

ความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพของฟองและประสิทธิภาพของระบบฟองลอย



นางสาวจินดารัตน์ สมุทรจรรย์

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1632-8

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RELATIONSHIP BETWEEN FOAM STABILITY AND FROTH FLOTATION EFFICIENCY



Miss Jindarat Samuthjarindr

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1632-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพของฟองและประสิทธิภาพของระบบฟองลอย
โดย	นางสาวจินดารัตน์ สมุทรจารินทร์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ชวเดช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมช รังสรรค์วิจิตร

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... รองคณบดีฝ่ายบริหาร  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ การเที่ยง) รักษาราชการแทนคณบดี  
คณะวิทยาศาสตร์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร.เพ็ชรพรอค ทิศคร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ชวเดช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมช รังสรรค์วิจิตร)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.สุชญา นิติวฒนานนท์)

จินดารัตน์ สมุทรจารย์ : ความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพของฟองและ  
ประสิทธิภาพของระบบฟองลอย (RELATIONSHIP BETWEEN FOAM  
STABILITY AND FROTH FLOTATION EFFICIENCY) อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.  
ดร. เลอสรวง เมฆสุด อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ดร. สุเมธ ขวเดช, ผศ.ดร.  
ปราโมช รั้งสรรคิวิจิตร, 94 หน้า, ISBN 974-03-1632-8.

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพของฟอง  
และประสิทธิภาพของระบบฟองลอยในการกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย สารลดแรง  
ตึงผิวที่ใช้ ได้แก่ โซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต (เอสดีพีเอส) สารฟลอคคูลแลนท์ที่ใช้ คือ  
แคทอิออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ (โนวัส ซีอี 2680) การทดลอง ส่วนแรกเป็นการศึกษาปัจจัยที่มี  
ผลต่อเสถียรภาพของฟอง โดยได้ทำการทดลองในคอลัมน์ ที่ทำด้วยท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าน  
ศูนย์กลางต่างๆกัน 4 ขนาด คือ 4, 8, 12 และ 20 นิ้ว ซึ่งเป็นระบบฟองลอยแบบกะ โดย  
พบว่า ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดต่อการเกิดฟอง คือ พลังค์ของอากาศ ความเข้มข้นของสารลด  
แรงตึงผิวที่เติมก็มีผลต่อความสูงของชั้นฟองด้วย แต่ เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ ใน  
ขอบเขตที่ศึกษาไม่มีผลต่อความสูงของชั้นฟอง ส่วนที่สองเป็นการศึกษาประสิทธิภาพของ  
ระบบฟองลอยในการแยกน้ำมันโดยใช้คอลัมน์โพลเทชัน ซึ่งทำการทดลองในคอลัมน์แก้ว  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม (4 นิ้ว) ความสูง 140 ซม น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการ  
ทดลองมีความเข้มข้นของน้ำมันเครื่อง (พีทีที เพอร์ฟอร์มมา) 50 มก/ล คงที่ตลอดการ  
ทดลอง ซึ่งจากการทดลอง พบว่า การแยกน้ำมันมีค่าสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น  
ของสารลดแรงตึงผิวเท่ากับความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ (ซีเอ็มซี) และความเข้มข้น  
ของแคทอิออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ 250 มก/ล การเติมสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ให้ประสิทธิภาพ  
ในการแยกน้ำมันสูงกว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวเพียงอย่างเดียว (ประสิทธิภาพ 6.9  
เปอร์เซ็นต์) และเมื่อลดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเหลือ 0.5 ซีเอ็มซี ประสิทธิภาพใน  
การแยกน้ำมันจะลดลงเหลือ 77.5 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชา...เคมีเทคนิค.....	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา...เคมีเทคนิค.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา...2544.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

.....

4272234723 : CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : FOAM STABILITY/FROTH FLOTATION

JINDARAT SAMUTHJARINDR: RELATIONSHIP BETWEEN FOAM STABILITY AND FROTH FLOTATION EFFICIENCY. THESIS ADVISOR ASSOC.PROF.DR.LURSEONG MEKASUT THESIS CO-ADVISOR ASSOC.PROF.DR.SUMAETH CHAVADEJ, ASST.PROF.DR. PRAMOCH RUNGSANVIJIT. 94 pp. ISBN 974-03-1632-8

The objective of this study was to find the relationship between foam stability and froth flotation efficiency in oily wastewater treatment. Sodium dodecylbenzenesulfonate (SDBS) and the Novous CE 2680 were used as the surfactant and flocculant, respectively. The first part of this work was to investigate the operational parameters affecting foam stability by using batch flotation columns. The columns were made of PVC pipes with four different diameters: 4, 8, 12 and 20 in. The results showed that the foam height was significantly affected with the air flux. The concentration of surfactant added also affected positively the foam height. However, the column diameter in the studied range did not affect the foam height. The second part was to determine froth flotation efficiency in treating oily wastewater treatment using a continuous froth flotation unit. The column made of glass had 10 and 140 cm in diameter and height, respectively. The synthetic wastewater used in this experiment had 50 mg/l of lubricant oil (PTT Performa) and it was constantly stirred. From the experimental results, it was found that the oil removal reached 90 percent efficiency at the critical micelle concentration of surfactant and 250 mg/l of a cationic polyelectrolyte. The addition of the polyelectrolyte gave much higher efficiency of oil removal than using only the surfactant, which only had 6.9 percent of oil removal efficiency. And when reducing a surfactant concentration to 0.5 CMC, the oil removal efficiency decreased to 77.5 percent.

Department/Program...Chemical Technology Student's signature .....

Field of study...Chemical Technology Advisor's signature.....

Academic year.....2001..... Co-advisor's signature.....

.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณา ความช่วยเหลือ และการสนับสนุนจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.เลอสรวง เมฆสุต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุเมธ ชวเดช และผศ.ดร.ปราโมช รังสรรค์วิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดต่างๆ ของการวิจัยด้วยดีมาตลอด

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนจากการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ดังนั้นจึงใคร่ขอกล่าวขอบคุณ ที่ผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนการเงินตลอดช่วงการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ท่านอาจารย์ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิค และวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การอนุเคราะห์ให้สถานที่และอุปกรณ์ในการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพัสดรา สมบูรณ์ธเนส คุณสนธิท ปรีนคร พ.จ.อ.พูน อาจปฎุ คุณชนิษฐา บุญสนธิ คุณนพรัตน์ รวนสูงเนิน และคุณสรพงษ์ อ้นเงิน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกาย กำลังสติปัญญา และกำลังใจที่ดีตลอดมา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงิน และกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎี	
2.1 สารลดแรงตึงผิว.....	3
2.2 การดูดซับและความเข้มข้นวิกฤติของการเกิดไมเซลล์.....	4
2.3 ฟอง.....	8
2.4 สารพอลิอิเล็กโทรไลต์.....	13
2.5 การประยุกต์ใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ในการแยกวีภูมิภาค.....	17
2.6 ปฏิกิริยาระหว่างสารพอลิอิเล็กโทรไลต์และสารลดแรงตึงผิว.....	21
2.7 หลักการทำให้เป็นฟองลอย.....	21
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
3. การทดลอง	
3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	32
3.4 แผนการทดลอง.....	33
3.5 วิธีวิเคราะห์น้ำเสีย.....	37
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1 ระบบฟองลอยแบบกะ.....	38
4.2 ระบบฟองลอยแบบต่อเนื่อง.....	45
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	59

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
รายการอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก.....	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	94



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

### หน้า

ตารางที่ 2.1	การนำสารลดแรงตึงผิวไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม และผลิตภัณฑ์ต่างๆ.....	5
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่างของฟองในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม.....	9
ตารางที่ 2.3	ตัวอย่างของฟองที่พบในชีวิตประจำวัน.....	10
ตารางที่ 2.4	การประยุกต์ใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ในอุตสาหกรรมต่างๆ.....	15
ตารางที่ 2.5	ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ใน กระบวนการฟลอคคูเลชัน.....	16
ตารางที่ ค-1	ข้อมูลการทดลองความสูงของชั้นฟองของคอลัมน์ โพลเทชันขนาดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1ซีเอ็มซี.....	75
ตารางที่ ค-2	ข้อมูลการทดลองความสูงของชั้นฟองของคอลัมน์ โพลเทชันขนาดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1ซีเอ็มซี.....	77
ตารางที่ ค-3	ข้อมูลความสูงของชั้นฟองที่ระดับของของเหลวเริ่มต้นต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 ซีเอ็มซี.....	79
ตารางที่ ค-4	ข้อมูลความสูงของชั้นฟองที่ระดับของของเหลวเริ่มต้นต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี.....	81
ตารางที่ ค-5	ข้อมูลความสูงของชั้นฟองที่คงที่ในคอลัมน์โพลเทชัน.....	83
ตารางที่ ค-6	ข้อมูลความสูงของชั้นฟองที่ค่าฟลักซ์ของอากาศต่างๆ.....	84
ตารางที่ ค-7	ข้อมูลความเข้มข้นและสัดส่วนความเข้มข้นของสารลด แรงตึงผิวในชั้นน้ำและชั้นฟองที่ค่าฟลักซ์ของอากาศต่างๆ.....	86
ตารางที่ ง-1	ข้อมูลการทดลองเพื่อหาเวลาที่น้ำมันขาออกเริ่มเข้าสู่ สภาวะคงที่.....	87
ตารางที่ ง-2	ข้อมูลการทดลองการแยกน้ำมันของระบบฟองลอยที่ความสูง ของชั้นฟองต่างๆ.....	88

## หน้า

ตารางที่ ง-3	ข้อมูลการทดลองการแยกน้ำมันของระบบฟองลอย เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น 1 ซีเอ็มซี ร่วมกับ สารพอลิอิเล็กโทรไลต์.....89
ตารางที่ ง-4	ข้อมูลการทดลองการแยกน้ำมันของระบบฟองลอย เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น 0.5 ซีเอ็มซี ร่วมกับ สารพอลิอิเล็กโทรไลต์.....90



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โมเลกุลสารลดแรงตึงผิว.....	3
รูปที่ 2.2 การดูดซับและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว.....	6
รูปที่ 2.3 แรงระหว่างโมเลกุลในสารละลาย.....	7
รูปที่ 2.4 โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวในการเกิดไมเซลล์.....	7
รูปที่ 2.5 การเกิดฟองของสารลดแรงตึงผิว.....	8
รูปที่ 2.6 เสถียรภาพของฟอง.....	9
รูปที่ 2.7 ความแตกต่างของความดันภายในลาเมลลาของฟอง.....	11
รูปที่ 2.8 ผลของการขยายตัวของพื้นผิว.....	12
รูปที่ 2.9 การทำงานของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ทำหน้าที่เป็น Primary Flocculant และ Flocculant Aid.....	19
รูปที่ 2.10 กลไกการทำงานของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่เป็น Flocculant Aid แบบ Bridging และ Patch Flocculation.....	19
รูปที่ 2.11 กระบวนการทำให้เป็นฟองลอย.....	22
รูปที่ 2.12 ลักษณะการเกาะตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวหรือ สารพอลิอิเล็กโทรไลต์กับอนุภาคน้ำมัน.....	23
รูปที่ 3.1 แผนผังอุปกรณ์ทดลองระบบฟองลอยแบบกะ.....	32
รูปที่ 3.2 แผนผังอุปกรณ์ทดลองระบบฟองลอยแบบต่อเนื่อง.....	34
รูปที่ 4.1 ผลของขนาดของคอลลอยด์ฟอสเฟตต่อการเกิดฟอง ที่ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว 0.1 ซีเอ็มซี.....	39
รูปที่ 4.2 ผลของขนาดของคอลลอยด์ฟอสเฟตต่อการเกิดฟอง ที่ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี.....	39
รูปที่ 4.3 ผลของระดับของของเหลวเริ่มต้นต่อการเกิดฟอง ในคอลลอยด์ฟอสเฟต ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 ซีเอ็มซี.....	40

รูปที่ 4.4	ผลของระดับของของเหลวเริ่มต้นต่อการเกิดฟอง ในคอลัมน์โพลเทชัน ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี.....	40
รูปที่ 4.5	ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ต่อความสูง ของชั้นฟอง ที่ระดับของของเหลวเริ่มต้น 50 ซม ความเข้มข้น ของสารลดแรงตึงผิว 0.1 และ 1 ซีเอ็มซี.....	42
รูปที่ 4.6	ผลของค่าฟลักซ์ของอากาศต่อการเกิดฟองในคอลัมน์ ขนาด 4 นิ้ว ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 ซีเอ็มซี ระดับของของเหลวเริ่มต้น 50 ซม.....	42
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของอากาศและความสูง ของชั้นฟองที่คงที่.....	43
รูปที่ 4.8	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำและชั้นฟอง ที่ค่าฟลักซ์ของอากาศต่างๆ ในคอลัมน์โพลเทชันขนาด 4 นิ้ว ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 ซีเอ็มซี.....	44
รูปที่ 4.9	สัดส่วนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำและชั้นฟอง ที่ค่าฟลักซ์ของอากาศต่างๆ.....	45
รูปที่ 4.10	ปริมาณน้ำมันในน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ ตลอดการทดลอง.....	46
รูปที่ 4.11	ปริมาณน้ำมันในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ และในชั้นฟอง ที่ความสูงของชั้นฟองต่างๆ ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี.....	49
รูปที่ 4.12	ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของระบบฟองลอย ที่ความสูงของชั้นฟองต่างๆ.....	49
รูปที่ 4.13	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำและชั้นฟอง ที่ความสูงของชั้นฟองต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของชั้นฟองกับปริมาตร ฟองที่ล้นออกมา.....	50
รูปที่ 4.15	สัดส่วนความเข้มข้นของน้ำมันที่ความสูงของชั้นฟองต่างๆ.....	51
รูปที่ 4.16	สัดส่วนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ความสูง ของชั้นฟองต่างๆ.....	51

## หน้า

รูปที่ 4.17 ปริมาณน้ำมันขาออกในน้ำที่ออกจากคอลัมน์และในชั้นฟอง ที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี.....	53
รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของระบบฟองลอย ที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี.....	53
รูปที่ 4.19 ปริมาณน้ำมันในน้ำที่ออกจากคอลัมน์และในชั้นฟอง ที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.5 ซีเอ็มซี.....	54
รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของระบบฟองลอยที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.5 ซีเอ็มซี.....	54
รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำและชั้นฟอง ที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี.....	55
รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำและชั้นฟอง ที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.5 ซีเอ็มซี.....	55
รูปที่ 4.23 ความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ในชั้นน้ำและ ชั้นฟอง ที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสาร ลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี.....	56
รูปที่ 4.24 ความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ในชั้นน้ำและ ชั้นฟอง ที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสาร ลดแรงตึงผิว 0.5 ซีเอ็มซี.....	56
รูปที่ 4.25 สัดส่วนความเข้มข้นของน้ำมันที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.5 และ 1 ซีเอ็มซี.....	57
รูปที่ 4.26 สัดส่วนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.5 และ 1 ซีเอ็มซี.....	57

## หน้า

รูปที่ 4.27	สัดส่วนความเข้มข้นของสารพอลิเอทิลีนไคโรไลต์ผิว ที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรง ตึงผิว 0.5 และ 1 ซีเอ็มซี.....	58
รูปที่ ซ-1	ชุดอุปกรณ์ซีบเลเตอร์.....	70



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

น้ำมันและไขมันมักพบปนเปื้อนในน้ำเสียที่มาจากหลากหลายกิจการ เช่น ร้านอาหาร สถานบริการ โรงภาพยนตร์ โรงงานปลากะปอง เป็นต้น ในส่วนของน้ำเสียจากสถานบริการพบว่า มาจาก การล้างรถ ซ่อมรถ และ การเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วน้ำมันเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าส่วนที่มาจากร้านอาหาร และมีผลกระทบต่อระบบบำบัดแบบชีวภาพ เนื่องจากน้ำมันและไขมันเหล่านี้เป็นสารประกอบพวกกลีเซอรอลรวมกับกรดไขมันต่างๆ ไขมันเหล่านี้เป็นสารอินทรีย์ที่มีความคงตัว และย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ยาก และตามมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมมีข้อกำหนดว่า ปริมาณน้ำมันและไขมันต้องไม่เกิน 5.0 มก/ล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดน้ำมันและไขมันในน้ำทิ้งก่อนไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และควรแยกออกก่อนที่จะไหลเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพ

น้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย อาจอยู่ในรูปน้ำมันอิสระ (Free Oil) หรืออยู่ในรูปอิมัลชัน (Emulsion) แต่โดยทั่วไปมักอยู่ในรูปน้ำมันอิสระ การแยกน้ำมันในน้ำเสียที่มีการประยุกต์ใช้ อาจแยกเป็น 2 วิธี ได้แก่ (สุเมธ ชวเดช, 2535) <sup>[1]</sup>

1. Oil-trap Chamber เป็นวิธีการที่ใช้แรงโน้มถ่วงของโลกในการแยกน้ำมัน โดยอาศัยสมบัติความหนาแน่นที่ต่ำกว่าน้ำ เมื่อน้ำเสียไหลผ่านถังที่มีเวลาเก็บกักนานเพียงพอ น้ำมันจะลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ ทำให้สามารถแยกออกได้ ถังดักน้ำมันนี้อาจมีแผ่นเอียงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน วิธีการนี้กล่าวได้ว่าเป็นวิธีการที่ง่าย และมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันไม่สูงมากนัก เหมาะสำหรับน้ำมันที่เบากว่าน้ำมากๆ และอยู่ในรูปอิสระ ดังนั้นจึงนิยมประยุกต์ใช้สำหรับน้ำเสียปริมาณน้อยๆ หรือใช้ในการกำจัดน้ำมันเบื้องต้น
2. Dissolved Air Flotation (DAF) หรือการทำให้ลอย เป็นกระบวนการที่นิยมใช้มาก เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย และมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ หลักการ คือ ทำให้น้ำมันซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยขึ้น โดยอาศัยแรงลอยตัวขึ้นของฟองอากาศพองอนุภาคของน้ำมันให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ฟองอากาศทำให้เกิดขึ้นในปริมาณมาก โดยการอัดอากาศที่ความดัน 5 บรรยากาศ และลดความดันเหลือ 1 บรรยากาศ ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก จากนั้นน้ำมันที่อยู่บริเวณผิวน้ำจะถูกกวาดออกจากถัง ข้อดีของวิธีนี้ คือ สาร

แขวนลอยขนาดเล็กสามารถถูกแยกออกได้ด้วย ต้องการพื้นที่ไม่มากในการติดตั้งระบบ ไม่มีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นรบกวน เพราะเวลาเก็บกักสั้นและมีปริมาณออกซิเจนในถังมากพอ แต่อย่างไรก็ตามระบบ DAF นี้ มีค่าใช้จ่ายสูงทั้งในส่วนของอุปกรณ์ และการบำบัด

ระบบฟองลอย (Froth Flotation System) เป็นระบบที่ใช้เป่าอากาศให้เกิดฟอง เพื่อแยกสารแขวนลอย น้ำมันและไขมัน โดยได้รับการพัฒนาใช้ในการแยกแร่ ต่อมาได้เริ่มมีการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งนี้เนื่องจาก ระบบฟองลอย ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องการพลังงานต่ำ ทำให้ค่าใช้จ่ายต่ำ ใช้เวลาในการบำบัดสั้น และมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันสูง ในระบบนี้จะมีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไป เมื่อเป่าอากาศจะเกิดฟองลอยขึ้น และสามารถพาน้ำมันรวมถึงของแข็งมาสะสมที่ฟอง จึงสามารถแยกน้ำมันออกได้ ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบฟองลอยนี้ ได้แก่ ชนิดสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ ความสูงของชั้นฟอง อัตราการเป่าอากาศ เวลาเก็บกัก ตลอดจนความเข้มข้นของน้ำมันที่เข้ามาในระบบ ซึ่งในส่วนของความสูงของชั้นฟองนั้นมีความสำคัญต่อระบบฟองลอยมาก และขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการเป่าอากาศ ขนาดของคอลัมน์โฟลเทชันที่ใช้ในระบบฟองลอย ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ สารเคมีที่เติมลงในระบบ เช่น สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ เพื่อช่วยให้อนุภาคของแข็งและน้ำมันเกาะติดกัน ทำให้ได้โครงสร้างที่สามารถเกาะติดกับฟองอากาศได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงปริมาณสารที่เข้ามาในระบบ เช่น น้ำมัน ของแข็ง สารแขวนลอย โดยในการนำไปใช้งานจริงอาจเกิดปัญหา คือ ปริมาณของฟองที่เกิดไม่ก่อตัว และไม่ล้นออก ทำให้ไม่สามารถแยกน้ำมันและสารแขวนลอยได้ และทางตรงกันข้าม อาจเกิดฟองปริมาณมากเกินไป (Wet Foam) ก็จะทำให้มีปริมาณน้ำฟองมากเกินไป เป็นปัญหาที่ต้องกำจัดต่อไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดฟอง และประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของระบบฟองลอย ซึ่งจะมีประโยชน์ในการออกแบบระบบฟองลอยสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันปนเปื้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

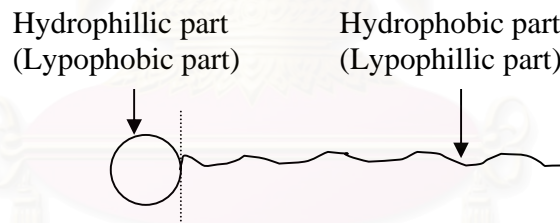


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นคำย่อของ Surface Active Agent เป็นสารที่มีสมบัติในการดูดซับได้สูงที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาค ทำให้แรงตึงผิว (Surface Tension) ของสารละลายต่ำลง สารลดแรงตึงผิวมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยส่วนหัว คือส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) หรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำมัน (Lypophobic) และส่วนหาง คือ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) หรือส่วนที่ชอบน้ำมัน (Lypophilic) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวที่ชอบน้ำจะละลายน้ำได้ ส่วนหางเป็นอนุพันธ์ของสารอินทรีย์ซึ่งจะเป็นสายโซ่ยาว สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ คือ ไฮโดรคาร์บอน ฟลูออโรคาร์บอน และสารพอลิเมอร์พวกซิลิโคน (Rosen, 1989)<sup>[33]</sup>



รูปที่ 2.1 โมเลกุลสารลดแรงตึงผิว (Rosen, 1989)<sup>[33]</sup>

นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวยังสามารถแบ่งเป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ ตามธรรมชาติของส่วนหัว คือ แคตไอออนิก (Cationic Surfactant) แอนไอออนิก (Anionic Surfactant) นอนไอออนิก (Nonionic Surfactant) และสวิตเตอร์ไอออนิก (Switterionic Surfactant)

##### 2.1.1 แอนไอออนิก

เป็นสารลดแรงตึงผิวซึ่งส่วนหัวมีประจุเป็นลบ เช่น  $\text{RCOO}^- \text{M}^+$  (Carboxyl),  $\text{RSO}_3^- \text{M}^+$  (Sulfonate) หรือ  $\text{ROSO}_3^- \text{M}^+$  (Sulfate)

### 2.1.2 แคทไอออนิก

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวมีประจุเป็นบวก เช่น  $R_4N^+Cl^-$  (Quarternary Ammonium Halide)

### 2.1.3 นอนไอออนิก

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวไม่มีประจุ แต่สามารถละลายน้ำได้เนื่องจากกลุ่มอนุภาคที่มีความเป็นขั้วสูง เช่น  $-OCH_2CH_2O-$  (Polyoxyethylene)

### 2.1.4 สวิตเตอร์ไอออนิก

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวมีทั้งประจุบวกและลบ เช่น  $RN^+H_2CH_2COO^-$  (Long-chain Amino Acid),  $RN^+(CH_3)_2CH_2CH_2SO_3^-$  (Sulfobetaine)

ธรรมชาติของส่วนหางจะแตกต่างจากส่วนหัว โดยมีส่วนหางมักจะประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่มีสายยาว และมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน (Myers, 1946) เช่น

- Long, Straight Chain Alkyl Groups
- Branched Chain Alkyl Groups
- Alkylbenzenes
- Alkylnaphthalenes
- Fluoroalkyl Groups
- Polydimethylsiloxenes
- High Molecular Weight Polyoxypropylene Glycol Derivatives

การนำสารลดแรงตึงผิวไปประยุกต์ใช้ในทางวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมมีเป็นจำนวนมาก ตั้งแต่กระบวนการเบื้องต้น เช่น การทำให้วัตถุที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นและนำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม จนถึงการเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น สี เครื่องสำอาง ยา และอาหาร ดังแสดงในตารางที่ 2.1

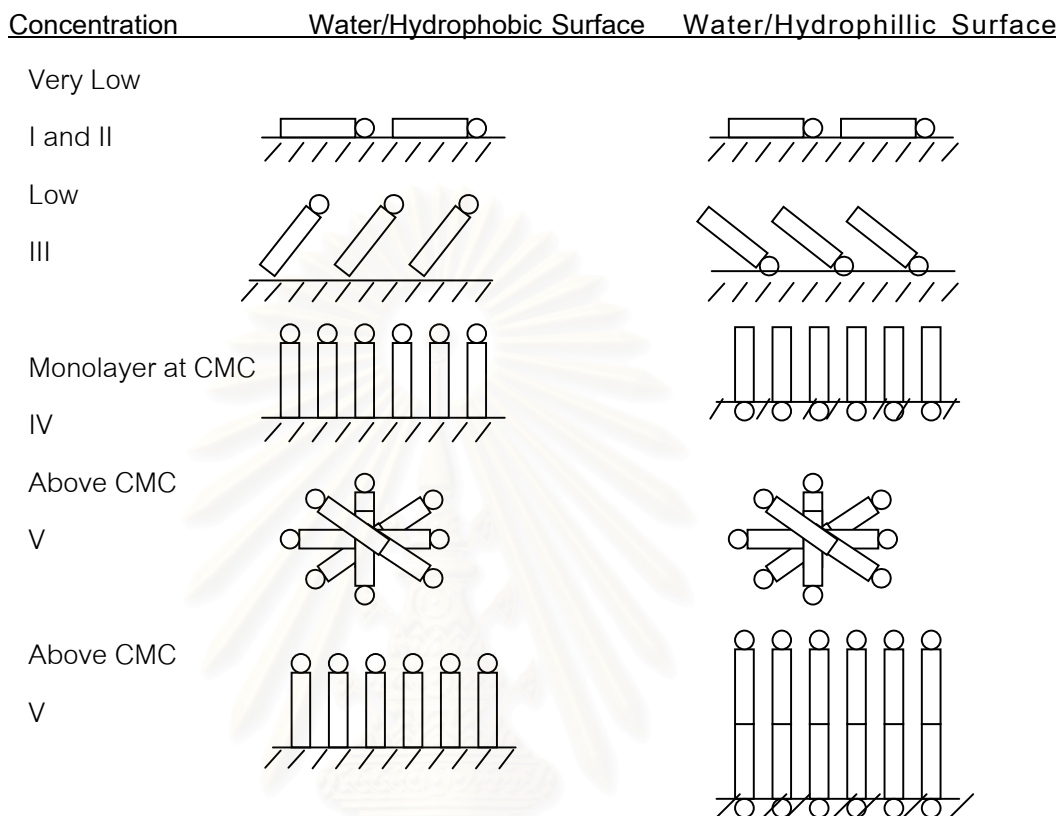
## 2.2 การดูดซับและความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์

การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวของแข็ง ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย ดังแสดงในรูป 2.2 ที่ความเข้มข้นต่ำๆ (I และ II) โมเลกุลจะวางตัวในแนวระนาบบนพื้นผิว ขณะที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น (III) จำนวนโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะไม่มีการว่างเพียงพอสำหรับโมเลกุลที่จะจัดวางตัวในแนวระนาบ

ดังนั้นโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวจะเริ่มเรียงตัวใหม่ การเรียงตัวขึ้นกับธรรมชาติของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่มีอยู่ ถ้าโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวมีเพียงพอก็จะเรียงตัวอยู่ในรูปแบบชั้นของโมเลกุล (Unimolecular Layer) ซึ่งที่ความเข้มข้นนี้ คือ “ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์หรือซีเอ็มซี (Critical Micelle Concentration, CMC)” ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากกว่าความเข้มข้นที่ซีเอ็มซี (V และ IV) พื้นผิวที่ขอบน้ำจะมีมากกว่าหนึ่งชั้นของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่จะสามารถเรียงตัวเป็นโครงสร้างบนพื้นผิวของของแข็ง นอกจากนี้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายจะเรียงตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่าไมเซลล์ (Micelle) (Porter, 1995)<sup>[32]</sup>

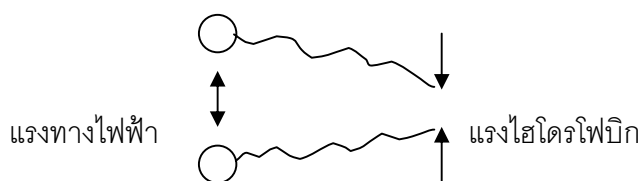
### ตารางที่ 2.1 การนำสารลดแรงตึงผิวไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมและผลิตภัณฑ์ต่างๆ (Myers, 1946)<sup>[25]</sup>

Industrial	Consumer Goods
พืชผลทางการเกษตร (Agricultural Crop Applications)	กาว (Adhesives)
วัสดุก่อสร้าง (Building materials)	น้ำยาซักแห้ง (Dry-cleaning Fluids)
สารเติมในปูนซีเมนต์ (Cement Additives)	อาหารและเครื่องดื่ม (Food and Beverages)
การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)	ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและซักกรีด (Household Cleaning and Laundering)
การทำความสะอาด (Industrial Cleaning)	ยา (Phamaceuticals)
การฟอกหนัง (Leather Processing)	ผลิตภัณฑ์ถ่ายภาพ (Photographic Products)
การหล่อลื่น (Lubrication)	สบู่, ยาสระผม, ครีม (Soaps , Shampoos ,creams)
การแยกแร่ (Ore Flotation)	ผลิตภัณฑ์กันน้ำ (Waterproofing)
อุตสาหกรรมกระดาษ (Paper Manufacture)	
การนำกลับปิโตรเลียม (Petroleum Recovery)	
การเตรียมพื้นผิว (Surface Preparation)	
สิ่งทอ (Textiles)	

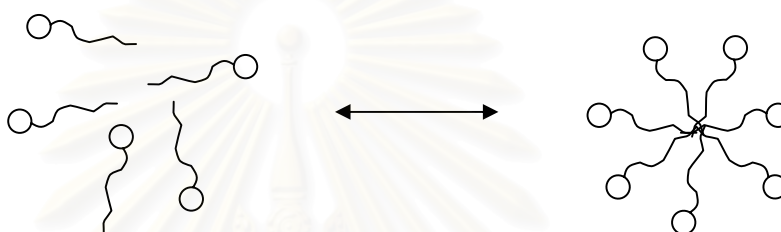


รูปที่ 2.2 การดูดซับและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (Porter, 1995)<sup>[32]</sup>

