ (g/L)	%Remove
1.2	0.00	528	-	0.3299	67.01
	0.17	230	-	0.1437	83.59
	0.47	209	-	0.1306	81.83
	0.58	201	-	0.1256	81.37
	0.70	185	-	0.1156	81.70
	0.83	241	6.01	0.1506	74.53
	1.30	247	6.09	0.1543	67.85
	1.73	254	6.14	0.1587	61.25
	2.12	282	6.24	0.1762	51.25
	2.50	313	6.29	0.1956	39.70
3.07	396	6.34	0.2474	11.96	
0.6	0.00	265	-	0.1656	83.44
	0.17	155	-	0.0968	87.57
	0.47	137	-	0.0856	84.73
	0.58	125	-	0.0781	84.64
	0.70	137	-	0.0856	81.45
	0.83	185	6.1	0.1156	72.45
	1.30	196	6.3	0.1225	61.22
	1.73	221	6.4	0.1381	46.38
	2.12	245	6.5	0.1531	30.61
	2.50	277	6.5	0.1731	10.58
3.07	250	6.5	0.1562	4.46	

## ภาคผนวก ก.5 ผลการศึกษาตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล

ตารางที่ ก-5 ผลการศึกษาตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล

$Q_{ww}$ (L/min)	$Q_{pw}$ (L/min)	Contact time (min)	G(tube) (s <sup>-1</sup> )	G(bubble) (s <sup>-1</sup> )	G Overall (s <sup>-1</sup> )	G.T (s/s)
3	0.00	2.62	2.59	0.00	2.59	407.29
	0.17	2.48	2.74	7.95	10.69	1588.01
	0.47	2.26	3.00	12.63	15.63	2121.51
	0.58	2.19	3.10	13.81	16.91	2224.48
	0.70	2.12	3.20	14.93	18.13	2307.31
	0.83	2.05	3.31	15.97	19.29	2371.79
	1.30	1.83	3.72	18.87	22.59	2474.00
	1.73	1.66	4.09	20.75	24.84	2473.82
	2.12	1.53	4.43	22.08	26.51	2438.59
	2.50	1.43	4.76	23.14	27.89	2388.53
3.07	1.29	5.25	24.40	29.65	2300.93	
1.8	0.00	4.36	1.56	0.00	1.56	407.29
	0.17	3.98	1.70	10.08	11.78	2817.40
	0.47	3.46	1.96	15.61	17.58	3647.11
	0.58	3.30	2.06	16.94	19.00	3759.72
	0.70	3.14	2.16	18.16	20.32	3828.27
	0.83	2.98	2.27	19.28	21.55	3859.65
	1.30	2.53	2.68	22.22	24.90	3783.58
	1.73	2.22	3.05	24.02	27.08	3612.61
	2.12	2.00	3.39	25.24	28.63	3439.43
	2.50	1.83	3.72	26.17	29.88	3273.30
3.07	1.61	4.21	27.25	31.46	3042.33	

ตารางที่ ก-5 ผลการศึกษาตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล (ต่อ)

$Q_{ww}$ (L/min)	$Q_{pw}$ (L/min)	Contact time (min)	G(tube) ( $s^{-1}$ )	G(bubble) ( $s^{-1}$ )	G Overall ( $s^{-1}$ )	G.T (s/s)
1.2	0.00	6.54	1.04	0.00	1.04	407.29
	0.17	5.73	1.18	12.09	13.27	4563.09
	0.47	4.70	1.44	18.20	19.65	5541.64
	0.58	4.41	1.54	19.59	21.13	5590.45
	0.70	4.13	1.64	20.83	22.47	5570.62
	0.83	3.87	1.76	21.94	23.70	5498.32
	1.30	3.14	2.16	24.75	26.91	5069.29
	1.73	2.68	2.53	26.37	28.90	4645.99
	2.12	2.36	2.87	27.42	30.29	4297.49
	2.50	2.12	3.20	28.21	31.41	3997.98
3.07	1.84	3.69	29.10	32.79	3616.80	
0.6	0.00	13.08	0.52	0.00	0.52	407.29
	0.17	10.19	0.67	16.12	16.79	10270.06
	0.47	7.34	0.93	22.74	23.67	10418.44
	0.58	6.65	1.02	24.06	25.08	10010.18
	0.70	6.04	1.12	25.18	26.30	9530.44
	0.83	5.49	1.24	26.14	27.38	9018.13
	1.30	4.13	1.64	28.38	30.03	7443.72
	1.73	3.37	2.01	29.57	31.58	6384.52
	2.12	2.89	2.35	30.30	32.65	5653.26
	2.50	2.53	2.68	30.82	33.50	5089.37
3.07	2.14	3.17	31.39	34.56	4435.21	

ที่มาของสมการคำนวณ

- ค่าระยะเวลาสัมผัส (Contact time)

ขนาดถังในส่วนสัมผัส เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 ม. สูง 1 เมตร

$$Volume = \frac{\pi D^2}{4} H = \frac{\pi (0.1)^2 \cdot 1}{4} = 7.85L$$

ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ

$$T = \frac{V}{Q} = \left( \frac{7.85}{Q_{ww} + Q_{PW}} \right) \left( \frac{L}{L/\min} \right) \quad (\text{ก-3})$$

- ค่า G ฟองอากาศ (Svarovsky, 2000)

แรงที่กระทำต่อฟองอากาศ 1 ฟองมีค่าเท่ากับ

$$Force_{drag} = 3\pi\mu v_s D$$

กำลังหรือ Power ที่เกิดขึ้นจากฟองอากาศ 1 ฟองมีค่าเท่ากับ

$$Power = Force \times v_s$$

สามารถหาความเร็ว  $v_s$  ได้จากสมการของสโตกคือ

$$v_s = \frac{g(\rho_s - \rho)D^2}{18\mu}$$

หรือกรณีที่ความหนาแน่นอากาศมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นน้ำเสียมากๆจะได้ว่า

$$v_s = \frac{g\rho D^2}{18\mu}$$

Power จากฟองอากาศ 1 ฟองจะได้ว่า

$$Power = \left( 3\pi\mu \left( \frac{g\rho D^2}{18\mu} \right)^2 D \right) = \frac{\pi g^2 \rho^2 D^5}{108\mu}$$

จากสมการคำนวณค่า G

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

แปลงค่า P/V ในลักษณะของฟองอากาศ

$$\frac{P}{V} = \frac{\text{Power}}{\text{Volume}} = \frac{\text{Power}}{\text{bubble}} \times \frac{\text{bubble}}{\text{Volume}}$$

$$\frac{\text{Power}}{\text{Volume}} = \frac{\text{Power}}{\text{bubble}} \times \frac{\text{air - volume}}{\text{Volume}} \times \frac{1}{1\text{bubble - vol.}}$$

$$\frac{\text{Power}}{\text{Volume}} = \left( \frac{\pi g^2 \rho^2 D^5}{108 \mu} \right) \times \left( \frac{V_A}{V} \right) \times \left( \frac{6}{\pi D^3} \right)$$

$$\frac{P}{V} = \frac{g^2 \rho^2 D^2 V_A}{18 \mu V}$$

G จึงมีค่าเท่ากับ

$$G = 0.236 \frac{g \rho D}{\mu} \sqrt{\frac{V_A}{V}} \quad (\text{ก-4})$$

- G จากน้ำเสีย

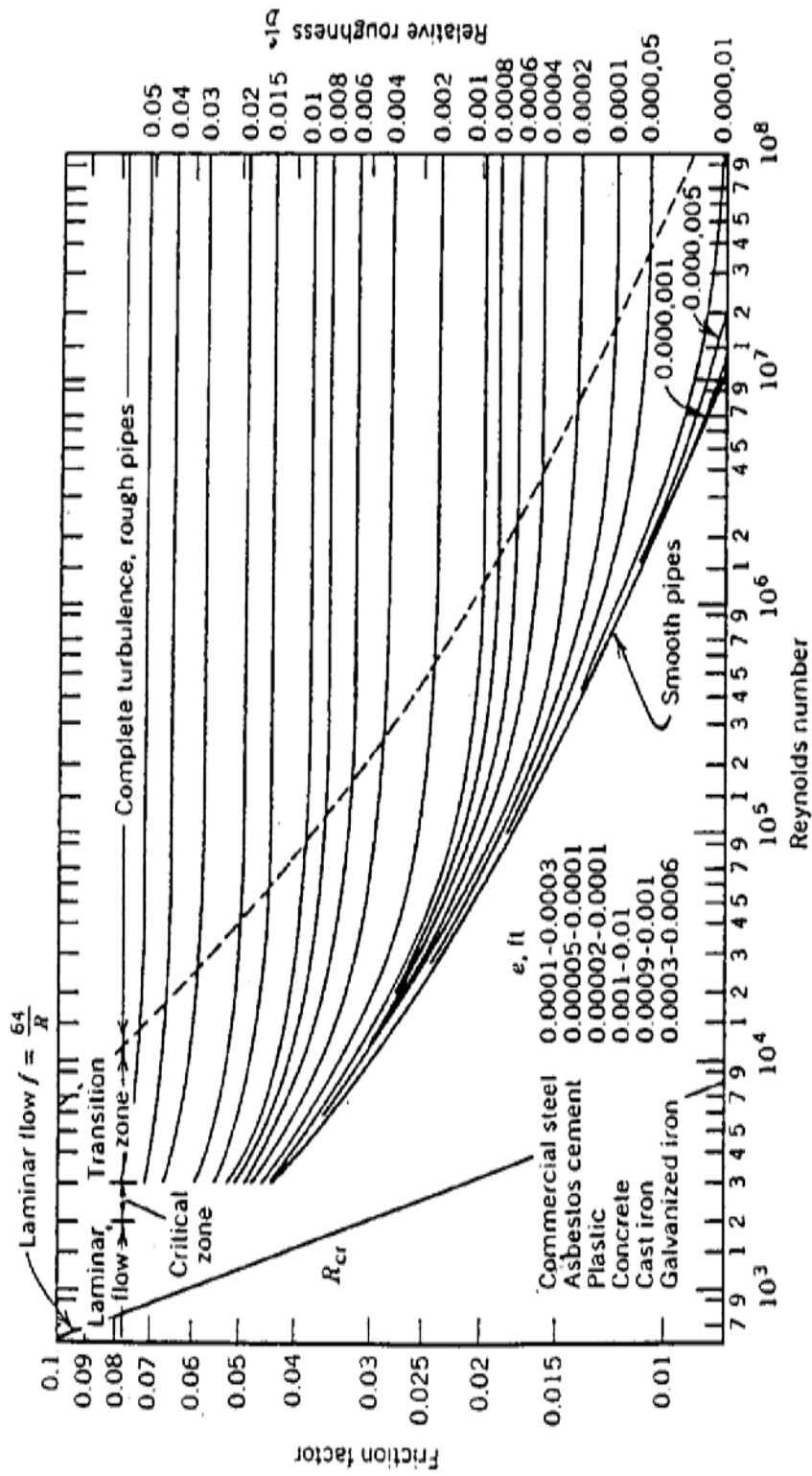
เนื่องจากคอลัมน์ลอยตะกอนมีลักษณะเป็นทรงกระบอก การคำนวณจึงใช้สมการการคำนวณค่า G จากการไหลในท่อ คือ

$$G = \sqrt{\frac{\rho g H Q}{V \mu}}$$

โดยที่ H สามารถหาได้จากสมการของดาร์ซี-ไวส์บาซ (Darcy-Weisbach) คือ

$$H = \frac{4fL}{d} \times \frac{v^2}{2g}$$

ซึ่ง f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของเส้นท่อ ( Friction factor) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดท่อและค่า Reynold's Number ค่า f ที่ ชนิดท่อและค่า Reynold's Number ต่างๆ แสดงดังภาพที่ ก-2



ภาพที่ ก-2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเส้นท่อ (f)

## ภาคผนวก ก.6 ผลการศึกษาค่าสัดส่วน A/S

ตารางที่ ก-6 ผลการศึกษาค่าสัดส่วน A/S

ความเข้มข้นน้ำมันตัด g/L	A (g-air/min)	S (g-oil/min)	A/S (g-air/g-oil)	ความขุ่นขาออก NTU	ความเข้มข้นขาออก (g/L)	%remove
0.50	0.06	0.60	0.11	195.00	0.12	61.42
1.00	0.06	1.20	0.05	242.00	0.15	76.06
1.50	0.06	1.80	0.04	343.00	0.21	77.38
2.00	0.06	2.40	0.03	456.00	0.28	77.44
2.50	0.06	3.00	0.02	679.00	0.42	73.13
3.00	0.06	3.60	0.02	1070.00	0.67	64.72
3.50	0.06	4.20	0.02	1550.00	0.97	56.19

ตัวอย่างการคำนวณ

- ค่า A (กรัมอากาศต่อนาที)

Pressure	(atm $\approx$ bar)	1	2	3	4	5	6	7	8
Dissolved air	( $g_{air}/L_{water}$ )	0.023	0.045	0.068	0.091	0.114	0.136	0.159	0.182
Air release	( $g_{air}/L_{water}$ )	0.000	0.023	0.045	0.068	0.091	0.114	0.136	0.159
	( $L_{air}/L_{water}$ )	0.000	0.019	0.038	0.057	0.075	0.094	0.113	0.132

จากการเดินระบบด้วยความดันเกจ 4 บาร์ อัตราการไหลน้ำอัดอากาศ 0.7 ลิตรต่อนาทีจะได้ว่า

$$A = 0.7 \left( \frac{L}{min} \right) \times 0.091 \left( \frac{g_{air}}{L} \right) = 0.064 g_{air} / min$$

- ค่า S (กรัมน้ำมันตัดต่อนาที)

จากการเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำเสีย 1.2 ลิตรต่อนาที

$$S = 1.2 \left( \frac{L}{min} \right) \times 1.0 \left( \frac{g}{L} \right) = 1.2 g / min$$

## ภาคผนวก ก.7 ผลการศึกษาศักยภาพการกรอง

ตารางที่ ก-7 ผลการศึกษาศักยภาพการกรอง

$Q_{ww}$ L/min	$Q_{pw}$ L/min	$Q_{mix}$ L/min	detention time s	$C_0$	C	$\ln C/C_0$	$Q_g$ $m^3/s$	Media volume $m^3$	1-e	(1-e)H/d	$\alpha \eta_T$
0.6	0.00	0.60	785	1.000	0.166	-1.798	0	0	0	0	0
	0.17	0.77	612	0.779	0.097	-2.085	2.13E-07	0.00013	0.017	331.2	0.004198
	0.47	1.07	440	0.561	0.086	-1.880	5.88E-07	0.00026	0.033	658.9	0.001902
	0.58	1.18	399	0.508	0.078	-1.873	7.25E-07	0.00029	0.037	737.3	0.001694
	0.70	1.30	362	0.462	0.086	-1.685	8.75E-07	0.00032	0.040	807.7	0.001391
	0.83	1.43	329	0.420	0.116	-1.289	1.04E-06	0.00034	0.044	870.6	0.000987
	1.30	1.90	248	0.316	0.122	-0.947	1.63E-06	0.00040	0.051	1026.3	0.000615
	1.73	2.33	202	0.258	0.138	-0.623	2.16E-06	0.00044	0.056	1113.7	0.000373
1.2	0.00	1.20	393	1.000	0.330	-1.109	0	0.00000	0.000	0.0	0
	0.17	1.37	344	0.876	0.144	-1.808	2.13E-07	0.00007	0.009	186.1	0.006474
	0.47	1.67	282	0.719	0.131	-1.705	5.88E-07	0.00017	0.021	422.2	0.002693
	0.58	1.78	265	0.674	0.126	-1.680	7.25E-07	0.00019	0.024	488.8	0.002292
	0.70	1.90	248	0.632	0.116	-1.698	8.75E-07	0.00022	0.028	552.6	0.002049
	0.83	2.03	232	0.591	0.151	-1.368	1.04E-06	0.00024	0.031	613.3	0.001487
	1.30	2.50	188	0.480	0.154	-1.135	1.63E-06	0.00031	0.039	780.0	0.00097
	1.73	2.93	161	0.410	0.159	-0.948	2.16E-06	0.00035	0.044	885.7	0.000714
1.8	0.00	1.80	262	1.000	0.428	-0.849	0	0.00000	0.000	0.0	0
	0.17	1.97	239	0.914	0.197	-1.532	2.13E-07	0.00005	0.006	129.4	0.007891
	0.47	2.27	207	0.793	0.148	-1.678	5.88E-07	0.00012	0.016	310.6	0.003602
	0.58	2.38	198	0.756	0.151	-1.610	7.25E-07	0.00014	0.018	365.5	0.002936
	0.70	2.50	188	0.720	0.161	-1.497	8.75E-07	0.00016	0.021	420.0	0.002376
	0.83	2.63	179	0.684	0.194	-1.262	1.04E-06	0.00019	0.024	473.4	0.001778
	1.30	3.10	152	0.581	0.246	-0.861	1.63E-06	0.00025	0.031	629.0	0.000912
	1.73	3.53	133	0.510	0.267	-0.645	2.16E-06	0.00029	0.037	735.1	0.000585
3	0.00	3.00	157	1.000	0.565	-0.570	0	0.00000	0.000	0.0	0
	0.17	3.17	149	0.946	0.378	-0.918	2.13E-07	0.00003	0.004	80.4	0.007606
	0.47	3.47	136	0.865	0.261	-1.197	5.88E-07	0.00008	0.010	203.2	0.003928
	0.58	3.58	132	0.838	0.214	-1.364	7.25E-07	0.00010	0.012	243.0	0.003741
	0.70	3.70	127	0.811	0.211	-1.345	8.75E-07	0.00011	0.014	283.8	0.00316
	0.83	3.83	123	0.783	0.281	-1.025	1.04E-06	0.00013	0.016	325.1	0.002101
	1.30	4.30	110	0.698	0.307	-0.820	1.63E-06	0.00018	0.023	453.5	0.001205
	1.73	4.73	100	0.634	0.297	-0.757	2.16E-06	0.00022	0.027	548.6	0.00092



วิธีการคำนวณหาค่า  $\eta_T \cdot \alpha$

จากสมการ

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\frac{3}{2} \eta_T \alpha (1 - \varepsilon) \frac{H}{D_B}$$

$$\eta_T \cdot \alpha = -\frac{2}{3} \frac{\left( \ln \frac{C}{C_0} \right) D_B}{(1 - \varepsilon) H}$$

ซึ่ง  $1 - \varepsilon$  คำนวณได้ดังนี้

$$1 - \varepsilon = \frac{Q_g}{Q_{ww} + Q_{pw} + Q_g}$$

ตารางที่ ก-8 ผลการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยสมการการกรอง

$Q_{ww}$ L/min	$Q_{pw}$ L/min	$\alpha \cdot \eta_T$	$\ln(C/C_0)$	%remove
0.6	0		0	
	0.17	0.0054	-2.67	93.10
	0.47	0.0020	-5.32	99.51
	0.58	0.0017	-5.95	99.74
	0.70	0.0014	-6.52	99.85
	0.83	0.0012	-7.03	99.91
	1.30	0.0008	-8.29	99.97
	1.73	0.0006	-8.99	99.99
1.2	0.00		0.00	0.00
	0.17	0.0054	-1.50	77.76
	0.47	0.0020	-3.41	96.69
	0.58	0.0017	-3.95	98.07
	0.70	0.0014	-4.46	98.85
	0.83	0.0012	-4.95	99.29
	1.30	0.0008	-6.30	99.82
	1.73	0.0006	-7.15	99.92

ตารางที่ ก-8 ผลการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยสมการการกรอง (ต่อ)

$Q_{ww}$ L/min	$Q_{pw}$ L/min	$\alpha \cdot \eta_T$	$\ln(C/C_0)$	%remove
1.8	0.00		0.00	0.00
	0.17	0.0054	-1.05	64.84
	0.47	0.0020	-2.51	91.86
	0.58	0.0017	-2.95	94.78
	0.70	0.0014	-3.39	96.63
	0.83	0.0012	-3.82	97.81
	1.30	0.0008	-5.08	99.38
	1.73	0.0006	-5.94	99.74
3	0.00		0.00	0.00
	0.17	0.0054	-0.65	47.77
	0.47	0.0020	-1.64	80.62
	0.58	0.0017	-1.96	85.95
	0.70	0.0014	-2.29	89.89
	0.83	0.0012	-2.63	92.76
	1.30	0.0008	-3.66	97.43
	1.73	0.0006	-4.43	98.81

ภาคผนวก ก.8 ผลการศึกษาสมการการดูดซับ

ตารางที่ ก-9 ผลการศึกษาสมการการดูดซับ

$C_s$	$q_e$ ( $\Delta S/A$ )	Langmuir's isotherm		Freundlich's isotherm	
ความเข้มข้น ขาออก (g/L)	Adsorption Capacity (g-oil/g-air)	$1/q_e$ (g-air/g-oil)	$1/C_s$ (L/g)	$\ln q$	$\ln C$
0.122	5.79	0.1729	8.208	1.755	-2.105
0.151	14.33	0.0698	6.614	2.662	-1.889
0.214	21.87	0.0457	4.666	3.085	-1.540
0.285	29.18	0.0343	3.510	3.373	-1.256
0.424	34.44	0.0290	2.357	3.539	-0.857
0.669	36.57	0.0273	1.496	3.599	-0.403
0.968	37.05	0.0270	1.033	3.612	-0.032

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลดิบและตัวอย่างการคำนวณ  
ส่วนของการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย

### ภาคผนวก ข.1 ผลการศึกษากราฟมาตรฐานสำหรับ

ตารางที่ ข-1 ผลการศึกษากราฟมาตรฐานสำหรับ

จำนวนเซลล์ เซลล์ต่อมล.	ความขุ่น NTU	OD	
		560	680
2.52E+06	12.5	0.086	0.114
5.07E+06	19.8	0.165	0.219
6.50E+06	24.2	0.206	0.286
1.04E+07	37.2	0.310	0.418

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

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นเซลล์

N คือ จำนวนเซลล์สำหรับที่ทำการนับได้ทั้งหมด

n คือ จำนวนช่องที่ทำการนับสำหรับ

A คือ พื้นที่ต่อ 1 ช่องที่ทำการนับสำหรับ

d คือ ความหนาของช่องที่ทำการนับ

ภาคผนวก ข.2 ผลการศึกษากราฟการเจริญเติบโตสาหร่าย

ตารางที่ ข-2 ผลการศึกษากราฟการเจริญเติบโตสาหร่าย

วันที่	จำนวนเซลล์	วันที่	จำนวนเซลล์
1	1.12E+06	11	1.85E+07
2	1.45E+06	12	1.90E+07
3	2.86E+06	13	1.96E+07
4	4.64E+06	14	2.02E+07
5	5.69E+06	15	1.96E+07
6	7.16E+06	16	1.58E+07
7	7.90E+06	17	1.52E+07
8	1.09E+07	18	1.42E+07
9	1.37E+07	19	8.31E+06
10	1.56E+07	20	5.47E+06

ภาคผนวก ข.3 ผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (จาร์เทส)

ตารางที่ ข-3 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายช่วงที่ 2 ด้วยกระบวนการจาร์เทส

ช่วงที่ 2					
ความเข้มข้นalum (mg/l)	cell(cell/ml)	pH	OD		%remove
			560	680	
0	100	7.66	0.034	0.045	0
5	88	7.53	0.027	0.029	12
10	46	7.47	0.015	0.015	54
15	31	7.29	0.016	0.014	69
20	29	7.26	0.015	0.013	71
25	31	7.22	0.014	0.011	69
30	30	7.20	0.014	0.013	70

ตารางที่ ข-4 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายช่วงที่ 4 ด้วยกระบวนการจาร์เทส

ช่วงที่ 4					
ความเข้มข้นalum (mg/l)	cell cells/ml	pH	OD		ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
			560	680	
0	113	7.86	0.029	0.038	0
5	45.5	7.80	0.017	0.021	67.5
10	31	7.62	0.015	0.017	82
15	25	7.57	0.013	0.015	88
20	24	7.56	0.012	0.014	89
25	22	7.51	0.010	0.013	91
30	23	7.42	0.010	0.012	90



ภาคผนวก ข.4 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายช่วงที่ 2 ด้วยถังลอยตะกอน

ตารางที่ ข-5 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายช่วงที่ 2

ช่วงที่ 2						
Sediment						
Sample	OD		% Removal (OD)		จำนวนเซลล์	% Removal (cell)
Start	560	680	560	680	( $\times 10^4$ )	
	0.049	0.054			100	
40	0.036	0.041	26.53	24.07	91	24.00
45	0.04	0.044	18.37	18.52	76	
50	0.043	0.049	12.24	9.26	96	
55	0.041	0.048	16.33	11.11	79	
60	0.045	0.048	8.16	11.11	86	
	Avg		16.33	14.81	Avg	19.67
					SD	5.13
Coagulation						
Start	0.069	0.078			100	
40	0.039	0.044	43.48	43.59	65	35.00
45	0.04	0.045	42.03	42.31	57	43.00
50	0.045	0.052	34.78	33.33	71	29.00
55	0.043	0.049	37.68	37.18	71	29.00
60	0.044	0.05	36.23	35.90	64	36.00
	Avg		38.84	38.46	Avg	34.40
					SD	5.81

ตารางที่ ข-5 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายช่วงที่ 2 (ต่อ)

DAF						
Sample	OD		% Removal (OD)		จำนวนเซลล์	% Removal (cell)
	560	680	560	680	(x10 <sup>4</sup> )	
Start	0.064	0.076			112	
10	0.024	0.026	62.50	65.79	28	60.42
15	0.022	0.032	65.63	57.89	24	66.07
20	0.032	0.032	50.00	57.89	25	64.66
25	0.031	0.023	51.56	69.74	36	
	Avg		57.42	62.83	Avg	63.72
					SD	2.94
DAF+Coagulation						
Start	0.055	0.057			77	
15	0.021	0.019	61.82	66.67	16	67.10
20	0.021	0.02	61.82	64.91	17	65.04
25	0.021	0.022	61.82	61.40	16	67.10
30	0.022	0.022	60.00	61.40	18	62.99
	Avg		61.36	63.60	Avg	65.56
					SD	1.97

ภาคผนวก ข.5 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายช่วงที่ 4 ด้วยถังลอยตะกอน

ตารางที่ ข-6 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายช่วงที่ 4

ช่วงที่ 4						
Sediment						
Sample	OD		% Removal (OD)		จำนวนเซลล์ ( $\times 10^4$ )	% Removal (cell)
	560	680	560	680		
Start	0.037	0.051			92	
40	0.026	0.03	29.73	41.18	45	51.09
45	0.025	0.036	32.43	29.41	48	47.83
50	0.027	0.037	27.03	27.45	71	
55	0.027	0.04	27.03	21.57	56	39.13
60	0.03	0.035	18.92	31.37	54	41.30
	Avg		27.03	30.20	Avg	44.84
					SD	5.57
Coagulation						
Start	0.038	0.05			113	
40	0.025	0.029	34.21	42	52	53.98
45	0.027	0.027	28.95	46	52	53.98
50	0.026	0.034	31.58	32	44	61.06
55	0.03	0.034	21.05	32	74	
60	0.03	0.037	21.05	26	42	62.83
	Avg		27.37	35.6	Avg	57.96
					SD	4.65

ตารางที่ ข-6 ผลการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่ายช่วงที่ 4 (ต่อ)

DAF						
Sample	OD		% Removal (OD)		จำนวนเซลล์	% Removal (cell)
	560	680	560	680	( $\times 10^4$ )	
Start	0.102	0.112			118	
10	0.038	0.038	62.75	66.07	17	43.64
15	0.041	0.047	59.80	58.04	42	
20	0.043	0.046	57.84	58.93	30	
25	0.046	0.057	54.90	49.11	42	43.64
	Avg		58.82	58.04	Avg	43.64
					SD	0
DAF+Coagulation						
Start	0.112	0.122			121	
15	0.05	0.05	55.36	59.02	39	48.97
20	0.05	0.055	55.36	54.92	40	47.66
25	0.052	0.054	53.57	55.74	44	42.42
30	0.051	0.053	54.46	56.56	46	39.81
	Avg		54.69	56.56	Avg	44.71
					SD	4.32

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพชร โพธิ์ทอง เกิดวันที่ 8 ธันวาคม 2529 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลพัทลุง จ.พัทลุง ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพัทลุง จ.พัทลุง และระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย