

การจัดน้ำมันตัดชิ้นงานโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องที่มีตัวกลางบรรจุ
ภายใต้ภาวะแรงตึงผิวระหว่างภูมิภาคต่ำ

นางสาวอภิษฎา บรรเทิงประทุมรัฐ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CUTTING OIL REMOVAL BY CONTINUOUS FROTH FLOTATION WITH PACKING
MEDIA UNDER LOW INTERFACIAL TENSION CONDITION

Miss Apichaya Bunturngpratoomrat

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องที่มี
โดย	ตัวกลางบรรจุภายใต้ภาวะแรงตึงผิวระหว่างภูมิภาคต่ำ
สาขาวิชา	นางสาวอภิษฎา บรรเทิงประทุมรัฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิติวฒนานนท์
	รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ชวเดช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิติวฒนานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ชวเดช)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. จตุรงค์ จิตพุทธิ)

อภิขญา บรรเทงประทุมรัฐ : การขจัดน้ำมันตัดขึ้นงานโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องที่มีตัวกลางบรรจุภายใต้ภาวะแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคต่ำ. (CUTTING OIL REMOVAL BY CONTINUOUS FROTH FLOTATION WITH PACKING MEDIA UNDER LOW INTERFACIAL TENSION CONDITION) อ. ที่ปริภษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. สุขญา นิติวฒนานนท์, อ. ที่ปริภษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร.สุเมธ ชวเดช 84 หน้า.

การแยกโดยฟองลอยเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันปนเปื้อนที่ความเข้มข้นต่ำ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อประยุกต์ใช้ตัวกลางบรรจุในคอลัมน์การแยกโดยฟองแบบต่อเนื่องเพื่อการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค สมบัติของฟอง และประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันตัดขึ้นงานในการควบคุมระบบฟองลอยแบบต่อเนื่อง ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความสูงของตัวกลางบรรจุ ความเข้มข้นของเกลือ อัตราการไหลอากาศ และเวลาเก็บกักสารละลาย งานวิจัยนี้มีสภาวะการดำเนินการที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ขจัดน้ำมันได้สูงที่สุด การแยกโดยฟองลอยในกรณีที่ไม่มีตัวกลางบรรจุขจัดน้ำมันได้ร้อยละ 88.37 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 98.10 ในกรณีที่มีตัวกลางบรรจุอยู่ร้อยละ 50 ของปริมาตรคอลัมน์ จากนั้นการขจัดน้ำมันลดลงเหลือร้อยละ 91.90 และ 90.60 เมื่อตัวกลางบรรจุเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 75 และ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ ตามลำดับ สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม คือ ปริมาณตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 โซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของน้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อ นาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที ทั้งนี้การมีตัวกลางบรรจุในคอลัมน์จะทำให้ฟองอากาศอยู่ในคอลัมน์นานขึ้นจึงมีอัตราการถ่ายโอนมวลสูงขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณตัวกลางบรรจุที่มากเกินไปอาจลดปริมาตรสะสมของของเหลวในคอลัมน์ทำให้ประสิทธิภาพการขจัดน้ำมันลดลง

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริภษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2552.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริภษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5172536423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : CONTINUOUS FROTH FLOTATION / PACKING MEDIA / CUTTING OIL REMOVAL / FOAM CHARACTERISTIC / AIR BUBBLE

APICHAYA BUNTURNGPRATOOMRAT: CUTTING OIL REMOVAL BY CONTINUOUS FROTH FLOTATION WITH PACKING MEDIA UNDER LOW INTERFACIAL TENSION CONDITION. THESIS ADVISOR: ASST.PROF. SUCHAYA NITIVATTANANON, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. SUMAETH CHAVADEJ, Ph.D., 84 pp.

Froth flotation is an effective process for oil removal from wastewater especially at low oil concentrations. The aim of this research was to apply a packing media in a froth flotation column for oily wastewater treatment and to investigate the relationship between interfacial tension (IFT), foam characteristics and the efficiency of cutting oil removal from water in a continuous froth flotation operation. The effects of operational parameters including height of packing media, salinity, air flow rate, and hydraulic retention time (HRT) on the cutting oil removal were investigated. In this research, a sodium dodecyl sulfate (SDS) concentration of 0.1 % by weight which provided the highest cutting oil removal was used as the base operation condition. The froth flotation column without packing media gave oil removal of 88.10 % and the oil removal increased to 98.10 % and then declined to 90.60 % with 50% and 100% packing media, respectively. The optimal operational condition was found at 50% packing media, 6 % by weight NaCl, 500 ppm oil content, 200 ml/min air flow rate, and 60 minutes HRT. The presence of packing media in the froth flotation column simply retains the air bubbles in the column, leading to a higher mass transfer rate. However, if it was too high fraction of packing media, it reduces the effective liquid holding volume in the column, resulting in the reduction of oil removal efficiency.

Department :Chemical Technology..... Student's Signature

Field of Study :Chemical Technology..... Advisor's Signature

Academic Year :2009..... Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชนา นิตวิฒนานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. สุเมธ ชวเดช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำด้านวิชาการและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนการแก้ไขปรับปรุงงานวิจัยฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรพรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปดี และดร. จตุรงค์ จิตพุทธิ ที่กรุณาเป็นกรรมการคุมสอบและให้คำแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในการวิเคราะห์ตัวอย่างในการวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมีที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิคและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ช่วยสนับสนุนค่าใช้จ่ายต่างๆ ในงานวิจัยนี้

สุดท้ายขอกราบขอบคุณพระคุณบิดา มารดา พี่และน้อง ผู้อยู่เบื้องหลังที่เป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและเป็นแรงผลักดันจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย.....	5
2.2 สารลดแรงตึงผิว	5
2.3 ไมโครอิมัลชัน	9
2.4 การแยกโดยฟองลอย.....	13
2.5 การเกิดฟอง	16
2.6 สมบัติของฟอง.....	16
2.7 ตัวกลางบรรจุ.....	17
2.7.1 ชนิดตัวกลางบรรจุ.....	18
2.7.2 การใช้งาน.....	20
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
3.1 สารเคมี	25
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	26
3.2 วิธีดำเนินการดำเนินงานวิจัย.....	27

3.2.1 การวัดแรงตึงผิวระหว่างภูมิภาค.....	27
3.2.2 การทดลองการแยกโดยฟองลอย.....	27
3.2.3 การทดสอบความสามารถในการเกิดฟองและความเสถียรของฟอง.....	30
3.2.4 การวัดการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศ.....	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	33
4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่อแรงตึงผิวระหว่างภูมิภาค.....	33
4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพระบบการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่อง.....	34
4.2.1 ระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุ.....	34
4.2.2 ระบบที่มีตัวกลางบรรจุ.....	42
4.3 ผลการศึกษากการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศ.....	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	60
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก การคำนวณ.....	67
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง.....	71
ภาคผนวก ค วิธีการทดสอบหาความเข้มข้นของน้ำมันและสารลดแรงตึงผิว.....	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	84

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ข1	แสดงค่าแรงดึงผิวระหว่างภูมิภาคของน้ำมันตัดชิ้นงานและสารละลายของสารลดแรงดึงผิวและโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	71
ข2	แสดงการศึกษาผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดชิ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลอากาศ 150 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	72
ข3	แสดงการศึกษาผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	73
ข4	แสดงการศึกษาผลของเวลาเก็บกักที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิเมตรต่อนาที.....	74
ข5	แสดงการศึกษาผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	75
ข6	แสดงการศึกษาผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 75 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	76

ตารางที่		ญ หน้า
ข7	แสดงการศึกษาผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมไดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	77
ข8	แสดงการศึกษาผลของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมไดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที.....	78
ข9	แสดงการศึกษาผลของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 75 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมไดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที.....	79
ข10	แสดงการศึกษาผลของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมไดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที.....	80
ข11	แสดงการศึกษาผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่อความสามารถในการเกิดฟองและความเสถียรของฟอง ในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมไดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดขึ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลอากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	81
ข12	แสดงการศึกษาผลของอัตราการไหลอากาศต่อความสามารถในการเกิดฟองและความเสถียรของฟอง ในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมไดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	82

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว.....	6
2.2	โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวในการเกิดไมเซลล์.....	7
2.3	การจัดเรียงตัวในรูปไมเซลล์แบบทั่วไปและแบบกลับด้าน	8
2.4	โครงสร้างในการรวมตัวกันของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว.....	8
2.5	โครงสร้างไมโครอิมัลชันลักษณะน้ำมันในน้ำ (O/W) และน้ำในน้ำมัน (W/O).....	10
2.6	แบบจำลองในการเกิดเฟสไมโครอิมัลชัน.....	11
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดไมโครอิมัลชันแบบต่าง ๆ และแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคกับปริมาณเกลือ.....	12
2.8	คอลัมน์กระบวนการแยกโดยฟองลอย.....	15
2.9	การขจัดน้ำมันออกจากน้ำด้วยการแยกโดยฟองลอย.....	15
2.10	การเกิดฟอง.....	16
2.11	ตัวอย่างตัวกลางบรรจุแบบโครงสร้าง.....	18
2.12	ตัวอย่างตัวกลางบรรจุแบบสุ่ม ตัวกลางบรรจุNetzsch (รูปบนด้านซ้าย) ตัวกลางบรรจุพอลริ่ง (รูปบนด้านขวา) ตัวกลางบรรจุคาสเคด (รูปล่าง).....	19
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์	26
3.2	ความสูงและร้อยละของปริมาตรตัวกลางบรรจุในคอลัมน์.....	28
3.3	แผนภาพการใช้วิธีถ่ายภาพในกระบวนการแยกโดยฟองลอย.....	31
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์และแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของน้ำต่อน้ำมัน 1:1.....	34
4.2	ผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดขึ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลอากาศ 150 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	35

ภาพที่	ฎ หน้า
4.3 ผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่อความสามารถในการเกิดฟองในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดขึ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลอากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	36
4.4 ผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่อความเสถียรของฟองในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดขึ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลอากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	36
4.5 ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	38
4.6 ผลของอัตราการไหลอากาศต่อความสามารถในการเกิดฟองในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	39
4.7 ผลของอัตราการไหลอากาศต่อความเสถียรของฟองในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	39
4.8 ผลของเวลาเก็บกักที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิเมตรต่อนาที.....	41

ภาพที่

4.9	ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อร้อยละการขจัดน้ำมันของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นไซเตียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นไซเตียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	43
4.10	ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อสัดส่วนของน้ำมันในเฟสโฟมของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นไซเตียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นไซเตียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	44
4.11	ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อร้อยละการขจัดสารลดแรงตึงผิวของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นไซเตียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นไซเตียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	45
4.12	ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อสัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในเฟสโฟมของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นไซเตียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นไซเตียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	46
4.13	ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่ออัตราการผลิตฟองของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นไซเตียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นไซเตียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	47

ภาพที่	หน้า	
4.14	ผลของเวลาเก็บกักต่อร้อยละการขจัดน้ำมันของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นโซเดียมโคโคซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที.....	49
4.15	ผลของเวลาเก็บกักต่อสัดส่วนน้ำมันในเฟสโฝมของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นโซเดียมโคโคซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที.....	50
4.16	ผลของเวลาเก็บกักต่อร้อยละการขจัดสารลดแรงตึงผิวของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นโซเดียมโคโคซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที.....	51
4.17	ผลของเวลาเก็บกักต่อสัดส่วนสารลดแรงตึงผิวในเฟสโฝมของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นโซเดียมโคโคซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที.....	52
4.18	ผลของเวลาเก็บกักต่ออัตราการผลิตฟองของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นโซเดียมโคโคซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที.....	53

ภาพที่		ผ หน้า
4.19	การกระจายตัวของขนาดฟองอากาศในคอลัมน์การแยกโดยฟองลอยที่ตำแหน่งและปริมาตรตัวกลางบรรจุต่างๆ ในระบบน้ำบริสุทธิ์ อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	56
4.20	การกระจายตัวของขนาดฟองอากาศในคอลัมน์การแยกโดยฟองลอยที่ตำแหน่งและปริมาตรตัวกลางบรรจุต่างๆ ในระบบสารละลายสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดชิ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที.....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและและความสำคัญของปัญหา

โลกในยุคปัจจุบันประสบกับปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษอย่างมาก หนึ่งในนั้นคือ มลพิษทางน้ำซึ่งมีสาเหตุสำคัญจากการปล่อยของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและครัวเรือน ชนิดของสารปนเปื้อนในน้ำเสียขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดน้ำเสีย ส่วนใหญ่น้ำเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมประกอบด้วย สารอินทรีย์และอนินทรีย์ทั้งที่อยู่ในรูปละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้ยังพบว่า น้ำมันต่างๆที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น น้ำมันหล่อลื่นและน้ำมันเครื่องยนต์ เป็นต้น มักพบในน้ำเสียด้วยเช่นกัน จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมให้น้ำเสียที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีระดับความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ตามมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้ง ซึ่งสารแขวนลอยและน้ำมันหรือไขมันจะต้องอยู่ในน้ำทิ้งไม่เกิน 50 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรของน้ำทิ้งตามลำดับ (กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539) น้ำมันตัดชิ้นงาน (Cutting oil) เป็นน้ำมันที่ใช้หล่อลื่นเครื่องมือในโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ในการหล่อลื่นในกระบวนการตัดชิ้นงานต่าง ๆ เพื่อลดการเสียดสีระหว่างโลหะตัดกับชิ้นงานและลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการด้วย น้ำมันตัดชิ้นงานประกอบด้วยน้ำมันชนิดต่าง ๆ สารอิมัลซิไฟเออร์ และสารเติมแต่งต่าง ๆ เช่น สารต่อต้านการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และสารลดการกัดกร่อน เป็นต้น เมื่อประสิทธิภาพของน้ำมันตัดชิ้นงานลดลงจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนน้ำมันตัดชิ้นงานใหม่อยู่เสมอ ทำให้น้ำทิ้งจากกระบวนการตัดชิ้นงานมีน้ำมันปะปนออกมาด้วย น้ำมันที่อยู่ในน้ำเสียเหล่านี้จะรวมตัวกันอยู่เป็นชั้นของน้ำมันที่แยกออกจากชั้นของน้ำและอาจกระจายตัวกันอยู่ในรูปของหยดน้ำมันขนาดเล็กในชั้นของน้ำ ซึ่งทำให้ต้องใช้วิธีที่แตกต่างกันในการแยกน้ำมันเหล่านี้

ขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสียทั่วไปประกอบด้วย การบำบัดเบื้องต้นซึ่งเป็นการแยกน้ำมันหรือไขมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำออก โดยอาศัยความแตกต่างในความหนาแน่นของน้ำมันที่ต่ำกว่าน้ำ ดังนั้นจึงใช้หลักการแรงโน้มถ่วงในการแยกน้ำมันออกจากชั้นน้ำโดยน้ำมันซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำจะลอยขึ้นสู่ด้านบนของผิวน้ำและรวมตัวกันเป็นชั้นของน้ำมัน ทำให้สามารถขจัดน้ำมันส่วนใหญ่่ออกได้ (โดยชั้นน้ำมันไหลล้นออกหรือการกวาดชั้นน้ำมันออก) การบำบัดขั้นที่สองเป็นการแยกน้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันในชั้นน้ำ การแยกน้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันนี้สามารถทำได้โดยใช้วิธี

ทางเคมี กายภาพ หรือไฟฟ้า ซึ่งวิธีทางกายภาพเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการขจัดน้ำมันที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียมากที่สุด เนื่องจากประสิทธิภาพการแยกสูง เทคนิคที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยและน้ำมันที่น่าสนใจเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น คือ การแยกโดยฟองลอย (Froth flotation) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่าย เวลาที่ใช้ในการแยกสารสั้น ประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายต่ำ และสามารถแยกสารต่าง ๆ ได้หลากหลาย และที่สำคัญสารที่แยกได้ไม่ถูกทำลายสมบัติและสภาพของสาร จึงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัด นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายอุตสาหกรรม เช่น การแยกสินแร่ โลหะ หมึกพิมพ์ กระบวนการรีไซเคิลกระดาษ และน้ำมัน เป็นต้น การแยกโดยฟองลอยเป็นกระบวนการที่ใช้ฟองอากาศเป็นตัวกลางในการแยกสารแขวนลอยออกจากสารละลาย โดยต้องมีการใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อให้สารที่ต้องการแยกเกาะอยู่บนผิวของฟองอากาศได้ง่ายขึ้นและฟองอากาศดังกล่าวก็จะพาสารที่ต้องการแยกลอยออกจากสารละลายขึ้นสู่ด้านบน การแยกโดยฟองลอยจึงเป็นกระบวนการแยกหรือขจัดน้ำมันออกจากน้ำเสียในขั้นที่สองและเหมาะกับการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณน้ำมันอยู่ไม่สูงมากนัก

ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันโดยกระบวนการแยกโดยฟองลอยขึ้นกับหลายปัจจัย ได้แก่ แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial tension, IFT) น้ำมันและน้ำต้องต่ำและความเสถียรของฟองต้องสูงซึ่งขึ้นกับสารลดแรงตึงผิวและความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) อัตราการไหลอากาศ (Air flow rate) เวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time, HRT) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของฟองอากาศมีความเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของระบบการแยกโดยฟองลอย โดยฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและความเร็วของฟองอากาศที่ช้าลงจะเพิ่มประสิทธิภาพของการแยกน้ำมัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้ตัวกลางบรรจุ (Packing media) ในระบบการแยกโดยฟองลอยเพื่อให้ฟองอากาศอยู่ในคอลัมน์ยาวนานขึ้นซึ่งจะทำให้มีเวลาสัมผัสกับสารละลายที่มีน้ำและน้ำมันมากขึ้น ซึ่งคาดว่าจะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันสูงขึ้น โดยงานวิจัยนี้ใช้สารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิวนิดประจุลบเพื่อใช้สร้างฟองและทำให้เกิดไมโครอิมัลชัน (Microemulsion) กับน้ำมันตัดขึ้นงาน ซึ่งมีการวัดค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคเพื่อสังเกตการเกิดไมโครอิมัลชัน จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Lapee-e, 2006) พบว่าความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักมีประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันตัดขึ้นงานโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องสูงที่สุด งานวิจัยนี้จึงได้ใช้ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวดังกล่าวในการศึกษาผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค ประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันตัดขึ้นงานโดยฟองลอย

แบบต่อเนื่อง สมบัติของฟอง ได้แก่ ความสามารถในการเกิดฟองและความเสถียรของฟอง และความสัมพัทธ์ของขนาดฟองอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่อง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของปริมาณตัวกลางบรรจุที่มีต่อประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องภายใต้ภาวะแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคต่ำ (Low interfacial tension)
2. ศึกษาภาวะที่มีความเหมาะสม ได้แก่ อัตราการไหลอากาศและเวลาเก็บกัก ในการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องที่มีตัวกลางบรรจุภายใต้ภาวะแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคต่ำ
3. ศึกษาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องระหว่างระบบที่มีตัวกลางบรรจุและระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุภายใต้ภาวะแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคต่ำ และศึกษาการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศภายในคอลัมน์

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการแยกโดยฟองลอย
2. ศึกษาวิธีการทดลองและการใช้เครื่องมือในระบบการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงาน ด้วยระบบฟองลอยแบบต่อเนื่อง
3. วางแผนการดำเนินการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง
4. เตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
5. ศึกษาประสิทธิภาพการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานด้วยระบบฟองลอยแบบต่อเนื่องในกรณีไม่มีตัวกลางบรรจุ เนื่องจากผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอิลิกโทรไลต์ อัตราการไหลอากาศ และเวลาเก็บกักสารละลาย
6. นำภาวะความเข้มข้นของสารอิลิกโทรไลต์ที่เหมาะสมในกรณีไม่มีตัวกลางบรรจุมาศึกษาประสิทธิภาพการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานด้วยระบบฟองลอยแบบต่อเนื่องในกรณีมีตัวกลางบรรจุ เนื่องจากผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อัตราการไหลอากาศ เวลาเก็บกักสารละลาย และปริมาณตัวกลางบรรจุ (Packing media volume)

7. ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟอง ได้แก่ ความสามารถในการเกิดฟอง และความเสถียรของฟอง
8. ศึกษาการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศที่ลอยตัวอยู่ในคอลัมน์
9. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการทดลอง
10. เขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำน้ำที่ได้จากการบำบัดกลับมาใช้ในกระบวนการอื่น ๆ ได้
2. สามารถประยุกต์ใช้ภาวะเหมาะสมจากการทดลองเข้ากับกระบวนการบำบัดน้ำเสียจริงในโรงงานอุตสาหกรรมได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย

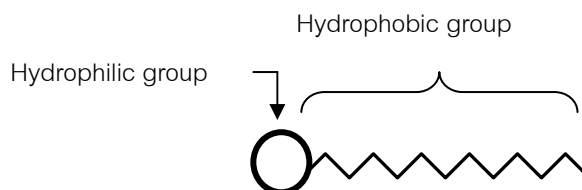
การบำบัดเบื้องต้น (Pretreatment) เป็นการบำบัดที่อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก โดยน้ำมันและไขมันซึ่งเบากว่าน้ำจะแยกชั้นลอยอยู่บนผิวน้ำจึงสามารถแยกชั้นน้ำมันและไขมันออกจากน้ำและอิมัลชันของน้ำมันกับน้ำได้

การบำบัดน้ำเสียขั้นแรก (Primary treatment) การบำบัดในขั้นนี้จะทำลายอิมัลชันของน้ำมันกับน้ำหลังจากนั้นจะแยกส่วนที่เป็นอิมัลชันน้ำมันออกจากน้ำ การทำลายอิมัลชันของน้ำมันกับน้ำสามารถทำได้โดยวิธีทางเคมี ฟิสิกส์ หรือไฟฟ้า ทั้งนี้วิธีทางเคมีเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมัน โดยเติมสารเคมีลงในน้ำเสียเพื่อให้อนุภาคของน้ำมันถูกแยกออกมาได้ง่ายขึ้น

การบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง (Secondary treatment) เป็นการแยกสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ ออกจากน้ำเสีย

2.2 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่ดูดซับระหว่างผิวสัมผัสของเหลวกับวัฏภาคต่าง ๆ เพื่อให้แรงผิวสัมผัสผิว (Surface tension) หรือแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial tension, IFT) ลดลง คำว่า วัฏภาค หมายถึง ผิวสัมผัสระหว่างสารสองเฟสที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนคำว่า ผิวสัมผัส หมายถึง ผิวสัมผัสระหว่างสารเฟสเดียว (Rosen, 2004) สารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่ช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ คำว่า Surfactant มาจากคำว่า Surface active agent ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนหัวที่มีขั้วและมีความชอบน้ำ (Hydrophilic) และ ส่วนหางที่ไม่มีขั้วและไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว (Withayapanyanon, 2003)

หลักการทำงานของสารลดแรงตึงผิวคือ ส่วนที่ชอบน้ำจะทำการจับน้ำและส่วนที่ชอบน้ำมันจะทำการจับสิ่งสกปรกพวกไขมันที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกไปแล้วแขวนลอยอยู่ในน้ำ (จิรสา, 2548)

สารลดแรงตึงผิวแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าบนส่วนประกอบที่ละลายน้ำ โดยสามารถแยกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

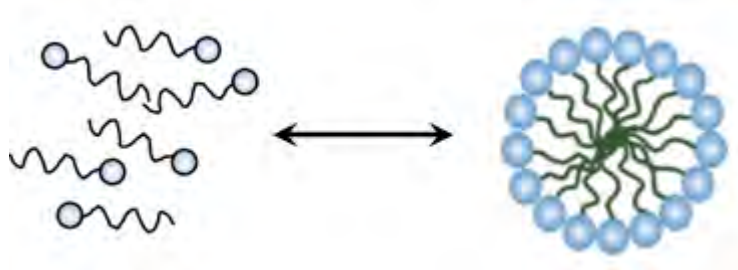
1. สารลดแรงตึงผิวประจุลบ (Anionic surfactant) คือ สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนหัวเป็นประจุลบ เช่นสารประกอบของซัลเฟต (Sulfate, $\text{ROSO}_3^- \text{M}^+$), ซัลโฟเนต (Sulfonate, $\text{RSO}_3^- \text{M}^+$) หรือ คาร์บอกซิเลต (Carboxyl, $\text{RCOO}^- \text{M}^+$)

2. สารลดแรงตึงผิวประจบวก (Cationic surfactant) คือ สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนหัวเป็นประจบวก เช่นสารประกอบของควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium, $\text{R}_4^+ \text{NCl}^-$)

3. สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) คือ สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนหัวไม่มีประจุ แต่สามารถละลายน้ำได้ เนื่องจากกลุ่มของโมเลกุลที่มีความเป็นขั้วสูง เช่น พอลิออกซิอีทิลีน (Polyoxyethylene, $-\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{O}-$)

4. สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งสองประจุ (Amphoteric surfactant, Zwitterionics) คือ สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนหัวเป็นทั้งประจบวกและประจุลบ เช่น สารประกอบของกรดอะมิโนที่มีสายโซ่ยาว ($\text{RN}^+\text{H}_2\text{CH}_2\text{COO}^-$)

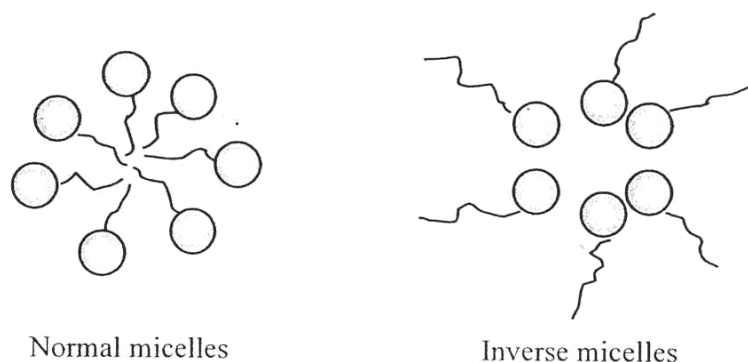
สารลดแรงตึงผิวหนึ่งโมเลกุลเรียกว่า มอนอเมอร์ (Monomer) เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพียงพอโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะรวมตัวกัน การจัดเรียงตัวแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยผ่านกระบวนการไมเซลล์ไลเซชัน (Micellization) มาอยู่ในรูปไมเซลล์ (Micelles) ซึ่งความเข้มข้นต่ำสุดที่ทำให้โมเลกุลเรียงตัวในรูปของไมเซลล์เรียกว่า ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC)



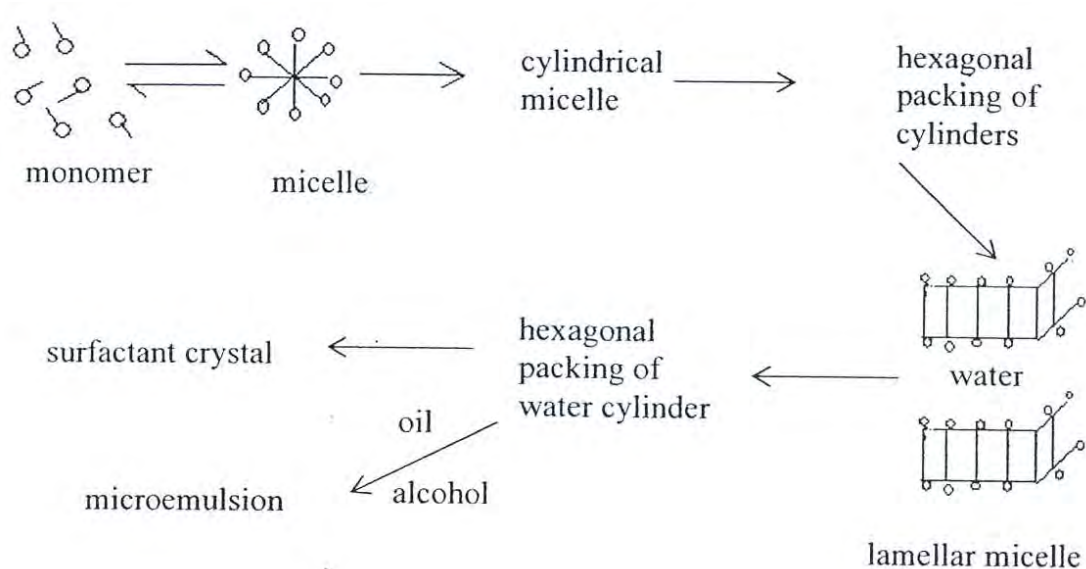
รูปที่ 2.2 โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวในการเกิดไมเซลล์ (Rosen, 1989)

การจัดเรียงตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวในรูปของไมเซลล์มี 2 ลักษณะ คือ แบบทั่วไป (Normal) และแบบกลับด้าน (Inverse or reverse) ดังแสดงในรูป 2.3 ในน้ำหรือสารละลาย โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะจัดเรียงตัวแบบทั่วไป โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำหันเข้าหากันอยู่ด้านใน และส่วนที่ชอบน้ำเรียงชิดกันอยู่ด้านนอก ส่วนในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วจะจัดเรียงตัวแบบกลับด้าน โดยหันส่วนที่ชอบน้ำเข้าหากันด้านในและหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำออกด้านนอก

รูปที่ 2.4 แสดงการรวมตัวกันเกิดเป็นโครงสร้างต่าง ๆ เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวสามารถรวมตัวกันเป็นทรงกลม ทรงกระบอก เฮกซะกอนัล ลามลลา (Lamellar) หรือแบบกลับด้าน โครงสร้างการเรียงตัวขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น ค่าพีเอช (pH) อุณหภูมิ และสารอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น น้ำมันที่อยู่ในระบบจะสัมผัสหรือละลายอยู่ในโครงสร้างเหล่านี้ในส่วนที่ไม่ชอบน้ำ โดยน้ำมันเป็นเฟสหลักหรือเฟสที่กระจายตัวขึ้นอยู่กับธรรมชาติและอัตราส่วนของน้ำต่อน้ำมัน (Oil-to-water ratio) (Sharma *et al.*, 1991) นอกจากนี้ความสามารถในการจับหรือละลายของน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนไมเซลล์ในสารละลายเพิ่มขึ้น (Clarence and Neogi, 1985)



รูปที่ 2.3 การจัดเรียงตัวในรูปไมเซลล์แบบทั่วไปและแบบกลับด้าน (Rosen, 1989)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างในการรวมตัวกันของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว (Sharma *et al.*, 1991)

สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทสำคัญในกระบวนการแยก เช่น การแยกแบบฟอง (Flotation) ซึ่งเป็นวิธีที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องใช้พลังงานมาก และมีฟองอากาศขนาดเล็กเป็นตัวกลางในการแยก ฟองอากาศจำนวนมากเหล่านี้จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายโอนจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่งได้อย่างรวดเร็ว ด้วยคุณสมบัติในการชอบน้ำที่แตกต่างกันในโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวทำให้สารลดแรงตึงผิวถูกดูดซับลงบนผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทำให้สารที่ต้องการแยกมาเกาะได้ดีขึ้น (Sebba, 1989)

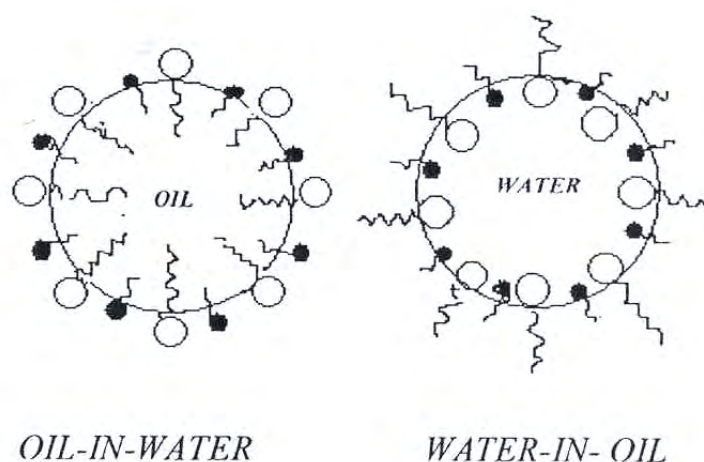
2.3 ไมโครอิมัลชัน

อิมัลชันเป็นอนุภาคขนาดเล็กของของเหลวชนิดแรกที่แขวนลอยอยู่ในของเหลวชนิดที่สอง โดยของเหลวทั้งสองชนิดนี้ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (Rosen, 2004) เพื่อให้ของเหลวทั้งสองเข้ากันได้จึงมีการเติมสารชนิดที่สามซึ่งเรียกว่าสารอิมัลซิไฟอิง (Emulsifying) เข้าไปในระบบ สารที่ใช้กันทั่วไปคือสารลดแรงตึงผิว อิมัลชันสามารถแบ่งได้เป็นสามชนิดตามขนาดของอนุภาคที่กระจายตัว ได้แก่

- แมโครอิมัลชัน (Macroemulsion) มีขนาดใหญ่กว่า 400 นาโนเมตร
- ไมโครอิมัลชัน มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร
- นาโนอิมัลชัน (Nanoemulsion) มีขนาด 100-400 นาโนเมตร

มีการอธิบายถึงไมโครอิมัลชันครั้งแรกในปี 1943 โดย Hoar และ Schulman ไมโครอิมัลชันเป็นการกระจายตัวของคอลลอยด์ ระบบที่มีความโปร่งแสงหรือโปร่งใสซึ่งเกิดจากการผสมกันของน้ำมันกับน้ำรวมทั้งสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุ (Hoar และ Schulman, 1943) ไมโครอิมัลชันคือ การกระจายตัวของ น้ำ น้ำมันที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ รวมทั้งสารลดแรงตึงผิวที่ดูดซับอยู่บนผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสอง โดยกระจายตัวอยู่อย่างเสถียรภายในระบบ

ไมโครอิมัลชันเป็นการกระจายตัวของของเหลวสองชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันโดยเกิดจากการผสมของเหลวทั้งสองเข้าด้วยกัน ขนาดของอนุภาคของเหลวที่กระจายตัวมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10-100 นาโนเมตร (0.01-0.1 ไมโครเมตร) ไมโครอิมัลชันมีทั้งที่เป็นลักษณะ น้ำมันอยู่ในน้ำ (O/W) น้ำอยู่ในน้ำมัน (W/O) หรือทั้งสองลักษณะ (Rosen, 2004) ลักษณะที่น้ำอยู่ในน้ำมันเป็นการกระจายตัวของของเหลวที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับสารละลายซึ่งเรียกว่าน้ำมัน (O) ในเฟสสารละลาย (W) ในกรณีนี้ น้ำเป็นเฟสย่อย (Discontinuous or inner phase) สารละลายเป็นเฟสหลัก (Continuous or outer phase) ในกรณีน้ำในน้ำมันจะเป็นการกระจายตัวของน้ำหรือสารละลาย (W) ในของเหลวที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (O) ดังแสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างไมโครอิมัลชันลักษณะน้ำมันในน้ำ (O/W) และน้ำในน้ำมัน (W/O)

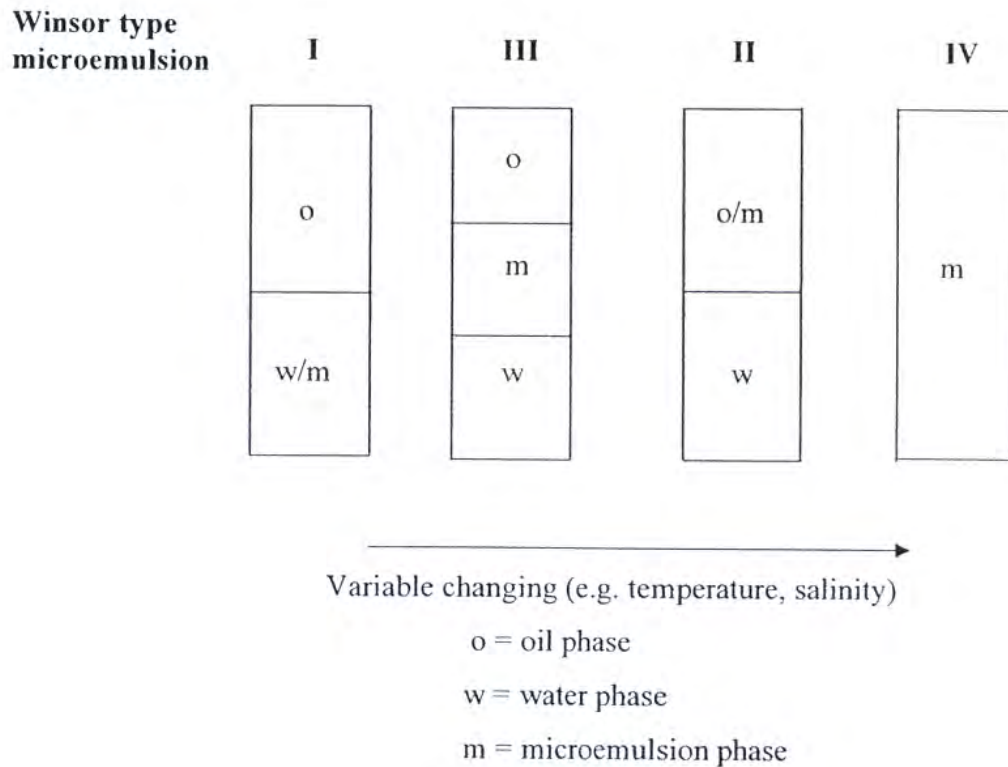
(Rosen, 1989)

ไมโครอิมัลชันเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพื้นผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมีมาก แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคต่ำ และความสามารถในการละลายสูงเมื่อเทียบกับระบบคอลลอยด์อื่น (Bourrel และ Schechter, 1988)

การศึกษาเฟสของไมโครอิมัลชันที่รู้จักกันมากที่สุด คือ ไมโครอิมัลชันแบบวินเซอร์ (Winsor-Type microemulsion) (Winsor, 1954) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 4 แบบ ดังแสดงในรูป 2.6

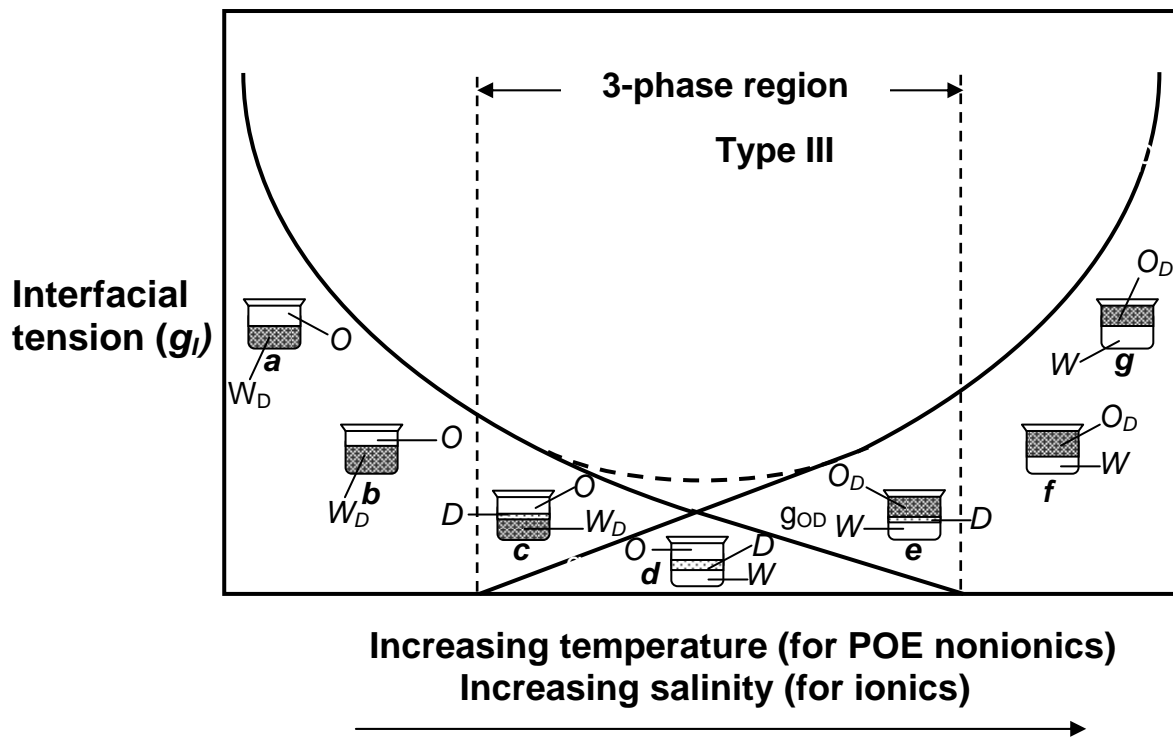
1. วินเซอร์แบบ **I** : เกิดไมโครอิมัลชันลักษณะน้ำมันในน้ำที่สมดุลอยู่กับเฟสน้ำมันมากเกินพอ
2. วินเซอร์แบบ **II** : เกิดไมโครอิมัลชันลักษณะน้ำในน้ำมันในเฟสน้ำมันที่สมดุลอยู่กับเฟสน้ำมากเกินพอ
3. วินเซอร์แบบ **III** : เกิดเฟสกลาง (Middle phase) หรือเฟสไมโครอิมัลชันสมดุลอยู่กับเฟสน้ำและน้ำมันที่มากเกินพอ
4. วินเซอร์แบบ **IV** : เกิดเฟสเดียว (Single phase) หรือเฟสไมโครอิมัลชัน

การเปลี่ยนรูปแบบในการเกิดวินเซอร์แบบ **I** ไปยังแบบ **III** และแบบ **II** ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เกลือ โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวและสารลดแรงตึงผิวร่วม อัตราส่วนของน้ำมันต่อน้ำ หรือโครงสร้างของน้ำมัน โดยทั่วไปแล้วการศึกษาเฟสไดอะแกรมนั้นจะทำการเพิ่มเกลือเข้าไปดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.6 แบบจำลองในการเกิดเฟสไมโครอิมัลชัน (Winsor, 1968)

นอกจากนั้นการเปลี่ยนของวินเซอร์แบบ **I-III-II** ยังเป็นผลมาจากคุณสมบัติของไมโครอิมัลชันที่สำคัญสองประการ คือ ความสามารถในการละลายและแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค ซึ่งทำให้โครงสร้างขนาดไมโครเกิดการเปลี่ยนแปลง รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบบของไมโครอิมัลชันและแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค บริเวณทางด้านซ้ายของรูปเป็นวินเซอร์แบบ **I** เฟสน้ำที่ไม่มีไมโครอิมัลชันลักษณะที่น้ำมันอยู่ในน้ำจะอยู่ด้านล่างและเฟสน้ำมันมากเกินพออยู่ด้านบน บริเวณนี้ค่าแรงตึงผิวระหว่างเฟสน้ำมันเกินพอกับสารละลายไมเซลล์ (Micellar solution, $\gamma_{o/m}$) ลดลงเมื่อเกลือเพิ่มขึ้น เมื่อเกิดเฟสกลางขึ้นเฟสของไมโครอิมัลชันจะมีโครงสร้างเป็น bicontinuous อยู่สมดุลกับเฟสน้ำมันและน้ำที่มากเกินพอโดยค่าแรงตึงผิวระหว่างเฟสน้ำมันเกินพอกับเฟสกลาง ($\gamma_{o/m}$) และเฟสน้ำเกินพอกับเฟสกลาง ($\gamma_{w/m}$) จะลดลง ในวินเซอร์แบบ **III** จุดที่แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคของเฟสน้ำมันเกินพอกับเฟสกลาง ($\gamma_{o/m}$) มีค่าเท่ากับแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคของเฟสน้ำเกินพอกับเฟสกลาง ($\gamma_{w/m}$) เป็นจุดที่มีปริมาณเกลือเหมาะสมทำให้น้ำและน้ำมันละลายอยู่ในเฟสไมโครอิมัลชันด้วยปริมาณเท่ากัน บริเวณทางขวาของรูปเป็นวินเซอร์แบบ **II** ประกอบด้วยไมโครอิมัลชันลักษณะที่น้ำอยู่ในน้ำมันอยู่ด้านบนและสมดุลอยู่กับเฟสน้ำเกินพอ



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดไมโครอิมัลชันแบบต่าง ๆ และแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคกับปริมาณเกลือ (Salager *et al.*, 1982)

ด้วยคุณสมบัติพิเศษของไมโครอิมัลชัน เช่น พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่สูงกว่าระบบคอลลอยด์อื่นทำให้เป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรมและทำให้เชื่อได้ว่าค่าแรงตึงผิวที่ต่ำของวินเซอร์แบบ **III** สามารถทำให้ระบบการแยกโดยฟองลอยมีประสิทธิภาพที่ดี

จากงานวิจัยเกี่ยวกับปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดไมโครอิมัลชันระหว่างเฟสน้ำมันกับน้ำที่ทำให้ประสิทธิภาพของการแยกแบบฟองดีขึ้นพบว่าระบบที่เกิดไมโครอิมัลชันวินเซอร์แบบ **III** ทำให้ประสิทธิภาพของการแยกแบบฟองสูงสุด (Pondsatabodee *et al.*, 1998) และภาวะที่ทำให้แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคของน้ำกับน้ำมันมีค่าน้อยได้กลายเป็นแนวทางที่เลือกใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบการแยกแบบฟอง (Bourrel, 1988, Scaemhorn, 2000)

2.4 การแยกโดยฟองลอย (Froth flotation)

กระบวนการแยกด้วยการทำให้ลอย (Flotation) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีอนุภาคของสารที่ไม่ละลายน้ำอยู่ เช่น น้ำมัน โดยทำให้เกิดฟองอากาศในน้ำเสียเหล่านั้นซึ่งฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะไปสัมผัสกับอนุภาคของน้ำมัน จากนั้นอนุภาคของน้ำมันที่เกาะอยู่บนฟองอากาศจะถูกพาลอยขึ้นสู่ผิวน้ำและถูกออกจากกระบวนการ การแยกด้วยการทำให้ลอย (Flotation) สามารถแยกออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การแยกโดยฟองลอยด้วยการเป่าอากาศ (Induced Air Flotation, IAF) เป็นการเป่าอากาศเข้าไปที่ก้นถังทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กพาอนุภาคหรือหยดน้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ลอยขึ้นมาบนผิวน้ำซึ่งฟองที่มีอนุภาคเหล่านั้นจะถูกแยกออกจากน้ำเสียทำให้น้ำที่ผ่านกระบวนการนี้มีความสะอาดมากขึ้น แต่ระบบนี้อาจมีประสิทธิภาพไม่สูงนักเนื่องจากอากาศมีขนาดใหญ่และกระจายตัวไม่ทั่วถึง

2. การแยกโดยฟองลอยด้วยการอัดอากาศ (Dissolved Air Flotation, DAF) เป็นวิธีที่ใช้ความดันสูงประมาณ 4-6 บรรยากาศ เพื่อทำให้อากาศละลายในน้ำได้ 4-6 เท่าของที่ละลายได้ที่ความดัน 1 บรรยากาศ จากนั้นปล่อยความดันให้เข้าสู่สภาพความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว ทำให้อากาศละลายน้ำได้เกินจุดอิ่มตัว อากาศที่ละลายออกมาจะหลุดออกมาเป็นฟองอากาศขนาดเล็กซึ่งเกาะและพุงอนุภาคหรือหยดน้ำมันให้ลอยขึ้นมาที่ผิวน้ำโดยในถังลอยจะมีเครื่องกวาดวัสดุที่ลอยแยกออกมา ระบบนี้เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงแต่มีข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากต้องใช้เทคโนโลยีสูงเพื่อทำให้เกิดความดันที่ต้องการ การแยกโดยฟองลอยด้วยการอัดอากาศ มี 2 ระบบ คือ ระบบที่มีการหมุนเวียน และระบบที่ไม่มีการหมุนเวียน นอกจากนี้ยังมีการแยกโดยฟองลอยด้วยสูญญากาศ (Vacuum Flotation) คือ เป็นถังลอยที่ต้องปิดสนิทเพื่อให้สามารถดูดอากาศออกซึ่งเป็นการลดความดันของน้ำ ทำให้อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำหลุดออกมาเป็นฟองอากาศขนาดเล็กและเกาะกับอนุภาคที่ต้องการแยกออกมา เพื่อให้ความถ่วงจำเพาะของอนุภาคลดลงจนลอยขึ้นบนผิวน้ำและแยกออกไปได้

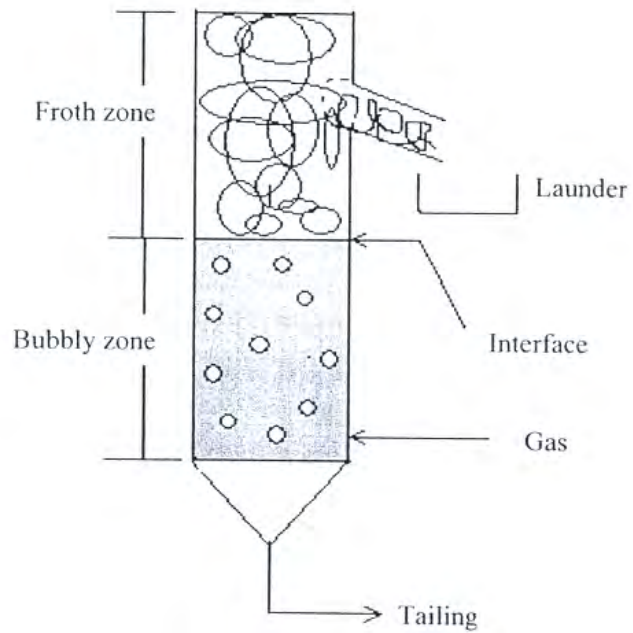
การแยกโดยฟองลอย เป็นกระบวนการใช้ฟองเป็นตัวกลางในการแยกสารที่ไม่ละลายในน้ำและโดยอาศัยความแตกต่างของคุณสมบัติระหว่างผิวสัมผัสของสารละลายและสารที่ต้องการแยก สารลดแรงตึงผิวจึงมีบทบาทสำคัญในกระบวนการ (Scamehorn, 1989) ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวสัมผัสให้ต่ำลง ช่วยทำให้อนุภาคที่ต้องการขจัดสามารถเกาะหรือกระจายตัวบนผิวของ

ฟองอากาศได้ง่ายขึ้น หลักการทำงานของเครื่องแยกโดยฟองลอยแสดงดังรูปที่ 2.8 การแยกโดยฟองลอย ประกอบด้วย

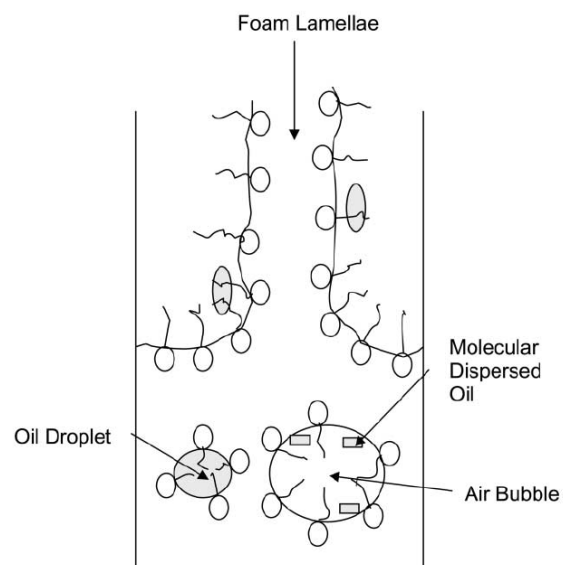
1. บริเวณการขจัด (Recovery zone) ฟองอากาศที่ถูกป้อนจากด้านล่างผ่านตัวกระจายอากาศจะลอยผ่านสารละลาย สารลดแรงตึงผิวที่เติมลงไปจะหันส่วนที่มีขี้ผึ้งเข้าหาน้ำและส่วนที่ไม่มีขี้ผึ้งเข้าหาฟองอากาศ สารที่ต้องการแยกจะแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำกับอากาศจากนั้นจะลอยขึ้นสู่ส่วนถัดไป

2. บริเวณที่เกิดการลอยตัว (Froth zone) ฟองอากาศจะพาอนุภาคที่ต้องการแยกขึ้นมาจากบริเวณการขจัดและลอยพ่นขึ้นมาที่บริเวณผิวหน้าของสารละลายจากนั้นไหลออกทางด้านบนของคอลัมน์ซึ่งฟองเหล่านั้นจะแตกกลายเป็นของเหลวต่อไป (Pal และ Masliyah, 1990) ฟองที่ไหลออกมาประกอบด้วยอนุภาคของสารลดแรงตึงผิวและสารที่ต้องการแยก สารละลายที่เหลือหรือผ่านการแยกจะไหลออกทางด้านล่างของคอลัมน์ รูปที่ 2.9 แสดงการขจัดน้ำมันโดยการแยกโดยฟองลอยซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถขจัดสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำออกได้

เมื่อฟองอากาศและหยดน้ำมันสัมผัสกัน น้ำมันจะเกาะอยู่บนผิวของฟองอากาศซึ่งทั้งน้ำมันและฟองอากาศมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ (ยกเว้นน้ำมันบางชนิดที่เป็นน้ำมันหนัก) จึงลอยขึ้นสู่ด้านบน ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กจะสามารถจับกับหยดน้ำมันขนาดเล็ก ส่วนฟองอากาศขนาดใหญ่จะจับกับหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการเกาะมากกว่าเมื่อเทียบกับฟองอากาศขนาดใหญ่ ดังนั้นขนาดและการกระจายตัวของฟองอากาศจึงเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกแบบฟอง นอกจากนี้เวลาที่ฟองอากาศอยู่ในคอลัมน์นานขึ้น (Residence time of gas bubble) จะทำให้ฟองอากาศมีประสิทธิภาพในการสัมผัส (Contact efficiency) กับหยดน้ำมันได้ดีกว่าและปริมาณน้ำมันที่ถูกขจัดออกจากระบบก็มากกว่า ซึ่งจะทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดออกมามีความใสมากขึ้น (Moosai *et al.*, 2003)



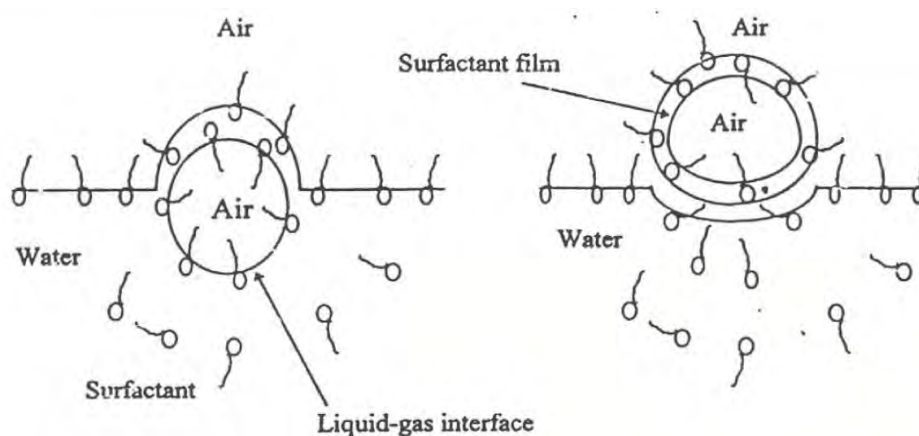
รูปที่ 2.8 คอลัมน์กระบวนการแยกโดยฟองลอย (Pal และ Masliyah, 1989)



รูปที่ 2.9 การขจัดน้ำมันออกจากน้ำด้วยการแยกโดยฟองลอย
(Wungrattanasopon, 1995)

2.5 การเกิดฟอง (Foam formation)

ฟองคือการกระจายตัวของแก๊สหรือฟองอากาศในของเหลว ซึ่งฟองอากาศจะถูกห่อหุ้มด้วยชั้นฟิล์มของของเหลว การเกิดฟองจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ถ้าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่ำโมเลกุลจะอยู่ในรูปอิสระโดยกระจายตัวอยู่ในลักษณะของมอนอเมอร์ แต่ถ้าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ฟองอากาศจะเกิดได้ดีเนื่องจากโมเลกุลเรียงตัวในรูปไมเซลล์ รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดฟองในสารละลายที่มีสารลดแรงตึงผิว



รูปที่ 2.10 การเกิดฟอง (Rosen, 1989)

2.6 สมบัติของฟอง (Foam characteristics)

สมบัติของฟองในคอลัมน์ประกอบด้วย 2 ลักษณะ

1. ความเสถียรของฟอง (Foam stability) คือ ความคงทนต่อการแตกของฟอง ฟองไม่แตกง่ายซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว ถ้าสารลดแรงตึงผิวเป็นชนิดที่มีหัวโมเลกุลของน้ำจะดึงส่วนที่ชอบน้ำเข้ามาละลายและส่วนหัวซึ่งมีประจุเหมือนกันจะเกิดแรงผลักรวมกัน ฟองที่เกิดขึ้นจึงมีความคงทน ไม่แตกง่ายเหมือนฟองอากาศที่เกิดจากสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีหัวซึ่งไม่มีแรงผลักรวมกัน ความเสถียรภาพของฟองยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity force) การรวมตัวของฟอง (Coalescence) และความยืดหยุ่นของพื้นผิว (Surface elasticity) เป็นต้น

2. ความสามารถในการเกิดฟอง (Foamability) คือ การที่ฟองเกิดง่าย เกิดได้ดี ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการเกิดฟองได้แก่ แรงตึงผิว ความหนืด (Viscosity) เป็นต้น

2.7 ตัวกลางบรรจุ

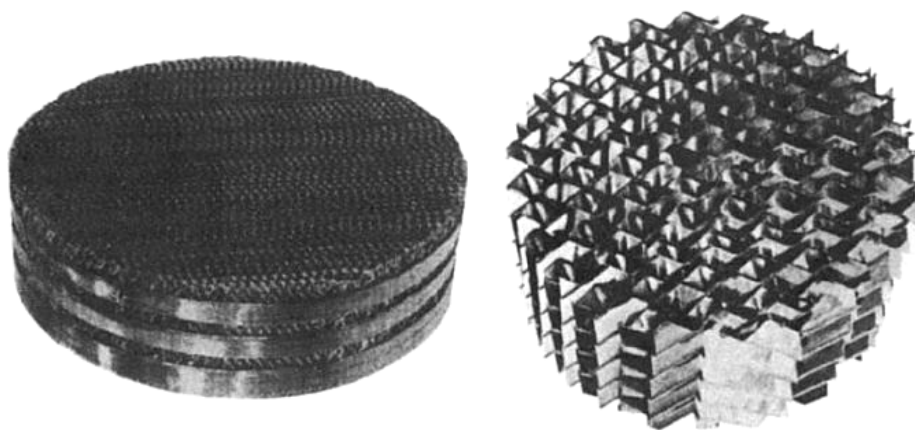
ตัวกลางบรรจุ เป็นวัสดุที่มีจุดประสงค์ในการใช้เพื่อทำให้เกิดและของเหลวในกระบวนการแยกมีเวลาสัมผัสกันมากขึ้นในขณะที่เดียวกันจะพยายามทำให้ความดันลดระหว่างตัวกลางเกิดน้อยที่สุด จึงมีการใช้ตัวกลางบรรจุในกระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการกลั่น (Distillation) การดูดซึม (Absorption) โดยแก๊สจะไหลผ่านผิวหน้าของตัวกลางบรรจุที่ชุ่มไปด้วยของเหลวที่ไหลปกคลุมอยู่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลดีขึ้นซึ่งในกรณีของการบำบัดน้ำเสียจะทำให้สิ่งเจือปนถูกจัดออกมาอยู่ในเฟสแก๊ส (ฟองอากาศ) ได้มากขึ้นนั่นเอง ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้ตัวกลางบรรจุเพื่อพัฒนาการแยกในหอกลั่น ข้อดีของตัวกลางบรรจุ คือ ทำให้เกิดความดันลดภายในหอกลั่นน้อย จึงเหมาะกับการใช้ในหอกลั่นสุญญากาศ (0 Vacuum distillation columns) ตัวกลางบรรจุส่วนใหญ่มักทำจากเซรามิก พลาสติก โลหะ ซึ่งมีข้อจำกัดในการใช้ที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ต้นทุน การเกิดความดันลด พื้นที่ผิวชุ่มด้วยของเหลว (Wetted surface) และความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) รูปร่างของตัวกลางบรรจุทั่วไปมีหลากหลายรูปแบบ เช่น Ring shap, Berl saddle, Pall ring และ Tellerettes เป็นต้น (Alley, 2006) รูปร่างที่แตกต่างกันทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสและความเป็นช่องว่าง (Void space) ต่างกันซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพเนื่องจากตัวกลางบรรจุที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าจะให้ประสิทธิภาพดีกว่า (มีพื้นที่ให้ของเหลวได้สัมผัสกับแก๊สมากกว่า)

การเลือกใช้ตัวกลางบรรจุในกระบวนการบำบัดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของสารปนเปื้อนที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายและจุดประสงค์ของการบำบัดสารละลายดังกล่าว ตัวกลางบรรจุมีหลายประเภททั้งแบบนิ่ง (Stationary) และแบบเคลื่อนที่ (Mobile) เช่น ทรงกลมแก้ว ไฟเบอร์เบด (Fibrous bed) ทรงกลมพลาสติก หรือแบบนิ่ง เช่น ตัวกลางบรรจุเซรามิก ตัวกลางบรรจุพลาสติก เป็นต้น (Cheremisinoff, 1993)

2.7.1 ชนิดตัวกลางบรรจุ

ตัวกลางบรรจุแบบโครงสร้าง (Structure Packing)

คือ ตัวกลางซึ่งทำจากวัสดุที่เป็นเซรามิก โลหะ หรือพลาสติก มีลักษณะเป็นแผ่นลูกฟูกบางวางตัวเรียงตัวกันในแนวตั้งและการเรียงตัวของลูกฟูกแต่ละแผ่นสลับกันเพื่อให้มีลักษณะเป็นช่องของรังผึ้งซึ่งของไหลสามารถไหลผ่านได้และเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น การติดตั้งตัวกลางบรรจุแบบโครงสร้างต้องทำให้ตัวกลางมีขนาดพอดีกับคอลัมน์ที่ต้องการใช้งานก่อนบรรจุลงในคอลัมน์และเหมาะกับคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้นนี้ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลมากขึ้นเนื่องจากแก๊สและของเหลวสัมผัสกันมากขึ้น นอกจากนี้ลักษณะที่เป็นช่องซึ่งมีการขัดขวางการไหลน้อยจึงทำให้ตัวกลางแบบโครงสร้างมีข้อดี คือ สามารถใช้ในระบบที่มีอัตราการไหลของแก๊สสูงและอัตราการไหลของของเหลวต่ำได้ แก๊สและของเหลวผสมกันดีขึ้น และให้ประสิทธิภาพดีกว่าตัวกลางบรรจุแบบสุ่มและชั้นของหอกถัน (Trays) ตามลำดับ (3McKetta, 1993)



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างตัวกลางบรรจุแบบโครงสร้าง (4Stewart และ Arnold, 2008)

ตัวกลางบรรจุแบบสุ่ม (Random Packing)

คือ ตัวกลางซึ่งทำจากวัสดุที่เป็นเซรามิก พลาสติก หรือโลหะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของระบบ ประกอบด้วยรูปร่างต่าง ๆ เช่น ทรงกลม (Ball) อานม้า (Saddle) และวงแหวน (Ring) และมีการพัฒนาออกแบบให้รูปร่างต่าง ๆ มีความเหมาะสมกับการใช้งาน ทั้งนี้แต่ละรูปร่างมีหลากหลายรูปแบบและหลายขนาด เช่น รัศชิงริง (Rasching Ring) พอลลริง (Pall Ring) อินทาลอก แซดเดิล (Intalox Saddle) เทลเลอร์เทท (Tellerettes) เป็นต้น แต่ละรูปแบบมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป โดยจุดประสงค์หลักของตัวกลางบรรจุแบบสุ่ม คือ เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวซึ่งต้องทำให้เกิดความดันลดและการถูกกักของของเหลวน้อยที่สุด ข้อดีของตัวกลางบรรจุชนิดนี้คือ หากมีเทคโนโลยีรองรับจะสามารถผลิตได้ง่าย และบรรจุลงในคอลัมน์ได้ง่าย ข้อเสีย คือ มีการกระจายตัวของเฟสเหนือพื้นที่หน้าตัดน้อยเมื่อเทียบกับตัวกลางบรรจุแบบโครงสร้าง และเกิดความดันลดภายในคอลัมน์ (Kolev, 2006)



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างตัวกลางบรรจุแบบสุ่ม ตัวกลางบรรจุรัศชิงริง (รูปบนด้านซ้าย)

ตัวกลางบรรจุพอลลริง (รูปบนด้านขวา) ตัวกลางบรรจุคาสเคด (รูปล่าง)

(Chattopadhyay, 2007)

2.7.2 การใช้งานของตัวกลางบรรจุ

ตัวกลางบรรจุเซรามิก ทำให้เกิดชั้นฟิล์มที่มีความบางมากซึ่งทำให้ของเหลวและแก๊สผสมกันได้ดี มีความทนทานต่ออุณหภูมิและการกัดกร่อนของสารเคมีได้มากกว่าตัวกลางบรรจุแบบโลหะ ตัวกลางบรรจุเซรามิกมักใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เช่น หอทำให้แห้ง (Drying tower) หอดูดซับ (Absorbing tower) และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

ตัวกลางบรรจุพลาสติก ทำให้เกิดความดันลดและของเหลวที่ถูกกักอยู่ลดลง และมีความสามารถมากกว่าระบบหรือหอที่ใช้ชั้นเมื่อประสิทธิภาพเท่ากัน สามารถใช้ในระบบที่มีอุณหภูมิอยู่ในระดับต่ำถึงกลาง รวมทั้งยอมให้ความร้อนผ่านได้ดีกว่าเซรามิกและราคาถูกกว่าโลหะโดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะพิเศษและอัลลอยด์ ตัวกลางบรรจุพลาสติกนิยมใช้ในส่วนดูดซับ ส่วนบำบัด (Scrubbing) ส่วนสทริปปิง (Stripping) และส่วนถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer)

ตัวกลางบรรจุโลหะ มีการออกแบบโดยรวมรูปทรงอันเข้ากับวงแหวนเข้าด้วยกันเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งแบบดังกล่าวสามารถลดการเกิดความดันลดและของเหลวที่ถูกกักอยู่ให้ต่ำลงและป้องกันการเกิดติดกันของตัวกลางทำให้การสัมผัสกันระหว่างวัฏภาคของแก๊สและของเหลวมีความเหมาะสม มีการใช้ตัวกลางชนิดนี้ในหน่วยการดูดซับและ ส่วนสทริปปิง หอกั่น (Distillation tower) การถ่ายโอนความร้อน การถ่ายโอนความร้อนและมวล การผสมแก๊ส (Gas Mixing) การสกัด (Extraction)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pongstabadee (1998) ศึกษาการกำจัดออร์โธไดคลอโรเบนซีนออกจากน้ำ โดยศึกษาการเกิดไมโครอิมัลชันของสารลดแรงตึงผิวในการเกิดไมโครอิมัลชันภาวะวินเซอร์แบบที่หนึ่งไปสู่แบบที่สาม พบว่า การใช้สารลดแรงตึงผิวประจุบวกมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวประจุลบ และพบว่าภาวะวินเซอร์แบบที่สามทำให้ระบบฟองลอยมีประสิทธิภาพในการแยกสารสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะดังกล่าวมีค่าแรงตึงผิวต่ำที่สุด เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำภายใต้ภาวะที่เหมาะสมและความเข้มข้นเหนือจุดซีเอ็มซี สารลดแรงตึงผิวจะรวมตัวเกิดเป็นไมเซลล์ซึ่งสามารถละลายน้ำมันและเพิ่มการละลายของน้ำมันในน้ำได้ นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการขจัดน้ำมัน ได้แก่ อัตราการไหลอากาศ ขนาดของฟองอากาศและหยดน้ำมัน ค่าซีตาโพเทนเชียลของหยดน้ำมันและฟองอากาศ รวมถึงความหนาแน่นของหยดน้ำมัน

Feng และ Aldrich (2000) ศึกษาการขจัดน้ำมันดีเซลจากสารละลายอิมัลชันด้วยวิธีการแยกโดยฟองลอยแบบกะ (Batch flotation) และศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อความเสถียรของฟอง เช่น พีเอช และความเข้มข้นของเกลือ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวประจุลบ ประจุบวก ความเข้มข้นของน้ำมันดีเซล อัตราการไหลอากาศ ปริมาณสารลดแรงตึงผิว และตัวกระจายอากาศ จากการทดลองพบว่าเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นค่าคงที่ความเสถียรอิมัลชันของน้ำมันกับน้ำ (K_s) สูงขึ้นทำให้ระบบไมโครอิมัลชันไม่เสถียรนำไปสู่การที่อิมัลชันถูกทำลายอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันดีเซล ปริมาณไซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเสถียรของอิมัลชันลดลง สารลดแรงตึงผิวประจุบวก คือ Octadecyl amine chloride (ODAC) และ Cetyl trimethyl ammonium chloride (CTMAC) มีผลต่อการขจัดน้ำมันมากกว่า สารลดแรงตึงผิวประจุลบ (SDS) ในภาวะที่เหมาะสมสามารถขจัดน้ำมันดีเซลได้สูงสุดถึงร้อยละ 99 ทำให้เหลือความเข้มข้นของน้ำมันดีเซลอยู่น้อยกว่า 10 ส่วนในล้านส่วน

Benkrid และคณะ (2002) ศึกษากลไกการเคลื่อนที่ของฟองอากาศในระบบแก๊สและของเหลวไหลผ่านทริกเคิลเบดที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกแบนเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร เรียงตัวอยู่บน Plexiglas plates กว้าง 60 มิลลิเมตร ยาว 103 มิลลิเมตร จำนวนสองแผ่นซึ่งวางห่างกัน 2 มิลลิเมตร ทริกเคิลเบดจะเรียงตัวเป็นแถวซึ่งแต่ละแถวประกอบด้วย ทริกเคิลเบด 10 อัน มีทั้งหมด 20 แถว เรียงตัวแบบสลับห่างกันโดยมีช่องว่างระหว่างทริกเคิลเบดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร การทดลองนี้ใช้กล้องวีดีโอความเร็วสูงบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลหาความเร็วและรูปร่างของฟองอากาศที่ความเร็วจำเพาะของของเหลวเท่ากับ 0.031 เมตรต่อวินาที และความเร็วจำเพาะของแก๊สเท่ากับ 0.046 เมตรต่อวินาที ความเร็วของฟองอากาศที่ตำแหน่งใด ๆ ขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลในตำแหน่งนั้นและช่องว่างที่ฟองอากาศดังกล่าวสามารถผ่านไปได้ จากผลการทดลองพบว่า ในบริเวณที่มีสัดส่วนช่องว่างมากความเร็วฟองอากาศจะต่ำกว่าบริเวณที่มีสัดส่วนช่องว่างน้อย เนื่องจากฟองอากาศส่วนใหญ่มักหยุดและแกว่งไปมาในบริเวณที่มีการขยายของช่องว่าง ขนาดฟองอากาศโดยเฉลี่ยไม่ขึ้นกับชนิดหรือลักษณะของช่องว่างและฟองอากาศยึดตัวมากขึ้นในบริเวณที่ช่องว่างแคบลง

Yanatatsaneejit และคณะ (2005) ศึกษาประสิทธิภาพของแยกเอทิลเบนซีนออกจากน้ำ โดยศึกษาจากการเกิดไมโครอิมัลชันและสมบัติของฟอง สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ คือ ไดเฮกซิลซัลโฟซักซิเนต (AMA) ซึ่งสามารถเกิดไมโครอิมัลชันกับเอทิลเบนซีนได้โดยระบบที่ทำให้แรงตึงผิวสัมผัสระหว่างเอทิลเบนซีนกับน้ำมีค่าต่ำคือ การเกิดไมโครอิมัลชันในวินเซอร์แบบที่สาม จากนั้นศึกษาการแยกเอทิลเบนซีนออกจากน้ำด้วยการโดยฟองลอย ระบบประกอบด้วยฟรอฟไฟเทชันคอลัมน์

ซึ่งเป็นคอลัมน์แก้วทรงกระบอกยาว 120 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร อากาศที่ถูกอัดด้วยเครื่องอัดอากาศจะถูกป้อนผ่านแผ่นกระจายอากาศเข้าสู่ด้านล่างของคอลัมน์ ด้วยความเร็วอากาศป้อนเข้าเท่ากับ 0.3 ลิตรต่อนาที ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว โซเดียมคลอไรด์ และอัตราส่วนน้ำมันต่อน้ำ ทั้งนี้อัตราส่วนน้ำมันต่อน้ำไม่ได้ส่งผลต่อแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการแยกเอทิลเบนซีนออกจากน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคลดลงและประสิทธิภาพการแยกสูงสุดที่ความเข้มข้นไดเอทิลซัลไฟฟอสเฟตร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก และโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความสามารถในการเกิดฟองสูงที่สุด แต่ค่าแรงตึงผิวสัมผัสกลับต่ำสุดที่ความเข้มข้นไดเอทิลซัลไฟฟอสเฟตร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สรุปได้ว่าทั้งค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคและสมบัติของฟองเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการขจัดน้ำมัน

Lapee-e (2006) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคต่ำกับประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานจากน้ำเสียโดยฟองลอยแบบต่อเนื่อง สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการศึกษาทำให้เกิดไมโครอิมัลชัน คือ Branched alcohol propoxylate sulfate, sodium sulf (Alfoterra 145-5 PO Sulfate) และ Sodium bis (2-ethylhexyl) sulfosuccinate (AOT) ซึ่งตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นของเกลือ อัตราส่วนน้ำต่อน้ำมัน ผลการศึกษาการแยกโดยฟองลอยกับตัวแปรต่างๆ คือ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นของเกลือ ความสูงโฟม อัตราการไหลอากาศ เวลาในการเก็บกัก และ พอลิอิเล็กโทรไลต์ พบว่าประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันสูงสุดด้วยวิธีการแยกโดยฟองลอยไม่ได้สัมพันธ์กับแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคที่ต่ำสุด และความเสถียรของฟองเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการแยกโดยฟองลอย การเติมโซเดียมไดเอทิลซัลเฟตในการศึกษาการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องทำให้ความเสถียรของฟองและความสามารถในการเกิดฟองดีขึ้น ซึ่งระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมไดเอทิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก โซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลอากาศ 0.15 ลิตรต่อนาที ความสูงโฟม 30 เซนติเมตร และเวลาเก็บกัก 60 นาที มีประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันสูงสุดถึงร้อยละ 96

Yanatatsaneejit และคณะ (2008) ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการแยกน้ำมันดีเซลด้วยการแยกโดยฟองลอย ในการทดลองน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ศึกษา เตรียมจากการผสมระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำกลั่นตามอัตราส่วนโดยปริมาตรน้ำเสียที่เตรียม จากสภาวะการทดลองที่ความเข้มข้น Alfotera ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที พบว่าความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคต่ำสุด แต่ไม่สามารถแยก

น้ำมันดีเซลออกจากน้ำได้ ส่วนความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักซึ่งไม่ได้ให้ค่าแรงตึงผิวต่ำสุดกลับให้ความสามารถในการเกิดฟองสูงสุด และสามารถแยกน้ำมันดีเซลออกจากน้ำได้โดยให้ประสิทธิภาพการขจัดน้ำมันประมาณร้อยละ 90 สรุปได้ว่านอกจากค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค สมบัติของฟองยังเป็นตัวแปรที่สำคัญในการขจัดน้ำมันดีเซลด้วยการแยกโดยฟองลอย และระบบที่ใช้การรบกวนก่อนการแยกจะให้ร้อยละการแยกน้ำมันดีเซลต่ำสุด

Watcharasing และคณะ (2008) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค สมบัติของฟองและประสิทธิภาพการแยกน้ำมันดีเซลออกจากน้ำในระบบการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่อง ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว โซเดียมคลอไรด์ อัตราส่วนน้ำมันต่อน้ำ อัตราการไหลอากาศ และเวลาเก็บกัก จากการทดลองตัวแปรทุกตัวที่ศึกษาและสมบัติของฟองมีผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมันดีเซลในระบบฟองลอยแบบต่อเนื่อง ยกเว้นค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค ที่ความเข้มข้น Alfotera และ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 และ 0.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ โซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำมันต่อน้ำเท่ากับ 1:19 อัตราการไหลอากาศ 0.25 ลิตรต่อนาที เวลาเก็บกัก 60 นาที มีประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันดีเซลสูงสุดร้อยละ 96 เปอร์เซนต์

Watcharasing และคณะ (2008) ศึกษาการนำเทคนิคคอลลอยด์แก๊สแอฟรอน (Colloidal gas aphon, CGA) มาใช้ในการเกิดฟองในการแยกน้ำมันดีเซลในระบบการแยกโดยฟองลอย ตัวแปรที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวและโซเดียมคลอไรด์ ความเร็วที่ใช้กวน เวลาที่ใช้กวน และ อัตราการไหลอากาศ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดฟองแก๊สแอฟรอน ที่ความเข้มข้น Alfotera ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก โซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ความเร็วที่ใช้กวน 5,000 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้กวนนาน 5 นาที จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาผลของการใช้คอลลอยด์แก๊สแอฟรอนในการเกิดฟองต่อประสิทธิภาพการขจัดน้ำมันดีเซลที่อัตราการป้อนเข้าอากาศต่าง ๆ พบว่าอัตราการไหลอากาศ 0.30 ลิตรต่อนาที มีความเหมาะสมในการขจัดน้ำมันดีเซลเนื่องจากให้ค่าเปอร์เซ็นต์การขจัดน้ำมันสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการขจัดน้ำมันพบว่าระบบสมดุที่ใช้แก๊สแอฟรอน มีประสิทธิภาพการขจัดน้ำมันสูงที่สุดถึงร้อยละ 97 เนื่องจากฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีความเสถียรมากกว่าระบบอื่น

Daeseong และ Shripad (2009) ศึกษากลไกการเคลื่อนที่ของฟองอากาศภายในเบดนิ่งสองมิติโดยใช้กล้องวีดีโอความเร็วสูงบันทึกภาพ จากการทดลองฟองอากาศมีการรวมตัวและแตกออก การรวมตัวของฟองอากาศเกิดขึ้นจาก 2 กลไก คือ การรวมตัวที่เกิดจากการบีบอัด (compression) และความเร็วที่ลดลงของฟอง (deceleration) ส่วนการแตกออกของฟองอากาศ

เกิดขึ้นจาก 3 กลไก คือ แรงเฉือน (shear force) ความเร็วที่เพิ่มขึ้น (acceleration) และการชนกันของฟอง (impact) ฟองอากาศทุกขนาดมีความเร็วโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ณ ความเร็วแก๊สและของเหลวหนึ่ง ๆ และความเร็วดังกล่าวแปรผันตรงกับความเร็วแก๊สและของเหลว

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี

สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบ มีประจุลบอยู่ที่ส่วนหัวของโมเลกุล โดยสารลดแรงตึงผิวผลิตจาก Carlo Erba Reagenti มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 94-97 มีมวลโมเลกุล 288.38 และมีสูตรทางเคมี คือ $C_{12}H_{25}SO_4Na$

น้ำมันตัดชิ้นงาน

น้ำมันที่เลือกมาใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำมัน model oil contaminant ซึ่งเป็นน้ำมันที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบมีสารไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนประกอบและมีจำนวนคาร์บอนอะตอมอยู่ในช่วง 15-24 อะตอม ($C_{15}-C_{24}$) และมีจุดเดือดสูงกว่า 316 องศาเซลเซียส

น้ำ

ในการทดลองทั้งหมดใช้น้ำกลั่นทั้งในการเตรียมสารละลายสารลดแรงตึงผิวและในการล้างเครื่องแก้ว โดยเป็นน้ำกลั่นที่ได้จากองค์การเภสัชกรรม (Government Pharmaceutical Organization, Bangkok, Thailand)

สารอิเล็กโทรไลต์

สารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) ชนิดวิเคราะห์ (Analytical grade) มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ผลิตจากบริษัทแลบสแกนเอเชียจำกัด (Labscan Asia Co., Ltd.)

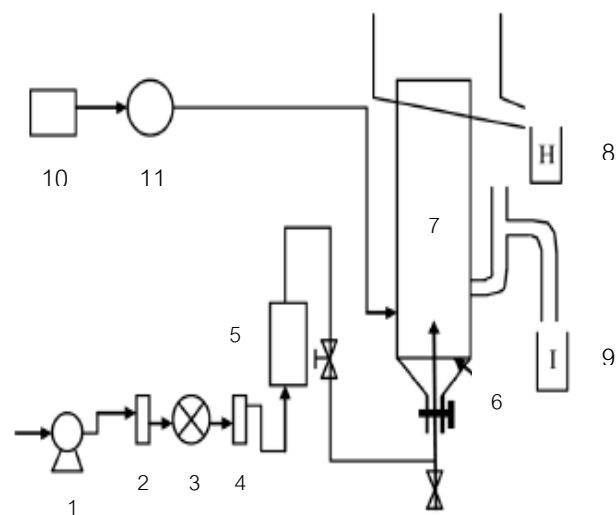
สารเคมีทั้งหมดใช้โดยตรงโดยไม่มีการนำมาทำให้บริสุทธิ์ก่อนการทดลอง

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย

1. เครื่องอัดอากาศ (Compressor)
2. ตัวกรองน้ำ (Water filter)
3. ตัวปรับความดันอากาศ (Air regulator)
4. ตัวกรองน้ำมัน (Oil filter)
5. เครื่องควบคุมการไหล (Mass flow controller, AALBORG รุ่น GFC171S)
6. ตัวกระจายอากาศ (Sintered glass disc)
7. คอลัมน์แก้วเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร
8. ภาชนะเก็บฟอง (Foam receiver)
9. ภาชนะเก็บสารละลายที่ถูกปล่อยออกมา (Effluent receiver)
10. ถังสารป้อนเข้า (Feed tank)
11. เพอร์ริสแตลติก ปั๊ม (Peristaltic pump, Masterflex รุ่น Easy-load II)

แผนผังอุปกรณ์และเครื่องมือแสดงดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสี่ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการวัดค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค ส่วนที่สองเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการขจัดน้ำมันตัดขึ้นงานด้วยฟองลอยแบบต่อเนื่องทั้งในระบบที่มีตัวกลางบรรจุและไม่มีตัวกลางบรรจุ ส่วนที่สามศึกษาสมบัติของฟอง ได้แก่ ความสามารถในการเกิดฟองและความเสถียรของฟอง ศึกษาการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศ และส่วนที่สี่ศึกษาการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศ ในการทดลองทั้งหมดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวและเกลือคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักเทียบกับสารละลาย โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

3.2.1 การวัดแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค

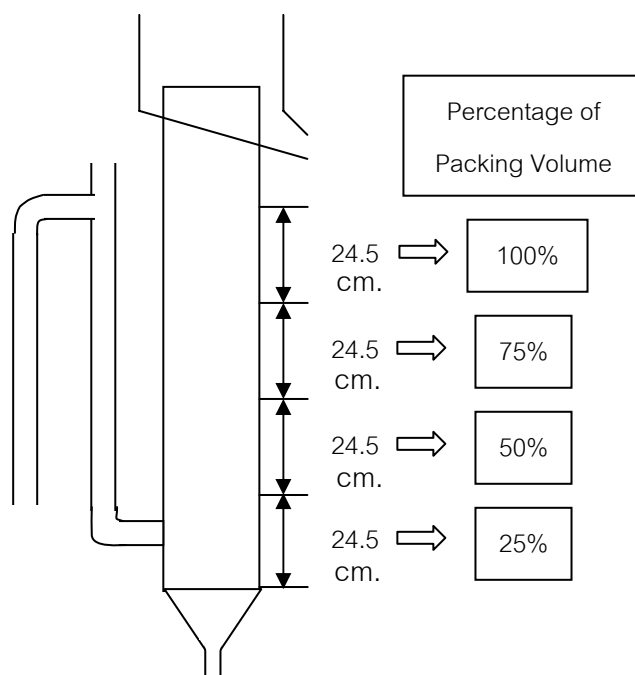
เตรียมสารละลายของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ (ร้อยละ 3-8 โดยน้ำหนัก) และน้ำมันตัดขึ้นงาน โดยแรงตึงผิวระหว่างสารสองเฟสวัดได้จากเครื่องสปินนิงดรอปเทนซิโอมิเตอร์ (Spinning drop Tensiometer, SITE 04, Kruss GmbH, Hamburg)

3.2.2 การทดลองการแยกโดยฟองลอย

รูปที่ 3.1 แสดงระบบการแยกโดยฟองลอยที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยคอลัมน์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร และทำการทดลองในระบบต่อเนื่อง สารละลายที่มีส่วนผสมของสารลดแรงตึงผิว น้ำ น้ำมัน และสารอิเล็กโทรไลต์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ถูกคววนให้เข้ากันภายใต้ภาวะการเกิดไมโครอิมัลชัน โดยความเข้มข้นของน้ำมันตัดขึ้นงานถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ที่ 500 ส่วนในล้านส่วน ตลอดการทดลองเนื่องจากการแยกโดยฟองลอยเป็นระบบที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมันต่ำแต่ยังคงสูงกว่าค่ามาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้ง สารละลายดังกล่าวจะถูกป้อนเข้าสู่คอลัมน์อย่างต่อเนื่องผ่านเพอร์ิสแตลติคัมตามอัตราการไหลที่กำหนด โดยระดับของสารละลายในคอลัมน์สามารถกำหนดได้จากความสูงของที่เก็บตัวอย่างสารละลายซึ่งระดับสารละลายจะบอกถึงความสูงของโฟมด้วย กรณีการทดลองในระบบที่มีตัวกลางบรรจุจะต้องใส่ตัวกลางบรรจุลงในคอลัมน์ตามปริมาตรที่กำหนดก่อนป้อนสารละลาย ส่วนอากาศจะถูกอัดเพื่อป้อนเข้าคอลัมน์ผ่านตัวกรองน้ำ โดยอัตราการไหลอากาศจะ

ถูกควบคุมด้วยเครื่องควบคุมการไหล จากนั้นอากาศจะเข้าสู่ด้านล่างของคอลัมน์ผ่านตัวกระจายอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ให้อากาศผ่านเท่ากับ 16-40 ไมโครเมตร ฟองอากาศที่ผ่านเข้าไปในสารละลายจะกลายเป็นโฟมและไหลล้นออกทางด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งโฟมที่ไหลออกได้ถูกเก็บตัวอย่างทุก 10 นาที เช่นเดียวกันน้ำที่ผ่านการแยกโดยฟองลอยซึ่งไหลออกทางด้านข้างคอลัมน์ถูกเก็บตัวอย่างทุก 10 นาที และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของน้ำมันตัดชิ้นงานและสารลดแรงตึงผิวด้วยวิธีการสกัดด้วยเมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride extraction) และการไตเตรทด้วยเมทิลีนบลูคลอไรด์ (Methylene blue chloride titration) ตามลำดับ ทั้งนี้การทดลองทั้งหมดดำเนินการที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25-27°C

รูปที่ 3.2 แสดงปริมาตรและความสูงของตัวกลางบรรจุในการทดลองกรณีมีตัวกลางบรรจุ โดยจะทดลองที่ปริมาตรตัวกลางบรรจุในคอลัมน์ต่างๆ คือ ปริมาตรตัวกลางบรรจุในคอลัมน์ร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยแต่ละปริมาตรตัวกลางบรรจุมีความสูงของตัวกลางบรรจุในคอลัมน์ต่างกัน 24.5 เซนติเมตร หรือมีความสูงจากตัวกระจายอากาศเท่ากับ 24.5 49 73.5 และ 98 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยชนิดของตัวกลางบรรจุที่ใช้ คือ โลหะพอลริง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร สูง 1.6 เซนติเมตร ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) 339 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร และมีสัดส่วนช่องว่าง (Void fraction) 0.93 ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 3.2 ความสูงและร้อยละของปริมาตรตัวกลางบรรจุในคอลัมน์

ปัจจัยที่ศึกษากรณีไม่มีตัวกลางบรรจุ

ศึกษาประสิทธิภาพการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานด้วยระบบฟองลอยแบบต่อเนื่องในกรณีไม่มีตัวกลางบรรจุ เนื่องจากผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่

1. ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์

ในการทดลองดำเนินการที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 3 ถึง 7 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลอากาศ 150 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที

2. อัตราการไหลอากาศ

ในการทดลองดำเนินการที่อัตราการไหลอากาศตั้งแต่ 150 ถึง 300 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

3. เวลาเก็บกัก

ในการทดลองดำเนินการที่เวลาเก็บกักต่างๆ คือ 20 40 60 และ 80 นาที ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 150 มิลลิลิตรต่อนาที

ปัจจัยที่ศึกษากรณีมีตัวกลางบรรจุ

นำภาวะความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในกรณีไม่มีตัวกลางบรรจุมาศึกษาประสิทธิภาพการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานด้วยระบบฟองลอยแบบต่อเนื่องในกรณีมีตัวกลางบรรจุ เนื่องจากผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่

1. อัตราการไหลอากาศ

ที่ปริมาตรตัวกลางบรรจุหนึ่งๆ ดำเนินการที่อัตราการไหลอากาศตั้งแต่ 150 ถึง 200 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

2. เวลาเก็บกัก

ที่ปริมาตรตัวกลางบรรจุหนึ่งๆ ดำเนินการที่เวลาเก็บกักสารละลายในคอลัมน์ 20 40 60 และ 80 นาที ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที รวมทั้งเปรียบเทียบกับในกรณีที่ไม่มีตัวกลางบรรจุที่อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

3. ปริมาณตัวกลางบรรจุ ดำเนินการที่ปริมาตรตัวกลางบรรจุต่างๆในคอลัมน์ คือ ร้อยละ 25 50 75 และ 100 ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก

3.2.3 การทดสอบความสามารถในการเกิดฟองและความเสถียรของฟอง

การทดลองหาคุณสมบัติของฟองทำโดยการป้อนสารละลายตัวอย่างปริมาตร 100 มิลลิลิตร (Prud'homme และ Khan, 1996) เข้าไปในคอลัมน์แก้วทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร จากนั้นจึงป้อนอากาศที่ผ่านตัวกรองเข้าสู่ด้านล่างคอลัมน์ผ่านตัวกระจายอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ให้อากาศผ่าน 16-40 ไมโครเมตร ด้วยอัตราการไหลอากาศเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อความสูงของโฟมที่เกิดจากการป้อนอากาศผ่านสารละลายคงที่จึงหยุดการป้อนอากาศและบันทึกความสูงโฟมดังกล่าว จากนั้นจับเวลาที่โฟมแตกจนเหลือปริมาตรครึ่งหนึ่งของปริมาตรโฟมในตอนแรกและบันทึกเวลาไว้ ค่าความสามารถในการเกิดฟองหาได้จากอัตราส่วนของความสูงโฟมที่มากที่สุดกับความสูงสารละลายตอนเริ่มต้น ส่วนความเสถียรของฟอง คือ เวลาที่โฟมแตกจนเหลือปริมาตรครึ่งหนึ่ง

ปัจจัยที่ศึกษา

1. ความเข้มข้นสารอิเล็กโทรไลต์

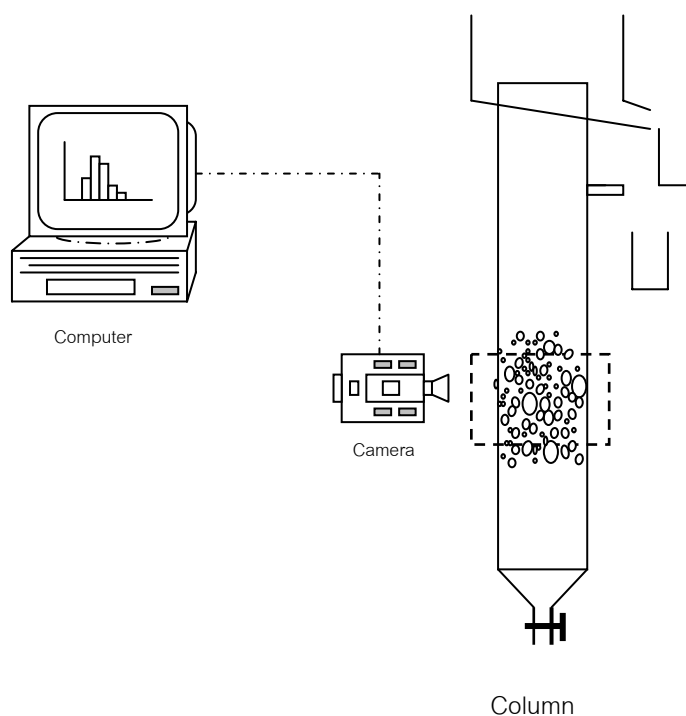
ในการทดลองดำเนินการที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ตั้งแต่ร้อยละ 3 ถึง 7 โดยน้ำหนัก อัตราไหลอากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

2. อัตราการไหลอากาศ

ในการทดลองดำเนินการที่อัตราไหลอากาศตั้งแต่ 150 ถึง 300 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก

3.2.4 การวัดการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศ

การกระจายตัวของขนาดของฟองอากาศในระบบสามารถวัดได้จากวิธีการถ่ายภาพ (Photographic method) โดยถ่ายภาพฟองอากาศด้วยกล้องดิจิทัลความเร็วสูงผ่านซอฟต์แวร์ชื่อ อิมเมจโปรพลัส 5.1 (Image-Pro Plus 5.1) ซึ่งภาพจะถูกส่งกลับจากกล้องเข้ามาที่คอมพิวเตอร์ ภาพที่ได้เป็นภาพสามมิติทำให้เห็นขอบเขตของฟองอากาศที่ลอยอยู่ในสารละลายได้อย่างชัดเจน ซอฟต์แวร์ดังกล่าวสามารถคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วของฟองอากาศทั้งสามแกนได้ อัตโนมัตินำมาสู่สมมติฐานว่าฟองอากาศมีความสมมาตรและมีขนาดเท่ากันตลอดหน้าตัด ระบบที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพการใช้วิธีถ่ายภาพในกระบวนการแยกโดยฟองลอย

วิธีถ่ายภาพเพื่อหาการกระจายตัวของขนาดของฟองอากาศมีข้อจำกัด คือ สามารถถ่ายภาพได้เฉพาะฟองอากาศที่อยู่ใกล้ผนังของคอลัมน์เท่านั้น (ความหนาของผนังคอลัมน์เท่ากับ 2 มิลลิเมตร) และไม่คิดผลที่เกิดจากระยะห่างระหว่างฟองอากาศกับกล้อง

การถ่ายภาพฟองอากาศทำที่ตำแหน่งต่างๆ 3 ตำแหน่งตามความยาวของคอลัมน์ คือ ตำแหน่งที่ฟองอากาศออกจากตัวกระจายอากาศ ตำแหน่งเหนือตัวกลางบรรจุ และตำแหน่งที่ฟองอากาศกำลังลอยขึ้นสู่เฟสเฟิม โดยการถ่ายภาพเพื่อวัดขนาดของฟองอากาศใช้ความเร็วชัตเตอร์ (Shutter speed) เท่ากับ 1/2000 วินาที และใช้ซอฟต์แวร์ในการคำนวณขนาดฟองจากภาพถ่ายฟองอากาศอย่างน้อย 500 ฟอง เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์การกระจายตัวของขนาดฟองอากาศ

ปัจจัยที่ศึกษา

ระบบมีความเข้มข้นของไซเดียมโตเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นไซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาเก็บกัก 60 นาที

1. ปริมาตรของตัวกลางบรรจุ

เปรียบเทียบขนาดของฟองอากาศ ณ ตำแหน่งเดียวกันของคอลัมน์ ทั้งในกรณีมีและไม่มีตัวกลางบรรจุ

2. สารละลาย

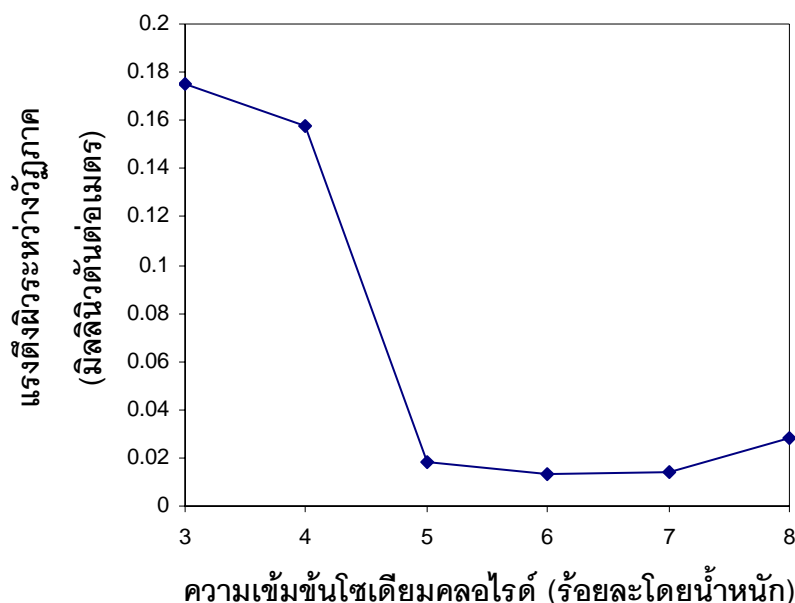
เปรียบเทียบขนาดของฟองอากาศ ณ ตำแหน่งเดียวกันของคอลัมน์ ระหว่างการใช้น้ำกับสารละลายสารลดแรงตึงผิว

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่อแรงดึงผิวระหว่างวัฏภาค

จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Lapee-e, 2006) ศึกษาการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานด้วยระบบฟองลอยพบว่าประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงดึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตเท่ากับร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงวัดแรงดึงผิวระหว่างวัฏภาคของน้ำมันตัดชิ้นงานและสารละลายของสารลดแรงดึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และศึกษาความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ในช่วงร้อยละ 3-8 โดยน้ำหนัก เพื่อหาความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ที่ทำให้แรงดึงผิวระหว่างวัฏภาคต่ำสุด ดังรูป 4.1 แสดงผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่อแรงดึงผิวระหว่างวัฏภาค พบว่า ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 3-6 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้แรงดึงผิวมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เพิ่มจากร้อยละ 6-8 โดยน้ำหนัก การลดลงของค่าแรงดึงผิวระหว่างวัฏภาคเมื่อเติมโซเดียมคลอไรด์ในระบบมีสาเหตุจากประจุตรงกันข้าม (Counter ions) ในที่นี้คือ โซเดียมไอออน (Na^+) จะไปลดแรงผลักระหว่างหัวของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตจึงทำให้โมเลกุลของสารลดแรงดึงผิวดังกล่าวสามารถเรียงตัวอยู่บนชั้นผิวระหว่างชั้นน้ำและชั้นน้ำมันได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์จะทำให้โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตเคลื่อนย้ายไปละลายในชั้นน้ำมันมากขึ้น (Salt in and Salt out effect) แรงดึงผิวระหว่างวัฏภาคจึงเพิ่มขึ้น จากค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดึงผิวระหว่างวัฏภาคสามารถสรุปได้ว่า ผลของการเติมเกลือ (โซเดียมคลอไรด์) พบว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนชนิดไมโครอิมัลชันจากวินเซอร์แบบ I ไปเป็นแบบ III และแบบ II โดยในช่วงความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 5-7 มีค่าแรงดึงผิวระหว่างวัฏภาคต่ำมาก (Ultra low) หรือมีค่าอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-2} บ่งชี้ว่าเกิดไมโครอิมัลชันในวินเซอร์แบบ III



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์และแรงตึงผิวระหว่างวัสดุภาคที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของน้ำต่อน้ำมัน 1:1

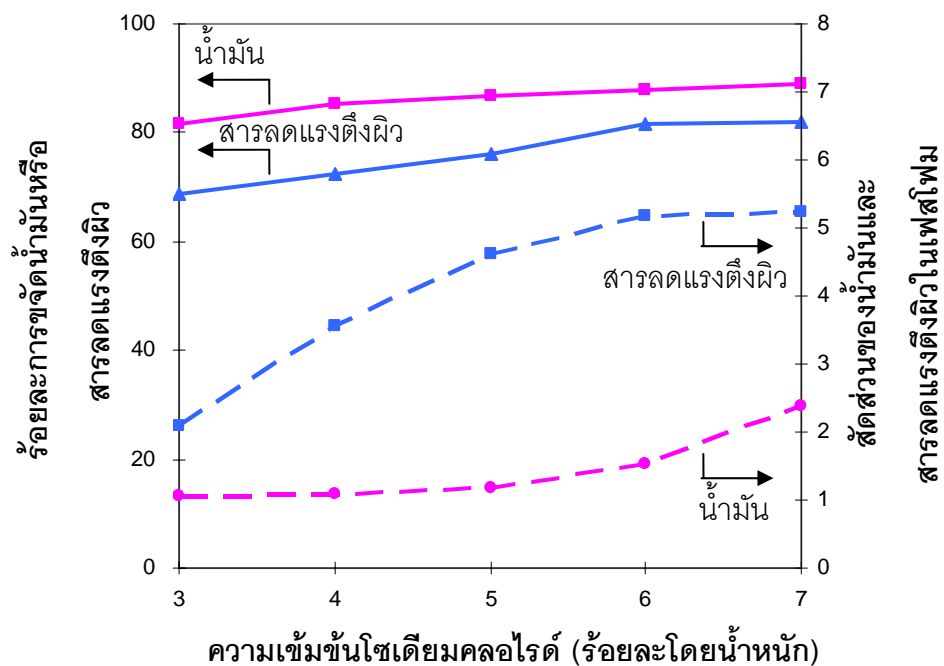
4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพระบบการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่อง

4.2.1 ระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุ

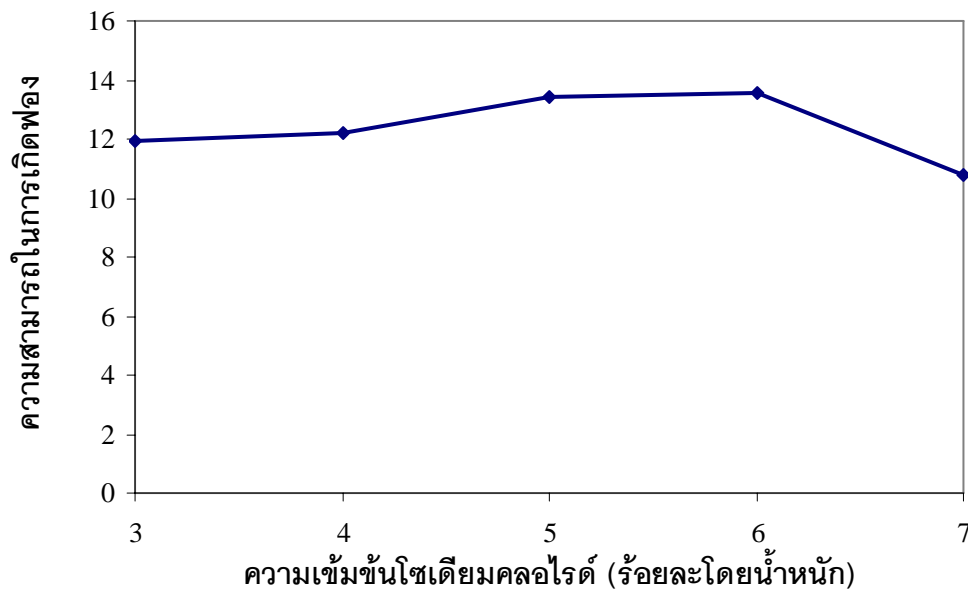
ผลจากความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์

การทดลองในกรณีที่ไม่มีตัวกลางบรรจุเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกน้ำมันตัดขึ้นงานด้วยระบบฟองลอยแบบต่อเนื่องที่มีความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดขึ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลอากาศ 150 มิลลิเมตรต่อนาที และเวลาเก็บกักเท่ากับ 60 นาที ดังแสดงในรูป 4.2 ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการขจัดน้ำมันตัดขึ้นงานสูงขึ้นเนื่องจากโซเดียมคลอไรด์จะลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัว (ส่วนที่มีขั้ว) ของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อกันทำให้สารลดแรงตึงผิวสามารถดูดซับที่ฟองอากาศได้มากขึ้น น้ำมันจึงสามารถเกาะและกระจายตัวอยู่บนผิวได้เพิ่มขึ้นและถูกขจัดออกจากระบบได้มากขึ้น และทำให้สัดส่วนน้ำมันที่อยู่ในเฟสโฟม (Enrichment ratio of cutting oil) เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับความสามารถในการขจัดสารลดแรงตึงผิวและสัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวที่

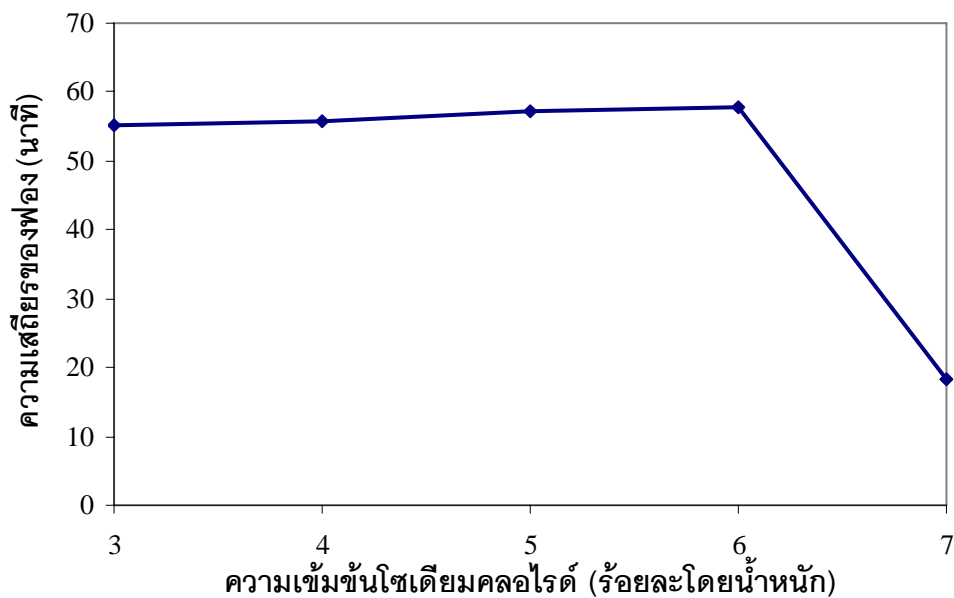
เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นซึ่งเหตุผลสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับที่ใช้ อธิบายการขจัดน้ำมันและสัดส่วนน้ำมันในเฟสโพลีเมอร์ จะเห็นว่าความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ที่ เพิ่มขึ้นส่งผลต่อร้อยละการขจัดสารลดแรงตึงผิวมากกว่าน้ำมันจึงทำให้สัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในเฟสโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับสัดส่วนของน้ำมันในเฟสโพลีเมอร์ นอกจากนี้แรงผลักดันที่ ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวที่ลดลงเนื่องมาจากความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 3 - 6 โดยน้ำหนัก ยังทำให้สมบัติของฟอง คือ ความสามารถในการเกิดฟองและความเสถียรของ ฟองเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 4.3 และ 4.4 แต่ค่าดังกล่าวจะลดลงเมื่อความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ มากกว่าร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก อาจเนื่องมาจากน้ำมันสามารถสัมผัสกับฟองอากาศได้เพิ่มขึ้นเมื่อ โซเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้สมบัติของฟองที่ดีขึ้นเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมให้ความสามารถในการขจัด น้ำมันของระบบดีขึ้น ที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 6 โดยน้ำหนักจะมีร้อยละการ ขจัดน้ำมันสูงที่สุดจึงเลือกความเข้มข้นนี้ในการศึกษาตัวแปรอื่นต่อไป



รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟอง ลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดขึ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลอากาศ 150 มิลลิลิตรต่ออนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที



รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่อความสามารถในการเกิดฟองในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดชิ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลอากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที

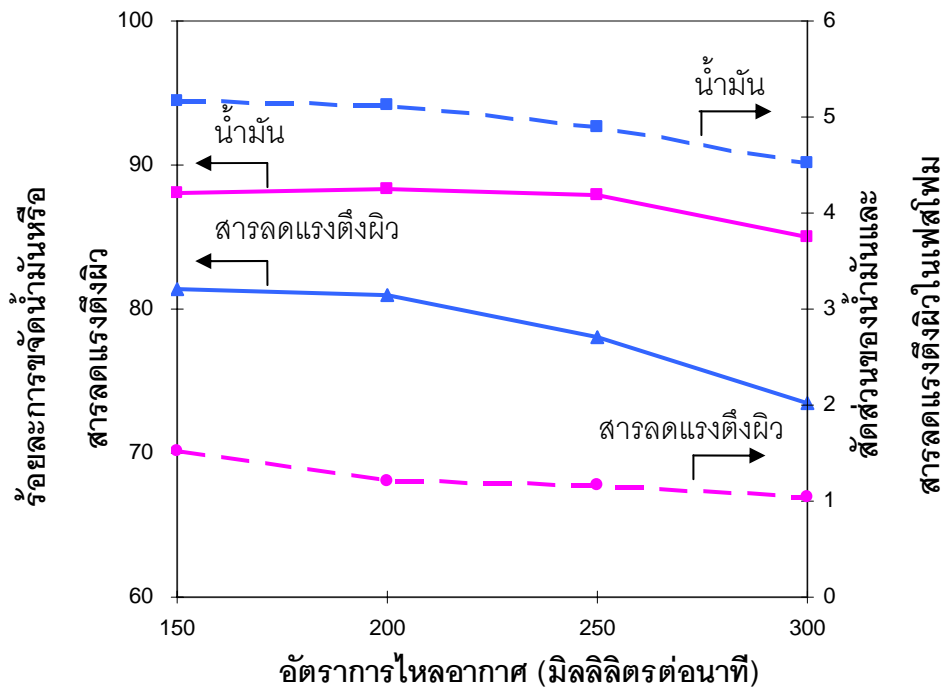


รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่อความเสถียรของฟองในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดชิ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลอากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที

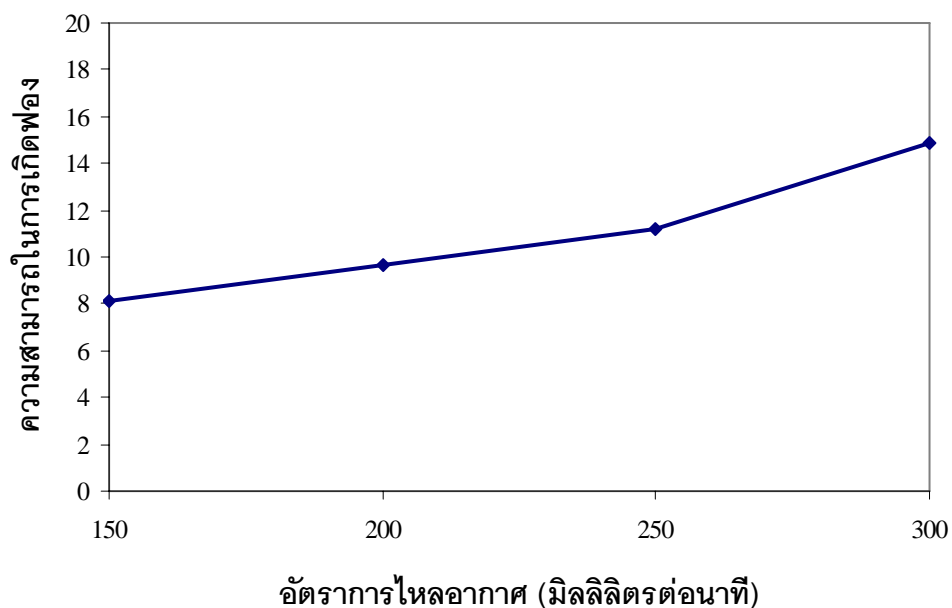
ผลจากอัตราการไหลอากาศ

ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อตัวแปรต่าง ๆ ในรูปที่ 4.5 ทดลองในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมไดออกไซด์ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกักเท่ากับ 60 นาที แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลอากาศที่เพิ่มขึ้นในช่วง 150-250 มิลลิลิตรต่อนาที ไม่ทำให้อัตราการขจัดน้ำมันมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลอากาศจนเท่ากับ 300 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการขจัดน้ำมันมีค่าลดลงเนื่องจากอัตราการไหลอากาศที่สูงทำให้ฟองอากาศภายในคอลัมน์มีการไหลแบบปั่นป่วนและแตกได้ส่งผลให้การขจัดน้ำมันลดลง อัตราการขจัดสารลดแรงตึงผิวลดลงเนื่องจากฟองอากาศมีเวลาอยู่ในคอลัมน์น้อยลงนั่นคือมีเวลาเพื่อให้อัตราการขจัดสารลดแรงตึงผิวและน้ำมันเกาะบนผิวฟองอากาศได้น้อยลงจึงสามารถพาน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวออกจากระบบได้ลดลง ส่วนสัดส่วนของน้ำมันในเฟสโพลลดลงเล็กน้อยเนื่องจากฟองอากาศมีความเร็วเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟองในเฟสโพลมีเวลาในการทำให้น้ำมันไหลออกจากโพลลดลงจึงมีน้ำมันอยู่ในเฟสโพลมากเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันทำให้ค่าสัดส่วนน้ำมันในเฟสโพลลดลงเช่นเดียวกับสัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในเฟสโพล จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที มีอัตราการขจัดน้ำมันสูงสุดถึงร้อยละ 88.37 จึงเลือกอัตราการไหลอากาศดังกล่าวในการศึกษาตัวแปรถัดไป

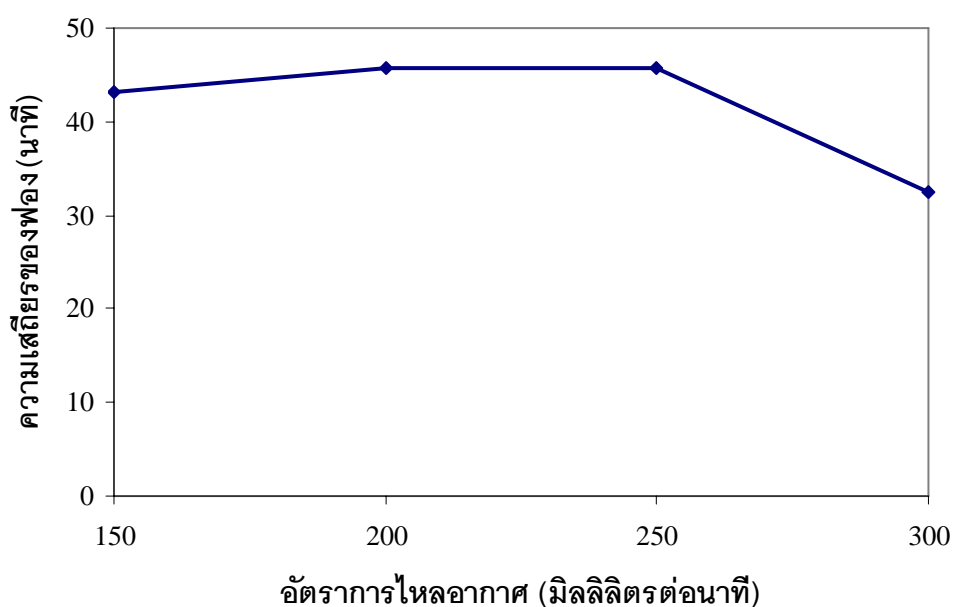
ผลของอัตราการไหลอากาศต่อความสามารถในการเกิดฟองและความเสถียรของฟอง แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 โดยอัตราการไหลอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการเกิดฟองสูงขึ้น อธิบายได้จากปริมาณฟองอากาศที่ผ่านเข้าสู่สารละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้น และ Zouboulis และคณะ (Zouboulis *et al.*, 1994) พบว่าที่อัตราการไหลอากาศสูงสามารถทำให้เกิดฟองปริมาณมากโดยฟองเหล่านี้จะสะสมกันเป็นชั้นของเฟสโพล ดังนั้นปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้เฟสโพลมีความสูงเพิ่มขึ้นนำไปสู่ความสามารถในการเกิดฟองที่สูงขึ้น ความเสถียรของฟองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงอัตราการไหลอากาศที่น้อยกว่า 250 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นความเสถียรของฟองจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออัตราการไหลอากาศมากกว่า 250 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากความเร็วการไหลวน (Circulation velocity) ที่เกิดจากกลุ่มของฟองอากาศที่ไหลขึ้นซึ่งทำให้เกิดความปั่นป่วนในบริเวณที่เกิดการลอยตัวเป็นผลให้ฟองที่เกิดขึ้นแตกได้



รูปที่ 4.5 ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที



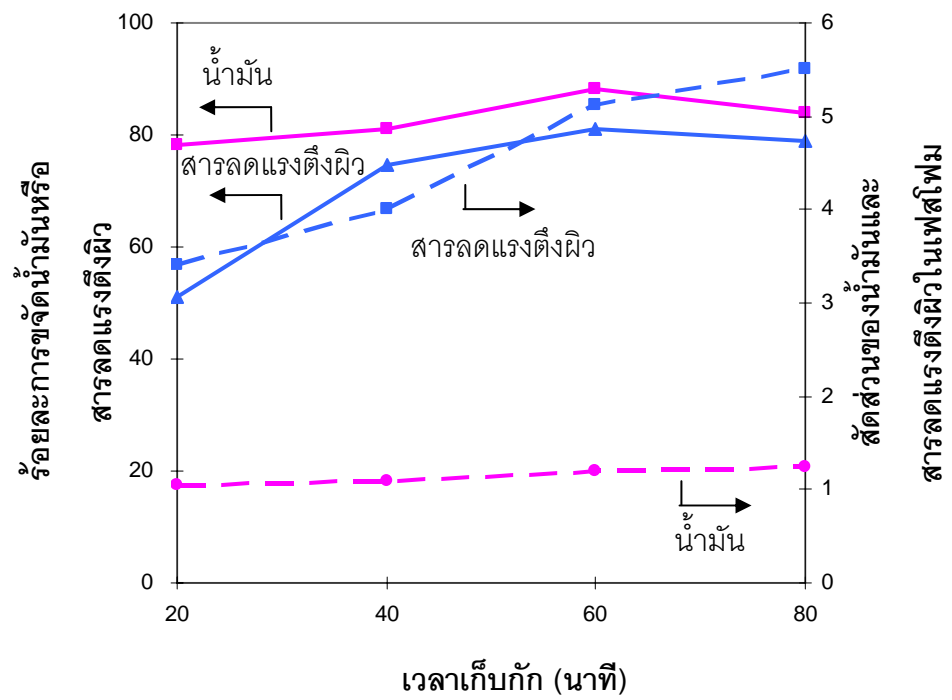
รูปที่ 4.6 ผลของอัตราการไหลอากาศต่อความสามารถในการเกิดฟองในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที



รูปที่ 4.7 ผลของอัตราการไหลอากาศต่อความเสถียรของฟองในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

ผลจากเวลาเก็บกัก

ความสัมพันธ์ของเวลาเก็บกักกับตัวแปรต่าง ๆ ของกระบวนการแยกโดยฟองลอย แสดงในรูปที่ 4.8 โดยทดลองที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเท่ากับร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิเมตรต่อนาที จะเห็นว่าเมื่อเวลาที่สารละลายอยู่ในคอลัมน์นานขึ้นตั้งแต่ 20 ถึง 60 นาที จะทำให้ร้อยละการขจัดน้ำมันสูงขึ้นเนื่องจากสารละลายที่อยู่ในคอลัมน์นานขึ้น ฟองอากาศที่ผ่านเข้าสู่สารละลายสามารถรวมตัวกับน้ำมันในสารละลายได้มากขึ้นพาน้ำมันออกจากระบบได้เพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของน้ำมันในเฟสโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวจะถูกพาออกจากระบบได้มากขึ้นเช่นกัน เมื่อเวลาเก็บกักเพิ่มขึ้นเป็น 80 นาที ร้อยละการขจัดน้ำมันจะเริ่มคงที่เนื่องจากเวลาเก็บกักอยู่คอลัมน์คืออัตราส่วนของปริมาตรสารละลายในคอลัมน์ต่ออัตราการป้อนเข้าสารละลายดังนั้นเวลาเก็บกักที่นานขึ้นจึงหมายถึงอัตราป้อนเข้าสารละลายน้อยลงทำให้ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในระบบน้อยลงไม่เพียงพอที่จะทำให้ไขมันเกาะที่ผิวฟองอากาศได้มากขึ้น ในทำนองเดียวกันสามารถใช้เหตุผลนี้ในการอธิบายการขจัดสารลดแรงตึงผิวออกจากระบบสัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในโพลิเมอร์ได้ จากผลการทดลองเวลาเก็บกักเท่ากับ 60 นาที มีความสามารถในการขจัดน้ำมันสูงที่สุด

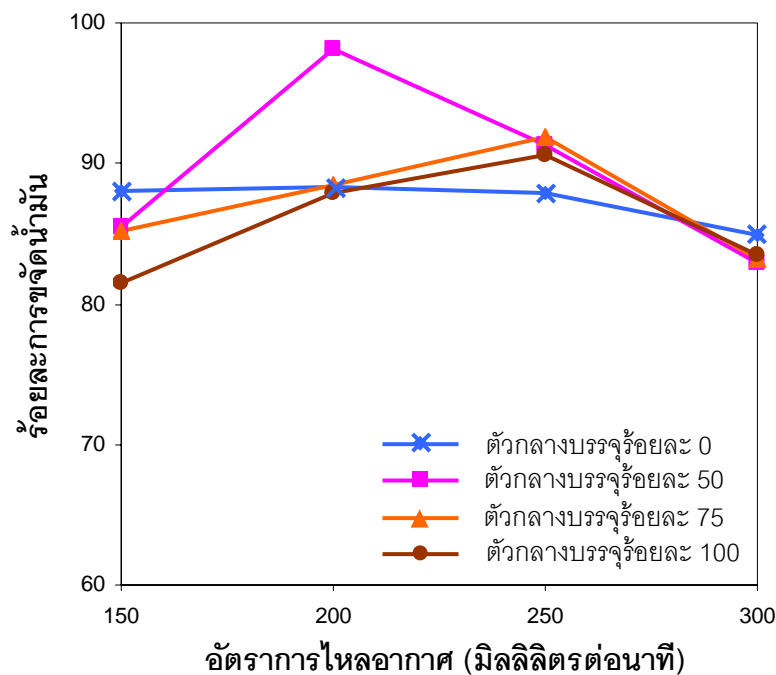


รูปที่ 4.8 ผลของเวลาเก็บกักที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิเมตรต่อนาที

4.2.2 ระบบที่มีตัวกลางบรรจุ

ผลจากอัตราการไหลอากาศ

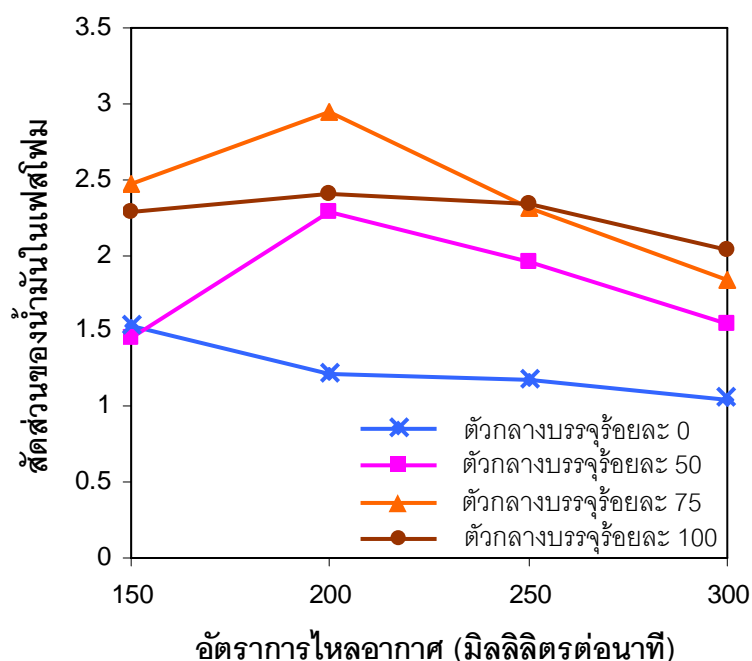
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอากาศกับร้อยละการขจัดน้ำมันที่ปริมาตรตัวกลางบรรจุต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นโซเดียมไดออกไซด์เฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน และเวลาเก็บกักเท่ากับ 60 นาที จะเห็นว่าในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่อัตราการไหลอากาศ 150-250 มิลลิลิตรต่อนาที ร้อยละการขจัดน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่จะลดลงเมื่ออัตราการไหลอากาศเท่ากับ 250-300 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลอากาศค่าหนึ่งในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 ของปริมาตรคอลัมน์ มีร้อยละการขจัดน้ำมันสูงกว่าระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 75 และ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ โดยปริมาตรของตัวกลางบรรจุเท่ากับร้อยละ 50 ของปริมาตรคอลัมน์ จะมีร้อยละการขจัดน้ำมันสูงที่สุดเท่ากับ 98.10 ที่อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาตรของตัวกลางบรรจุเท่ากับร้อยละ 75 และ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ มีร้อยละการขจัดสูงสุดเท่ากับ 91.90 และ 90.60 ตามลำดับ เมื่ออัตราการไหลอากาศเท่ากับ 250 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อเปรียบเทียบระบบที่มีตัวกลางบรรจุกับระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุแล้วพบว่าระบบที่มีตัวกลางบรรจุมีประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันสูงกว่าเนื่องจากตัวกลางบรรจุทำให้ฟองอากาศอยู่ในคอลัมน์นานขึ้น หยदन้ำมันในสารละลายจึงรวมตัวกับฟองอากาศได้ดีขึ้นหรือมีอัตราการถ่ายโอนมวลสูงขึ้นส่งผลให้ร้อยละการขจัดน้ำมันสูงขึ้น ปริมาณตัวกลางบรรจุที่มากเกินไปจะทำให้ปริมาณสารละลายที่ถูกกักอยู่ในคอลัมน์ลดลงเป็นสาเหตุให้ความสามารถในการขจัดน้ำมันลดลง ในกรณีที่มีร้อยละการขจัดน้ำมันสูงสุดของระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 75 และ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ ต้องการอัตราการไหลอากาศสูงกว่าระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 ของปริมาตรคอลัมน์ อธิบายได้จากฟองอากาศการเคลื่อนที่ของฟองอากาศผ่านตัวกลางบรรจุปริมาณมากจะมีความเร็วช้ากว่าการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางบรรจุที่มีปริมาณน้อย การใช้อัตราการไหลอากาศต่ำในระบบที่มีตัวกลางบรรจุมากจึงอาจทำให้ฟองอากาศอยู่ในคอลัมน์นานเกินไปและมีโอกาสแตกก่อนที่จะขึ้นไปถึงด้านบนของคอลัมน์ในเฟสโพลี ส่งผลให้น้ำมันที่เกาะอยู่บนผิวฟองอากาศอาจกลับลงมาอยู่ในสารละลายได้ใหม่อีกครั้ง ดังนั้นระบบที่มีตัวกลางบรรจุมากจึงต้องใช้ใช้อัตราการไหลอากาศที่สูงกว่าระบบที่มีตัวกลางบรรจุน้อย



รูปที่ 4.9 ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อร้อยละการขจัดน้ำมันของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่มีความเข้มข้นโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอากาศกับสัดส่วนน้ำมันในเฟสโฝม ในกรณีที่มีตัวกลางบรรจุที่อัตราการไหลอากาศ 150-200 มิลลิลิตรต่อนาที สัดส่วนของน้ำมันในเฟสโฝมมีค่าเพิ่มขึ้นเพราะอัตราการไหลอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้มีจำนวนฟองอากาศเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีตัวกลางบรรจุช่วยให้อยู่ในคอลัมน์นานขึ้นจึงมีโอกาสสัมผัสกับน้ำมันได้มากขึ้น และพาฟองอากาศขึ้นมาสู่ด้านบนได้ หลังจากนั้นเมื่ออัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของน้ำมันในเฟสโฝมลดลง โดยสาเหตุจะอธิบายในส่วนถัดไป ในช่วงอัตราการไหลอากาศน้อยกว่า 250 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ปริมาตรของตัวกลางบรรจุร้อยละ 75 ของปริมาตรคอลัมน์มีสัดส่วนน้ำมันในเฟสโฝมสูงกว่าปริมาตรของตัวกลางบรรจุร้อยละ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ เพราะเมื่ออัตราการไหลอากาศน้อยและปริมาตรของตัวกลางบรรจุมากจะทำให้ฟองอากาศอยู่ในคอลัมน์นานเกินไป และอาจแตกก่อนเคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบนจึงพาน้ำมันขึ้นไปยังเฟสโฝมได้น้อย จากผลการทดลองพบว่าระบบที่มีตัวกลางบรรจุช่วยให้สัดส่วนของน้ำมันในเฟสโฝมสูงกว่าระบบที่ไม่มี

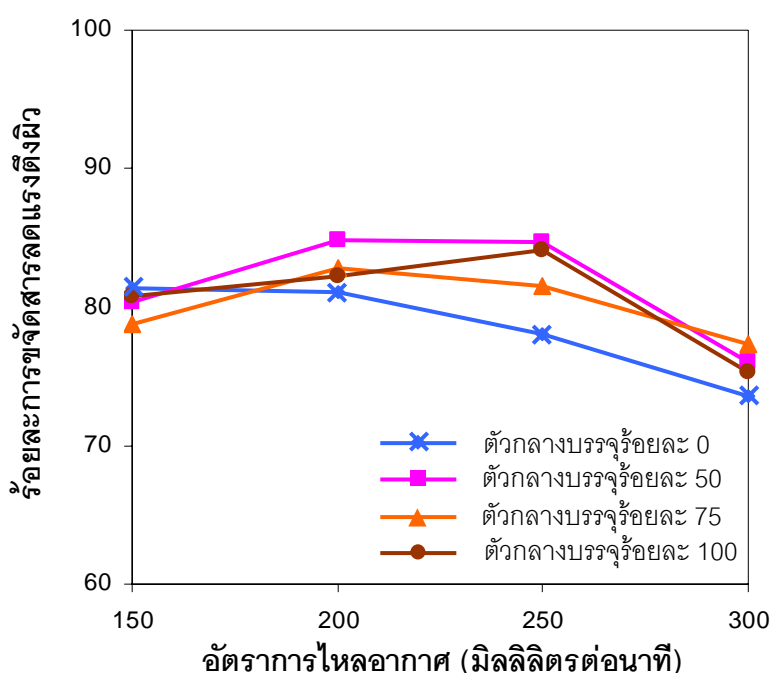
ตัวกลางบรรจุ ทั้งนี้จะอธิบายสาเหตุในส่วนของอัตราการผลิตฟอง อัตราการไหลอากาศน้อยกว่า 250 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาตรของตัวกลางบรรจุร้อยละ 75 ของปริมาตรคอลัมน์ มีสัดส่วนน้ำมันในเฟสโคมสูงที่สุดเท่ากับ 2.95 ส่วนอัตราการไหลอากาศที่มากกว่า 250 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาตรของตัวกลางบรรจุร้อยละ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ จะมีสัดส่วนน้ำมันในเฟสโคมสูงที่สุดเท่ากับ 2.03



รูปที่ 4.10 ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อสัดส่วนของน้ำมันในเฟสโคมของกระบวนการแยก โดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุ ที่ความเข้มข้นไซเดียมไดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นไซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอากาศกับร้อยละการขจัดสารลดแรงตึงผิว จะเห็นว่าในกรณีไม่มีตัวกลางบรรจุอัตราการไหลอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดสารลดแรงตึงผิวลดลง ในขณะที่กรณีมีตัวกลางบรรจุ เมื่ออัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการขจัดสารลดแรงตึงผิวจะสูงขึ้นจากนั้นจะลดลงเมื่ออัตราการไหลอากาศสูงกว่า 250 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากที่อัตราการไหลอากาศสูงจำนวนฟองอากาศที่อยู่ใน

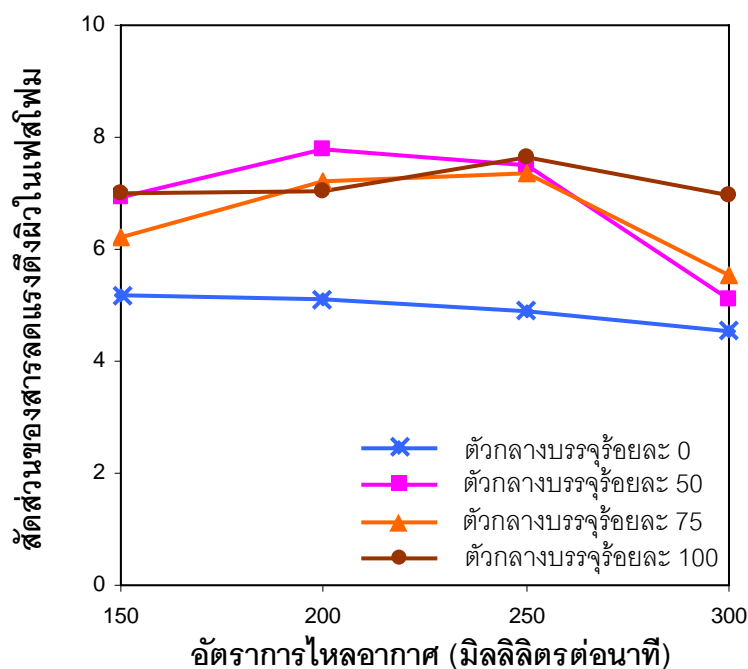
คอรัลมีปริมาณมากอาจทำให้ฟองอากาศชนกันและแตกก่อนที่จะพาสารลดแรงตึงผิวขึ้นสู่ด้านบนของคอรัลมี เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่าระบบที่มีตัวกลางบรรจุจะมีประสิทธิภาพในการขจัดสารลดแรงตึงผิวสูงกว่าระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุในช่วงอัตราการไหลอากาศ 200-300 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากตัวกลางบรรจุทำให้ฟองอากาศอยู่ในคอรัลมีนานขึ้นสารลดแรงตึงผิวจึงสามารถเกาะบนผิวของฟองอากาศได้เพิ่มขึ้น ปริมาตรตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 มีการขจัดสารลดแรงตึงผิวสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 84.90 ที่อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.11 ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อร้อยละการขจัดสารลดแรงตึงผิวของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอากาศและสัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในเฟสโฟมแสดงดังรูปที่ 4.12 อัตราการไหลอากาศที่เพิ่มขึ้นในช่วง 150-250 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้ระบบที่มีตัวกลางบรรจุมีแนวโน้มของสัดส่วนสารลดแรงตึงผิวในเฟสโฟมเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณฟองอากาศที่ไหลเข้าสู่คอรัลมีมากขึ้นจึงพาสารลดแรงตึงผิวขึ้นมาสู่เฟสโฟมได้มากขึ้น

และเมื่ออัตราการไหลอากาศสูงกว่า 250 มิลลิลิตรต่ออนาที สัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวลดลง เนื่องจากจากการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองระบบพบว่าในกรณีที่มีตัวกลางบรรจุ มีสัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในเฟสโพลิเมอร์มากกว่าเนื่องจากฟองอากาศที่ต้องไหลผ่านตัวกลางบรรจุจะอยู่ในคอลัมน์ได้นานขึ้นทำให้มีเวลาในการรวมตัวกับสารลดแรงตึงผิวได้มากขึ้นและสามารถพาขึ้นไปยังส่วนบนของคอลัมน์ได้มากกว่าจึงมีสัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวจึงมากกว่าในกรณีไม่มีตัวกลางบรรจุ สัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวมีค่ามากที่สุดเมื่อปริมาตรตัวกลางบรรจุเท่ากับร้อยละ 50 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่ออนาที

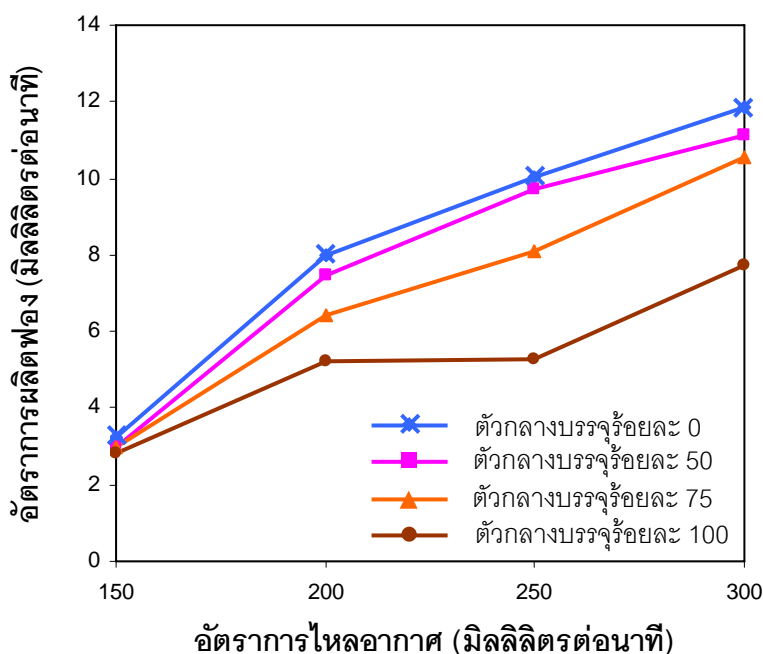


รูปที่ 4.12 ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อสัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในเฟสโพลิเมอร์ของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นไซเดียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นไซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่ออัตราการผลิตฟอง (Foam production rate) แสดงดังรูปที่ 4.13 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ปริมาตรของตัวกลางบรรจุหนึ่ง ๆ อัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการผลิตฟองเพิ่มขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการไหล

อากาศเดียวกันระบบที่ภายในคอลัมน์ไม่มีหรือมีปริมาตรของตัวกลางบรรจุอยู่น้อยจะมีอัตราการผลิตโพลีเมอร์สูงกว่าระบบที่มีปริมาตรของตัวกลางบรรจุอยู่มาก

ผลจากอัตราการผลิตพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์ในเฟสโพลีเมอร์มีการทำให้น้ำไหลออกจากโพลีเมอร์ (ชั้นของเหลวที่อยู่ระหว่างพอลิเมอร์กับอากาศ) ลดลง เมื่อมีน้ำเป็นองค์ประกอบในโพลีเมอร์มากจึงทำให้สัดส่วนของน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวลดลงทั้งในกรณีไม่มีและมีตัวกลางบรรจุ ดังแสดง ในรูป 4.10 และ 4.12 สัดส่วนของน้ำมันในเฟสโพลีเมอร์ที่มีตัวกลางบรรจุ จะสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีตัวกลางบรรจุ เนื่องจากเมื่อมีตัวกลางบรรจุอัตราการผลิตโพลีเมอร์ลดลงทำให้น้ำในเฟสโพลีเมอร์มีเวลาทำให้น้ำไหลออกจากพอลิเมอร์นานขึ้น ความเข้มข้นของน้ำมันในเฟสโพลีเมอร์จึงเพิ่มขึ้น



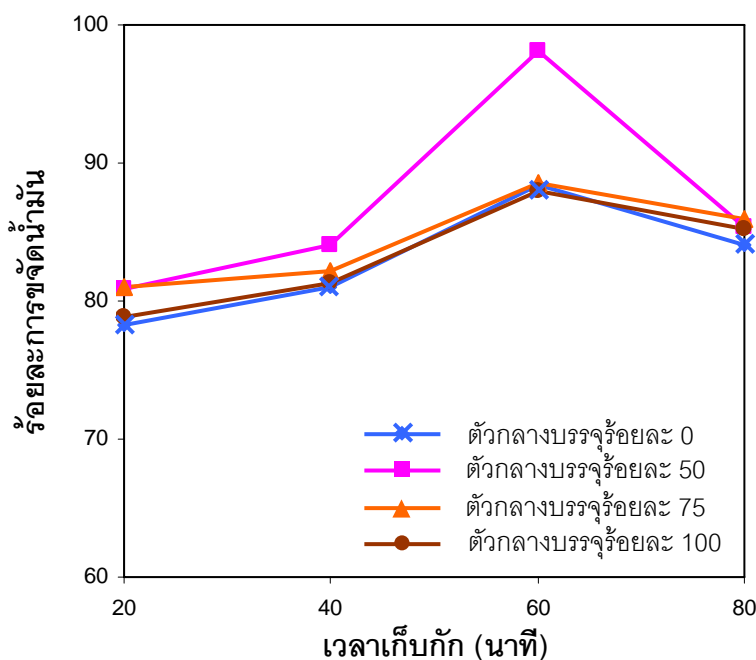
รูปที่ 4.13 ผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่ออัตราการผลิตพอลิเมอร์ของกระบวนการแยกโดยพอลิเมอร์แบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

จากการศึกษาผลของอัตราการไหลอากาศพบว่าการใส่ตัวกลางบรรจุในระบบทำให้อัตราการผลิตพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีตัวกลางบรรจุ โดย

ระบบที่มีอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาตรของตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 ของปริมาตรคอลัมน์ ให้ประสิทธิภาพการขจัดน้ำมันสูงสุดถึงร้อยละ 98.10

ผลจากเวลาเก็บกัก

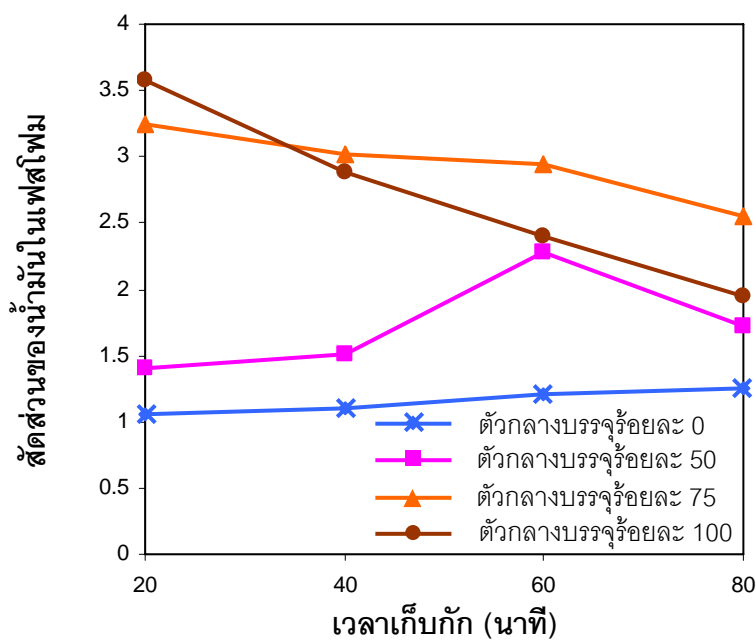
จากความสัมพันธ์ของเวลาเก็บกักกับร้อยละการขจัดน้ำมันที่ความเข้มข้นโซเดียม โทเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที รูปที่ 4.14 พบว่าในกรณีที่มีตัวกลางบรรจุเมื่อเพิ่มเวลาเก็บกักของสารละลายจาก 20 นาที ถึง 60 นาที ร้อยละการขจัดน้ำมันเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารละลายมีเวลาอยู่ในคอลัมน์ได้นานขึ้นฟองอากาศที่กำลังลอยขึ้นผ่านตัวกลางบรรจุจึงสามารถรวมตัวกับน้ำมันในสารละลายได้ดีขึ้น (น้ำมันเกาะอยู่ที่ผิวของฟองอากาศได้เพิ่มขึ้นขึ้น) น้ำมันจึงถูกพาออกจากระบบได้เพิ่มขึ้น แต่ร้อยละการขจัดน้ำมันลดลงเมื่อเพิ่มเวลาเก็บกักสารละลายเป็น 80 นาที สาเหตุจะอธิบายในส่วนถัดไป ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 60 นาที ระบบที่มีปริมาตรของตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 ของปริมาตรคอลัมน์มีความสามารถในการขจัดน้ำมันสูงที่สุดร้อยละ 98.10



รูปที่ 4.14 ผลของเวลาเก็บกักต่อร้อยละการขจัดน้ำมันของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่มีความเข้มข้นโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บกักและสัดส่วนน้ำมันในเฟสโผล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวลาเก็บกักที่เพิ่มขึ้นในระบบที่มีตัวกลางบรรจุอยู่น้อยจะมีสัดส่วนน้ำมันในเฟสโผลเพิ่มขึ้นเพราะเวลาที่สารละลายอยู่ในคอลัมน์นานพอที่ฟองอากาศจะรวมตัวกับน้ำมันในสารละลายและพาขึ้นมาในเฟสโผลได้ แต่ระบบที่มีตัวกลางบรรจุอยู่มากสัดส่วนน้ำมันในเฟสโผลมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากในระบบดังกล่าวสารละลายจะถูกกักอยู่ในคอลัมน์น้อยกว่าระบบที่มีตัวกลางบรรจุอยู่น้อยและเวลาในการเก็บกักสารละลายที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในระบบลดลง น้ำมันจึงเกาะบนผิวฟองอากาศได้น้อยลง รวมทั้งฟองอากาศในระบบดังกล่าวใช้เวลาอยู่ในคอลัมน์นานกว่าระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุจึงอาจทำให้ฟองอากาศแตกก่อนขึ้นสู่เฟสโผลได้ โดยน้ำมันที่ยังคงอยู่ในระบบเหล่านี้ อาจเกาะอยู่บนผิวของตัวกลางบรรจุ

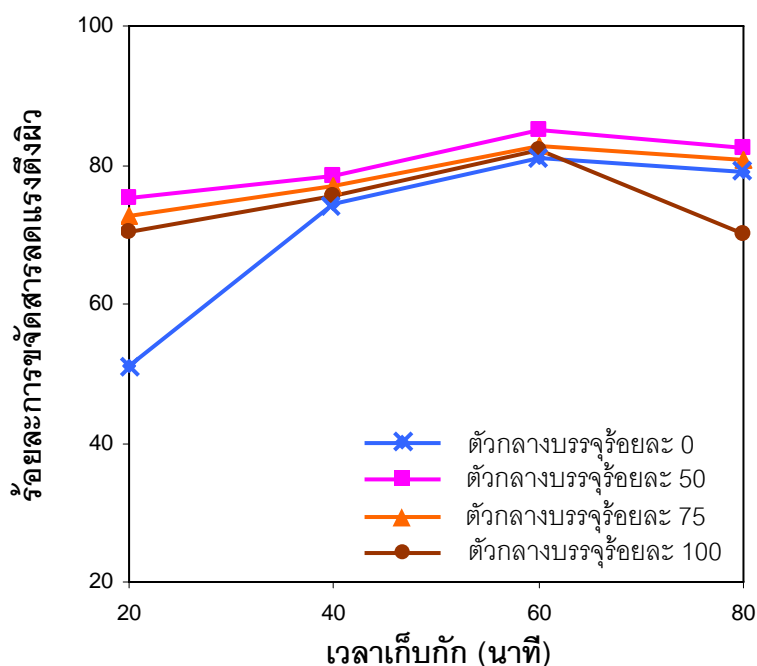
ได้โดยในระบบที่มีตัวกลางบรรจุมากจะมีพื้นที่ให้น้ำมันเกาะมากจึงทำให้ระบบที่มีตัวกลางบรรจุมากมีร้อยละการขจัดน้ำมันเพิ่มขึ้นแต่มีสัดส่วนของน้ำมันในเฟสโพลลดลง



รูปที่ 4.15 ผลของเวลาเก็บกักต่อสัดส่วนน้ำมันในเฟสโพลของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

ผลของเวลาเก็บกักต่อร้อยละการขจัดสารลดแรงตึงผิวแสดงดังรูป 4.16 ร้อยละการขจัดสารลดแรงตึงผิวของระบบที่มีตัวกลางบรรจุสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาเก็บกักในช่วง 20-60 นาทีสามารถอธิบายได้จากสารลดแรงตึงผิวในสารละลายมีเวลาสัมผัสกับฟองอากาศได้มากขึ้นสารลดแรงตึงผิวจึงสามารถเกาะบนผิวของฟองอากาศได้ดีขึ้นและถูกนำออกไปจากระบบได้มากขึ้น ที่เวลาเก็บกักเท่ากับ 80 นาที ระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 และ 75 ของปริมาตรคอลัมน์ มีการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการขจัดไม่มากนัก ในขณะที่ปริมาตรของตัวกลางบรรจุร้อยละ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ มีร้อยละการขจัดสารลดแรงตึงผิวลดลงเนื่องจากที่ปริมาตรตัวกลางบรรจุมากจะมีปริมาณสารละลายที่ถูกกักอยู่ในระบบน้อยลง นอกจากนี้ที่เวลาเก็บกักดังกล่าวจะมีความเข้มข้น

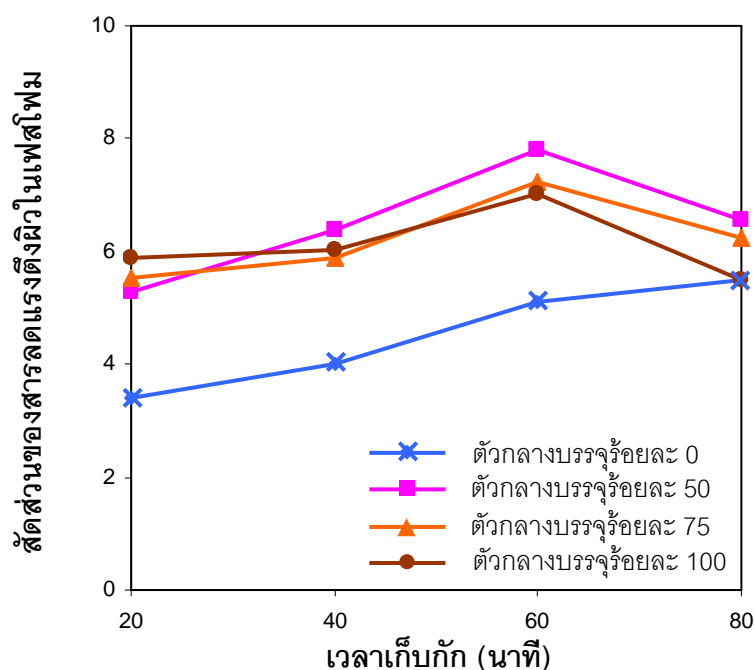
ของสารลดแรงตึงผิวน้อยประกอบกับฟองอากาศที่อยู่ในคอลัมน์นานเกินไปมีโอกาสแตกก่อนขึ้นสู่ด้านบนจึงทำให้สารลดแรงตึงผิวที่เกาะอยู่กลับลงมาอยู่ในคอลัมน์ได้อีกครั้ง ร้อยละการขจัดจึงลดลงเมื่อปริมาณตัวกลางบรรจุมาก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีมีตัวกลางบรรจุกับไม่มีตัวกลางบรรจุจะพบว่ากรณีมีตัวกลางบรรจุมีประสิทธิภาพในการขจัดสารลดแรงตึงผิวได้ดีกว่าซึ่งมีเหตุผลเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น



รูปที่ 4.16 ผลของเวลาเก็บกักต่อร้อยละการขจัดสารลดแรงตึงผิวของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.17 แสดงผลของเวลาเก็บกักที่มีต่อสัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในเฟสโฝมจากการทดลองพบว่ามีความสอดคล้องกับร้อยละการขจัดสารลดแรงตึงผิวในรูปที่ 4.16 คือเวลาเก็บกักที่เพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 60 นาที ทำให้สัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในเฟสโฝมของระบบที่มีปริมาณตัวกลางบรรจุเพิ่มขึ้น มีสาเหตุมาจากสารละลายที่มีเวลาอยู่ในคอลัมน์นานขึ้นสารลดแรงตึงผิวจึงสามารถสัมผัสกับฟองอากาศได้ดีขึ้นและสามารถพาสารลดแรงตึงผิวเหล่านั้นขึ้นมาสู่

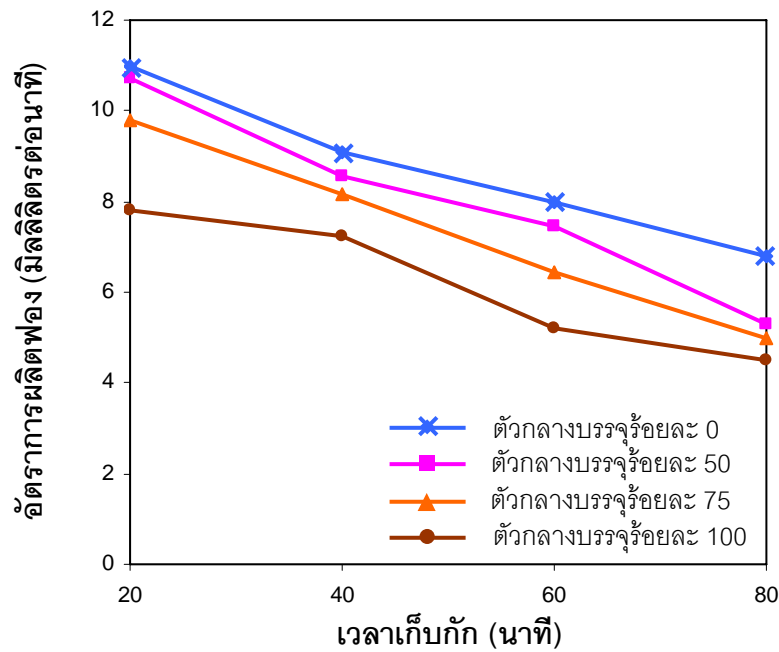
ในเฟสโม่ได้เพิ่มขึ้น ที่เวลาเก็บกาก 80 นาที ระบบจะมีสัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในเฟสโม่ลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวลดลงทำให้สัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในเฟสโม่ลดลง ระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 มีสัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในเฟสโม่สูงที่สุดที่เวลาเก็บกาก 60 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณตัวกลางบรรจุเป็นร้อยละ 75 และ 100 สัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในเฟสโม่จะลดลงตามลำดับเนื่องจากอิทธิพลของสารละลายที่ถูกเก็บกากน้อยลงเมื่อปริมาณตัวกลางบรรจุมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีตัวกลางบรรจุในคอลัมน์ พบว่าระบบที่มีตัวกลางบรรจุมีสัดส่วนของสารลดแรงตึงผิวในเฟสโม่มากกว่า



รูปที่ 4.17 ผลของเวลาเก็บกากต่อสัดส่วนสารลดแรงตึงผิวในเฟสโม่ของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่ความเข้มข้นไซเดียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นไซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลาเก็บกากที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการผลิตโม่ลดลงทั้งในระบบที่มีและไม่มีตัวกลางบรรจุเนื่องจากอัตราการป้อนเข้าสารละลายลดลงทำให้สารลดแรงตึงผิวมีความเข้มข้นลดลงความสามารถในการเกิดฟองจึงลดลงดังแสดงในรูป 4.18 เมื่อพิจารณาเวลาเก็บกากเท่ากับ

80 นาที (อัตราการป้อนเข้าสารละลายต่ำ) มีอัตราการผลิตฟองน้อยที่สุดส่งผลให้ความสามารถในการขจัดน้ำมันออกจากระบบต่ำลงและน้ำมันที่ถูกฟองอากาศพาขึ้นมาในเฟสโพลิเมอร์มีปริมาณน้อย ทำให้สัดส่วนน้ำมันในเฟสโพลิเมอร์ลดลงด้วย



รูปที่ 4.18 ผลของเวลาเก็บกักต่ออัตราการผลิตฟองของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุที่มีความเข้มข้นโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

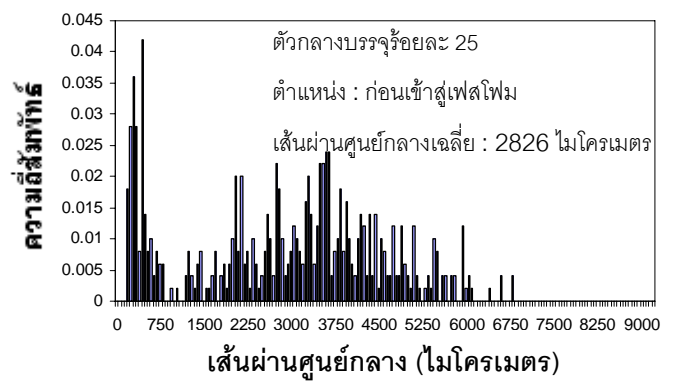
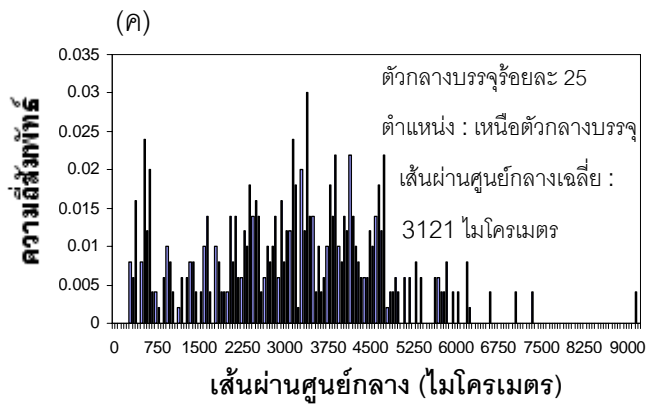
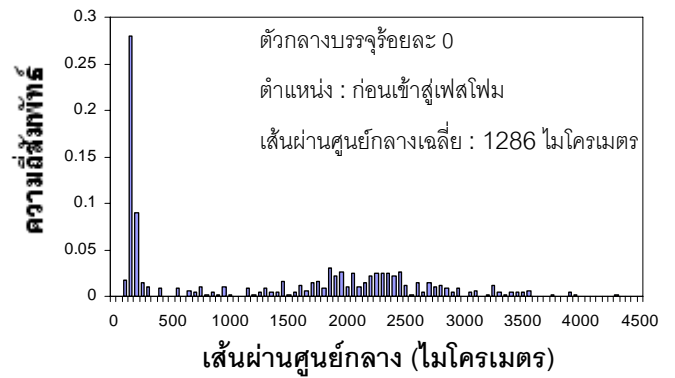
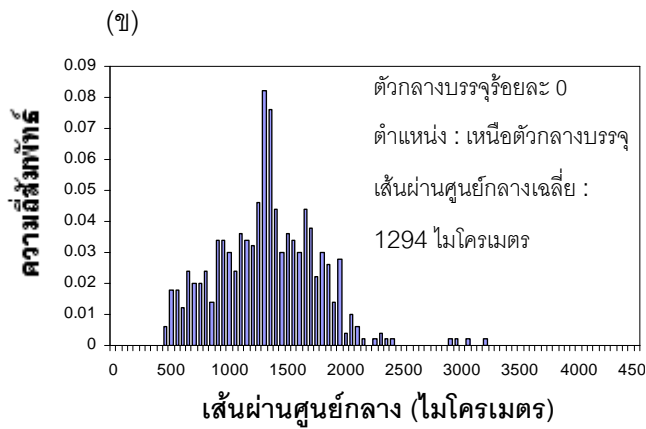
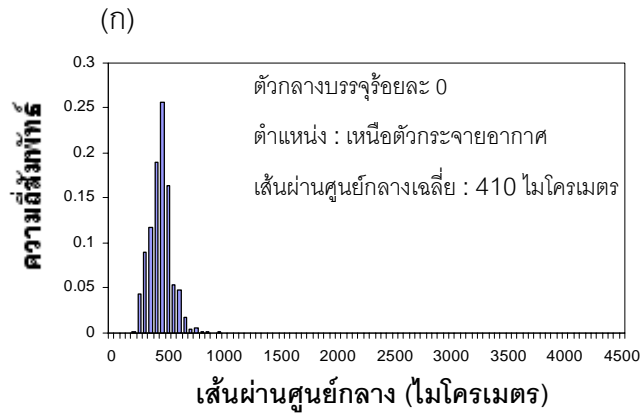
4.3 ผลการศึกษาการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศ

จากภาวะการดำเนินการที่มีความเหมาะสม คือ ระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดชิ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน โซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกักเท่ากับ 60 นาที จึงใช้ภาวะดังกล่าวในการศึกษาการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศในคอลัมน์การแยกโดยฟองแบบต่อเนื่องในกรณีต่างๆ รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศในระบบที่เป็นน้ำบริสุทธิ์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามความยาวของคอลัมน์ คือ ฟองอากาศที่ออกจากตัวกระจายอากาศ (Bottom) ฟองอากาศที่อยู่เหนือตัวกลางบรรจุ (Middle) และฟองอากาศที่กำลังลอยขึ้นสู่เฟสโพลี (Top) ระหว่างระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุและมีตัวกลางบรรจุ โดยตำแหน่งฟองอากาศที่ออกจากตัวกระจายอากาศในทุกกรณีแสดงดังรูป 4.19(ก) รูปที่ 4.19(ข) 4.19(ค) 4.19(ง) 4.19(จ) และ 4.19(ฉ) แสดงการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในระบบน้ำบริสุทธิ์ที่มีปริมาตรตัวกลางบรรจุร้อยละ 25 50 75 และ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ตามลำดับ กรณีไม่มีตัวกลางบรรจุฟองอากาศที่ลอยขึ้นมาจากตัวกระจายอากาศขึ้นสู่ส่วนกลางของคอลัมน์จะมีการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการกระจายตัวของขนาดค่อนข้างมาก เมื่อขึ้นสู่ด้านบนของคอลัมน์ฟองอากาศเริ่มมีขนาดเล็กลงอาจเป็นเพราะฟองอากาศที่รวมกันมีการแตกออกเป็นฟองขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามยังคงมีการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศค่อนข้างกว้าง ในกรณีมีตัวกลางบรรจุเมื่อพิจารณาแต่ละปริมาตรจะเห็นว่าระบบที่มีตัวกลางบรรจุน้อยจะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีไม่มีตัวกลางบรรจุ แต่เมื่อปริมาตรของตัวกลางบรรจุเพิ่มขึ้นมีความแตกต่างของขนาดฟองอากาศที่ส่วนเหนือตัวกลางบรรจุและก่อนลอยขึ้นสู่เฟสโพลีบนค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกรณีไม่มีและมีส่วนกลางบรรจุที่ตำแหน่งเดียวกัน พบว่าขนาดของฟองอากาศที่ก่อนลอยขึ้นสู่เฟสโพลีเมื่อมีส่วนกลางบรรจุจะมีขนาดใหญ่กว่ากรณีไม่มีตัวกลางบรรจุแสดงว่าตัวกลางบรรจุไม่ได้มีผลให้ฟองอากาศในน้ำบริสุทธิ์มีขนาดเล็กลงหรือมีการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศที่ลดลง

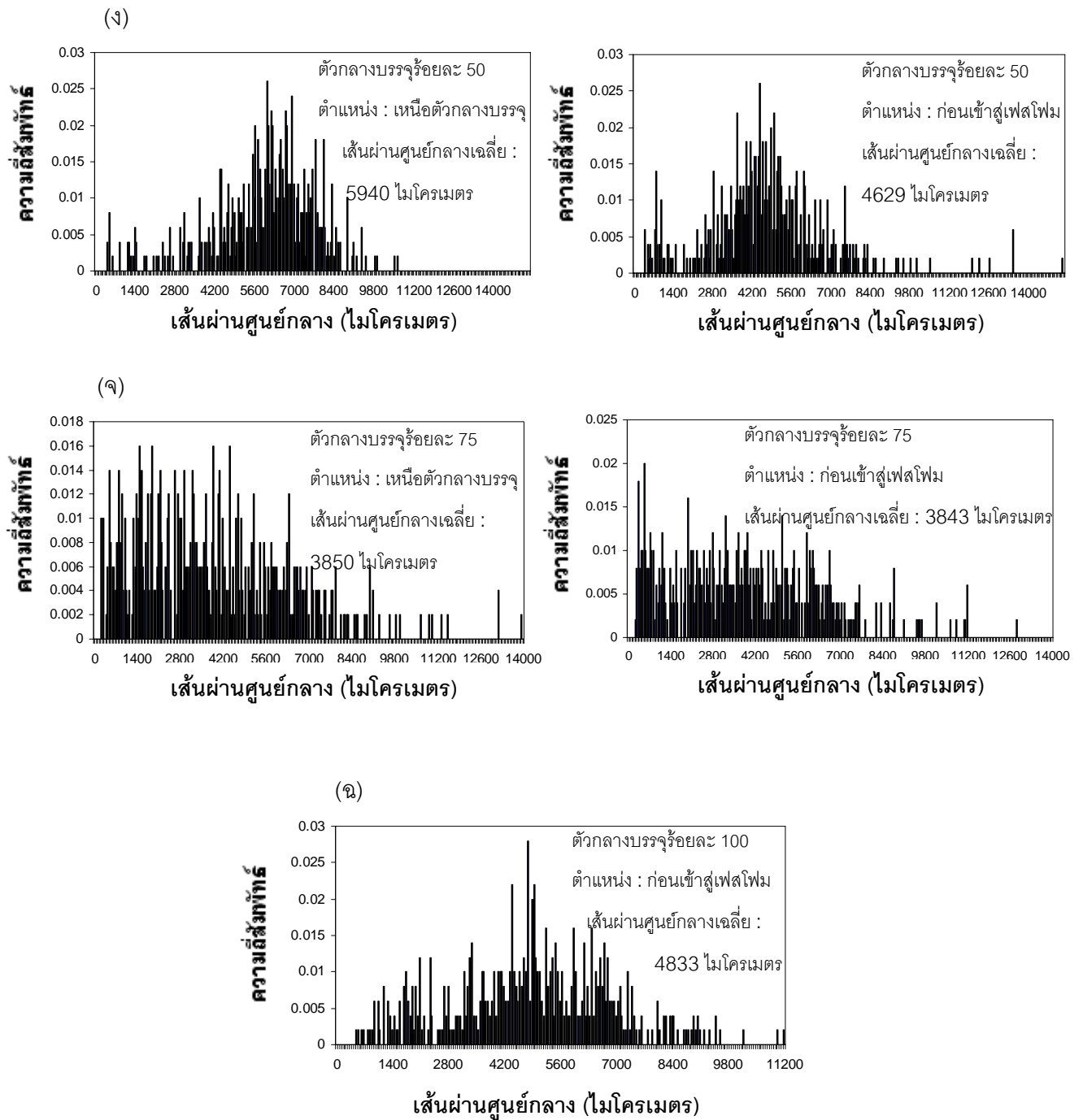
เมื่อพิจารณาผลของปริมาตรตัวกลางบรรจุในระบบที่สารละลายในคอลัมน์มีสารลดแรงตึงผิว รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศในระบบที่สารละลายในคอลัมน์มีความเข้มข้นของสารต่างๆตามที่ได้กล่าวข้างต้น ณ ตำแหน่งต่างๆของคอลัมน์และปริมาตรของตัวกลางบรรจุที่แตกต่างกัน โดยรูปที่ 4.20(ก) แสดงการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศทั้งสามตำแหน่งของคอลัมน์ในกรณีไม่มีตัวกลางบรรจุ และผลของการกระจายตัวของ

ฟองอากาศหลังจากออกจากตัวกระจายอากาศสามารถอ้างอิงได้จากรูปนี้ รูปที่ 4.20(ข) 4.20(ค) 4.20(ง) 4.20(จ) และ 4.20(ฉ) แสดงการกระจายตัวที่ตำแหน่งต่างๆเมื่อปริมาตรของตัวกลางบรรจุเท่ากับร้อยละ 25 50 75 และ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ ตามลำดับ กรณีไม่มีตัวกลางบรรจุ ฟองอากาศที่ลอยขึ้นจากตัวกระจายอากาศด้านล่างจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความสูงของคอลัมน์ เนื่องจากฟองอากาศขนาดเล็กรวมตัวกัน เช่นเดียวกับระบบที่มีตัวกลางบรรจุ ซึ่งฟองอากาศที่อยู่เหนือตัวกลางบรรจุ (กลางคอลัมน์) จะมีขนาดใหญ่กว่าฟองอากาศที่ลอยออกจากตัวกระจายอากาศและมีขนาดใหญ่ขึ้นก่อนลอยขึ้นสู่เฟสโฟมด้านบนนอกจากนี้การกระจายตัวของขนาดฟองอากาศจะกว้างขึ้นตามความสูงของคอลัมน์ด้วย เมื่อเปรียบเทียบที่ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละกรณีพบว่าที่ตำแหน่งก่อนฟองอากาศจะลอยขึ้นสู่เฟสโฟม ระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 25 ของปริมาตรคอลัมน์ จะมีขนาดฟองอากาศเล็กกลงกว่าและมีการกระจายตัวของขนาดที่แคบกว่ากว่าเมื่อไม่มีตัวกลางบรรจุ เมื่อตัวกลางบรรจุเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 50 และ 75 ของปริมาตรคอลัมน์ ขนาดฟองจะเพิ่มขึ้นตามลำดับและการกระจายตัวของขนาดกว้างขึ้นกว่าคอลัมน์ที่ไม่มีตัวกลางบรรจุเนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศที่ลอยขึ้นมา แต่เมื่อตัวกลางบรรจุเพิ่มเป็นร้อยละ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ หรือมีตัวกลางบรรจุเต็มคอลัมน์ฟองอากาศจะมีขนาดเล็กกลงและมีการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศอยู่ในช่วงแคบลงเมื่อเทียบกับปริมาตรตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 และ 75 ของปริมาตรคอลัมน์ เนื่องจากไม่มีพื้นที่ให้ฟองอากาศที่เพิ่งลอยพ้นออกจากตัวกลางบรรจุรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ที่ปริมาตรของตัวกลางบรรจุมากยังทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้นซึ่งอาจทำให้ฟองเกิดการชนกันและแตกได้ จากผลการทดลองสามารถบอกได้ว่าการมีตัวกลางบรรจุไม่ทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กกลงเนื่องจากฟองอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางบรรจุจะมีทั้งการรวมตัวกันและแตกออกจากกัน

เมื่อเปรียบเทียบระบบที่ใช้น้ำบริสุทธิ์กับสารละลายที่มีสารลดแรงตึงผิวในกรณีเดียวกันคือ ที่ตำแหน่งเดียวกันและปริมาตรตัวกลางบรรจุเท่ากัน จะเห็นว่าระบบที่ใช้น้ำบริสุทธิ์จะมีขนาดของฟองอากาศที่ใหญ่กว่ามากและมีการกระจายตัวของขนาดที่กว้างกว่าระบบที่มีสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากสารละลายจะมีแรงตึงผิวน้อยกว่าน้ำบริสุทธิ์ทำให้ฟองที่เกิดขึ้นมีความเสถียรส่งผลให้อัตราการรวมตัวกันของฟองอากาศและการแตกของฟองลดลง และเกิดฟองมากขึ้น

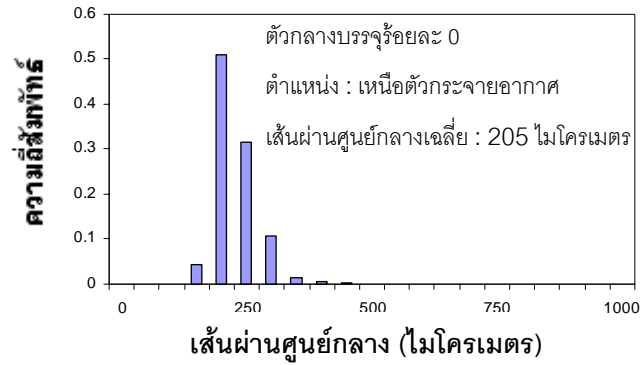


รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของขนาดฟองอากาศในคอลัมน์การแยกโดยฟองลอยที่ตำแหน่งและปริมาณตัวกลางบรจรร้อยละต่างๆ ในระบบน้ำบริสุทธิ์ อัตรากาไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที

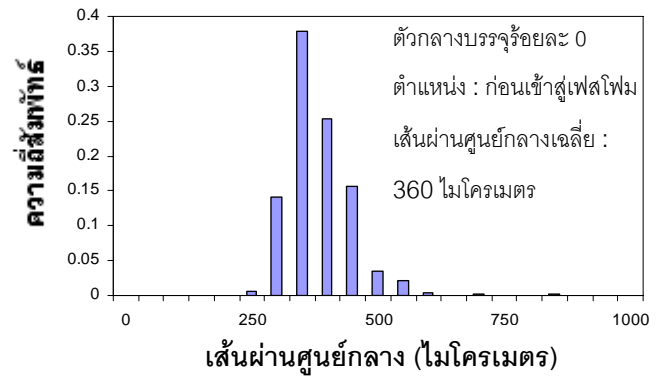
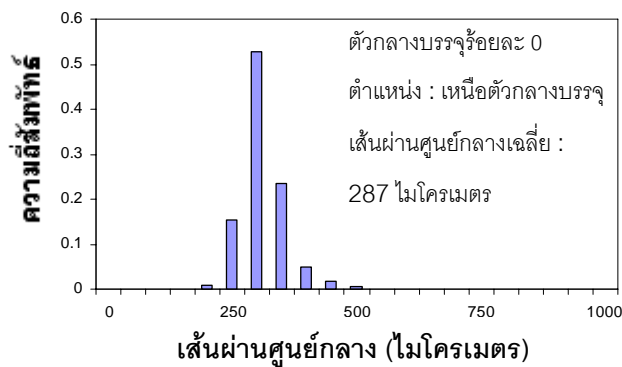


รูปที่ 4.19 (ต่อ) การกระจายตัวของขนาดฟองอากาศในคอลัมน์การแยกโดยฟองลอยที่ตำแหน่งและปริมาตรตัวกลางบรรจุต่างๆ ในระบบน้ำบริสุทธิ์ อัตรากาโรไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที

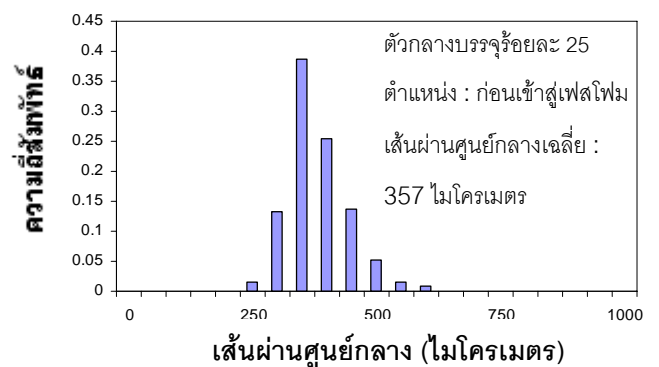
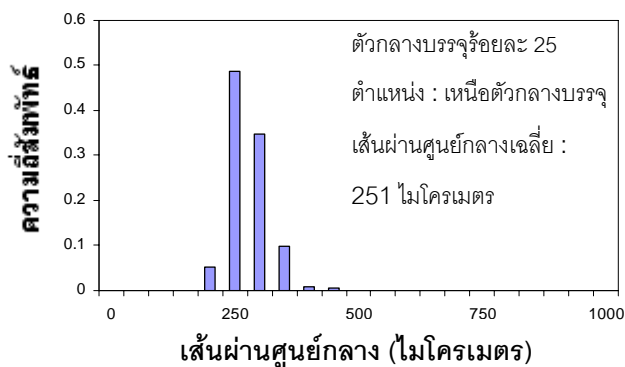
(ก)



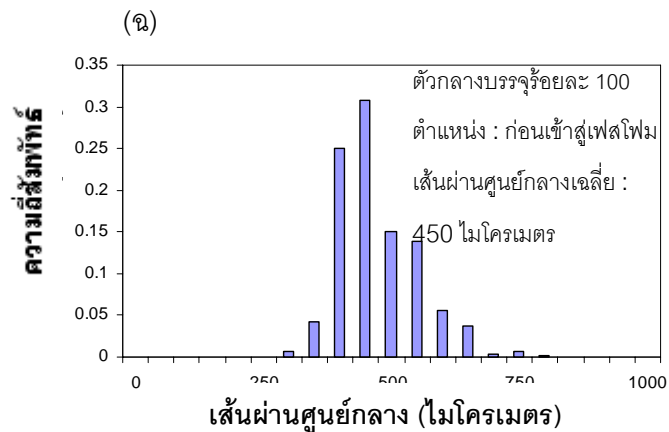
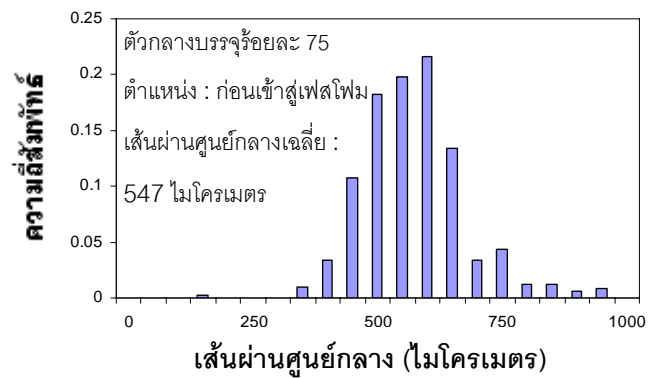
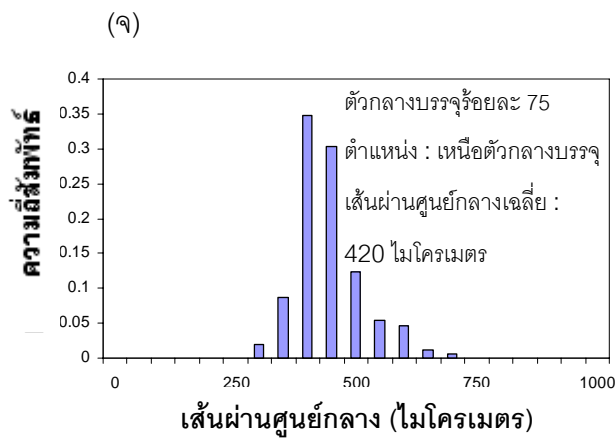
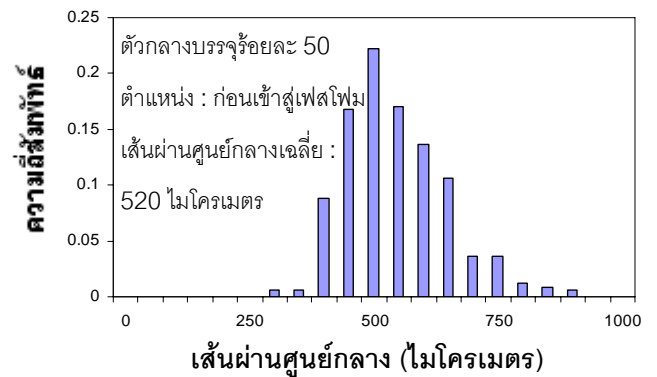
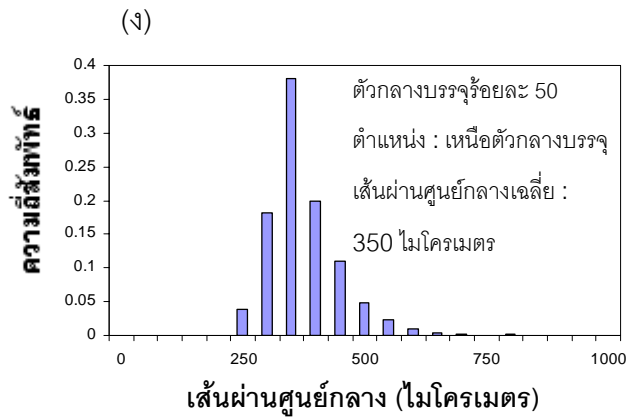
(ข)



(ค)



รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของขนาดฟองอากาศในคอลัมน์การแยกโดยฟองลอยที่ตำแหน่งและปริมาณตัวกลางบรรจุต่างๆ ในระบบสารละลายสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้นซีเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดชิ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นซีเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที



รูปที่ 4.20 (ต่อ) การกระจายตัวของขนาดฟองอากาศในคอลัมน์การแยกโดยฟองลอยที่ตำแหน่งและปริมาตรตัวกลางบรรจุต่างๆ ในระบบสารละลายสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นไซเดียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดชิ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นไซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องที่มีตัวกลางบรรจุ ภายใต้ภาวะแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคต่ำ ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณตัวกลางบรรจุและปัจจัยร่วมต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานโดยฟองลอยแบบต่อเนื่อง ได้แก่ อัตราการไหลอากาศและเวลาเก็บกัก เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินการทดลอง และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานในกรณีที่มีตัวกลางบรรจุและไม่มีตัวกลางบรรจุ รวมทั้งหาความสามารถในการเกิดฟองและความเสถียรของฟอง โดยการทดลองในงานวิจัยนี้ใช้ความเข้มข้นของน้ำมันตัดชิ้นงานเท่ากับ 500 ส่วนในล้านส่วน และความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่มีประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานสูงที่สุดในงานวิจัยที่ผ่านมา นอกจากนี้ยังศึกษาผลของปริมาณตัวกลางบรรจุที่มีต่อขนาดของฟองอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของคอลัมน์ในระบบการแยก โดยฟองลอยแบบต่อเนื่อง

การวัดค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคของน้ำมันตัดชิ้นงานและสารละลายที่มีความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 3 ถึง 8 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก มีแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันตัดชิ้นงานและสารละลายน้อยที่สุด การขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในกรณีไม่มีตัวกลางบรรจุ พบว่า ประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 88.37 เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกักสารละลายเท่ากับ 60 นาที

ในกรณีมีตัวกลางบรรจุ ปริมาณตัวกลางบรรจุที่ใช้ศึกษาประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันตัดชิ้นงานโดยฟองลอยแบบต่อเนื่อง ได้แก่ ปริมาตรของตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 75 และ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ และใช้ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 พบว่าระบบที่มีปริมาตรตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 มีประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันสูงที่สุดโดยมีร้อยละการขจัดน้ำมันเท่ากับ 98.10 ที่อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที

ประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันสูงที่สุดของระบบที่มีปริมาตรตัวกลางบรรจุร้อยละ 75 และ 100 มีค่าเท่ากับร้อยละ 91.90 และ 90.60 ตามลำดับ ที่อัตราการไหลอากาศ 250 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที

ผลการศึกษาการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศในคอลัมน์ที่ตำแหน่งและปริมาตรตัวกลางบรรจุต่างๆในระบบที่ใช้ น้ำบริสุทธิ์และสารละลายที่มีความเข้มข้นโซเดียมไดออกไซด์ซีลเฟต ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดชิ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน และโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที ซึ่งเป็นภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม พบว่า ระบบที่มีสารละลายของสารลดแรงตึงผิวจะมีขนาดของฟองอากาศเล็กกว่าและการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศแคบกว่าระบบที่ใช้ น้ำบริสุทธิ์ และฟองอากาศที่ผ่านตัวกลางบรรจุในคอลัมน์ไม่ได้มีขนาดเล็กลงมากนักเช่นเดียวกับการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อมีตัวกลางบรรจุในคอลัมน์ของการแยกโดยฟองแบบต่อเนื่องจะทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันสูงขึ้นแต่เมื่อปริมาตรของตัวกลางบรรจุมากเกินไปทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดน้ำมันลดลงแต่จะช่วยเพิ่มสัดส่วนของน้ำมันในเฟสโพลีที่ออกมาให้มีความมากขึ้น ดังนั้นการใช้ตัวกลางบรรจุปริมาณมากจึงเหมาะกับระบบที่ต้องการความเข้มข้นของสาร (ที่อยู่ในเฟสโพลี) ที่แยกออกมาจากสารละลายสูงเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการอื่น ๆ ต่อไป

นอกจากนี้ควรมีการทดลองร่วมกับสารลดแรงตึงผิวอื่นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุและสามารถนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรมได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย Wastewater Treatment. พิมพ์ครั้งที่ 2, 2542.
- สุเมธ ชวเดช. การพัฒนากระบวนการฟรอกโฟลเทชันสำหรับบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: วิทยาลัย
ปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- จิรสา กรงกรด. สารลดแรงตึงผิว. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา:[http://www.dss.go.th/dssweb/
st-articles/files/cp_7_2548_surfactant.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_7_2548_surfactant.pdf) [2552, ตุลาคม 12]
- ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3. กำหนดมาตรฐานควบคุมการ
ระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิด. 3 มกราคม 2539.

ภาษาอังกฤษ

- Alley, E.R. Water Quality Control Handbook. (nd Ed.) United States of America: McGraw-Hill, 2006.
- ASTM D1681-92. Standard Test Method for Synthetic Anionic Active Ingredient in Detergents by Cationic Titration Procedure.
- Benkrid, K., Rode, S., Pons, M. N., Pitiot, P. Midoux, N. Bubble flow mechanisms in trickle beds—an experimental study using image processing. Chemical Engineering Science. 57 (2002): 3347 – 3358.
- Bourrel, M., Schechter, R.S. Microemulsion and Related Systems. New York: Marcel Dekker, 1988.
- Chattopadhyay, P. Absorption and Stripping. New Delhi: Asia Book Pvt. Ltd., 2007.
- Cheremisinoff, P.N. Air pollution control and design for industry. New York: Marcel Dekker, 1993.
- Clarence, A.M., Neogi, P. Interfacial Phenomena: Equilibrium and Dynamic Effects. New York: Marcel Dekker, 1985.
- Daeseong, J., Shripad, T.R., Bubble mechanisms and characteristics at pore scale in a packed-bed reactor. Chemical Engineering Science. 64 (2009): 3179 – 3187.

- Feng, D., Aldrich, C. Removal of Diesel from Aqueous Emulsions by Flotation. Separation Science and Technology. 35 (2000): 2159–2172.
- Kolev., N. Packed bed columns: for absorption, desorption, rectification and direct heat transfer. Netherland: Elsevier, 2006.
- Lapee-e, A. Froth Flotation to Remove Cutting Oil from Wastewater. M.S. Thesis, The Petrochemical Technology The Petroleum and Petrochemical College Chulalongkorn University, 2006.
- McKetta, J.J. Unit Operations Handbook: Mass transfer. United States of America: CRC Press, 1993.
- Moosai, R., Dawe, R.A. Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup. Separation and Purification Technology. 33 (2003): 303-314.
- Pal, R., Masliyah, J. Oil recovery from oil in water emulsions using a flotation column. Canadian Journal of chemical Engineering. 68 (1990): 959-967.
- Pondstabodee, S., Scamehorn, J.F., Chavadej, S., Harwell, J.H. Removal of Orthodichlorobenzene by Froth Flotation under Winsor's Type III Conditions. Separation Science and Technology. 33 (1998): 591–609.
- Prud'homme, R.K., Khan, S.A. Surfactant Science Series. New York: Marcel Dekker, 1996.
- Rosen, M.J. Foaming antifoaming by aqueous solutions of surfactants. In Surfactants and Interfacial Phenomena. (nd Ed.). New York: John Wiley and Sons, 1989.
- Rosen, M.J. Surfactants and Interfacial Phenomena (rd Ed.). NJ: Wiley-Interscience, 2004.
- Salager, J.L., Loaiza-Maldonado, I., MMinana-Perez, M Silva, F. Surfactant-oil-water systems near the affinity inversion part I : Relationship between equilibrium phase behavior and emulsion type and stability. Dispersion Science Technology. 3 (1982): 279-292.
- Scamehorn, J.F., Harwell, J.H. Surfactant-Based Separation Processes. New York: Marcel Dekker, 1989.

- Sebba, F., Scamehorn, J.F., Harwell, J.H. Surfactant Based Separation Process. New York: Marcel Dekker, 1989.
- Sharma, M.K. Particle Technology and Surface Phenomena. New York: Wiley, 1991.
- Stewart, M., Arnold, K. Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. United States of America: Gulf Professional Publishing, 2008.
- Watcharasing, S., Chavadej, S. Scamehorn, J.F. Diesel Oil Removal by Froth Flotation Under Low Interfacial Tension Conditions II: Continuous Mode of Operation. Separation Science and Technology. 43 (2008): 2048–2071.
- Watcharasing, S., Kongkowitz, W., Chavadej, S. Motor oil removal from water by continuous froth flotation using extended surfactant: Effects of air bubble parameters and surfactant concentration. Separation and Purification Technology. 70 (2009): 179-189.
- Watcharasing, S., Panita, A. Chavadej, S. Diesel oil removal from water by froth flotation under low interfacial tension and colloidal gas aphron conditions. Separation and Purification Technology. 62 (2008): 118–127.
- Winsor, P.A. Binary and multicomponent solutions of amphiphilic compounds, solubilization and formation, structure, and theoretical significance of liquid crystalline solution. Chemical Reviews. 68 (1968): 1-40.
- Withayapanyanon, A. Microemulsion formation of surfactant/Oily wastewater System Related to Clean-Up by Froth Flotation. M.S. Thesis, The Petrochemical Technology The Petroleum and Petrochemical College Chulalongkorn University, 2003.
- Wungrattanasopon, P., Scamehorn, J.F., Chavadej, S., Saiwan, C., Harwell, J.H. Use of foam flotation to remove tert-butylphenol from water. Separation Science and Technology. 31 (1996): 1523-1540.
- Yanatatsaneejit, U., Chavadej, S. Scamehorn, J.F. Diesel Oil Removal by Froth Flotation Under Low Interfacial Tension Conditions I: Foam Characteristics, and Equilibration Time. Separation Science and Technology. 43 (2008): 1520–1534.

- Yanatatsaneejit, U., Witthayapanyanon, A., Rangsunvigit, P., Acosta, E.J., Sabatini, D.A., Scamehorn, J.F., Chavadej, S. Ethylbenzene removal by Froth Flotation under conditions of middle-phase microemulsion formation I: Interfacial tension, foamability, and foam stability. Separation Science and Technology. 40 (2005): 1537-1553.
- Zouboulis, A.I., Lazaridis, N.K., Zamboulis, D. Powered activated carbon separation from water by foam flotation. Separation Science and Technology. 29 (1994): 385-400.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

1. แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial Tension, IFT)
แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคสามารถคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$IFT = e(Vd)^3 n^2 \Delta\rho \quad (ก1)$$

เมื่อ	IFT	คือ	แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคหรือ σ หน่วย มิลลินิวตันต่อเมตร หรือ ดายน์ต่อเซนติเมตร
	e	คือ	ยูนิตีแฟคเตอร์ (3.427×10^{-7} มิลลินิวตันลูกบาศก์เซนติเมตรนาที่ ² ต่อมิลลิกรัมลูกบาศก์เมตร)
	V	คือ	เอนลาร์จเมนต์แฟคเตอร์ (0.31 มิลลิเมตรต่อsdv)
	d	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำมัน (sdv)
	n	คือ	จำนวนรอบการหมุน หน่วย รอบต่อนาที
	$\Delta\rho$	คือ	ความแตกต่างของความหนาแน่นของของเหลว 2 ชนิด หน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

2. ร้อยละการขจัดน้ำมัน (%Oil removal)

$$\% \text{ Oil removal} = \frac{([\text{oil}]_{\text{in}} \times \text{feed flow rate}) - ([\text{oil}]_{\text{out}} \times \text{treated water flow rate})}{([\text{oil}]_{\text{in}} \times \text{feed flow rate})} \times 100 \quad (\text{ก2})$$

เมื่อ	$[\text{oil}]_{\text{in}}$	คือ	ความเข้มข้นของน้ำมันในสารป้อนเข้า หน่วย ร้อยละโดยน้ำหนัก
	$[\text{oil}]_{\text{out}}$	คือ	ความเข้มข้นของน้ำมันในสารขาออก หน่วย ร้อยละโดยน้ำหนัก
	feed flow rate	คือ	อัตราการไหลของสารป้อนเข้า หน่วย มิลลิเมตรต่อนาที
	treated water flow rate	คือ	อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว หน่วย มิลลิเมตรต่อนาที

3. สัดส่วนน้ำมันในเฟสโฟม (Enrichment ratio of oil)

$$\text{Enrichment ratio} = \frac{[\text{oil}] \text{ in collapsed foam solution}}{[\text{oil}] \text{ in feed solution}} \quad (\text{ก3})$$

เมื่อ	$[\text{oil}] \text{ in collapsed foam solution}$	คือ	ความเข้มข้นของน้ำมันในสารละลายโฟมที่แตก
	$[\text{oil}] \text{ in feed solution}$	คือ	ความเข้มข้นของน้ำมันในสารละลาย

4. ร้อยละการขจัดสารลดแรงตึงผิว (%Surfactant removal)

$$\% \text{ Surfactant removal} = \frac{([\text{surfactant}]_{\text{in}} \times \text{feed flow rate}) - ([\text{surfactant}]_{\text{out}} \times \text{treated water flow rate})}{([\text{surfactant}]_{\text{in}} \times \text{feed flow rate})} \times 100 \quad (\text{ก4})$$

$[\text{surfactant}]_{\text{in}}$	คือ	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารป้อนเข้า หน่วย ร้อยละโดยน้ำหนัก
$[\text{surfactant}]_{\text{out}}$	คือ	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารขาออก หน่วย ร้อยละโดยน้ำหนัก
feed flow rate	คือ	อัตราการไหลของสารป้อนเข้า หน่วย มิลลิลิตรต่อนาที
treated water flow rate	คือ	อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว หน่วย มิลลิลิตรต่อนาที

5. สัดส่วนสารลดแรงตึงผิวในเฟสโฟม (Enrichment ratio of surfactant)

$$\text{Enrichment ratio} = \frac{[\text{surfactant}] \text{ in collapsed foam solution}}{[\text{surfactant}] \text{ in feed}} \quad (\text{ก5})$$

เมื่อ	$[\text{surfactant}] \text{ in collapsed foam solution}$	คือ	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายโฟมที่แตก
	$[\text{surfactant}] \text{ in feed solution}$	คือ	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย

6. ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายตัวอย่าง

$$C_{\text{sample}} = \frac{(CV)_{\text{hyamine}}}{V_{\text{sample}}} \quad (\text{ก6})$$

เมื่อ	C_{sample}	คือ	ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายตัวอย่าง
	V_{sample}	คือ	ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้
	C_{hyamine}	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายไฮยามีน
	V_{hyamine}	คือ	ปริมาตรสารละลายไฮยามีนตัวอย่างที่ใช้

7. ความสามารถในการเกิดฟอง (Foamability)

$$\text{Foamability} = \frac{H_{\text{max}}}{H_{\text{in}}} \quad (\text{ก7})$$

เมื่อ	H_{max}	คือ	ความสูงของฟองที่สูงที่สุด หน่วย เซนติเมตร
	H_{in}	คือ	ความสูงเริ่มต้นของสารละลาย หน่วย เซนติเมตร

8. ความเสถียรของฟอง

คือ เวลาที่ฟองใช้ในการแตกเหลือครึ่งหนึ่งของความสูงเดิม หน่วย นาที

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลอง

แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค

ตาราง ข1 แสดงค่าแรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคของน้ำมันตัดขึ้นงานและสารละลายของสารลดแรงตึงผิวและโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

System	IFT (mN/m)	System	IFT (mN/m)	System	IFT (mN/m)	System	IFT (mN/m)	System	IFT (mN/m)
[SDS]0.1 [NaCl]4	0	[SDS]0.1 [NaCl]5	0.01815	[SDS]0.1 [NaCl]6	0.0136	[SDS]0.1 [NaCl]7	0.0143	[SDS]0.1 [NaCl]8	0.02735
	0.1576		0.02066		0.01247		0.0153		0.02835
	0.1551		0.01852		0.01383		0.01266		0.0298
	0.157		0.01778		0.01422		0.01268		0.02832
	0.1561		0.01769		0.01391		0.01434		0.02962
	0.1556		0.01781		0.01384		0.01376		0.02904
	0.1549		0.01743				0.01383		0.02705
	0.1584		0.01766				0.01416		0.02877
	0.1659		0.01734				0.01399		
	0.16		0.01743				0.01431		
							0.01368		

ตาราง ข2 แสดงการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดชิ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลอากาศ 150 มิลลิเมตรต่อนาที และเวลาเก็บกัก 60 นาที

NaCl concentration (wt%)	Oil removal (%)	Enrichment ratio of cutting oil	Surfactant Removal (%)	Enrichment ratio of surfactant	Foam flow rate (mL/min)
3	81.75	1.05	68.70	2.10	2.55
4	85.28	1.10	72.52	3.57	2.87
5	86.59	1.17	76.16	4.62	3.77
6	88.05	1.53	81.44	5.17	3.10
7	88.87	2.38	82.05	5.25	2.98

ตาราง ข3 แสดงการศึกษาค่าผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยก โดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

Air flow rate (mL/min)	Oil removal (%)	Enrichment ratio of cutting oil	Surfactant Removal (%)	Enrichment ratio of surfactant	Foam flow rate (mL/min)
150	88.05	1.53	81.44	5.17	3.10
200	88.37	1.21	81.02	5.12	7.98
250	87.88	1.17	78.08	4.90	10.01
300	84.95	1.05	73.52	4.52	11.87

ตาราง ข4 แสดงการศึกษาค่าผลของเวลาเก็บกักที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่ไม่มีตัวกลางบรรจุ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และ อัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิเมตรต่อนาที

HRT (min)	Oil removal (%)	Enrichment ratio of cutting oil	Surfactant Removal (%)	Enrichment ratio of surfactant	Foam flow rate (mL/min)
20	78.28	1.05	51.15	3.40	10.98
40	81.00	1.10	74.50	4.00	9.10
60	88.37	1.21	81.02	5.12	7.98
80	84.02	1.25	78.95	5.50	6.81

ตาราง ข5 แสดงการศึกษาค่าผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

Air flow rate (mL/min)	Oil removal (%)	Enrichment ratio of cutting oil	Surfactant Removal (%)	Enrichment ratio of surfactant	Foam flow rate (mL/min)
150	85.52	1.45	80.35	6.93	3.00
200	98.10	2.28	84.90	7.80	7.47
250	91.34	1.95	84.70	7.50	9.71
300	82.97	1.54	75.96	5.11	11.14

ตาราง ข6 แสดงการศึกษาค่าผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 75 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

Air flow rate (mL/min)	Oil removal (%)	Enrichment ratio of cutting oil	Surfactant Removal (%)	Enrichment ratio of surfactant	Foam flow rate (mL/min)
150	85.15	2.47	78.72	6.20	2.98
200	88.51	2.95	82.80	7.23	6.43
250	91.90	2.31	81.50	7.35	8.10
300	83.16	1.83	77.28	5.52	10.57

ตาราง ข7 แสดงการศึกษาค่าผลของอัตราการไหลอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

Air flow rate (mL/min)	Oil removal (%)	Enrichment ratio of cutting oil	Surfactant Removal (%)	Enrichment ratio of surfactant	Foam flow rate (mL/min)
150	81.52	2.29	80.74	7.00	2.84
200	87.91	2.40	82.24	7.02	5.22
250	90.58	2.34	84.07	7.63	5.29
300	83.44	2.03	75.34	6.97	7.72

ตาราง ข8 แสดงการศึกษาผลของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 50 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

HRT (min)	Oil removal (%)	Enrichment ratio of cutting oil	Surfactant Removal (%)	Enrichment ratio of surfactant	Foam flow rate (mL/min)
20	80.87	1.41	75.16	5.28	10.71
40	84.08	1.51	78.43	6.38	8.54
60	98.10	2.28	84.90	7.80	7.47
80	85.39	1.72	82.56	6.55	5.31

ตาราง ข9 แสดงการศึกษาผลของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 75 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

HRT (min)	Oil removal (%)	Enrichment ratio of cutting oil	Surfactant Removal (%)	Enrichment ratio of surfactant	Foam flow rate (mL/min)
20	80.98	3.25	72.78	5.52	9.80
40	82.20	3.02	76.98	5.87	8.18
60	88.51	2.95	82.80	7.23	6.43
80	85.90	2.55	80.72	6.24	5.00

ตาราง ข10 แสดงการศึกษาผลของเวลาเก็บกักต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกโดยฟองลอยแบบต่อเนื่องในระบบที่มีตัวกลางบรรจุร้อยละ 100 ของปริมาตรคอลัมน์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลอากาศ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

HRT (min)	Oil removal (%)	Enrichment ratio of cutting oil	Surfactant Removal (%)	Enrichment ratio of surfactant	Foam flow rate (mL/min)
20	78.90	3.57	70.28	5.87	7.80
40	81.24	2.88	75.53	6.02	7.25
60	87.91	2.40	82.24	7.02	5.22
80	85.20	1.95	70.01	5.50	4.51

ตาราง ข11 แสดงการศึกษาผลของความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ต่อความสามารถในการเกิดฟอง และความเสถียรของฟอง ในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมันตัดชิ้นงาน 500 ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลอากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาเก็บ กัก 60 นาที

NaCl concentration (wt%)	Foamability	Foam stability (min)
3	11.92	55.15
4	12.22	55.90
5	13.43	57.35
6	13.55	57.83
7	10.80	18.42

ตาราง ข12 แสดงการศึกษาผลของอัตราการไหลอากาศต่อความสามารถในการเกิดฟองและความเสถียรของฟอง ในระบบที่มีความเข้มข้นโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก น้ำมัน 500 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และเวลาเก็บกัก 60 นาที

Air flow rate (mL/min)	Foamability	Foam stability (min)
150	8.10	43.08
200	9.69	45.75
250	11.24	45.67
300	14.86	32.47

ภาคผนวก ค

วิธีการทดสอบหาความเข้มข้นของน้ำมันและสารลดแรงตึงผิว

1. การหาความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำเสียที่บำบัดแล้วและโฟม

1.1 เขย่าขวดสารละลายตัวอย่างที่ต้องการทดสอบหาความเข้มข้นของน้ำมันเบาๆ เพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วดูดสารละลาย 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดขนาดเล็ก

1.2 เติมไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) ลงในขวดขนาดเล็ก (มากกว่าหรือเท่ากับ 1 มิลลิลิตร) โดยใส่เท่าๆกันในทุกครั้ง

1.3 เขย่าเบาๆให้เข้ากันประมาณ 10 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น

1.4 ดูดเอาสารชั้นล่าง (ไดคลอโรมีเทนและน้ำมัน) ใส่ในปิเกตอร์ขนาดเล็กที่ซั้งไว้แล้ว

1.5 ตั้งทิ้งไว้ให้ไดคลอโรมีเทนระเหยออกให้หมด

1.6 ชั่งน้ำหนักปิเกตอร์และน้ำมัน บันทึกน้ำหนักที่ซั้งได้เพื่อนำไปคำนวณหาน้ำหนักและความเข้มข้นของน้ำมัน

2. การหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในน้ำเสียที่บำบัดแล้วและโฟม

2.1 ใส่คลอโรฟอร์ม (Chloroform) 1.5 มิลลิลิตร และอินดิเคเตอร์ คือ เมทิลีนบลูคลอไรด์ (Methylene blue chloride) 4 มิลลิลิตร ลงในขวดขนาด 20 มิลลิลิตร

2.2 ค่อยๆเติมตัวอย่างที่ต้องการทดสอบหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวลงในขวดดังกล่าวจนกว่าเฟสล่างจะมีสีน้ำเงินเข้มกว่าเฟสบน แต่ละครั้ควรใส่ตัวอย่างในปริมาณเท่ากัน

2.3 ไตเตรทด้วยสารละลายไฮยามีน (Hyamine) 0.005 โมลต่อลิตร จนกว่าสีของสารทั้งสองเฟสจะเท่ากัน

2.4 บันทึกปริมาตรของไฮยามีนที่ใช้ นำไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในตัวอย่าง จากสูตร (n6)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอภิษฎา บรรเทิงประทุมรัฐ เกิดวันที่ 5 กันยายน 2528 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี
วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชา
เคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2551