อิทธิพลที่มีผลทำให้สารลดแรงตึงผิวเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มซึ่งเรียกว่า ไมเซลล์ ได้แก่ แรงทางไฟฟ้า (Electrostatic Force) และแรงไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Force) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แรงทางไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งจะเกิดแรงผลัก (Repulsion) เนื่องจากส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวมีประจุเดียวกัน ถ้าส่วนหัวมีความเป็นขั้วมากจะทำให้การเกิดไมเซลล์ยากขึ้นด้วย ดังนั้นสารประเภทนอนไอออนิก ซึ่งไม่มีประจุจึงเกิดไมเซลล์ที่ความเข้มข้นต่ำๆ เมื่อเปรียบเทียบกับสารลดแรงตึงผิวชนิดมีประจุ ส่วนแรงไฮโดรโฟบิก เกิดที่ส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว เป็นแรงดึงดูดกัน (Attractive Force) การดึงส่วนหางเข้าหากันนั้นซับซ้อนมาก เกิดจากเอนโทรปีและเอนทาลปีที่เปลี่ยนไป เมื่อสารลดแรงตึงผิวละลายในน้ำ ส่วนหางซึ่งไม่ชอบน้ำจึงพยายามที่จะมารวมกันภายในเพื่อหนีน้ำ ส่วนหัวซึ่งชอบน้ำจะอยู่ด้านนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 แรงระหว่างโมเลกุลในสารละลาย (Clint, 1992)<sup>[5]</sup>



รูปที่ 2.4 โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวในการเกิดไมเซลล์  
(Rosen, 1989)<sup>[33]</sup>

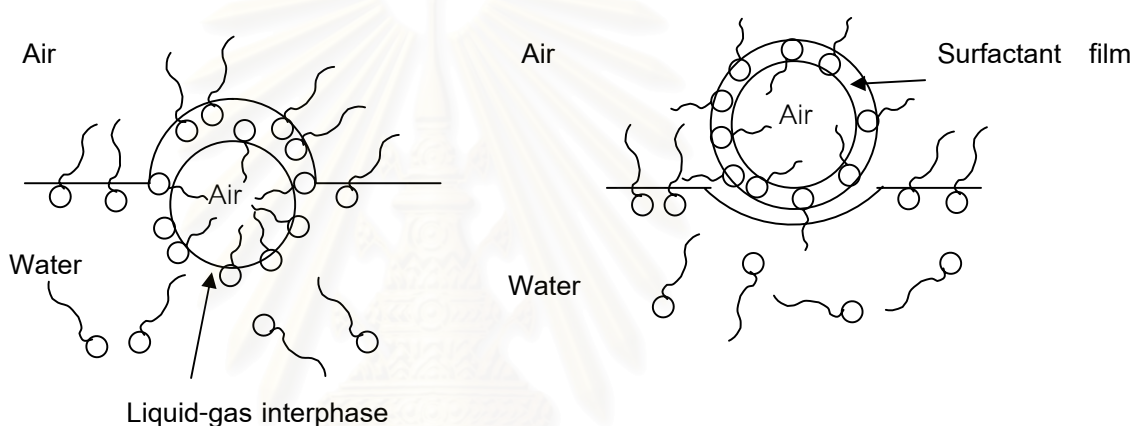
เมื่อความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวต่ำ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะอยู่ห่างกัน ทำให้แรงทั้ง 2 มีค่าต่ำ แต่เมื่อความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวสูงขึ้น โมเลกุลเกิดแรงทั้ง 2 มากขึ้น ถ้าแรงทางไฟฟ้ามากกว่าแรงไฮโดรโฟบิกมากๆ โมเลกุลจะไม่รวมตัวกันไม่ว่าความเข้มข้นจะมากขึ้นเพียงใด และจะกระจายตัวเป็นสารแขวนลอยในน้ำ แต่ถ้าเป็นโมเลกุลที่มีส่วนหางสั้น โมเลกุลละลายน้ำได้มากขึ้น ในกรณีกลับกัน ถ้าแรงไฮโดรโฟบิกมากกว่าแรงทางไฟฟ้ามากๆ โมเลกุลจะรวมตัวกันง่าย แต่จะไม่ละลายน้ำ และมีค่าซีเอ็มซีต่ำจนไม่อาจวัดค่าได้ ดังนั้นความสัมพันธ์ของแรงทั้ง 2 และโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวจึงมีผลต่อค่าซีเอ็มซี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.3 ฟอง

### 2.3.1 การเกิดฟอง

ฟอง (Foams) เกิดขึ้นเมื่อผ่านอากาศหรือก๊าซเข้าไปภายใต้ผิวของเหลว ซึ่งของเหลวนั้นจะขยายตัวห่อหุ้มก๊าซด้วยฟิล์มของเหลว (Liquid Film) หรือกล่าวได้ว่า การเกิดฟอง คือ การกระจายของก๊าซในของเหลวซึ่งมีสัดส่วนปริมาตรของวัฏภาคกระจายสูง (Rosen, 1989)<sup>[33]</sup> ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สามารถพบเห็นฟองในชีวิตประจำวันและในอุตสาหกรรมได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3



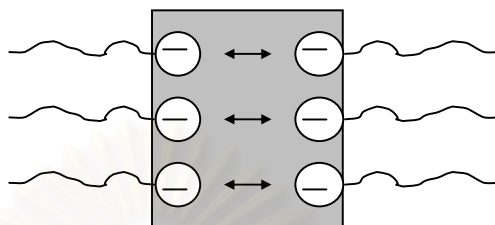
รูปที่ 2.5 การเกิดฟองของสารลดแรงตึงผิว (Rosen, 1989)<sup>[33]</sup>

การเกิดฟองมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวน้อยๆ อนุภาคของสารลดแรงตึงผิวจะอยู่ในลักษณะของอนุภาคอิสระ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นจนถึงค่าซีเอ็มซี การเกิดฟองจะเกิดได้ดี โดยที่สารลดแรงตึงผิวจะอยู่ในลักษณะเป็นไมเซลล์ ดังรูป 2.4

### 2.3.2 เสถียรภาพของฟอง

เสถียรภาพของฟอง (Foam Stability) คือ การที่ฟองไม่แตกง่าย ซึ่งเสถียรภาพของฟองเกิดจากความชื้นของน้ำตึงส่วนหัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวซึ่งชอบน้ำเข้ามาละลายน้ำ ในขณะที่ส่วนหัวที่มีประจุเหมือนกันจะมีแรงผลักรัน จึงเป็นเหตุให้ฟองอากาศมีความเสถียร ดังนั้นถ้าส่วนหัวไม่มีประจุก็จะไม่มีแรงผลักรัน ทำให้ฟองมีเสถียรภาพต่ำ ดังนั้น

เสถียรภาพของฟองจึงขึ้นกับโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวด้วย รูปที่ 2.6 แสดงผลของประจุของส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อเสถียรภาพของฟอง



รูปที่ 2.6 เสถียรภาพของฟอง (Davies and Rideal, 1963)<sup>[7]</sup>

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของฟองในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (Schramm & Wassmuth, 1994)<sup>[34]</sup>

Type	Occurrence
Undesirable Foams	Producing Oil well and Well-Head Foams Oil Flotation Process Froth Distillation and Fractionation Tower Foams Fuel Oil and Jet Tank (Truck) Foams
Desirable Foams	Foam Drilling Fluid Foam Fracturing Fluid Blocking and Diverting Foams Gas-Mobility Control Foams

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างของฟองที่พบในชีวิตประจำวัน (Schramm & Wassmuth, 1994)<sup>[34]</sup>

กลุ่ม	ผลิตภัณฑ์
อาหาร	แชมเปญ, โซดา เบียร์ วิปครีม
การทำความสะดวก	น้ำยาล้างจาน ผงซักฟอก น้ำยาซักผ้า
ผลิตภัณฑ์ดูแลเฉพาะตัว	ครีมโกนหนวด ยาสระผม ครีมอาบน้ำ
กระบวนการอุตสาหกรรม	ฟองที่ออกจากการบำบัดสิ่งปฏิกูล ฟองจากการแยกแร่หรือน้ำมัน ฟองจากการล้างเยื่อกระดาษ ฟองจากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
อื่นๆ	น้ำยาดับเพลิง ยาฆ่าแมลง, ยาฆ่าวัชพืช

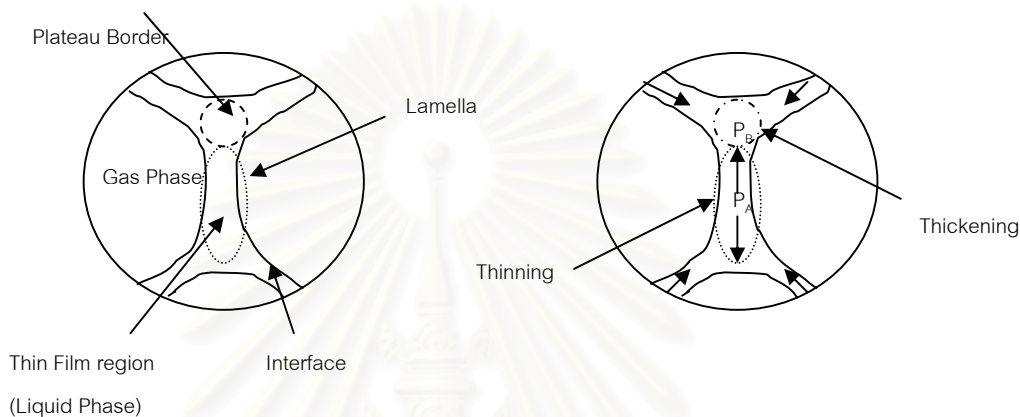
### 2.3.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพของฟอง

#### 1) Gravity Drainage and Capillary Suction

หลังจากที่ฟองเกิดขึ้นแล้ว ของเหลวที่อยู่ภายในฟองมักมีแนวโน้มที่จะไหลออก เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Force of Gravity) ซึ่งทิศทางการไหลนั้นของเหลวจะไหลลงผ่านชั้นฟิล์มของของเหลวที่ยังคงสภาพอยู่ (Existing Liquid Films) ภายในลามেলা (Lamella) ในที่สุดฟองอากาศจะไม่อยู่ในสภาพเป็นทรงกลมอีกต่อไป จุดนี้แรงแคพิลลารี (Capillary Force) จะมีอิทธิพลเช่นเดียวกับแรงโน้มถ่วงของโลก เนื่องจากความแตกต่างของความดันที่ "Plateau Borders" พื้นผิวระหว่างก๊าซ-ของเหลวมีลักษณะโค้ง และการมีลักษณะ



โค้งนี้ทำให้บริเวณ Plateau Borders เป็นพื้นที่ที่มีความดันต่ำ ( $P_B$ ) ในขณะที่บริเวณฟิล์มบางพื้นผิวมีลักษณะเรียบแบน ทำให้พื้นที่นี้มีความดันสูง ( $P_A$ ) ของเหลวจากบริเวณที่มีความดันสูงจะไหลไปยัง Plateau Borders ทำให้ชั้นฟิล์มบางลงดังรูปที่ 2.7



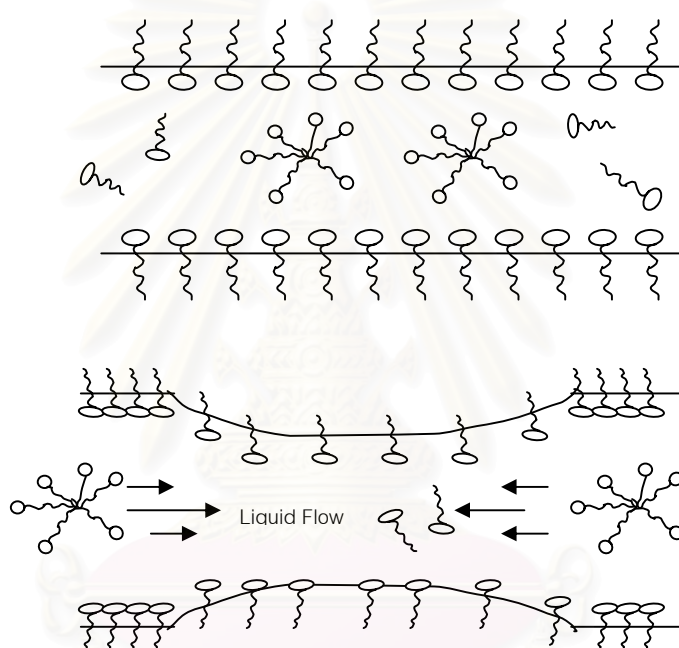
รูปที่ 2.7 ความแตกต่างของความดันภายในลามেলাของฟอง (Schramm และ Wassmuth, 1994)<sup>[34]</sup>

## 2) Surface Elasticity

ชั้นฟิล์มของฟองที่เกิดขึ้นควรมีความยืดหยุ่น เพื่อด้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างไปโดยที่ฟองยังไม่แตก ถ้าฟิล์มที่เสถียรของสารลดแรงตึงผิวเกิดการขยายตัวทันทีทำให้สัดส่วนที่ขยายขึ้นของฟิล์มมีระดับของการดูดซับสารลดแรงตึงผิวที่ต่ำกว่าสัดส่วนที่ไม่ขยาย เนื่องจากพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.8 การขยายตัวนี้ทำให้แรงตึงผิวมากขึ้น ทำให้เกิดแรงต้านต่อการขยายตัวต่อไปเพิ่มขึ้น แรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นผิวเกิดการหดตัว และถูกบีบเข้าหากันภายใต้ชั้นของเหลวโดยแรงหนืด การหดตัวของพื้นผิวนี้ทำให้เกิดการไหลของของเหลวภายในฟิล์มบางจากบริเวณที่มีแรงตึงผิวน้อยไปยังบริเวณที่มีแรงตึงผิวมาก การเคลื่อนที่ของของเหลว (Bulk Liquid) ที่เกิดจากความแตกต่างของแรงตึงผิว หรือที่เรียกว่า “The Marangoni Effect” และทำให้เกิดแรงต้านต่อการบางลงของฟิล์ม

### 3) Viscosity

ขณะที่ฟองเคลื่อนที่เข้าหากัน การบางลงของชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นและความต้านทานต่อการแตกมีความสำคัญมากต่อเสถียรภาพของฟอง ดังนั้นความหนืดระหว่างพื้นผิว (Interfacial Viscosity) จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของฟอง โดยทำให้อัตราการไหลออกของของเหลวในชั้นฟิล์มและอัตราการรวมกันของฟองช้าลง ความหนืดของของเหลว (Bulk Liquid) และความหนืดระหว่างพื้นผิวไม่ได้สร้างแรงที่ทำให้ชั้นฟิล์มเกิดความเสถียรขึ้นโดยตรง แต่จะต้านทานต่อการบางลงและการแตกของฟอง (Schramm และ Wassmuth, 1994)<sup>[34]</sup>



รูปที่ 2.8 ผลของการขยายตัวของพื้นผิว (Schramm และ Wassmuth, 1994)<sup>[34]</sup>

### 4) Electric Double-layer Repulsion (EDL)

EDL ประกอบด้วยพื้นผิวที่มีประจุ (Charged Surface) และไอออนที่มีประจุตรงข้าม (Counterions) มากกว่าไอออนที่มีประจุเหมือนกัน (Coions) กระจายอยู่ โดยไอออนที่มีประจุตรงข้ามจะถูกดูดมาที่บริเวณพื้นผิว ในขณะที่ไอออนที่มีประจุเหมือนกันจะถูกผลักออกไป เนื่องจากแต่ละด้านของฟิล์มบางสมดุลกัน จึงมีประจุอยู่เท่าๆ กัน ถ้าชั้นฟิล์มถูกทำให้เสถียรด้วยสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุ จะทำให้เกิดแรงผลัก (Repulsion Force) ขึ้น ซึ่งจะยับยั้ง

การบางลงของชั้นฟิล์ม (Thinning Process) โดยขนาดของแรงผลักดันที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความหนาแน่นของประจุและความหนาของฟิล์ม (Schramm และ Wassmuth, 1994)<sup>[34]</sup>

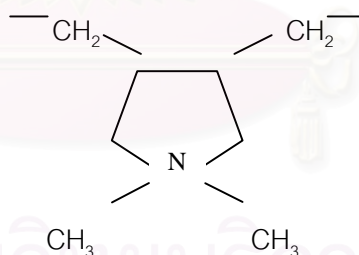
## 2.4 สารพอลิอิเล็กโทรไลต์

สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte, PE) เป็นสารพอลิเมอร์ หรือสารแมโครโมเลกุล (Macromolecule) ซึ่งประกอบด้วยยูนิตขนาดใหญ่ ที่มีกลุ่มของประจุบวกหรือประจุลบเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ และมีเคาน์เตอร์ไอออน (Counterion) ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ช่วยในการทำให้ประจุเป็นกลาง (Electroneutrality) สารพอลิอิเล็กโทรไลต์โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟเนต (Sulfonate) ฟอสเฟต (Phosphate) คาร์บอกซีเลต (Carboxylate) ไพริดีเนียม (Pyridinium) หรือกลุ่มพันธะเปปไทด์ (Peptide Bonding) ที่มีประจุต่อเข้าด้วยกันเป็นสายยาว (Dautzenberg, 1994)<sup>[6]</sup>

สารพอลิอิเล็กโทรไลต์แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะของแมโครไอออน คือ

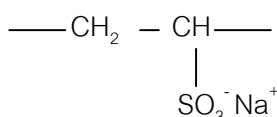
### 2.4.1 แคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Cationic Polyelectrolyte)

เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีแมโครไอออนเป็นประจุบวก ซึ่งจะแสดงสมบัติความเป็นเบส เช่น Polyquatemium-6 (Polymer of Dimethyldiallyl Ammonium Chloride)



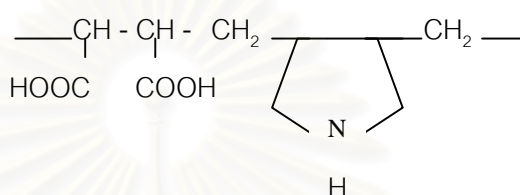
### 2.4.2 แอนไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Anionic Polyelectrolyte)

เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีแมโครไอออนเป็นประจุลบ ซึ่งแสดงสมบัติความเป็นกรด เช่น Polyvinyl-sulfonate



### 2.4.3 แอมโฟเทอริกพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Amphoteric polyelectrolyte)

เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบในโมเลกุล เช่น Maleic Acid-Diallylamine Copolymer



นอกจากนี้ยังมีสารพวกรอนอไอออนิกพอลิเมอร์ (Nonionic Polymer) ซึ่งเป็นสารแมคโครโมเลกุลที่ไม่มีประจุ เช่น Polyvinyl Alcohol หรือแม้แต่สารแมคโครโมเลกุลในธรรมชาติ เช่น โปรตีน และ ดีเอ็นเอ

สารแมคโครโมเลกุลจะเป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์เมื่ออยู่ในตัวทำละลายที่มีขั้วสูง เช่น น้ำ แล้วแคตไอออนหรือแอนไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์จึงอาจแบ่งเป็นกรดและเบสได้ ซึ่งถ้าประจุของแมคโครไอออนขึ้นกับค่าพีเอชจะเรียกว่าเป็น Weak Polyelectrolyte แต่ถ้าไม่ขึ้นกับค่าพีเอชจะเป็น Strong Polyelectrolyte (Fler, 1993)<sup>[11]</sup>

เนื่องจากสารพอลิอิเล็กโทรไลต์สามารถละลายน้ำ นำไฟฟ้า และมีความสามารถที่จะจับไอออนที่มีประจุตรงข้ามได้ดี จึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย ดังแสดงในตารางที่ 2.4

จากสมบัติที่ดีหลายประการของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ จึงได้มีการนำสารพอลิอิเล็กโทรไลต์มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารน้ำมันปนเปื้อน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่จะเกิดระหว่างแมคโครไอออนของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์กับสารที่มีประจุตรงกันข้าม เช่น สารอนินทรีย์แคตไอออนที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก แมคโครไอออน สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุ (Ionic Surfactants) อนุภาคคอลลอยด์ และการดูดซับบนพื้นผิวของของแข็ง

ตารางที่ 2.4 การประยุกต์ใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ในอุตสาหกรรมต่างๆ  
(Dautzenberg, 1994)<sup>[6]</sup>

Industrial Area	Product or Process Example
Film and Textile Industry	Viscose Process Antistatic Agents Textile Sizes
Paper Industry	Retention Aids Paper Sizes and Coating
Water and Effluent Processing	Flocculants Sludge Dewatering PE-Based Membranes
Chemical Industry	PE-Based Membranes Supporting Materials Processing Aids
Mining Industry	Flocculants
Petrol Industry	Oilwell Drilling Aids Oil Recovery Aids
Building Industry	Concrete Processing Additives Pigment Dispergants
Nutrition	Natural PE-Based Thickening and Gelling Agents
Cosmetics Industry	Antistatic Agents Gelling Agents
Medicine and Pharmacy	Tablet Coating Blood Compatibility Enhancement

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ในกระบวนการ  
ฟล็อกคูเลชัน (Dautzenberg, 1994)<sup>[6]</sup>

Component to be Flocculated	Flocculant
Humic Acids in Surface Water	Cationic Polyelectrolyte
Silica Hydrosol	Anionic Polyelectrolyte
Dyes	Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> + Cationic Polyelectrolyte
Oil from Refinery Effluents	Cationic Polyelectrolyte
Oil from Oil Water Emulsions	Cationic Polyelectrolyte
Lubricating Oil from Wastewater	Anionic Polyelectrolyte
Water from Oil/Water Emulsions	Anionic and Cationic Polyelectrolyte
Surfactants from Effluents (Flocculating Flotation)	Anionic Polyelectrolyte
Suspended Quartz	Anionic Polyelectrolyte Polyamines

1) ปฏิกริยาระหว่างสารพอลิอิเล็กโทรไลต์กับสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุ

ที่เหนือจุดซีเอ็มซี สารลดแรงตึงผิวจะอยู่ในลักษณะเป็นไมเซลล์ (Micelle) และแสดงพฤติกรรมชอบสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงกันข้าม เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารลดแรงตึงผิวกับสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยที่ส่วนที่ไม่ชอบน้ำของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวจะมีอิทธิพลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโมเลกุลทั้งสอง ปฏิกริยาระหว่างสารพอลิอิเล็กโทรไลต์และสารลดแรงตึงผิวจะเกิดจากการรวมกันของแรงไฮโดรโฟบิกในไมเซลล์ และแรงทางไฟฟ้า กับส่วนที่มีประจุของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Dautzenberg, 1994)<sup>[6]</sup> และส่วนไฮโดรโฟบิกในโมเลกุลของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ และในโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (Winnik และคณะ, 1996)<sup>[39]</sup>

ในกรณีที่เป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ชนิดนอนไอออนิกหรือ Uncharged Polymer เช่น Hydroxyethyl Cellulose จะไม่เกิดปฏิกริยากับ Ionic Surfactants อย่างไรก็ตาม สามารถทำให้เกิดปฏิกริยาระหว่างสารทั้งสองชนิดได้ โดยการปรับปรุงโครงสร้างของสารพอลิเมอร์ที่ไม่มีประจุ ด้วยการเพิ่มส่วนที่มีประจุ หรือส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิก จะได้สารชนิดใหม่ที่เรียกว่า Hydrophobically Modified Polymer ซึ่งสามารถทำปฏิกริยากับสารลดแรงตึงผิวได้ด้วยแรง

ทางไฟฟ้า หรือแรงไฮโดรโฟบิกเกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า Mixed Micelles (Kastner และคณะ, 1996 และ Botto และคณะ, 1996)<sup>[3,18]</sup>

## 2) ปฏิกริยาระหว่างสารพอลิอิเล็กโทรไลต์กับอนุภาคที่มีประจุ

การเกิดปฏิกริยาระหว่างสารพอลิอิเล็กโทรไลต์กับอนุภาคที่มีประจุตรงกันข้ามเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ต่างๆ คือ Stabilization, Ordering, Flocculation และ Coacervation โดยทั่วไปจะใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ชนิดแอนไอออนิกในการทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพ การเกิดแรงทางไฟฟ้าระหว่างสารพอลิอิเล็กโทรไลต์กับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุตรงกันข้าม จะทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันเป็นฟลอคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Bridging Flocculation) ในขณะที่เดียวกันสารพอลิอิเล็กโทรไลต์จะทำหน้าที่เป็นดิสเพอซิงเอเจนต์ (Dispersing Agent) และสารทำให้เสถียร (Stabilizer) ในระบบคอลลอยด์ โดยจะไปเพิ่มความหนืด (Viscosity) ทำให้อนุภาคที่แขวนลอยเกิดการรวมตัวกันง่ายขึ้น (Dautzenberg, 1994)<sup>[6]</sup>

## 2.5 การประยุกต์ใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ในการแยกแวกภาค

โดยทั่วไปการทำให้อนุภาคแขวนลอยหรืออิมัลชันแยกออกจากน้ำ สามารถใช้วิธีการทำให้ตกตะกอน (Sedimentation) แต่ถ้าอนุภาคนั้นมีประจุสามารถใช้การเติมสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงกันข้ามเข้าช่วย โดยเกิดแรงกระทำทางไฟฟ้า (Coulombic Interaction) ระหว่างประจุบวกและประจุลบ ในขณะที่แรงไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Force) และพันธะไฮโดรเจน (H-bond) เป็นแรงผลักดัน อนุภาคคอลลอยด์ในน้ำส่วนใหญ่มีประจุลบ ดังนั้นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่นำมาประยุกต์ใช้จึงเป็นชนิดแคทไอออนิกเป็นส่วนใหญ่ (Dautzenberg, 1994)<sup>[6]</sup> โดยมีการนำไปใช้ใน 2 ลักษณะ คือ

1. การทำให้น้ำใสขึ้น โดยเติมสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์ แล้วแยกส่วนที่เป็นฟลอคออกมา โดยการทำให้ลอยหรือตกตะกอน
2. การดึงน้ำออกจากตะกอนสลัดจ์ (Sludge Dewatering) เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของแข็ง (Solid Content) และลดปริมาณน้ำ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการขนถ่ายและกำจัดสลัดจ์ในขั้นต่อไป

### 2.5.1 การใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ในการเกิดโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และฟลอคคูเลชัน (Flocculation)

โดยปกติอนุภาคคอลลอยด์จะไม่รวมตัวกันเนื่องจากมีแรงผลักทางไฟฟ้า ดังนั้นกระบวนการโคแอกกูเลชันจึงเกี่ยวข้องกับการลดแรงผลักทางไฟฟ้า ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าใกล้กันได้ และกระบวนการฟลอคคูเลชัน จะเป็นการสร้างสารประกอบที่มีขนาดใหญ่ เชื่อมต่อกันเป็นร่างแหด้วยพันธะเคมี ซึ่งเรียกว่า Floc Networks (Manahan, 1994)<sup>[23]</sup>

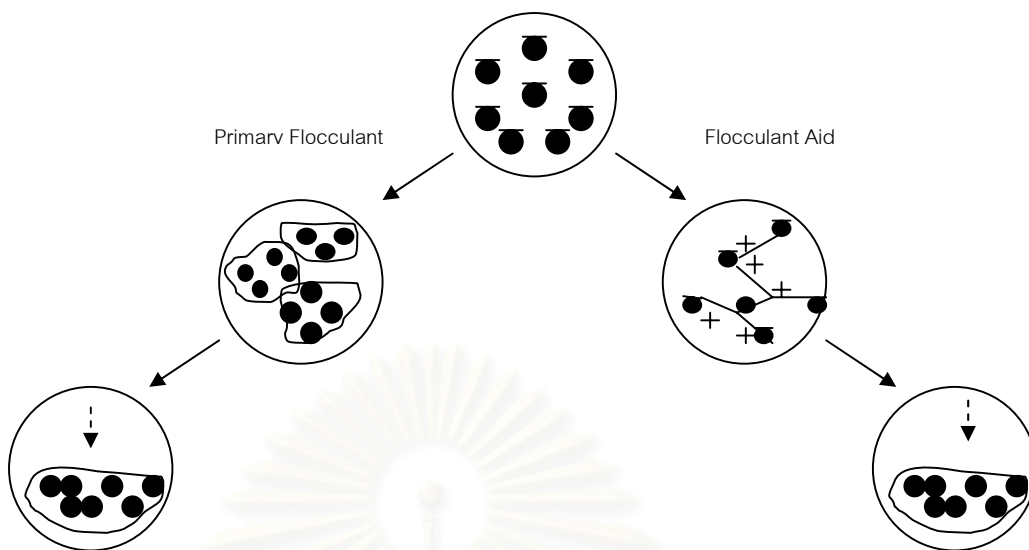
หลักการนำสารพอลิอิเล็กโทรไลต์เป็นสารช่วยในการเกิดการรวมตัวหรือฟลอคคูแลนต์ (Flocculant) ในการแยกอนุภาคคอลลอยด์จากน้ำมี 2 แนวทาง คือ

1) ใช้เป็น Primary Flocculant ซึ่งจะเกิดฟลอคที่สามารถตกตะกอนได้เร็ว ทำให้แยกพวกคอลลอยด์ออกไปได้ ดังรูปที่ 2.9

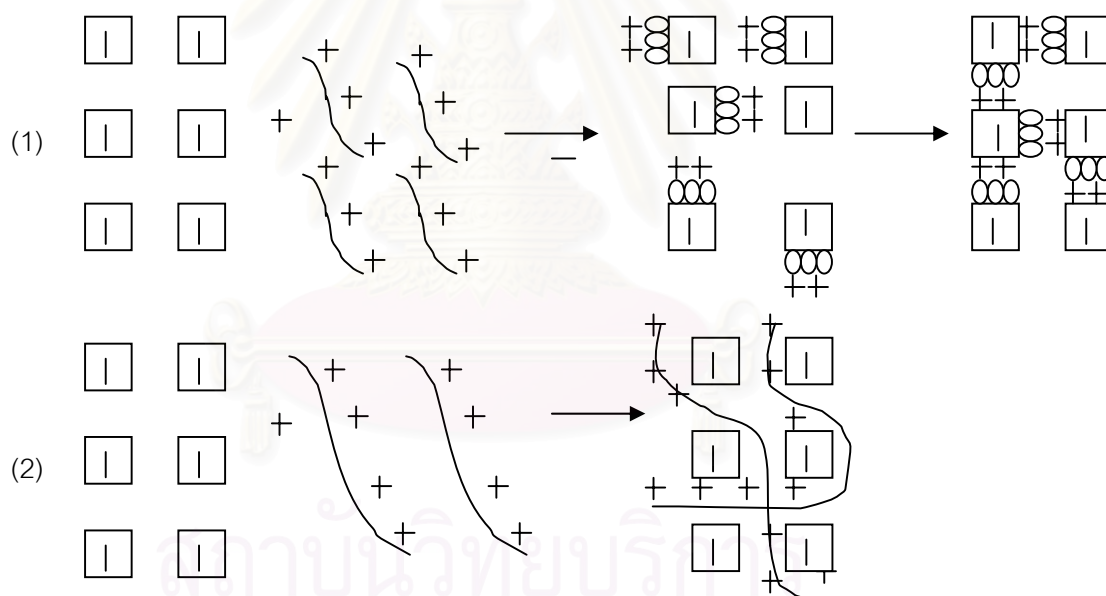
2) ใช้เป็นตัวช่วยให้เกิดการรวมตัวกัน (Flocculant Aid) คือ เป็นตัวเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ด้วยแรงทางไฟฟ้า หรือแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Force) ทำให้เกิดเป็นฟลอคขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย กลไกการเกิดฟลอคคูเลชันอาจเป็นแบบ Patch หรือ Mosaic Flocculation โดยประจุของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์จะไปทำให้ประจุบางส่วนบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์เป็นกลาง นอกจากนี้ Flocculant Aid ยังสามารถใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ Primary Flocculant ได้อีกด้วย กลไกการทำงานของ Flocculant Aid แสดงในรูปที่ 2.10

โดยปกติจะใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ชนิดแคทไอออนิกเป็นฟลอคคูแลนต์ แต่ในบางกรณีอาจใช้ชนิดแอนไอออนิกในการทำให้อนุภาคที่มีประจุลบเกิดการรวมตัวกัน ตัวอย่างที่เกิดในระบบชีวภาพ ได้แก่ การเกาะติดกันของเนื้อเยื่อเซลล์ การรวมกลุ่มของแบคทีเรีย และปฏิกิริยาระหว่างแอนติบอดีและแอนติเจน (Manahan, 1994)<sup>[23]</sup> กระบวนการฟลอคคูเลชันที่ใช้สารแอนไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์นี้ จะได้ง่ายขึ้นเมื่อมีไอออนของโลหะในปริมาณเล็กน้อยปนอยู่ โดยจะสร้างพันธะเชื่อมระหว่างประจุบวกของโลหะกับประจุลบของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ และประจุลบบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์





รูปที่ 2.9 การทำงานของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ทำหน้าที่เป็น Primary Flocculant และ Flocculant Aid (Dautzenberg, 1994)<sup>[6]</sup>



รูปที่ 2.10 กลไกการทำงานของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่เป็น Flocculant Aid แบบ Bridging (1) และ Patch Flocculation (2) (Dautzenberg, 1994)<sup>[6]</sup>

### 2.5.2 การใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ในการดึงน้ำออกจากตะกอน

ตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดชีวภาพ ก่อนนำไปกำจัดนั้น จำเป็นต้องรีดน้ำออกเพื่อลดปริมาณ โดยได้มีการทดลองใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์เป็นฟล็อกคูแลนท์ พบว่าจะได้

ตะกอนที่มีความแห้งสูงขึ้น ปริมาณของฟลอคคูแลนท์ที่เหมาะสมไม่เพียงขึ้นอยู่กับชนิดของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์และองค์ประกอบของตะกอนเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับปริมาณของแข็ง และสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นวิกฤตของสารพอลิเมอร์ (Critical Polymer Concentration,  $C^*$ ) ซึ่งหาได้จาก Viscometry และ Light Scattering ซึ่งแสดงให้เห็นถึงจุดเริ่มของการเปลี่ยนโครงสร้างของสารพอลิเมอร์

Kulicke<sup>[22]</sup> และคณะ (1993) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ระบบโมโนฟลอคคูเลชัน (Monoflocculation) คือ ใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์เพียงชนิดเดียวกับระบบการใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์สองชนิด (Dual Flocculation) ที่มีลำดับการใช้แคทไอออนิก-แอนไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ หรือแอนไอออนิก-แคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยได้ข้อสรุปว่า ระบบ Dual Flocculation ที่ใช้แคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ แล้วตามด้วยแอนไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการปรับสภาพกากตะกอนสลัดจ์ นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำลดลง เพราะเกิดพันธะทางไฟฟ้ากับอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำและสารแอนไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์

### 2.5.3 สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ในการแยกวัฏภาคระหว่างน้ำและน้ำมัน

การแยกวัฏภาคของเหลว-ของเหลวออกจากกัน สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อนลดความเสถียรของระบบคอลลอยด์ (Thermal Destabilization) การใช้ Ultrafiltration ผ่านเยื่อเมมเบรนที่เหมาะสม การใช้กระบวนการ Classical Acid Emulsion Splitting และการเติมสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม ซึ่งมักจะเป็นชนิดแคทไอออนิก สองวิธีหลังนี้เป็นการอาศัยกระบวนการ Chemical Deactivation ของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเตรียมอิมัลชัน (Emulsion) ซึ่งมักเป็นชนิดแอนไอออนิกและนอนไอออนิก โดยวิธี Emulsion Splitting จะใช้กรดแก่ในการทำให้เกิด Surfactant Deactivation ในขณะที่แรงทางไฟฟ้าจะไปทำลายอิมัลชันเมื่อมีการเติมสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยส่วนใหญ่สารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออนิก หรือบางกรณีอาจใช้ร่วมกับนอนไอออนิก ถูกใช้เป็น Emulsifier ดังนั้นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ชนิดแคทไอออนิกที่มีความหนาแน่นของประจุสูงเพียงพอ และมีมวลไม่ต่ำเกินไปนัก จึงเป็นที่ต้องการในกระบวนการนี้ เพื่อจับประจุที่ตรงกันข้าม ดังนั้นในบางกรณีอาจใช้ทั้งสองระบบคู่กัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกเฟสให้ดียิ่งขึ้น (Rosen, 1989)<sup>[33]</sup>

## 2.6 ปฏิกริยาระหว่างสารพอลิอิเล็กโทรไลต์และสารลดแรงตึงผิว

สารประกอบแมคโครโมเลกุล เช่น พอลิเมอร์สังเคราะห์ โปรตีน แป้ง และอนุพันธ์ของเซลลูโลส สามารถทำปฏิกิริยากับสารลดแรงตึงผิว เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยที่โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะถูกดูดซับอยู่บนสารแมคโครโมเลกุลด้วยแรงทางไฟฟ้าและแรงไฮโดรโฟบิก การเติมสารแมคโครโมเลกุลที่มีโครงสร้างเหมาะสมลงในสารละลายของสารลดแรงตึงผิว สามารถเพิ่ม Solubilization Power ได้ เช่น สารลดแรงตึงผิวโซเดียมแอลคิลซัลเฟตที่มีจำนวนคาร์บอน 10-16 อะตอม ที่ความเข้มข้นต่ำกว่าจุดซีเอ็มซี จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ Serum Albumin ทำให้สามารถละลายสารพวกที่เป็น Oil-soluble Azo Dye และ Isooctane ได้ (Rosen, 1989)<sup>[33]</sup>

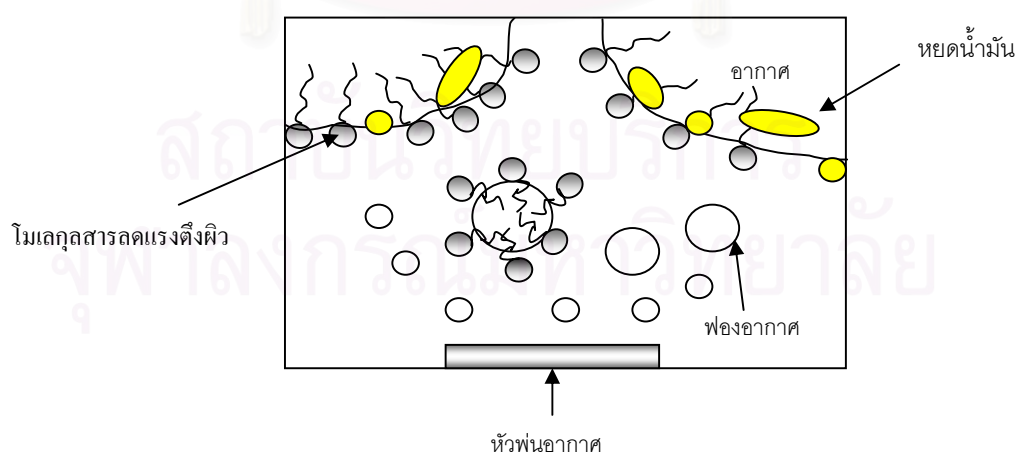
## 2.7 หลักการทำให้เป็นฟองลอย

หลักการทำให้เป็นฟองลอยหรือระบบฟองลอย (Froth Flotation) คือ กระบวนการที่ใช้แยกอนุภาคของแข็งหรือของเหลว การแยกจะเกิดจากการเป่าฟองก๊าซ (ปกติใช้อากาศ) ไปในชั้นของเหลว ฟองก๊าซจะไปจับกับอนุภาค และแรงยก (Buoyant Force) ของฟองก๊าซที่จับกับอนุภาคจะมากเพียงพอ ทำให้อนุภาคลอยขึ้นสู่ผิวบน การลอยขึ้นของอนุภาคที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลว เช่น น้ำมัน จะเกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงกว่าของเหลว (Tantayakom, 1997)<sup>[36]</sup>

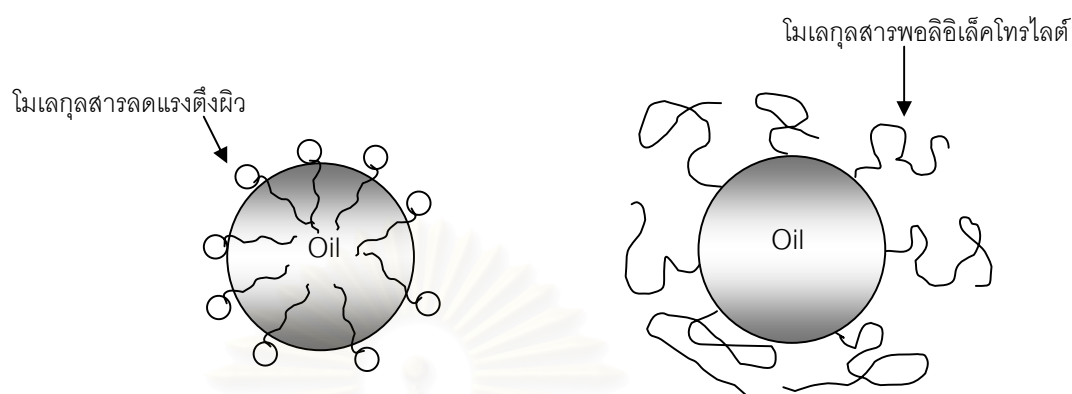
หลักการในการทำให้ลอยถูกนำมาใช้ในการแยกแร่ และแยกเซลล์แบคทีเรีย (Bacterial Separation) ต่อมาได้มีการนำมาประยุกต์ในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อใช้แยกสารแขวนลอยและน้ำมัน หลักการทำให้ลอยนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าการตกตะกอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่สารแขวนลอยมีขนาดเล็ก หลักการ คือ การแยกอนุภาคที่มีสมบัติไฮโดรโฟบิกออกจากน้ำหรือส่วนที่เป็นไฮโดรฟิลิก โดยใช้สารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีผลต่อลักษณะของฟองอากาศ คือ ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่ำ ฟองจะมีขนาดใหญ่ไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงขึ้น ฟองจะมีขนาดเล็กและกระจายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารที่เป็นไฮโดรโฟบิก

ในการทำให้ลอยโดยฟองอากาศลงไปใต้อากาศละลาย สามารถกำจัดอนุภาคได้ โดยอนุภาคจะเกาะติดกับฟองอากาศ ซึ่งจะลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ การเติมสารลดแรงตึงผิวจะช่วยทำให้ค่าแรงตึงผิวของสารละลายลดต่ำลง ทำให้เกิดฟองอากาศได้ง่ายขึ้น และโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวจะไปเกาะรวมตัวระหว่างผิวน้ำและอากาศเป็นส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 2.11 โดยส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำจะชี้ออกสู่อากาศ ขณะที่ส่วนหัวจะอยู่ในชั้นน้ำ ในกรณีที่มีอนุภาคสารน้ำมันอยู่ในสารละลาย โมเลกุลสารลดแรงตึงผิวจะไปเกาะที่บริเวณอนุภาคน้ำมัน โดยหันส่วนหางของโมเลกุลเข้าหาอนุภาคน้ำมัน ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันลอยขึ้นมาพร้อมกับฟองอากาศร่วมกับโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว ส่วนในกรณีที่ใช้เป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ โมเลกุลสารพอลิอิเล็กโทรไลต์จะไปเกาะบนอนุภาคน้ำมัน เกิดการรวมตัวเป็นฟลอคที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเป่าอากาศเข้าไป ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะพุงให้ฟลอคลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ซึ่งเรียกระบวนการที่เกิดขึ้นว่า Floc Flotation (Dobias, 1993)<sup>[9]</sup> ลักษณะการเกาะตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวหรือสารพอลิอิเล็กโทรไลต์กับอนุภาคน้ำมัน แสดงในรูปที่ 2.12

ประสิทธิภาพของระบบฟองลอยอาจเพิ่มสูงได้โดยเติมสารเคมีช่วย เช่น อลูมินัม เกลือเฟอริก และแอสติเวเตดซิลิกา โดยสารที่เติมลงไปเหล่านี้สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงอนุภาคเข้าด้วยกัน และในการทำเช่นนี้จะทำให้โครงสร้างง่ายต่อการถูกจับด้วยฟองอากาศ สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะทำหน้าที่จับอนุภาคเข้าด้วยกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งทำให้สามารถถูกจับด้วยฟองอากาศง่ายขึ้น และลอยตัวได้รวดเร็วยิ่งขึ้น (Tantayakom, 1997)<sup>[36]</sup>



รูปที่ 2.11 กระบวนการทำให้เป็นฟองลอย (Dean และ Lemlich, 1995)<sup>[8]</sup>



รูปที่ 2.12 ลักษณะการเกาะตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวหรือสารพอลิอิเล็กโทรไลต์กับอนุภาคน้ำมัน (Evans และ Wennerstrom,1994)<sup>[10]</sup>

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sylvester และคณะ (1980)<sup>[35]</sup> ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสีย อัตราการไหลของอากาศ ขนาดของฟองอากาศ ขนาดของหยดน้ำมัน ความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ และอุณหภูมิ ต่อประสิทธิภาพในการแยกน้ำมัน โดยขนาดของหยดน้ำมันและฟองอากาศมีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน ส่วนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำเสียไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน

Ityokumbul และคณะ (1988)<sup>[17]</sup> ศึกษาจลนพลศาสตร์อัตราการทำให้ลอยของการนำบิทูเมนกลับมาใช้ใหม่จากหางน้ำมันทราย (Oil Sand Tailings) ผลการทดลองสรุปได้ว่าอัตราการแยกขึ้นกับชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่เติมลงไป

Kocz' และ R'acz (1990)<sup>[20]</sup> ศึกษาสมบัติในการเกิดฟองของสารละลายของสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ Octyl-phenyl-n-glycoether (Triton X-100; T-100) Dodecylbenzenesulfonic acid sodium salt (NaSDBS) Cetylpyridinium bromide (CPB) ในอุปกรณ์การทดลอง ที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกที่สามารถปรับอุณหภูมิได้ และมีการกวนสารละลายอยู่ตลอดเวลา โดยสามารถปรับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ได้ ในการทดลองนี้วัดค่าปริมาตรของฟอง อัตราไหลของของเหลวภายในฟอง ความเข้มข้นของสารลด

แรงตึงผิวที่อยู่ส่วนล่างของท่อ ค่าที่วัดได้จะนำไปคำนวณค่าสัดส่วนการขยายตัวเฉลี่ยของฟอง การกระจายของขนาดอนุภาคฟอง และพื้นที่ผิวของฟอง พบว่า ค่าสัดส่วนการขยายตัวของฟอง ที่เกิดจากสารละลาย T-100 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ลดลงเมื่อความเร็วในการหมุนของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่ง NaSDBS และ CPB ก็ให้ผลในลักษณะเดียวกัน แต่เมื่อความเร็วในการหมุนของมอเตอร์และความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น และขนาดของลวดในแกนหมุนลดลง พบว่า ขนาดของฟองมีขนาดเล็ก และมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูง นอกจากนี้การวัดค่าการดูดซับสารลดแรงตึงผิว พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวลดลง

Pal และ Masliyah (1990)<sup>[29]</sup> ทำการทดลองแยกน้ำมันออกจากสารละลายอิมัลชัน น้ำมันในน้ำ โดยใช้คอลลัมน์โฟลเทชัน ความเข้มข้นของน้ำมันอยู่ในช่วงร้อยละ 0.25 ถึง 8.0 โดยปริมาตร การแยกน้ำมันจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันที่ป้อนเข้าเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการแยก การเพิ่มขึ้นของอัตราการใช้ของก๊าซ จะก่อให้เกิดการแยกน้ำมันเพิ่มขึ้น

Watanabe และคณะ (1991)<sup>[36]</sup> ศึกษาทดลองบำบัดน้ำเสียจากเรือสินค้า ซึ่งประกอบด้วยสารแขวนลอย 59% สารน้ำมันเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อนในปริมาณค่อนข้างสูงถึง 370 ถึง 1,080 มก/ล และสารซักฟอก ด้วยวิธี Oil Flocculation และ Froth Flotation โดยใช้ Nonionic Surfactant พบว่า ระบบสามารถแยกอนุภาคน้ำมันและของแข็งขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอนได้สูงถึง 90% นอกจากนี้พบว่า ประสิทธิภาพการแยกสารน้ำมันยังขึ้นอยู่กับการผสมสารให้เป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ รวมทั้งสารต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ เช่น ชนิดและความเข้มข้นของสารซักฟอก

Matis และ Mavros (1991)<sup>[24]</sup> กล่าวถึงประสิทธิภาพของระบบฟรอตโฟลเทชันว่า ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ขนาดของอนุภาคที่ต้องการแยก จากงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา พบว่า อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ (Ultrafine) จะก่อปัญหาในกระบวนการแยกแร่ และจากงานวิจัยของ Fuerstenau (1980) แสดงให้เห็นว่า การแยกแร่จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด เมื่ออนุภาคมีขนาดอยู่ในช่วง 10-100 ไมครอน ซึ่งพบว่า ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพสูง และยังมี Selectivity ที่ดีกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ และชนิดของสารลดแรงตึงผิว นอกจากนี้ได้กล่าวถึง ระบบฟรอตโฟลเทชันแบบที่ใช้เป็นถังกวนมีใบพัดกวาดฟองออก ทั้งนี้เนื่องจาก อนุภาคที่ต้องการแยกสามารถอยู่ในคอลลัมน์ได้ยาวนาน และถูกฟองอากาศยกขึ้นในที่สุด

Oh และ Shah (1991)<sup>[26]</sup> ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาของการคงอยู่เป็นไมเซลล์และความสามารถในการเกิดฟองของ Sodium Dodecyl Sulfate และ Sodium Dodecyl Sulfate/1-Hexanol Mixtures โดยทำการทดลองใน Air Flotation Column ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่า ช่วงเวลาเฉลี่ยของการคงอยู่เป็นไมเซลล์จะมีค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้นเฉพาะค่าหนึ่งของสารลดแรงตึงผิว และที่จุดนี้ความสามารถในการเกิดฟองจะน้อยที่สุด

คณะวิจัยของ BHP และ CSIRO (1992)<sup>[2]</sup> ประเทศออสเตรเลียได้ทำการวิจัยพัฒนาระบบฟลอตโฟลเทชัน เพื่อนำมาประยุกต์ในการบำบัดน้ำเสียประเภทต่างๆ โดยมีการทดลองระดับนำร่องในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแผ่นเหล็กและท่อเหล็ก ซึ่งมีปริมาณน้ำมันสูง พบว่า ระบบฟลอตโฟลเทชันสามารถกำจัดมันได้สูงถึง 98% นอกจากนี้ น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

Garcia และ Martinez-Tarazona (1993)<sup>[12]</sup> ศึกษาการนำระบบฟลอตโฟลเทชันมาใช้ในการกำจัดโลหะชนิดต่างๆ ออกจากถ่านหิน เช่น As, Cu, Pb, Hg, Cr เป็นต้น ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะในถ่านหินนั้น ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดต่าง โดยค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 3-7

Chin (1994)<sup>[4]</sup> ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงกลั่นน้ำมัน ซึ่งประกอบด้วย API Oil Separator ตามด้วยระบบ DAF (Dissolved Air Flotation) และระบบชีวภาพแบบ Extended Aeration โดยสารน้ำมันมากกว่า 85% และของแข็งที่ตกตะกอนได้ ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดโดยระบบ API Oil Separator จากขั้นตอนนี้จะเหลือน้ำมันอยู่ประมาณ 104-680 มก/ล ซึ่งบำบัดต่อโดยการทำให้ลอยแบบความดันสูง (DAF) ซึ่งสามารถกำจัดน้ำมันได้มากกว่า 80% สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟลอคคูเลชัน ได้แก่ สารส้ม (Alum) ปูนขาว (Lime) และสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ หลังจากผ่านกระบวนการ DAF จะถูกบำบัดต่อด้วย Once-through Aerated Lagoon ที่เวลาเก็บกัก 30 นาที ซึ่งจะเหลือน้ำมันประมาณ 16 มก/ล แต่ค่าซีโอดีและบีโอดียังสูงถึง 177 และ 19 มก/ล ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในน้ำมีสารที่ยากต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในระบบชีวภาพ

Koutlemani และคณะ (1994)<sup>[21]</sup> นำเทคนิคของระบบฟลอตลอยมาใช้ในการนำกลับของโคบอลต์จากสารละลายในสถานะที่เป็นกรด โดยคอลัมน์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 และ 8 ซม. สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ คือ โดเดคซิลเอมีน (Dodecylamine) เซทิลไพริดีเนียมคลอไรด์ (Cetylpyridiniumchloride) และโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) จากผลการทดลองพบว่า SDS ให้ประสิทธิภาพในการนำกลับสูงสุด แต่จะก่อปัญหา เนื่องจากฟองที่เกิดขึ้นซึ่งมีน้ำ

ปนมาด้วยจะแยกน้ำออกได้ยาก นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการเป่าอากาศต่อปริมาตรของ คอลลัมน์ มีความสัมพันธ์กับปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เติมลงไป และขนาดของคอลลัมน์ด้วย หลังจากนั้นในปี 1995 คณะผู้วิจัยได้ศึกษาการนำอ็อกซอนของโคบอลต์กลับมา โดยระบบ Dispersed-air Flotation ในสภาวะที่เป็นกรด สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ ได้แก่ เซทิลไตรเมทิลแอม โมเนียมโบรไมด์ (CTAB) โซเดียมเดคซิลซัลเฟต (SDS) เซทิลไพริดีเนียมคลอไรด์ (CPC) และเด คซิลเอมีน (Dodecylamine) พบว่า โดเดคซิลเอมีนให้ประสิทธิภาพการนำกลับสูงสุด และยัง พบว่ากระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการเป่าอากาศด้วย ซึ่งการเป่าอากาศที่เหมาะสมจะสัมพันธ์ กับค่าความเร็วของอากาศเท่ากับ 0.1 ซม./วินาที โดยจะมีประสิทธิภาพการนำกลับสูงสุด แต่ถ้า เพิ่มอัตราการเป่าอากาศมากกว่านี้ จะทำให้ประสิทธิภาพการนำกลับลดลง

Gulyas และ Reich (1995)<sup>[16]</sup> ศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียโรงกลั่นน้ำมัน ซึ่งน้ำเสียส่วน ใหญ่ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนและฟีนอล โดยได้แนะนำให้ใช้กระบวนการทำให้ลอย ใน ขั้นตอนก่อนการบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งสามารถกำจัดสารพวกอัลเคน อะโรมาติก และฟีนอลออกไป ได้ส่วนใหญ่ โดยไม่ก่อปัญหาการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระบวนการตะกอนเร่ง

Wungrattanasopon และคณะ (1996)<sup>[40]</sup> ศึกษาเพื่อหาชนิดและความเข้มข้นของ สารลดแรงตึงผิว และปริมาณเกลือแกงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารเทอร์เชียรี บิวทิลฟีนอล (TBP) โดยใช้ระบบฟองลอย พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด เมื่อความ เข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่าประมาณความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ แต่ถ้าเติมสาร ลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (CMC) สารลดแรงตึง ผิวจะรวมตัวเป็นไมเซลล์ ซึ่งจะแข่งขันกับฟองในการจับสาร TBP ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด สาร TBP ลดลง เมื่อมีการเติมเกลือแกงส่งผลให้ประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวลดลง ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดสาร TBP ยังสูง แต่ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ต้องเติมต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวลดต่ำลง เมื่อเติมเกลือ แกงเพิ่มขึ้น

Bolto และคณะ (1996)<sup>[3]</sup> ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันในรูปอิมัลชัน โดยใช้ ระบบฟองลอย และใช้แคทออดิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันสูง กว่า 95% และถ้าใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ปรับสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก ประสิทธิภาพจะสูงขึ้น นอกจากนี้ได้ทำการทดลองกับน้ำเสียประเภทอื่น พบว่าแคทออดิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ เหมาะสมในการช่วยแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย และค่าความเป็นกรดต่างที่สูงขึ้นทำให้ ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันสูงกว่าในกรณีค่าความเป็นกรดต่างต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่า การ



ใช้สารแคทอิออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ร่วมกับ SDS ทำให้ประสิทธิภาพการแยกสารแขวนลอยน้ำมัน และสีเพิ่มสูงขึ้นด้วย

Gray และคณะ (1997)<sup>[15]</sup> ศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลและความหนาแน่นของประจุของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ ที่มีต่อการลอยของอิมัลชันของสารน้ำมันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อฟล็อกมีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงให้เห็นว่า สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ช่วยในการทำให้ลอย โดยการเพิ่มขนาดของฟล็อก ประสิทธิภาพการลอยจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของประจุของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ นอกจากนี้ปริมาณของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ยังมีผลต่อระบบการทำให้ลอย โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สูง จะลดประสิทธิภาพการทำให้ลอย และมีผลมากที่สุดเมื่ออนุภาคน้ำมันและสารพอลิอิเล็กโทรไลต์มีความหนาแน่นของประจุต่ำ การเพิ่มความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์มีผลทำให้ประสิทธิภาพการลอยลดลง เนื่องจากการเกิด Electrostatic Shielding ทำให้ฟล็อกมีขนาดเล็กกลง ในขณะที่แรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคน้ำมันเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการรวมตัวแบบ Patch Flocculation

Zhu และคณะ (1997)<sup>[41]</sup> ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแผ่นโลหะ ซึ่งน้ำเสียประกอบด้วยไขมัน และ Mineral Oil เป็นส่วนใหญ่ โดยการใช้สารพอลิเมอร์ในการกำจัดไขมัน น้ำมันและสารแขวนลอย แบ่งการใช้งานเป็น 2 ระบบ คือ ระบบสายพอลิเมอร์เดี่ยว (Single Polymer System) ใช้ชนิดแคทอิออนิกเป็นโคเอกกูแลนต์ และระบบสายพอลิเมอร์คู่ (Dual Polymer System) ใช้ชนิดแคทอิออนิกในการทำลายอิมัลชัน และชนิดแอนอิออนิกในการเพิ่มการเกิดโคเอกกูแลชัน พบว่า ทั้ง 2 ระบบให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน ไขมันและสารแขวนลอยสูงถึง 99% จากน้ำเสียที่มีน้ำมันอยู่ในช่วง 1,080-3,271 มก/ล และสารแขวนลอยในปริมาณ 200-1,500 มก/ล

Pongstabadee (1998)<sup>[30]</sup> ศึกษาการกำจัดออร์โธไดคลอโรเบนซีนออกจากน้ำ โดยศึกษาการเกิดไมโครอิมัลชันของสารลดแรงตึงผิว ในการเกิดสภาวะวินเซอร์แบบที่หนึ่งไปสู่สภาวะวินเซอร์แบบที่สาม พบว่า การใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเป็นบวกมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเป็นลบ และพบว่าที่สภาวะวินเซอร์แบบที่สาม ทำให้ระบบเป็นฟองลอยจะมีประสิทธิภาพการแยกสารสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะดังกล่าวมีค่าแรงตึงผิวต่ำสุด เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำภายใต้สภาวะที่เหมาะสมและที่ความเข้มข้นเหนือจุดซีเอ็มซี สารลดแรงตึงผิวจะรวมตัวเกิดเป็นไมเซลล์ ซึ่งสามารถละลายสารน้ำมัน และสามารถเพิ่มการละลายของสารน้ำมันในน้ำได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยที่มี

ผลต่อการกำจัดสารน้ำมัน ได้แก่ อัตราการเป่าอากาศ ขนาดของฟองอากาศ และหยดน้ำมัน ค่าซีตาโพเทนเชียลของหยดน้ำมันและฟองอากาศ รวมถึงความหนาแน่นของหยดน้ำมัน

Omar และคณะ (1998)<sup>[27]</sup> ศึกษาการนำกลับน้ำมันหล่อลื่นที่เหลือตกค้างจากดินที่มาจากของเสียโรงกลั่น ซึ่งจะมีน้ำมันหล่อลื่นอยู่ประมาณ 30% งานวิจัยในห้องทดลองได้ทำการแยกสารน้ำมัน โดยกระบวนการทำให้ลอย ซึ่งใช้ Linear Barium Alkylbenzenesulfonates เป็นสารลดแรงตึงผิวประเภท Petroleum Sulfonate ที่นิยมใช้มากที่สุดในการทำให้น้ำมันลอย เนื่องจากความสามารถในการลดแรงตึงผิว มีช่วงการใช้งานที่กว้าง และมีราคาไม่แพง จากผลการทดลองพบว่า ที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม ซึ่งใช้ปริมาณสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 1.5 กิโลกรัมต่อตัน ให้ประสิทธิภาพการนำกลับน้ำมันประมาณ 86% โดยน้ำมันที่ได้นี้จะมีคุณภาพต่ำ ดังนั้นถ้าจะนำไปใช้ใหม่ จำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเสียก่อน

Goon และคณะ (1999)<sup>[14]</sup> ศึกษาเรื่องการเกิดฟองและความสามารถในการทำความสะอาดของ Linear Alkylbenzene Sulfonate และ Secondary Alkyl Sulfonate โดยการวัดความสูงของฟองและความสามารถในการทำความสะอาดของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 2 ชนิด รวมถึงเมื่อมีการเติมฟีนอลลงใน Secondary Alkyl Sulfonate จากการทดลองพบว่า การเกิดฟองขึ้นกับความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด และความสามารถในการทำความสะอาดขึ้นกับ การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง (Conformational Change) ที่ระดับโมเลกุล

Tavera และคณะ (2000)<sup>[37]</sup> ศึกษาเรื่องการแยกสารประกอบเชิงซ้อนของนิเกิลไอออนกับพอลิเอมีน (Diethylentriamine: BETA,  $\text{NH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-NH-CH}_2\text{-CH}_2$ ) ในสารละลายด้วยวิธีการทำให้เป็นฟองลอย โดยใช้คอลัมน์โฟลเทชัน (Completely Equipped and Automatized Flotation Columns) การทดลองจะวัดค่าเฉลี่ยของขนาดของฟองอากาศด้วยวิธี Pulling Analysis เพื่อประมาณค่าความหนาแน่นของการไหลของฟองอากาศ, ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของการทำให้ลอยของสารประกอบเชิงซ้อนของนิเกิล จากการทดลองพบว่า การแยก Ni-DELTA สามารถทำได้โดยใช้คอลัมน์โฟลเทชัน และการแยกจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีตัวเก็บประจุ (Collector) มากขึ้น

Omar และคณะ (2001)<sup>[28]</sup> ศึกษาพฤติกรรมของการลอยของน้ำมัน (Emulsifiable Oil) โดยใช้ N-Octyl-N-Benzyl-N-Methylglycine (OBM) เป็นตัวเก็บประจุ (Collector) และใช้ Heavy Alkylate Naphthalene Sulphonates (HNS) เป็น Je-Emulsifier จากการทดลองพบว่า แรงตึงผิวมีผลต่อการแยกน้ำมัน/การนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่ แรงตึงผิวบริเวณรอยต่อของน้ำ-

อากาศ จะควบคุมโดยการใช้แอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล, นอร์มัลโพรพานอล (N-propanol) และนอร์มัลบิวทานอล (N-butanol) และเปรียบเทียบกับเมื่อใช้ตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียวในการทำให้เป็นฟองลอย การดูดซับของตัวเก็บประจุจากสารละลายทำได้โดย การวัดค่าแรงตึงผิว เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นที่อุณหภูมิต่างๆกัน สมบัติของพื้นผิวโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความเข้มข้นวิกฤติของการเกิดไมเซลล์ (CMC) ผลของการลดลงของแรงตึงผิว, ประสิทธิภาพ, ค่าพื้นที่ผิวที่มากที่สุด และค่าพื้นที่ผิวที่น้อยที่สุด วัดที่อุณหภูมิ 25, 35 และ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Pongstabodee (2001)<sup>[31]</sup> ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราการไหลของอากาศ, ความสูงของชั้นฟอง, ความเข้มข้นของน้ำมัน, สารลดแรงตึงผิว และความเข้มข้นของอิเล็คโตรไลต์ (Aluminium Nitrate) ในการกำจัดสารผสมของน้ำมัน (Myristic Acid and Ethylbenzene) ความเข้มข้นต่ำ (< 2000 มก/ล) จากสารละลาย โดยการเป่าอากาศให้เป็นฟองลอยในการทดลองแบบกะ ในการทดลองวัดค่า Zeta Potential ของหยดน้ำมันที่มีทั้งอิเล็คโตรไลต์และสารลดแรงตึงผิว (SDS) อยู่ด้วย พบว่า ความเข้มข้นของอิเล็คโตรไลต์มีผลมากต่อค่า Zeta Potential และยังวิเคราะห์ Linear Regression ซึ่งใช้วิเคราะห์ค่าคงที่การทำให้ลอยจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆในการทดลองและปริมาณน้ำมันที่ถูกกำจัดในรูปของ COD ที่เหลืออยู่ พบว่า ค่าคงที่ขึ้นอยู่กัตัวแปรเกือบทั้งหมดในการทดลอง

## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากการผสมระหว่าง น้ำมันเครื่องเบนซิน PTT PERFORMA SAE 20W-50 และน้ำประปา ซึ่งมีการผสมไม่ให้เกิดการแยกชั้นของน้ำมันตลอดการทดลอง

#### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.2.1 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ โซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต (Sodium Dodecyl Benzenesulfonate; SDBS) ของบริษัท Fluka สูตรโมเลกุล คือ  $C_{18}H_{29}NaSO_3$  น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 348.48 และมีความบริสุทธิ์ 80% เป็นสารผสมของพวกอัลคิลเบนซีนซัลโฟเนต มีค่าซีเอ็มซีเท่ากับ  $1.23 \times 10^{-3}$  โมลาร์ (418 มก/ล)

##### 3.2.2 สารโคแอกกูแลนต์

สารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ NOVOUS CE 2680 ของบริษัท BetzDearborn Industrial ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.034

##### 3.2.3 สารเคมีอื่นๆ

สารเคมีอื่นๆที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นเกรดที่ใช้วิเคราะห์ (Analytical Grade) ได้แก่

กรดกำมะถัน (Sulfuric Acid;  $H_2SO_4$ ) ของบริษัท LAB-SCAN น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 98.08 และมีความบริสุทธิ์ 95-98%

คลอโรฟอร์ม (Chloroform;  $\text{CHCl}_3$ ) ของบริษัท LAB-SCAN มีความบริสุทธิ์ 99.5%

โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium Bicarbonate;  $\text{NaH}_2\text{CO}_3$ ) ของบริษัท CARLO ERBA น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 84.007 และมีความบริสุทธิ์ 99.8%

โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride;  $\text{NaCl}$ ) ของบริษัท LAB-SCAN น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 58.44 และมีความบริสุทธิ์ 99%

โซเดียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (Sodium Dihydrogen Orthophosphate Monohydrate;  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ของบริษัท CARLO ERBA น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 137.99 และมีความบริสุทธิ์ 99%

โซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulphate;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ของบริษัท CARLO ERBA มีความบริสุทธิ์ 99.5%

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide;  $\text{NaOH}$ ) ของบริษัท AJAX CHEMICALS น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 40.0 และมีความบริสุทธิ์ 97%

เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol;  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) ของบริษัท CARLO ERBA น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 32.04 และมีความบริสุทธิ์ 99.9%

เมทิลีนบลู (Methylene Blue) ของบริษัท RIEDEL-DEHAEN น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 319.86 และมีความบริสุทธิ์ 95%

ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein;  $\text{C}_6\text{H}_4\text{COO}(\text{C}_6\text{H}_4\text{-4-OH})_2$ ) ของบริษัท CARLO ERBA น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 318.31 และมีความบริสุทธิ์ 95%

เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol;  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ของบริษัท CARLO ERBA มีความบริสุทธิ์ 99.9%

เอทิลอะซิเตต (Ethyl Acetate;  $\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$ ) ของบริษัท LAB SCAN มีความบริสุทธิ์ 99.8%

ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol;  $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$ ) ของบริษัท LAB-SCAN มีความบริสุทธิ์ 99.7%

เฮกเซน (Hexane;  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$ ) ของบริษัท LAB-SCAN มีความบริสุทธิ์ 95%

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide;  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ความเข้มข้น 30% ของบริษัท APS FINECHEM น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 34.01

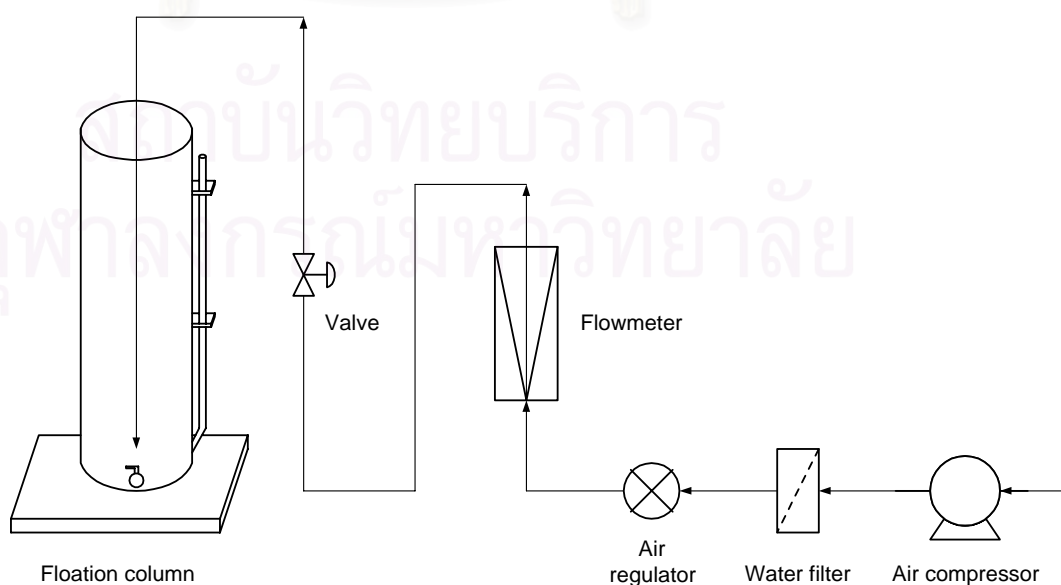
### 3.2.4 น้ำกลั่น

น้ำที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นน้ำที่ผ่านกระบวนการกลั่น 1 ครั้ง จากบริษัท น้ำกลั่นนวนนที ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 1.7 โอห์ม<sup>1</sup>

## 3.3 อุปกรณ์ทดลอง

### 3.3.1 ระบบฟองลอยแบบกะ

แผนผังของระบบฟองลอยแบบกะที่ใช้ในการศึกษา ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1 โดยระบบทดลองประกอบด้วยคอลัมน์ที่ทำด้วยท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4, 8, 12 ความสูง 150 ซม และขนาด 20 นิ้ว สูง 100 ซม มีท่อใส่ด้านข้างคอลัมน์สำหรับสังเกตระดับของสารละลาย ด้านล่างของคอลัมน์มีวาล์วสำหรับเก็บตัวอย่างและไซสารละลายออกจากคอลัมน์ ในการทดลองจะเตรียมสารละลายของสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้นที่แน่นอน ค่อยๆ เติมลงในคอลัมน์ให้ได้ระดับความสูงของสารละลายที่ต้องการ และเกิดฟองน้อยที่สุด ทำการเป่าอากาศจากเครื่องอัดอากาศ Iwata รุ่น SPC-07 PB ผ่านหัวลูกฟูกไปยังสารละลายในคอลัมน์ โดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้คงที่ด้วย Rotameter วัดความสูงของชั้นฟองที่เกิดขึ้นทุก 5 นาที ด้วยตลับเมตรจากด้านบนของคอลัมน์ จนกระทั่งความสูงของชั้นฟองคงที่ และเก็บตัวอย่างสารละลายที่อยู่ในคอลัมน์จากวาล์วด้านล่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่ในชั้นน้ำ รวมถึงเก็บรวบรวมฟองที่เกิดขึ้นในภาชนะเพื่อนำของเหลวที่อยู่ในส่วนของฟองไปทำการวิเคราะห์เช่นกัน โดยใช้เครื่อง Total Organic Carbon Analyzer ยี่ห้อ SHIMADZU Model TOC-5000 A



รูปที่ 3.1 แผนผังอุปกรณ์ทดลองระบบฟองลอยแบบกะ

### 3.3.2 ระบบฟองลอยแบบต่อเนื่อง

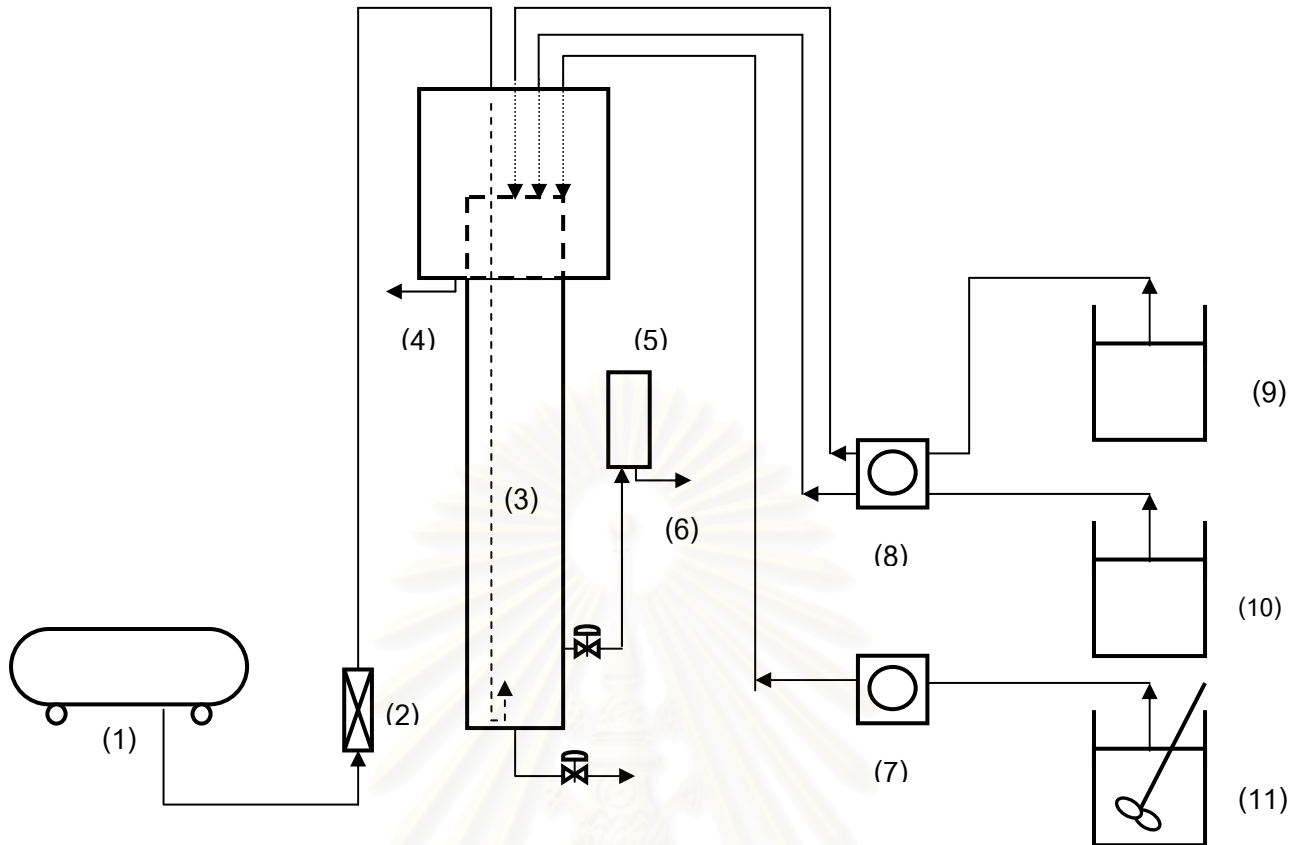
แผนผังของระบบฟองลอยแบบต่อเนื่องที่ใช้ในการศึกษา ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 โดยระบบทดลองประกอบด้วยคอลัมน์ทำด้วยแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 140 ซม. ท่อน้ำออกสามารถปรับเลื่อนขึ้นลงเพื่อให้ได้ระดับน้ำในคอลัมน์มีระดับตามที่ต้องการ ในการทดลองจะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จากการผสมระหว่างน้ำมันเครื่องและน้ำประปา โดยน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้จะถูกกวนตลอดเวลาเพื่อป้องกันการแยกตัวของน้ำมันเครื่อง จากนั้นน้ำเสียจะถูกสูบเข้าคอลัมน์ที่อัตราการไหลต่างๆโดยเครื่องสูบบนเบร็ด (Peristaltic Pump) ยี่ห้อ Masterflex รุ่น 7518-62 อัตราการไหลของน้ำเสียคำนวณได้จากปริมาตรของน้ำในคอลัมน์หารด้วยเวลาเก็บกัก ซึ่งในการทดลองนี้เวลาเก็บกักเท่ากับ 30 นาทีที่คงที่ตลอดการทดลอง สารลดแรงตึงผิวและสารโคแอกกูแลนท์ซึ่งเตรียมที่ความเข้มข้นต่างๆ จะถูกสูบเข้าคอลัมน์ทางด้านบนพร้อมกับน้ำเสียด้วยเครื่องสูบบนเบร็ด (Micro Tube Pump) ยี่ห้อ EYELA เป่าอากาศจากเครื่องอัดอากาศยี่ห้อ Hitachi รุ่น Oil Free Bebicon ผ่านหัวลูกฟูกไปยังสารละลายในคอลัมน์ โดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้คงที่ด้วย Rotameter ฟองที่เกิดขึ้นจะไหลล้นออกทางท่อที่ส่วนบนของคอลัมน์ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไหลออกทางท่อน้ำออก ทำการเก็บตัวอย่างของน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วที่เวลาต่างๆจนถึงสิ้นสุดการทดลอง รวมถึงปริมาณของฟองที่ล้นออกมา เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของน้ำมัน สารลดแรงตึงผิว และสารโคแอกกูแลนท์ที่อยู่ในชั้นน้ำและชั้นฟอง

### 3.4 แผนการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟองในคอลัมน์โพลเทชัน และการหาประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันของระบบฟองลอย

#### 3.4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองในระบบฟองลอยแบบกะ

ในการทดลองส่วนนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟอง ซึ่งปริมาณและเสถียรภาพของฟองที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อระบบฟองลอยในการแยกสารออกจากระบบ สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการทดลอง คือ โซเดียมโดเดคซิลเบนซีนซัลโฟเนต (SDBS) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่



- |                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| (1) Air Compressor    | (6) Effluent Outlet       |
| (2) Rotameter         | (7),(8) Peristaltic Pump  |
| (3) Floatation Column | (9) Surfactant Tank       |
| (4) Foam Outlet       | (10) Polyelectrolyte Tank |
| (5) Level Control     | (11) Wastewater Tank      |

รูปที่ 3.2 แผนผังอุปกรณ์ทดลองระบบฟองลอยแบบต่อเนื่อง

#### 3.4.1.1 ขนาดของคอลัมน์โฟลเทชัน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์โฟลเทชันที่ใช้ในการทดลองมี 4 ขนาด ได้แก่ 4, 8, 12 ความสูง 150 ซม และขนาด 20 นิ้ว ความสูง 100 ซม ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ คือ 0.1 และ 1 ซีเอ็มซี (41.8 และ 418 มก/ล) ระดับของสารลดแรงตึงผิวที่ใส่ลงในคอลัมน์เท่ากับ 50 ซม และค่าฟลักซ์ของอากาศ 0.62 มล/(นาที่.ซม<sup>2</sup>) ทำการวัดความสูงของชั้นฟองที่เกิดขึ้นทุกๆ 5 นาทีตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนความสูงของชั้นฟองมีค่าคงที่



### 3.4.1.2 ระดับของของเหลวเริ่มต้นในคอลัมน์

ในการทดลองนี้ใช้คอลัมน์โพลเทชันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว ระดับของของเหลวเริ่มต้นในคอลัมน์ ได้แก่ 20, 50 และ 80 ซม ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว คือ 0.1 และ 1 ซีเอ็มซี ค่าฟลักซ์ของอากาศ 0.62 มล/(นาที่.ซม<sup>2</sup>) ทำการวัดความสูงของชั้นฟองที่เกิดขึ้นทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนความสูงของชั้นฟองมีค่าคงที่

### 3.4.1.3 ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

การทดลองใช้คอลัมน์ทั้ง 4 ขนาด (4, 8, 12 และ 20 นิ้ว) ระดับของของเหลวเริ่มต้นในคอลัมน์เท่ากับ 50 ซม ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 และ 1 ซีเอ็มซี ค่าฟลักซ์ของอากาศ 0.62 มล/(นาที่.ซม<sup>2</sup>) ทำการวัดความสูงของชั้นฟองที่เกิดขึ้นทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนความสูงของชั้นฟองมีค่าคงที่

### 3.4.1.4 ฟลักซ์ของอากาศ

การทดลองใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ค่าฟลักซ์ของอากาศที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ 0.62, 1.2, 2, 2.5 และ 2.7 มล/(นาที่.ซม<sup>2</sup>) ระดับของของเหลวเริ่มต้นในคอลัมน์เท่ากับ 50 ซม ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 และ 1 ซีเอ็มซี ทำการวัดความสูงของชั้นฟองที่เกิดขึ้นทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนความสูงของชั้นฟองมีค่าคงที่

## 3.4.2 การทดลองระบบฟองลอยแบบต่อเนื่อง

ในการทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นของน้ำมันก่อนเข้าระบบเท่ากับ 50 มก/ล เวลาเก็บกัก 30 นาที และค่าอัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที่

### 3.4.2.1 การหาเวลาที่น้ำมันขาออกจากคอลัมน์เข้าสู่สภาวะคงที่

เป็นการหาเวลาที่ปริมาณน้ำมันเริ่มมีค่าคงที่หลังจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วล้นออกจากระบบ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำขาออกจากคอลัมน์มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ทุกๆ 5 นาที เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง

### 3.4.2.2 การใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออนิก (SDBS) เพียงอย่างเดียวในการแยกน้ำมัน

จากข้อมูลที่ได้ในหัวข้อที่ 3.4.2.1 ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของระบบฟองลอย โดยการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออนิกเพียงอย่างเดียวในการแยกน้ำมันนั้น ได้ทำการทดลองที่ความสูงของชั้นฟอง 30, 40, 50 และ 60 ซม ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้เท่ากับ 1 ซีเอ็มซี เก็บตัวอย่างบริเวณน้ำขาออกและในส่วนของฟองที่ล้นออกมาไปทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

### 3.4.2.3 การใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออนิก (SDBS) ร่วมกับสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Betz Novous CE 2680)

จากข้อมูลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.2.2 ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงทำการเติมสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้น (Dosage) ต่างๆได้แก่ 10, 40, 70, 120, 200 และ 250 มก/ล ลงในระบบ เพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันของระบบฟองลอยดีขึ้น ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้เท่ากับ 1 ซีเอ็มซี เก็บตัวอย่างบริเวณน้ำขาออกและในส่วนของฟองที่ล้นออกมาไปทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์

### 3.4.2.4 การใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออนิก (SDBS) ความเข้มข้น 0.5 ซีเอ็มซี ร่วมกับสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Betz Novous CE 2680)

จากข้อมูลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.2.3 จะเห็นว่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ คือ 1 ซีเอ็มซี นั้นเป็นปริมาณที่สูงมาก จึงได้ทดลองลดปริมาณของสารลดแรงตึงผิวลงเหลือ 0.5 ซีเอ็มซี ร่วมกับการใช้สารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้นต่างๆเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.4.2.3 ทำการเก็บตัวอย่างบริเวณน้ำขาออกและในส่วนของฟองที่ล้นออกมาไปทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์

### 3.5 วิธีวิเคราะห์น้ำเสีย

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำเสีย ได้แก่

**3.5.1 ปริมาณสารน้ำมันและไขมัน (Oil and Grease)** สามารถหาโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย เช่น เฮกเซน ในกรวยแยก จากนั้นระเหยตัวทำละลายออกไป ซึ่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น จะเป็นน้ำหนักของสารน้ำมันที่สกัดได้ วิธีวิเคราะห์โดยละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

**3.5.2 ปริมาณสารซักฟอก (Detergent and Liquid Detergent)** เป็นการหาปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่มีอยู่ในน้ำเสีย ในการทดลองนี้สารลดแรงตึงผิวที่ใช้เป็นชนิดแอนไอออนิก ซึ่งโดยทั่วไปสารลดแรงตึงผิวจะเป็นองค์ประกอบสำคัญในการผลิตสารซักฟอก โดยขั้นแรกจะต้องแยกส่วนที่เป็นสารลดแรงตึงผิวออกจากส่วนที่ไม่เป็นสารลดแรงตึงผิวด้วยวิธีซับเลชัน จากนั้นจึงหาปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออนิกโดยวิธีเมทิลีนบลูวิธีวิเคราะห์โดยละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

**3.5.3 ปริมาณสารพอลิอิเล็กโทรไลต์** เป็นการหาปริมาณ สารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่เหลืออยู่ในชั้นน้ำและชั้นฟอง โดยใช้เครื่องมือ Total Organic Carbon Analyzer (TOC) ยี่ห้อ SHIMADZU Model TOC-5000 A ซึ่งจะได้ออกมาเป็นผลรวมของปริมาณคาร์บอนทั้งหมดของสารน้ำมันและไขมัน, สารซักฟอก (ในการทดลองนี้ คือ สารลดแรงตึงผิว) และสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ต่างก็มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ จากนั้นนำปริมาณสารน้ำมันและไขมันที่หาได้จากวิธีในหัวข้อที่ 3.5.1 และปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่หาได้จากวิธีในหัวข้อที่ 3.5.2 มาคิดเทียบเป็นปริมาณคาร์บอนจาก Calibration Curve ในภาคผนวก จ นำค่าปริมาณคาร์บอนของสารน้ำมันและไขมัน และสารลดแรงตึงผิวไปลบออกจากปริมาณคาร์บอนทั้งหมด ได้เป็นปริมาณคาร์บอนของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ แล้วนำไปคิดเทียบเป็นค่าความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ระบบฟองลอยแบบกะ (Batch Froth Flotation System)

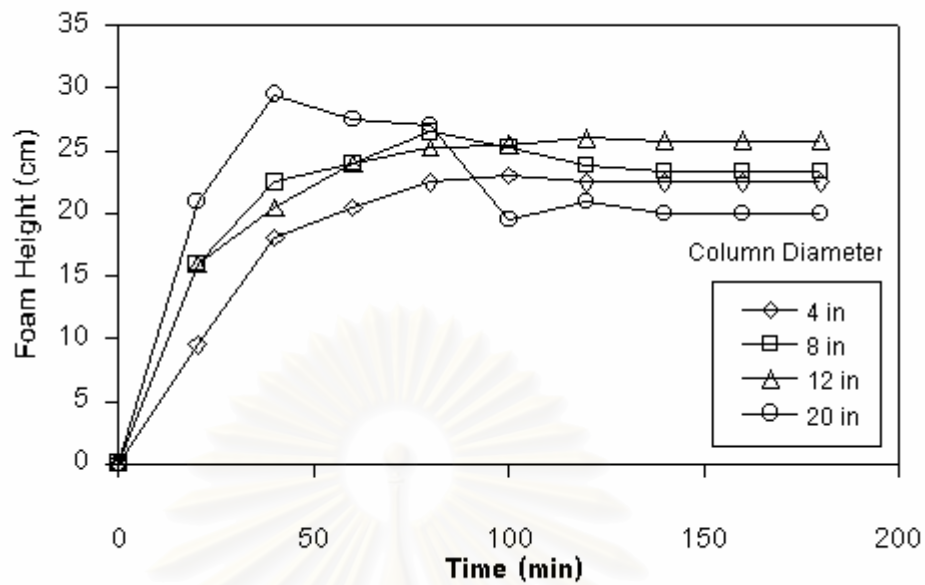
การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟองในระบบฟองลอยแบบกะ ซึ่งได้แก่ ขนาดของคอลัมน์โฟลเทชัน ความสูงของของเหลวเริ่มต้นในคอลัมน์ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และฟลักซ์ของอากาศ โดยสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการทดลองคือ โซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต (SDBS) ข้อมูลการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก ค

##### 4.1.1 ผลของขนาดของคอลัมน์โฟลเทชัน

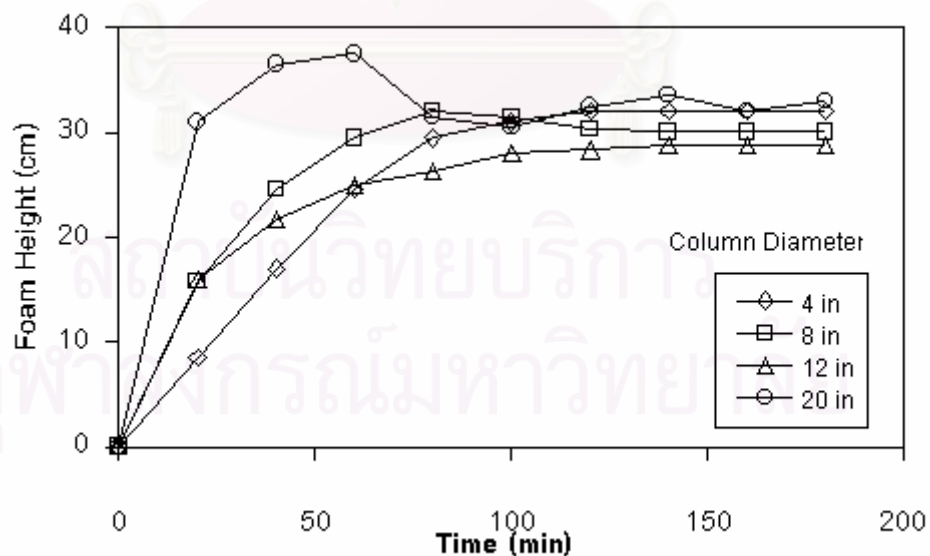
รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 และ 1 ซีเอ็มซี ความสูงของชั้นฟองเพิ่มขึ้นตามเวลาในคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ จนกระทั่งเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 80 นาที การเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้นฟองลดลงและเริ่มคงที่โดยค่าความสูงของชั้นฟองที่คงที่แล้วในแต่ละคอลัมน์มีค่าใกล้เคียงกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในช่วงแรกของการทดลองปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย (Bulk Liquid) ยังมีมาก เมื่อเป่าอากาศผ่านสารละลาย สารลดแรงตึงผิวจะเคลื่อนที่และสะสมที่ฟอง เกิดเป็นฟองที่มีลักษณะเป็นฟิล์มของสารลดแรงตึงผิวที่ล้อมรอบฟองอากาศซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความสูงของชั้นฟองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปโดยที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในระบบอีก แต่ยังคงเป่าอากาศอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายจะลดลงเพราะส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปอยู่ที่ฟองแล้ว และบริเวณ Interface ของฟอง จะอิมตัวไปด้วยสารลดแรงตึงผิวแล้ว ดังนั้นการเกิดฟองจึงช้าลงส่งผลให้ความสูงของฟองที่วัดได้มีค่าค่อนข้างคงที่

##### 4.1.2 ผลของระดับของเหลวเริ่มต้นในคอลัมน์

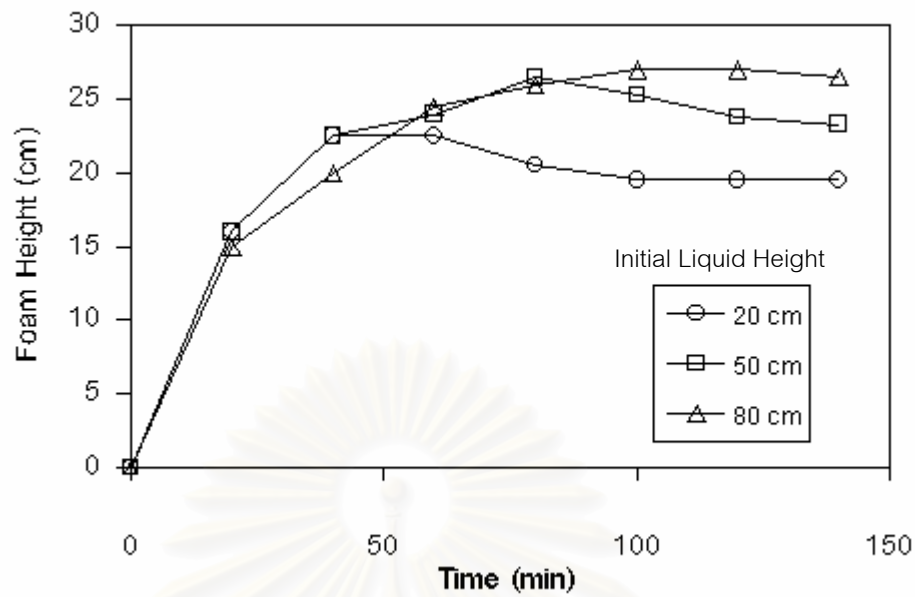
เมื่อพิจารณาผลของระดับของของเหลวเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า ทั้งที่ความเข้มข้น 0.1 และ 1 ซีเอ็มซี ให้ผลในลักษณะเดียวกันที่ระดับของของเหลวเริ่มต้นทั้ง 3 ระดับ (20, 50 และ 80 ซม) นั่นคือ ความสูงของชั้นฟองเพิ่มขึ้นตามเวลา



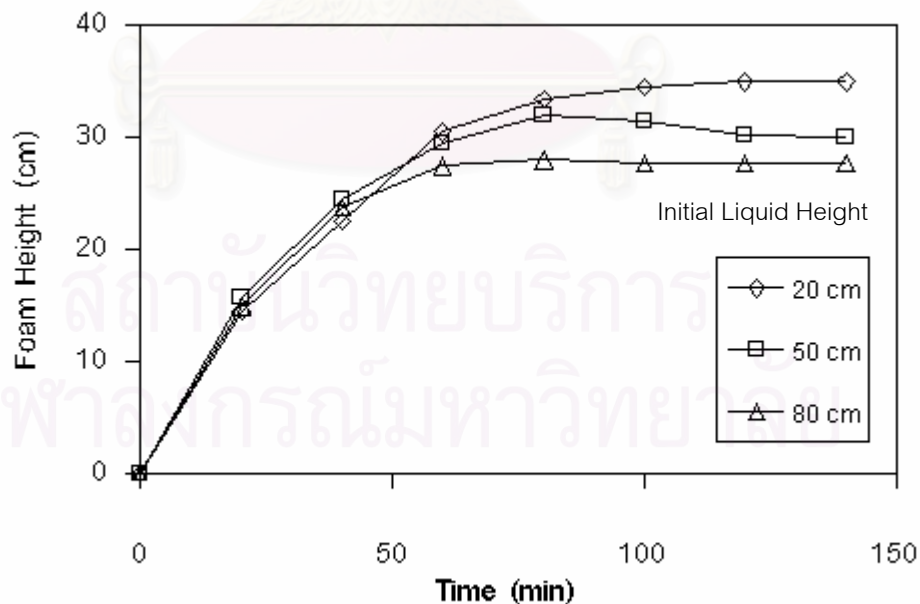
รูปที่ 4.1 ผลของขนาดของคอลัมน์โพลเทชนต์ต่อการเกิดฟองที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 ซีเอ็มซี ระดับของของเหลวเริ่มต้นในคอลัมน์ 50 ซม ฟลักซ์ของอากาศ 0.62 มล/(นาทී.ซม<sup>2</sup>)



รูปที่ 4.2 ผลของขนาดของคอลัมน์โพลเทชนต์ต่อการเกิดฟองที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี ระดับของของเหลวเริ่มต้นในคอลัมน์ 50 ซม ฟลักซ์ของอากาศ 0.62 มล/(นาทී.ซม<sup>2</sup>)



รูปที่ 4.3 ผลของระดับของของเหลวเริ่มต้นต่อการเกิดฟองในคอลัมน์ขนาด 8 นิ้ว ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 ซีเอ็มซี ฟลักซ์ของอากาศ 0.62 มล/(นาที.ซม<sup>2</sup>)



รูปที่ 4.4 ผลของระดับของของเหลวเริ่มต้นต่อการเกิดฟองในคอลัมน์ขนาด 8 นิ้ว ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี ฟลักซ์ของอากาศ 0.62 มล/(นาที.ซม<sup>2</sup>)

ในคอลัมน์แต่ละขนาด เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 80 นาที การเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้นฟองลดลงและเริ่มคงที่ ซึ่งอธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 0.1 ซีเอ็มซี โดยเมื่อเพิ่มระดับความสูงของของเหลว ทำให้ความสูงของชั้นฟองเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ระดับของของเหลวเริ่มต้น 80 ซม. จะมีจำนวนโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวสูงสุด ทำให้เกิดฟองมากขึ้น แต่ในกรณีที่ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวเป็น 1 ซีเอ็มซี ให้ผลตรงกันข้าม กล่าวคือ ความสูงของชั้นฟองต่ำลง เมื่อเพิ่มระดับความสูงของของเหลว ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวมีเพียงพอที่จะทำให้เกิดฟองอยู่แล้ว แต่ความสูงของชั้นน้ำที่สูงขึ้นจะมีผลทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดชั้นฟองลดลง แต่อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้นฟอง พบว่า ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ระดับความสูงของของเหลวมีผลไม่มากนักต่อความสูงของชั้นฟอง

#### 4.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

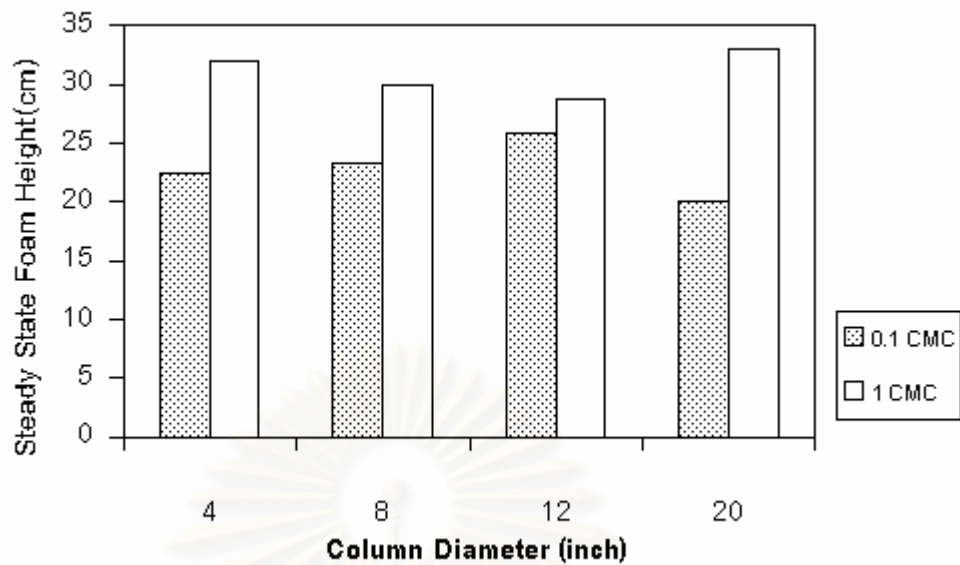
รูปที่ 4.5 แสดงผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่อความสูงของการเกิดฟองที่เส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ (4, 8, 12 และ 20 นิ้ว) ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 และ 1 ซีเอ็มซี พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี ซึ่งเป็นจุดที่สารละลายมีค่าแรงตึงผิวต่ำสุด นั่นคือ ความสูงของชั้นฟองจะมากกว่าที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 ซีเอ็มซี เนื่องจากมีปริมาณของสารลดแรงตึงผิวมากกว่า การเกิดฟองจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.3 และ 4.4

#### 4.1.4 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ที่ความสูงของชั้นฟองคงที่

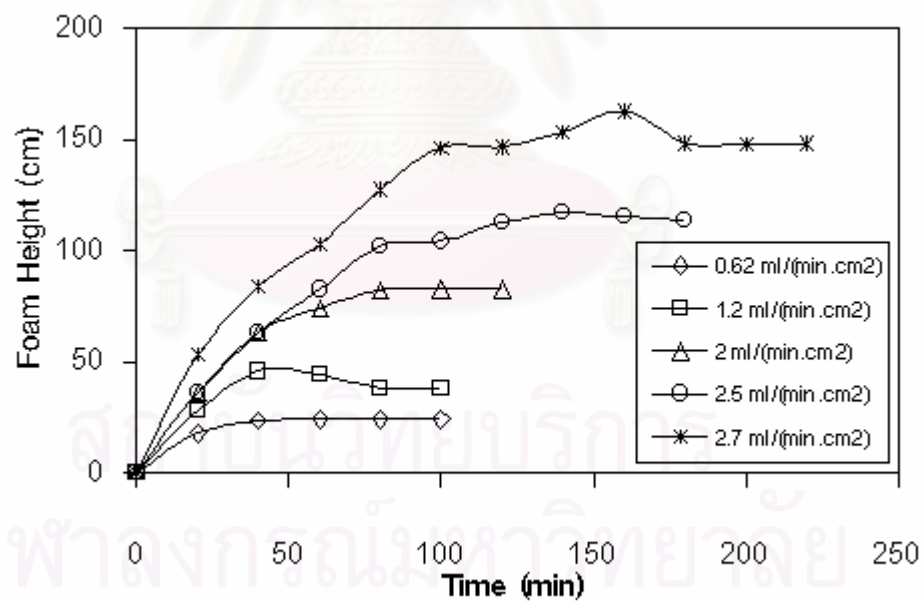
รูปที่ 4.5 แสดงผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่อการเกิดฟองที่ค่าความสูงของฟองคงที่แล้ว โดยทำการทดลองในคอลัมน์ทั้ง 4 ขนาด (4, 8, 12 และ 20 นิ้ว) ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 และ 1 ซีเอ็มซี พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์มีผลไม่มากต่อความสูงของชั้นฟองที่คงที่แล้ว โดยมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งที่ความเข้มข้น 0.1 และ 1 ซีเอ็มซี ซึ่งสอดคล้องกับในหัวข้อที่ 4.1.1

#### 4.1.5 ผลของค่าฟลักซ์ของอากาศ

รูปที่ 4.6 แสดงผลของค่าฟลักซ์ของอากาศต่อการเกิดฟอง โดยทำการทดลองในคอลัมน์ขนาด 4 นิ้ว ระดับของของเหลวเริ่มต้นในคอลัมน์ 50 ซม. ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 ซีเอ็มซี พบว่า ความสูงของชั้นฟองเพิ่มขึ้นตามเวลาที่แต่ละค่าฟลักซ์



รูปที่ 4.5 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของชั้นฟอง ที่ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว 0.1 และ 1 ซีเอ็มซี ระดับของของเหลวเริ่มต้น 50 ซม และฟลักซ์ของอากาศ 0.62 มล/(นาที.ซม<sup>2</sup>)

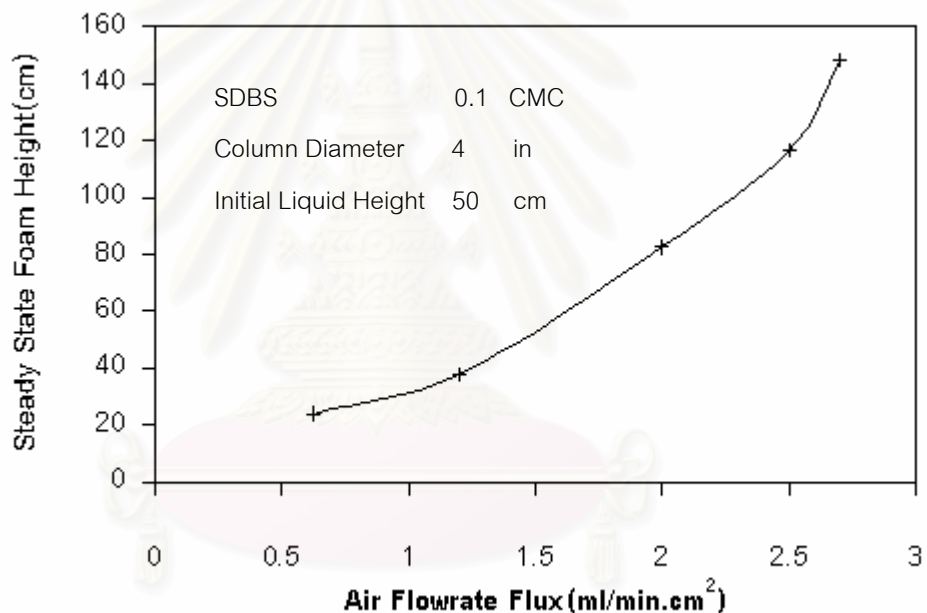


รูปที่ 4.6 ผลของค่าฟลักซ์ของอากาศต่อการเกิดฟองในคอลัมน์ขนาด 4 นิ้ว ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 ซีเอ็มซี ระดับของของเหลวเริ่มต้น 50 ซม



ของอากาศ และจะมีความสูงคงที่เมื่อเวลาเป่าอากาศยาวนานพอ เมื่อค่าฟลักซ์ของอากาศเพิ่มขึ้นความสูงของชั้นฟองก็เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจาก เมื่อเพิ่มค่าฟลักซ์ของอากาศก็เท่ากับเป็นการเพิ่มปริมาณของฟองอากาศ ทำให้สารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในสารละลายสามารถเคลื่อนที่ไปยังฟองอากาศที่มีเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ความสูงของชั้นฟองจึงเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ของอากาศที่เป่ากับความสูงที่คงที่ของชั้นฟอง ซึ่งจะเห็นว่าความสูงของชั้นฟองเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก เมื่อค่าฟลักซ์ของอากาศที่เป่าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อัตราการเป่าอากาศเป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่สุดต่อความสูงของชั้นฟอง

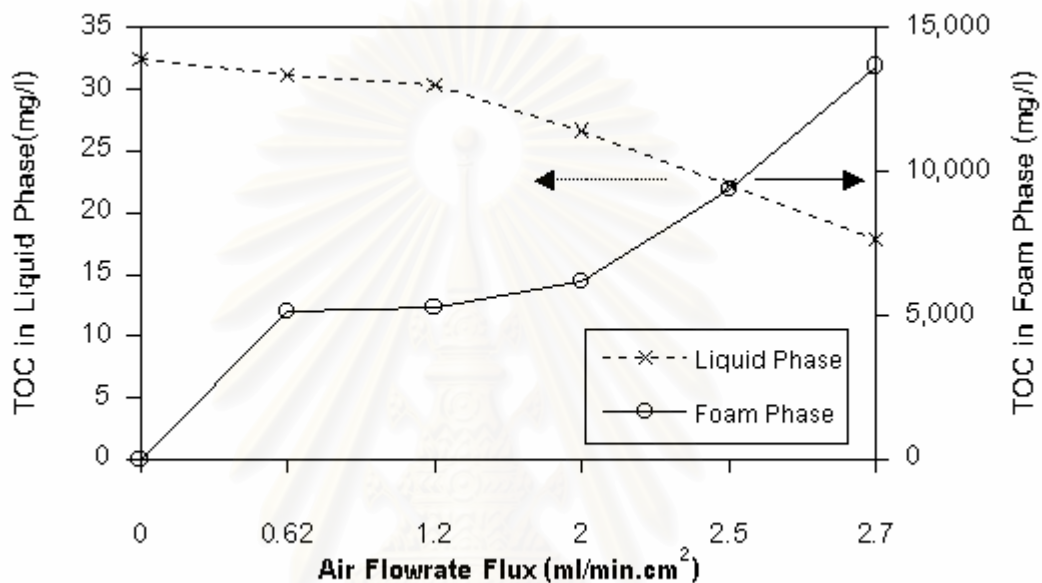


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของอากาศและความสูงของชั้นฟองที่คงที่

#### 4.1.6 ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำและชั้นฟอง

ในการทดลองที่ค่าฟลักซ์ของอากาศต่างๆ ของคอลัมน์ขนาด 4 นิ้ว ได้ทำการเก็บตัวอย่างของสารละลายที่อยู่ในชั้นน้ำและฟองหลังจากสิ้นสุดการทดลองแล้วมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณของสารลดแรงตึงผิว โดยใช้เครื่อง Total Organic Analyzer ผลการ

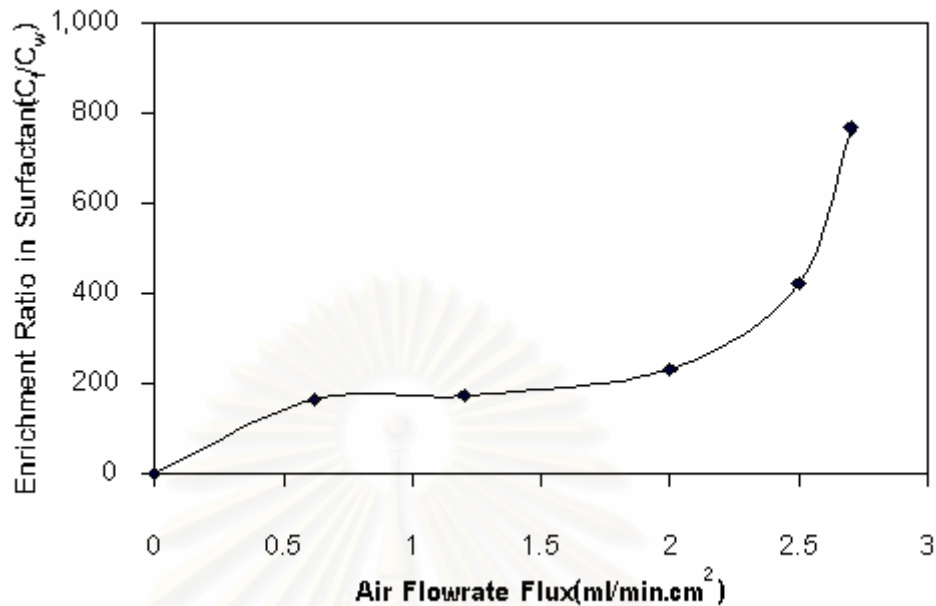
วิเคราะห์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8 นั่นคือ เมื่อค่าฟลักซ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่ในชั้นน้ำจะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นฟองเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวส่วนมากจะเคลื่อนที่ไปสะสมอยู่ที่ฟอง โดยที่เมื่อค่าฟลักซ์ของอากาศมากขึ้น การเกิดฟองจะเกิดได้มากขึ้นด้วย ดังที่อธิบายในหัวข้อ 4.1.4 ดังนั้น สารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่ในชั้นน้ำจึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำและชั้นฟองที่ค่าฟลักซ์ของอากาศต่างๆ ในคอลัมน์ขนาด 4 นิ้ว ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.1 ซีเอ็มซี

#### 4.1.7 สัดส่วนความเข้มข้น (Enrichment Ratio; $C_f/C_w$ )

สัดส่วนความเข้มข้น (Enrichment Ratio) หมายถึง อัตราส่วนความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวในส่วนของฟอง ( $C_f$ ) ต่อความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวในส่วนของน้ำ ( $C_w$ ) สัดส่วนความเข้มข้นนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการแยกสารมากน้อยเพียงใด ถ้าสัดส่วนความเข้มข้นมีค่าสูง แสดงว่ามีประสิทธิภาพการแยกสารสูง รูปที่ 4.9 แสดง สัดส่วนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว พบว่า เมื่อค่าฟลักซ์ของอากาศเพิ่มขึ้น สัดส่วนความเข้มข้นสูงขึ้น นั่นคือ ระบบสามารถที่จะแยกสารลดแรงตึงผิวมาอยู่ในชั้นฟองได้ดีขึ้น โดยสัดส่วนความเข้มข้นนี้จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อค่าฟลักซ์ของอากาศสูงกว่า 2 มล/(นาที่.ซม<sup>2</sup>)



รูปที่ 4.9 สัดส่วนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำและชั้นฟองที่ค่าพลังค์ของอากาศต่างๆ

## 4.2 ระบบฟองลอยแบบต่อเนื่อง (Continuous Froth Flotation System)

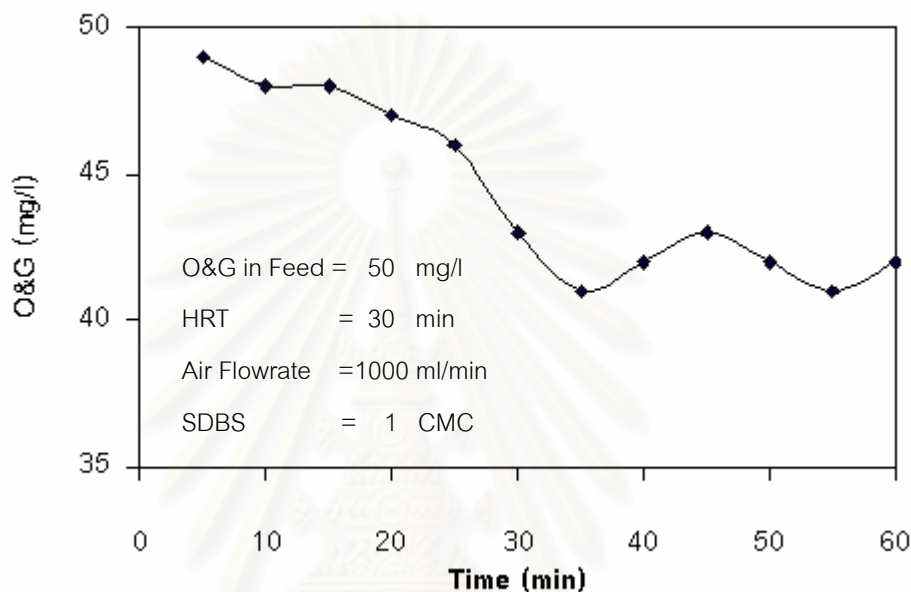
### 4.2.1 ระบบที่มีเฉพาะสารลดแรงตึงผิว

ในการทดลองนี้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นน้ำมันเครื่อง 50 มก/ล คงที่ตลอดการทดลอง ข้อมูลการทดลองได้แสดงในภาคผนวก ง โดยแบ่งออกเป็น 2 การทดลองย่อย การทดลองแรกเป็นการทดลองแยกน้ำมันโดยเติมเฉพาะสารลดแรงตึงผิว ส่วนการทดลองที่สองเป็นการเติมสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว

#### 4.2.1.1 การหาเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่

การทดลองนี้เป็นการหาเวลาที่ระบบฟองลอยเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) โดยเมื่อเริ่มทำการทดลองแล้วเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลออกทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันที่เหลือนอยู่ในชั้นน้ำ โดยเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลล้นออกจากคอดัมน์ภายหลังจากไหลเข้าจนเต็มซึ่งใช้เวลา 30 นาที ปริมาณน้ำมันยังมีการเปลี่ยนแปลงเรื่อยๆ จนถึงจุดหนึ่งจะเริ่มคงที่ ซึ่งผลการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า

เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณน้ำมันมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ปริมาณน้ำมันเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลดลงและมีค่าค่อนข้างคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ดังนั้นในการทำการทดลองต่อไปจะเลือกเก็บตัวอย่างที่เวลา 40 นาทีถึง 60 นาที แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นปริมาณน้ำมันในน้ำที่ล้นออกจากคอลัมน์



รูปที่ 4.10 ปริมาณน้ำมันในน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆตลอดการทดลอง

#### 4.2.1.2 ความสูงของชั้นฟองในคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน

จากรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อความสูงของชั้นฟองในคอลัมน์เพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 40, 50 และ 60 ซม ปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในชั้นน้ำมีค่าลดลง เนื่องจาก เมื่อความสูงของชั้นฟองเพิ่มขึ้น นั่นคือ มีปริมาณของสารลดแรงตึงผิวสะสมอยู่ที่ฟองมาก ซึ่งโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวจะไปสะสมอยู่ที่บริเวณผิวฟอง โดยน้ำมันจะมาเกาะที่ส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว ทำให้อนุภาคน้ำมันลอยขึ้นมาพร้อมกับฟองอากาศและโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว และฟองที่ล้นออกมาจะมีลักษณะเป็นฟองที่แห้งเนื่องจากปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ที่ฟองบางส่วนมีการไหลออก ซึ่งเป็นผลจากแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้มีความเข้มข้นของน้ำมันสะสมอยู่ที่ฟองมาก น้ำมันจะเหลืออยู่ในชั้นน้ำน้อยกว่า และน้ำมันส่วนใหญ่นั้นจะไปสะสมอยู่บริเวณฟอง เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของระบบดังแสดงใน

รูปที่ 4.12 พบว่า เมื่อความสูงของชั้นฟองเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันของระบบจะมีค่าสูงขึ้น แต่จะเห็นว่า ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันสูงสุดประมาณ 7.4% ซึ่งกล่าวได้ว่าต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจาก สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ทดลองเป็นชนิดลบ ในขณะที่อนุภาคน้ำมันมีประจุลบ จึงเกิดการผลักกันระหว่างอนุภาคน้ำมันและอนุภาคสารลดแรงตึงผิว ทำให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันมีค่าต่ำ และจากรูปที่ 4.13 พบว่า เมื่อความสูงของชั้นฟองเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นฟองเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงของโลก คือ เมื่อความสูงของชั้นฟองเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ของเหลวบางส่วนที่สะสมอยู่ที่ฟอง ซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบค่อนข้างมากจะเริ่มไหลออก ทำให้ฟองที่ล้นออกมาเป็นฟองที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบน้อยลง จึงทำให้มีความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากกว่าที่ความสูงของชั้นฟองต่ำกว่า และเมื่อพิจารณาปริมาตรของฟองที่ความสูงของชั้นฟองต่างๆ พบว่า เมื่อความสูงของชั้นฟองเพิ่มขึ้นปริมาตรฟองที่ล้นออกมาจะลดลงดังรูปที่ 4.14

#### 4.2.1.3 สัดส่วนความเข้มข้น (Enrichment Ratio)

รูปที่ 4.15 แสดงสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำมันที่ค่าความสูงของชั้นฟองต่างๆ พบว่า ที่ความสูงของชั้นฟองเพิ่มขึ้นค่าสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำมันมีค่าลดลง ในขณะที่สัดส่วนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.16

#### 4.2.2 ระบบที่เติมสารลดแรงตึงผิวและสารพอลิอิเล็กโทรไลต์

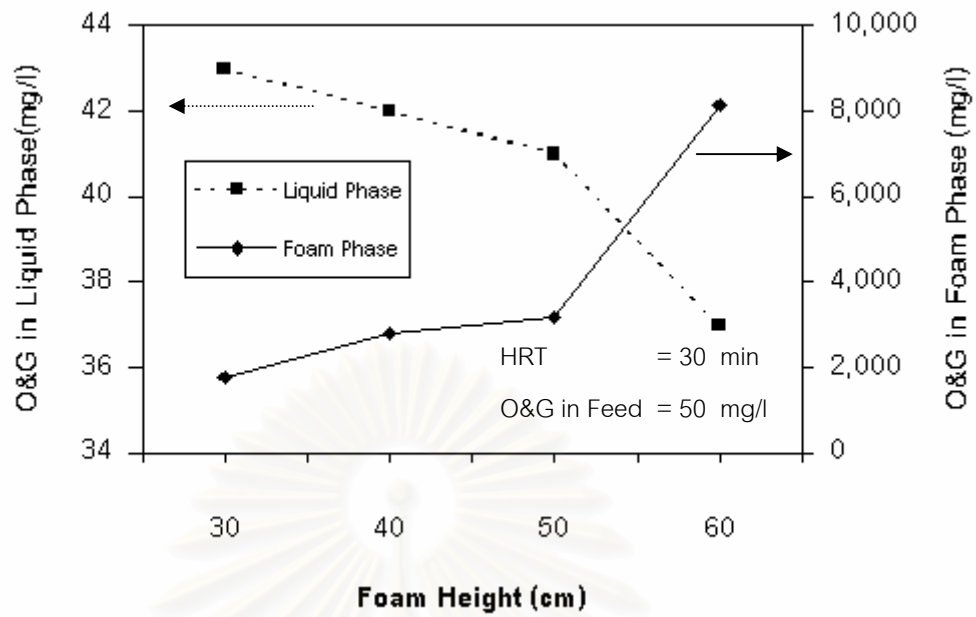
สารฟลอคคูลแลนท์ที่ใช้เติมลงในระบบฟองลอยในการทดลองนี้ ได้แก่ สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ชนิดแคทไอออนิก Betz Novous Polymer 2680 โดยจากงานวิจัยของ อโณชา เกตุเวชช์ ในปี พ.ศ. 2539 ที่ศึกษาเรื่องการทำบัตน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมันโดยระบบฟองลอยพบว่า การใช้สารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ Betz Novous Polymer 2680 ให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันสูงสุด เท่ากับ 100% ที่ความเข้มข้นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ 100 มก/ล ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกใช้สารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์นี้

##### 4.2.2.1 ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันเมื่อมีการเติมสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว

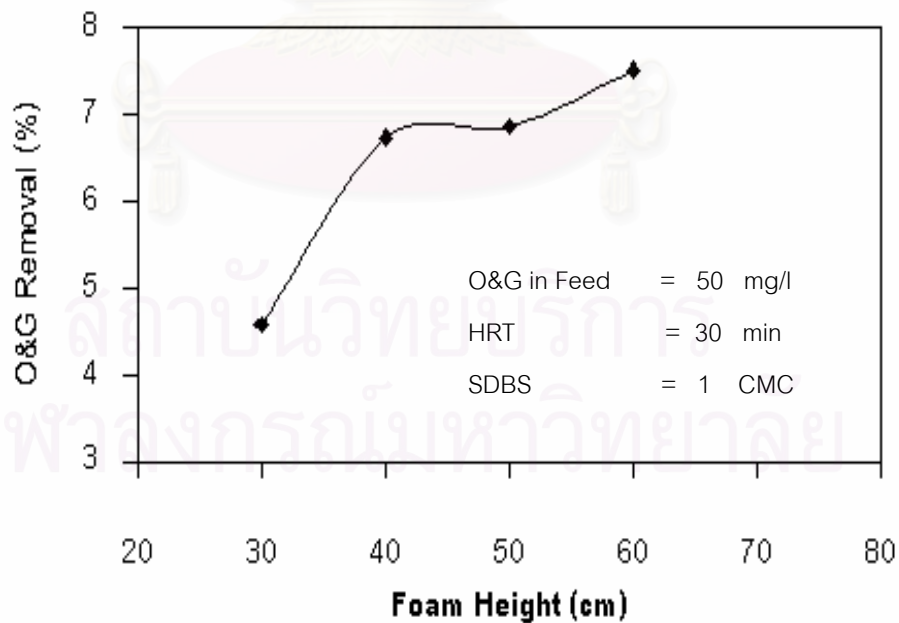
ในการทดลองได้เติมสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ลงในระบบ โดยให้มีค่า Polyelectrolyte Dosage ต่างๆ ได้แก่ 10, 40, 70, 120, 200 และ 250 มก/ล และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว(SDBS) 1 ซีเอ็มซี ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18

ซึ่งสารลดแรงตึงผิวจะเกาะรวมตัวกับสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่เติม เนื่องจากมีประจุตรงกันข้าม เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารลดแรงตึงผิวกับสารพอลิอิเล็กโทรไลต์พาอนุภาคน้ำมันออกจากระบบได้ง่ายขึ้น เมื่อเติมสารพอลิอิเล็กโทรไลต์เพิ่มสูงขึ้น พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น โดยที่น้ำมันจะเหลืออยู่ในชั้นน้ำลดลง และไปอยู่ที่ชั้นฟองมากขึ้น ซึ่งที่ค่า Polyelectrolyte Dosage เท่ากับ 250 มก/ล ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันสูงถึง 90%  $((\text{ความเข้มข้นของน้ำมันขาเข้า} - \text{ความเข้มข้นของน้ำมันขาออก}) \times 100 / \text{ความเข้มข้นของน้ำมันขาเข้า})$  สูงกว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวเพียงอย่างเดียว (ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันเท่ากับ 6.9% ดังรูปที่ 4.12) สามารถอธิบายได้ว่า น้ำมันมีประจุเป็นลบซึ่งตรงข้ามกับประจุของสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นบวก ทำให้เมื่อเพิ่มสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ลงไปในระบบ โมเลกุลของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์จะไปจับกับอนุภาคน้ำมันมากขึ้น ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันจึงสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Bolto และคณะ ในปี 1996 ที่ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันในรูปอิมัลชัน โดยใช้ระบบฟองลอย และใช้สารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยได้พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันสูงกว่า 95% และยังพบว่า การใช้สารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ร่วมกับ SDS (Sodium Dodecyl Sulfate) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออนิกทำให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันสูงขึ้น

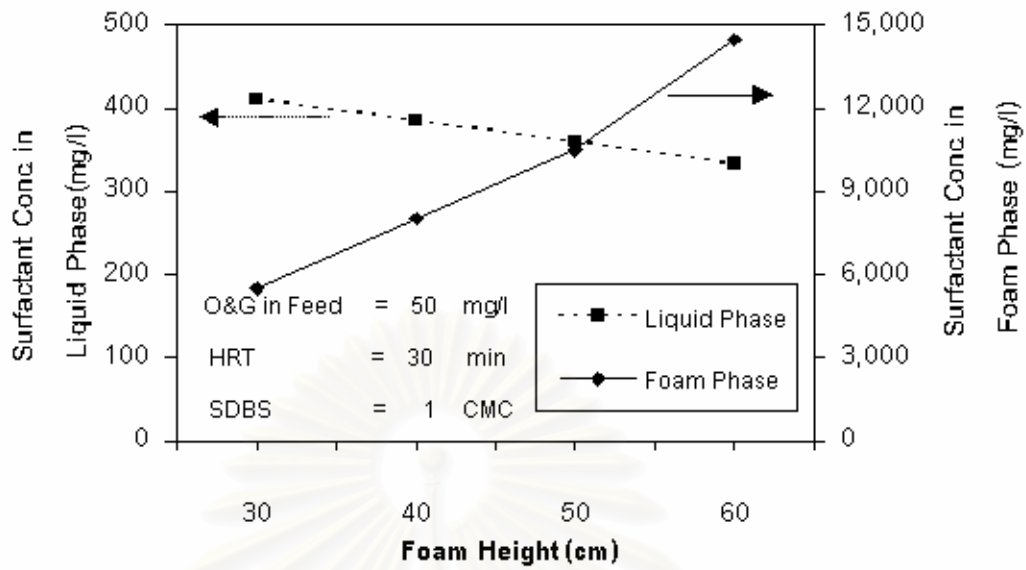
จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 เมื่อทดลองลดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออนิก SDBS จาก 1 ซีเอ็มซี เป็น 0.5 ซีเอ็มซี พบว่า ปริมาณน้ำมันที่อยู่ในชั้นน้ำมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี และประสิทธิภาพการแยกน้ำมันลดลงเหลือ 77.5% ที่ค่า PE Dosage 250 มก/ล สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวที่ 0.5 ซีเอ็มซี และเป่าอากาศ จำนวนโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่เคลื่อนย้ายไปอยู่ในฟองมีน้อยกว่า และหรือมีปริมาตรน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เติมสารลดแรงตึงผิวที่ 1 ซีเอ็มซี จึงทำให้ปริมาณอนุภาคน้ำมันมีการรวมตัวที่ฟองน้อยลงด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันลดต่ำลง เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวต่ำลงจาก 1 ซีเอ็มซี เป็น 0.5 ซีเอ็มซี



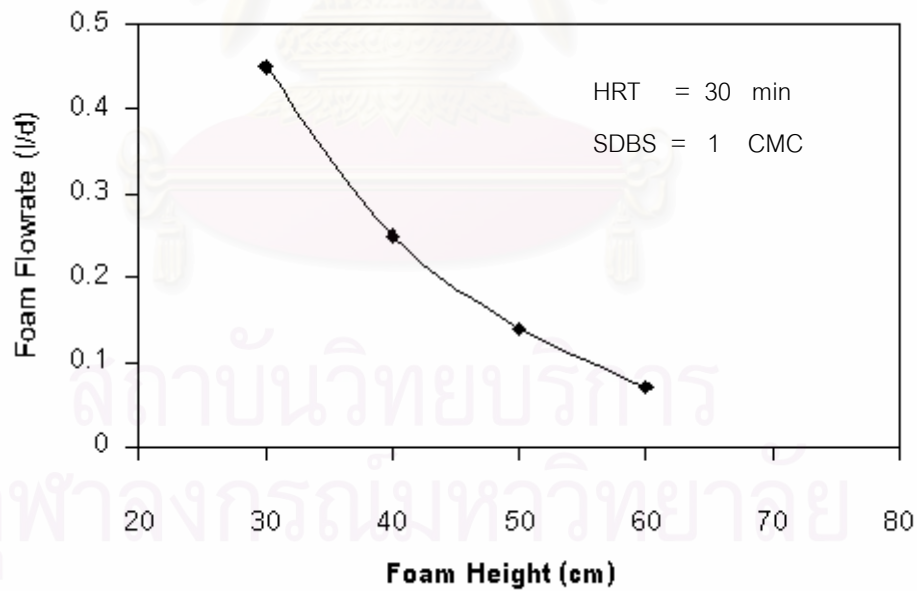
รูปที่ 4.11 ปริมาณน้ำมันในน้ำที่ออกจากคอลัมน์และในชั้นฟองที่ความสูงของชั้นฟองต่างๆ (ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี อัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที )



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของระบบฟองลอยที่ค่าความสูงของชั้นฟองต่างๆ (อัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที )

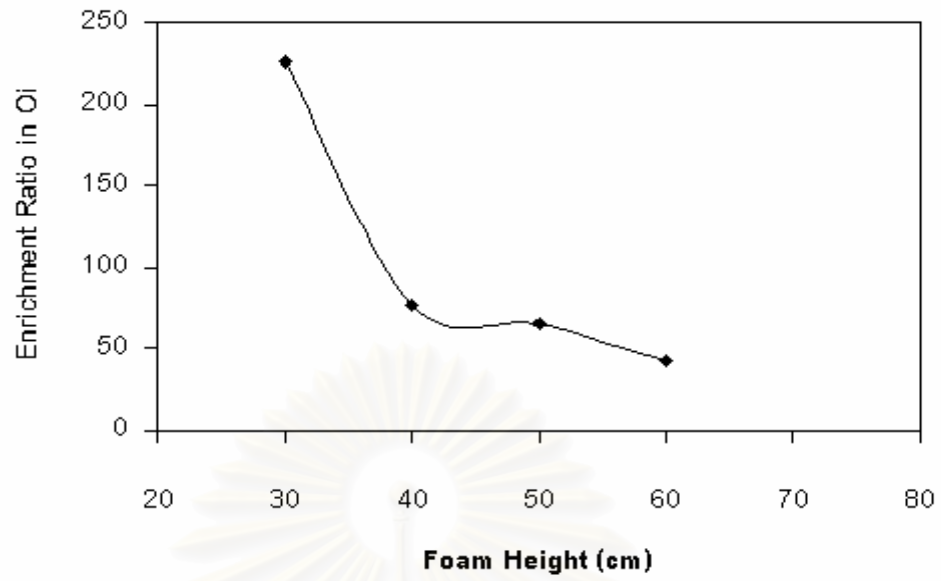


รูปที่ 4.13 ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำและชั้นฟองที่ความสูงของชั้นฟองต่างๆ (อัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที)

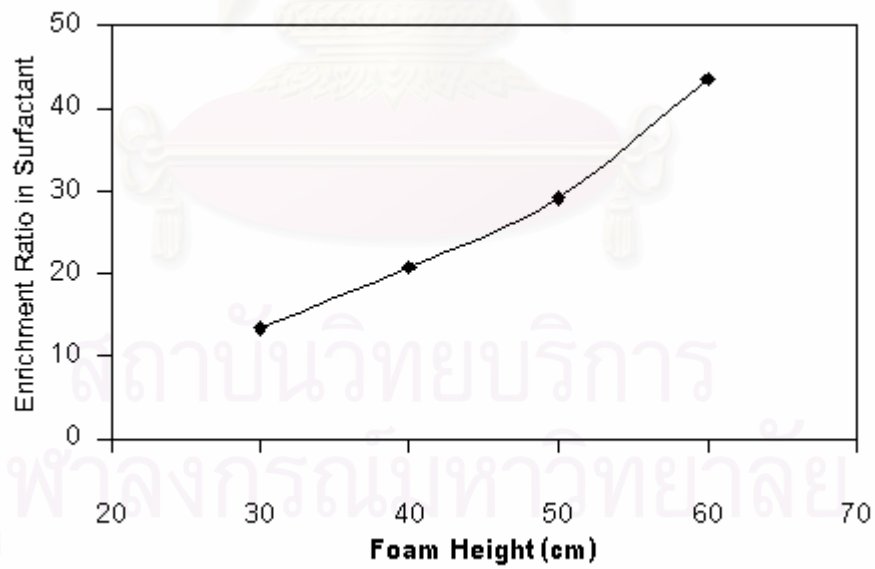


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของชั้นฟองกับปริมาณฟองที่ล้นออกมา





รูปที่ 4.15 สัดส่วนความเข้มข้นของน้ำมันที่ค่าความสูงของชั้นฟอง



รูปที่ 4.16 สัดส่วนความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวที่ค่าความสูงของชั้นฟองต่างๆ

#### 4.2.2.2 ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในชั้นน้ำและชั้นฟอง

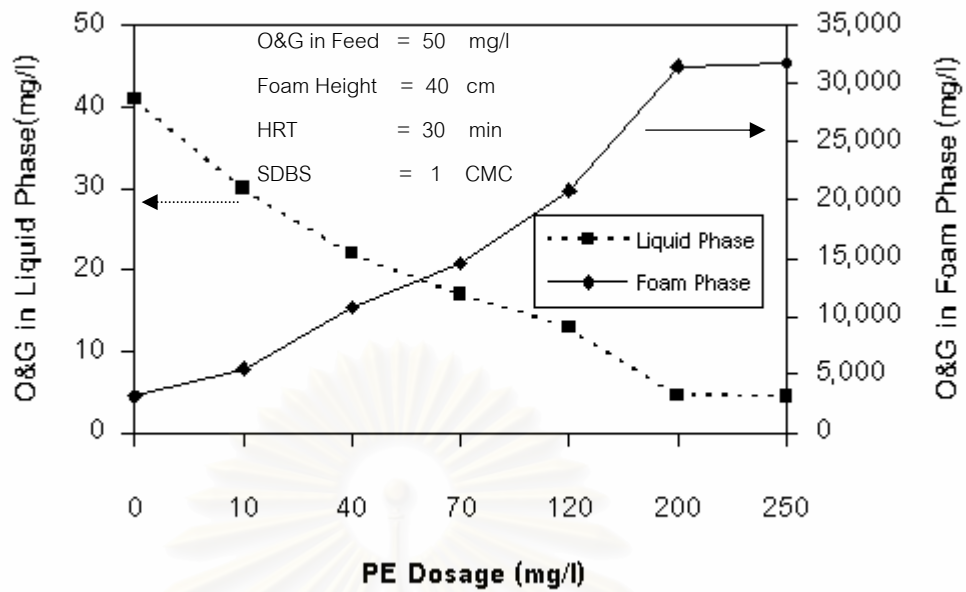
จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 พบว่า เมื่อค่า PE Dosage เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นฟองลดลง เนื่องจาก สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ส่วนหนึ่งละลายน้ำได้ดี จึงดึงสารลดแรงตึงผิวให้ละลายอยู่ในชั้นน้ำ ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ จึงทำให้สารลดแรงตึงผิวถูกดึงให้มาละลายอยู่ในชั้นน้ำมากขึ้น ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในชั้นน้ำจึงสูงขึ้นและไปอยู่ที่ชั้นฟองลดลง

#### 4.2.2.3 ปริมาณสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ในชั้นน้ำและชั้นฟอง

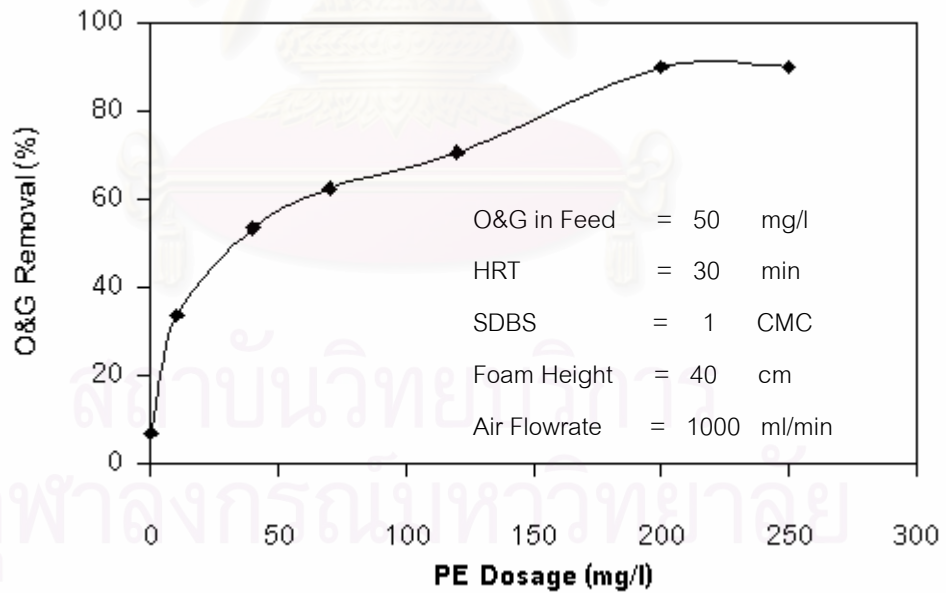
จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 พบว่า ที่ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิว 0.5 และ 1 ซีเอ็มซี ความเข้มข้นของสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ในชั้นน้ำและชั้นฟองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่ความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ในชั้นฟองมีค่ามากกว่าในชั้นน้ำ ซึ่งสามารถอธิบายในทำนองเดียวกับหัวข้อ 4.2.3.3

#### 4.2.2.4 สัดส่วนความเข้มข้นของน้ำมัน

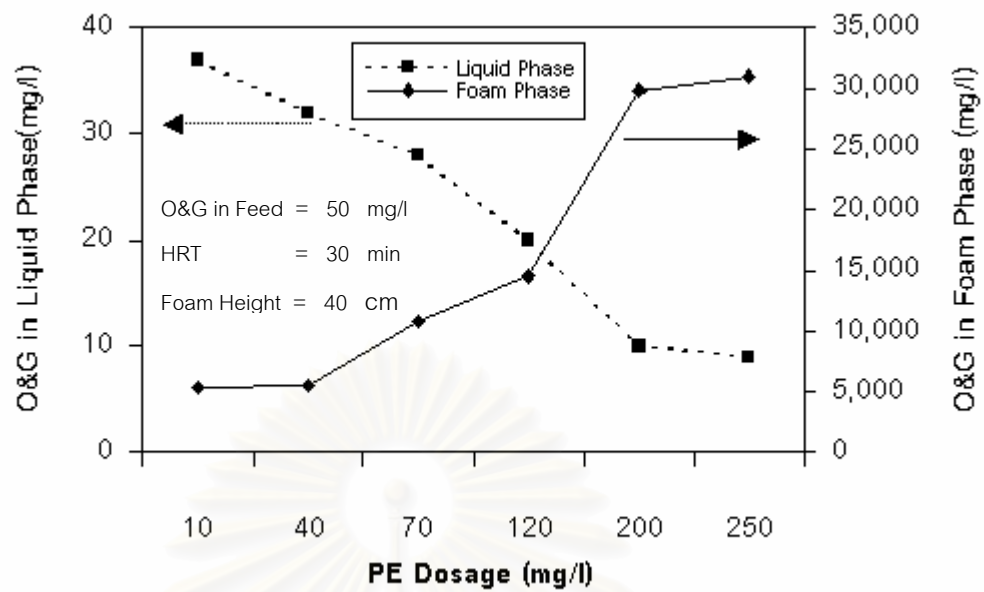
จากรูปที่ 4.25 พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี มีสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำมันมากกว่าที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.5 ซีเอ็มซี นั่นคือ ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันมีค่าสูงกว่า ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในทำนองเดียวกันสำหรับสัดส่วนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวและสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ



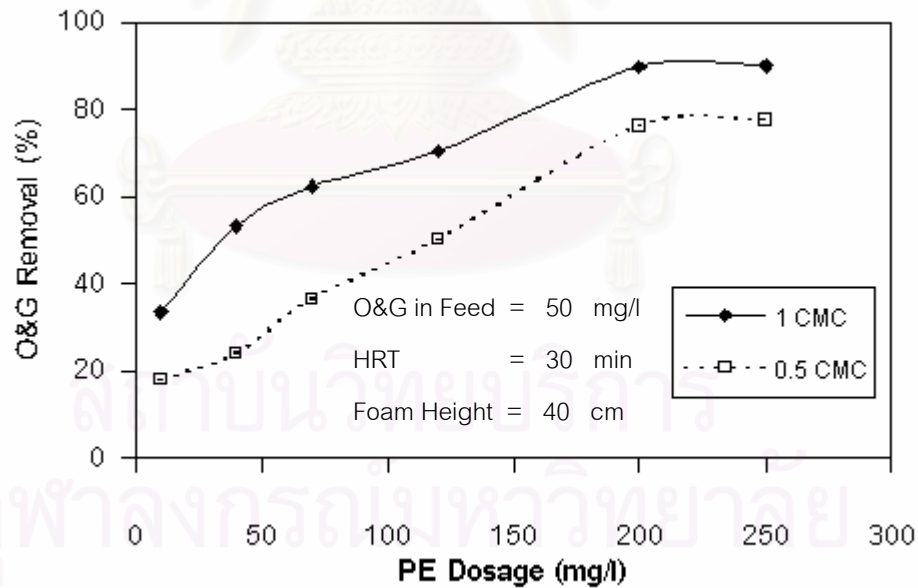
รูปที่ 4.17 ปริมาณน้ำมันขาออกในน้ำที่ออกจากคอลัมน์และในชั้นฟองที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ที่อัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที



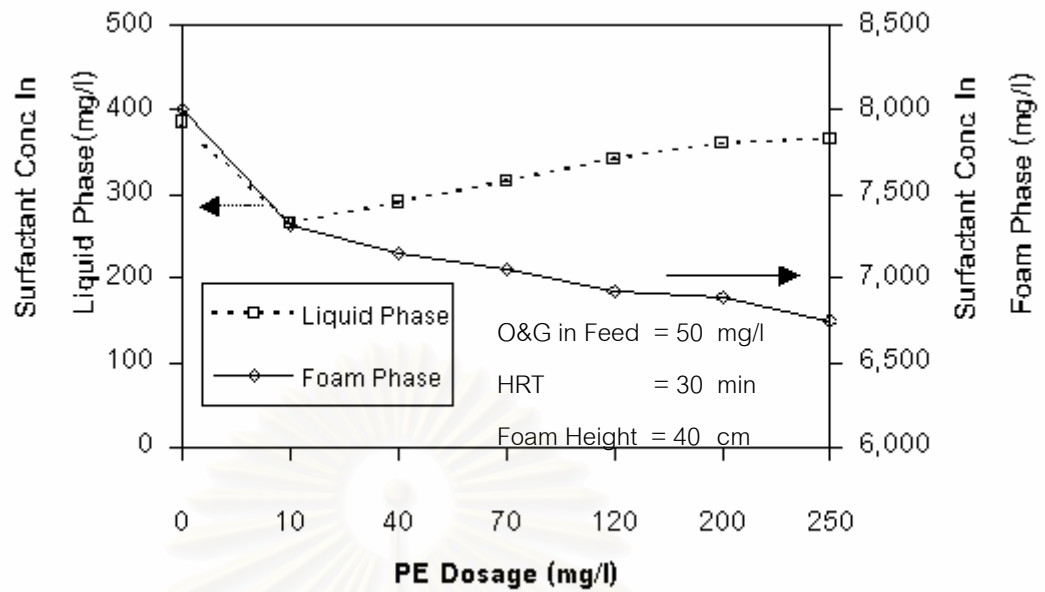
รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของระบบฟองลอยที่ค่า PE Dosage ต่างๆ



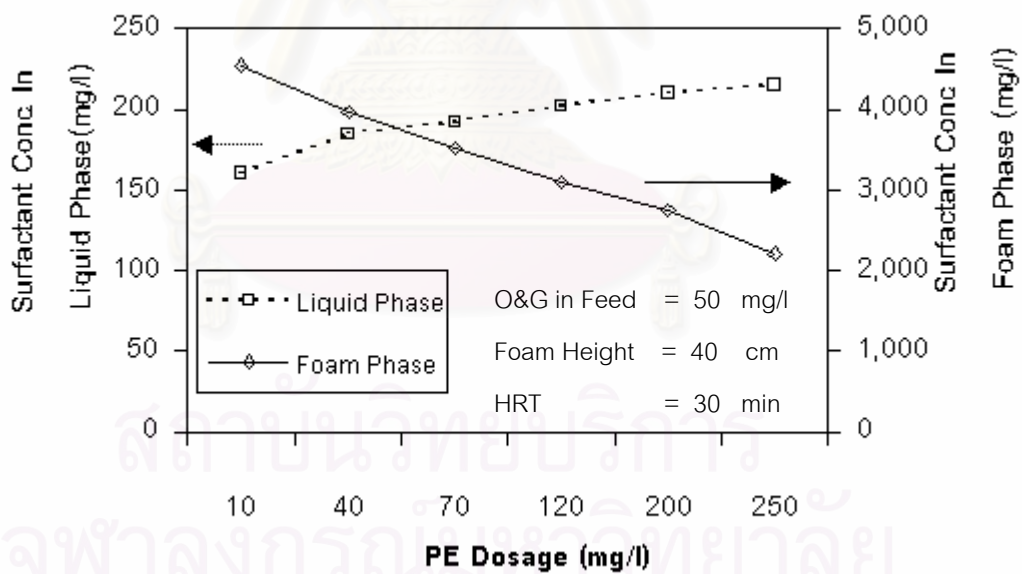
รูปที่ 4.19 ปริมาณน้ำมันในน้ำที่ออกจากคอลัมน์และในชั้นฟองที่ PE Dosage ต่างๆที่ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.5 ซีเอ็มซี อัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที



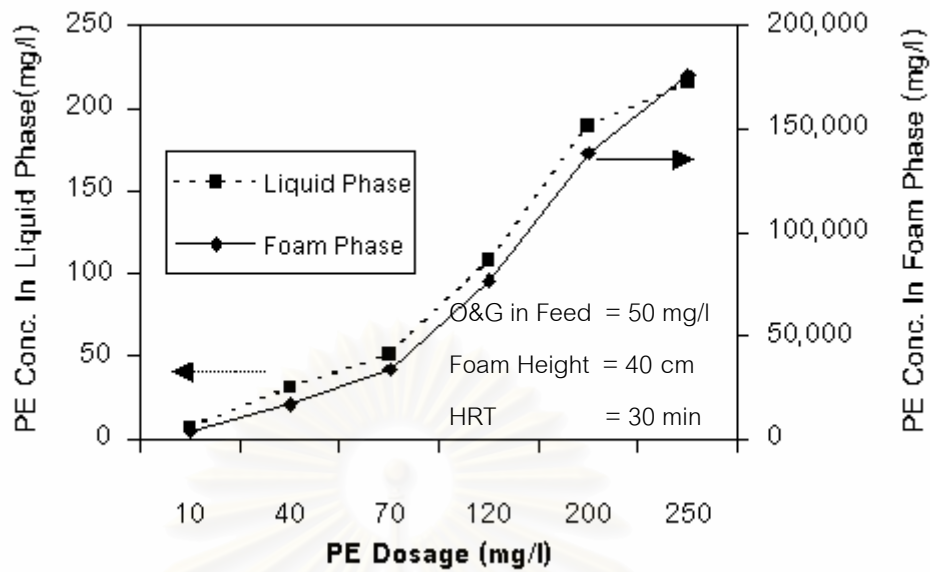
รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของระบบฟองลอยที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 และ 0.5 ซีเอ็มซี อัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที



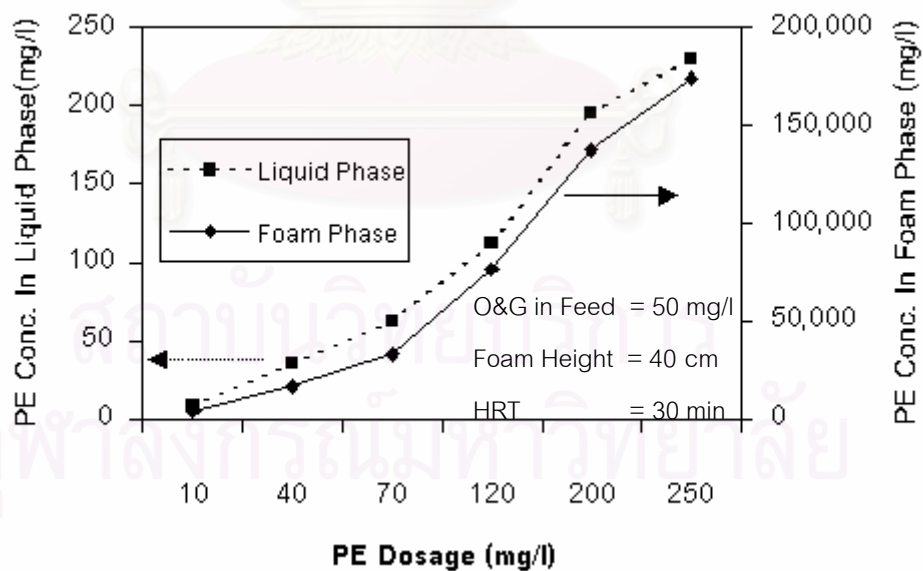
รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำและชั้นฟองที่ PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี และ อัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที



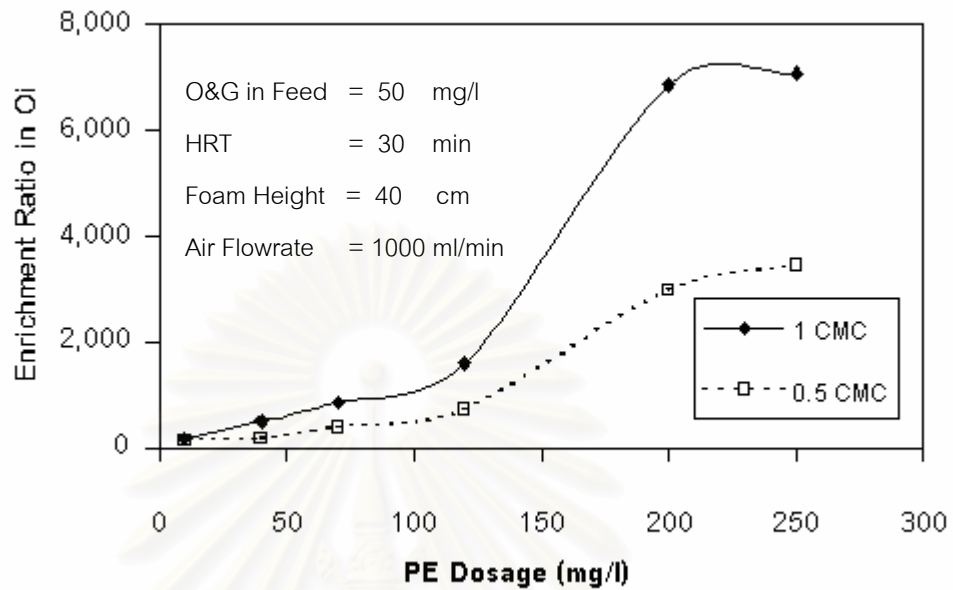
รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำและชั้นฟองที่ PE Dosagต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.5 ซีเอ็มซี และ อัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที



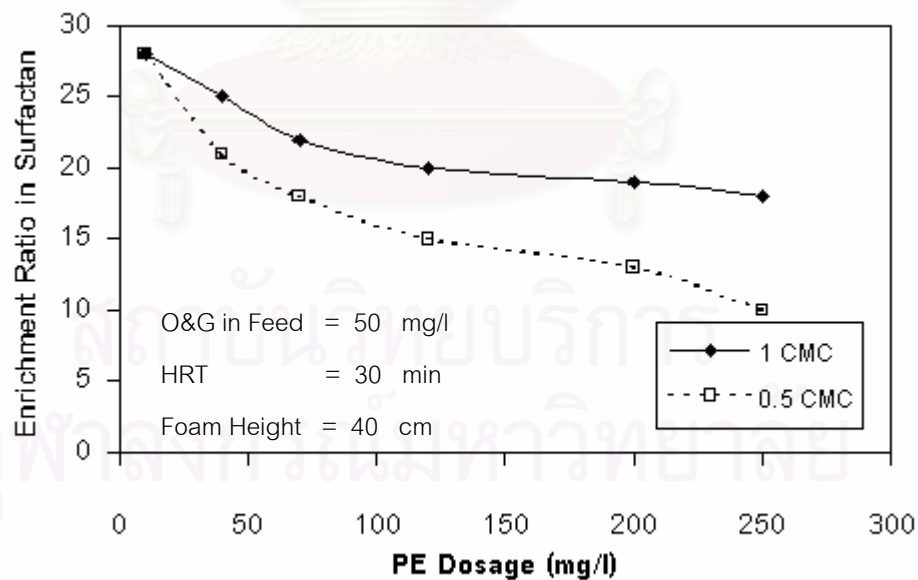
รูปที่ 4.23 ความเข้มข้นของสารแคทอิออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ในชั้นน้ำ และชั้นฟองที่ PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 ซีเอ็มซี และอัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที



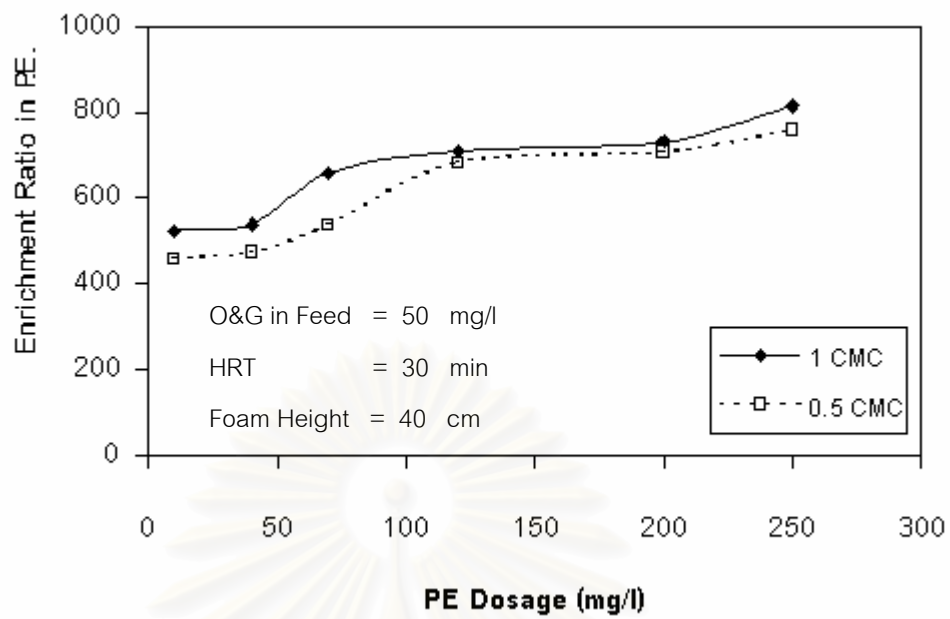
รูปที่ 4.24 ความเข้มข้นของสารแคทอิออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ในชั้นน้ำ และชั้นฟองที่ PE Dosage ต่างๆ ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 0.5 ซีเอ็มซี อัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที



รูปที่ 4.25 สัดส่วนความเข้มข้นของน้ำมันที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 และ 0.5 ซีเอ็มซี



รูปที่ 4.26 สัดส่วนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 และ 0.5 ซีเอ็มซี และอัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที



รูปที่ 4.27 สัดส่วนความเข้มข้นของสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ ที่ค่า PE Dosage ต่างๆ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว 1 และ 0.5 ซีเอ็มซี และอัตราการไหลของอากาศ 1000 มล/นาที



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลลอยด์มีผลต่อความสูงของชั้นฟองที่เกิดขึ้นเมื่อความสูงยังไม่คงที่ แต่จะมีผลไม่มากเมื่อความสูงของชั้นฟองคงที่แล้ว
2. ระดับของของเหลวเริ่มต้นมีผลไม่มากต่อความสูงของชั้นฟอง
3. เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้น ความสูงของชั้นฟองจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าพิจารณาที่ความเข้มข้นเดียวกันในคอลลอยด์แต่ละขนาด ความสูงของชั้นฟองจะมีค่าไม่ต่างกันมากนัก
4. เมื่อค่าฟลักซ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ความสูงของชั้นฟองจะเพิ่มขึ้น
5. เมื่อค่าฟลักซ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในชั้นน้ำจะลดลง แต่ในชั้นของฟองจะเพิ่มขึ้น
6. ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของระบบฟองลอยมีค่าน้อยเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออนิก (SDBS) เพียงอย่างเดียว
7. การใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของระบบฟองลอยจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก
8. การใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับสารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ เมื่อลดค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวลง ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันของระบบฟองลอยจะลดลง
9. สารฟลอคคูแลนต์หรือสารช่วยในการรวมตัว สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกน้ำมันโดยระบบฟองลอยได้ โดยสารฟลอคคูแลนต์ที่เหมาะสม คือ สารแคทไอออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Betz Novous Polymer CE 2680) เมื่อใช้สารนี้ที่ความเข้มข้น (Polyelectrolyte Dosage) เท่ากับ 250 มก/ล ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว (SDBS) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1 ซีเอ็มซี จะให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันสูงถึง 90%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดลองใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีความเป็นไฮโดรโฟบิกมากขึ้น เนื่องจาก ความเป็นไฮโดรโฟบิกของสารลดแรงตึงผิว มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน
2. ควรมีการศึกษาค่าผลของอัตราการใช้สารลดแรงตึงผิวที่ต่างกัน เนื่องจากปริมาณและขนาดของฟองอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน
3. ควรมีการศึกษาค่าผลของความเป็นกรดต่างของสารละลายต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของสารลดแรงตึงผิวและ/หรือสารพอลิอิเล็กโทรไลต์
4. ควรมีการทดลองใช้กับน้ำเสียจากสถานบริการน้ำมันหลายๆแห่ง เพื่อเปรียบเทียบและทดสอบประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวและ/หรือสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ เพื่อปรับปรุงระบบให้ดีขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

1. สุขเมธ ชวเดช. การบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
2. อโณชา เกตุเวชช์. การบำบัดน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมันโดยระบบฟองลอย. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

### ภาษาอังกฤษ

1. APHA, AWWA, and WEF. (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (18<sup>th</sup> ed.). Washington: American Public Health Association.
2. BHP Research. (1992). News from BHP (28 December 1992).
3. Bolto, B.A., et al. (1996). The Use of Soluble Organic Polymer in Waste Treatment. Water Science Technology. 34(9): 117-124.
4. Chin, K.K. (1994). Evaluation of Treatment Efficiency of Processes for Petroleum Refinery Wastewater. Wat.Sci.&Tech. 29(8): 47-50.
5. Clint, J.T. (1992). Surfactant Aggregation. New York: Blackie&Son. Chap.11: 1-11
6. Dautzenberg, H.; Jaeger, W.; Kotz, J.; Philipp, B.; Seidel, Ch.; and Stscherbina, D. (1994). Polyelectrolytes: Formation, Characterization and Application, Hanser. 1-281
7. Davies, J.T., and Rideal, E.K. (1963). Interfacial Phenomena. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Academic.
8. Dean, O.H., and Lemlich, R. (1965). Bubble and Foam Fractionation Combined. I&EC Process Design and Development. 4(1): 13-16.
9. Dobias, B. (1993). Coagulation and Flocculation: Theory and Applications (Surfactant Science Series Vol. 47). New York: Marcel Dekker. Ch.7: 321-351.

10. Evans, D.F., and Wennerstrom, H. (1994). The Colloids Domain. VCH Publishers: 455-488.
11. Fler, G.J., et al. (1993). Polymers at Interfaces. Uk: Chapman&Hall.
12. Garcia., A.B., and Martinez-Tarazona, M.R. (1993). Removal of Trace Elements from Spanish Coals. Fuel 72: 329-335.
13. Gehr, R., and Henry, J.G. (1982). Water Sci. Technol. 14:689.
14. Goon, P.; Bhirud, R.G.; and Kumar, V.V. (1999). Detergency and Foam Studies on Linear Alkylbenzene Sulfonate and Secondary Alkyl Sulfonate. Journal of Surfactants and Detergents. 2(4): 489-493.
15. Gray, S.R.; Harbour, P.J.; and Dixon, D.R. (1997). Effect of Polyelectrolyte Charge Density and Molecular Weight on the Flotation of Oil in Water Emulsions. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 126: 85-95.
16. Gulyas, H., and Reich, M. (1995). Organic Compounds at Different Stages of a Refinery Wastewater Treatment Plant. Wat. Sci. Tech. 32(7): 119-126.
17. Ityokumbul, M.T.; Bulani, W.; and Kosaric, N. (1988). Flotation Kinetics for Titanium, Zirconium and Bitumen Recovery from Oil Sand. Com.J.Chem.Eng. 66: 382-385.
18. Kastner, U.; Hoffmann, H.; Donges, R.; and Ehrter, R. (1996). Interactions between Modified Hydroxyethyl Cellulose (HEC) and Surfactants. Colloids and Surfaces. 112: 209-225.
19. Kirk-Othmer. (1983). Encyclopedia of Chemical Technology. (3<sup>rd</sup> ed.). Vol. 10: 523-524.
20. Kocz'o, K., and R'acz, G. (1991). Foaming Properties of Surfactants Solution. Colloids and Surfaces. 56: 59-82.
21. Koutlemani, M. M.; Mavros, P.; Zouboulis, A. I.; and Matis, K. A. (1994). Recovery of  $\text{Co}^{2+}$  Ions from Aqueous-Solutions by Froth Flotation. Sep.Sci.&Tech. 29(7): 867-886.
22. Kulicke, W. M.; Lenk, S.; Detzner, H. D.; and Weiss, Th. (1993). Chem.-Eng.-Tech. 65:541.

23. Manahan, S.E. (1994). Environmental Chemistry (6<sup>th</sup> ed.). USA: Lewis Publishers. 118-124.
24. Matis, K.A., and Mavros, P. (1991). Foam/Froth Flotation: Part II. Removal of Particulate Matter. Separation and Purification Methods. 20(2): 163-198.
25. Myers, D. (1946). Surfactant Science and Technology. (2<sup>nd</sup> ed.): 15-16.
26. Oh, S.G., and Shar, D.O. (1991). Relationship between Micellar Lifetime and Foamability of Sodium Dodecyl Sulfate and Sodium Sulfate/1-Hexanol Mixtures. Langmuir. 7:1316-1318.
27. Omar, A.M.A.; Adly, R.A. El.; Keera, S.T.; and Mohamed, M.S. (1998). Recovery of Residual Lubricating Oil from Waste Clay by Flotation. Monatshefte Fur Chemie. 129(4): 387-392.
28. Omar, A.M.A. (2001). Separation of Emulsifiable Oil from a Flotation Solution by Surface Tension Control. Adsorption Science&Technology. 19(1): 91-100.
29. Pal, R., and Masliyah, J. (1990). Oil Recovery from Oil in Water Emulsions Using a Flotation Column. ComJ.ChemEng. 68: 959-967.
30. Pongstabodee, S.; Scamehorn, J.F.; Chavadej, S.; and Harwell, J.H. (1998). Cleanup of Oily Wastewater by Froth flotation: Effect of Microemulsion Formation. Separation Science and Technology. 33(4): 591-609.
31. Pongstabodee, S., James, A.E. (2001). Removal of oil Mixtures from Aqueous Dispersion Using Froth Flotation. 6<sup>th</sup> World Congress of Chemical Engineering Melbourne, Australia.
32. Porter, M. R. (1994). Handbooks of Surfactants. (2<sup>nd</sup> ed.). Chapman&Hall. 65-69.
33. Rosen, M.J. (1989). Surfactants and Interfacial Phenomena (2<sup>nd</sup> ed.). New York: John Wiley&Son.
34. Schramm, L.L., and Wassmuth F. (1994). Foam: Fundamentals&Applications in the Petroleum Industry. American Chemical Society: New York. 276-284.
35. Sylvester, N.D., and Byeseda, J.J. (1980). Oil/Water Separation by Induced-Air Flotation. Soc.Pet.Eng.J. 20: 579-590.

36. Tantayakom, P. (1997). Oil Removal from DOP Wastewater by Froth Flotation Process. Master's Thesis, Inter-Department of Environmental Science, Graduate School, Chulalongkorn University.
37. Tavera, F.J.; Escudero, R.; Uribe, A.; and Finch, J.A. (2000). Ni-DETA Flotation in Aqueous Media: Application of flotation Columns. Afinidad. 57(490): 415-423.
38. Watanabe, K.; Yamanouchi, H.; Ueta, Y.; and Nagota, O. (1991). Present Situation and Problem Related to Marine Oily-Water Separating Techniques. Wat.Sci.Tech. 23: 319-328.
39. Winnik, F.M.; Regismond, S.T.A.; and Goddard, E.D. (1996). Interactions of Cationic Surfactants with a Hydrophobically Modified Cationic Cellulose Polymer. A Study by Fluorescence Spectroscopy. Colloids and Surfaces. 106: 243-247.
40. Wungrattanasopon, P.; Scamehorn, J.F.; Chavadej, S.; Harwell, J.H. (1996). Use of Foam Flotation to Remove Tert-Butylphenol from Water. Separation Science and Technology. 1523-1540.
41. Zhu, X.F.; Reed, B.A.; Lin, W.; Carriere, P. E.; and Roark, G. (1997). Investigation of Emulsified Oil Wastewater Treatment with Polymers. Separation Science and Technology. 32(13): 2173-2187.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์ปริมาณสารน้ำมัน (Oil & Grease) ด้วยวิธีสกัดแยก (Partition-Gravimetric Method) (APHA, 1992)<sup>[1]</sup>

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กรวยแยก (Separatory Funnel) ขนาด 500 มล ซึ่งล้างด้วยเฮกเซนไว้ก่อน
2. ถ้วยระเหย (Evaporating Disc)
3. เครื่องอ่างน้ำ (Water Bath)
4. กระจกทรงขนาด 11 ซม เบอร์ 40
5. ปีกเกอร์ขนาด 600 มล และ 100มล ซึ่งล้างด้วยเฮกเซนไว้ก่อน
6. เครื่องชั่งละเอียด

#### สารเคมี

1. กรดกำมะถันเข้มข้น (Conc.  $H_2SO_4$ )
2. เฮกเซน (n-hexane) หรือฟิออน
3. โซเดียมซัลเฟตปราศจากน้ำ (Sodium Sulfate Anhydrous)

#### วิธีการวิเคราะห์

1. เติตัวอย่างน้ำที่รู้ปริมาตรจำนวนหนึ่ง (500 มลหรือน้อยกว่า) ใส่ในปีกเกอร์ขนาด 600 มล เติกรดกำมะถันเข้มข้น จนพีเอสน้อยกว่า 2 (หรือประมาณ 2 มล ต่อตัวอย่างน้ำ 1 ลิตร)
2. เติตัวอย่างน้ำจากปีกเกอร์ใส่กรวยแยก เติเฮกเซนจำนวน 10-15 มล เขย่าอย่างแรง ประมาณ 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ สารผสมจะแยกชั้น โดยชั้นของเฮกเซนจะอยู่ส่วนบน และส่วนของชั้นน้ำจะอยู่ส่วนล่าง
3. โซเดียมซัลเฟตละลายชั้นล่างซึ่งเป็นชั้นน้ำไว้ในปีกเกอร์ใบเดิม เพื่อนำมาสกัดอีก
4. โซเดียมซัลเฟตละลายชั้นบนซึ่งเป็นชั้นของเฮกเซน ผ่านกรวยกรองที่มีโซเดียมซัลเฟตบนกระดาษกรอง ลงในถ้วยระเหยซึ่งได้ทำให้แห้ง มีน้ำหนักคงที่ และได้ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว สมมติเป็น A กรัม
5. ทำการสกัดซ้ำด้วยวิธีเดียวกันนี้อีกหลายครั้ง จนกระทั่งไขมันและน้ำมันถูกสกัดออกจากตัวอย่างจนหมด



6. นำถ้วยระเหยซึ่งมีเฮกเซน และน้ำมันละลายอยู่ ไประเหยเอาเฮกเซนออกบนเครื่องอัง น้ำที่อุณหภูมิ 70 °ซ จนแห้งปราศจากความชื้น แล้วปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง ประมาณ 30 นาที แล้วชั่งน้ำหนัก สมมติเป็น B กรัม

#### หมายเหตุ

1. หากชั้นของตัวทำละลายมีน้ำปนอยู่ ให้ใช้เฮกเซนที่มีน้ำมันและไขมันลงในบีกเกอร์ ขนาด 100 มล ใส่โซเดียมซัลเฟตลงไป จนได้สารละลายใส หรือโซเดียมซัลเฟตจับตัวกันดี กลิ้งไปกลิ้งมาได้ ไม่เหลว และควรใส่โซเดียมซัลเฟตไปบนกระดาษกรองด้วย แล้วจึงเทตัว ทำละลายที่ใสผ่านกระดาษกรอง เพื่อให้มีลชัน และโซเดียมซัลเฟตจับกับน้ำ

2. ในกรณีที่มีสารลดแรงตึงผิวปนอยู่ในตัวอย่างน้ำในปริมาณมาก อาจมีผลทำให้ปริมาณ ของสารน้ำมันหลังสกัดด้วยเฮกเซอร์มีค่าสูงผิดไปจากความเป็นจริงมาก ทั้งนี้เนื่องจากสารลด แรงตึงผิวบางส่วนถูกสกัดเข้าไปอยู่ในชั้นของเฮกเซนด้วย ดังนั้นในการวิเคราะห์ปริมาณสาร น้ำมันในกรณีนี้ หลังจากที่ได้ชั้นของเฮกเซนที่สกัดน้ำมันรวมทั้งสารลดแรงตึงผิวมาแล้ว ให้ เติมน้ำอุ่น (ประมาณ 60 ๐ซ) ในปริมาณเป็น 2 เท่าของปริมาตรชั้นเฮกเซนลงในกรวยแยก ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ ตั้งทิ้งไว้จนสารละลายแยกชั้น แยกกรวยแยกเบาๆ แล้วใช้สารละลาย ชั้นล่างทิ้งไป จากนั้นทำซ้ำขั้นตอนการเติมน้ำอุ่นอีก 2-3 ครั้ง จนสารละลายในชั้นบนใส ใช้ ผ่านกระดาษกรองที่มีโซเดียมซัลเฟตใสในถ้วยระเหย จากนั้นนำไประเหยเอาเฮกเซนออกใน วิธีที่สรเดียวกันที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

#### การคำนวณ

$$\text{ไขมันและน้ำมัน (มก/ลิตร)} = \frac{(B - A) * 10^6}{\text{มล ของตัวอย่างน้ำที่ใช้}}$$

เมื่อ B = น้ำหนักรวมเป็นกรัมของน้ำมันและไขมัน+ถ้วยระเหย

A = น้ำหนักถ้วยระเหยอบแห้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### วิธีวิเคราะห์ปริมาณสารซักฟอก (Detergent and Liquid Detergent) (APHA, 1992)<sup>[1]</sup>

#### หลักการ

สารซักฟอกที่ใช้ในการทำทำความสะอาดทั่วไป มักจะมีสารลดแรงตึงผิวเป็นองค์ประกอบสำคัญ เพื่อช่วยลดความตึงผิวของน้ำ ดังนั้นในการวิเคราะห์หาปริมาณสารซักฟอก จึงมักนิยมหาในรูปของสารลดแรงตึงผิว อนึ่งสารลดแรงตึงผิวนี้อาจแบ่งออกได้เป็นชนิดแอนไอออน (Anionic) ชนิดแคทไอออน (Cationic) และชนิดนอนไอออน (Nonionic) แต่ที่นิยมใช้กันแพร่หลายส่วนใหญ่เป็นชนิดแอนไอออน เช่น สารประกอบอัลคิลเบนซีนซัลโฟเนต (Alkyl Benzene Sulfonate, ABS) และลิเนียอัลคิลเลตซัลโฟเนต (Linear Alkylate Sulfonate, LAS) สารประกอบ ABS เป็นสารประกอบซึ่งสลายตัวได้ยาก ส่วน LAS เป็นสารซึ่งสลายตัวได้ง่ายกว่า

การใช้สาร ABS ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ คือ ทำให้เกิดฟองในแหล่งน้ำทั่วไป และในระบบบำบัดน้ำทิ้ง เนื่องจากสารชนิดนี้สลายตัวได้ยากจึงเกิดการสะสมในแหล่งน้ำ และสารนี้เพียง 1 มก ในน้ำ 100 มล ก็สามารถทำให้เกิดฟองบางๆ ได้ ดังนั้นในปัจจุบันหลายประเทศได้หันมาใช้สารประกอบ LAS แทน ABS ในการควบคุมคุณภาพแหล่งน้ำ โดยทั่วไปมักจะควบคุมไว้มิให้มีสารลดแรงตึงผิวเกินกว่า 0.5 มก/ล ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารลดแรงตึงผิวในน้ำ นิยมใช้กันอยู่ 2 วิธี คือ

1. วิธีเมทิลีนบลู (Methylene Blue Method) เป็นวิธีที่ใช้หาปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออนที่น้อยกว่า 0.5 มก/ล ซึ่งสามารถทำได้ง่าย ค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก แต่มีสิ่งแทรกสอดหลายชนิด

2. วิธีอินฟราเรด แอ็บซอร์ปชัน (Infrared absorption Method) เป็นวิธีที่ใช้หาปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออนที่มีมากกว่า 0.5 มก/ล หรือในกรณีที่เกิดปัญหาเกี่ยวกับวิธีเมทิลีนบลู

3. วิธีโคบอลท์ไทโอไซยาเนต (Cobalt Thiocyanate Method) เป็นวิธีที่ใช้หาปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิดนอนไอออน

สำหรับการทดลองนี้จะใช้วิธีเมทิลีนบลู ในการวิเคราะห์ปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิดแอนไอออน

ก่อนที่จะหาปริมาณสารลดแรงตึงผิวใดๆ จะต้องมีการกำจัดสิ่งแทรกสอดที่อยู่ในตัวอย่างน้ำ ที่อาจส่งผลต่อการอ่านค่าปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่แท้จริงได้ วิธีการที่ใช้ในการแยกสารลดแรงตึงผิวออกจากสารละลาย คือ วิธีซับเลชัน (Sublation Method)

## 1. การแยกสารลดแรงตึงผิวออกจากสารละลายโดยวิธีซับเลชัน (Sublation Method)

### 1.1 หลักการ

กระบวนการซับเลชันเป็นการแยกสารที่เป็นสารลดแรงตึงผิวออกจากสารที่ไม่เป็นสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย โดยการเป่าก๊าซไนโตรเจนผ่านตัวอย่างน้ำที่อยู่ในคอลัมน์ สารลดแรงตึงผิวจากชั้นน้ำจะถูกแยกไปอยู่ในชั้นของเอทิลอะซีเตต เมื่อระเหยไล่ตัวทำละลายเอทิลอะซีเตตออกไปแล้ว ก็จะเหลือเฉพาะสารที่เป็นสารลดแรงตึงผิวเท่านั้น

### 1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.2.1 ชุดซับเลเตอร์ (Sublator) ดังแสดงในรูป ข-1 เป็นคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ซม สูง 127 ซม โดยมีตัวกระจายอากาศเป็นซินเทอร์กลาส (Sintered Glass Disk) ชนิด Coarse-porosity Frit มีก๊อกไขน้ำออก 2 ระดับ ระดับที่ 1 อยู่ที่บริเวณแผ่นกระจายฟองที่กั้นคอลัมน์ และระดับที่ 2 อยู่สูงจากแผ่นกระจายฟอง 92 ซม ซึ่งทำให้ความจุของคอลัมน์ถึงก๊อกระดับที่ 2 เท่ากับ 1 ลิตร ส่วนบนของคอลัมน์ต่อท่อเข้าสู่ตู้ควีน ตัวอย่างน้ำเสียจะถูกเติมลงในคอลัมน์ สารลดแรงตึงผิวที่ละลายอยู่ในน้ำเสียจะถูกสกัดออกมาด้วยเอทิลอะซีเตต น้ำเสียจะถูกเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนซึ่งควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 1 ลิตร/นาท เป็นเวลา 5 นาที และก่อนจะเป่าเข้าคอลัมน์ จะถูกเป่าผ่านเอทิลอะซีเตตเพื่อทำความสะอาดก๊าส หลังจากนั้นก๊าสจะถูกเป่าเข้าคอลัมน์ผ่านทางแผ่นกระจายฟอง ไส้สารละลายชั้นบนออกทางก๊อกระดับที่ 2 แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารลดแรงตึงผิว

1.2.2 ขวดสำหรับทำความสะอาดก๊าส (Gas Washing Bottle) ขนาด 100 มล

1.2.3 กรวยแยก (Separatory Funnel) ขนาด 250 มล

1.2.4 ชุดกรองสารละลาย (Filtration Equipment) โดยใช้กระดาษกรองชนิด Medium-porosity Qualitative Filter Paper

1.2.5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ (Gas Flowmeter) ที่อัตราการไหล 1 ลิตร/นาที่

### 1.3 สารเคมี

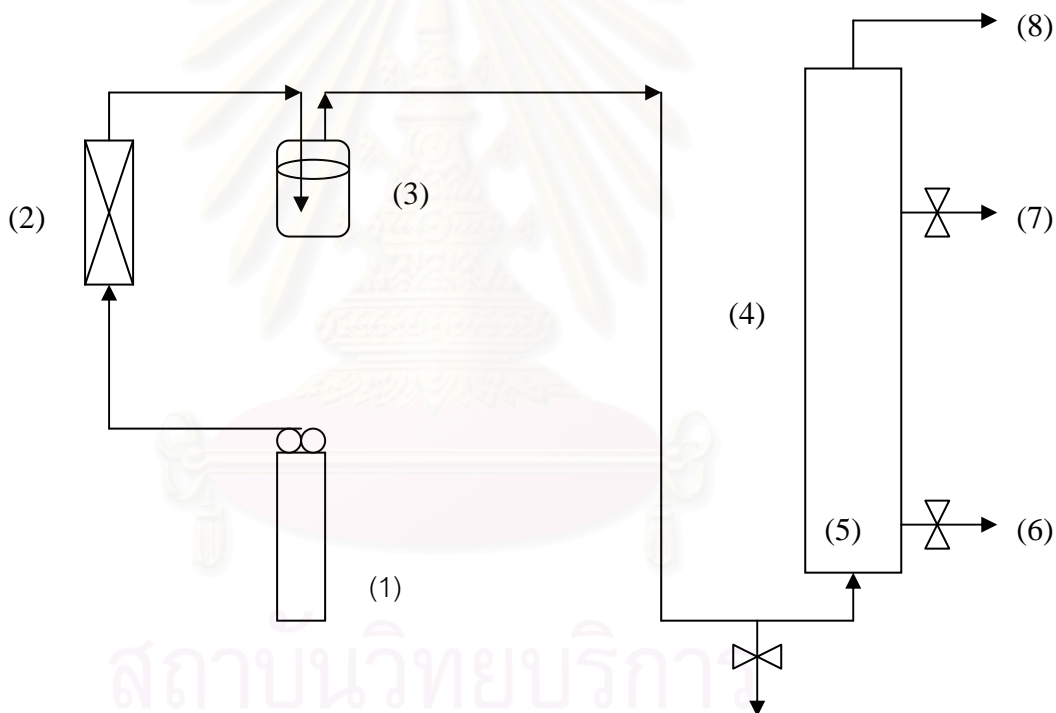
1.3.1 ก๊าซไนโตรเจน (Standard-commercial Grade Nitrogen Gas)

1.3.2 เอทิลอะซิเตต (Ethyl Acetate)

1.3.3 โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium Bicarbonate,  $\text{NaHCO}_3$ )

1.3.4 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride)

1.3.5 น้ำกลั่นปราศจากสารลดแรงตึงผิว



(1) ถังก๊าซไนโตรเจน

(2) เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter)

(3) ขวดสำหรับล้างก๊าซ (Wash Bottle)

(4) คอลัมน์ซับเลเตอร์ (Sublator Column)

(5) แผ่นกระจายฟองชนิดซินเทอร์กลาส

(6) ก๊อกไประดับที่ 1

(7) ก๊อกไประดับที่ 2 สำหรับเก็บตัวอย่าง

(8) ทางออกของก๊าซสู่ตู้ควัน

### 1.4 วิธีการทดลอง

1. เลือกระบิมาตรตัวอย่างน้ำประมาณ 1 ลิตร กรองผ่านกระดาษกรอง โดยทิ้งส่วนที่กรองได้ 200 มล แรกไปเพื่อล้างกระดาษกรอง

2. ต่อเครื่องมือดังรูปที่ ข-1 โดยต่อก๊าซไนโตรเจนผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลเข้ากับขวดสำหรับล้างก๊าซ และที่ปลายส่วนบนของคอลัมน์ให้ต่อสายเข้าตู้ควัน
3. เติมเอทิลอะซีเตตลงในขวดสำหรับล้างก๊าซประมาณ 2 ใน 3 ของขวด
4. ชะคอลัมน์ด้วยเอทิลอะซีเตต แล้วเทตัวอย่างน้ำที่กรองแล้วและทราบปริมาตรแน่นอนลงในคอลัมน์ เติมโซเดียมโบคาร์บอเนต 5 กรัม โซเดียมคลอไรด์ 10 กรัม และเติมน้ำจนได้ปริมาตรรวม 1 ลิตร สังเกตได้จากระดับของเหลวในคอลัมน์จะอยู่ที่ระดับไขน้ำออกตัวบน
5. เติมเอทิลอะซีเตต 100 มล ลงในคอลัมน์ โดยค่อยๆ เทสารลงผ่านด้านข้างของคอลัมน์
6. เปิดวาล์วก๊าซไนโตรเจน ปรับอัตราการไหลให้ได้ 1 ลิตร/นาที ระวังอย่าให้เกิดการผสมกันอย่างรุนแรงในคอลัมน์ จับเวลา 5 นาที แล้วปิดวาล์วก๊าซ ถ้าต้องใช้อัตราการไหลที่ต่ำกว่า 1 ลิตร/นาที เวลาในการขับไล่ชั้นจะต้องเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน
7. ไขชั้นของเอทิลอะซีเตตใส่ในกรวยแยก ถ้ามีชั้นน้ำปนออกมาให้ไขชั้นน้ำกลับใส่คอลัมน์
8. กรองชั้นเอทิลอะซีเตตที่ได้ผ่านกระดาษกรองลงในบีกเกอร์ที่แห้ง
9. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 และ 7 โดยใช้เอทิลอะซีเตตจำนวน 100 มล หลังจากผ่านก๊าซไนโตรเจนแล้ว ไขผ่านกรวยแยกและกรองด้วยอุปกรณ์ชุดเดียวกับการทำในครั้งแรก ใช้เอทิลอะซีเตตประมาณ 20 มล ฉีดล้างด้านข้างของคอลัมน์ แล้วรวมสารละลายทั้งหมดในบีกเกอร์เดียวกัน
10. ทำการระเหยเอทิลอะซีเตตออก โดยวางบีกเกอร์บนเครื่องอังน้ำในตู้ควัน ซึ่งอาจใช้ก๊าซไนโตรเจนหรืออากาศเป่าเบาๆ เพื่อช่วยให้เกิดการระเหยเร็วขึ้น หลังจากเอทิลอะซีเตตระเหยไปหมดแล้ว จะเหลือสารลดแรงตึงผิวที่ได้ในบีกเกอร์

## 2. การวิเคราะห์หาปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิดแอนอออน โดยวิธีเมทิลีนบลู (Takada Ishiwatari, 1987)

### 2.1 หลักการ

เมทิลีนบลูสามารถทำปฏิกิริยากับสารลดแรงตึงผิวชนิดแอนอออน ให้เกลือสีน้ำเงินซึ่งละลายได้ในคลอโรฟอร์ม ความเข้มข้นของสีวัดได้โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 652 นาโนเมตร ปริมาณความเข้มข้นของสีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณ

ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว วิธีนี้สามารถวิเคราะห์น้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวตั้งแต่ 0.025-100 มก/ล

## 1.2 สิ่งแทรกสอด

สารอินทรีย์และอนินทรีย์หลายชนิดเป็นสิ่งแทรกสอดในการวิเคราะห์นี้ กล่าวคือ สารประกอบอินทรีย์ ซัลเฟต ซัลโฟเนต คาร์บอกซีเลต ฟีนอล ฟอสเฟต และ สารประกอบอนินทรีย์พวกไซยาไนด์ คลอไรด์ ไนเตรต ไทโอไซยาเนต ซึ่งสามารถรวมกับ เมทิลีนบลูให้เกิดสีน้ำเงินเหมือนกัน ทำให้อ่านค่าปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ได้มากกว่าค่าแท้จริง

แต่ในทางตรงกันข้าม สารอินทรีย์ประเภทเอมีน สารจะรวมตัวกับกลุ่มแอนไอออนได้ ดังนั้นจึงทำให้อ่านค่าปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวได้น้อยลง

## 1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.3.1 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่มีช่วงความยาวคลื่น 652 นาโนเมตร และใช้เซลล์ที่มีช่องแสงผ่านกว้าง 1 ซม หรือยาวกว่า

2.3.2 กรวยแยกขนาด 500 มล ที่มีจุดและก๊อกทำด้วยเพฟลอน

## 2.4 สารเคมี

2.4.1 สารละลายสต็อกสารลดแรงตึงผิว

ละลายโซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต 1.00 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางได้ปริมาตร 1000 มล สารละลายนี้ 1.00 มล เท่ากับ 1.00 มก ของสารลดแรงตึงผิว

2.4.2 สารละลายมาตรฐานสารลดแรงตึงผิว

นำสารละลายสต็อกสารลดแรงตึงผิวมา 10.00 มล ทำให้เจือจางเป็น 1000 มล ด้วยน้ำกลั่น สารละลายมาตรฐานนี้ 1.00 มล เท่ากับ 10.0 ไมโครกรัมของสารลดแรงตึงผิว

2.4.3 สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

ละลายฟีนอล์ฟทาลีนไดไฮดรอกไซด์ 5 กรัม ในแอลกอฮอล์ 100 มล

2.4.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์

2.4.5 สารละลายกรดกำมะถัน 0.5 โมลาร์

2.4.6 คลอโรฟอร์ม

2.4.7 สารละลายเมทิลีนบลู

ละลายเมทิลีนบลู 0.1 กรัม ลงในน้ำ 10 มล ตวงสารละลายที่ได้ 30 มล ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร เติมน้ำกลั่น 500 มล กรดกำมะถันเข้มข้น 6.8 มล และโมโนโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโนมโนไฮเดรต (Monosodium Dihydrogen Phosphate Monohydrate) 50 กรัม เขย่าจนละลายหมด แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรเป็น 1000 มล

#### 2.4.8 สารละลายสำหรับล้าง (Washing Solution)

เติมกรดกำมะถันเข้มข้น 6.8 มล ลงในน้ำกลั่น 500 มล เติมโมโนโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโนมโนไฮเดรต 50 กรัม เขย่าจนละลายหมด แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรเป็น 1000 มล

#### 2.4.9 เมทิลแอลกอฮอล์

#### 2.4.10 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ร้อยละ 30

#### 2.4.11 ไยแก้ว (Glass Wool)

#### 2.4.12 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol)

### 2.5 วิธีวิเคราะห์

#### 2.5.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน

1. เติมสารละลายมาตรฐานสารลดแรงตึงผิวปริมาตร 0.00 1.00 3.00 5.00 7.00 9.00 11.00 13.00 15.00 และ 20.00 มล ลงในกรวยแยก 10 ใบ ตามลำดับ
2. เติมน้ำกลั่นลงในแต่ละกรวยจนครบ 100 มล
3. สกัดและทำให้เกิดสีด้วยวิธีเดียวกับสารตัวอย่างในข้อ 2.5.2
4. วัดค่าการดูดกลืนแสง แล้วสร้างกราฟมาตรฐาน โดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงบนแกนตั้ง และค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสารลดแรงตึงผิวบนแกนนอน

#### 2.5.2 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. ละลายสารลดแรงตึงผิวที่ผ่านวิธีข้อ 2.5.1 ด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ 10-20 มล
2. เทสารละลายทั้งหมดลงในน้ำกลั่น 25-50 มล แล้วนำไปประเหยได้เมทิลแอลกอฮอล์ ระวังอย่าให้แห้ง ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเจือจางเป็น 100 มล
3. หยดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2-3 หยด แล้วเทสารละลายลงในกรวยแยก
4. หยดฟีนอล์ฟทาลีนลงในน้ำตัวอย่าง ถ้าไม่มีสีชมพูเกิดขึ้นละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนเกิดสีชมพู แล้วเติมสารละลายกรดกำมะถันจนสีชมพูพอดีหายไป ถ้าเกิดสีชมพูก็เติมสารละลายกรดกำมะถันจนสีชมพูพอดีหายไป

5. เติมคลอโรฟอร์ม 10 มล และสารละลายเมทิลีนบลู 25 มล ปิดจุกเขย่าแรงๆเป็นเวลา 30 วินาที แล้วตั้งไว้จนแยกชั้น เติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไป 5-10 มล เพื่อทำลายอิมัลชัน แกว่งเบาๆให้ตกตะกอน แล้วไซ้ชั้นคลอโรฟอร์มออก ใส่ในกรวยแยกใบที่สอง ใช้คลอโรฟอร์มปริมาณเล็กน้อยล้างก้านกรวยแยก ทำซ้ำเช่นนี้อีก 2 ครั้ง ถ้าสีน้ำเงินในชั้นน้ำจางลงมาก ให้เติมสารละลายเมทิลีนบลูอีก 25 มล ไซ้ชั้นคลอโรฟอร์มรวมไว้ด้วยกันในกรวยแยกใบที่สอง

6. เติมสารละลายสำหรับล้าง 50 มล ลงในกรวยแยกใบที่สอง เขย่าแรงๆเป็นเวลา 30 วินาที ตั้งไว้ให้แยกชั้น ไซ้ชั้นคลอโรฟอร์มกรองผ่านใยแก้ว ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล

7. สกัดสารออกจากสารละลายสำหรับล้างด้วยคลอโรฟอร์ม ครั้งละ 10 มล อีก 2 ครั้ง ไซ้เอาชั้นคลอโรฟอร์มกรองผ่านใยแก้ว รวมไว้ด้วยกัน

8. ล้างใยแก้วและกรวยกรองด้วยคลอโรฟอร์มเล็กน้อย รวมไว้ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล ใบเดิม และเติมคลอโรฟอร์มจนได้ปริมาตร 100 มล

9. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายในคลอโรฟอร์ม โดยใช้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 652 นาโนเมตร ใช้คลอโรฟอร์มเป็นแบลนด์ นำค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ไปหาปริมาณสารลดแรงตึงผิวจากกราฟมาตรฐาน

## 2.6 การคำนวณ

$$\text{ปริมาณสารลดแรงตึงผิว มก/ล ในรูปเอ็มบีเอส} = \frac{\text{ไมโครกรัมของสารลดแรงตึงผิว}}{\text{มิลลิลิตรของน้ำตัวอย่าง}}$$

หมายเหตุ เอ็มบีเอส คือ สารที่ให้สีน้ำเงินกับเมทิลีนบลูทั้งหมด (Methylene Blue Active Substance, MBAS)

ในการรายงานผลการวิเคราะห์ ต้องระบุชนิด และน้ำหนักโมเลกุลของแอลเอสที่ใช้ เช่น  
“MBAS, Calculated as LAS, Mol. Wt.....”



## ภาคผนวก ค

## ข้อมูลการทดลองเสถียรภาพการเกิดฟอง

ตารางที่ ค-1 ข้อมูลการทดลองความสูงของชั้นฟองที่เวลาต่างๆของคอลัมน์โฟลเทชัน

ระดับของของเหลวเริ่มต้น	50	ซม
ความเข้มข้นของ SDBS	0.1	ซีเอ็มซี
ฟลักซ์ของอากาศ	0.62	มล/(นาที.ซม <sup>2</sup> )

เวลา (นาที)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์			
	4 นิ้ว	8 นิ้ว	12 นิ้ว	20 นิ้ว
0	0	0	0	0
5	4.5	5.5	5.5	9
10	5	8.5	12.5	11
15	8	13.5	15	18
20	9.5	16	16	21
25	11.5	17.5	18	21
30	14	19.5	18.5	26
35	16	21	19	29
40	18	22.5	20.5	29.5
45	18	22.5	21.5	30
50	18.5	23	22.5	30.5
55	19	23.8	24	29.5
60	20.5	24	24	27.5
65	21	25.3	25	27.5
70	21.5	26	25.5	27.5
75	22	25.8	25.5	27.5

เวลา (นาทีก)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์			
	4 นิ้ว	8 นิ้ว	12 นิ้ว	20 นิ้ว
80	22.5	26.5	25.3	27
85	23	25.8	25	26.5
90	23.5	26.3	25	24
95	23	25.8	25.5	22.5
100	23	25.3	25.5	19.5
105	23.5	24.8	25.5	19.5
110	23	24.8	25.8	19.5
115	22.5	24.8	26	19.5
120	22.5	23.8	26	21
125	22.5	23.3	26	21
130	22.5	23.3	25.5	18
135	22.5	23.3	25.8	18
140	22.5	23.3	25.8	20
145	22.5	23.3	25.8	20
150	22.5	23.3	25.8	20
155			25.8	20
160			25.8	20
165				20
170				20
175				20
180				20

ตารางที่ ค-2 ข้อมูลการทดลองความสูงของชั้นฟองที่เวลาต่างๆของคอลัมน์โพลเท  
ชั้น

ระดับของของเหลวเริ่มต้น	50	ซม
ความเข้มข้นของ SDBS	1	ซีเอ็มซี
ฟลักซ์ของอากาศ	0.62	มล/(นาที่.ซม <sup>2</sup> )

เวลา (นาที่)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์			
	4 นิ้ว	8 นิ้ว	12 นิ้ว	20 นิ้ว
0	0	0	0	0
5	2.5	6.8	7	11.5
10	5	10.8	9.5	19.5
15	6.5	13	12	25.5
20	8.5	15.8	16	31
25	10.5	18.5	18	34
30	13	20	21	36.5
35	15	21.8	21.5	35
40	17	24.5	21.8	36.5
45	19	25.8	22.3	37
50	21	27.5	23.5	36
55	22.5	28.3	24.5	35.5
60	24.5	29.5	25	37.5
65	26	30	26	33
70	27.5	31.3	26	33.5
75	28.5	31.8	25.8	32
80	29.5	32	26.3	31.5
85	30.5	31.8	26.5	31.5
90	30.5	31.8	27	31
95	31	31.8	27	30.5
100	31	31.5	28	30.5
105	31.5	31	27.5	33

เวลา (นาทีก)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์			
	4 นิ้ว	8 นิ้ว	12 นิ้ว	20 นิ้ว
110	31.5	31	27.8	32.5
115	31.5	31	28.3	35.5
120	32	30.3	28.3	32.5
125	32	30	28.8	30.5
130	32	30	29	33.5
135	32	30	28.8	32.5
140	32	30	28.8	33.5
145	32	30	28.8	33.5
150	32	30	28.8	31.5
155			28.8	32
160			28.8	32
165				33.5
170				33
175				33
180				33

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่	ค-3	ข้อมูลความสูงของชั้นฟองที่ระดับของของเหลวเริ่มต้นต่างๆ	
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์	8	นิ้ว
	ความเข้มข้นของ SDBS	0.1	ซีเอ็มซี
	ฟลักซ์ของอากาศ	0.62	มล/(นาที่.ซม <sup>2</sup> )

เวลา (นาที่)	ระดับของของเหลวเริ่มต้น		
	20 ซม	50 ซม	80 ซม
0	0	0	0
5	5.5	5.5	7.5
10	8.5	8.5	11.5
15	13.5	13.5	13
20	16	16	15
25	17.5	17.5	16
30	19.5	19.5	17.5
35	21	21	18.5
40	22.5	22.5	20
45	22.5	22.5	22
50	23.5	23	23
55	23.5	23.8	23.5
60	22.5	24	24.5
65	22.5	25.3	25.5
70	22.5	26	25.5
75	21.5	25.8	25.5
80	20.5	26.5	26
85	19.5	25.8	26.5
90	19.5	26.3	26
95	19.5	25.8	27.5

เวลา (นาที)	ระดับของของเหลวเริ่มต้น		
	20 ซม	50 ซม	80 ซม
100	19.5	25.3	27
105	19.5	24.8	27
110	19.5	24.8	27
115	19.5	24.8	27
120	19.5	23.8	27
125		23.3	26.5
130		23.3	26.5
135		23.3	26.5
140		23.3	26.5
145		23.3	26.5
150		23.3	26.5

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่	ค-4	ข้อมูลความสูงของชั้นฟองที่ระดับของของเหลวเริ่มต้นต่างๆ	
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์	8	นิ้ว
	ความเข้มข้นของ SDBS	.1	ซีเอ็มซี
	ฟลักซ์ของอากาศ	0.62	มล/(นาที่.ชม <sup>2</sup> )

เวลา (นาที่)	ระดับของของเหลวเริ่มต้น		
	20 ชม	50 ชม	80 ชม
0	0	0	0
5	5	6.8	5.5
10	3	10.8	11
15	12	13	13
20	14.5	15.8	15
25	15.5	18.5	17
30	18	20	19.5
35	20.5	21.8	21.5
40	22.5	24.5	23.75
45	26	25.8	24.75
50	27.5	27.5	26.25
55	29.5	28.3	26.5
60	30.5	29.5	27.5
65	31.5	30	27.25
70	32.5	31.3	27.75
75	33	31.8	27.75
80	33.5	32	28
85	33.5	31.8	27.75
90	34	31.8	27.75
95	34.5	31.8	27.75

เวลา (นาที)	ระดับของของเหลวเริ่มต้น		
	20 ซม	50 ซม	80 ซม
100	34.5	31.5	27.75
105	34.5	31	27.75
110	34.5	31	27.75
115	35	31	27.75
120	35	30.3	27.75
125	35	30	27.75
130	35	30	27.75
135	35	30	27.75
140	35	30	27.75
145		30	27.75
150		30	27.75

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค-5 ข้อมูลความสูงของชั้นฟองที่คงที่ในคอลัมน์โฟลเทชัน

ระดับของของเหลวเริ่มต้น	50	ซม
ฟลักซ์ของอากาศ	0.62	มล/(นาที.ซม <sup>2</sup> )

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของ คอลัมน์ (นิ้ว)	ความเข้มข้นของสารลด แรงตึงผิว	
	0.1 ซีเอ็มซี	1 ซีเอ็มซี
4	22.5	32
8	23.3	30
12	25.8	28.8
20	20	33

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-6 ข้อมูลความสูงของชั้นฟองที่ค่าฟลักซ์ของอากาศต่างๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์	4	นิ้ว
ความเข้มข้นของ SDBS	0.1	ซีเอ็มซี
ระดับของของเหลวเริ่มต้น	50	ซม

เวลา (นาท)	ฟลักซ์ของอากาศ (มล/(นาท.ซม <sup>2</sup> ))				
	0.62	1.2	2	2.5	2.7
0	0	0	0	0	0
5	6.5	9	12	15	12
10	9.5	16	20	23	31
15	14	22	27.5	28.5	43
20	17.5	28	36	36	53
25	20	35	46.5	48	64.5
30	21.5	39	51	47	70.5
35	22.5	44	59	52	78
40	23	45.5	63	63	84
45	24	46	67	68	92
50	24	48	69	68	95.5
55	24	45	72	83.5	102.5
60	24	44	74	82.5	103
65		43	77	86.5	109.5
70		42	79	98	118.5
75		42	80	99.5	122
80		38	82	102	127.5
85		38	82.5	99.5	132.5
90		38	82	100	131
95			82.5	106	139.5

เวลา (นาทีก)	ฟลักซ์ของอากาศ (มล/(นาทีก.ซม <sup>2</sup> ))				
	0.62	1.2	2	2.5	2.7
100			82.5	104	146
105				108	143
110				106	148
115				113	152
120				112.5	146.5
125				108.5	145.5
130				116	149
135				116	148
140				117	153
145				121	154
150				118	155.5
155				121.5	160
160				115	162.5
165				123	160.5
170				121.5	158.5
175				117.5	144
180				113.5	148
185				116.5	152.5
190				116.5	155
195					151
200					147.5
205					146.5
210					149
215					148
220					148

ตารางที่ ค-7 ข้อมูลความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (SDBS) ในชั้นน้ำและชั้นฟอง และสัดส่วนความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ที่ค่าฟลักซ์ของอากาศ ต่างๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์	4	นิ้ว
ความเข้มข้นเริ่มต้นของ SDBS	0.1	ซีเอ็มซี
ระดับของของเหลวเริ่มต้น	50	ซม

ฟลักซ์ของอากาศ (มล/(นาที่.ซม <sup>2</sup> ))	ความเข้มข้นของ SDBS (มก/ล)		สัดส่วนความเข้มข้นของ สารลดแรงตึงผิว
	ชั้นน้ำ	ชั้นฟอง	
0	32.45	0	0
0.62	31.15	5124.35	164.51
1.2	30.39	5279.27	173.72
2	26.69	6196.99	232.18
2.5	22.27	9381.43	421.26
2.7	17.84	13665.65	766.01

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลองประสิทธิภาพการแยกน้ำมันโดยใช้ระบบฟองลอย  
แบบต่อเนื่อง

ตารางที่ ง-1 ข้อมูลการทดลองเพื่อหาเวลาที่น้ำมันขาออกเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์	4	นิ้ว
ความเข้มข้นของน้ำมันก่อนเข้าระบบ	50	มก/ล
เวลาเก็บกัก	30	นาที
ความเข้มข้นของ SDBS	1	ซีเอ็มซี
อัตราการไหลของอากาศ	1000	มล/นาที

เวลา (นาที)	O&G (มก/ล)
5	49
10	48
15	48
20	47
25	46
30	43
35	41
40	42
45	43
50	42
55	41
60	42

ภาคผนวก ง-2 ข้อมูลการทดลองการแยกน้ำมันของระบบฟองลอยที่ความสูงของชั้นฟองต่างๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์	4	นิ้ว
ความเข้มข้นของน้ำมันก่อนเข้าระบบเฉลี่ย	50	มก/ล
เวลาเก็บกัก	30	นาที
ความเข้มข้นของ SDBS	1	ซีเอ็มซี
อัตราการไหลของอากาศ	1000	มล/นาที

ความสูงของชั้นฟอง (ซม)	ความเข้มข้นของน้ำมัน (มก/ล)		ความเข้มข้นของสารลดแรง ตึงผิว (มก/ล)		ประสิทธิภาพการ แยกน้ำมัน (%)	สัดส่วนความ เข้มข้นในน้ำมัน	สัดส่วนความ เข้มข้นในสาร ลดแรงตึงผิว
	ชั้นน้ำ	ชั้นฟอง	ชั้นน้ำ	ชั้นฟอง			
30	43	8140	411	5500	4.6	226	13
40	42	3162	385	8000	6.7	77	21
50	41	2794	360	10500	6.9	65	29
60	37	1747	333	14500	7.5	43	44

ภาคผนวก ง-3 ข้อมูลการทดลองการแยกน้ำมันของระบบฟองลอยเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว SDBS ควบคู่กับสารแคทอิออนิกพอลิอิเล็กโทรไลต์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์	4	นิ้ว	เวลาเก็บกัก	30	นาที
ความเข้มข้นของน้ำมันก่อนเข้าระบบเฉลี่ย	50	มก/ล	ความเข้มข้นของ SDBS	1	ซีเอ็มซี
ความสูงของชั้นฟอง	40	ซม	อัตราการไหลของอากาศ	1000	มล/(นาที.ซม <sup>2</sup> )

ความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ (มก/ล)	ความเข้มข้นของน้ำมัน (มก/ล)		ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (มก/ล)		ความเข้มข้นของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์(มก/ล)		ประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน (%)	สัดส่วนความเข้มข้นในน้ำมัน	สัดส่วนความเข้มข้นในสารลดแรงตึงผิว	สัดส่วนความเข้มข้นในสารพอลิอิเล็กโทรไลต์
	ชั้นน้ำ	ชั้นฟอง	ชั้นน้ำ	ชั้นฟอง	ชั้นน้ำ	ชั้นฟอง				
10	30	5524	265	7320	7	3664	33.5	184	28	523
40	22	10800	290	7150	31	16681	53.3	491	25	538
70	17	14560	315	7050	51	33526	62.3	856	22	657
120	13	20860	342	6920	108	76523	70.5	1605	20	709
200	4.6	31550	360	6887	189	138202	89.8	6859	19	731
250	4.5	31830	365	6750	216	175999	90.0	7073	18	815

ภาคผนวก ง-4 ข้อมูลการทดลองการแยกน้ำมันของระบบฟองลอยเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว SDBS ควบคู่กับสารแคทอิกฟอสฟอริลอิเล็คโตรไลต์

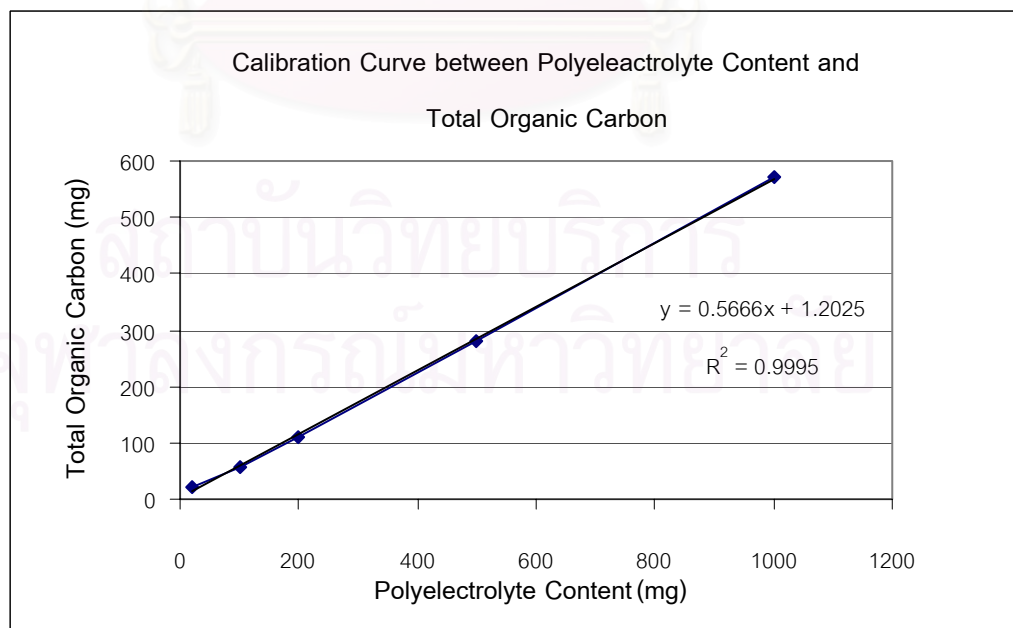
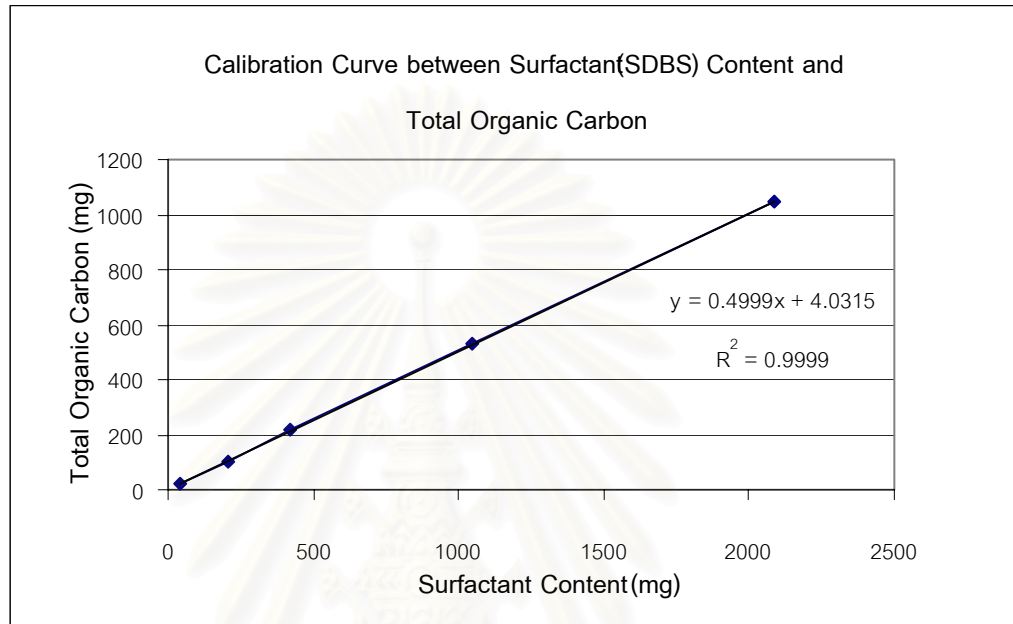
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์	4	นิ้ว	เวลาเก็บกัก	30	นาที
ความเข้มข้นของน้ำมันก่อนเข้าระบบเฉลี่ย	50	มก/ล	ความเข้มข้นของ SDBS	0.5	ซีเอ็มซี
ความสูงของชั้นฟอง	40	ซม	อัตราการไหลของอากาศ	1000	มล/(นาที.ซม <sup>2</sup> )

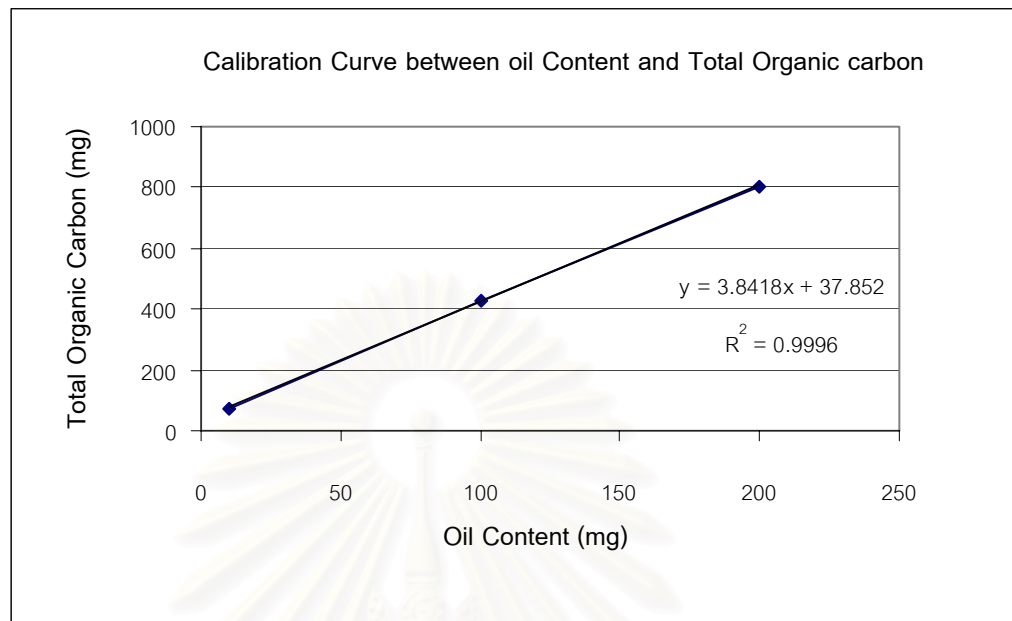
ความเข้มข้นของสารฟอสฟอริลอิเล็คโตรไลต์ (มก/ล)	ความเข้มข้นของน้ำมัน (มก/ล)		ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (มก/ล)		ความเข้มข้นของสารฟอสฟอริลอิเล็คโตรไลต์ (มก/ล)		ประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน (%)	สัดส่วนความเข้มข้นในน้ำมัน	สัดส่วนความเข้มข้นในสารลดแรงตึงผิว	สัดส่วนความเข้มข้นในสารฟอสฟอริลอิเล็คโตรไลต์
	ชั้นน้ำ	ชั้นฟอง	ชั้นน้ำ	ชั้นฟอง	ชั้นน้ำ	ชั้นฟอง				
10	37	5320	160	4550	8	3660	17.9	144	28	458
40	32	5520	185	3965	35	16550	23.9	173	21	473
70	28	10760	192	3520	62	33220	36.4	384	18	536
120	20	14495	202	3102	112	76250	50.1	725	15	681
200	10	29850	210	2754	195	137550	76.2	2985	13	705
250	9	30990	215	2210	230	174260	77.5	3443	10	758



## ภาคผนวก จ

## Calibration Curve of Total Organic Carbon Analyzer (TOC)

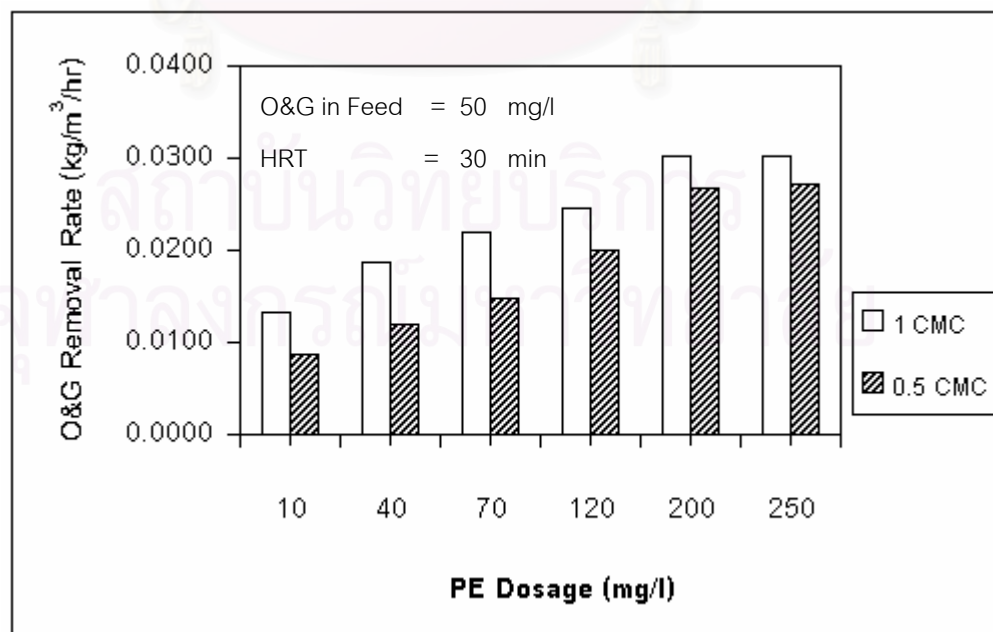
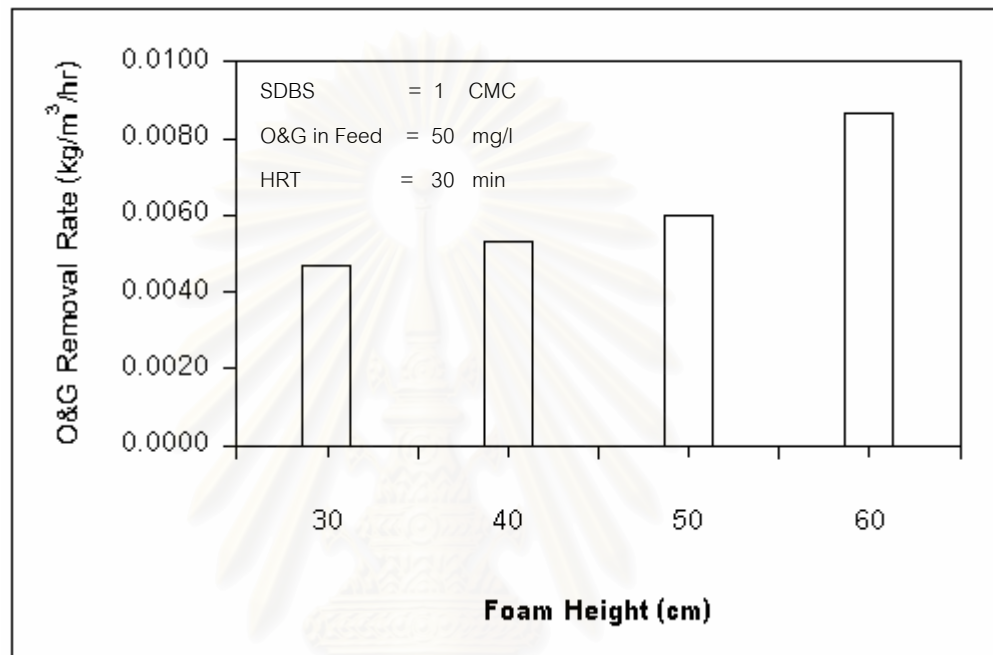




สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก จ

O&G Removal Rate at Air Flowrate Flux  $12.33 \text{ ml}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$   
(Column Diameter 4 inch; Air Flowrate 1000 ml/min)



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจินดารัตน์ สมุทรจารินทร์ เกิดวันที่ 6 พฤษภาคม พ.ศ. 2520 ที่ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2542 และสำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตเดือนเมษายน พ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย