

โซลูบิไลเซชันและแอดโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์โดยอะลูมิเนียมออกไซด์  
ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์



นางสาวจุฑานันท์ คำแพง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2556  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

SOLUBILIZATION AND ADSOLUBILIZATION OF ORGANIC COMPOUNDS  
ONTO ALUMINUM OXIDE MODIFIED BY RHAMNOLIPID BIOSURFACTANT  
MIXED LINKER MOLECULE

Miss Chuthanan Khampaeng



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โซลูบิไลเซชันและแอดโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์โดย  
อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ  
แรมโนลิพิดที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์

โดย

นางสาวจุฑานันท์ คำแพง

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนัง)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร. เอมมา อาสนจินดา)



# # 5470148521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: RHAMNOLIPID / ADSORPTION / SOLUBILIZATION / ADSOLUBILIZATION / LINKER MOLECULE

CHUTHANAN KHAMPAENG: SOLUBILIZATION AND ADSOLUBILIZATION OF ORGANIC COMPOUNDS ONTO ALUMINUM OXIDE MODIFIED BY RHAMNOLIPID BIOSURFACTANT MIXED LINKER MOLECULE. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., 116 pp.

Removal of organic contaminants in the environment by surfactant have been applied to many applications. Surfactant-modified adsorbents can enhance the efficiency of organic compounds removal. In this research study, the solubilization and adsolubilization on aluminum oxide surface using rhamnolipid biosurfactant mixed three linker molecules; butanol (4-carbon), octanol (8-carbon) and dodecanol (12-carbon). Two organic compounds with different dipole-dipole forces including styrene and ethylcyclohexane were evaluate in solubilization and adsolubilization studies. The results showed that the adsorption capacity of all surfactant on aluminum oxide surface increased when surfactant concentration increased. The rhamnolipid biosurfactant mixed with octanol showed the highest maximum adsorption capacity while the rhamnolipid biosurfactant mixed with butanol showed the lowest adsorption capacity. For adsolubilization study, the rhamnolipid biosurfactant mixed with linker molecules showed greater adsolubilization capacity than rhamnolipid biosurfactant alone. The result indicated that the adsolubilization capacity increased with increasing carbon chain lengths of linker molecules. For solubilization study, the rhamnolipid biosurfactant without the linker molecules showed greater solubilization capacity than rhamnolipid biosurfactant with the linker molecules. The result indicated that the solubilization capacity decreased when the number of carbons in the linker molecule chain increased. The adsolubilization and solubilization capacity of ethylcyclohexane showed higher than styrene. This could be due to ethylcyclohexane has lower water solubility than styrene. Therefore, ethylcyclohexane prefers to partition into the surfactant admicelle and micelle rather than solubilize in the aqueous phase. In addition, the organic solutes solubilization capacity was higher than adsolubilization capacity due to the surfactant micelle with the area for solubilizing of organic solutes than the admicelle. For desorption study, the rhamnolipid biosurfactant with and without the linker molecules showed surfactant loss from the surface of aluminum oxide in small quantities. Thus, the linker molecules can reduce surfactant molecule desorption from the solid surface. The result demonstrated that surfactant-modified adsorbents have been evaluated for removal of organic contaminants and to be applied in environmental applications.

Department: Environmental Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Environmental Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งของ รศ. ดร. สุชา ขาวเขียว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ข้อคิดต่างๆตลอดจนการตรวจทานแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล (ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์) ผศ. ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธ์ และ ผศ. ดร. มนัสกร ราชกรกิจ (กรรมการสอบวิทยานิพนธ์) ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และได้กรุณาร่วมกันตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ อ. ดร. เอมมา อาสนจินดา (กรรมการสอบวิทยานิพนธ์) ที่กรุณาอนุเคราะห์สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ใช้ในงานวิจัย และให้คำปรึกษาแนะนำในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดระยะเวลาการศึกษาในระดับปริญญาโทมาบัดนี้

ขอขอบพระคุณ อ. ดร. อัมพิรา เจริญแสง และ นางสาวนวลกมล อภรณ์พงษ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการและความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณรามณรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการตึกสี่ภาควิชา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆสำหรับดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ สำหรับมิตรภาพอันดี ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา เป็นอย่างสูง สำหรับกำลังใจ ทุนสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาแนะนำต่างๆจนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สารลดแรงตึงผิว.....	4
2.1.1 สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์.....	4
2.1.2 สารลดแรงตึงผิวธรรมชาติ.....	5
2.1.3 สารลดแรงตึงผิวชีวภาพ.....	5
2.2 ความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์.....	10
2.3 การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวโลหะออกไซด์.....	11
2.3.1 อะลูมินัมออกไซด์.....	14
2.3.2 สารอินทรีย์.....	15
2.3.3 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการดูดซับของสารลดแรงตึงผิว.....	16
2.4 แอดโซลูบิลิเซชันและโซลูบิลิเซชันของสารอินทรีย์.....	17
2.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารอินทรีย์ในไมเซลล์ ( $K_{mic}$ ) และแอดไมเซลล์ ( $K_{adm}$ ).....	19
2.5 โมเลกุลลิแกนด์.....	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.6.1 การกำจัดสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด.....	22

2.6.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุล ลิงเกอร์	26
2.6.3 การปรับสภาพตัวกลางดูดซับโลหะออกไซด์ด้วยสารลดแรงตึงผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์	28
2.7 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
2.7.1 สรุปการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด	30
2.7.2 สรุปการดูดซับสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์	32
2.7.3 สรุปการปรับสภาพตัวกลางดูดซับโลหะออกไซด์ด้วยสารลดแรงตึงผิว	33
บทที่ 3 แผนการวิจัยและวิธีการดำเนินการวิจัย	35
3.1 แผนการวิจัย	35
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	37
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	37
3.2.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	38
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย	40
3.3.1 การศึกษาค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว	40
3.3.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์	41
3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอออนของสารอินทรีย์	43
3.3.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบ์ไอออนของสารอินทรีย์	47
3.3.5 การศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์	50
3.4 วิธีวิเคราะห์ผลการวิจัย	52
3.4.1 การวิเคราะห์สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด	52
3.4.2 การวิเคราะห์สไตรีน	52
3.4.3 การวิเคราะห์เอทิลไซโคลเฮกเซน	52
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล	53
4.1 การศึกษาค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว	53
4.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์	56
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอออนของสารอินทรีย์	60
4.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอออนของสไตรีน	60



4.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการแอตโบลูปีไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซน.....	64
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการโบลูปีไลเซชันของสารอินทรีย์ .....	68
4.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการโบลูปีไลเซชันของสไตรีน .....	68
4.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการโบลูปีไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซน.....	71
4.5 การศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ .....	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	77
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
5.1.1 การศึกษาความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว.....	77
5.1.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์.....	78
5.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการแอตโบลูปีไลเซชันของสารอินทรีย์ .....	78
5.1.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการโบลูปีไลเซชันของสารอินทรีย์ .....	79
5.1.5 การศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ .....	79
5.2 การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม .....	80
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง .....	82
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก.....	89
ภาคผนวก ข.....	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	116

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	สารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ผลิตจากจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ (Desai และ Banat, 1997).....	6
ตารางที่ 2.2	การกำจัดสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด.....	31
ตารางที่ 2.3	การดูดซับสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์.....	32
ตารางที่ 2.4	การปรับสภาพตัวกลางดูดซับโลหะออกไซด์ด้วยสารลดแรงตึงผิว.....	33
ตารางที่ 3.1	สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด (JBR 515).....	38
ตารางที่ 3.2	สมบัติของเอทิลไฮโดรเจน และสไตรีน.....	38
ตารางที่ 3.3	คุณสมบัติของอะลูมิเนียมออกไซด์.....	39
ตารางที่ 3.4	โมเลกุลลิแกนด์.....	39
ตารางที่ 3.5	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการศึกษาค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์.....	40
ตารางที่ 3.6	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิว... ..	42
ตารางที่ 3.7	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิลิเซชัน.....	44
ตารางที่ 3.8	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิลิเซชัน.....	47
ตารางที่ 3.9	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการศึกษากการสูญเสียสารลดแรงตึงผิว.....	50
ตารางที่ 4.1	ค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์จากการวัดค่าแรงตึงผิว ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์.....	54
ตารางที่ 4.2	ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์.....	59
ตารางที่ 4.3	สัมประสิทธิ์การละลายของสไตรีนในแอดไมเซลล์ ( $K_{adm}$ ) ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์.....	62
ตารางที่ 4.4	สัมประสิทธิ์การละลายของเอทิลไฮโดรเจนและสไตรีนในแอดไมเซลล์ ( $K_{adm}$ ) ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโมเดคานอล.....	66
ตารางที่ 4.5	สัมประสิทธิ์การละลายของสไตรีนในไมเซลล์ ( $K_{mic}$ ) ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์.....	69
ตารางที่ 4.6	สัมประสิทธิ์การละลายของเอทิลไฮโดรเจนและสไตรีนในไมเซลล์ ( $K_{mic}$ ) ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด.....	72
ตารางที่ 4.7	การสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์.....	75

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างโมโนเมอร์ของสารลดแรงตึงผิว .....	4
ภาพที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแบบต่างๆ ของแรมโนลิพิด .....	8
ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจุลินทรีย์ ดิน สารปนเปื้อน และสารลดแรงตึงผิว .....	10
ภาพที่ 2.4 การเกิดโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว .....	11
ภาพที่ 2.5 ไอโซเทอมการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวโลหะออกไซด์.....	13
ภาพที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างของแอลฟาอะลูมินัมออกไซด์ .....	14
ภาพที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างของสไตรีน (ก.) และเอทิลไฮโคลเฮกเซน (ข.) .....	15
ภาพที่ 2.8 โซลูบิลิเซชันและแอดโซลูบิลิเซชันของสารอินทรีย์ .....	17
ภาพที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างแอดไมเซลล์ .....	18
ภาพที่ 2.10 คุณสมบัติของโมเลกุลลิแกนด์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการโซลูบิลิเซชันสารอินทรีย์ ...	21
ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง.....	36
ภาพที่ 3.2 สรุพบวิธีการทดลองค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ .....	41
ภาพที่ 3.3 สรุพบวิธีการทดลองความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ .....	43
ภาพที่ 3.4 สรุพบวิธีการทดลองประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิลิเซชันของสารอินทรีย์ .....	46
ภาพที่ 3.5 สรุพบวิธีการทดลองประสิทธิภาพในการโซลูบิลิเซชันของสารอินทรีย์ .....	49
ภาพที่ 3.6 สรุพบวิธีการทดลองการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ .....	51
ภาพที่ 4.1 ความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส.....	54
ภาพที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์บนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส.....	57
ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิลิเซชันสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด ที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์บนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส.....	62
ภาพที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การละลายของสไตรีนในแอดไมเซลล์โดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์บนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส.....	63

ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการแอตโซลูบ์ไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ  
 แรมโนลิพิดที่ผสมโตนคานอลบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0  
 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส..... 65

ภาพที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การละลายของเอทิลไซโคลเฮกเซนในแอตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ  
 แรมโนลิพิดที่ผสมโตนคานอลบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0  
 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส..... 67

ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการโซลูบ์ไลเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด ที่  
 ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5  
 และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส..... 69

ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการโซลูบ์ไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ  
 แรมโนลิพิด ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ 25 ±  
 2 องศาเซลเซียส..... 72

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมโดยกระบวนการดูดซับด้วยสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณลักษณะของสารลดแรงตึงผิวที่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่มีขั้วหรือส่วนที่ชอบน้ำ เรียกว่า ไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) และส่วนที่ไม่มีขั้วหรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เรียกว่า ไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้สารลดแรงตึงผิวสามารถกระจายตัวอยู่ระหว่าง 2 ภูมิภาคที่แตกต่างกันได้ จึงได้มีการนำสารลดแรงตึงผิวมาประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลายทั้งในด้านอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม เช่น อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมทำความสะอาด (toiletries) สารทำให้เปียก (wetting agent) ใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) สารซักฟอก (detergent) และสารทำให้เกิดโฟม (foaming agent) เป็นต้น (ณรงค์ ลักษณะภิรมย์, 2543) ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อมได้นำสารลดแรงตึงผิวมาใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนทั้งในดินและน้ำ เช่น ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ใช้เป็นสารล้างดิน โดยการนำสารลดแรงตึงผิวมาชะล้างดินเพื่อสกัดสารอินทรีย์หรือโลหะหนักที่ปนเปื้อนออกจากดิน หรือนำสารลดแรงตึงผิวมาใช้ในการปรับสภาพตัวกลางดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ สารลดแรงตึงผิวอีกหนึ่งชนิดที่น่าสนใจ คือ สารลดแรงตึงผิวชีวภาพ (biosurfactant) เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวชีวภาพสามารถผลิตได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น แบคทีเรีย รา และยีสต์บางชนิด (จิราภรณ์ ธนียวัน และคณะ, 2551) จึงสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติและมีความเป็นพิษต่ำ

สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด (rhamnolipid) เป็นสารลดแรงตึงผิวชีวภาพประจุลบชนิดไกลโคลิพิด ที่ผลิตได้จากจุลินทรีย์จำพวก *Pseudomonas aeruginosa* จากตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมา โดย Yin และคณะ (2009) ได้ศึกษาการกำจัดฟิแนนทรินในน้ำเสียด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด พบว่า ในสภาวะที่มีแรมโนลิพิดจะสามารถกำจัดฟิแนนทรินจากน้ำเสียได้มากกว่าสภาวะที่ไม่มีแรมโนลิพิด 23 เท่า ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ นอกจากนี้ สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดยังส่งเสริมการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดย Pei และคณะ (2010) พบว่า ในกรณีที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายฟิแนนทรินได้ร้อยละ 83.6 แต่จะเกิดการยับยั้งการย่อยสลาย เมื่อเติม Tween-80 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ลงไป โดยสามารถย่อยสลายได้ร้อยละ 33.5 ส่วนในกรณีที่เติมสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดสามารถย่อยสลายฟิแนนทรินได้ร้อยละ 99.5 ดังนั้น การนำสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ

เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะสะสมอยู่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาค โดยจะหันส่วนที่มีขั้วไปหาส่วนที่มีขั้วและหันส่วนที่ไม่มีขั้วไปหาส่วนที่ไม่มีขั้ว ทำให้แรงตึงผิวของน้ำลดลงและเมื่อสารลดแรงตึงผิวมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นจนเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างไมเซลล์ (micelle) โดยหันส่วนที่มีขั้วหรือส่วนที่ชอบน้ำออกด้านนอก และด้านในจะเป็น

ส่วนที่ไม่มีขั้วซึ่งใช้เป็นพื้นที่ในการดูดซับสารอินทรีย์ เรียกกระบวนการนี้ว่า โซลูบิไลเซชัน (solubilization) ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ในกรณีที่ไม่มีตัวกลางดูดซับ เมื่อเติมตัวกลางดูดซับลงในสารละลาย ส่วนที่มีขั้วของสารลดแรงตึงผิวจะดูดซับบนตัวกลาง โดยอาจเกิดการเรียงตัวแบบเฮมิไมเซลล์ (hemimicelle) ซึ่งเป็นการเรียงตัวแบบชั้นเดียว หรือแอดไมเซลล์ (admicelle) ซึ่งเป็นการเรียงตัวแบบสองชั้น และส่วนที่ไม่มีขั้วหรือส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวจะเป็นส่วนที่ใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เรียกกระบวนการนี้ว่า แอดโซลูบิไลเซชัน (adsolubilization) ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ในกรณีที่มีตัวกลางดูดซับ

สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนแตกต่างกัน 3 ชนิด ในการกำจัดสไตรีนและเอทิลไซโคลเฮกเซนด้วยกระบวนการโซลูบิไลเซชันและแอดโซลูบิไลเซชันบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดผสมกับโมเลกุลลิแกนด์ นำมาใช้ในการปรับสภาพตัวกลางดูดซับอะลูมินัมออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของโมเลกุลลิแกนด์ที่มีจำนวนคาร์บอนแตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์

1.2.2 เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์บนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์

1.2.3 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสไตรีนและเอทิลไซโคลเฮกเซนทั้งในกรณีที่มีและไม่มีตัวกลางดูดซับอะลูมินัมออกไซด์

1.2.4 เพื่อศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์บนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์สูงกว่าสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์

1.3.2 สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ที่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากับจำนวนคาร์บอนส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวมีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสารอินทรีย์

1.3.3 ประสิทธิภาพในการดูดซับเอทิลไซโคลเฮกเซนสูงกว่าสไตรีน เนื่องจากเอทิลไซโคลเฮกเซนมีแรงไดโพล-ไดโพลน้อยกว่าสไตรีน และส่วนที่ใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์เป็นโมเลกุลส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการ อาคารสีภาควิชา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของงานวิจัย ดังนี้

1.4.1 ดำเนินการทดลองแบบที่ละเทที่อุณหภูมิห้อง ( $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส) โดยใช้ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์โซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 1.0 มิลลิโมลาร์ และปรับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 8.0 - 8.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และ/หรือกรดไฮโดรคลอริก

1.4.2 สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการทดลอง คือ สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด

1.4.3 โมเลกุลลิแกนด์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นแอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล (4 คาร์บอน) ออคทานอล (8 คาร์บอน) และโดเดคานอล (12 คาร์บอน) โดยมีอัตราส่วนในการผสมสารลดแรงตึงผิวกับโมเลกุลลิแกนด์เท่ากับ 10:1 โดยปริมาตร

1.4.4 ตัวกลางดูดซับที่ใช้ในการทดลอง คือ อะลูมินัมออกไซด์

1.4.5 สารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองเป็นสารที่มีแรงไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole) แตกต่างกันได้แก่ สไตรีนและเอทิลไซโคลเฮกเซน

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงผลของโมเลกุลลิแกนด์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์

1.5.2 ทราบถึงประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีตัวกลางดูดซับอะลูมินัมออกไซด์

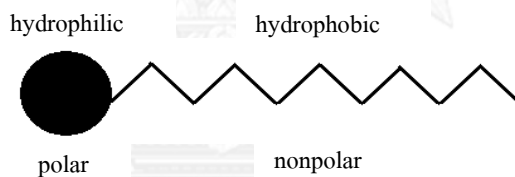
1.5.3 ทราบถึงความสามารถในการดูดซับและการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์บนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

สารลดแรงตึงผิว มาจากคำว่า surface active agent หมายถึง สารที่มีคุณสมบัติในการลดแรงตึงผิว โดยมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบแอมฟิพาติก (amphipatic structure) ซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้าง 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีขั้วหรือส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic portion) เป็นส่วนหัวที่ละลายน้ำได้ เช่น โปรีตินและน้ำตาล ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก หมู่ไฮดรอกซิล หมู่อะมิโน หมู่ฟอสเฟต เป็นต้น และส่วนที่ไม่มีขั้วหรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic portion) เป็นส่วนหางที่ละลายน้ำได้น้อย ซึ่งเป็นโมเลกุลพวกไฮโดรคาร์บอน เช่น กรดไขมันทั้งชนิดอิ่มตัว (saturated fatty acid) และไม่ิ่มตัว (unsaturated fatty acid) มีทั้งโมเลกุลใหญ่และโมเลกุลเล็ก ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวแตกต่างกันไป ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างโมโนเมอร์ของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่ (รุจา สารคุณ, 2548)

##### 2.1.1 สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ (Synthetic surfactants)

สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ผลิตได้จากกระบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถแบ่งตามประจุไฟฟ้าที่อยู่บนส่วนที่มีขั้วได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (anionic surfactant) คือ สารลดแรงตึงผิวเมื่อละลายน้ำแล้วส่วนที่มีขั้วจะแสดงประจุลบ เนื่องจากโมเลกุลประกอบไปด้วยหมู่ที่มีความสามารถแตกตัวเป็นไอออนลบได้ เช่น หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) หมู่ซัลเฟต (sulfate group) เป็นต้น
2. สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (cationic surfactant) คือ สารลดแรงตึงผิวเมื่อละลายน้ำแล้วส่วนที่มีขั้วจะแสดงประจุบวก เนื่องจากโมเลกุลประกอบไปด้วยหมู่ที่มีความสามารถแตกตัวเป็นไอออนบวกได้ เช่น เกลือของเอมีน และเกลือของควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium salt) เป็นต้น



3. สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (nonionic surfactant) คือ สารลดแรงตึงผิวเมื่อละลายน้ำแล้วส่วนที่มีขั้วจะไม่แสดงประจุ เนื่องจากโมเลกุลประกอบไปด้วยส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้วในอัตราส่วนต่างๆกัน ทำให้มีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่างกัน

4. สารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีทั้งประจุบวกและลบ (amphoteric surfactant หรือ zwitterionic surfactant) คือ สารลดแรงตึงผิวเมื่อละลายน้ำแล้วส่วนที่มีขั้วจะแสดงทั้งประจุบวกและประจุลบ ซึ่งการแตกตัวเป็นไอออนขึ้นอยู่กับพีเอช โดยถ้าอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดจะแสดงประจุบวก แต่ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นด่างจะแสดงประจุลบ และจะไม่แสดงประจุเมื่อพีเอชมีค่าเป็นกลาง

### 2.1.2 สารลดแรงตึงผิวธรรมชาติ (Natural surfactants)

สารลดแรงตึงผิวธรรมชาติสามารถพบได้ในธรรมชาติ เช่น อคาเซีย (acacia) เจลาติน (gelatin) ลาโนลิน (lanolin) ขี้ผึ้ง (beewax) เลซิทีน (lecitin) ไซโคลเดกซ์ติน (cyclodextrin) และซาโปนิน (saponin) เป็นต้น (Clint, 1992) และพบได้ในสิ่งมีชีวิตทั่วไป โดยมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต เช่น ในเยื่อหุ้มเซลล์ที่มีฟอสโฟลิพิด ฟอสโฟลิพิดจะทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวในเยื่อเซลล์ ในน้ำมันไขมันส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปไตรกลีเซอไรด์ แต่มีจำนวนน้อยที่อยู่ในรูปฟอสโฟลิพิดและไดกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่ช่วยให้อิมัลชันในน้ำมันเสถียร สารลดแรงตึงผิวที่พบในระบบเลือด ได้แก่ ซีรัมอัลบูมิน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารก่ออิมัลชันที่ดี (รุจา สารคุณ, 2548)

### 2.1.3 สารลดแรงตึงผิวชีวภาพ (Biosurfactants)

สารลดแรงตึงผิวชีวภาพ เป็นสารชีวโมเลกุลที่สามารถผลิตได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น แบคทีเรีย รา และยีสต์บางชนิด (จิราภรณ์ ธนียวัน และคณะ, 2551) โดยมีสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน เช่น น้ำตาล น้ำมัน อัลเคน และของเสียอินทรีย์ต่างๆ (Czaplicka และ Chmielarz, 2009; Szymanska และ Sadowski, 2010) สารลดแรงตึงผิวชีวภาพส่วนใหญ่จะมีประจุเป็นลบหรือเป็นกลาง โดยประจุลบนั้นอาจเนื่องมาจากอิทธิพลของหมู่คาร์บอกซิลิก หมู่ฟอสเฟต หรือหมู่ซัลเฟต เป็นต้น ส่วนสารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่มีประจุบวก อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของหมู่แอมีน (amine) แต่จะพบในจำนวนน้อย (Mulligan, 2009) ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพจะแตกต่างกันตามชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิต ดังตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ผลิตจากจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ดังนั้น จึงสามารถแบ่งสารลดแรงตึงผิวชีวภาพตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็น 5 ประเภท (Desai และ Banat, 1997) ได้แก่

1. ไกลโคลิพิด (glycolipids) เป็นสารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตหรือน้ำตาล เชื่อมต่อกับไขมัน เช่น แรมโนลิพิด ซอโฟโรลิพิด ทรีฮาโลลิพิด ไกลโคลิพิด เป็นต้น

2. ไลโปเพปไทด์ (lipopeptides) และไลโปโพรตีน (lipoproteins) เป็นสารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ประกอบด้วยสายโซ่ของโพลีเพปไทด์เชื่อมต่อกับไขมัน เช่น เซอร์แฟกติน ซับลิไลซิน ไลเคนนิซิน เซอร์ราเวตติน อาร์โทรแฟกติน สเตรบิโตแฟกติน เป็นต้น

3. กรดไขมัน (fatty acids) ไขมัน (neutral lipids) และฟอสโฟลิพิด (phospholipids) เป็นสารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ประกอบด้วยสารในกลุ่มแอลกอฮอล์เชื่อมต่อกับไขมันและฟอสเฟต เช่น รูบิเวตติน R1 ออร์นินิลิพิด ฟอสฟาทีดิลกลีเซอรอล เป็นต้น

4. สารลดแรงตึงผิวชีวภาพชนิดโพลิเมอร์ (polymeric biosurfactants) เป็นสารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ประกอบด้วยโพลิแซคคาไรด์เชื่อมต่อกับกรดไขมัน เช่น อิมัลแซน ไลโปแซน แมนโนโพรตีน ไบโอดีสเพอร์แซน เป็นต้น

5. สารลดแรงตึงผิวชีวภาพชนิดอนุภาค (particulate biosurfactants) ประกอบด้วยโพรตีน ฟอสโฟลิพิด และไลโปโพลิแซคคาไรด์ ที่สะสมอยู่บนเซลล์ของจุลินทรีย์ (extracellular membrane vesicles) แล้วเปลี่ยนรูปเป็นไมโครอิมัลชัน (microemulsion) มีส่วนช่วยในการนำสารไฮโดรคาร์บอนเข้าสู่เซลล์

ตารางที่ 2.1 สารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ผลิตจากจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ (Desai และ Banat, 1997)

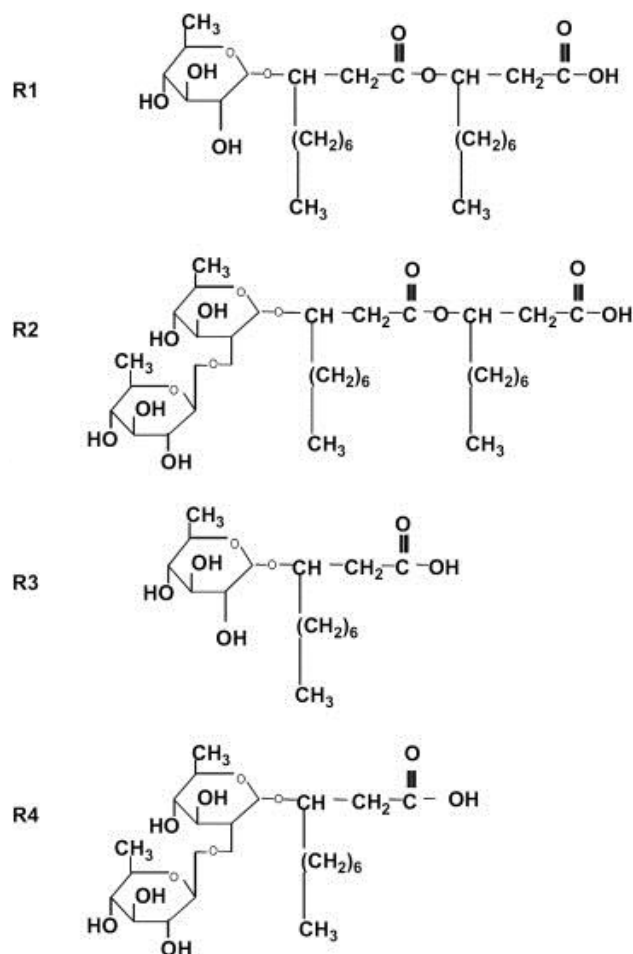
Biosurfactants	Organisms	Surface tension (mN/m)	CMC (g/L)	Interfacial tension (mN/m)
Glycolipids	<i>P. aeruginosa</i>	29	0.1-10	0.25
	<i>Pseudomonas sp.</i>	25-30		1
Trehalolipids	<i>R. erythropolis</i>	32-36	4	14-17
	<i>N. erythropolis</i>	30	20	3.5
	<i>Mycobacterium sp.</i>	38	0.3	15
Sophorolipids	<i>T. bombicola</i>	33		1.8
	<i>T. apicola</i>	30		0.9
	<i>T. petrophilum</i>			
Cellobiolipids	<i>U. zeae, U. maydis</i>			
Lipopeptides and lipoproteins	<i>B. licheniformis</i>	27	12-20	0.1-0.3
	<i>S. marcescens</i>	28-33		
	<i>P. fluorescens</i>	26.5		

ตารางที่ 2.1 สารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ผลิตจากจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ (ต่อ) (Desai และ Banat, 1997)

Biosurfactants	Organisms	Surface tension (mN/m)	CMC (g/l)	Interfacial tension (mN/m)
Surfactin	<i>B. subtilis</i>	27-32	23-160	1
Subtilisin	<i>B. subtilis</i>			
Gramicidins	<i>B. brevis</i>			
Fatty acids, neutral lipids and phospholipids				
Fatty acids	<i>C. lepus</i>	30	150	2
Neutral lipids	<i>N. erythropolis</i>	32		3
Phospholipids	<i>T. thiooxidans</i>			
Polymeric biosurfactants				
Emulsan	<i>A. calcoaceticus</i>			
Biodispersan	<i>A. calcoaceticus</i>			
Liposan	<i>C. lipolytica</i>	27	10	
Carbohydrate-protein-lipid	<i>P. fluorescens</i>			
	<i>D. polymorphis</i>			
Particulate biosurfactants				
Vesicle and fimbria	<i>A. calcoaceticus</i>			

### 2.1.3.1 แรมโนลิพิด (Rhamnolipid)

แรมโนลิพิดเป็นสารลดแรงตึงผิวชีวภาพประจุลบชนิดไกลโคลิพิด ที่ผลิตได้จากจุลินทรีย์จำพวก *Pseudomonas aeruginosa* มีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลแรมโนส (rhamnose) จำนวนหนึ่งหรือสองโมเลกุลเชื่อมต่อกับกรดเบต้าไฮดรอกซิลเดคานอิก ( $\beta$ -hydroxydecanoic acid) ด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ดังภาพที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างทางเคมีแบบต่างๆ ของแรมโนลิพิด นอกจากนี้แรมโนลิพิดยังมีโครงสร้างแบบอื่นๆ ขึ้นอยู่กับการออกแบบถังหมัก พีเอช สารตั้งต้น อุณหภูมิ องค์กรประกอบและชนิดของอาหาร (Mulligan, 2009)



ภาพที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีแบบต่างๆ ของแรมโนลิพิด  
(Mulligan, 2005)

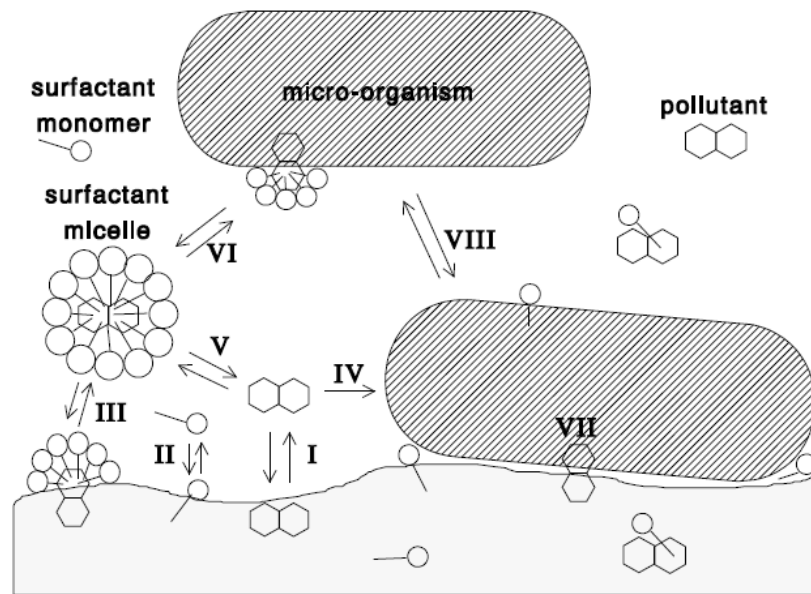
### 2.1.3.2 ประโยชน์และการประยุกต์ใช้แรมโนลิพิด (จิราภรณ์ ธนียวัน และคณะ, 2549)

1. ด้านการเกษตร ใช้เป็นสารยับยั้งเชื้อโรคของพืชที่เป็นพวงรา โดยมีผลยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคในพืชเป็นอย่างดีในพวก Zoosporic plant pathogen เช่น *Pythium aphanidermatum*, *phytophthora capsici* และ *Plasmopara lactucae-radici* ตามลำดับ
2. ด้านอุตสาหกรรมอาหาร ใช้เป็นแหล่งของน้ำตาลแรมโนส ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารปรุงแต่งกลิ่นและรส และใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารอินทรีย์บางชนิด น้ำตาลแรมโนสจากแรมโนลิพิดที่ผลิตจาก *Pseudomonas aeruginosa* จะเตรียมได้ง่ายกว่าวิธีอื่น โดยกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ทั้งนี้เพราะแรมโนลิพิดผลิออกนอกเซลล์ใน late log phase และ stationary phase ทำให้ง่ายในการแยกออกจากเซลล์

3. ด้านอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง สารลดแรงตึงผิวชีวภาพจำนวนมากได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง โดยใช้เป็น emulsifier solubilizer สารทำให้เปียก และใช้เป็นสารทำความสะอาด เนื่องจากไม่ระคายเคืองและเข้ากันง่ายกับผิว

4. ด้านสิ่งแวดล้อม สารลดแรงตึงผิวชีวภาพได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อมอย่างหลากหลาย โดยใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์หรือโลหะหนักที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทั้งในดินและน้ำ การฟื้นฟูทางชีวภาพ (bioremediation) เพิ่มการนำกลับน้ำมัน (Enhanced Oil Recovery, EOR) เป็นต้น เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวชีวภาพมีประสิทธิภาพแม้ในสถานะที่อุณหภูมิ ความเค็มและพีเอชสูง (Mukherjee และคณะ, 2006) มีความเป็นพิษต่ำและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Czaplicka และ Chmielarz, 2009; Mulligan, 2009)

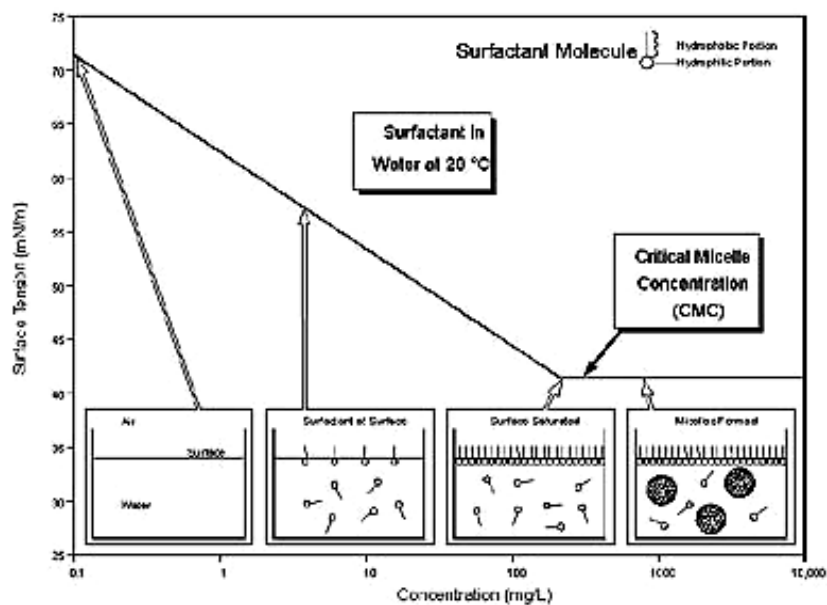
สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิทิดได้ถูกนำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนทั้งในดินและน้ำ โดยมีส่วนช่วยเพิ่มค่า bioavailability ของสารปนเปื้อนดังกล่าว โดยใช้กลไกหลัก 3 กลไก (ขนิษฐา วงษ์นิกร, 2547) คือ กลไกแรกการเกิดอิมัลชันของสารปนเปื้อน อันเนื่องมาจากสารลดแรงตึงผิวไปลดค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำและสารปนเปื้อน ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นอิมัลชัน กลไกที่สองการเพิ่มความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อน เนื่องจากการเกิดโครงสร้างไมเซลล์ และกลไกสุดท้ายการทำให้สารปนเปื้อนเคลื่อนย้ายได้ง่าย โดย Volkering และคณะ (1997) ได้อธิบายถึงการเพิ่มค่า bioavailability ของสารปนเปื้อนที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างจุลินทรีย์ สารปนเปื้อน ดิน และสารลดแรงตึงผิว ที่ทำให้เกิดการย่อยสลายสารปนเปื้อนได้ดีขึ้น ดังภาพที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า สารปนเปื้อนบางส่วนละลายน้ำ บางส่วนถูกดูดซับและดูดซับในดิน (I) เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไป โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะไปยึดเกาะที่ผิวหน้าดิน (II) และที่เมมเบรนของจุลินทรีย์เนื่องจากมีส่วนที่เป็นฟอสโฟลิพิดคล้ายสารลดแรงตึงผิว และยังไปช่วยเพิ่มการละลายของสารปนเปื้อนโดยเกิดโครงสร้างไมเซลล์ (III) จุลินทรีย์จึงสามารถย่อยสลายสารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำได้ (IV) สารปนเปื้อนบางส่วนถูกดูดซับด้วยโครงสร้างไมเซลล์ (V) แล้วจึงนำเข้าสู่เซลล์ (VI) บางกรณีจุลินทรีย์สามารถนำสารปนเปื้อนไปใช้ได้โดยตรง (VII) โดยสารลดแรงตึงผิวมีส่วนช่วยทำให้จุลินทรีย์สามารถเคลื่อนที่เข้ายึดเกาะที่ผิวหน้าดินได้ (III)



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจุลินทรีย์ ดิน สารปนเปื้อน และสารลดแรงตึงผิว  
(Volkering และคณะ, 1997)

## 2.2 ความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration, CMC )

เมื่อสารลดแรงตึงผิวอยู่ในสารละลาย โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะสะสมอยู่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค โดยจะหันส่วนที่มีขั้วไปหาส่วนที่มีขั้วและหันส่วนที่ไม่มีขั้วไปหาส่วนที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้แรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัสลดลง การลดลงของแรงตึงผิวเกิดจากการสะสมตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มมากขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าแรงตึงผิวลดต่ำลงเรื่อยๆ จนบริเวณนั้นอึดตัวไปด้วยโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว และโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวส่วนเกินไม่สามารถแทรกตัวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคจะเกิดการรวมตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า ไมเซลล์ (micelle) ซึ่งค่าแรงตึงผิวของสารละลายจะมีค่าคงที่และไม่ลดลงอีก ถึงแม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวลงไปอีกเท่าใด เรียกจุดนี้ว่า ความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration, CMC ) ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารลดแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดโครงสร้างไมเซลล์ในระบบ ดังนั้น CMC จึงเป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิว เช่น ถ้าสารลดแรงตึงผิวมีค่า CMC ต่ำ แสดงว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณน้อยก็สามารถลดแรงตึงผิวได้ แต่ถ้าสารลดแรงตึงผิวมีค่า CMC สูง แสดงว่าต้องใช้สารลดแรงตึงผิวปริมาณมากในการลดแรงตึงผิว



ภาพที่ 2.4 การเกิดโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว

(<http://www.kruss.de/en/theory/measurements/surface-tension/cmc-measurement.html>)

### 2.3 การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวโลหะออกไซด์ (Adsorption of ionic surfactant onto metal oxide surface)

การปรับสภาพพื้นผิวดักกลางดูดซับด้วยสารลดแรงตึงผิว สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนทั้งในด้านอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม เช่น ใช้ในกระบวนการทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกหรือสารปนเปื้อนออกจากพื้นผิววัสดุ โดยส่วนที่ไม่มีขั้วของสารลดแรงตึงผิวที่เติมลงไปจะดูดซับสารปนเปื้อนบนพื้นผิววัสดุ ซึ่งเป็นการลดค่าแรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัสและลดการยึดติดของสารปนเปื้อนกับพื้นผิวของวัสดุ ทำให้สารปนเปื้อนหลุดออกมาและถูกดูดซับโดยโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย ดังนั้น สารปนเปื้อนจึงไม่ตกตะกอนมาดูดซับหรือเกาะติดบนพื้นผิววัสดุอีก (Rosen, 2004) นอกจากนี้ ตัวกลางที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในเครื่องกรอง (filter) หรือถังปฏิกรณ์แบบแพคเบด (packed-bed reactor) ใช้ในการบำบัดน้ำเสียหรือน้ำใต้ดิน โดยการสูบน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนขึ้นมาบำบัดซึ่งจำเป็นต้องใช้สารลดแรงตึงผิวช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อนที่ละลายน้ำได้น้อย หรือนำตัวกลางที่ปรับสภาพมาประยุกต์ใช้โดยการสร้างกำแพงขวางการไหลของน้ำเมื่อน้ำไหลซึมผ่านกำแพงนี้ สารลดแรงตึงผิวจะดูดซับกับสารปนเปื้อนคล้ายกับเป็นการกรองน้ำ ทำให้น้ำสะอาดขึ้น ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูทางชีวภาพในการกำจัดสารอินทรีย์หรือโลหะหนักที่ปนเปื้อน

ออกจากดินหรือตะกอนดิน อีกทั้งยังช่วยชะลอการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในดิน (Charoensaeng และคณะ, 2008; Lewlomphaisan, 2009)

มีหลายงานวิจัยได้ศึกษาการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวโลหะออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตัวกลางในการกำจัดสารอินทรีย์ โดยสารลดแรงตึงผิวที่ดูดซับบนพื้นผิวโลหะออกไซด์จะเกิดการรวมตัวและเรียงตัวในรูปแบบต่างๆ ทำให้โลหะออกไซด์ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้น การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวโลหะออกไซด์ เช่น อะลูมินัมออกไซด์ กระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นโดยการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การเกิดไอออนแพร์ (ion pairing) และการสร้างพันธะไฮโดรโฟบิก (hydrophobic bonding) (E. Asnachinda, 2009; Charoensaeng และคณะ, 2008) โดยไอโซเทอมการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวโลหะออกไซด์จะมีลักษณะเป็นไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) (Somasundaran และ Fuerstenau, 1966) ดังภาพที่ 2.5 เมื่อสร้างกราฟล็อกการิทึมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวกับค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว จะแบ่งออกได้เป็น 4 ขอบเขต ดังนี้

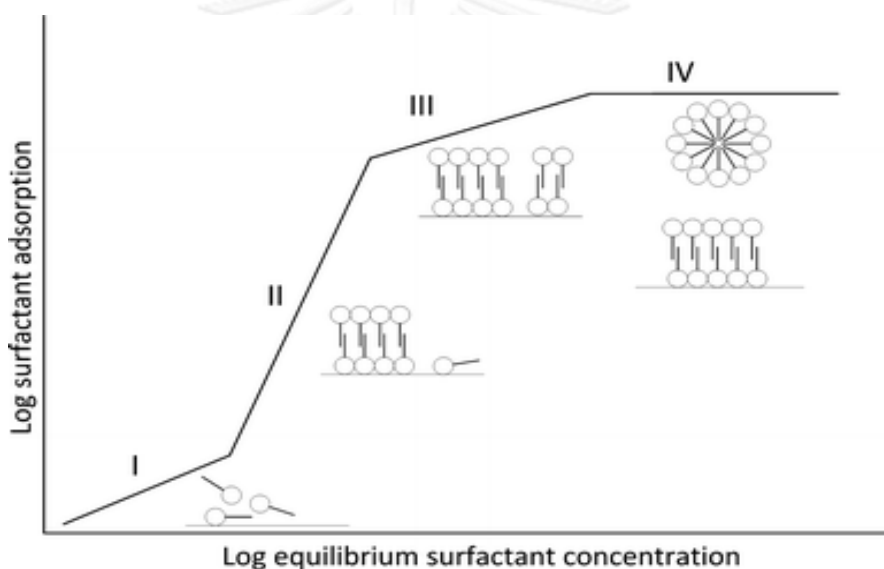
ขอบเขตที่ 1 สารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในสารละลายมีความเข้มข้นต่ำจึงเกิดการดูดซับในปริมาณน้อย ซึ่งในขั้นตอนนี้การดูดซับเป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's law) โดยกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและจะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น กระบวนการดูดซับหลักที่เกิดขึ้น คือ การแลกเปลี่ยนไอออน โดยสารลดแรงตึงผิวส่วนที่มีขั้วจะดูดซับบนพื้นผิวโลหะออกไซด์ ซึ่งการดูดซับในขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะอยู่ในรูปของโมโนเมอร์และยังไม่เกิดการรวมตัวกัน

ขอบเขตที่ 2 กราฟจะมีความชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวโลหะออกไซด์เพิ่มมากขึ้น สารลดแรงตึงผิวจะเริ่มมีการจัดเรียงโครงสร้างแบบเฮมิไมเซลล์ (hemimicelle) หรือแอดไมเซลล์ (admicelle) โดยโครงสร้างของเฮมิไมเซลล์นั้นเป็นการจัดเรียงตัวแบบชั้นเดียว ซึ่งส่วนที่มีขั้วของสารลดแรงตึงผิวจะดูดซับอยู่บนพื้นผิวโลหะออกไซด์และส่วนที่ไม่มีขั้วจะเป็นส่วนที่สัมผัสกับสารละลาย ส่วนโครงสร้างของแอดไมเซลล์นั้นจะมีการจัดเรียงตัวแบบสองชั้น โดยส่วนที่มีขั้วของสารลดแรงตึงผิวจะดูดซับบนพื้นผิวโลหะออกไซด์และส่วนที่ไม่มีขั้วจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างสายไฮโดรคาร์บอนด้วยแรงไฮโดรโฟบิก (hydrophobic force) ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกันของบริเวณส่วนหาง (tail-tail interaction) ของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวแบบเฮมิไมเซลล์หรือแอดไมเซลล์นั้น จะเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่ำกว่าค่า CMC



ขอบเขตที่ 3 ความชันของกราฟจะลดลง เนื่องจากเกิดแรงผลักทางไฟฟ้า (electrostatic repulsion) ระหว่างสารลดแรงตึงผิวที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวโลหะออกไซด์ที่อยู่ติดกัน โดยในขอบเขตนี้ จะเกิดโครงสร้างแอมโมเซลล์อย่างสมบูรณ์

ขอบเขตที่ 4 เป็นขอบเขตที่แสดงถึงค่าการดูดซับสูงสุดของสารลดแรงตึงผิว โดยจุดเปลี่ยนระหว่างขอบเขตที่ 3 ไปยังขอบเขตที่ 4 เป็นจุดเริ่มต้นในการสร้างไมเซลล์หรือ CMC ดังนั้น ในขอบเขตที่ 4 ความชันของกราฟจึงมีค่าคงที่ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น แต่จะไม่เพิ่มการดูดซับ เนื่องจากพื้นผิวของโลหะออกไซด์อิ่มตัวด้วยการดูดซับของแอมโมเซลล์ ดังนั้น การเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว จึงเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของไมเซลล์ในระบบ



ภาพที่ 2.5 ไอโซเทอมการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวโลหะออกไซด์ (Charoensaeng และคณะ, 2008)

ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวโลหะออกไซด์สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.1

$$q = \frac{(C_i - C_f)V}{w_g} \quad (2.1)$$

เมื่อ

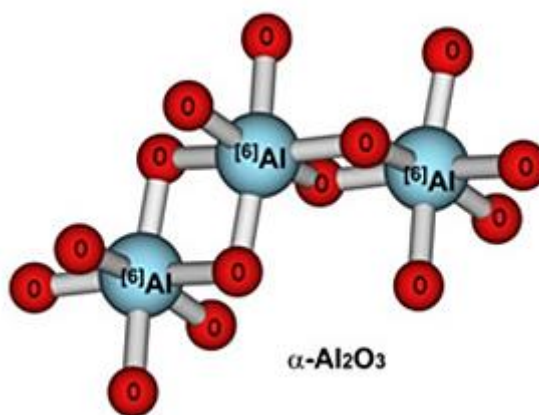
- q = ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิว (โมลต่อกรัม)
- $C_i$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารลดแรงตึงผิว (โมลต่อลิตร)
- $C_f$  = ความเข้มข้นที่สมดุลของสารลดแรงตึงผิว (โมลต่อลิตร)

$V$  = ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)

$W_s$  = น้ำหนักของอะลูมินัมออกไซด์ (กรัม)

### 2.3.1 อะลูมินัมออกไซด์ (Aluminum oxide)

ผลึกโครงสร้างของแอลฟาอะลูมินัมออกไซด์ ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นรูปของอะลูมินาที่มีความเสถียรมากที่สุด ซึ่งโครงสร้างของอะลูมินัมออกไซด์ประกอบไปด้วย ออกซิเจนเรียงตัวกันแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) และมีอะลูมิเนียมแทรกอยู่ในช่องออกตะฮีดรอล (octahedral) 2 ใน 3 ส่วนของช่องทั้งหมด (อนูรัตน์ ภูวานคำ, 2548) ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างของแอลฟาอะลูมินัมออกไซด์  
(Lee และคณะ, 2009)

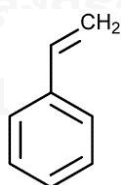
พีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมประจุบนพื้นผิวของอะลูมินัมออกไซด์ โดยอะลูมินัมออกไซด์จะมีประจุรวมบนพื้นผิวเท่ากับศูนย์ (point of zero charge, PZC) ที่พีเอช 9.1 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Sun และ Jaffe, 1996) ถ้าพีเอชของสารละลายมีค่าต่ำกว่าค่า PZC พื้นผิวของอะลูมินัมออกไซด์จะแสดงประจุบวก ในทางตรงกันข้าม ถ้าพีเอชของสารละลายมีค่ามากกว่าค่า PZC พื้นผิวของอะลูมินัมออกไซด์จะแสดงประจุลบ ดังนั้น การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวประจุลบบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ที่พีเอชมากกว่าค่า PZC (9.1) จึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้

อะลูมินัมออกไซด์เป็นตัวกลางดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างประจุบวกบนพื้นผิวของอะลูมินัมออกไซด์กับประจุลบของสารลดแรงตึงผิว และเกิดจากปฏิกิริยาของสายไฮโดรคาร์บอนของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวที่ดูดซับบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ในรูปของโครงสร้างแอดไมเซลล์ด้วย (Adak และคณะ, 2005)

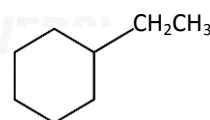
### 2.3.2 สารอินทรีย์ (Organic compound)

สารอินทรีย์เป็นสารที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมายในชีวิตประจำวัน และมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ใช้เป็นตัวทำละลาย เป็นส่วนประกอบหรือส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น สี ยางสังเคราะห์ พลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ กิจกรรมของมนุษย์อาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมได้ เช่น การลักลอบทิ้งกากสารเคมีหรือปล่อยน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัด การรั่วซึมของสารเคมีจากโรงงานอุตสาหกรรมลงสู่แหล่งน้ำ การชะของน้ำจากพื้นที่ฝังกลบขยะที่ไม่ได้มาตรฐาน เป็นต้น จากกิจกรรมต่างๆ เหล่านี้ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะกลุ่มของสารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย เป็นสารในกลุ่ม Light Non-Aqueous Phase Liquid หรือ LNAPL ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ทำให้เกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติได้ช้า จึงอาจก่อให้เกิดการแพร่กระจายและตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนของดินและแหล่งน้ำ อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำใต้ดิน (ชไมพร สุขธัมภ์รักษา และ สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, 2555)

โดยทั่วไปในน้ำเสียจะประกอบด้วยสารอินทรีย์ปนเปื้อนมากกว่าหนึ่งชนิดที่มีลักษณะโครงสร้างและมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารอินทรีย์ 2 ชนิด ได้แก่ สไตรีน (styrene) และเอทิลไซโคลเฮกเซน (ethyl cyclohexane) มาใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ซึ่งสารอินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดจะมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีคล้ายคลึงกัน แต่มีความสามารถในการละลายน้ำและมีแรงไดโพล-ไดโพลแตกต่างกัน จึงทำให้มีสภาพขั้วแตกต่างกันด้วย โดยสไตรีนเป็นสารในกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีต่อกันเป็นวงแหวนเบนซีน และเอทิลไซโคลเฮกเซนมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นวงหกเหลี่ยม ดังภาพที่ 2.7



ก.



ข.

ภาพที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างของสไตรีน (ก.) และเอทิลไซโคลเฮกเซน (ข.)

### 2.3.3 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการดูดซับของสารลดแรงตึงผิว (Parameter affecting surfactant adsorption)

#### 1. พีเอช

พีเอชของสารละลายเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวโลหะออกไซด์ เมื่อพีเอชของสารละลายลดลง พื้นผิวของอะลูมินัมออกไซด์จะแสดงประจุบวกมากกว่า เนื่องจากเกิดการดูดซับกับโปรตอน ( $H^+$ ) ในสารละลาย ทำให้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบเกิดการดูดซับกับอะลูมินัมออกไซด์ได้มากขึ้นและสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเกิดการดูดซับได้น้อยลง (Rosen, 2004) ในทางตรงกันข้าม เมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มมากขึ้นพื้นผิวของอะลูมินัมออกไซด์จะแสดงประจุลบมากกว่า ทำให้เกิดการสูญเสียสารลดแรงตึงผิว (desorption) ที่ดูดซับบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ เมื่อเกิดการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์จะทำให้พีเอชของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น โดยพีเอชของสารละลายที่สมดุลจะสูงกว่าพีเอชเริ่มต้น เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคตไอออนและไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) ที่ดูดซับบนอะลูมินัมออกไซด์ (Lewlomphaisan, 2009) ดังนั้น พีเอชของสารละลายจึงมีความสำคัญในการกำหนดประจุของอะลูมินัมออกไซด์

#### 2. ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์

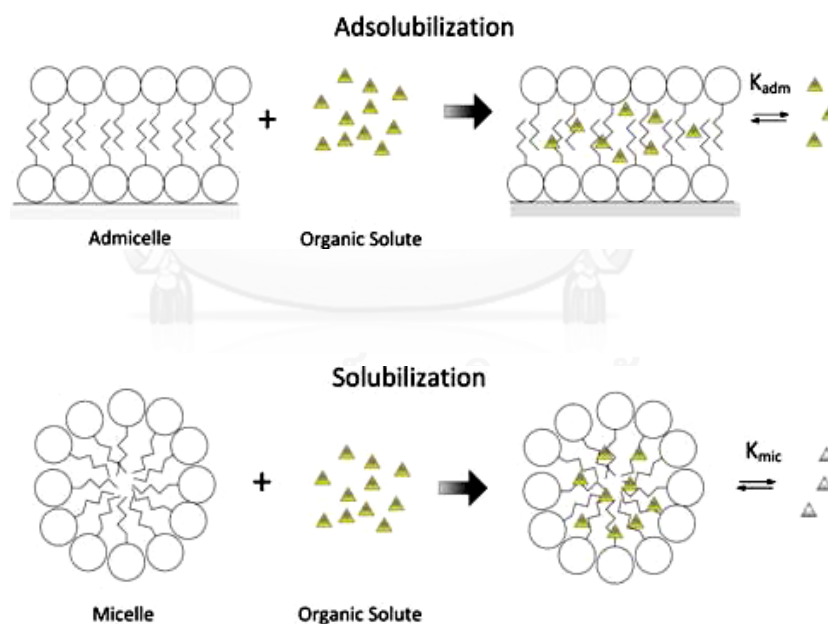
การเติมอิเล็กโทรไลต์ เช่น NaCl หรือ KBr ในปริมาณเพียงเล็กน้อยลงในสารละลายจะมีผลต่อการดูดซับของสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ที่เติมลงไปจะช่วยลดแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเหมือนกัน ทำให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเกิดการรวมตัวเป็นโครงสร้างแอดไมเซลล์ได้ง่ายขึ้น เมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซับสูงสุดของสารลดแรงตึงผิวจะเพิ่มมากขึ้นด้วย (Rosen, 2004) การโซลูบิลิเซชันของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพชนิดแรมโนลิพิด พบว่าเมื่อมีอิเล็กโทรไลต์ในระบบจะทำให้ค่า CMC ต่ำลง ทำให้เกิดโครงสร้างไมเซลล์ได้เร็วขึ้น ดังนั้น จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการโซลูบิลิเซชันของสารอินทรีย์ (Q. Wang และคณะ, 2007)

#### 3. อุณหภูมิ

การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ประสิทธิภาพและปริมาณการดูดซับสูงสุดของสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุลดลง (Pavan และคณะ, 1999) แต่ผลของอุณหภูมิมิเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลของพีเอช แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุประเภท POE เพิ่มมากขึ้น (Rosen, 2004)

## 2.4 แอดโซลูบิไลเซชันและโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์ (Adsolubilization and solubilization of organic solutes)

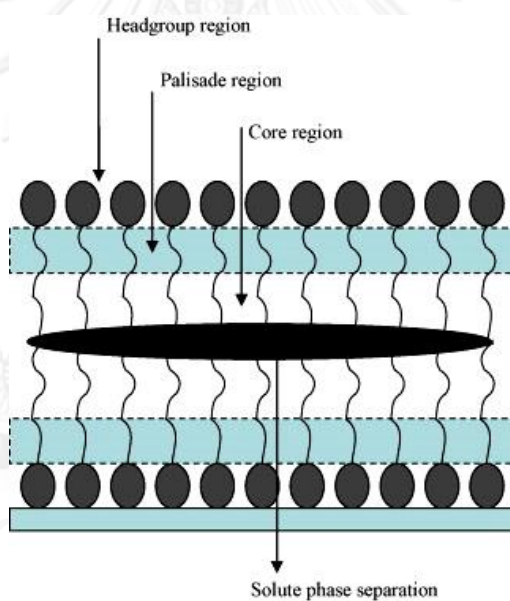
โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีขั้วหรือส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่มีขั้วหรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เมื่อโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างไมเซลล์จะทำให้สามารถละลายสารอินทรีย์ได้ ซึ่งการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนตัวกลางอาจเกิดโครงสร้างเฮมิไมเซลล์หรือแอดไมเซลล์ ขึ้นกับว่าจะเกิดการเรียงตัวแบบชั้นเดียวหรือสองชั้น ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายสูง สารลดแรงตึงผิวจะเกิดการเรียงตัวแบบสองชั้นหรือแอดไมเซลล์ ซึ่งด้านในจะเป็นส่วนที่เกิดแรงดึงดูดระหว่างกันของบริเวณส่วนหางจึงเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วเรียกว่า ไฮโดรโฟบิกคอร์ (hydrophobic core) ซึ่งเป็นส่วนที่ละลายสารอินทรีย์เข้าไปในแอดไมเซลล์ ดังนั้น การดูดซับสารอินทรีย์ของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่บนตัวกลาง เรียกว่า แอดโซลูบิไลเซชัน (adsolubilization) ส่วนในกรณีที่ไม่มีตัวกลาง เมื่อสารลดแรงตึงผิวเกิดการรวมตัวในรูปของไมเซลล์ การดูดซับสารอินทรีย์เข้าไปในไมเซลล์ เรียกว่า โซลูบิไลเซชัน (solubilization) (Charoensaeng และคณะ, 2008; Rosen, 2004) ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 โซลูบิไลเซชันและแอดโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์  
(Charoensaeng และคณะ, 2008)

โดยทั่วไปลักษณะของโครงสร้างแอดไมเซลล์หรือไมเซลล์จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก (Attaphong และคณะ, 2010; Charoensaeng และคณะ, 2008; Dickson และ O'Haver, 2002; Saphanuchart และคณะ, 2007) ดังภาพที่ 2.9 ได้แก่

1. ส่วนหัว (headgroup region) หรือส่วนที่มีขั้วของสารลดแรงตึงผิว เป็นส่วนที่อยู่ด้านนอกซึ่งจะดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวกลางในรูปของแอดไมเซลล์
2. ส่วนคอร์ (core region) เป็นส่วนที่อยู่ด้านในซึ่งไม่มีขั้ว เนื่องจากเป็นส่วนของสายไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นส่วนหางของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว
3. ส่วนพาลิเซด (palisade region) เป็นส่วนที่อยู่ระหว่างส่วนหัวและคอร์ของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วปานกลางประกอบด้วยคาร์บอนที่อยู่ใกล้กับส่วนหัวและมีคุณสมบัติยอมให้โมเลกุลของน้ำซึมผ่านในแอดไมเซลล์ด้วย (Charoensaeng และคณะ, 2008; Dickson และ O'Haver, 2002)



ภาพที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างแอดไมเซลล์  
(Saphanuchart และคณะ, 2007)

มีหลายงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งในการโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์ในไมเซลล์หรือแอดไมเซลล์ ซึ่งพบว่าสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วจะเกิดการพาดิชัน (partition) เข้าไปในส่วนคอร์ ในขณะที่สารอินทรีย์ที่มีขั้วจะเกิดการพาดิชันเข้าไปในส่วนหัวและส่วนพาลิเซด (Charoensaeng และคณะ, 2008; Dickson และ O'Haver, 2002; Saphanuchart และคณะ, 2007) โดยการโซลูบิไลเซชันและสัมประสิทธิ์การพาดิชัน (partition coefficient) มีแนวโน้ม ดังนี้

- ถ้าสารอินทรีย์เกิดการพาดิชนเข้าไปในส่วนคอร์ พบว่า สัมประสิทธิ์การพาดิชนจะเพิ่มขึ้น เมื่อเศษส่วนโมล (mole fraction) ของสารอินทรีย์ในแอตโมเซลล์เพิ่มขึ้น
- ถ้าสารอินทรีย์เกิดการพาดิชนเข้าไปในส่วนพาลีเซต พบว่า สัมประสิทธิ์การพาดิชนจะลดลง เมื่อเศษส่วนโมลของสารอินทรีย์ในแอตโมเซลล์เพิ่มขึ้น
- ถ้าสารอินทรีย์เกิดการพาดิชนเข้าไปทั้งในส่วนคอร์และส่วนพาลีเซต พบว่า สัมประสิทธิ์การพาดิชนจะค่อนข้างคงที่เมื่อเศษส่วนโมลของสารอินทรีย์ในแอตโมเซลล์เพิ่มขึ้น

#### 2.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารอินทรีย์ในไมเซลล์ ( $K_{mic}$ ) และแอตโมเซลล์ ( $K_{adm}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารอินทรีย์ในไมเซลล์ ( $K_{mic}$ ) แสดงถึงความสามารถในการโซลูบิลิเซชันของสารอินทรีย์ (Charoensaeng และคณะ, 2008; Fuangswasdi และคณะ, 2006) และค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารอินทรีย์ในแอตโมเซลล์ ( $K_{adm}$ ) แสดงถึงความสามารถในการแอตโซลูบิลิเซชันของสารอินทรีย์ (Charoensaeng และคณะ, 2008; Fuangswasdi และคณะ, 2006)

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการโซลูบิลิเซชัน ประกอบด้วย ลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว พีเอชของสารละลาย อุณหภูมิ ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ และจำนวนความยาวของอัลคิลของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว (Abouseoud และคณะ, 2010; Charoensaeng และคณะ, 2008) การศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิลิเซชันของสารอินทรีย์ของสารลดแรงตึงผิวสามารถคำนวณได้จาก Molar Solubilization Ratio (MSR) โดยมีค่าเท่ากับจำนวนโมลของสารอินทรีย์ต่อจำนวนโมลของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย ซึ่งสามารถหาได้จากความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารอินทรีย์กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว คำนวณได้ดังสมการที่ 2.2

$$MSR = \frac{(S_{mic} - S_{CMC})}{(C_{surf} - CMC)} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$S_{mic}$  = ค่าการละลายรวมทั้งหมดของสารอินทรีย์ในไมเซลล์ (โมลต่อลิตร)

$S_{CMC}$  = ค่าการละลายของสารอินทรีย์ที่ CMC (โมลต่อลิตร)

$C_{surf}$  = ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่สูงกว่า CMC

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารอินทรีย์ในไมเซลล์ ( $K_{mic}$ ) เมื่อ  $K_{mic}$  คือ อัตราส่วนระหว่างเศษส่วนโมลของสารอินทรีย์ในไมเซลล์และเศษส่วนโมลของสารอินทรีย์ในสารละลาย สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.3



$$K_{mic} = \frac{X_{mic}}{X_{aq}} \quad (2.3)$$

โดยที่  $X_{mic}$  และ  $X_{aq}$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

$$X_{mic} = \frac{MSR}{(1+MSR)} \quad (2.4)$$

$$X_{aq} = \frac{C_{aq}}{C_{aq}+55.55} \quad (2.5)$$

เมื่อ

- $X_{mic}$  = เศษส่วนโมลของสารอินทรีย์ในไมเซลล์
- $X_{aq}$  = เศษส่วนโมลของสารอินทรีย์ในสารละลาย
- $C_{aq}$  = ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในสารละลาย (โมลต่อลิตร)

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารอินทรีย์ในแอตไมเซลล์ ( $K_{adm}$ ) เมื่อ  $K_{adm}$  คือ อัตราส่วนระหว่างเศษส่วนโมลของสารอินทรีย์ในแอตไมเซลล์และเศษส่วนโมลของสารอินทรีย์ในสารละลาย สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.6

$$K_{adm} = \frac{X_{adm}}{X_{aq}} \quad (2.6)$$

เมื่อ

- $X_{adm}$  = เศษส่วนโมลของสารอินทรีย์ในแอตไมเซลล์
- $X_{aq}$  = เศษส่วนโมลของสารอินทรีย์ในสารละลาย

โดยที่  $X_{adm}$  และ  $X_{aq}$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

$$X_{adm} = \frac{(C_{i,s} - C_{f,s})}{(C_{i,s} - C_{f,s}) + (S_i - S_f)} \quad (2.7)$$

$$X_{aq} = \frac{C_{f,s}}{C_{f,s} + 55.55} \quad (2.8)$$

เมื่อ

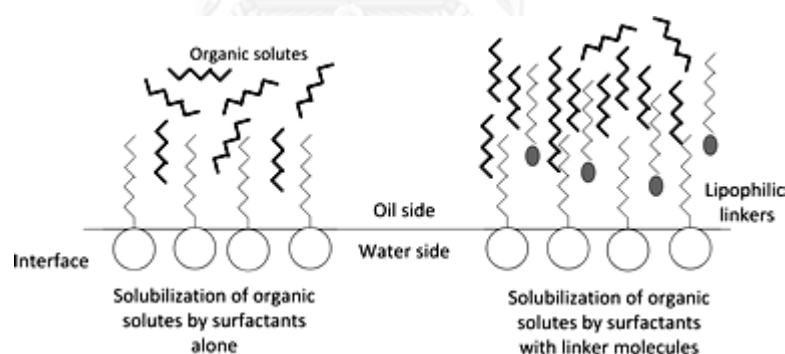
- $C_{i,s}$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ (โมลต่อลิตร)
- $C_{f,s}$  = ความเข้มข้นที่สมดุลของสารอินทรีย์ (โมลต่อลิตร)
- $S_i$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารลดแรงตึงผิว (โมลต่อลิตร)
- $S_f$  = ความเข้มข้นที่สมดุลของสารลดแรงตึงผิว (โมลต่อลิตร)



## 2.5 โมเลกุลลิงเกอร์ (Linker molecule)

โมเลกุลลิงเกอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นแอมฟิฟิลิก (amphiphilic) เช่น แอลกอฮอล์ที่มีสายโมเลกุลยาว โดยประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วหรือส่วนหัวที่มีขนาดเล็กและส่วนที่ไม่มีขั้วหรือส่วนหางที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้น ค่า Hydrophilic-Lipophilic Balance (HLB) หรือสัดส่วนระหว่างส่วนที่ชอบน้ำกับส่วนที่ชอบน้ำมันจึงมีค่าต่ำ ซึ่งค่า HLB ที่มีค่าต่ำทำให้โมเลกุลลิงเกอร์แสดงลักษณะไม่ชอบน้ำ โดยโมเลกุลลิงเกอร์จะเชื่อมระหว่างส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวและโมเลกุลของน้ำมันทำให้เกิดการโซลูบิไลเซชันสารอินทรีย์ได้มากขึ้น ดังภาพที่ 2.10 โดยประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันขึ้นกับจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลของแอลกอฮอล์ ดังนี้ (Graciaa และคณะ, 1993a)

- แอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอน 2-4 อะตอม จะมีคุณสมบัติเป็น co-solvent โดยจะลดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว
- แอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอน 4-9 อะตอม จะมีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวร่วม (co-surfactants) โดยจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และเกิดการดูดซับที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำและสารอินทรีย์
- แอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 อะตอมขึ้นไป จะเพิ่มการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ แต่จะไม่เกิดการดูดซับที่ผิวสัมผัส



ภาพที่ 2.10 คุณสมบัติของโมเลกุลลิงเกอร์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการโซลูบิไลเซชันสารอินทรีย์ (Charoensaeng และคณะ, 2008)

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

### 2.6.1 การกำจัดสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด

Guo และ Mulligan (2006) ศึกษาการกำจัดสไตรีนที่ปนเปื้อนในดินด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การสกัดสไตรีนจากดินโดยใช้แรมโนลิพิดเป็นสารล้างดินตามด้วยการบำบัดแบบไร้อากาศ พบว่า ภายในเวลา 1 วัน และ 5 วันสามารถกำจัดสไตรีนที่ความเข้มข้น 32,750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ออกจากดินได้ร้อยละ 72.7 และร้อยละ 88.3 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของสไตรีน 16,340 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สามารถกำจัดสไตรีนได้ร้อยละ 90 ในเวลา 1 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดสไตรีนจะมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น โดยมี weight solubilization ratio (WSR) เท่ากับ 0.29 การทดสอบการย่อยสลายโดยแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ พบว่า หลังจากเวลา 1 วัน และ 3 วัน สไตรีนถูกย่อยสลายร้อยละ 37.9 และร้อยละ 67 ตามลำดับ

Aşçı และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดแคดเมียมด้วยเคโอลิน (kaolin) และสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด โดยทำการทดลองในช่วงพีเอช 6.0-7.4 ที่มีความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมและความเข้มข้นของแรมโนลิพิดเท่ากับ 0.25-5.29 มิลลิโมลาร์ และ 0-100 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ผลการดูดซับแคดเมียมด้วยเคโอลิน พบว่า มีประสิทธิภาพสูงสุดที่พีเอช 6.6 โดยสามารถดูดซับแคดเมียมได้ร้อยละ 86.8 และเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลง ส่วนการดูดซับแคดเมียมจากเคโอลินด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด พบว่า มีประสิทธิภาพสูงสุดที่พีเอช 6.8 และที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 0.25 มิลลิโมลาร์ สามารถดูดซับแคดเมียมได้ร้อยละ 71.9 และประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

Clifford และคณะ (2007) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันเตตระคลอโรเอทิลีน (PCE) โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพชนิดแรมโนลิพิดที่ความเข้มข้น 0-170 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ค่าแรงตึงผิวระหว่าง PCE และแรมโนลิพิดจะลดลงจาก 47-10 มิลลินิวตันต่อเมตร เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น และการกำจัด PCE จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงกว่าค่า CMC โดยมี weight solubilization ratio (WSR) เท่ากับ 1.24 และที่ความเข้มข้นของแรมโนลิพิดเท่ากับ 170 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัด PCE ได้ 365 มิลลิกรัมต่อลิตร

Juwarkar และคณะ (2007) ศึกษาประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผลิตโดย *Pseudomonas aeruginosa* BS2 ในการกำจัดแคดเมียมและตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน ทำการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า แรมโนลิพิดร้อยละ 0.1 สามารถกำจัดแคดเมียมและตะกั่วได้มากกว่าร้อยละ 92 และร้อยละ 88 ตามลำดับ ภายในเวลา 36 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าสารลดแรง

ตั้งผิวชีวภาพแรมโนลิพิทลดความเป็นพิษของโลหะหนักทำให้เกิดจุลินทรีย์ *Azotobacter* และ *Rhizobium* เพิ่มมากขึ้น โดยไม่ทำให้คุณภาพดินต่ำลง

Aşçı และคณะ (2008) ศึกษาการกำจัดสังกะสีจากโซเดียมเฟลด์สปาร์ (Na-feldspar) ด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิท โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 12.5 – 100 มิลลิโมลาร์ พีเอช 5.0 – 7.6 และความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 0.47 – 4.08 มิลลิโมลาร์ จากการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้นของแรมโนลิพิท 25 มิลลิโมลาร์ พีเอช 6.8 และความเข้มข้นของสังกะสี 2.2 มิลลิโมลาร์ แรมโนลิพิทมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีได้สูงสุด โดยสามารถกำจัดสังกะสีจากโซเดียมเฟลด์สปาร์ได้ร้อยละ 98.83

Lai และคณะ (2009) ศึกษาการกำจัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH) จากดินปนเปื้อนน้ำมัน ด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ (แรมโนลิพิทและเซอร์แฟคติน) เปรียบเทียบกับสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ (Tween 80 และ Triton X-100) พบว่า สารลดแรงตึงผิวชีวภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัด TPH ได้มากกว่าสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ โดยแรมโนลิพิท เซอร์แฟคติน Tween 80 และ Triton X-100 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยมวล สามารถกำจัด TPH 3,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ได้ร้อยละ 23, 14, 6 และ 4 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 63, 62, 40 และ 35 ตามลำดับ ในการกำจัด TPH 9000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และพบว่าความสามารถในการกำจัด TPH จะมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวจากร้อย 0-2 โดยมวล

Nayak และคณะ (2009) ศึกษาคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิทที่ผลิตโดย *Pseudoxanthomonas* sp. PNK-04 พบว่า โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วยน้ำตาลแรมโนสหนึ่งและสองโมเลกุลเชื่อมต่อกับกรดเบต้าไฮดรอกซิลอัลโคนิก ( $\beta$ -hydroxy alkonic acids) ที่มีจำนวนคาร์บอน 8-12 อะตอม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเกิดอิมัลชันกับสารไฮโดรคาร์บอนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ Tween-80 และ Triton X-100 นอกจากนี้แรมโนลิพิทยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลาย 2-chlorobenzoic acid, 3-chlorobenzoic acid และ 1-methyl naphthalene โดยทำให้สารอินทรีย์เกิดการละลายได้มากขึ้น

Wang และ Mulligan (2009) ศึกษาการกำจัดสารหนูและโลหะหนัก (ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี) จากหางแร่ ด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิท (JBR425) ทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์ที่มีความยาว 15 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ใช้สารละลายแรมโนลิพิทเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่พีเอช 11 ไหลผ่านคอลัมน์ที่มีปริมาณหางแร่  $53 \pm 2$  กรัม ด้วยอัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า สามารถกำจัดสารหนู ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีได้ 148, 74, 2379 และ 259 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนการmobilization พบว่า จะเกิดการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับเหล็ก โดยจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเหล็ก เมื่อแรงตึง

ผิวมีค่าลดลงสารหนูจะถูกกำจัดผ่านโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวและการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับเหล็ก

Yin และคณะ (2009) ศึกษาคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผลิตโดยแบคทีเรีย *Pseudomonas aeruginosa* S6 จากน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมัน จากการทดลองพบว่าแรมโนลิพิดมีความสามารถในการลดค่าแรงตึงผิวของน้ำจาก 72 - 33.9 มิลลินิวตันต่อเมตร และมีค่า CMC 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบว่าในสถานะที่มีแรมโนลิพิดในสารละลายจะสามารถกำจัดฟิแนทรีนได้มากกว่าสถานะที่ไม่มีแรมโนลิพิด 23 เท่า ซึ่งการโซลูบิไลเซชันฟิแนทรีนจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว โดยมี weight solubilization ratio (WSR) เท่ากับ 0.2022 ซึ่งมากกว่าสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ Tween80 (0.012), Tween20 (0.008) และ Triton X-100 (0.016)

Abouseoud และคณะ (2010) ศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของเกลือ (NaCl) ต่อความสามารถในการเกิดอิมัลชันและการโซลูบิไลเซชันของแนพทาซีน โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพชนิดแรมโนลิพิดที่มีการปรับพีเอชตั้งแต่ 2-11 และความเข้มข้นของเกลือร้อยละ 5-20 โดยมวลต่อปริมาตร เมื่อเพิ่มพีเอชจาก 4-11 พบว่าค่าแรงตึงผิวของสารละลายจะมีค่าลดลงจาก 34-30 มิลลินิวตันต่อเมตร และการเกิดอิมัลชันของแนพทาซีนจะเพิ่มมากขึ้น โดยที่พีเอชเท่ากับ 7 และความเข้มข้นของเกลือร้อยละ 0 โดยมวลต่อปริมาตร ประสิทธิภาพการละลายของแนพทาซีนจะมีค่าสูงสุด (205 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่ที่พีเอชเป็นด่างและความเข้มข้นของเกลือมากกว่าร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร การละลายของแนพทาซีนจะลดลงมากกว่าร้อยละ 50 โดยที่พีเอชเท่ากับ 5 และ 11 การละลายของแนพทาซีนเท่ากับ 180 และ 92 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่ำกว่าค่า CMC (290 มิลลิกรัมต่อลิตร) การละลายของแนพทาซีนจะมีค่าน้อย เพราะสารลดแรงตึงผิวอยู่ในรูปโมโนเมอร์จึงไม่ได้ช่วยในการละลายแนพทาซีน แต่ที่ความเข้มข้นสูงกว่าค่า CMC สารลดแรงตึงผิวจะเกิดการรวมตัวกันเป็นไมเซลล์ ดังนั้น การโซลูบิไลเซชันของแนพทาซีนจึงเพิ่มขึ้น

Costa และคณะ (2010) ศึกษาคุณสมบัติและประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ *Pseudomonas aeruginosa* L2-1 จากน้ำเสียมันสำปะหลังและแรมโนลิพิด JBR599 ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ พบว่า JBR599 มีค่าแรงตึงผิวและค่า CMC เท่ากับ 29 มิลลินิวตันต่อเมตร และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และ L2-1 มีค่าแรงตึงผิวและค่า CMC เท่ากับ 30 มิลลินิวตันต่อเมตร และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยแรมโนลิพิดทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดอิมัลชันกับน้ำมันถั่วเหลืองได้ร้อยละ 100 และการกำจัดน้ำมันดิบที่ปนเปื้อนในดินทรายพบว่า JBR599 กำจัดได้ร้อยละ 98 และ L2-1 กำจัดได้ร้อยละ 69

Pei และคณะ (2010) ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ Tween-80 และ สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดต่อการย่อยสลายพีแนนทรีน (PHE) โดยจุลินทรีย์ *Sphingomonas sp.* GF2B ทำการทดลองโดยใช้สารลดแรงตึงผิวเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการย่อยสลาย PHE 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายในเวลา 10 วัน พบว่า ในกรณีที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว จุลินทรีย์ *Sphingomonas sp.* GF2B สามารถย่อยสลาย PHE ได้ร้อยละ 83.6 แต่จะเกิดการยับยั้ง การย่อยสลาย เมื่อเติม Tween-80 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ลงไป โดยสามารถย่อยสลาย PHE ได้ร้อยละ 33.5 ส่วนในกรณีที่เติมสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดจะสามารถย่อยสลาย PHE ได้มากถึงร้อยละ 99.5 และการโซลูบิไลเซชัน PHE นั้น จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า Tween-80 สามารถกำจัด PHE ได้ 15.4 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ความเข้มข้น 79 มิลลิกรัมต่อลิตร แรมโนลิพิดสามารถกำจัด PHE ได้ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

Lovaglio และคณะ (2011) ศึกษาผลของพีเอชต่อการเกิดอิมัลชันระหว่างสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดกับเบนซีน น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันก๊าด เปรียบเทียบกับสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ SDS โดยทำการศึกษาในช่วงพีเอช 3-9 พบว่า แรมโนลิพิดมีประสิทธิภาพในการเกิดอิมัลชันกับเบนซีน น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันก๊าดได้ดีกว่า SDS ในช่วงพีเอช 4-9, 5-9 และ 6-9 ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่พีเอช 8 สามารถเกิดอิมัลชันกับกับเบนซีน น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันก๊าด ได้เท่ากับร้อยละ 56.1, 65.2 และ 71.4 ตามลำดับ

Wan และคณะ (2011) ศึกษาการกำจัดเฮกซะคลอโรเบนซีน (HCB) ที่ปนเปื้อนในดิน 2 ชนิด คือ เคโอลิน (kaolin) และดินที่ปนเปื้อนในพื้นที่จริง (real soil) โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดเป็นสารล้างดินควบคู่กับการดูดซับโดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ (PAC) พบว่า การโซลูบิไลเซชัน HCB จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแรมโนลิพิดจาก 0.06-20 กรัมต่อลิตร โดยมี molar solubilization ratio (MSR) เท่ากับ  $54 \times 10^{-4}$  ซึ่งสูงกว่าสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ SDS ( $3.7-4.7 \times 10^{-4}$ ) ในการดูดซับ HCB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงถ่านกัมมันต์ 2.5-10 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพร้อยละ 80-99 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงถ่านกัมมันต์ และในการกำจัด HCB จากดินจะใช้แรมโนลิพิดเข้มข้น 12.5 และ 25 กรัมต่อลิตร ในการล้าง HCB ออกจากดิน หลังจากนั้นจะใช้ผงถ่านกัมมันต์ 10 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับ HCB จากสารละลายแรมโนลิพิด จากการทดลองพบว่าแรมโนลิพิดสามารถกำจัด HCB จากเคโอลินได้มากกว่าดินในพื้นที่จริง โดยแรมโนลิพิดที่ความเข้มข้น 12.5 และ 25 กรัมต่อลิตร จะสามารถกำจัด HCB ออกจากดินเคโอลินได้ร้อยละ 55 และ 71 ตามลำดับ และการดูดซับ HCB จากสารละลายแรมโนลิพิด ด้วยผงถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 90 ทั้งในดินเคโอลินและดินในพื้นที่จริง

Zeng และคณะ (2011) ศึกษาผลของแรมโนลิพิตต่อการย่อยสลายเฮกซะเดคเคน ด้วย *Candida tropicalis* โดยใช้ความเข้มข้นของแรมโนลิพิตที่ 11.4, 19, 38 และ 114 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการย่อยสลายเฮกซะเดคเคนที่มีความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า แรมโนลิพิตที่ความเข้มข้นต่ำกว่าหรือเท่ากับค่า CMC (38 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลาย โดยสามารถย่อยสลายเฮกซะเดคเคนภายในเวลา 96 ชั่วโมงได้ร้อยละ 82.4, 93.1 และ 90.1 ที่ความเข้มข้นของแรมโนลิพิตเท่ากับ 11.4, 19 และ 38 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่ที่ความเข้มข้น 114 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าค่า CMC พบว่า จะยับยั้งการย่อยสลาย เนื่องจากลด bioavailability ของเฮกซะเดคเคนโดยโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว

Venkatesh และ Vedaraman (2012) ศึกษาการกำจัดทองแดงจากดินด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิตที่ผลิตจาก *Pseudomonas aeruginosa* MTCC 2297 ทำการทดลองแบบที่ละเทโดยใช้แรมโนลิพิตที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1 และ 2 เป็นสารล้างดินในการกำจัดทองแดงที่ความเข้มข้น 500 และ 5000 พีพีเอ็ม โดยทำการทดลองเป็นเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงมากขึ้น โดยแรมโนลิพิตที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 มีประสิทธิภาพมากที่สุด สามารถกำจัดทองแดงได้ร้อยละ 71 และ 74 จากความเข้มข้นทองแดง 474 และ 4,484 พีพีเอ็ม โดยที่เวลา 48 ชั่วโมง สามารถกำจัดทองแดงได้มากที่สุด 72% แต่ที่เวลา 72 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพลดลงสามารถกำจัดทองแดงได้ 64% เนื่องจากทองแดงเกิดการดูดซับกลับสู่ดิน ดังนั้น เวลาที่เหมาะสม คือ 24-48 ชั่วโมง

## 2.6.2 การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์

Graciaa และคณะ (1993b) ศึกษาผลของแอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอน 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 อะตอม ผสมกับสารลดแรงตึงผิวอีทอกซีเลทออกทิลฟีนอล (ethoxylated octylphenols) ในการโซลูบิไลเซชันไอโซออกเทน พบว่า จำนวนคาร์บอนในโมเลกุลของแอลกอฮอล์มีผลต่อการโซลูบิไลเซชัน โดยแอลกอฮอล์ที่มีสายโมเลกุลยาวจะมีคุณสมบัติเป็นโมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำมัน (lipophilic linker) ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการโซลูบิไลเซชันสารอินทรีย์ โดยประสิทธิภาพจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนคาร์บอนจาก C8-C16

Salager และคณะ (1998) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันสารอินทรีย์โดยการผสมสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุโพลีอีทอกซีเลทออกทิลฟีนอล (polyethoxylated octyl phenols, OP) (C8) ที่มีจำนวนเอทิลีนออกไซด์ (EO) แตกต่างกัน กับโมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำมัน ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์สายโมเลกุลยาวที่มีจำนวนคาร์บอนแตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง คือ การทดลองที่ 1 การกำจัดไอโซออกเทน (C8) ด้วยเฮกซะนอล (C6-

ol), ออกทานอล (C8-ol), โมโนอีทอกซีเลทออกทานอล (C8-ol + 1EO) และไดอีทอกซีเลทโดเดคทานอล (C12-ol + 2EO). พบว่า ออกทานอลมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด การทดลองที่ 2 การกำจัดเฮกซะเดคเคน (C16) ด้วยโมโนอีทอกซีเลทออกทานอล (C8-ol + 1 EO), โดเดคทานอล (C12-ol), ไดอีทอกซีเลทโดเดคทานอล (C12-ol + 2 EO) และไดอีทอกซีเลทโอเลิลแอลกอฮอล์ (C18-ol + 2 EO). พบว่าไดอีทอกซีเลทโดเดคทานอล มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด และการทดลองที่ 3 การกำจัดโดเดคเคน (C12) ด้วยออกทานอล (C8-ol), เดคทานอล (C10-ol) และไดอีทอกซีเลทโดเดคทานอล (C12-ol + 2 EO) พบว่าเดคทานอลมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า จำนวนคาร์บอนในโมเลกุลลิงเกอร์มีผลต่อการกำจัดสารอินทรีย์ โดยจะมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อจำนวนคาร์บอนของโมเลกุลลิงเกอร์มีค่าเท่ากับหรือมีค่าอยู่ระหว่างจำนวนคาร์บอนส่วนหางสารลดแรงตึงผิวและสารอินทรีย์ เนื่องจากโมเลกุลลิงเกอร์จะทำปฏิกิริยากับส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวและโมเลกุลของสารอินทรีย์

Sabatini และคณะ (2003) ศึกษาการใช้โมเลกุลลิงเกอร์ผสมกับสารลดแรงตึงผิวประจุลบ SDHS เพื่อเพิ่มความสามารถในการโซลูบิไลเซชันสารอินทรีย์ 3 ชนิด ได้แก่ ไตรคลอโรเอทิลีน (TCE) เตตระคลอโรเอทิลีน (PCE) และเฮกเซน (C6) โดยใช้โมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำมัน (lipophilic linkers) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่มีสายโมเลกุลยาว (โดเดคทานอลและโอเลิลแอลกอฮอล์) และโมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic linkers) คือ SMDNS พบว่า ประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ (lipophilic linkers) ส่วนโมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำ SMDNS จะเกิดการดูดซับร่วมกับสารลดแรงตึงผิวที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับสารอินทรีย์ ดังนั้น จึงเป็นการเพิ่มปฏิกิริยาระหว่างน้ำและสารลดแรงตึงผิว แต่จะเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่ำ เนื่องจากมีสายโมเลกุลสั้น แต่เมื่อใช้โมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำและโมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำมันร่วมกัน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันมากกว่าการใช้โมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำมันเพียงชนิดเดียว

Khaolerk (2006) ศึกษาการสกัดเตตระคลอโรเอทิลีนจากน้ำเสียด้วยการแบ่งวัฏภาคของสารลดแรงตึงผิวผสมระหว่างสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (DTAB) และสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (DOWFAX 8390) โดยเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเติมโมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำมัน (ออกทานอล โดเดคทานอล และเฮกซะเดคทานอล) และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (TX-114 และ TX-100) จากการทดลองพบว่า ระบบที่เหมาะสมที่สุดคือการผสมสารลดแรงตึงผิว DTAB และ DOWFAX 8390 ที่อัตราส่วนโดยโมล 2:1 ทำการศึกษาที่ความเข้มข้น 30-110 มิลลิโมลาร์ พบว่าที่ความเข้มข้น 70 มิลลิโมลาร์ มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยสามารถสกัดเตตระคลอโรเอทิลีนได้ร้อยละ 91.4 จากระดับความเข้มข้นเริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม นอกจากนี้ การเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ 2 มิลลิโมลาร์ สามารถสกัดเตตระคลอโรเอทิลีนได้ร้อยละ 96 และในการเติมแอลกอฮอล์ทั้ง 3

ชนิด พบว่า โดเดคานอลมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยโดเดคานอล 0.1 มิลลิโมลาร์ สามารถสกัดตระกูลโรเอทีลินได้ถึงร้อยละ 98

### 2.6.3 การปรับสภาพตัวกลางดูดซับโลหะออกไซด์ด้วยสารลดแรงตึงผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์

Nayyar และคณะ (1994) ศึกษาแอตโซลูบีไลเซชันและโซลูบีไลเซชันของสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แนพทาซีน แนพทอล และ 4-amino-l-naphthalenesulfonic acid ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว มีขั้ว และมีคุณสมบัติเป็นไอออนตามลำดับ ด้วยสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ SDS บนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ พบว่า การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์มีลักษณะเป็นไอโซเทอมรูปร่างตัวเอส โดยความสามารถในการแอตโซลูบีไลเซชันและโซลูบีไลเซชันมีประสิทธิภาพในการดูดซับแนพทาซีน ได้มากที่สุด รองลงมาคือ naphthol และ 4-amino-l-naphthalenesulfonic acid ตามลำดับ

Adak และคณะ (2005) ศึกษาการดูดซับสารลดแรงตึงผิวประจุลบ SDS จากน้ำเสียด้วยอะลูมินา ทำการทดลองแบบที่ละเทโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 8068 พีพีเอ็ม ที่พีเอชของน้ำเสียน้อยกว่า 9.1 (PZC) พบว่า การใช้ปริมาณตัวดูดซับ 120 กรัมต่อลิตร ในเวลา 1 ชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดร้อยละ 94 ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์ใช้อัตราการไหล 1.63 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ใช้คอลัมน์สูง 10 เซนติเมตร พบว่า มีบริเวณที่เกิดการดูดซับ 5.5 เซนติเมตร และอัตราการดูดซับที่ไหลผ่านตัวกลาง 9.42 เซนติเมตรต่อชั่วโมง คอลัมน์เกิดการอิ่มตัวร้อยละ 75.5 มีค่าสัมประสิทธิ์อัตราการดูดซับและค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.000824 ลิตรต่อมิลลิกรัมชั่วโมง และ 143,460 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

Charoensaeng และคณะ (2008) ศึกษาสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์และสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายชนิดซัลเฟตในการแอตโซลูบีไลเซชันและโซลูบีไลเซชันสไตรีนบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ ผลการศึกษาการดูดซับพบว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดผสมโมเลกุลลิงเกอร์มีระดับการดูดซับสูงสุดมีค่าสูงกว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยาย ส่วนสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายนั้นมีความสามารถในการโซลูบีไลเซชันสูงกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดผสมโมเลกุลลิงเกอร์ โดยประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนโพรพิลีนออกไซด์ที่แทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลส่วนขยาย ส่วนประสิทธิภาพในการแอตโซลูบีไลเซชัน พบว่า ทั้งสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์และสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายชนิดซัลเฟตมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

E. Asnachinda (2009) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพแอตไมเซลและแอตโซลูบีไลเซชันของสไตรีนและฟีนิลเอทานอลซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีขั้วอ่อนและสูงตามลำดับ ด้วยสารลดแรงตึงผิวแบบสองหัวที่สามารถเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรซ์ได้บนพื้นผิวซิลิกาเปรียบเทียบกับสารลดแรงตึงผิวธรรมดา DTAB ผลการทดลองพบว่า สารลดแรงตึงผิวแบบสองหัวที่สามารถเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรซ์



ได้ มีความสามารถในการดูดซับมากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่เกิดจากโมโนเมอร์ของมันเองและสารลดแรงตึงผิวแบบธรรมดา อีกทั้งยังเกิดการดูดซับสูงสุดได้ก่อนโดยใช้ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวน้อยกว่า ส่วนการแอดโซลูปีไลเซชันจะมีค่ามากที่สุดเมื่อเกิดโครงสร้างแอดไมเซลล์อย่างสมบูรณ์ โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสไตรีนได้มากกว่าฟีนิลเอทานอล ทั้งนี้พบว่ากระบวนการโพลีเมอร์ไม่มีผลต่อแอดโซลูปีไลเซชันของสารอินทรีย์ทั้งสองชนิด โดยการแอดโซลูปีไลเซชันของสไตรีนจะเกิดขึ้นที่ส่วนกลางของโครงสร้างแอดไมเซลล์เป็นหลัก ในทางตรงกันข้าม แอดโซลูปีไลเซชันของฟีนิลเอทานอลมักจะเกิดขึ้นที่ส่วนพาลีเซด สำหรับการศึกษาเพื่อลดการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวจากตัวกลางพบว่า สารลดแรงตึงผิวแบบสองหัวที่สามารถเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรซ์ได้มีการสูญเสียน้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวแบบธรรมดา

Lewlompaisan (2009) ศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูปีไลเซชันและแอดโซลูปีไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนและฟีนิลเอทานอลด้วยสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวธรรมดา SDS และสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยาย 2 ชนิด ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายชนิดซัลเฟตและคาร์บอกซิเลต พบว่า กระบวนการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายชนิดซัลเฟตแสดงประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ และสารลดแรงตึงผิวชนิดคาร์บอกซิเลตมีการดูดซับในรูปแบบแอดไมเซลล์ที่แข็งแรงและสามารถลดการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวจากพื้นผิวตัวกลาง สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายมีประสิทธิภาพในการโซลูปีไลเซชันและแอดโซลูปีไลเซชันเอทิลไซโคลเฮกเซนและฟีนิลเอทานอลดีกว่าสารลดแรงตึงผิวธรรมดา โดยสามารถดูดซับเอทิลไซโคลเฮกเซนได้มากกว่าของฟีนิลเอทานอล ทั้งนี้เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายมีจำนวนโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวสำหรับการรวมกลุ่มเป็นไมเซลล์และแอดไมเซลล์มากกว่าสารลดแรงตึงผิวธรรมดา

Arpornpong และคณะ (2010) ศึกษาการดูดซับ แอดโซลูปีไลเซชันและโซลูปีไลเซชันฟีนานทรินด้วยสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยาย 2 ชนิด คือ ชนิดคาร์บอกซิเลต (ES5EOC) และซัลเฟต (ESS) บนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยพบว่า ES5EOC และ ESS มีค่า CMC เท่ากับ 0.20 และ 0.07 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ โดยความสามารถในการดูดซับสูงสุดบนตัวกลางอะลูมิเนียมออกไซด์และประสิทธิภาพในการแอดโซลูปีไลเซชันของ ESS (0.47 มิลลิโมลต่อกรัม และ  $\log K_{adm}$  6.15) จะมีค่าสูงกว่า ES5EOC (0.14 มิลลิโมลต่อกรัม และ  $\log K_{adm}$  5.71) แต่ประสิทธิภาพในการโซลูปีไลเซชัน พบว่า ES5EOC ( $\log K_{mic}$  5.61) มีประสิทธิภาพสูงกว่า ESS ( $\log K_{mic}$  5.42) ดังนั้น สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายชนิดคาร์บอกซิเลตจะมีคุณสมบัติในการโซลูปีไลเซชันดีกว่า เนื่องจากมีค่า CMC ต่ำกว่า และ  $K_{mic}$  สูงกว่า ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายชนิดซัลเฟตจะมีคุณสมบัติในการแอดโซลูปีไลเซชันดีกว่า เนื่องจากสามารถดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ได้มากกว่า และมีค่า  $K_{adm}$  สูงกว่า อีกทั้งยังเกิดการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวจากตัวกลางได้น้อยกว่า

Attaphong และคณะ (2010) ศึกษาการดูดซับและแอดโซลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนและสไตรีนด้วยสารลดแรงตึงผิวที่สามารถเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรซ์ได้ โดยใช้สารลดแรงตึงผิว 2 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวประจุลบ (Hitenol BC 05, Hitenol BC 10 และ Hitenol BC 20) และสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Hitenol N 08) ในการดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ ผลการทดลองพบว่าเมื่อหมู่เอทิลีนออกไซด์ (EO) เพิ่มขึ้น พื้นที่ต่อโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นและค่าการดูดซับสูงสุดจะลดลง โดย Hitenol BC 05, BC 10, BC 20 และ N 08 มีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 0.30, 0.15, 0.08 และ 0.28 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนการแอดโซลูบิไลเซชัน พบว่า สามารถละลายและดูดซับเอทิลไซโคลเฮกเซนได้มากกว่าสไตรีน เนื่องจากเอทิลไซโคลเฮกเซนละลายน้ำได้น้อยและมีความเป็นขั้วน้อยกว่าสไตรีน โดยความสามารถในการแอดโซลูบิไลเซชันไม่ขึ้นกับจำนวนกลุ่ม EO ของสารลดแรงตึงผิว สำหรับการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวจากตัวกลางดูดซับ พบว่า สารลดแรงตึงผิวที่สามารถเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรซ์ได้จะเกิดการดูดซับกับอะลูมิเนียมออกไซด์ได้ดีและลดการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวจากการดีซอร์ชัน (desorption)

Panswad และคณะ (2012) ศึกษาการดูดซับ การสูญเสียสารลดแรงตึงผิว และแอดโซลูบิไลเซชันบนพื้นผิวซิลิกาไดออกไซด์ด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวก (CPC) ผสมกับสารลดแรงตึงผิวประจุลบที่มีส่วนขยาย 4 ชนิด โดยมีจำนวนคาร์บอน (C16,17 และ C16,18) และเอทิลีนออกไซด์ (2 และ 5) แตกต่างกัน ใช้อัตราส่วนในการผสมเท่ากับ 1:1 เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในการตกผลึก (precipitation) จากการศึกษาการดูดซับและการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวจากตัวกลาง พบว่า สารลดแรงตึงผิว CPC มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าสารลดแรงตึงผิวผสม อีกทั้งยังเกิดการสูญเสียจากตัวกลางน้อยกว่า เนื่องจาก CPC มีจำนวนโมเลกุลประจุบวกดูดซับอยู่บนซิลิกาไดออกไซด์สูงกว่าสารลดแรงตึงผิวผสม การศึกษาแอดโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์ 3 ชนิด ได้แก่ เอทิลไซโคลเฮกเซน สไตรีน และฟีนิลเอทานอล พบว่า สารลดแรงตึงผิวผสมมีความสามารถในการแอดโซลูบิไลเซชันสูงกว่า โดยสามารถดูดซับเอทิลไซโคลเฮกเซนได้มากที่สุด รองลงมา คือ สไตรีน และฟีนิลเอทานอล ตามลำดับ

## 2.7 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปโดยแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

### 2.7.1 สรุปการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด

1. สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์หลายชนิด ตลอดจนสามารถกำจัดโลหะหนัก และน้ำมันที่ปนเปื้อนทั้งในดินและน้ำ ดังตารางที่ 2.2
2. สารลดแรงตึงผิวชีวภาพสามารถส่งเสริมการย่อยสลายสารปนเปื้อนโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์

3. ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว โดยจะมีประสิทธิภาพในการโซลูบไลเซชันสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงกว่าค่า CMC

4. งานวิจัยส่วนใหญ่ทำการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดเป็นสารล้างดิน เพื่อสกัดสารอินทรีย์ออกจากดิน

ตารางที่ 2.2 การกำจัดสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด

ปี	ผู้วิจัย	สารลดแรงตึงผิว	สารอินทรีย์/น้ำมัน/โลหะหนัก
2006	Guo และ Mulligan	แรมโนลิพิด	สไตรีน
2007	Asci และคณะ	แรมโนลิพิด	แคดเมียม
2007	Clifford และคณะ	แรมโนลิพิด	คลอโรเอทีลีน
2007	Juwarkar และคณะ	แรมโนลิพิด	ตะกั่วและแคดเมียม
2008	Asci และคณะ	แรมโนลิพิด	สังกะสี
2008	Yin และคณะ	แรมโนลิพิด	พีแนทรีน
2009	Lai และคณะ	แรมโนลิพิด เซอร์แฟคติน Tween 80 Triton X-100	ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน
2009	Nayak และคณะ	แรมโนลิพิด Tween-80 Triton X-100	ไฮโดรคาร์บอน 2-chlorobenzoic acid 3-chlorobenzoic acid 1-methyl naphthalene
2009	Wang และ Mulligan	แรมโนลิพิด	สารหนู ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี
2010	Abouseoud และคณะ	แรมโนลิพิด	แนฟทาลีน
2010	Costa และคณะ	แรมโนลิพิด	น้ำมันดิบ
2010	Pei และคณะ	แรมโนลิพิด Tween-80	พีแนทรีน
2011	Lovaglio และคณะ	แรมโนลิพิด SDS	เบนซีน น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันก๊าด
2011	Wan และคณะ	แรมโนลิพิด	เฮกซะคลอโรเบนซีน

ตารางที่ 2.2 การกำจัดสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด (ต่อ)

ปี	ผู้วิจัย	สารลดแรงตึงผิว	สารอินทรีย์/น้ำมัน/โลหะหนัก
2011	Zeng และคณะ	แรมโนลิพิด	เฮกซะเดคเคน
2012	Venkatesh และ Vedaraman	แรมโนลิพิด	ทองแดง

### 2.7.2 สรุปรูปการดูดซับสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์

1. โมเลกุลลิแกนด์ที่นำมาผสมกับสารลดแรงตึงผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ เป็นแอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.3
2. แอลกอฮอล์ที่มีจำนวนสายโมเลกุลยาวจะมีคุณสมบัติเป็นโมเลกุลลิแกนด์ที่ชอบน้ำมัน ทำให้สามารถดูดซับกับสารอินทรีย์ได้มากขึ้น
3. สารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้มากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์
4. การผสมสารลดแรงตึงผิวกับโมเลกุลลิแกนด์จะมีประสิทธิภาพสูง เมื่อจำนวนคาร์บอนของแอลกอฮอล์มีค่าเท่ากับหรืออยู่ระหว่างจำนวนคาร์บอนส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวและสารอินทรีย์

ตารางที่ 2.3 การดูดซับสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์

ปี	ผู้วิจัย	สารลดแรงตึงผิว	โมเลกุลลิแกนด์	สารอินทรีย์
1993	Graciaa และคณะ	อีทอกซีเลท ออกทิลฟีนอล	แอลกอฮอล์ที่มีจำนวน คาร์บอน 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 อะตอม	ไอโซออกเทน
1998	Salager และคณะ	โพลีอีทอกซีเลท ออกทิลฟีนอล	เฮกซะนอล ออกทานอล เดกคานอล โดเดคคานอล โอเลอิลแอลกอฮอล์	ไอโซออกเทน เฮกซะเดคเคน โดเดคเคน
2003	Sabatini และคณะ	SDHS	โดเดคคานอล โอเลอิลแอลกอฮอล์	ไตรคลอโรเอทิลีน เตตระคลอโรเอทิลีน เฮกเซน
2006	Khaolerk	DTAB DOWFAX 8390 TX-114 TX-100	ออกทานอล โดเดคคานอล เฮกซะเดกคานอล	เตตระคลอโรเอทิลีน

### 2.7.3 สรุปการปรับสภาพตัวกลางดูดซับโลหะออกไซด์ด้วยสารลดแรงตึงผิว

1. ตัวกลางดูดซับโลหะออกไซด์ที่นำมาใช้ในการปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ อะลูมินัมออกไซด์และซิลิกาไดออกไซด์ โดยอะลูมินัมออกไซด์จะปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุลบ และซิลิกาไดออกไซด์จะปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวก ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ได้หลายชนิด ดังตารางที่ 2.4

2. ตัวกลางดูดซับที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้มากกว่าตัวกลางดูดซับที่ไม่มีการปรับสภาพ โดยสามารถกำจัดสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการแอดโซลูปีไลเซชันและโซลูปีไลเซชัน

3. ยังไม่มีการนำสารลดแรงตึงผิวชีวภาพมาใช้ในการปรับสภาพตัวกลางดูดซับอะลูมินัมออกไซด์ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้สารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์

ตารางที่ 2.4 การปรับสภาพตัวกลางดูดซับโลหะออกไซด์ด้วยสารลดแรงตึงผิว

ปี	ผู้วิจัย	โลหะออกไซด์	สารลดแรงตึงผิว	สารอินทรีย์
1994	Layer และคณะ	อะลูมินัมออกไซด์	สารลดแรงตึงผิวประจุลบ SDS	แนฟทาลีน แนฟทอล 4-amino-l-naphthalenesulfonic acid
2003	Adak และคณะ	อะลูมินัมออกไซด์	สารลดแรงตึงผิวประจุลบ SDS	-
2008	Charoensaeng และคณะ	อะลูมินัมออกไซด์	สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายและสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์	สไตรีน
2009	Asnachinda	ซิลิกาไดออกไซด์	สารลดแรงตึงผิวธรรมชาติ DTAB และสารลดแรงตึงผิวแบบสองหัวที่เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรซ์ได้	สไตรีน ฟีนิลเอทานอล
2009	Lewlumphaisan	อะลูมินัมออกไซด์	สารลดแรงตึงผิวประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยาย	เอทิลไซโคลเฮกเซน ฟีนิลเอทานอล

ตารางที่ 2.4 การปรับสภาพตัวกลางดูดซับโลหะออกไซด์ด้วยสารลดแรงตึงผิว (ต่อ)

ปี	ผู้วิจัย และคณะ	โลหะ ออกไซด์	สารลดแรงตึงผิว	สารอินทรีย์
2010	Arpompong และคณะ	อะลูมินัม ออกไซด์	สารลดแรงตึงผิวที่มี ส่วนชนิดคาร์บอกซิ เลต (ES5EOC) และซัลเฟต (ESS)	พีแวนทรีน
2010	Attapong และคณะ	อะลูมินัม ออกไซด์	สารลดแรงตึงผิว ประจุลบ Hitenol สารลดแรงตึงผิวที่ไม่ มีประจุ	เอทิลไซโคลเฮกเซน สไตรีน
2012	Panswad และคณะ	ซิลิกา ไดออกไซด์	สารลดแรงตึงผิว สังเคราะห์ CPC ผสม กับสารลดแรงตึงผิวที่ มีส่วนขยาย	เอทิลไซโคลเฮกเซน สไตรีน ฟินิลเอทานอล

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์หลายชนิด และมีความสามารถส่งเสริมการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ โดยในงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดิน แต่การกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อย และสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำสามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดมาใช้ในการศึกษาการดูดซับสไตรีนและเอทิลไซโคลเฮกเซน ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีแรงไดโพล-ไดโพล แตกต่างกัน โดยจะนำสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดมาผสมกับโมเลกุลลิแกนด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ เนื่องจากโมเลกุลลิแกนด์จะเชื่อมกับส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว ทำให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้น โมเลกุลลิแกนด์ที่ใช้ในการทดลอง คือ แอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล (4 คาร์บอน) ออกทานอล (8 คาร์บอน) และโดเดคทานอล (12 คาร์บอน) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนน้อยกว่า เท่ากับ และมากกว่าจำนวนคาร์บอนส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว (8 คาร์บอน) ตามลำดับ นำมาใช้ในการปรับสภาพตัวกลางดูดซับอะลูมินัมออกไซด์ โดยสารลดแรงตึงผิวจะดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับสารอินทรีย์ ทำให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้น

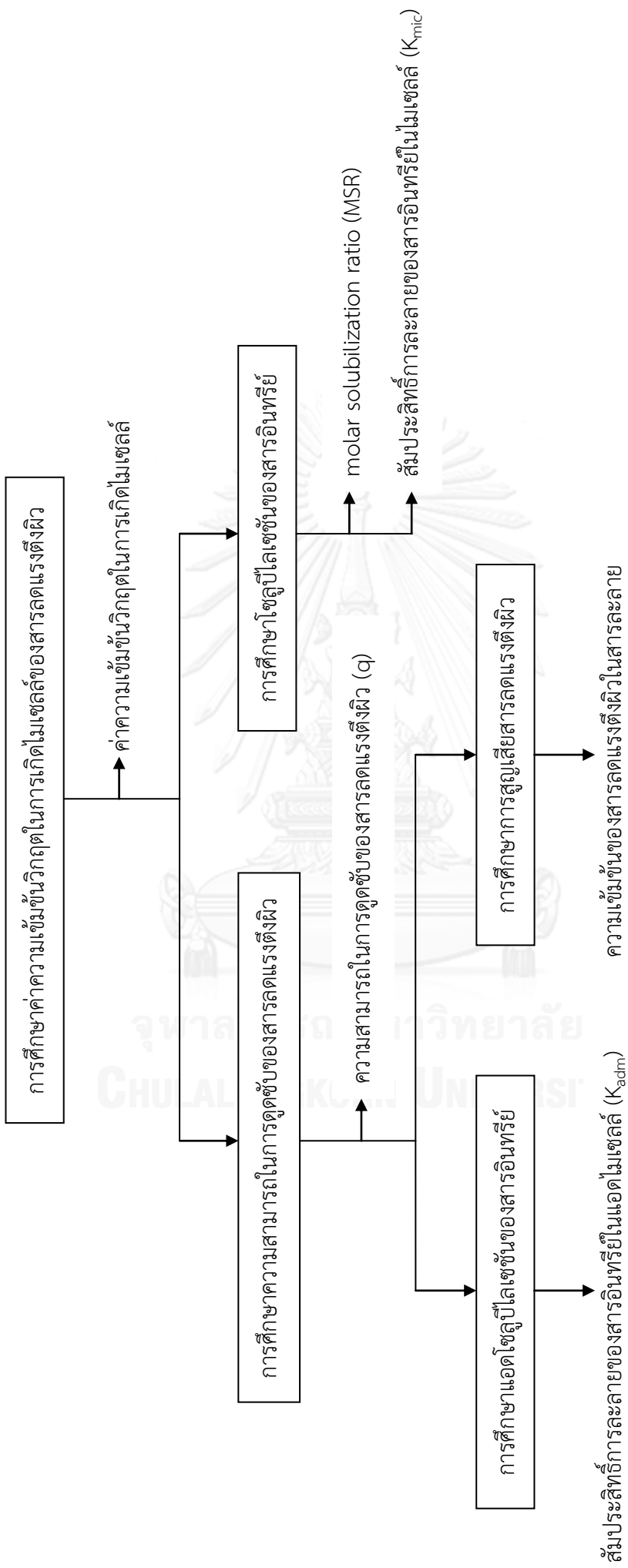
## บทที่ 3

### แผนการวิจัยและวิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีแรงไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole) แตกต่างกันได้แก่ สไตรีนและเอทิลไซโคลเฮกเซน ซึ่งเป็นสารที่มีแรงไดโพล-ไดโพลมากและน้อยตามลำดับ โดยกระบวนการโซลูบิลิเซชันและแอดโซลูบิลิเซชันบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล ออกทานอล และโดเดคทานอล โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังภาพที่ 3.1 และมีแผนการทดลอง ดังนี้

1. ค้นคว้าเอกสารและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
3. ดำเนินการทดลอง
  - การศึกษาค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว
  - การศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์
  - การศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิลิเซชันของสารอินทรีย์
  - การศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิลิเซชันของสารอินทรีย์
  - การศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์
4. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง



## 3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) รุ่น LC 1100 ยี่ห้อ Agilent ของบริษัท Agilent Technologies
2. เครื่องวัดแรงตึงผิว Wilhelmy plate tensiometer with a platinum plate รุ่น DCAT 11 ยี่ห้อ DataPhysics
3. เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) รุ่น 6890N ยี่ห้อ Agilent ของบริษัท Agilent Technologies
4. เครื่องเขย่า (shaker)
5. เครื่องวัดความเป็นกรด - ด่าง (pH meter)
6. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (analytical balance)
7. ชุดเครื่องกรอง
8. ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask)
9. ขวด vial ขนาด 40 มิลลิลิตร
10. ปีกเกอร์ (beaker)
11. ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask)
12. ปิเปต (pipette)
13. ไมโครปิเปต (micro pipette)
14. Nylon syringe filter 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร
15. กระดาษกรอง Nylon 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร

### 3.2.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

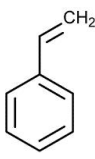
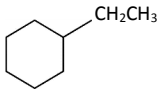
1. สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด (rhamnolipid) หรือ JBR 515 ของบริษัท JENEIL BIOSURFACTANT CO., LLC เป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบที่มีส่วนผสมระหว่างโมนโนแรมโนลิพิด (R1) และไดแรมโนลิพิด (R2) ในอัตราส่วน 50:50 โดยมวลต่อปริมาตร ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด (JBR 515)

JBR 515	ชื่อทางเคมี	สูตรโมเลกุล	มวลโมเลกุล
R1	1-(carboxymethyl)octyl 3-[[6-deoxy-alpha-L-mannopyranosyl]oxy]decanoate	$C_{26}H_{48}O_9$	504
R2	Decanoic acid, 3-[[6-deoxy-2-O-(6-deoxy-alpha-L-mannopyranosyl)-alpha-L-mannopyranosyl]oxy]-, 1-(carboxymethyl)octyl ester	$C_{32}H_{58}O_{13}$	650
			577

2. สารอินทรีย์ 2 ชนิด ที่ใช้ในการทดลองเป็นสารที่มีแรงไดโพล-ไดโพลแตกต่างกัน ได้แก่ สไตรีนของบริษัท Fluka chemical และเอทิลไซโคลเฮกเซนของบริษัท Arcos chemical แสดงคุณสมบัติของสารอินทรีย์แต่ละชนิด ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของเอทิลไซโคลเฮกเซน และสไตรีน

สารอินทรีย์	สูตรโมเลกุล	โครงสร้างโมเลกุล	มวลโมเลกุล	ความสามารถในการละลายน้ำ (mg/l)	ไดโพลโมเมนต์
สไตรีน	$C_8H_8$		104.15	312	0.13
เอทิลไซโคลเฮกเซน	$C_8H_{16}$		112.21	2.92	0.00




3. ตัวกลางดูดซับอะลูมิเนียมออกไซด์ ของบริษัท Aldrich Chemical แสดงคุณสมบัติดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของอะลูมิเนียมออกไซด์

ตัวกลางดูดซับ	สูตรโมเลกุล	PZC	ขนาดอนุภาค (meshes)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m <sup>2</sup> /g)
อะลูมิเนียมออกไซด์	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.1	150	155

4. โมเลกุลลิแกนด์ เป็นแอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล ออกทานอล และโดเดคทานอล แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 โมเลกุลลิแกนด์

แอลกอฮอล์	สูตรโมเลกุล	โครงสร้างโมเลกุล	มวลโมเลกุล
บิวทานอล	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O		74.12
ออกทานอล	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O		130.23
โดเดคทานอล	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> O		186.33

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH)
- โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride, NaCl)
- กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl)
- อะซิโตนไนไตรล์ (acetonitrile, C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>N)

### 3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยจะทำการทดลองแบบที่ละเทที่อุณหภูมิห้อง ( $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส) โดยใช้ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 1.0 มิลลิโมลาร์ และปรับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 8.0 - 8.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และ/หรือกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

#### 3.3.1 การศึกษาค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว

ความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration, CMC) ของสารลดแรงตึงผิว เป็นการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดของสารลดแรงตึงผิวที่ทำให้เกิดโครงสร้างไมเซลล์ในระบบ เมื่อมีไมเซลล์เกิดขึ้นค่าแรงตึงผิวของสารละลายจะมีค่าคงที่และไม่ลดลงอีก ถึงแม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวลงไปอีกเท่าใด ดังนั้น ค่า CMC จึงสามารถบอกถึงประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวได้ ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวกับค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

การศึกษาค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวมีตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3.5 และวิธีการทดลองสรุปได้ดังภาพที่ 3.2

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการศึกษาค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์

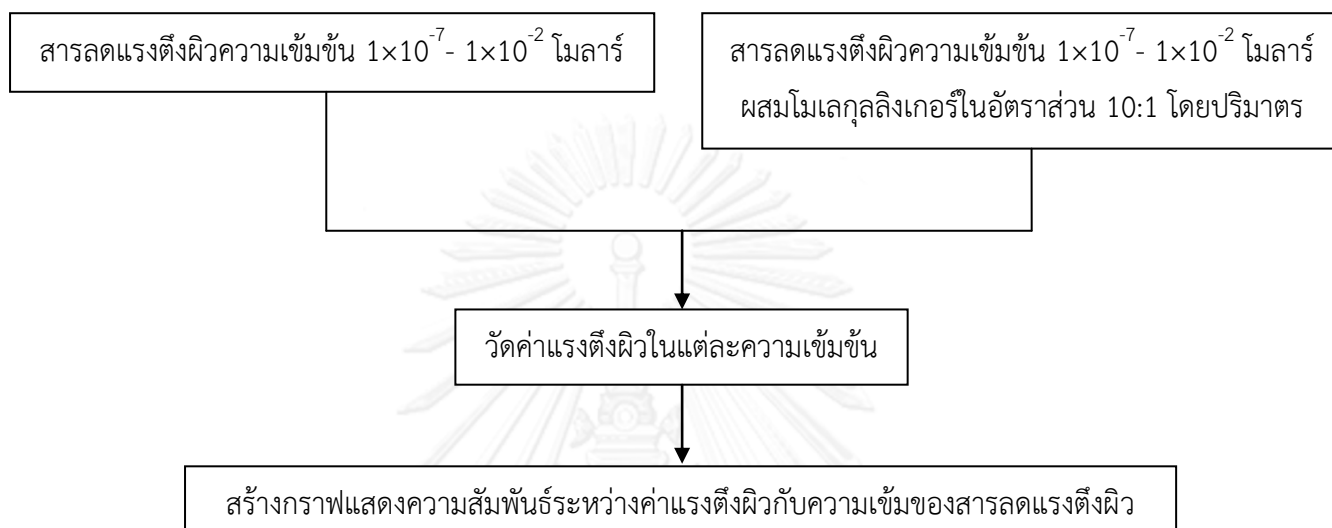
ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ	สารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น $1 \times 10^{-7}$ - $1 \times 10^{-2}$ โมลาร์ ที่ไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์และที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล ออกทานอล และโดเดคานอล
ตัวแปรตาม	1. ค่าแรงตึงผิวในแต่ละความเข้มข้น 2. ค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์
ตัวแปรคงที่	1. ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ 2. พีเอชสารละลาย 8.0 - 8.5 3. อุณหภูมิ $25 \pm 2$ องศาเซลเซียส 4. อัตราส่วนในการผสมสารลดแรงตึงผิวกับโมเลกุลลิแกนด์ 10:1 โดยปริมาตร

1. เตรียมสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น  $1 \times 10^{-7}$  -  $1 \times 10^{-2}$  โมลาร์ โดยมีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอชสารละลาย 8.0 - 8.5

2. นำสารละลายไปวัดค่าแรงตึงผิวด้วยเครื่องวัดแรงตึงผิว Wilhelmy plate tensiometer with a platinum plate

3. วิเคราะห์ค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวโดยสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวกับค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

4. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-3 โดยเตรียมสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิ้งเกอร์ 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล ออกทานอลและโดเดคานอล ตามลำดับ ในอัตราส่วนสารลดแรงตึงผิวต่อโมเลกุลลิ้งเกอร์ 10 : 1 โดยปริมาตร



ภาพที่ 3.2 สรุปวิธีการทดลองค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์

### 3.3.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์

การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพตัวกลางดูดซับในการกำจัดสารอินทรีย์ โดยสารลดแรงตึงผิวจะดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางและเกิดการเรียงตัวในรูปแบบต่างๆ ทำให้สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้น ไอโซเทอมการดูดซับสามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิว (สมการที่ 2.1) กับค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

$$q = \frac{(C_i - C_f)V}{w_g} \quad (2.1)$$

การศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์มีตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3.6 และวิธีการทดลองสรุปได้ดังภาพที่ 3.3

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิว

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ	สารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น $1 \times 10^{-5}$ - $1 \times 10^{-2}$ โมลาร์ ที่ไม่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์และที่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์ 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล ออกทานอล และโดเดคคานอล
ตัวแปรตาม	ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์
ตัวแปรคงที่	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์โซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์</li> <li>2. พีเอชสารละลาย 8.0 - 8.5</li> <li>3. อุณหภูมิ <math>25 \pm 2</math> องศาเซลเซียส</li> <li>4. ปริมาตรสารละลาย 40 มิลลิลิตร</li> <li>5. ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง</li> <li>6. ปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ 0.01 กรัม</li> <li>7. อัตราส่วนในการผสมสารลดแรงตึงผิวกับโมเลกุลลิงเกอร์ 10:1 โดยปริมาตร</li> </ol>

1. นำสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น  $1 \times 10^{-5}$  -  $1 \times 10^{-2}$  โมลาร์ ใส่ในขวดใส่ตัวอย่างปริมาตร 40 มิลลิลิตร ที่มีอะลูมิเนียมออกไซด์จำนวน 0.01 กรัม โดยมีความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอชสารละลาย 8.0 - 8.5

2. นำสารละลายไปเขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยหลังจากเขย่าเป็นเวลา 12 ชั่วโมงทำการวัดและปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 8.0 - 8.5 แล้วจึงนำสารละลายไปเขย่าอีกครั้งจนครบ 48 ชั่วโมง

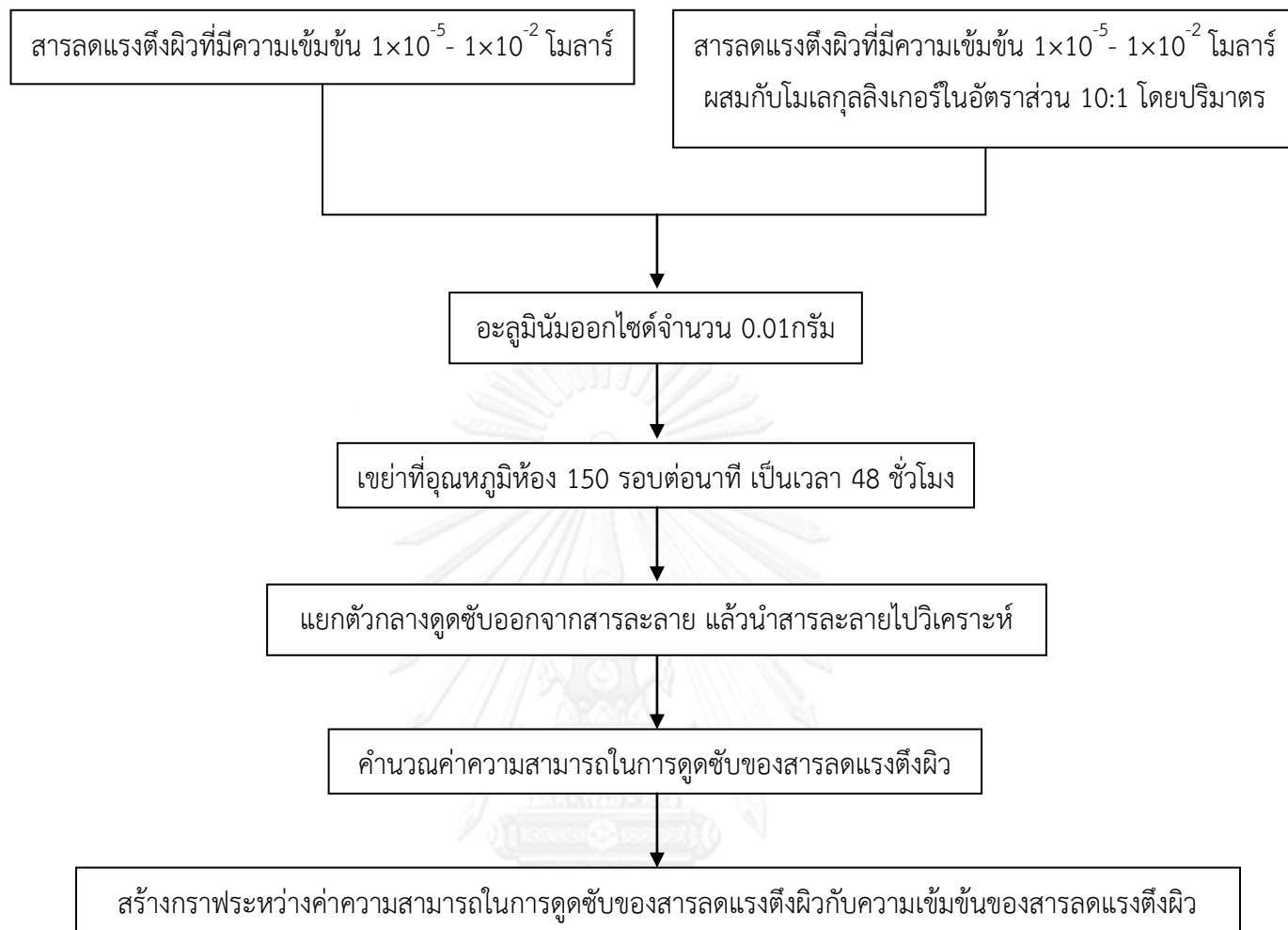
3. นำสารละลายไปหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกตัวกลางดูดซับออกจากสารละลาย

4. วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวด้วยเครื่อง HPLC

5. คำนวณค่าความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์

6. สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวกับค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

7. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-6 โดยเตรียมสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์ 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล ออกทานอลและโดเดคคานอล ตามลำดับ ในอัตราส่วนสารลดแรงตึงผิวต่อโมเลกุลลิงเกอร์ 10 : 1 โดยปริมาตร



ภาพที่ 3.3 สรุปวิธีการทดลองความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์

### 3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิเลชันของสารอินทรีย์

ในการศึกษาแอดโซลูบิเลชันซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวในกรณีที่มีตัวกลางดูดซับ จะทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ 95% CMC ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ เพื่อให้แน่ใจว่าสารลดแรงตึงผิวเกิดการดูดซับบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ในรูปของแอดไมเซลล์มากที่สุดและไม่มีโครงสร้างไมเซลล์เกิดขึ้นในระบบ สามารถทดสอบโดยใช้ pinacyanol chloride dye เป็นอินดิเคเตอร์ ถ้าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่าต่ำกว่าค่า CMC หรือไม่มีโครงสร้างไมเซลล์ในระบบสารละลายจะมีสีม่วง แต่ถ้าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่ามากกว่าค่า CMC หรือมีโครงสร้างไมเซลล์ในระบบสารละลายจะมีสีน้ำเงิน

ประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอออนของสารอินทรีย์จะประเมินจากค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารอินทรีย์ในแอดไมเซลล์ ( $K_{adm}$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 โดยการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนโมลของสารอินทรีย์ในแอดไมเซลล์ ( $X_{adm}$ ) และเศษส่วนโมลของสารอินทรีย์ในสารละลาย ( $X_{aq}$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

$$K_{adm} = \frac{X_{adm}}{X_{aq}} \quad (2.6)$$

$$X_{adm} = \frac{(C_{i,s} - C_{f,s})}{(C_{i,s} - C_{f,s}) + (S_i - S_f)} \quad (2.7)$$

$$X_{aq} = \frac{C_{f,s}}{C_{f,s} + 55.55} \quad (2.8)$$

การศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอออนของสารอินทรีย์ มีตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3.7 และวิธีการทดลองสรุปได้ดังภาพที่ 3.4

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอออน

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ	ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ - สไตรีนความเข้มข้น $1 \times 10^{-3}$ - $8 \times 10^{-3}$ โมลาร์ - เอทิลไซโคลเฮกเซนความเข้มข้น $5 \times 10^{-4}$ - $3 \times 10^{-3}$ โมลาร์
ตัวแปรตาม	1. ประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอออนของสารอินทรีย์ 2. ค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารอินทรีย์ในแอดไมเซลล์ ( $K_{adm}$ )
ตัวแปรคงที่	1. ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ 2. พีเอชสารละลาย 8.0 - 8.5 3. อุณหภูมิ $25 \pm 2$ องศาเซลเซียส 4. ปริมาตรสารละลาย 40 มิลลิลิตร 5. ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง 6. ปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ 0.01 กรัม

### 3.3.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอออนของสไตรีน

1. นำสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น 95% CMC ใส่ในขวดใส่ตัวอย่างปริมาตร 40 มิลลิลิตร ที่มีตัวกลางดูดซับอะลูมิเนียมออกไซด์จำนวน 0.01 กรัม โดยมีความเข้มข้นของสไตรีน  $1 \times 10^{-3}$  -  $8 \times 10^{-3}$  โมลาร์ ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอชสารละลาย 8.0 - 0.5

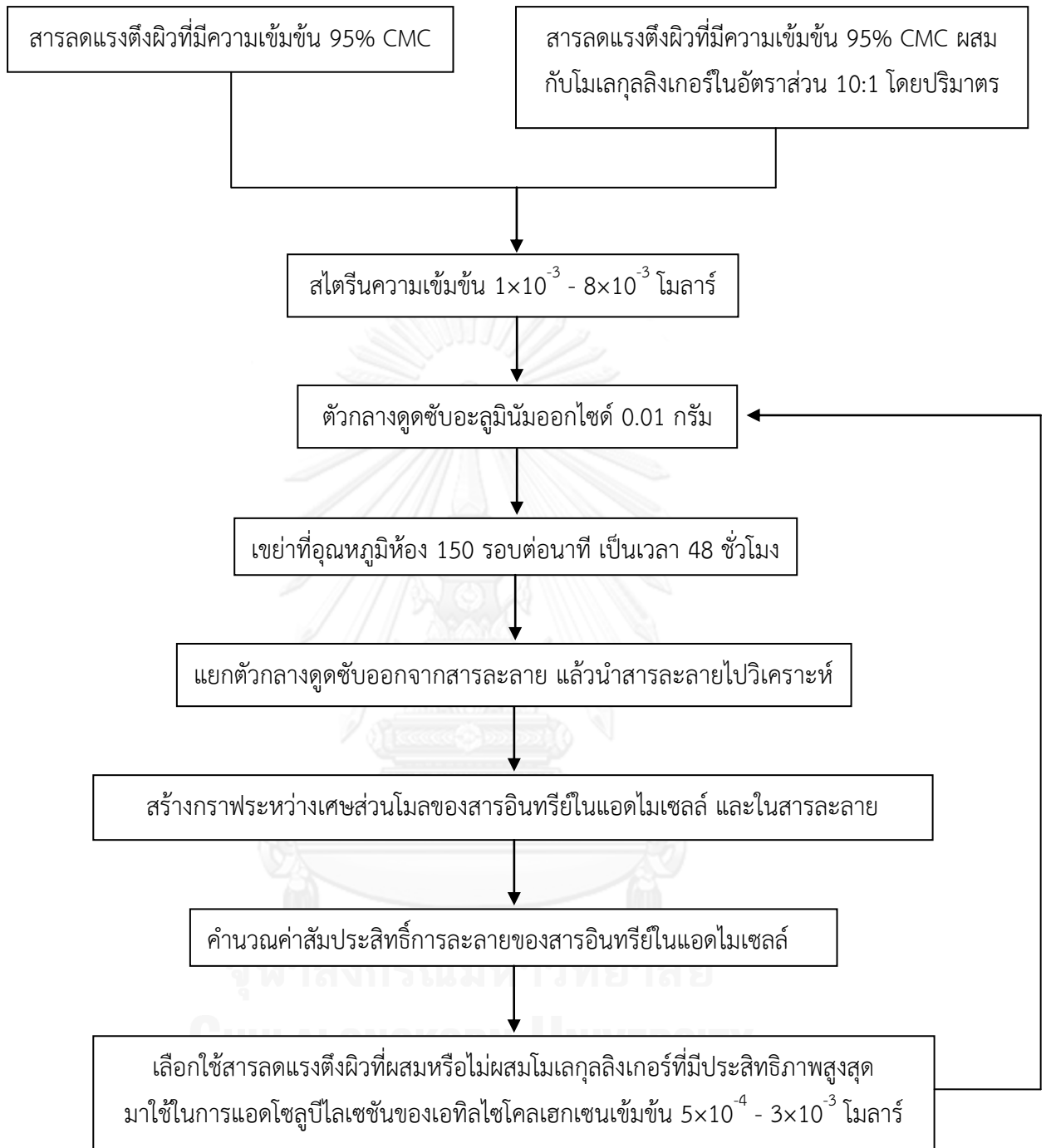


2. นำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารละลายไปหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกตัวกลางดูดซับออกจากสารละลาย
3. วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวและสไตรีนด้วยเครื่อง HPLC
4. สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนโมลของสไตรีนในแอตโมเซลล์ และเศษส่วนโมลของสไตรีนในสารละลาย
5. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสไตรีนในแอตโมเซลล์
6. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 โดยเตรียมสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล ออกทานอลและโดเดคานอล ตามลำดับ ในอัตราส่วนสารลดแรงตึงผิวต่อโมเลกุลลิแกนด์ 10 : 1 โดยปริมาตร

### 3.3.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการแอตโซลูบิลิเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซน

การศึกษาประสิทธิภาพในการแอตโซลูบิลิเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซน จะเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมหรือไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการแอตโซลูบิลิเซชันของสไตรีนมาใช้ในการทดลอง

1. นำสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมหรือไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ที่มีความเข้มข้น 95% CMC ใส่ในขวดใส่ตัวอย่างปริมาตร 40 มิลลิลิตร ที่มีตัวกลางดูดซับอะลูมินัมออกไซด์จำนวน 0.01 กรัม โดยมีความเข้มข้นของเอทิลไซโคลเฮกเซน  $5 \times 10^{-4}$  -  $3 \times 10^{-3}$  โมลาร์ ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอชสารละลาย 8.0 - 8.5
2. นำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารละลายไปหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกตัวกลางดูดซับออกจากสารละลาย
3. วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวด้วยเครื่อง HPLC และความเข้มข้นของเอทิลไซโคลเฮกเซนด้วยเครื่อง GC
4. สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนโมลของเอทิลไซโคลเฮกเซนในแอตโมเซลล์ และเศษส่วนโมลของเอทิลไซโคลเฮกเซนในสารละลาย
5. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การละลายของเอทิลไซโคลเฮกเซนในแอตโมเซลล์



ภาพที่ 3.4 สรุปวิธีการทดลองประสิทธิภาพในการแอตโซลูบิลิเซชันของสารอินทรีย์

### 3.3.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์

ในการศึกษาโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์จะทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในช่วงที่ต่ำกว่าจนถึงสูงกว่าค่า CMC ซึ่งเป็นการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวในกรณีที่ไม่มีตัวกลางดูดซับ โดยประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์สามารถคำนวณได้จากค่า molar solubilization ratio (MSR) ซึ่งหาได้จากความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์กับค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และประเมินจากค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารอินทรีย์ในไมเซลล์ ( $K_{mic}$ ) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$K_{mic} = \frac{X_{mic}}{X_{aq}} \quad (2.3)$$

การศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันสารอินทรีย์ มีตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 3.8 และวิธีการทดลองสรุปได้ดังภาพที่ 3.5

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชัน

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. สารลดแรงตึงผิวความเข้มข้น <math>1 \times 10^{-5}</math> - <math>1 \times 10^{-3}</math> โมลาร์ ที่ไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์และที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล ออกทานอล และโดเดคานอล</li> <li>2. สไตรีนความเข้มข้น <math>1 \times 10^{-3}</math> - <math>4 \times 10^{-3}</math> โมลาร์</li> <li>3. เอทิลไซโคลเฮกเซนความเข้มข้น <math>5 \times 10^{-4}</math> - <math>4 \times 10^{-3}</math> โมลาร์</li> </ol>
ตัวแปรตาม	ประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันสารอินทรีย์ <ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่า molar solubilization ratio (MSR)</li> <li>- ค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารอินทรีย์ในไมเซลล์ (<math>K_{mic}</math>)</li> </ul>
ตัวแปรคงที่	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์โซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์</li> <li>2. พีเอชสารละลาย 8.0 - 8.5</li> <li>3. อุณหภูมิ <math>25 \pm 2</math> องศาเซลเซียส</li> <li>4. ปริมาตรสารละลาย 40 มิลลิลิตร</li> <li>5. ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง</li> <li>6. อัตราส่วนในการผสมสารลดแรงตึงผิวกับโมเลกุลลิแกนด์ 10:1 โดยปริมาตร</li> </ol>

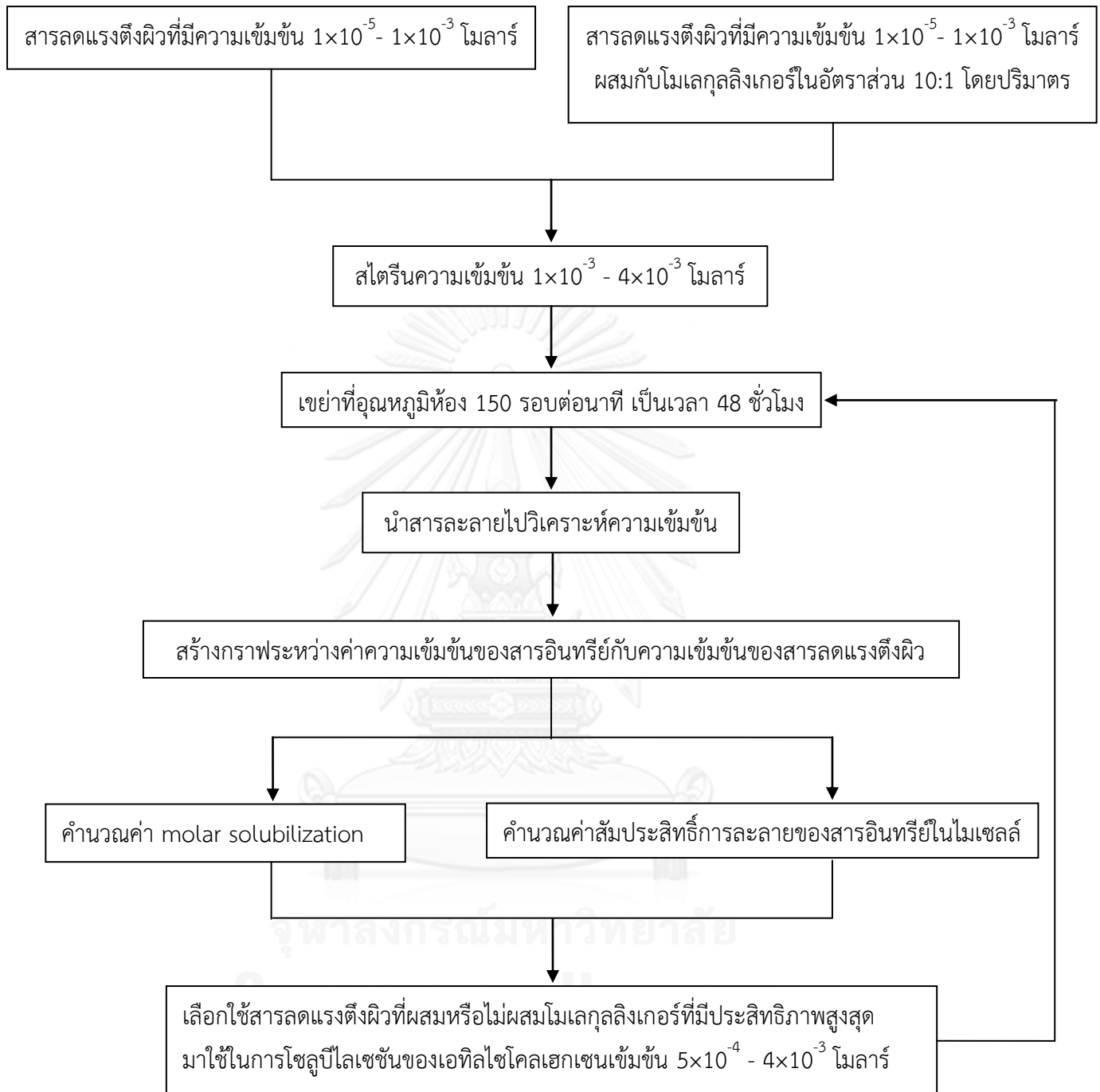
### 3.3.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของสไตรีน

1. นำสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น  $1 \times 10^{-5}$  -  $1 \times 10^{-3}$  โมลาร์ ใส่ในขวดใส่ตัวอย่างปริมาตร 40 มิลลิลิตร แล้วเติมสไตรีนที่มีความเข้มข้น  $1 \times 10^{-3}$  -  $4 \times 10^{-3}$  โมลาร์ โดยมีความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอชสารละลาย 8.0 - 8.5
2. นำสารละลายไปเขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวและสไตรีนด้วยเครื่อง HPLC
3. สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสไตรีนกับค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และคำนวณค่า MSR จากความชันของกราฟ
4. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสไตรีนในไมเซลล์
5. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-4 โดยเตรียมสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์ 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล ออกทานอลและโดเดคานอล ตามลำดับ ในอัตราส่วนสารลดแรงตึงผิวต่อโมเลกุลลิงเกอร์ 10 : 1 โดยปริมาตร

### 3.3.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซน

การศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซน จะเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมหรือไม่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์ ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการโซลูบิไลเซชันของสไตรีนมาใช้ในการทดลอง

1. นำสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมหรือไม่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์ที่มีความเข้มข้น  $1 \times 10^{-5}$  -  $1 \times 10^{-3}$  โมลาร์ ใส่ในขวดใส่ตัวอย่างปริมาตร 40 มิลลิลิตร แล้วเติมเอทิลไซโคลเฮกเซนความเข้มข้น  $5 \times 10^{-4}$  -  $4 \times 10^{-3}$  โมลาร์ โดยมีความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอชสารละลาย 8.0 - 8.5
2. นำสารละลายไปเขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวด้วยเครื่อง HPLC และความเข้มข้นของเอทิลไซโคลเฮกเซนด้วยเครื่อง GC
3. สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเอทิลไซโคลเฮกเซนกับค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และคำนวณค่า MSR จากความชันของกราฟ
4. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การละลายของเอทิลไซโคลเฮกเซนในไมเซลล์



ภาพที่ 3.5 สรุปวิธีการทดลองประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์

### 3.3.5 การศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์

ในการศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวจะทำการทดลองโดยใช้น้ำปราศจากไอออน ล้างตัวกลางดูดซับอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 95% CMC เพื่อให้แน่ใจว่าสารลดแรงตึงผิวเกิดการดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางในรูปโครงสร้างแอดไมเซลล์มากที่สุด แล้ววัดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เกิดการสูญเสียจากตัวกลางดูดซับอะลูมิเนียมออกไซด์ในสารละลายด้วยเครื่อง HPLC

การศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ มีตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3.9 และวิธีการทดลองสรุปได้ดังภาพที่ 3.6

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิว

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ	จำนวนรอบในการล้างสารลดแรงตึงผิว 10 รอบ
ตัวแปรตาม	การสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ (ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย)
ตัวแปรคงที่	<ol style="list-style-type: none"> <li>อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ 95% CMC ที่ไม่ผสม โมเลกุลลึงเกอร์และที่ผสมโมเลกุลลึงเกอร์ 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล ออกทานอล และโตเดคคานอล ในอัตราส่วน 10:1 โดยปริมาตร จำนวน 0.01 กรัม</li> <li>อุณหภูมิ <math>25 \pm 2</math> องศาเซลเซียส</li> <li>ปริมาตรสารละลาย 40 มิลลิลิตร</li> <li>ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง</li> </ol>

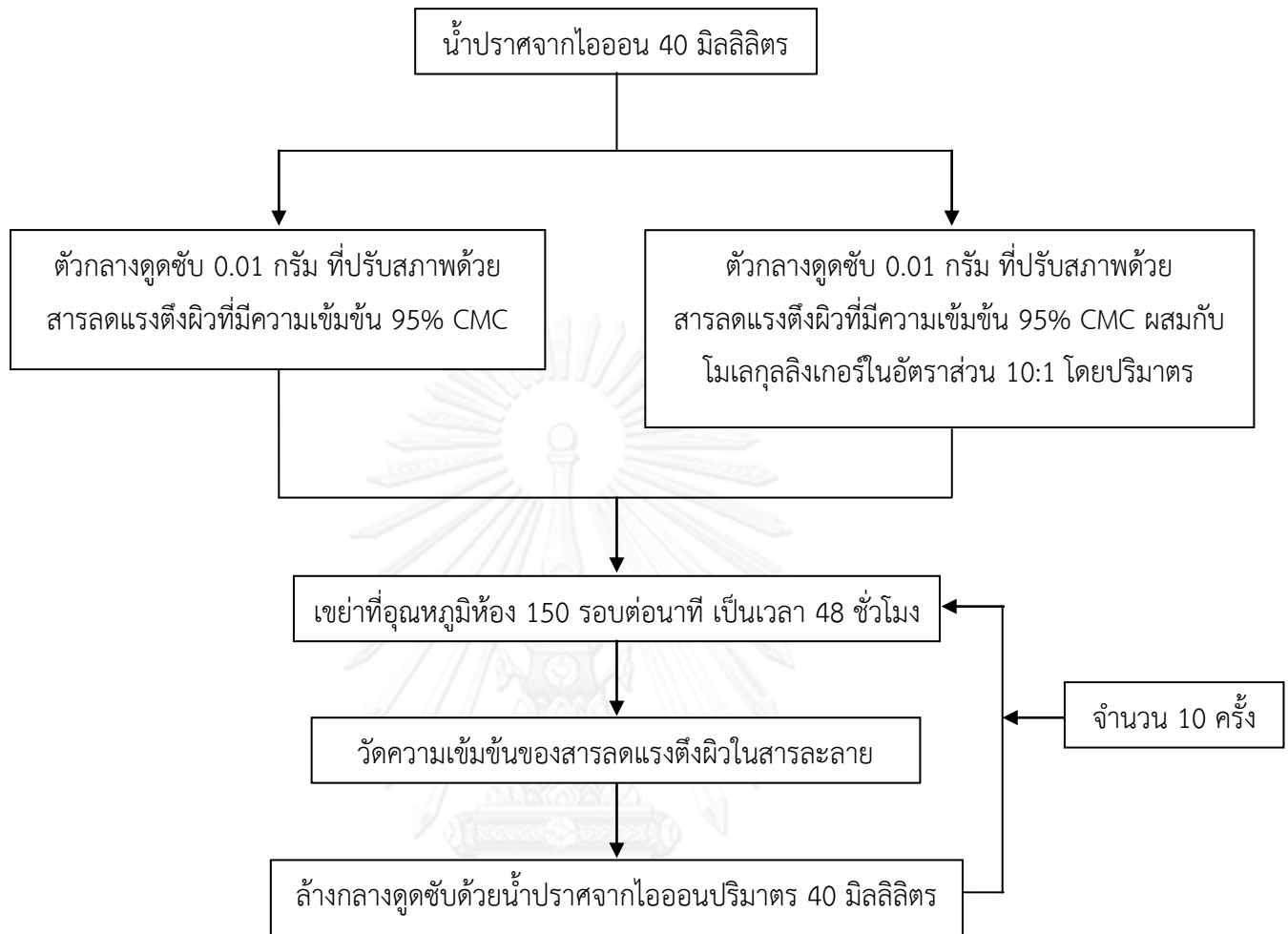
1. น้ำปราศจากไอออน (deionized water) เติมลงในขวดใส่ตัวอย่างปริมาตร 40 มิลลิลิตร ที่มีตัวกลางดูดซับอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 95% CMC จำนวน 0.01 กรัม

2. นำไปเขย่าที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้ววัดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวโดยใช้เครื่อง HPLC

3. ล้างตัวกลางดูดซับด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 40 มิลลิลิตร

4. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 2. และ 3. โดยล้างตัวกลางดูดซับเป็นจำนวน 10 ครั้ง

5. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-4 โดยเตรียมสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลึงเกอร์ 3 ชนิด ได้แก่ บิวทานอล ออกทานอลและโตเดคคานอล ตามลำดับ ในอัตราส่วนสารลดแรงตึงผิวต่อโมเลกุลลึงเกอร์ 10 : 1 โดยปริมาตร



ภาพที่ 3.6 สรุปวิธีการทดลองการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์

### 3.4 วิธีวิเคราะห์ผลการวิจัย

#### 3.4.1 การวิเคราะห์สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด (Noordman และคณะ, 2000)

ทำการวิเคราะห์สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดด้วยเครื่อง HPLC โดยใช้ อะซิโตรไนโตรล์และน้ำ(55:45) เป็นเฟสเคลื่อนที่ ใช้คอลัมน์ C<sub>18</sub> เป็นเฟสคงที่ อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณสารตัวอย่าง 100 ไมโครลิตร และใช้ตัวตรวจวัด Evaporative Light Scattering Detector (ELSD)

#### 3.4.2 การวิเคราะห์สไตรีน

ทำการวิเคราะห์สไตรีนด้วยเครื่อง HPLC โดยใช้อะซิโตรไนโตรล์และน้ำ (55:45) เป็นเฟสเคลื่อนที่ ใช้คอลัมน์ C<sub>18</sub> เป็นเฟสคงที่ อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณสารตัวอย่าง 100 ไมโครลิตร และใช้ตัวตรวจวัดยูวี (UV Detector) ที่ 247 นาโนเมตร

#### 3.4.3 การวิเคราะห์เอทิลไซโคลเฮกเซน (NIOSH, 2003)

ทำการวิเคราะห์เอทิลไซโคลเฮกเซนด้วยเครื่อง GC โดยใช้คอลัมน์คาพิลลารี ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สพา อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณสารตัวอย่าง 1 ไมโครลิตร และใช้ตัวตรวจวัด Flame Ionization Detector (FID) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



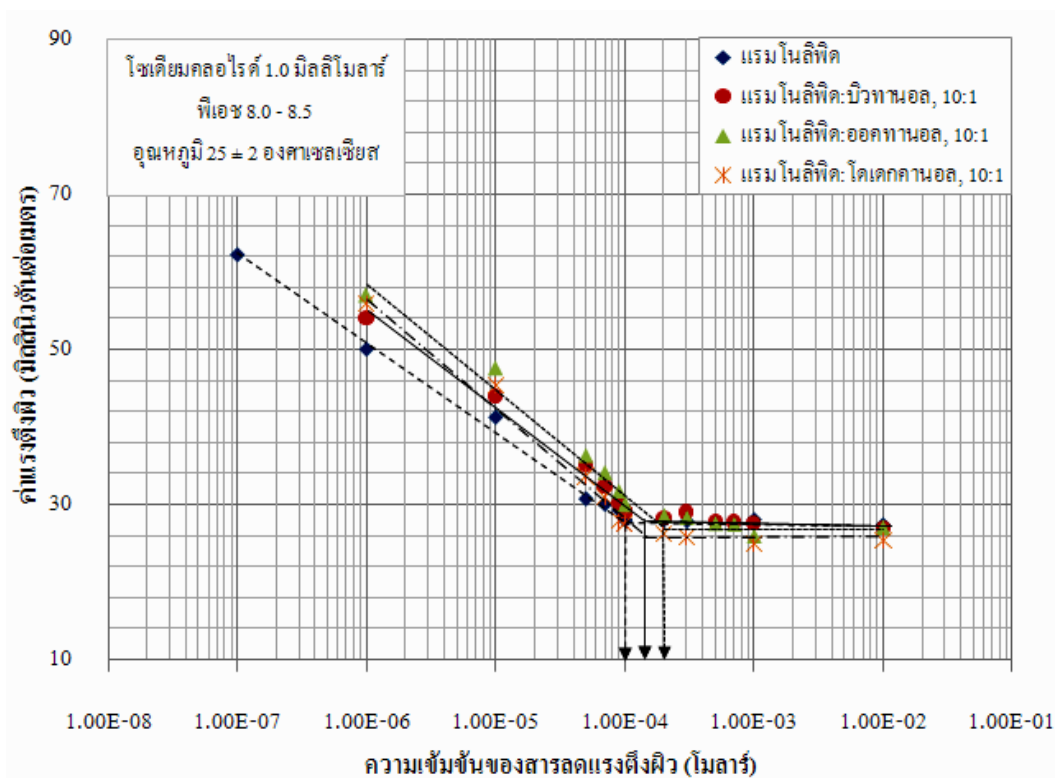
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 การศึกษาค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว

ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration, CMC) ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ แสดงดังภาพที่ 4.1 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ค่า CMC ของสารลดแรงตึงผิวเป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นต่ำสุดที่ทำให้โมโนเมอร์ของสารลดแรงตึงผิวเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างไมเซลล์ในสารละลาย จากภาพที่ 4.1 จะพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น ค่าแรงตึงผิวของสารละลายจะมีค่าลดต่ำลงเรื่อยๆ เนื่องจากโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเกิดการดูดซับที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค (น้ำกับอากาศ) จนบริเวณนั้นอิ่มตัวไปด้วยโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวและโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวส่วนเกินที่ไม่สามารถแทรกตัวบริเวณผิวสัมผัสจะเกิดการรวมตัวเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า ไมเซลล์ ซึ่งค่าแรงตึงผิวของสารละลายจะมีค่าคงที่และไม่ลดลงอีก ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวจะเพิ่มมากขึ้นอีกเท่าใด เรียกจุดนี้ว่า ความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวหรือ CMC

จากภาพที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 พบว่า สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์จะมีค่า CMC ใกล้เคียงกัน โดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดจะมีค่า CMC เท่ากับ 0.10 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์เล็กน้อย สารลดแรงตึงผิวที่ผสมกับบิวทานอล ออกทานอล และโดเดคทานอลจะมีค่า CMC เท่ากับ 0.15 0.20 และ 0.15 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดจะใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่น้อยกว่าในการเกิดโครงสร้างไมเซลล์ในสารละลาย เมื่อเปรียบเทียบกับสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ แต่อย่างไรก็ตาม สารลดแรงตึงผิวที่ผสมโดเดคทานอลจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดแรงตึงผิวของสารละลาย โดยสามารถลดแรงตึงผิวได้ถึง 26.00 มิลลินิวตันต่อเมตร



ภาพที่ 4.1 ความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 ค่าความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์จากการวัดค่าแรงตึงผิว ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์

Surfactant	CMC (mM)	Slope *	$r^2$	Average plateau (mN/m)	$\Gamma^{**}$ (mmol/1000 m <sup>2</sup> )	Effective area per molecule *** (Å <sup>2</sup> )
Rhamnolipid	0.10	-11.29	0.99	$27.80 \pm 0.2$	0.99	168
Rhamnolipid:butanol	0.15	-12.27	0.99	$28.07 \pm 0.8$	1.07	154
Rhamnolipid:octanol	0.20	-13.55	0.98	$27.84 \pm 1.3$	1.19	140
Rhamnolipid:dodecanol	0.15	-14.39	0.98	$26.00 \pm 1.0$	1.26	132

\*จากภาพที่ 4.1

\*\*surface excess concentration (Rosen, 2004)

\*\*\*effective area per molecule (Rosen, 2004)

เมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นพื้นผิวส่วนเกิน (surface excess concentration) และพื้นที่ต่อโมเลกุล (effective area per molecule) ของสารลดแรงตึงผิวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค (น้ำกับอากาศ) (ตารางที่ 4.1) สามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟจากภาพที่ 4.1 โดยใช้สมการกิบบส์ (Gibbs equation) (Rosen, 2004) ซึ่ง surface excess concentration เป็นปรากฏการณ์ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมีความเข้มข้นของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวมากกว่าในสารละลาย เนื่องจากพฤติกรรมของสารลดแรงตึงผิวที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่จากภายในสารละลายไปเรียงตัวกันและเกิดการดูดซับที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค ทำให้ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่บริเวณผิวสัมผัสมีมากกว่าในสารละลาย (เทิดศักดิ์ คำสุริวั, 2551) จากตารางที่ 4.1 พบว่า สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดมีค่า surface excess concentration น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดจะเคลื่อนที่จากสารละลายไปสะสมตัวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคได้น้อยกว่าโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ จึงส่งผลให้ค่า effective area per molecule ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดมีค่ามากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ เนื่องจากที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมีความเข้มข้นของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวในปริมาณน้อย จึงทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น พื้นที่ผิวต่อโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดจึงมีค่ามากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ ในทำนองเดียวกัน โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์จะเกิดการสะสมตัวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคได้มากกว่า จึงทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลลดน้อยลง ส่งผลให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวมีการจัดเรียงตัวในระยะที่ใกล้ชิดกันมากขึ้น ดังนั้น พื้นที่ผิวต่อโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์จึงมีค่าน้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ค่า surface excess concentration จะมีค่ามากขึ้นตามจำนวนคาร์บอนของโมเลกุลลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้น และค่า effective area per molecule จะมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนของโมเลกุลลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโตนเดคานอล (12 คาร์บอน) จะเกิดการสะสมและเรียงตัวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคได้มากกว่า ทำให้ความเข้มข้นของโมเลกุลมีค่ามากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมออกทานอล (8 คาร์บอน) และบิวทานอล (4 คาร์บอน) ตามลำดับ อาจเนื่องมาจาก เมื่อความยาวของโมเลกุลลิแกนด์เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกันของบริเวณส่วนหางที่เป็นไฮโดรโฟบิกหรือส่วนที่ไม่มีขั้วได้มากขึ้น จึงทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวมีค่าน้อยลง โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวสามารถจัดเรียงตัวกันที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคได้ในระยะใกล้ชิดกันมากขึ้น ดังนั้น สารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ที่มีสายยาวกว่าจึงมีความเข้มข้นของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ที่มีสายสั้น

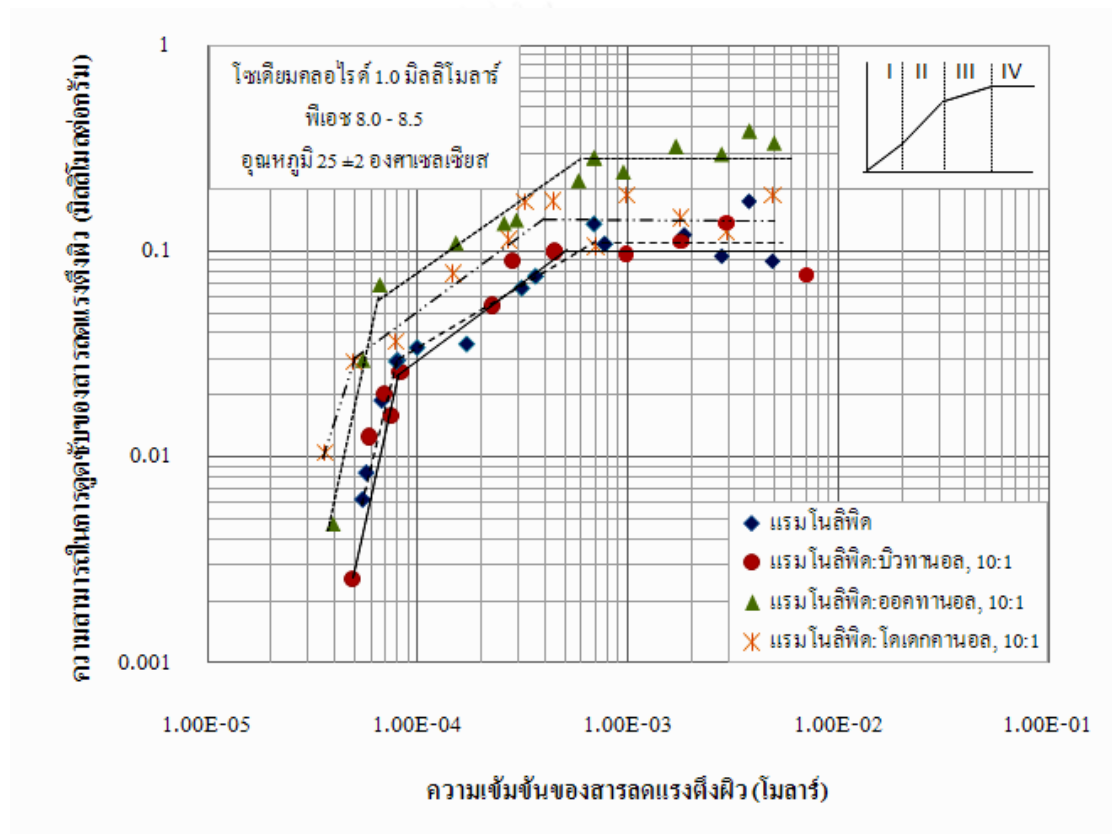
#### 4.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์

ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิทที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุล ลิงเกอร์บนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์แสดงดังภาพที่ 4.2 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว จากกราฟจะเห็น ได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึง ฝิบบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์จะเพิ่มขึ้น โดยไอโซเทอมการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวมีลักษณะเป็น ไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ขอบเขต แต่เนื่องจากข้อจำกัดของ เครื่องมือในการวัดจึงทำให้ไม่สามารถวัดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวได้ในขอบเขตที่ 1 ดังนั้น ไอโซเทอมการดูดซับจึงแสดงเพียงขอบเขตที่ 2 3 และ 4

จากภาพที่ 4.2 ในขอบเขตที่ 2 โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียม ออกไซด์จะเกิดการจัดเรียงตัวในรูปของโครงสร้างเฮมิไมเซลล์ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวแบบชั้นเดียว หรือ โครงสร้างแอดไมเซลล์ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวแบบสองชั้น จึงทำให้ความชันของกราฟเพิ่มมากขึ้น แต่ใน ขอบเขตที่ 3 ความชันของกราฟจะมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างโมเลกุลของสาร ลดแรงตึงผิวที่อยู่ติดกัน และในขอบเขตที่ 4 เป็นขอบเขตที่แสดงถึงความสามารถสูงสุดในการดูดซับ ของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว โดยจุดเปลี่ยนระหว่างขอบเขตที่ 3 ไปยังขอบเขตที่ 4 จะเป็นจุดเริ่มต้น ในการสร้างไมเซลล์ในระบบหรือ CMC ดังนั้น ความชันของกราฟจะมีค่าคงที่ ถึงแม้ว่าความเข้มข้น ของสารลดแรงตึงผิวจะเพิ่มมากขึ้น แต่จะไม่เพิ่มปริมาณการดูดซับ เนื่องจากพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ อิ่มตัวไปด้วยการดูดซับของแอดไมเซลล์

เมื่อเปรียบเทียบค่า CMC ของสารลดแรงตึงผิวในกรณีที่มีตัวกลางดูดซับอะลูมิเนียมออกไซด์ พบว่า สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิท สารลดแรงตึงผิวที่ผสมบิวทานอล ออกทานอล และโตะเดก คานอล มีค่า CMC เท่ากับ 0.70 0.50 0.60 และ 0.40 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ( ภาพที่ 4.2 และ ตารางที่ 4.2) ซึ่งจะมีค่า CMC สูงกว่าในกรณีที่ไม่มีตัวกลางดูดซับ (0.10 0.15 0.20 และ 0.15 มิลลิ โมลาร์ ตามลำดับ) (ตารางที่ 4.1) อาจเนื่องมาจาก ในกรณีที่ไม่มีตัวกลางดูดซับ เมื่อโมเลกุลของสาร ลดแรงตึงผิวเกิดการดูดซับที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค (น้ำกับอากาศ) จนอิ่มตัว โมเลกุลของ สารลดแรงตึงผิวส่วนเกินที่ไม่สามารถแทรกตัวบริเวณผิวสัมผัสจะเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างไม เซลล์ในสารละลาย แต่ในกรณีที่มีตัวกลางดูดซับ เมื่อบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคอิ่มตัวไปด้วย โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว โมเลกุลส่วนเกินที่ไม่สามารถแทรกตัวบริเวณผิวสัมผัสจะเกิดการดูดซับ บนพื้นผิวของตัวกลางจนอิ่มตัวไปด้วยโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ ในสารละลายจึงเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างไมเซลล์ ดังนั้น ในกรณีที่มีตัวกลางดูดซับอะลูมิเนียม ออกไซด์จะใช้ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นสูงกว่าในการเกิดโครงสร้างไมเซลล์ในระบบ จึง

ทำให้มีค่า CMC สูงกว่าในกรณีที่ไม่มีตัวกลางดูดซับ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Arpornpong และคณะ, 2010; Charoensaeng และคณะ, 2008; Lewlomphaisan, 2009) และพบว่าสารลดแรงตึงผิวจะเกิดการดูดซับสูงสุดที่ CMC เนื่องจากพื้นผิวของอะลูมินัมออกไซด์อิมมัวไปด้วยการดูดซับของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว ดังนั้น การเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นสูงกว่าค่า CMC จึงเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของโมเชลล์ในระบบ แต่จะไม่เพิ่มปริมาณการดูดซับ



ภาพที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิทิดที่ผสมและไม่ผสม โมเลกุลลิแกนด์บนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิทิด สารลดแรงตึงผิวที่ผสม บิวทานอล ออกทานอล และโคเดคานอล มีค่าเท่ากับ 0.12 0.10 0.30 และ 0.15 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2) จะเห็นได้ว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์โดยส่วนใหญ่จะมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิทิด ยกเว้น สารลดแรงตึงผิวที่ผสม บิวทานอลที่มีความสามารถในการดูดซับน้อยที่สุด (0.10 มิลลิโมลต่อกรัม) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจาก

บิวทานอลซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่มีสายโมเลกุลสั้น (4 คาร์บอน) เมื่อเปรียบเทียบกับออกทานอล (8 คาร์บอน) และโดเดคทานอล (12 คาร์บอน) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่มีสายโมเลกุลยาวกว่า ทำให้บิวทานอลแสดงลักษณะเป็นโมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic linker) และมีพฤติกรรมคล้ายสารลดแรงตึงผิว จึงทำให้บิวทานอลเกิดการดึงและแทนที่โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (Graciaa และคณะ, 1993b) โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจึงดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ได้น้อยลง อีกทั้ง การทำปฏิกิริยาระหว่างบิวทานอลกับบริเวณส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวจะเกิดแรงดึงดูดที่น้อยกว่าการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลลิงเกอร์ที่มีสายโมเลกุลยาว ดังนั้น การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมบิวทานอลบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์จึงมีค่าน้อยกว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดเพียงอย่างเดียว

การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์ที่มีสายโมเลกุลยาว (ออกทานอลและโดเดคทานอล) ทำให้โมเลกุลลิงเกอร์ดังกล่าวแสดงลักษณะเป็นโมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำมัน (lipophilic linker) จะพบว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมออกทานอลจะเกิดการดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ อาจเนื่องมาจากจำนวนคาร์บอนของออกทานอลมีค่าเท่ากับจำนวนคาร์บอนส่วนไฮโดรโฟบิกหรือส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างสายไฮโดรคาร์บอนของโมเลกุลลิงเกอร์และส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ โดยออกทานอลจะเกิดการดูดซับและเกิดแรงดึงดูดกับบริเวณส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวได้หนาแน่นกว่าโดเดคทานอล เนื่องจากมีจำนวนคาร์บอนของสายโมเลกุลยาวเท่ากัน (Salager และคณะ, 1998) ทำให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเกิดการดูดซับและเรียงตัวกันในระยะใกล้ชิดกันมากขึ้นบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ ส่วนการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโดเดคทานอล พบว่า จะมีค่าน้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมออกทานอล ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากโดเดคทานอลมีสายโมเลกุลยาวและมีจำนวนคาร์บอนมากกว่าจำนวนคาร์บอนส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว ทำให้เกิดผลของ coiling effect ซึ่งเป็นการขมวดหรือการขดตัวของสายโมเลกุลโดเดคทานอล จึงทำให้ปฏิกิริยาระหว่างส่วนหางของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวและโดเดคทานอลเกิดการดูดซับและรวมตัวกันอย่างหลวมๆ เนื่องจากการขดตัวของสายโมเลกุลโดเดคทานอลจึงทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น สารลดแรงตึงผิวจึงเกิดการดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ได้น้อยลง ดังนั้น การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโดเดคทานอลบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์จึงมีค่าน้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมออกทานอล

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสม โมเลกุลลิ้งเกอร์

Surfactant	CMC* (mM)	Maximum adsorption ( $q_{max}$ )			Effective area per molecule*** ( $\text{\AA}^2$ )
		mmol/g	molecule/nm <sup>2</sup>	$\text{\AA}^2$ /molecule**	
Rhamnolipid	0.70	0.12 ± 0.03	0.47	213	168
Rhamnolipid:butanol	0.50	0.10 ± 0.02	0.41	246	154
Rhamnolipid:octanol	0.60	0.30 ± 0.06	1.16	86	140
Rhamnolipid:dodecanol	0.40	0.15 ± 0.03	0.60	167	132

\*ค่า CMC จากไอโซเทอมการดูดซับ

\*\*คำนวณจากการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์

\*\*\*คำนวณจากค่าแรงตึงผิวที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค (น้ำกับอากาศ) (Rosen, 2004)

จากตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์และที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค (น้ำกับอากาศ) พบว่า โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด สารลดแรงตึงผิวที่ผสมบิวทานอล ออกทานอล และโดเดคทานอล ที่ดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ มีค่าเท่ากับ 0.47 0.41 1.16 และ 0.60 โมเลกุลต่อตารางนาโนเมตร หรือ 213 246 86 และ 167 ตารางอังสตรอมต่อโมเลกุล ตามลำดับ ซึ่งมีความมากกว่าโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ดูดซับบนผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค (168 154 140 และ 132 ตารางอังสตรอม ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคใช้พื้นที่ในการดูดซับต่อโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวน้อยกว่าบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ อาจเนื่องมาจากอนุภาคของตัวกลางดูดซับหรืออะลูมิเนียมออกไซด์มีรูพรุนขนาดเล็ก แต่ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการดูดซับกับตัวกลางมีขนาดใหญ่เกินไป จึงทำให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวไม่สามารถถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนของอะลูมิเนียมออกไซด์ได้ (Charoensaeng และคณะ, 2008; Lewlompaisan, 2009)

### 4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอเซชันของสารอินทรีย์

#### 4.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอเซชันของสไตรีน

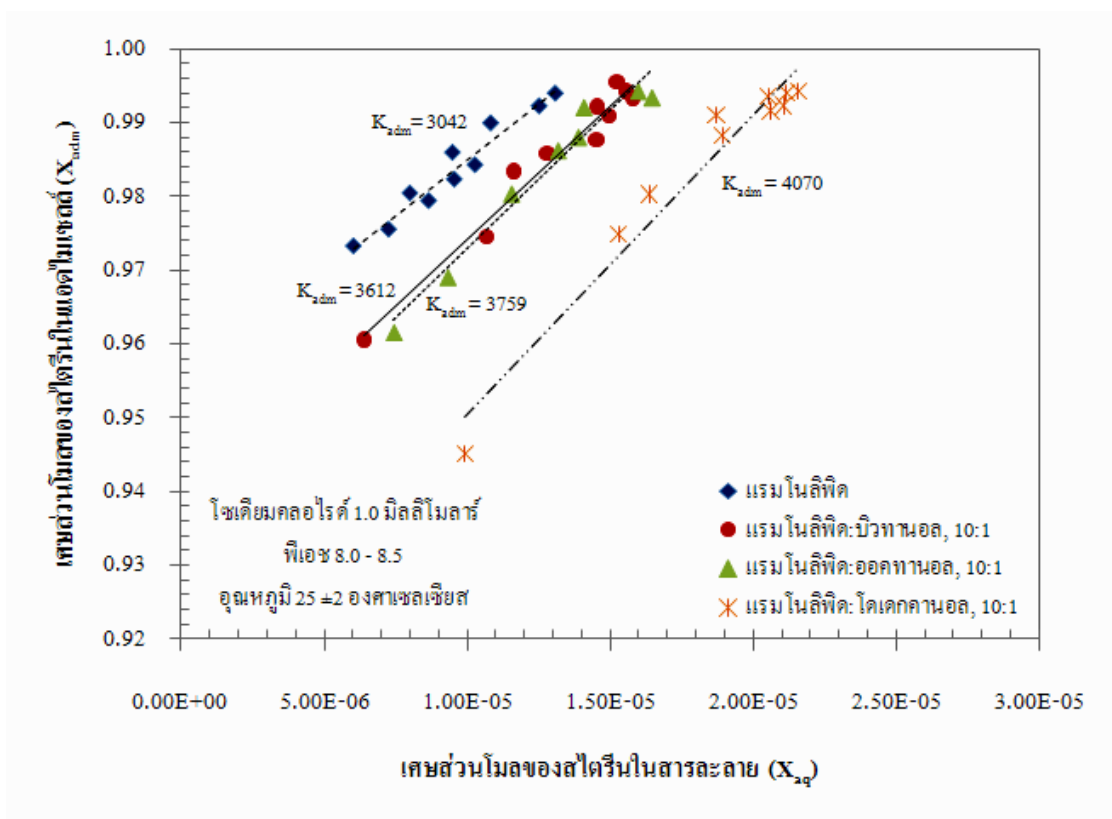
แอดโซลูบ์ไอเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ แสดงดังภาพที่ 4.3 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนโมลของสไตรีนในแอดไมเซลล์ ( $X_{adm}$ ) และเศษส่วนโมลของสไตรีนในสารละลาย ( $X_{aq}$ ) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสไตรีนในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ปริมาณการดูดซับสไตรีนเข้าไปในโครงสร้างแอดไมเซลล์จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอเซชันของสไตรีนสามารถประเมินได้จากค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารอินทรีย์ในแอดไมเซลล์ ( $K_{adm}$ ) แสดงดังตารางที่ 4.3 สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด สารลดแรงตึงผิวที่ผสมบิวทานอล ออกทานอล และโดเดคคานอล มีค่า  $K_{adm}$  เท่ากับ 3042 3612 3759 และ 4070 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ มีค่า  $K_{adm}$  มากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ เนื่องจากโมเลกุลลิแกนด์จะทำปฏิกิริยาและเกิดการเชื่อมระหว่างส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลนี้เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับสารอินทรีย์ ส่งผลให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเกิดการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้มากขึ้น (Graciaa และคณะ, 1993a) ดังนั้น สารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์จึงสามารถดูดซับสไตรีนเข้าไปในโครงสร้างแอดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวได้มากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอเซชันของสไตรีนสูงกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tan และ O'Haver (2004) ได้ทำการศึกษาแอดโซลูบ์ไอเซชันของสไตรีนด้วยสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ Triton X ผสมกับโมเลกุลลิแกนด์ที่มีจำนวนคาร์บอนแตกต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ ออกทานอล (8 คาร์บอน) เดกคานอล (10 คาร์บอน) โดเดคคานอล (12 คาร์บอน) และเตตระเดคคานอล (14 คาร์บอน) พบว่า ประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอเซชันของสไตรีนจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนคาร์บอนของโมเลกุลลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Charoensaeng และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาแอดโซลูบ์ไอเซชันของสไตรีนด้วยสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) และ SDS ที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ (โดเดคคานอล) บนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ พบว่า สารลดแรงตึงผิว SDS ที่ผสมโดเดคคานอลจะมีประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอเซชันของสไตรีนได้มากกว่าการใช้สารลดแรงตึงผิว SDS เพียงอย่างเดียว

จากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (95% Confidence Interval) พบว่า สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดมีประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอเซชันของสไตรีน ( $K_{adm}$ ) น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์อย่างมีนัยสำคัญ แต่สารลดแรงตึงผิวที่ผสมบิวทานอลและออกทานอลมีค่า  $K_{adm}$  ใกล้เคียงกันหรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไอเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโดเดคคานอล (12 คาร์บอน)



จะมีค่า  $K_{adm}$  สูงกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมออกทานอล (8 คาร์บอน) และบิวทานอล (4 คาร์บอน) เนื่องจากโตนคานอลเป็นโมเลกุลลิแกนด์ที่มีสายโมเลกุลยาวจึงเกิดปฏิกิริยากับส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวได้มากกว่าโมเลกุลลิแกนด์ที่มีสายสั้น ทำให้โมเลกุลส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวสามารถเข้าไปในวัฏภาคของสารอินทรีย์ได้มากขึ้น จึงเป็นการเพิ่มปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ โดยโมเลกุลของโตนคานอลเมื่อเกิดการเชื่อมต่อกับบริเวณส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว อาจทำให้พื้นที่ในการดูดซับสารอินทรีย์ในโครงสร้างแอดไมเซลล์มีขนาดใหญ่ มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโมเลกุลของออกทานอลและบิวทานอล เนื่องจากโตนคานอลมีสายโมเลกุลยาวกว่า ดังนั้น สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโตนคานอลจึงมีประสิทธิภาพสูงสุดในการแอดโซลูบิไลเซชันของสไตรีน

นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ จะทำให้สัดส่วนระหว่างส่วนที่ชอบน้ำกับส่วนที่ชอบน้ำมัน (Hydrophilic-Lipophilic Balance, HLB) ของสารลดแรงตึงผิวมีค่าเปลี่ยนแปลง ซึ่งพบว่าค่า HLB จะมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนของโมเลกุลลิแกนด์ที่เพิ่มมากขึ้น (ตารางที่ 4.3) อาจเนื่องมาจากโมเลกุลลิแกนด์มีลักษณะโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยส่วนที่มีขั้วหรือส่วนหัวที่มีขนาดเล็กและส่วนที่ไม่มีขั้วหรือส่วนหางที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้ค่า HLB ของโมเลกุลลิแกนด์มีค่าต่ำ (Graciaa และคณะ, 1993a) ค่า HLB ที่ต่ำลงแสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิวแสดงลักษณะที่เป็นไฮโดรโฟบิกหรือความไม่มีขั้วเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้สารลดแรงตึงผิวสามารถดูดซับสารอินทรีย์เข้าไปในโครงสร้างแอดไมเซลล์ได้มากขึ้น



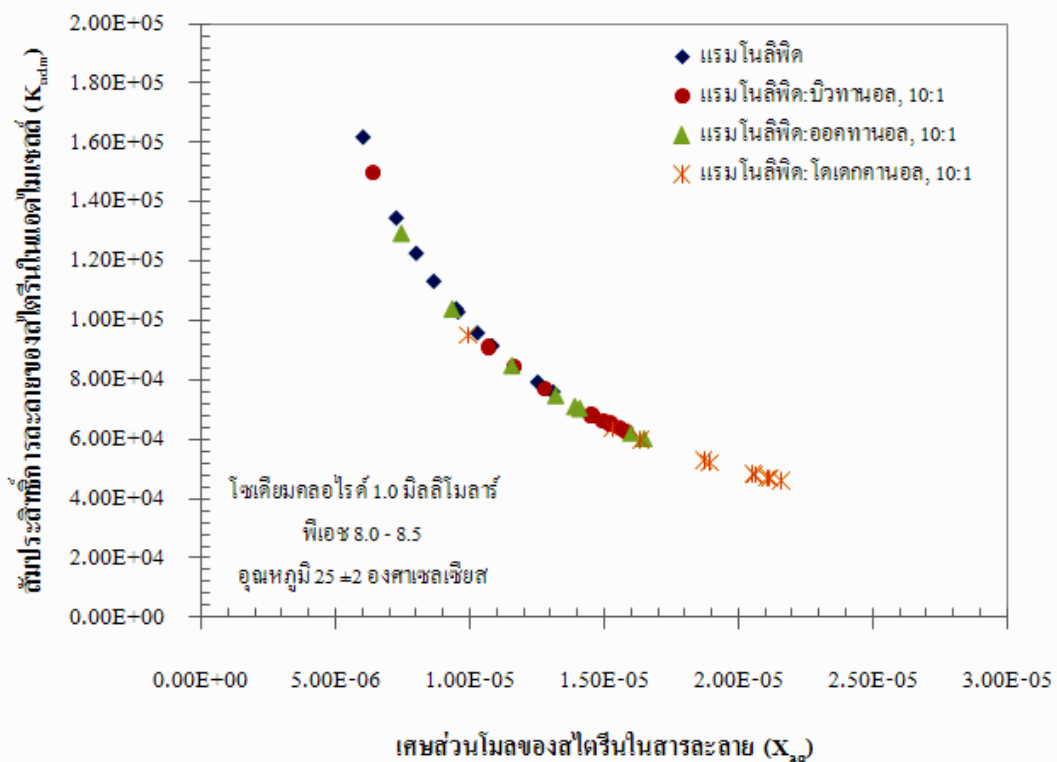
ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชันสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด ที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์บนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การละลายของสไตรีนในแอดไมเซลล์ ( $K_{adm}$ ) ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์

Surfactant	HLB* number	Maximum adsorption ( $q_{max}$ ) (mmol/g)		Styrene adsolubilization		
		Adsorption study	Adsolubilization study	$K_{adm}$	$r^2$	$\log K_{adm}$
Rhamnolipid	22-24	0.12	0.13	3042	0.95	3.48
Rhamnolipid:butanol	20.64-22.45	0.10	0.12	3612	0.96	3.56
Rhamnolipid:octanol	20.46-22.28	0.30	0.13	3759	0.96	3.58
Rhamnolipid:dodecanol	20.29-22.11	0.15	0.12	4070	0.95	3.61

\*HLB : Hydrophilic-Lipophilic Balance (Akatsu และคณะ, 1999; Xie และคณะ, 2005)

จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสม โมเลกุลสังเกอ์จะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการศึกษา ประสิทธิภาพในการแอดโซลูปีไลเซชันจะทำการทดลองที่ความเข้มข้น 95% CMC แต่ค่า CMC ของ สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลสังเกอ์มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น ปริมาณ การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวจึงมีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับจากการศึกษา ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิว (ไม่มีสารอินทรีย์) และการศึกษาประสิทธิภาพในการ แอดโซลูปีไลเซชัน (มีสารอินทรีย์) พบว่า โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเกิดการดูดซับบนพื้นผิว อะลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณใกล้เคียงกัน เนื่องจากการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวเกิดจากแรงดึงดูด ทางไฟฟ้าระหว่างประจุลบบนส่วนที่มีขั้วหรือส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวกับประจุบวกบนพื้นผิว อะลูมิเนียมออกไซด์ ดังนั้น ในกรณีที่มีหรือไม่มีสารอินทรีย์จึงไม่ส่งผลต่อการดูดซับของโมเลกุลสารลด แรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์



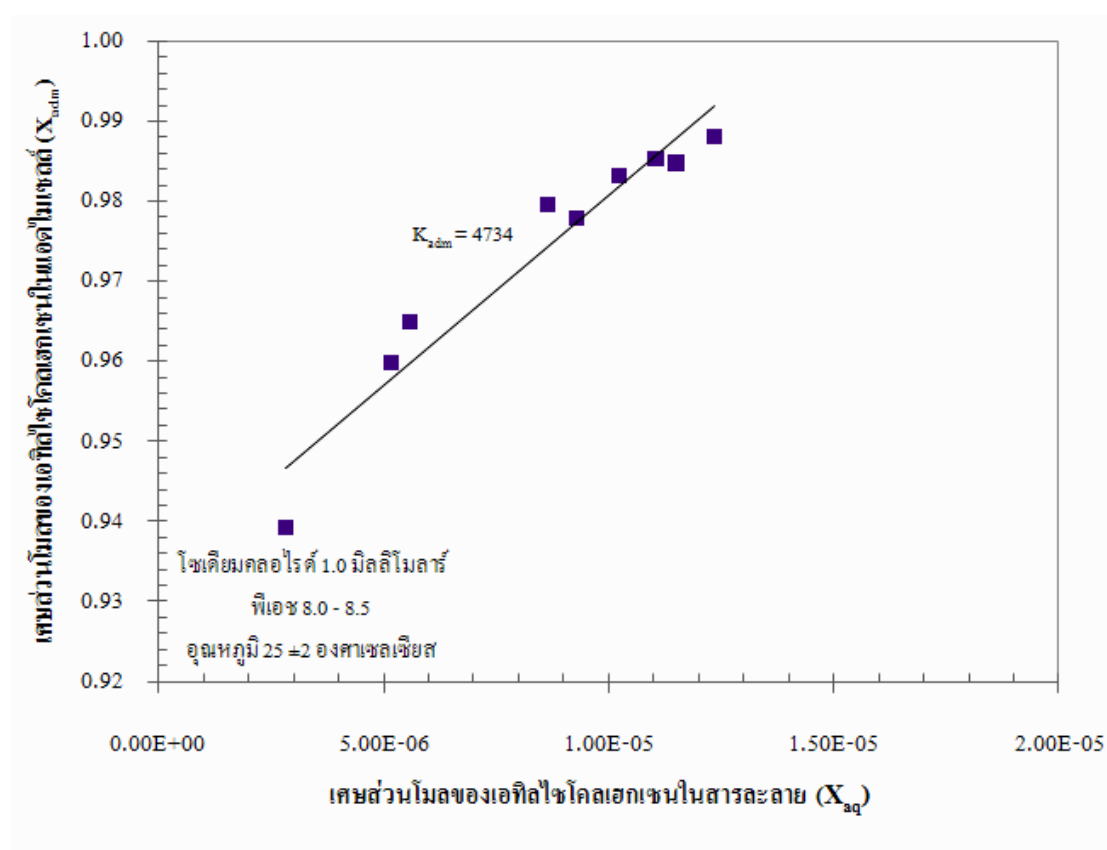
ภาพที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การละลายของสไตรีนในแอดไมเซลล์โดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด ที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลสังเกอ์บนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

ตำแหน่งในการแอดโซลูบิไลเซชันของสไตรีนเข้าไปในโครงสร้างแอดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว สามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การละลายของสไตรีนในแอดไมเซลล์ ( $K_{adm}$ ) และเศษส่วนโมลของสไตรีนในสารละลาย ( $X_{aq}$ ) ดังภาพที่ 4.4 พบว่า สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์จะมีค่า  $K_{adm}$  ลดลง เมื่อเศษส่วนโมลของสไตรีนในสารละลายเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าสไตรีนมีแนวโน้มในการถูกดูดซับเข้าไปในส่วนพาลีเซตของโครงสร้างแอดไมเซลล์ อาจเนื่องมาจากพาลีเซตเป็นส่วนที่อยู่ระหว่างส่วนหัวและส่วนหางของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว ดังนั้น จึงเป็นส่วนที่มีขั้วปานกลาง มีคุณสมบัติยอมให้สารที่มีขั้วเกิดการดูดซับเข้าไปในส่วนนี้ได้ (Dickson และ O'Haver, 2002; Saphanuchart และคณะ, 2007) ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยพบว่าสไตรีนเป็นสารอินทรีย์ที่มีค่าไดโพลโมเมนต์เท่ากับ 0.13 และมีความสามารถในการละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย จึงมีความเป็นไปได้ว่าสไตรีนเกิดการดูดซับเข้าไปในส่วนพาลีเซตในโครงสร้างแอดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว (Arpornpong, 2008; Emma Asnachinda และคณะ, 2010; Charoensaeng และคณะ, 2008)

#### 4.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซน

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ พบว่า สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโดเดคานอลมีประสิทธิภาพสูงสุดในการแอดโซลูบิไลเซชันของสไตรีน ดังนั้น จึงเลือกสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโดเดคานอลมาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซน แสดงดังภาพที่ 4.5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนโมลของเอทิลไซโคลเฮกเซนในแอดไมเซลล์ ( $X_{adm}$ ) และเศษส่วนโมลของเอทิลไซโคลเฮกเซนในสารละลาย ( $X_{aq}$ ) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของเอทิลไซโคลเฮกเซนในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ปริมาณการดูดซับเอทิลไซโคลเฮกเซนเข้าไปในโครงสร้างแอดไมเซลล์จะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การละลายของเอทิลไซโคลเฮกเซนในแอดไมเซลล์ ( $K_{adm}$ ) เท่ากับ 4737 (ตารางที่ 4.4) ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชันของสไตรีน ( $K_{adm} = 4070$ ) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากเอทิลไซโคลเฮกเซนเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่าสไตรีน จึงทำให้เอทิลไซโคลเฮกเซนเกิดการดูดซับเข้าไปในโครงสร้างแอดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวได้มากกว่า อีกทั้งส่วนที่ใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ของสารลดแรงตึงผิวจะเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วหรือส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว จึงทำให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวสามารถเกิดปฏิกิริยาและเกิดการดูดซับกับโมเลกุลของเอทิลไซโคลเฮกเซนได้มากกว่าสไตรีน ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดย Attaphong และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาแอดโซลูบิไลเซชันของสไตรีนและเอทิล

ไฮโคลเซนด้วยสารลดแรงตึงผิวที่สามารถเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรซ์ได้บนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์พบว่า ประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไลเซชันของเอทิลไฮโคลเฮกเซนจะมีค่าสูงกว่าสไตรีน



ภาพที่ 4.5 ประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไลเซชันของเอทิลไฮโคลเฮกเซนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ แรมโนลิพิดที่ผสมโดเดคกานอลบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Lewlompaisan (2009) ได้ทำการศึกษาแอดโซลูบ์ไลเซชันของฟีนิลเอทานอลและเอทิลไฮโคลเฮกเซนโดยสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายชนิดคาร์บอกซิเลตและซัลเฟตบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการแอดโซลูบ์ไลเซชันของเอทิลไฮโคลเฮกเซนจะมีค่ามากกว่าฟีนิลเอทานอล โดยคาดว่าเกิดจากคุณสมบัติของฟีนิลเอทานอลที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้มากกว่าเอทิลไฮโคลเฮกเซน ฟีนิลเอทานอลจึงละลายอยู่ในน้ำมากกว่าเกิดการดูดซับเข้าไปในโครงสร้างแอดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว ในทางตรงกันข้ามเอทิลไฮโคลเฮกเซนเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้น เอทิลไฮโคลเฮกเซนจึงมีแนวโน้มเกิดการดูดซับเข้าไปในโครงสร้างแอดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวได้มากกว่าฟีนิลเอทานอล นอกจากนี้

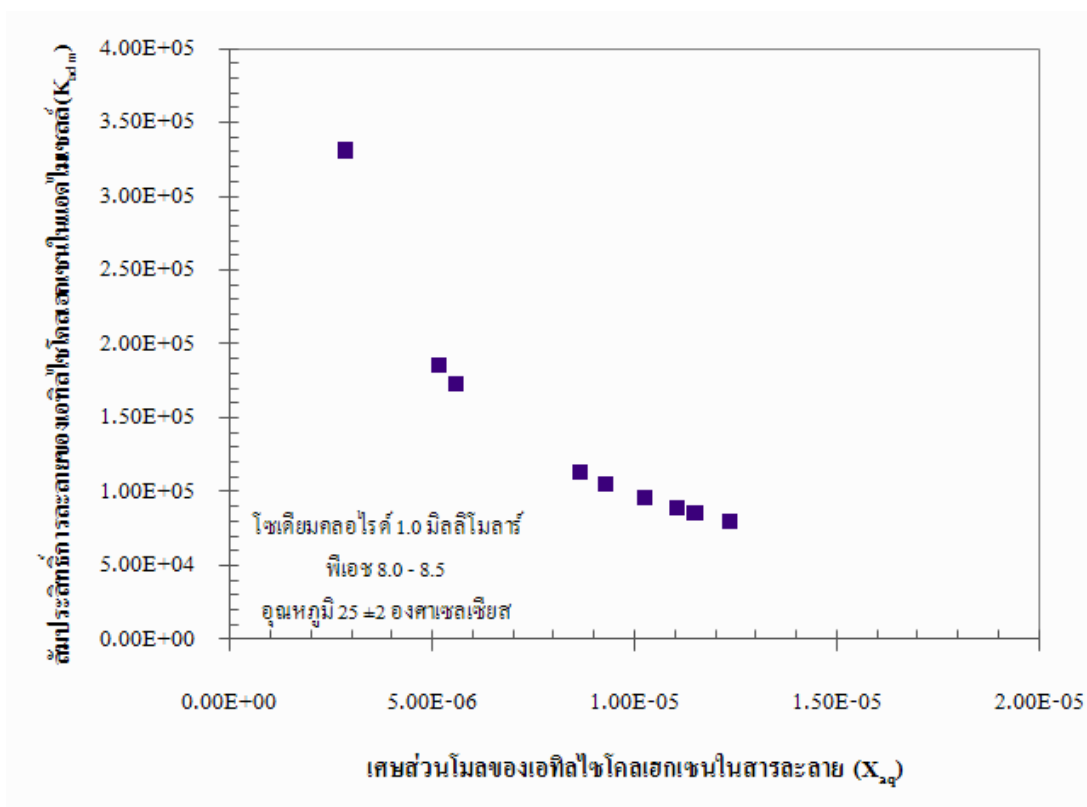
Panswad และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาแอดโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์ 3 ชนิด ที่มีความสามารถในการละลายน้ำแตกต่างกัน ได้แก่ ฟีนิลเอทานอล สไตรีนและเอทิลไซโคลเฮกเซน ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีค่าไดโพลโมเมนต์และมีความสามารถในการละลายน้ำจากมากไปน้อย ตามลำดับ ด้วยสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายประจุลบชนิดคาร์บอกซิเลตผสมกับสารลดแรงตึงผิวประจุบวก CPC บนพื้นผิวซิลิกาไดออกไซด์ พบว่า ประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนจะมีความมากกว่าสไตรีนและฟีนิลเอทานอล ตามลำดับ ซึ่งผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า จะมีประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชันสูงกว่า สารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้มากกว่า

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การละลายของเอทิลไซโคลเฮกเซนและสไตรีนในแอดไมเซลล์ ( $K_{adm}$ ) ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโคเดกานอล

Surfactant	HLB* number	Organic solute	Maximum adsorption ( $q_{max}$ )** (mmol/g)	Organic solute adsolubilization		
				$K_{adm}$	$r^2$	$\log K_{adm}$
Rhamnolipid:dodecanol	20.29-22.11	Ethylcyclohexane	0.15	4734	0.93	3.68
		Styrene		4070	0.95	3.61

\*HLB : Hydrophilic-Lipophilic Balance (Akatsu และคณะ, 1999; Xie และคณะ, 2005)

\*\*ค่าจากการศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์



ภาพที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การละลายของเอทิลไซโคลเฮกเซนในแอตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ แรณโนลิพิดที่ผสมโคเดคานอลบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

ตำแหน่งในการแอดโซลูบิเลชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนเข้าไปในโครงสร้างแอตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว สามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การละลายของเอทิลไซโคลเฮกเซนในแอตไมเซลล์ ( $K_{adm}$ ) และเศษส่วนโมลของเอทิลไซโคลเฮกเซนในสารละลาย ( $X_{ad}$ ) ดังภาพที่ 4.6 พบว่า สัมประสิทธิ์การละลายของเอทิลไซโคลเฮกเซนในแอตไมเซลล์จะมีค่าลดลง เมื่อเศษส่วนโมลของเอทิลไซโคลเฮกเซนในสารละลายเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเอทิลไซโคลเฮกเซนมีแนวโน้มในการถูกดูดซับเข้าไปในส่วนพาลีเซตของโครงสร้างแอตไมเซลล์ แต่ผลการวิจัยในครั้งนี้ คาดว่าเอทิลไซโคลเฮกเซนน่าจะมีแนวโน้มในการถูกดูดซับเข้าไปในส่วนคอร์ของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ด้านในและไม่มีขั้ว เนื่องจากเป็นส่วนของสายไฮโดรคาร์บอนหรือส่วนหางของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว (Attaphong และคณะ, 2010; Charoensaeng และคณะ, 2008; Dickson และ O'Haver, 2002; Saphanuchart และคณะ, 2007) ทั้งนี้ เนื่องจากเอทิลไซโคลเฮกเซนเป็นสารอินทรีย์ที่มีค่าไดโพลโมเมนต์เท่ากับ 0.00 และมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก แต่อย่างไรก็ตาม แนวโน้มในการดูดซับของเอทิลไซโคลเฮกเซนเข้าไปในส่วนพาลีเซตของการวิจัยในครั้งนี้

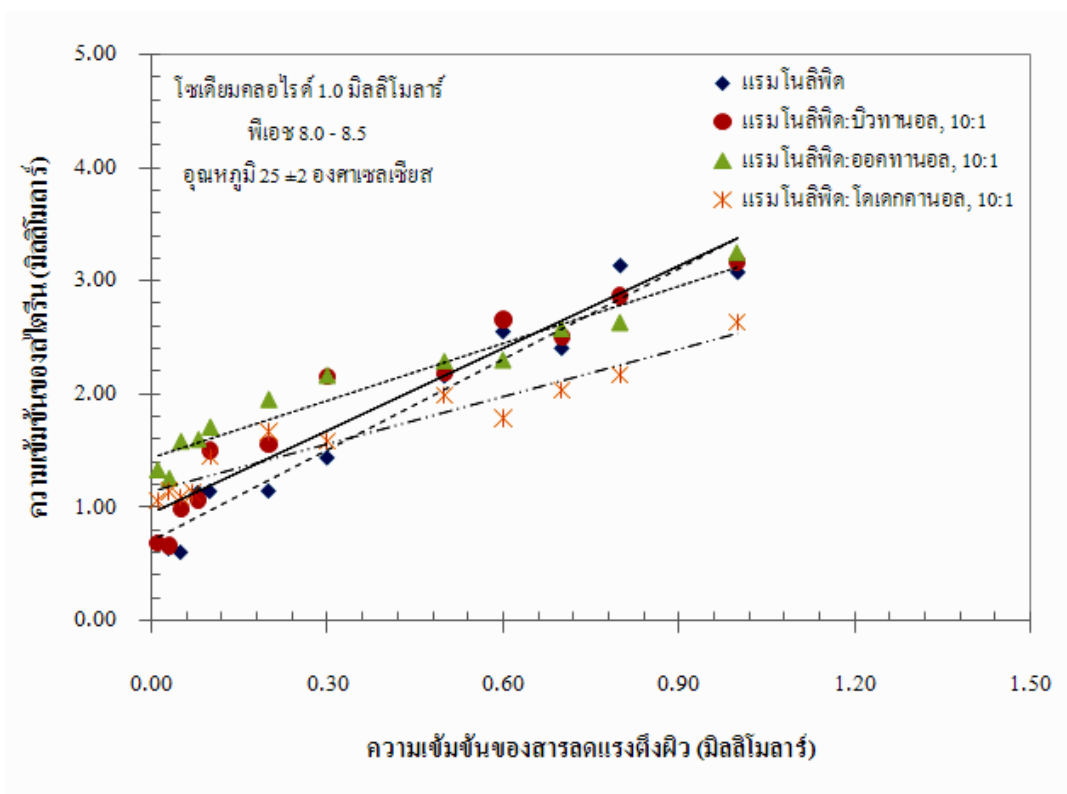
พบว่า สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Charoensaeng และคณะ, 2008; Lewlomphaisan, 2009) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวมีขนาดใหญ่และส่วนของสายไฮโดรคาร์บอนหรือส่วนหางมีขนาดสั้น อีกทั้งโครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก จึงทำให้เอทิลไซโคลเฮกเซนเกิดการดูดซับเข้าไปในส่วนพอลิเซตในโครงสร้างแอดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว (Charoensaeng, 2009)

#### 4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์

##### 4.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของสไตรีน

ผลการศึกษาโซลูบิไลเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ แสดงดังภาพที่ 4.7 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสไตรีนและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น สารลดแรงตึงผิวจะสามารถละลายสไตรีนได้มากขึ้น และที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่าสูงถึงความเข้มข้นค่าหนึ่ง โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างไมเซลล์ในสารละลาย (CMC) เมื่อความเข้มข้นมีค่าสูงกว่า CMC โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเกิดการรวมตัวกันเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น จึงเป็นการเพิ่มจำนวนไมเซลล์ในสารละลาย ส่งผลให้สไตรีนถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวได้มากขึ้น โดยประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์สามารถประเมินได้จากค่า Molar Solubilization Ratio (MSR) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงจำนวนโมลของสารอินทรีย์ต่อจำนวนโมลของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย โดยหาได้จากความชันของกราฟในภาพที่ 4.7 และค่า MSR จะนำมาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การละลายของสารอินทรีย์ในไมเซลล์ ( $K_{mic}$ ) โดยมีค่าเศษส่วนโมลของสไตรีนในสารละลาย ( $X_{aq}$ ) เท่ากับ  $5.40 \times 10^{-5}$  แสดงดังตารางที่ 4.5





ภาพที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด ที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์การละลายของสไตรีนในไมเซลล์ ( $K_{mic}$ ) ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์

Surfactant	HLB <sup>*</sup> number	Styrene solubilization				
		MSR	$r^2$	$X_{mic}$	$K_{mic}$	$\log K_{mic}$
Rhamnolipid	22-24	2.67	0.95	0.73	13472	4.13
Rhamnolipid:butanol	20.64-22.45	2.44	0.92	0.71	13135	4.12
Rhamnolipid:octanol	20.46-22.28	1.69	0.94	0.63	11634	4.07
Rhamnolipid:dodecanol	20.29-22.11	1.40	0.92	0.58	10802	4.03

\*HLB : Hydrophilic-Lipophilic Balance (Akatsu และคณะ, 1999; Xie และคณะ, 2005)

จากตารางที่ 4.5 จะพบว่า ค่า MSR และ  $K_{mic}$  ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิทจะมีค่าสูงกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ แสดงให้เห็นว่า สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิทมีประสิทธิภาพในการโซลูบิลิเซชันของสไตรีนเข้าไปในไมเซลล์ได้มากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ อาจเนื่องมาจาก สไตรีนเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย จึงมีแนวโน้มในการถูกดูดซับเข้าไปในส่วนพาลีเซตในโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วปานกลาง โดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิทจะแสดงลักษณะที่เป็นไฮโดรฟิลิกมากกว่า (ค่า HLB สูงกว่า) สารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ แสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิทมีพื้นที่ส่วนที่มีขั้วในโครงสร้างไมเซลล์มากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ ดังนั้น จึงมีประสิทธิภาพในการโซลูบิลิเซชันสไตรีนได้มากกว่า

ประสิทธิภาพในการโซลูบิลิเซชันของสไตรีนจะลดลงตามจำนวนคาร์บอนของโมเลกุลลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.5) โดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิทที่ผสมบิวทานอล (4 คาร์บอน) จะมีค่า MSR และ  $K_{mic}$  สูงกว่าสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิทที่ผสมออกทานอล (8 คาร์บอน) และโดเดคทานอล (12 คาร์บอน) ตามลำดับ เนื่องจาก เมื่อโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเกิดการรวมตัวกันในลักษณะโครงสร้างสามมิติของไมเซลล์ โมเลกุลลิแกนด์จะเกิดการเชื่อมต่อกับบริเวณส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวทำให้พื้นที่ข้างในซึ่งเป็นสายไฮโดรคาร์บอนมีความเป็นไฮโดรโฟบิกเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่า สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิท สารลดแรงตึงผิวที่ผสมบิวทานอล ออกทานอล และโดเดคทานอล จะมีค่า effective area per molecule เท่ากับ 168 154 140 และ 132 ตารางอังสตรอม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) โดยจะมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนของโมเลกุลลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า โมเลกุลลิแกนด์ที่มีสายโมเลกุลยาวกว่าจะเกิดแรงตึงผิวระหว่างโมเลกุลกับบริเวณส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวได้มากกว่าโมเลกุลลิแกนด์ที่มีสายสั้น โดยโมเลกุลลิแกนด์ที่มีสายโมเลกุลยาวกว่าจะเกิดปฏิกิริยาและทำให้เกิดการรวมตัวกันของสายไฮโดรคาร์บอนได้อย่างหนาแน่น จึงทำให้โครงสร้างไมเซลล์มีลักษณะที่เป็นไฮโดรโฟบิกหรือความไม่มีขั้วเพิ่มมากขึ้น สไตรีนจึงเกิดการดูดซับได้น้อยลง เนื่องจากสไตรีนเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย และมีค่าไดโพลโมเมนต์เท่ากับ 0.13 จึงมีแนวโน้มในการถูกดูดซับเข้าไปในส่วนพาลีเซตของโครงสร้างไมเซลล์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วปานกลาง อยู่ระหว่างส่วนหางของสายไฮโดรคาร์บอนส่วนหางและส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิว ดังนั้น การโซลูบิลิเซชันของสไตรีนเข้าไปในโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว จึงมีประสิทธิภาพลดลงตามจำนวนคาร์บอนของโมเลกุลลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้น

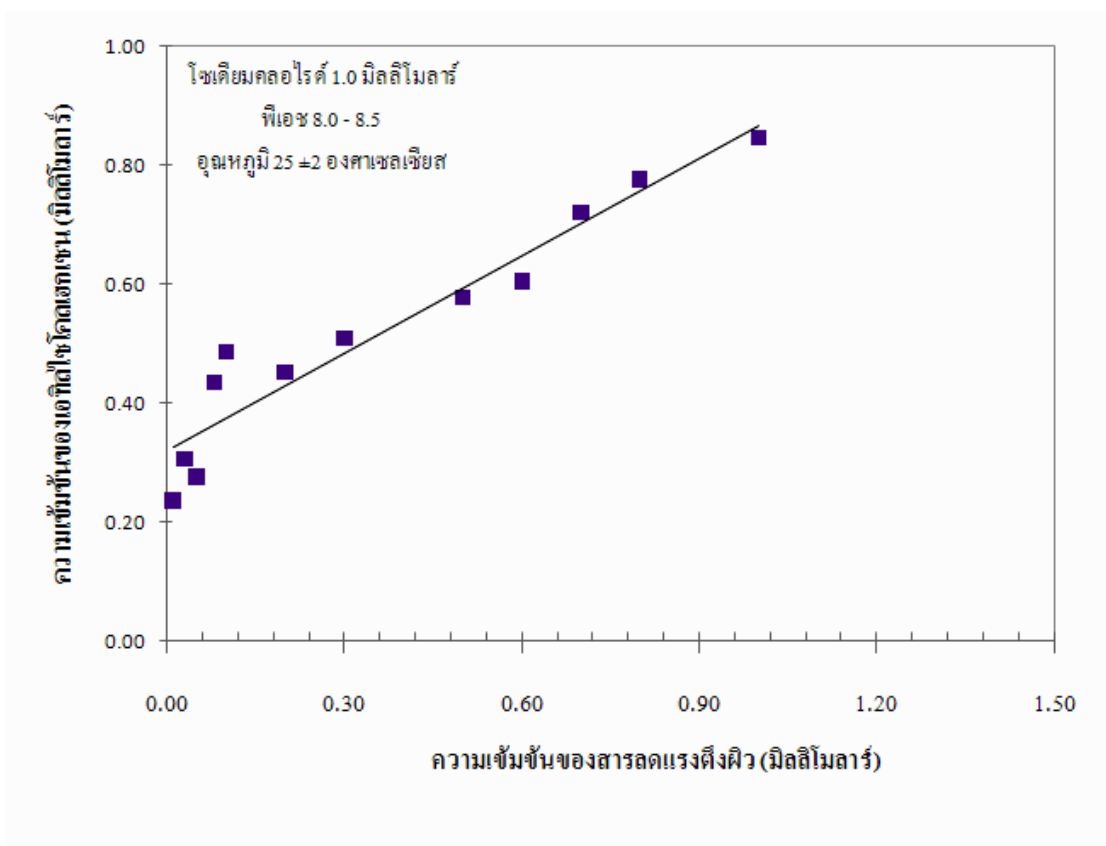
Lewlomphaisan (2009) ได้ทำการศึกษาโซลูบิลิเซชันของพีนิลเอทานอลโดยสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายชนิดคาร์บอกซิเลตที่มีจำนวนคาร์บอนแตกต่างกัน ( $C_{16,17}-(PO)_4-(EO)_5-COONa$  และ  $C_{16,18}-(PO)_4-(EO)_5-COONa$ ) โดยพีนิลเอทานอลเป็นสารอินทรีย์ที่มีค่าไดโพลโมเมนต์เท่ากับ 1.65 จึงมีแนวโน้มในการถูกดูดซับเข้าไปในส่วนพาลีเซตของโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว จากผลการศึกษาพบว่า สารลดแรงตึงผิว  $C_{16,17}-(PO)_4-(EO)_5-COONa$  และ  $C_{16,18}-(PO)_4-(EO)_5-COONa$  มีค่า  $K_{mic}$  เท่ากับ 3260 และ 3052 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า สารลดแรงตึงผิว  $C_{16,17}-(PO)_4-(EO)_5-$

COONa ซึ่งมีจำนวนคาร์บอนน้อยกว่า (16 - 17 คาร์บอน) จะมีประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของฟีนิลเอทานอลได้สูงกว่าสารลดแรงตึงผิว  $C_{16,18}-(PO)_4-(EO)_5-COONa$  ซึ่งมีจำนวนคาร์บอนมากกว่า (16 - 18 คาร์บอน)

Zhou และ Zhu (2004) ได้ทำการศึกษาโซลูบิไลเซชันของไพรินโดยสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) ที่ผสมกับสารลดแรงตึงผิว TX405 Brij35 Brij58 และ TX100 โดยสารลดแรงตึงผิว SDS TX405 Brij35 Brij58 และ TX100 มีค่า HLB เท่ากับ 40.0 17.9 16.9 15.7 และ 13.5 ตามลำดับ จากผลการศึกษา พบว่า ความสามารถในการโซลูบิไลเซชันของไพรินโดยสารลดแรงตึงผิว SDS-TX405 จะมีค่ามากกว่าสารลดแรงตึงผิว SDS-Brij35 SDS-Brij58 และ SDS-TX100 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของไพรินเข้าไปในโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวจะมีค่าลดลงเมื่อสารลดแรงตึงผิวมีค่า HLB ต่ำลง หรือแสดงลักษณะที่เป็นไฮโดรโฟบิกเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ Masrat และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาโซลูบิไลเซชันของแนฟทาลินและไพรินด้วยสารลดแรงตึงผิว Brij56 และ Brij30 ซึ่งมีค่า HLB เท่ากับ 13.38 และ 10.48 ตามลำดับ พบว่า ประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของแนฟทาลินและไพรินโดยสารลดแรงตึงผิว Brij56 จะมีค่ามากกว่าสารลดแรงตึงผิว Brij30

#### 4.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซน

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ พบว่า สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการโซลูบิไลเซชันของสไตรีน ดังนั้น จึงเลือกสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์มาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซน แสดงดังภาพที่ 4.8 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทิลไซโคลเฮกเซนและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว พบว่า ประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนเข้าไปในโครงสร้างไมเซลล์จะมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น โดยประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนสามารถประเมินได้จากค่า MSR และ  $K_{mic}$  โดยมีค่า  $X_{aq}$  เท่ากับ  $4.68 \times 10^{-7}$  แสดงดังตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ แรมโนลิพิด ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 และอุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.6 สัมประสิทธิ์การละลายของเอทิลไซโคลเฮกเซนและสไตรีนในไมเซลล์ ( $K_{mic}$ ) ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด

Surfactant	HLB* number	Organic solute	Organic solute solubilization				
			MSR	$r^2$	$X_{mic}$	$K_{mic}$	$\log K_{mic}$
Rhamnolipid	22-24	Ethylcyclohexane	0.55	0.92	0.35	758127	5.88
		Styrene	2.67	0.95	0.73	13472	4.13

\*HLB : Hydrophilic-Lipophilic Balance (Akatsu และคณะ, 1999; Xie และคณะ, 2005)

จากตารางที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของเอทิลไฮโคลเฮกเซน และสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิติด พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การละลายของเอทิลไฮโคลเฮกเซนในไมเซลล์ ( $K_{mic}$ ) จะมีค่าสูงกว่า  $K_{mic}$  ของสไตรีน แสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิติดมีความสามารถในการโซลูบิไลเซชันของเอทิลไฮโคลเฮกเซนเข้าไปในโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวได้มากกว่าสไตรีน ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับการศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชัน ที่พบว่า สารลดแรงตึงผิวจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเอทิลไฮโคลเฮกเซนเข้าไปในโครงสร้างแอดไมเซลล์ได้มากกว่าการดูดซับสไตรีน ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติของสารอินทรีย์ โดยสไตรีนเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำและมีค่าไดโพลโมเมนต์มากกว่าเอทิลไฮโคลเฮกเซน จึงทำให้สไตรีนละลายอยู่ในน้ำมากกว่าเกิดการดูดซับเข้าไปในโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว ดังนั้น ประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของเอทิลไฮโคลเฮกเซนจึงมีค่ามากกว่าสไตรีน ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดย Lewlompaisan (2009) ได้ทำการศึกษาโซลูบิไลเซชันของของฟีนิลเอทานอลและเอทิลไฮโคลเฮกเซนด้วยสารลดแรงตึงผิว SDS และสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายชนิดคาร์บอกซิเลตและซัลเฟต พบว่า สารลดแรงตึงผิวจะมีประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของเอทิลไฮโคลเฮกเซนสูงกว่าฟีนิลเอทานอล โดยเอทิลไฮโคลเฮกเซนจะเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำและมีค่าไดโพลโมเมนต์น้อยกว่าฟีนิลเอทานอล นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ (Arpornpong และคณะ, 2013) ได้ทำการศึกษาโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำและมีค่าไดโพลโมเมนต์แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ ฟีนิลเอทานอล สไตรีนและพีแนนทริน ด้วยสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายชนิดคาร์บอกซิเลตและซัลเฟต โดยพีแนนทรินเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำและมีค่าไดโพลโมเมนต์น้อยกว่าสไตรีนและฟีนิลเอทานอล ตามลำดับ จึงพบว่า ค่า  $K_{mic}$  ของพีแนนทรินจะมีค่าสูงสุด โดยมีค่ามากกว่าสไตรีนและฟีนิลเอทานอล ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของพีแนนทรินเข้าไปในโครงสร้างไมเซลล์จะมีค่าสูงกว่าสไตรีนและฟีนิลเอทานอล จากงานวิจัยของ Srivastava และ Ismail (2014) ได้ทำการศึกษาโซลูบิไลเซชันของโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ NAP DDE และ DDT ด้วยสารลดแรงตึงผิว AOT โดย DDT จะมีค่าความสามารถในการละลายน้ำน้อยกว่า DDE และ NAP ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของ DDT จึงมีค่ามากกว่า DDE และ NAP ตามลำดับ ดังนั้น จากผลการวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวในการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำและมีค่าไดโพลโมเมนต์ที่น้อยกว่าเข้าไปในโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำและมีค่าไดโพลโมเมนต์ที่มากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชัน ( $K_{adm}$ ) และประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชัน ( $K_{mic}$ ) ของสไตรีนและเอทิลไฮโคลเฮกเซน (ตารางที่ 4.3 – 4.6) จะพบว่า สารลดแรงตึง

ผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์จะมีค่า  $K_{adm}$  น้อยกว่าค่า  $K_{mic}$  แสดงให้เห็นว่า โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวมีความสามารถในการดูดซับสไตรีนเข้าไปในโครงสร้างไมเซลล์ได้มากกว่า เกิดการดูดซับเข้าไปในโครงสร้างแอดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว อาจเนื่องมาจาก โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวสามารถจัดเรียงตัวและเกิดการรวมตัวกันในลักษณะโครงสร้างสามมิติของไมเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าลักษณะโครงสร้างสองมิติของแอดไมเซลล์ (Charoensaeng, 2009; Lewlumphaisan, 2009) แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์เข้าไปในโครงสร้างแอดไมเซลล์และโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว อาจขึ้นอยู่กับหลายพารามิเตอร์ เช่น ความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ จำนวนคาร์บอนส่วนหางในโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว ประเภทของสารลดแรงตึงผิวซึ่งขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าที่อยู่บนส่วนหัวหรือส่วนที่มีขั้ว (Charoensaeng, 2009; Lewlumphaisan, 2009) ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Arpornpong (2008) ในการศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชันและโซลูบิไลเซชันของสไตรีนและพีแนทรีนโดยสารลดแรงตึงผิวธรรมดา SDS และสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายชนิดคาร์บอกซิเลตและซัลเฟต และผลงานวิจัยของ Lewlumphaisan (2009) ในการศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชันและโซลูบิไลเซชันของฟีนอลและเอทิลไซโคลเฮกเซนโดยสารลดแรงตึงผิวธรรมดา SDS และสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนขยายชนิดคาร์บอกซิเลตและซัลเฟต ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารลดแรงตึงผิวมีประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์มากกว่าประสิทธิภาพในการแอดโซลูบิไลเซชัน

#### 4.5 การศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์

การศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวที่ดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ จะปรับสภาพตัวกลางดูดซับด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ที่ความเข้มข้น 95% CMC เพื่อให้แน่ใจว่าสารลดแรงตึงผิวเกิดการดูดซับบนพื้นผิวตัวกลางในรูปของโครงสร้างแอดไมเซลล์มากที่สุด แล้วล้างตัวกลางดูดซับด้วยน้ำปราศจากไอออน หลังจากนั้นวัดปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายที่เกิดการสูญเสียจากพื้นผิวตัวกลางดูดซับ โดยผลการศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ แรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์

Surfactant	Surfactant concentration on aluminum oxide surface (mM)	Adsorption (mmol/g)	Desorption (%)
Rhamnolipid	0.023	0.09	< 85.68
Rhamnolipid:butanol	0.020	0.08	< 98.97
Rhamnolipid:octanol	0.048	0.19	< 41.81
Rhamnolipid:dodecanol	0.025	0.10	< 80.76

จากตารางที่ 4.7 พบว่า ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด สารลดแรงตึงผิวที่ผสมบิวทานอล ออกทานอล และโดเดคานอล มีค่าเท่ากับ 0.023 0.020 0.048 และ 0.025 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ถ้าสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดเกิดการสูญเสียจากการดูดซับบนพื้นผิวของอะลูมิเนียมออกไซด์อย่างน้อย 0.020 มิลลิโมลาร์ จึงสามารถตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายได้ เนื่องมาจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด จากผลการวิจัยพบว่า เมื่อล้างตัวกลางดูดซับอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดและสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นจำนวนทั้งหมด 10 รอบ โดยในแต่ละรอบของการล้างจะทำการตรวจวัดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย แต่จากการผลวิจัย ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดในสารละลายได้ จึงคาดว่าสารลดแรงตึงผิวเกิดการสูญเสียจากการดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณที่น้อยมาก (น้อยกว่า 0.020 มิลลิโมลาร์) ดังนั้นจากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด สารลดแรงตึงผิวที่ผสมบิวทานอล ออกทานอล และโดเดคานอล เกิดการสูญเสียจากการดูดซับบนตัวกลางอะลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณที่น้อยกว่า 85.68 98.97 41.81 และ 80.76 % ตามลำดับ

สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์เกิดการสูญเสียจากการดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณน้อย เนื่องมาจาก อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นตัวกลางดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Fuangswasdi และคณะ, 2006) โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างประจุลบกับพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์กับประจุลบที่อยู่บนส่วนหัวหรือส่วนที่มีขั้วของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด ทำให้แรงยึดเกาะระหว่างกันของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวและพื้นผิวตัวกลางดูดซับมีค่ามาก นอกจากนี้ ยังพบว่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมประจุบนพื้นผิวของอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยอะลูมิเนียมออกไซด์จะมีประจุรวมบนพื้นผิวเท่ากับศูนย์ (point of zero charge, PZC) ที่พีเอช 9.1

อุณหภูมิตั้งที่ 25 องศาเซลเซียส (Sun และ Jaffé, 1996) ถ้าพีเอชของสารละลายมีค่าต่ำกว่าค่า PZC พื้นผิวของอะลูมิเนียมออกไซด์จะแสดงประจุบวก ในทางตรงกันข้าม ถ้าพีเอชของสารละลายมีค่ามากกว่าค่า PZC พื้นผิวของอะลูมิเนียมออกไซด์จะแสดงประจุลบ การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวประจุลบบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ที่พีเอชมากกว่าค่า PZC (9.1) จึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิตสามารถดูดซับบนพื้นผิวของอะลูมิเนียมออกไซด์ได้ด้วยแรงยึดเกาะระหว่างกันที่มาก เนื่องจากพีเอชของสารละลายมีค่าน้อยกว่าค่า PZC ของอะลูมิเนียมออกไซด์ จึงทำให้สารลดแรงตึงผิวเกิดการสูญเสียจากพื้นผิวตัวกลางในปริมาณที่น้อย

การใช้สารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์อาจเป็นอีกหนึ่งวิธีในการช่วยลดการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวตัวกลางดูดซับ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากเมื่อโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเกิดการดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลาง โมเลกุลลิแกนด์จะเกิดการเชื่อมต่อระหว่างส่วนหางของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว จึงทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาที่หนาแน่นของสายไฮโดรคาร์บอนหรือบริเวณส่วนหางของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวที่ดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ในรูปของโครงสร้างแอดไมเซลล์ (Adak และคณะ, 2005) สารลดแรงตึงผิวจึงเกิดการดูดซับได้ดีกับพื้นผิวของตัวกลาง และสามารถลดการสูญเสียโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ได้ โดย Charoensaeng (2009) ได้ทำการศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวจากการดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยสารลดแรงตึงผิวธรรมชาติ SDS และ SDS ที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ (โดเดคานอล) โดยการวัดศักย์ไฟฟ้าของอะลูมิเนียมออกไซด์ พบว่า เมื่อปรับสภาพตัวกลางดูดซับอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยสารลดแรงตึงผิว ค่าซีต้าโพเทนเชียลของอะลูมิเนียมออกไซด์จะมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าที่แสดงประจุไฟฟ้าบวกเป็นประจุไฟฟ้าลบ แสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิวเกิดการดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ในรูปของโครงสร้างแอดไมเซลล์ เมื่อล้างตัวกลางดูดซับด้วยน้ำปราศจากไอออน พบว่า สารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์จะเกิดการสูญเสียจากการดูดซับบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ ดังนั้น จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า โมเลกุลลิแกนด์สามารถลดการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวจากการดูดซับบนพื้นผิวของตัวกลางได้



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ไม่ผสมและผสมโมเลกุลลิแกนด์ 3 ชนิด ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่มีจำนวนคาร์บอนแตกต่างกัน ได้แก่ บิวทานอล (4 คาร์บอน) ออคทานอล (8 คาร์บอน) และโดเดคคานอล (12 คาร์บอน) ในการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีแรงไดโพล-ไดโพลแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ สไตรีนและเอทิลไซโคลเฮกเซน ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีแรงไดโพล-ไดโพลมากและน้อย ตามลำดับ ทั้งในกรณีที่มีตัวกลางดูดซับอะลูมิเนียมออกไซด์ (แอตโซลูปีไลเซชัน) และไม่มีตัวกลางดูดซับ (โซลูปีไลเซชัน) โดยทำการทดลองแบบทีละเท ที่อุณหภูมิห้อง  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์โซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ และพีเอชสารละลาย 8.0 – 8.5 แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ขั้นตอน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

##### 5.1.1 การศึกษาความเข้มข้นวิกฤตในการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว

1. สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์จะมีค่า CMC ใกล้เคียงกัน โดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดจะใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่น้อยกว่าในการเกิดโครงสร้างไมเซลล์ในสารละลาย แต่สารลดแรงตึงผิวที่ผสมโดเดคคานอลจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดแรงตึงผิวของสารละลาย
2. โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค (น้ำกับอากาศ) จะมีปริมาณน้อยกว่าโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์
3. โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคจะมีความเข้มข้นมากขึ้นตามจำนวนคาร์บอนของโมเลกุลลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจาก เมื่อความยาวของโมเลกุลลิแกนด์เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกันของบริเวณส่วนหางได้มากขึ้น ทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลลดน้อยลง จึงสามารถจัดเรียงตัวกันได้ในระยะใกล้ชิดกันมากขึ้น

### 5.1.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์

1. ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น โดยไอโซเทอมการดูดซับมีลักษณะเป็นไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-shaped isotherm)

2. ค่า CMC ของสารลดแรงตึงผิวในกรณีที่มีตัวกลางดูดซับอะลูมิเนียมออกไซด์จะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีตัวกลางดูดซับ และสารลดแรงตึงผิวจะเกิดการดูดซับสูงสุดที่ CMC เนื่องจากพื้นผิวของตัวกลางอิมมิดีไปด้วยการดูดซับของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว

3. สารลดแรงตึงผิวที่ผสมบิวทานอลมีความสามารถในการดูดซับน้อยที่สุด อาจเนื่องจากบิวทานอลมีสายโมเลกุลสั้น ทำให้แสดงลักษณะที่ชอบน้ำและมีพฤติกรรมคล้ายสารลดแรงตึงผิว บิวทานอลจึงเกิดการดึงและแทนที่โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว ดังนั้น การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมบิวทานอลจึงมีค่าน้อยกว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดเพียงอย่างเดียว

4. สารลดแรงตึงผิวที่ผสมออกทานอลมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด อาจเนื่องมาจากจำนวนคาร์บอนของออกทานอลมีค่าเท่ากับจำนวนคาร์บอนส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลลิแกนด์และส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโดเดคคานอลจะมีค่าน้อยกว่าที่ผสมออกทานอล อาจเนื่องมาจากโดเดคคานอลมีสายโมเลกุลยาวกว่าจำนวนคาร์บอนส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว ทำให้เกิดผลของ coiling effect จึงเกิดการดูดซับได้น้อยลง

### 5.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการแอดโซลูบีไลเซชันของสารอินทรีย์

1. สารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์มีประสิทธิภาพในการแอดโซลูบีไลเซชัน ( $K_{adm}$ ) สูงกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ เนื่องจากโมเลกุลลิแกนด์จะทำปฏิกิริยาและเกิดการเชื่อมระหว่างส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับสารอินทรีย์

2. ประสิทธิภาพในการแอดโซลูบีไลเซชันของสไตรีนจะมากขึ้นตามจำนวนคาร์บอนของโมเลกุลลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลลิแกนด์ที่มีสายโมเลกุลยาวกว่าจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวและสารอินทรีย์ได้มากกว่าโมเลกุลลิแกนด์ที่มีสายสั้น

3. สไตรีนและเอทิลไซโคลเฮกเซนมีแนวโน้มในการถูกดูดซับเข้าไปในส่วนของพาลีเซตในโครงสร้างแอดไมเซลล์ของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว

4. ประสิทธิภาพในการแอตโซลูบ์ไอโซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนมีค่าสูงกว่า สไตรีน อาจเนื่องมาจากเอทิลไซโคลเฮกเซนเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่าสไตรีน จึงเกิดการดูดซับเข้าไปในโครงสร้างแอตโมเซลล์ได้มากกว่า

#### 5.1.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบ์ไอโซชันของสารอินทรีย์

1. สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดมีประสิทธิภาพในการโซลูบ์ไอโซชันของ สไตรีนสูงกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์ อาจเนื่องมาจาก สไตรีนมีความสามารถในการละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย จึงมีแนวโน้มในการถูกดูดซับเข้าไปในส่วนพาลีเซตของไมเซลล์ ซึ่งสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดจะแสดงลักษณะที่มีขั้วมากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์

2. ประสิทธิภาพในการโซลูบ์ไอโซชันของสไตรีนจะลดลงตามจำนวนคาร์บอนของ โมเลกุลลิแกนด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก โมเลกุลลิแกนด์ที่มีสายโมเลกุลยาวจะเกิดแรงดึงดูดกับบริเวณ ส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวได้มากกว่าโมเลกุลลิแกนด์ที่มีสายสั้น เมื่อจำนวนคาร์บอนของโมเลกุล ลิแกนด์เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้สารลดแรงตึงผิวแสดงลักษณะที่เป็นไฮโดรโฟบิกเพิ่มมากขึ้นด้วย

3. ประสิทธิภาพในการโซลูบ์ไอโซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนจะมีค่ามากกว่า สไตรีน อาจเนื่องมาจาก สไตรีนมีความสามารถในการละลายน้ำมากกว่าเอทิลไซโคลเฮกเซน สไตรีน จึงละลายอยู่ในน้ำมากกว่าเกิดการดูดซับเข้าไปในโครงสร้างไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว

4. ประสิทธิภาพในการโซลูบ์ไอโซชัน ( $K_{mic}$ ) จะมีค่ามากกว่าประสิทธิภาพในการ แอตโซลูบ์ไอโซชัน ( $K_{adm}$ ) อาจเนื่องมาจาก โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวสามารถจัดเรียงตัวและ รวมตัวกันในลักษณะโครงสร้างสามมิติของไมเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าโครงสร้างสองมิติ ของแอตโมเซลล์

#### 5.1.5 การศึกษาการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์

1. สารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิแกนด์สามารถ เกิดการดูดซับได้ดีบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ ทำให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเกิดการสูญเสียจาก พื้นผิวดังกล่าวในปริมาณน้อย

2. โมเลกุลลิแกนด์สามารถลดการสูญเสียสารลดแรงตึงผิวจากพื้นผิวดังกล่าวดูดซับได้ อาจเนื่องมาจาก การทำปฏิกิริยาที่แน่นหนาระหว่างส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวกับโมเลกุล ลิแกนด์ที่ดูดซับบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ในรูปของโครงสร้างแอตโมเซลล์

## 5.2 การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม

การปรับสภาพตัวกลางดูดซับด้วยสารลดแรงตึงผิวสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายทั้งในด้านอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม เช่น นำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในเครื่องกรอง (filter) หรือถังปฏิกรณ์แบบแพคเบด (packed-bed reactor) ใช้ในการบำบัดสารปนเปื้อนในพื้นที่ (in situ) ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์หรือโลหะหนักที่ปนเปื้อนออกจากดินหรือตะกอนดิน อีกทั้งยังช่วยชะลอการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในดินด้วย (Charoensaeng และคณะ, 2008; Lewlomphaisan, 2009) นำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดฟื้นฟูสภาพชั้นน้ำบาดาลหรือน้ำใต้ดิน โดยการสูบน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อนขึ้นมาบำบัดซึ่งจำเป็นต้องใช้สารลดแรงตึงผิวช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารปนเปื้อนที่ละลายน้ำได้น้อย เนื่องจากสารปนเปื้อนบางชนิดอาจยึดเกาะหรือดูดซับกับอนุภาคของดินทำให้เกิดการปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องและยาวนาน ดังนั้น การเติมสารลดแรงตึงผิวจึงทำให้สารปนเปื้อนเกิดการละลายน้ำได้มากขึ้น นอกจากนี้ ตัวกลางที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยการสร้างกำแพงขวางการไหลของน้ำ (permeable barrier) เมื่อน้ำไหลซึมผ่านกำแพงนี้ สารลดแรงตึงผิวจะดูดซับกับสารปนเปื้อนคล้ายกับเป็นการกรองน้ำ ทำให้น้ำสะอาดขึ้น ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูทางชีวภาพ ใช้ในการจัดการกับน้ำมันรั่วไหลในน้ำหรือในทะเล โดยสารลดแรงตึงผิวมีคุณสมบัติช่วยให้น้ำมันเกิดการกระจายตัวเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็กจากบริเวณผิวน้ำของน้ำ ซึ่งเป็นการเพิ่มค่า bioavailability ของสารปนเปื้อน โดยการลดค่าแรงตึงผิวระหว่างน้ำและสารปนเปื้อนด้วยการโซลูบิไลเซชัน ทำให้สารปนเปื้อนละลายน้ำได้มากขึ้น จุลินทรีย์จึงสามารถย่อยสลายน้ำมันได้ดีขึ้น

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันและแอตโซลูบิไลเซชันของสไตรีนและเอทิลไซโคลเฮกเซนด้วยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์บนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ จากผลการวิจัยพบว่า การปรับสภาพตัวกลางดูดซับด้วยสารลดแรงตึงผิวมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้น จึงสามารถนำไปประยุกต์และใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคตต่อไป

1. การปรับสภาพตัวกลางดูดซับด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ผสมโมเลกุลลิแกนด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้ ในการศึกษาครั้งต่อไปควรเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพชนิดอื่น เนื่องจากคุณสมบัติและลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารลดแรงตึงผิวจะแตกต่างกันไปตาม

ชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิต อีกทั้ง ควรศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพและสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ด้วย

2. อัตราส่วนในการผสมสารลดแรงตึงผิวกับโมเลกุลลิงเกอร์อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการโซลูบิไลเซชันและแอดโซลูบิไลเซชันของสารอินทรีย์ จึงเป็นที่น่าสนใจสำหรับงานวิจัยในอนาคตในการศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดในการบำบัดสารอินทรีย์ ตลอดจนการศึกษาการทำงานร่วมกันของโมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic linker) และโมเลกุลลิงเกอร์ที่ชอบน้ำมัน (lipophilic linker) ซึ่งอาจเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้

3. ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์บนเป็นอนาจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ดังนั้น ควรศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อการทำงานของสารลดแรงตึงผิว เช่น พีเอช อุณหภูมิ ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ เพื่อการประยุกต์ใช้งานในด้านสิ่งแวดล้อมต่อไป

## รายการอ้างอิง

- Abouseoud, M., Yataghene, A., Amrane, A., and Maachi, R. (2010). Effect of pH and salinity on the emulsifying capacity and naphthalene solubility of a biosurfactant produced by *Pseudomonas fluorescens*. *J Hazard Mater*, 180(1-3), 131-136.
- Adak, A., Bandyopadhyay, M., and Pal, A. (2005). Removal of anionic surfactant from wastewater by alumina: a case study. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 254(1-3), 165-171.
- Arpornpong, N. (2008). *Adsolubilization and solubilization using conventional and extended anionic surfactants on an aluminum oxide surface*. Master's Thesis, Environmental Management Program, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Arpornpong, N., Charoensaeng, A., Sabatini, A. D., and Khaodhiar, S. (2010). Ethoxy carboxylate extended surfactant: micellar, adsorption and adsolubilization properties. *Journal of Surfactants and Detergents*, 13, 305-311.
- Arpornpong, N., Lewlompaisan, J., Charoensaeng, A., Sabatini, D., and Khaodhiar, S. (2013). Ethoxy Carboxylate Extended Surfactant: Surface Charge of Surfactant-Modified Alumina, Adsolubilization and Solubilization of Phenylethanol and Styrene. *Journal of Surfactants and Detergents*, 16(3), 291-298.
- Aşçı, Y., Nurbaş, M., and Açikel, Y. S. (2007). Sorption of Cd(II) onto kaolin as a soil component and desorption of Cd(II) from kaolin using rhamnolipid biosurfactant. *J Hazard Mater*, 139(1), 50-56.
- Aşçı, Y., Nurbaş, M., and Sağ Açikel, Y. (2008). Removal of zinc ions from a soil component Na-feldspar by a rhamnolipid biosurfactant. *Desalination*, 223(1-3), 361-365.
- Asnachinda, E. (2009). *Admicelles and adsolubilization using polymerizable surfactants onto solid oxide surface*. Doctoral Dissertation, Environmental Management Program, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Asnachinda, E., Khaodhiar, S., and Sabatini, D. (2010). Styrene and Phenylethanol Adsolubilization of a Polymerizable Gemini Surfactant. *Journal of Surfactants and Detergents*, 13(2), 143-148.
- Attaphong, C., Asnachinda, E., Charoensaeng, A., Sabatini, D. A., and Khaodhiar, S. (2010). Adsorption and adsolubilization of polymerizable surfactants on aluminum oxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 344(1), 126-131.

- Charoensaeng, A. (2009). *Admicelles and adsolubilization using linker molecule and extended surfactants onto aluminum oxide surface*. Doctoral Dissertation, Environmental Management Program, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Charoensaeng, A., Sabatini, D., and Khaodhiar, S. (2008). Styrene Solubilization and Adsolubilization on an Aluminum Oxide Surface Using Linker Molecules and Extended Surfactants. *Journal of Surfactants and Detergents*, 11(1), 61-71.
- Clifford, J. S., Ioannidis, M. A., and Legge, R. L. (2007). Enhanced aqueous solubilization of tetrachloroethylene by a rhamnolipid biosurfactant. *Journal of Colloid and Interface Science*, 305(2), 361-365.
- Clint, J. H. (1992). *Surfactant Aggregation*, Chapman and Hall, New York, 283.
- Costa, S. G. V. A. O., Nitschke, M., Lépine, F., Déziel, E., and Contiero, J. (2010). Structure, properties and applications of rhamnolipids produced by *Pseudomonas aeruginosa* L2-1 from cassava wastewater. *Process Biochemistry*, 45(9), 1511-1516.
- Czaplicka, M., and Chmielarz, A. (2009). Application of biosurfactants and non-ionic surfactants for removal of organic matter from metallurgical lead-bearing slime. *J Hazard Mater*, 163(2-3), 645-649.
- Desai, J. D., and Banat, I. M. (1997). Microbial production of surfactants and their commercial potential. *Microbiol Mol Biol Rev*, 61(1), 47-64.
- Dickson, J., and O'Haver, J. (2002). Adsolubilization of Naphthalene and  $\alpha$ -Naphthol in CnTAB Admicelles. *Langmuir*, 18(24), 9171-9176.
- Fuangswasdi, A., Charoensaeng, A., Sabatini, D. A., Scamehorn, J. F., Acosta, E. J., Osathaphan, K., and Khaodhiar, S. (2006). Mixtures of anionic and cationic surfactants with single and twin head groups: Solubilization and adsolubilization of styrene and ethylcyclohexane. *Journal of Surfactants and Detergents*, 9(1), 29-37.
- Graciaa, A., Lachaise, J., Cucuphat, C., Bourrel, M., and Salager, J. L. (1993a). Improving solubilization in microemulsions with additives. 1. The lipophilic linker role. *Langmuir*, 9(3), 669-672.
- Graciaa, A., Lachaise, J., Cucuphat, C., Bourrel, M., and Salager, J. L. (1993b). Improving solubilization in microemulsions with additives. 2. Long chain alcohols as lipophilic linkers. *Langmuir*, 9(12), 3371-3374.
- Guo, Y., and Mulligan, C. N. (2006). *Hazardous Materials in Soil and Atmosphere*, Nova Science Publishers, New York, 1-37.
- Juwarkar, A. A., Nair, A., Dubey, K. V., Singh, S. K., and Devotta, S. (2007). Biosurfactant technology for remediation of cadmium and lead contaminated soils. *Chemosphere*, 68(10), 1996-2002.

- Khaolerk, S. (2006). *Tetrachloroethylene removal from wastewater using a phase separation of cationic and anionic surfactant mixture: efficiency enhancement by lipophilic linkers and nonionic surfactants addition*. Master's Thesis, Environmental Management Program, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Lai, C.-C., Huang, Y.-C., Wei, Y.-H., and Chang, J.-S. (2009). Biosurfactant-enhanced removal of total petroleum hydrocarbons from contaminated soil. *J Hazard Mater*, 167(1-3), 609-614.
- Lee, S. K., Lee, S. B., Park, S. Y., Yi, Y. S., and Ahn, C. W. (2009). Structure of amorphous aluminum oxide. *Phys Rev Lett*, 103(9), 095501.
- Lewlomphaisan, J. (2009). *Solubilization and adsolubilization of phenylethanol and ethylcyclohexane using anionic carboxylate extended surfactants on an aluminum oxide surface*. Master's Thesis, Environmental Management Program, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Lovaglio, R. B., dos Santos, F. J., Jafelicci, M., Jr., and Contiero, J. (2011). Rhamnolipid emulsifying activity and emulsion stability: pH rules. *Colloids Surf B Biointerfaces*, 85(2), 301-305.
- Masrat, R., Maswal, M., and Dar, A. A. (2013). Competitive solubilization of naphthalene and pyrene in various micellar systems. *J Hazard Mater*, 244-245(0), 662-670.
- Mukherjee, S., Das, P., and Sen, R. (2006). Towards commercial production of microbial surfactants. *Trends in Biotechnology*, 24(11), 509-515.
- Mulligan, C. N. (2005). Environmental applications for biosurfactants. *Environmental Pollution*, 133(2), 183-198.
- Mulligan, C. N. (2009). Recent advances in the environmental applications of biosurfactants. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 14(5), 372-378.
- Nayak, A. S., Vijaykumar, M. H., and Karegoudar, T. B. (2009). Characterization of biosurfactant produced by *Pseudoxanthomonas* sp. PNK-04 and its application in bioremediation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(1), 73-79.
- Nayyar, S. P., Sabatini, D. A., and Harwell, J. H. (1994). Surfactant Adsolubilization and Modified Admicellar Sorption of Nonpolar, Polar, and Ionizable Organic Contaminants. *Environmental Science & Technology*, 28(11), 1874-1881.
- NIOSH. (2003). *Hydrocarbons, BP 36°-216 °C*. [cited 26 March 2013]: Available from: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/1500.pdf> .
- Noordman, W. H., Brusseau, M. L., and Janssen, D. B. (2000). Adsorption of a Multicomponent Rhamnolipid Surfactant to Soil. *Environmental Science & Technology*, 34(5), 832-838.



- Panswad, D., Sabatini, D. A., and Khaodhiar, S. (2012). Adsorption, desorption and adsolubilization properties of mixed anionic extended surfactants and a cationic surfactant. *Journal of Surfactants and Detergents*, 15(6), 787–795.
- Pavan, P. C., Crepaldi, E. L., de A. Gomes, G., and Valim, J. B. (1999). Adsorption of sodium dodecylsulfate on a hydrotalcite-like compound. Effect of temperature, pH and ionic strength. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 154(3), 399-410.
- Pei, X.-H., Zhan, X.-H., Wang, S.-M., Lin, Y.-S., and Zhou, L.-X. (2010). Effects of a Biosurfactant and a Synthetic Surfactant on Phenanthrene Degradation by a *Sphingomonas* Strain. *Pedosphere*, 20(6), 771-779.
- Rosen, M. J. (2004). *Surfactant and interfacial phenomena*, John Willey & Son, New Jersey, 444.
- Sabatini, D. A., Acosta, E., and Harwell, J. H. (2003). Linker molecules in surfactant mixtures. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 8(4–5), 316-326.
- Salager, J.-L., Graciaa, A., and Lachaise, J. (1998). Improving solubilization in microemulsions with additives. Part III: Lipophilic linker optimization. *J Surfactants Deterg*, 1(3), 403-406.
- Saphanuchart, W., Saiwan, C., and O’Haver, J. H. (2007). Effect of adsolubilized solutes on 2-D structure of cationic admicelles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 307(1–3), 71-76.
- Somasundaran, P., and Fuerstenau, D. W. (1966). Mechanisms of Alkyl Sulfonate Adsorption at the Alumina-Water Interface<sup>1</sup>. *The Journal of Physical Chemistry*, 70(1), 90-96.
- Srivastava, A., and Ismail, K. (2014). Solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous sodium dioctylsulfosuccinate solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 195(0), 105-109.
- Sun, S., and Jaffé, P. R. (1996). Sorption of Phenanthrene from Water onto Alumina Coated with Dianionic Surfactants. *Environmental Science & Technology*, 30(10), 2906-2913.
- Szymanska, A., and Sadowski, Z. (2010). Effects of biosurfactants on surface properties of hematite. *Adsorption*, 16(4-5), 233-239.
- Tan, Y., and O’Haver, J. H. (2004). Lipophilic linker impact on adsorption of and styrene adsolubilization in polyethoxylated octylphenols. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 232(2–3), 101-111.

- Venkatesh, N. M., and Vedaraman, N. (2012). Remediation of soil contaminated with copper using Rhamnolipids produced from *Pseudomonas aeruginosa* MTCC 2297 using waste frying rice bran oil. *Annals of Microbiology*, 62(1), 85-91.
- Volkering, F., Breure, A. M., and Rulkens, W. H. (1997). Microbiological aspects of surfactant use for biological soil remediation. *Biodegradation*, 8(6), 401-417.
- Wan, J., Chai, L., Lu, X., Lin, Y., and Zhang, S. (2011). Remediation of hexachlorobenzene contaminated soils by rhamnolipid enhanced soil washing coupled with activated carbon selective adsorption. *J Hazard Mater*, 189(1-2), 458-464.
- Wang, S., and Mulligan, C. N. (2009). Rhamnolipid biosurfactant-enhanced soil flushing for the removal of arsenic and heavy metals from mine tailings. *Process Biochemistry*, 44(3), 296-301.
- Wang, Q., Fang, X., Bai, B., Liang, X., Shuler, P. J., Goddard, W. A., 3rd, and Tang, Y. (2007). Engineering bacteria for production of rhamnolipid as an agent for enhanced oil recovery. *Biotechnol Bioeng*, 98(4), 842-853.
- Yin, H., Qiang, J., Jia, Y., Ye, J., Peng, H., Qin, H., Zhang, N., and He, B. (2009). Characteristics of biosurfactant produced by *Pseudomonas aeruginosa* S6 isolated from oil-containing wastewater. *Process Biochemistry*, 44(3), 302-308.
- Zeng, G., Liu, Z., Zhong, H., Li, J., Yuan, X., Fu, H., Ding, Y., Wang, J., and Zhou, M. (2011). Effect of monorhamnolipid on the degradation of n-hexadecane by *Candida tropicalis* and the association with cell surface properties. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 90(3), 1155-1161.
- Zhou, W., and Zhu, L. (2004). Solubilization of pyrene by anionic-nonionic mixed surfactants. *J Hazard Mater*, 109(1-3), 213-220.
- ชนิษฐา วงษ์นิกร. (2547). การโคลนและลักษณะสมบัติของยีนกลุ่ม *rhl* ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แรมโนลิพิดของ *Pseudomonas aeruginosa* A41. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิราภรณ์ ธนียวัน, กอบชัย ภัทรกุลวณิช, และชนิษฐา วงษ์นิกร. (2549). การโคลนและลักษณะสมบัติของยีนกลุ่ม *rhl* ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์โมโนแรมโนลิพิดทางชีวภาพของ *Pseudomonas aeruginosa* A41. รายงานผลการวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิราภรณ์ ธนียวัน และคณะ. (2551). การผลิตสารลดแรงตึงผิวชีวภาพจากจุลินทรีย์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. รายงานผลการวิจัย ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชไมพร สุขธัมม์รักษา, และสัญญา สิริวิทยาปกรณ์. (2555). ผลของการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินต่อการแพร่กระจายของ LNAPL [cited 2 กุมภาพันธ์ 2556]: Available from: [http://rdi.ku.ac.th/kasetresearch54/GroupEnvironment/08Sanya\\_Siri\\_LNAPL/template.html](http://rdi.ku.ac.th/kasetresearch54/GroupEnvironment/08Sanya_Siri_LNAPL/template.html).

- ณรงค์ ลักษณะภิรมย์. (2543). การผลิตสารลดแรงตึงผิวชีวภาพโดย *Pseudomonas sp.* A41 ในถังหมักแบบไม่ต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เทิดศักดิ์ คำสุริวร. (2551). การใช้สารลดแรงตึงผิวในการกำจัดหมึกชนิดที่ใช้ตัวทำละลายบนผิวพลาสติก โพลีโพรพิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รุจา สารคุณ. (2548). ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนในดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อนรรตน์ ภูวานคำ. (2548). การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบ อะลูมินา-มุลไลต์-เซอร์โคเนีย สำหรับงานทางวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเซรามิก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



ภาคผนวก ก  
วิธีการคำนวณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การคำนวณ surface excess concentration ( $\Gamma$ ) (Rosen, 2004)

$$\Gamma = -\frac{1}{4.606RT} \left( \frac{\partial \gamma}{\partial \log C_1} \right)_T \quad (\text{mol}/1000 \text{ m}^2)$$

เมื่อ  $R = 8.314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$

$T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$  ที่  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

$\gamma$  = ค่าแรงตึงผิวหรือค่าแรงตึงผิวประจัน (N/m)

$C_1$  = ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (mol/L)

การคำนวณ Effective area per molecule ( $a_1^S$ ) (Rosen, 2004)

$$a_1^S = \frac{10^{23}}{N\Gamma_1} \quad (\text{\AA})$$

เมื่อ  $N = 6.023 \times 10^{23}$

$\Gamma$  = การดูดซับของสารลดแรงตึงผิว (mol/1000 m<sup>2</sup>)

การคำนวณค่า HLB (Hydrophilic-Lipophilic Balance)

การคำนวณค่า HLB ของแอลกอฮอล์ (Adamson, 1982)

$$\text{HLB} = 7 + n(-0.475) + 1.9$$

เมื่อ  $n$  = จำนวนคาร์บอนของแอลกอฮอล์

การคำนวณค่า HLB ของสารลดแรงตึงผิวที่ผสมแอลกอฮอล์ (Xie และคณะ, 2005)

$$\text{HLB}_{AB} = \frac{(\text{HLB}_A \times W_A + \text{HLB}_B \times W_B)}{(W_A + W_B)}$$

เมื่อ  $\text{HLB}_A$  = ค่า HLB ของสารลดแรงตึงผิว

$\text{HLB}_B$  = ค่า HLB ของแอลกอฮอล์

$W_A$  = ปริมาณของสารลดแรงตึงผิว

$W_B$  = ปริมาณของแอลกอฮอล์



ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ข-1 ค่าแรงตึงผิวของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

Concentration (M)	Surface tension (mN/m)		Avg.
	1	2	
1.0E-07	60.351	64.056	62.2035
1.0E-06	49.444	50.523	49.9835
1.0E-05	40.707	41.654	41.1805
5.0E-05	30.492	30.773	30.6325
7.0E-05	30.261	29.570	29.9155
9.0E-05	29.183	29.102	29.1425
1.0E-04	27.978	27.968	27.973
2.0E-04	28.073	28.023	28.048
3.0E-04	27.883	27.881	27.882
5.0E-04	27.621	27.606	27.6135
7.0E-04	27.606	-	27.606
1.0E-03	28.103	-	28.103
1.0E-02	27.408	-	27.408

ตาราง ข-2 ค่าแรงตึงผิวของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมบิวทานอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

Concentration (M)	Surface tension (mN/m)		Avg.
	1	2	
1.0E-06	53.205	54.814	54.0095
1.0E-05	44.576	43.219	43.8975
5.0E-05	34.789	35.619	35.204
7.0E-05	31.982	32.750	32.366
9.0E-05	29.900	30.455	30.1775
1.0E-04	29.182	-	29.182
2.0E-04	27.925	28.587	28.256
3.0E-04	28.124	29.910	29.017
5.0E-04	27.805	-	27.805
7.0E-04	27.723	-	27.723
1.0E-03	27.602	-	27.602
1.0E-02	26.929	-	26.929



ตาราง ข-3 ค่าแรงตึงผิวของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมออกทานอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Concentration (M)	Surface tension (mN/m)		Avg.
	1	2	
1.0E-06	57.167	56.983	57.075
1.0E-05	48.025	47.210	47.6175
5.0E-05	36.448	36.082	36.265
7.0E-05	33.498	34.563	34.0305
9.0E-05	31.419	30.756	31.0875
1.0E-04	31.486	28.334	29.91
2.0E-04	28.975	28.133	28.554
3.0E-04	29.248	27.387	28.3175
5.0E-04	27.585	-	27.585
7.0E-04	27.479	-	27.479
1.0E-03	25.945	-	25.945
1.0E-02	26.495	27.606	27.0505

ตาราง ข-4 ค่าแรงตึงผิวของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโดเดคทานอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 - 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Concentration (M)	Surface tension (mN/m)		Avg.
	1	2	
1.0E-06	56.125	55.743	55.934
1.0E-05	45.275	45.320	45.2975
5.0E-05	32.459	34.849	33.654
7.0E-05	31.025	30.748	30.8865
9.0E-05	27.638	28.217	27.9275
1.0E-04	27.418	27.701	27.5595
2.0E-04	26.239	-	26.239
3.0E-04	25.826	-	25.826
1.0E-03	24.939	-	24.939
1.0E-02	25.426	-	25.426

ตาราง ข-5 ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดบนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Conc. (M)	Initial		Equilibrium		Alumina (g)	$C_{in} - C_{eq}$ (M)	Solution (ml)	q (mmol/g)	$q_{ave}$ (mmol/g)
	Area	Conc. (M)	Area	Conc. (M)					
5.0E-05	53	5.58E-05	24	5.42E-05	0.0099	1.63E-06	40	6.60E-03	6.17E-03
5.0E-05	53	5.58E-05	27.5	5.44E-05	0.0100	1.44E-06	40	5.74E-03	
6.0E-05	102.2	5.86E-05	70.7	5.68E-05	0.0099	1.77E-06	40	7.17E-03	8.33E-03
6.0E-05	102.2	5.86E-05	58.8	5.62E-05	0.0103	2.44E-06	40	9.49E-03	
7.0E-05	303.2	7.17E-05	253.8	6.72E-05	0.0101	4.54E-06	40	1.80E-02	1.87E-02
7.0E-05	303.2	7.17E-05	248.3	6.68E-05	0.0100	4.85E-06	40	1.94E-02	
9.0E-05	546.5	8.71E-05	479.5	7.99E-05	0.0100	7.26E-06	40	2.90E-02	2.93E-02
9.0E-05	546.5	8.71E-05	472.2	7.95E-05	0.0104	7.67E-06	40	2.95E-02	
1.0E-04	908.6	1.09E-04	837.7	1.00E-04	0.0104	8.48E-06	40	3.26E-02	3.42E-02
1.0E-04	908.6	1.09E-04	827.9	9.95E-05	0.0101	9.03E-06	40	3.58E-02	
2.0E-04	2168.5	1.80E-04	2082.6	1.70E-04	0.0102	1.03E-05	40	4.02E-02	3.56E-02
2.0E-04	2168.5	1.80E-04	2130	1.73E-04	0.0100	7.59E-06	40	3.04E-02	
2.0E-04	2168.5	1.80E-04	2097.9	1.71E-04	0.0104	9.40E-06	40	3.62E-02	
3.0E-04	4676.5	3.29E-04	4637.4	3.14E-04	0.0101	1.47E-05	40	5.82E-02	6.65E-02
3.0E-04	4676.5	3.29E-04	4552.9	3.09E-04	0.0104	1.95E-05	40	7.48E-02	
3.0E-04	4676.5	3.29E-04	4591.1	3.11E-04	0.0104	1.73E-05	40	6.66E-02	
4.0E-04	5569.2	3.81E-04	5497.1	3.62E-04	0.0099	1.86E-05	40	7.52E-02	7.60E-02
4.0E-04	5569.2	3.81E-04	5483.2	3.62E-04	0.0101	1.94E-05	40	7.68E-02	
7.0E-04	11375.2	7.19E-04	11356.4	6.92E-04	0.0100	2.67E-05	40	1.07E-01	1.37E-01
7.0E-04	11375.2	7.19E-04	11086.8	6.77E-04	0.0101	4.19E-05	40	1.66E-01	
8.0E-04	12770.2	7.97E-04	12706.6	7.69E-04	0.0104	2.88E-05	40	1.11E-01	1.09E-01
8.0E-04	12770.2	7.97E-04	12747.5	7.71E-04	0.0099	2.65E-05	40	1.07E-01	
2.00E-03	2795.4	1.93E-03	2598.3	1.84E-03	0.0300	9.55E-05	40	1.27E-01	1.21E-01
2.00E-03	2795.4	1.93E-03	2619.6	1.85E-03	0.0299	8.51E-05	40	1.14E-01	
3.00E-03	4687.7	2.85E-03	4561.7	2.79E-03	0.0303	6.10E-05	40	8.06E-02	9.53E-02
3.00E-03	4687.7	2.85E-03	4514.6	2.77E-03	0.0305	8.38E-05	40	1.10E-01	
4.00E-03	6812.5	3.88E-03	6519	3.74E-03	0.0306	1.42E-04	40	1.86E-01	1.74E-01
4.00E-03	6812.5	3.88E-03	6559.4	3.76E-03	0.0301	1.23E-04	40	1.63E-01	
5.00E-03	8945.1	4.91E-03	8863.9	4.87E-03	0.0304	3.93E-05	40	5.17E-02	9.01E-02
5.00E-03	8945.1	4.91E-03	8745.5	4.82E-03	0.0301	9.67E-05	40	1.28E-01	

ตาราง ข-6 ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมบิวทานอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร บนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Conc. (M)	Initial		Equilibrium		Alumina (g)	$C_{in} - C_{eq}$ (M)	Solution (ml)	q (mmol/g)	$q_{ave}$ (mmol/g)
	Area	Conc. (M)	Area	Conc. (M)					
2.0E-05	146.1	4.94E-05	142.5	4.91E-05	0.0103	3.56E-07	40	1.38E-03	2.55E-03
2.0E-05	146.1	4.94E-05	136.6	4.85E-05	0.0101	9.40E-07	40	3.72E-03	
5.0E-05	272.8	6.19E-05	238	5.85E-05	0.0104	3.44E-06	40	1.32E-02	1.26E-02
5.0E-05	272.8	6.19E-05	242.6	5.90E-05	0.0100	2.99E-06	40	1.20E-02	
7.0E-05	398.1	7.43E-05	348.1	6.94E-05	0.0097	4.95E-06	40	2.04E-02	2.04E-02
7.0E-05	398.1	7.43E-05	348.1	6.94E-05	0.0097	4.95E-06	40	2.04E-02	
9.0E-05	544.5	8.88E-05	475.8	8.20E-05	0.0097	6.80E-06	40	2.80E-02	2.61E-02
9.0E-05	544.5	8.88E-05	483	8.27E-05	0.0101	6.09E-06	40	2.41E-02	
1.0E-04	444.5	7.89E-05	380.3	7.26E-05	0.0104	6.35E-06	40	2.44E-02	1.59E-02
1.0E-04	444.5	7.89E-05	426	7.71E-05	0.0100	1.83E-06	40	7.32E-03	
2.0E-04	1846.5	2.41E-04	1694.5	2.27E-04	0.0104	1.43E-05	40	5.50E-02	5.46E-02
2.0E-04	1846.5	2.41E-04	1695.3	2.27E-04	0.0105	1.42E-05	40	5.42E-02	
3.0E-04	3914.9	3.03E-04	3593.8	2.81E-04	0.0104	2.19E-05	40	8.43E-02	8.98E-02
3.0E-04	3914.9	3.03E-04	3562.4	2.79E-04	0.0101	2.41E-05	40	9.53E-02	
5.0E-04	6390	4.72E-04	6121.6	4.54E-04	0.0102	1.83E-05	40	7.19E-02	9.96E-02
5.0E-04	6390	4.72E-04	5909.6	4.39E-04	0.0103	3.28E-05	40	1.27E-01	
1.0E-03	14210.4	1.01E-03	13938.5	9.87E-04	0.0100	1.86E-05	40	7.42E-02	9.71E-02
1.0E-03	14210.4	1.01E-03	13744.4	9.74E-04	0.0106	3.18E-05	40	1.20E-01	
2.0E-03	4722.7	1.87E-03	4471.1	1.78E-03	0.0304	8.66E-05	40	1.14E-01	1.12E-01
2.0E-03	4722.7	1.87E-03	4480.8	1.79E-03	0.0304	8.33E-05	40	1.10E-01	
3.0E-03	8126.7	3.04E-03	8044.1	3.01E-03	0.0307	2.84E-05	40	3.70E-02	1.38E-01
3.0E-03	8126.7	3.04E-03	7593.9	2.86E-03	0.0307	1.83E-04	40	2.39E-01	
7.0E-03	19902.1	7.09E-3	19746.6	7.04E-03	0.0304	5.35E-05	40	7.04E-02	7.62E-02
7.0E-03	19902.1	7.09E-3	19722.7	7.03E-03	0.0301	6.17E-05	40	8.21E-02	

ตาราง ข-7 ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมออกทานอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร บนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Conc. (M)	Initial		Equilibrium		Alumina (g)	$C_{in} - C_{eq}$ (M)	Solution (ml)	q (mmol/g)	$q_{ave}$ (mmol/g)
	Area	Conc. (M)	Area	Conc. (M)					
2.0E-05	216.9	4.15E-05	166.7	3.83E-05	0.0101	3.20E-06	40	1.27E-02	4.71E-03
2.0E-05	216.9	4.15E-05	203.5	4.06E-05	0.0105	8.55E-07	40	3.26E-03	
7.0E-05	540.2	6.21E-05	423.8	5.47E-05	0.01	7.42E-06	40	2.97E-02	2.95E-02
7.0E-05	540.2	6.21E-05	426.2	5.48E-05	0.0099	7.27E-06	40	2.94E-02	
1.0E-04	873.1	8.33E-05	599	6.59E-05	0.0102	1.75E-05	40	6.86E-02	6.86E-02
1.0E-04	873.1	8.33E-05	237.7	4.28E-05	0.0101	4.05E-05	40	1.61E-01	
2.0E-04	1587.4	1.80E-04	1334.8	1.52E-04	0.0101	2.76E-05	40	1.09E-01	1.10E-01
2.0E-04	1587.4	1.80E-04	1331.5	1.52E-04	0.0102	2.80E-05	40	1.10E-01	
3.0E-04	4170.1	2.94E-04	3556	2.54E-04	0.0105	3.92E-05	40	1.49E-01	1.36E-01
3.0E-04	4170.1	2.94E-04	3672.1	2.62E-04	0.0103	3.18E-05	40	1.23E-01	
4.0E-04	2975.4	3.32E-04	2892.6	3.23E-04	0.0104	9.06E-06	40	3.48E-02	1.42E-01
4.0E-04	2975.4	3.32E-04	2396	2.68E-04	0.0102	6.34E-05	40	2.49E-01	
6.0E-04	5796.1	6.40E-04	5156.2	5.70E-04	0.0101	7.00E-05	40	2.77E-01	2.20E-01
6.0E-04	5796.1	6.40E-04	5421.2	5.99E-04	0.0101	4.10E-05	40	1.62E-01	
8.0E-04	6942.9	7.66E-04	6325.8	6.98E-04	0.0103	6.75E-05	40	2.62E-01	2.85E-01
8.0E-04	6942.9	7.66E-04	6204.6	6.85E-04	0.0105	8.08E-05	40	3.08E-01	
1.0E-03	1569.5	1.01E-03	1437.2	9.49E-04	0.0099	6.04E-05	40	2.44E-01	2.44E-01
1.0E-03	1569.5	1.01E-03	1478	9.68E-04	0.0102	4.17E-05	40	1.64E-01	
2.0E-03	3234.2	1.77E-03	3048.3	1.68E-03	0.0105	8.48E-05	40	3.23E-01	3.23E-01
2.0E-03	3234.2	1.77E-03	3197.3	1.75E-03	0.0105	1.68E-05	40	6.41E-02	
3.0E-03	5608.4	2.85E-03	5307.3	2.71E-03	0.0102	1.37E-04	40	5.39E-01	2.97E-01
3.0E-03	5608.4	2.85E-03	5576.9	2.84E-03	0.0104	1.44E-05	40	5.53E-02	

ตาราง ข-8 ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโตนคานอล  
ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร บนพื้นผิวอะลูมินัมออกไซด์ ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0  
มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Conc. (M)	Initial		Equilibrium		Alumina (g)	$C_{in} - C_{eq}$ (M)	Solution (ml)	q (mmol/g)	$q_{ave}$ (mmol/g)
	Area	Conc. (M)	Area	Conc. (M)					
2.0E-05	281.4	3.90E-05	235.8	3.59E-05	0.0107	3.09E-06	40	1.15E-02	1.05E-02
2.0E-05	281.4	3.90E-05	244.3	3.65E-05	0.0107	2.51E-06	40	9.39E-03	
5.0E-05	548.1	5.71E-05	443.1	5.00E-05	0.0104	7.11E-06	40	2.73E-02	2.91E-02
5.0E-05	548.1	5.71E-05	429.7	4.91E-05	0.0104	8.01E-06	40	3.08E-02	
1.0E-04	1006.2	8.81E-05	854.7	7.78E-05	0.0104	1.03E-05	40	3.94E-02	3.63E-02
1.0E-04	1006.2	8.81E-05	880.2	7.95E-05	0.0103	8.53E-06	40	3.31E-02	
2.0E-04	2175	1.67E-04	1881.2	1.47E-04	0.0103	1.99E-05	40	7.72E-02	7.80E-02
2.0E-04	2175	1.67E-04	1869.5	1.46E-04	0.0105	2.07E-05	40	7.88E-02	
3.0E-04	2615.3	3.68E-04	2035.5	3.18E-04	0.0104	4.93E-05	40	1.90E-01	1.74E-01
3.0E-04	2615.3	3.68E-04	2147	3.28E-04	0.0101	3.99E-05	40	1.58E-01	
5.0E-04	6888	4.86E-04	6123.1	4.34E-04	0.0106	5.18E-05	40	1.95E-01	1.75E-01
5.0E-04	6888	4.86E-04	6287.7	4.46E-04	0.0105	4.06E-05	40	1.55E-01	
7.0E-04	10469.3	7.29E-04	10066.4	7.01E-04	0.0100	2.73E-05	40	1.09E-01	1.06E-01
7.0E-04	10469.3	7.29E-04	10084.4	7.02E-04	0.0102	2.60E-05	40	1.02E-01	
1.0E-03	3192.2	1.03E-03	2978	9.75E-04	0.0103	5.81E-05	40	2.25E-01	1.86E-01
1.0E-03	3192.2	1.03E-03	3056.3	9.96E-04	0.0100	3.68E-05	40	1.47E-01	
2.0E-03	6357.1	1.89E-03	5808.6	1.74E-03	0.0300	1.49E-04	40	1.98E-01	1.45E-01
2.0E-03	6357.1	1.89E-03	6094.7	1.82E-03	0.0307	7.11E-05	40	9.27E-02	
3.0E-03	10544.2	3.03E-03	10133.7	2.91E-03	0.0305	1.11E-04	40	1.46E-01	1.23E-01
3.0E-03	10544.2	3.03E-03	10265.7	2.95E-03	0.0300	7.55E-05	40	1.01E-01	
5.0E-03	17886.2	5.02E-03	17259	4.85E-03	0.0305	1.70E-04	40	2.23E-01	1.87E-01
5.0E-03	17886.2	5.02E-03	17459.4	4.90E-03	0.0305	1.16E-04	40	1.52E-01	

ตาราง ข-9 แอดโซลูบิไลเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

Tube	Styrene (μL)	Surf_initial		Surf_equilibrium		Surf <sub>(in-eq)</sub> (M)	Styrene_initial	Styrene_equilibrium		Styrene <sub>(in-eq)</sub> (M)
		Area	Conc. (M)	Area	Conc. (M)		Conc. (M)	Area	Conc. (M)	
1	5	6947	6.65E-04	6710.9	6.42E-04	2.26E-05	1.08E-03	45526.2	3.34E-04	7.42E-04
2	5	6947	6.65E-04	6755.8	6.47E-04	1.83E-05	1.08E-03	45603.4	3.35E-04	7.41E-04
3	7	6947	6.65E-04	6735.2	6.45E-04	2.03E-05	1.51E-03	50125.2	4.05E-04	1.10E-03
4	7	6947	6.65E-04	6577.3	6.30E-04	3.54E-05	1.51E-03	49951.8	4.02E-04	1.11E-03
5	8	6947	6.65E-04	6625.2	6.34E-04	3.08E-05	1.72E-03	52136.4	4.40E-04	1.28E-03
6	8	6947	6.65E-04	6734.1	6.45E-04	2.04E-05	1.72E-03	52628.4	4.49E-04	1.27E-03
7	10	6947	6.65E-04	6514.5	6.24E-04	4.14E-05	2.15E-03	53607.5	4.68E-04	1.69E-03
8	10	6947	6.65E-04	6642	6.36E-04	2.92E-05	2.15E-03	54924.3	4.94E-04	1.66E-03
9	11	6947	6.65E-04	6719.1	6.43E-04	2.18E-05	2.37E-03	56304.8	5.23E-04	1.84E-03
10	11	6947	6.65E-04	6626.7	6.34E-04	3.07E-05	2.37E-03	56664.3	5.31E-04	1.84E-03
11	12	6947	6.65E-04	6675.2	6.39E-04	2.60E-05	2.58E-03	56902.8	5.37E-04	2.05E-03
12	12	6947	6.65E-04	6443.6	6.17E-04	4.82E-05	2.58E-03	56386.7	5.25E-04	2.06E-03
13	15	6947	6.65E-04	6394.5	6.12E-04	5.29E-05	3.23E-03	58355.1	5.70E-04	2.66E-03
14	15	6947	6.65E-04	6610.5	6.33E-04	3.22E-05	3.23E-03	58443.6	5.72E-04	2.66E-03
15	20	6947	6.65E-04	6504.1	6.23E-04	4.24E-05	4.31E-03	59769.4	6.05E-04	3.70E-03
16	20	6947	6.65E-04	6605.2	6.32E-04	3.27E-05	4.31E-03	59530.6	5.99E-04	3.71E-03
17	30	6947	6.65E-04	6473.1	6.20E-04	4.54E-05	6.46E-03	62482.7	6.77E-04	5.78E-03
18	30	6947	6.65E-04	6485.3	6.21E-04	4.42E-05	6.46E-03	63792.5	7.15E-04	5.74E-03
19	35	6947	6.65E-04	6509.5	6.23E-04	4.19E-05	7.54E-03	63320	7.01E-04	6.83E-03
20	35	6947	6.65E-04	6528.2	6.25E-04	4.01E-05	7.54E-03	65057.9	7.54E-04	6.78E-03

ตาราง ข-9 แอดโซลูชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด ความเข้มข้นของ โขเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส (ต่อ)

Tube	Alumina (g)	Surf <sub>(in-eq)</sub> (M)	q (mole/g)	q (molecule/nm <sup>2</sup> )	Styrene <sub>(in-eq)</sub> (M)	X <sub>adm</sub>	X <sub>aq</sub>	avg X <sub>adm</sub>	avg X <sub>aq</sub>	K <sub>adm</sub>	log K <sub>adm</sub>
1	0.0103	2.26E-05	8.78E-05	3.41E-01	7.42E-04	0.97	6.01E-06	0.9732	6.02E-06	1.62E+05	5.21
2	0.0097	1.83E-05	7.55E-05	2.93E-01	7.41E-04	0.98	6.03E-06				
3	0.0104	2.03E-05	7.80E-05	3.03E-01	1.10E-03	0.98	7.28E-06	0.9755	7.26E-06	1.34E+05	5.13
4	0.0098	3.54E-05	1.44E-04	5.61E-01	1.11E-03	0.97	7.23E-06				
5	0.0101	3.08E-05	1.22E-04	4.74E-01	1.28E-03	0.98	7.92E-06	0.9804	8.00E-06	1.23E+05	5.09
6	0.0102	2.04E-05	7.99E-05	3.10E-01	1.27E-03	0.98	8.08E-06				
7	0.0102	4.14E-05	1.62E-04	6.31E-01	1.69E-03	0.98	8.42E-06	0.9794	8.66E-06	1.13E+05	5.05
8	0.0099	2.92E-05	1.18E-04	4.58E-01	1.66E-03	0.98	8.90E-06				
9	0.0103	2.18E-05	8.47E-05	3.29E-01	1.84E-03	0.99	9.42E-06	0.9859	9.49E-06	1.04E+05	5.02
10	0.0102	3.07E-05	1.20E-04	4.67E-01	1.84E-03	0.98	9.56E-06				
11	0.0100	2.60E-05	1.04E-04	4.04E-01	2.05E-03	0.99	9.66E-06	0.9823	9.56E-06	1.03E+05	5.01
12	0.0102	4.82E-05	1.89E-04	7.34E-01	2.06E-03	0.98	9.45E-06				
13	0.0098	5.29E-05	2.16E-04	8.38E-01	2.66E-03	0.98	1.03E-05	0.9843	1.03E-05	9.57E+04	4.98
14	0.0105	3.22E-05	1.23E-04	4.77E-01	2.66E-03	0.99	1.03E-05				
15	0.0105	4.24E-05	1.62E-04	6.27E-01	3.70E-03	0.99	1.09E-05	0.9900	1.08E-05	9.14E+04	4.96
16	0.0103	3.27E-05	1.27E-04	4.93E-01	3.71E-03	0.99	1.08E-05				
17	0.0103	4.54E-05	1.76E-04	6.84E-01	5.78E-03	0.99	1.22E-05	0.9923	1.25E-05	7.92E+04	4.90
18	0.0101	4.42E-05	1.75E-04	6.80E-01	5.74E-03	0.99	1.29E-05				
19	0.0101	4.19E-05	1.66E-04	6.44E-01	6.83E-03	0.99	1.26E-05	0.9940	1.31E-05	7.59E+04	4.88
20	0.0100	4.01E-05	1.60E-04	6.23E-01	6.78E-03	0.99	1.36E-05				

K<sub>adm</sub> from slope of isotherm = 3042

log K<sub>adm</sub> = 3.48

ตาราง ข-10 แอดโซลูชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมบิวทานอล  
ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5  
อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Tube	Styrene ( $\mu$ L)	Surf_initial		Surf_equilibrium		Surf <sub>(in-eq)</sub> (M)	Styrene _initial	Styrene_equilibrium		Styrene <sub>(in-eq)</sub> (M)
		Area	Conc. (M)	Area	Conc. (M)		Conc. (M)	Area	Conc. (M)	
1	5	3826.4	4.75E-04	3580.8	4.45E-04	3.05E-05	1.08E-03	46674.7	3.50E-04	7.26E-04
2	5	3826.4	4.75E-04	3595.6	4.46E-04	2.87E-05	1.08E-03	47386.1	3.61E-04	7.16E-04
3	8	3826.4	4.75E-04	3584.3	4.45E-04	3.01E-05	1.72E-03	59228	5.91E-04	1.13E-03
4	8	3826.4	4.75E-04	3593.6	4.46E-04	2.89E-05	1.72E-03	59450.9	5.97E-04	1.13E-03
5	10	3826.4	4.75E-04	3619.4	4.49E-04	2.57E-05	2.15E-03	60908.1	6.34E-04	1.52E-03
6	10	3826.4	4.75E-04	3623.8	4.50E-04	2.52E-05	2.15E-03	61842.9	6.59E-04	1.49E-03
7	13	3826.4	4.75E-04	3579.8	4.44E-04	3.06E-05	2.80E-03	61217.7	6.42E-04	2.16E-03
8	13	3826.4	4.75E-04	3590.7	4.46E-04	2.93E-05	2.80E-03	65834.5	7.79E-04	2.02E-03
9	15	3826.4	4.75E-04	3591.7	4.46E-04	2.91E-05	3.23E-03	65755.1	7.76E-04	2.45E-03
10	15	3826.4	4.75E-04	3575.8	4.44E-04	3.11E-05	3.23E-03	67551.1	8.36E-04	2.39E-03
11	18	3826.4	4.75E-04	3577.2	4.44E-04	3.09E-05	3.88E-03	67190.3	8.24E-04	3.05E-03
12	18	3826.4	4.75E-04	3622.4	4.50E-04	2.53E-05	3.88E-03	67624.9	8.39E-04	3.04E-03
13	20	3826.4	4.75E-04	3637.1	4.52E-04	2.35E-05	4.31E-03	65837.8	7.79E-04	3.53E-03
14	20	3826.4	4.75E-04	3569.7	4.43E-04	3.19E-05	4.31E-03	67561.4	8.37E-04	3.47E-03
15	25	3826.4	4.75E-04	3584.3	4.45E-04	3.01E-05	5.38E-03	67358.8	8.30E-04	4.55E-03
16	25	3826.4	4.75E-04	3581.9	4.45E-04	3.04E-05	5.38E-03	69976.9	9.25E-04	4.46E-03
17	30	3826.4	4.75E-04	3583.4	4.45E-04	3.02E-05	6.46E-03	68612.1	8.74E-04	5.58E-03
18	30	3826.4	4.75E-04	3546	4.40E-04	3.48E-05	6.46E-03	68094.9	8.55E-04	5.60E-03
19	35	3826.4	4.75E-04	3591.8	4.46E-04	2.91E-05	7.54E-03	67997.3	8.52E-04	6.68E-03
20	35	3826.4	4.75E-04	3574.7	4.44E-04	3.12E-05	7.54E-03	67661.7	8.40E-04	6.70E-03



ตาราง ข-10 แอดโซลูชันไอโซเทอรั่มของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมบิวทานอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส (ต่อ)

Tube	Alumina (g)	Surf <sub>(in-eq)</sub> (M)	q (mole/g)	q (molecule/nm <sup>2</sup> )	Styrene <sub>(in-eq)</sub> (M)	X <sub>adm</sub>	X <sub>aq</sub>	avg X <sub>adm</sub>	avg X <sub>aq</sub>	K <sub>adm</sub>	log K <sub>adm</sub>
1	0.0100	3.05E-05	1.22E-04	4.74E-01	7.26E-04	0.96	6.31E-06	0.9606	6.40E-06	1.50E+05	5.18
2	0.0098	2.87E-05	1.17E-04	4.54E-01	7.16E-04	0.96	6.50E-06				
3	0.0100	3.01E-05	1.20E-04	4.67E-01	1.13E-03	0.97	1.06E-05	0.9745	1.07E-05	9.11E+04	4.96
4	0.0103	2.89E-05	1.12E-04	4.36E-01	1.13E-03	0.97	1.07E-05				
5	0.0099	2.57E-05	1.04E-04	4.03E-01	1.52E-03	0.98	1.14E-05	0.9834	1.16E-05	8.45E+04	4.93
6	0.0098	2.52E-05	1.03E-04	3.99E-01	1.49E-03	0.98	1.19E-05				
7	0.0101	3.06E-05	1.21E-04	4.71E-01	2.16E-03	0.99	1.16E-05	0.9859	1.28E-05	7.71E+04	4.89
8	0.0100	2.93E-05	1.17E-04	4.55E-01	2.02E-03	0.99	1.40E-05				
9	0.0100	2.91E-05	1.17E-04	4.53E-01	2.45E-03	0.99	1.40E-05	0.9877	1.45E-05	6.81E+04	4.83
10	0.0097	3.11E-05	1.28E-04	4.98E-01	2.39E-03	0.99	1.51E-05				
11	0.0103	3.09E-05	1.20E-04	4.67E-01	3.05E-03	0.99	1.48E-05	0.9908	1.50E-05	6.62E+04	4.82
12	0.0101	2.53E-05	1.00E-04	3.90E-01	3.04E-03	0.99	1.51E-05				
13	0.0105	2.35E-05	8.95E-05	3.48E-01	3.53E-03	0.99	1.40E-05	0.9921	1.45E-05	6.82E+04	4.83
14	0.0104	3.19E-05	1.23E-04	4.76E-01	3.47E-03	0.99	1.51E-05				
15	0.0103	3.01E-05	1.17E-04	4.53E-01	4.55E-03	0.99	1.49E-05	0.9933	1.58E-05	6.29E+04	4.80
16	0.0100	3.04E-05	1.21E-04	4.72E-01	4.46E-03	0.99	1.67E-05				
17	0.0103	3.02E-05	1.17E-04	4.55E-01	5.58E-03	0.99	1.57E-05	0.9942	1.56E-05	6.39E+04	4.81
18	0.0102	3.48E-05	1.37E-04	5.30E-01	5.60E-03	0.99	1.54E-05				
19	0.0098	2.91E-05	1.19E-04	4.62E-01	6.68E-03	1.00	1.53E-05	0.9955	1.52E-05	6.54E+04	4.82
20	0.0101	3.12E-05	1.24E-04	4.81E-01	6.70E-03	1.00	1.51E-05				

K<sub>adm</sub> from slope of isotherm = 3612

log K<sub>adm</sub> = 3.56

ตาราง ข-11 แอดโซลูบิลิเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมออกทานอล  
 ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5  
 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Tube	Styrene ( $\mu\text{L}$ )	Surf_initial		Surf_equilibrium		Surf <sub>(in-eq)</sub> (M)	Styrene_initial		Styrene_equilibrium		Styrene <sub>(in-eq)</sub> (M)
		Area	Conc. (M)	Area	Conc. (M)		Conc. (M)	Area	Conc. (M)		
1	5	5879.8	5.70E-04	5459	5.29E-04	4.08E-05	1.08E-03	50599.3	4.13E-04	6.64E-04	
2	5	5879.8	5.70E-04	5748	5.57E-04	1.28E-05	1.08E-03	50615.1	4.13E-04	6.64E-04	
3	7	5879.8	5.70E-04	5781.6	5.60E-04	9.52E-06	1.51E-03	55913.8	5.15E-04	9.92E-04	
4	7	5879.8	5.70E-04	5720.1	5.55E-04	1.55E-05	1.51E-03	56174.6	5.21E-04	9.87E-04	
5	11	5879.8	5.70E-04	5517.5	5.35E-04	3.51E-05	2.37E-03	61086.5	6.39E-04	1.73E-03	
6	11	5879.8	5.70E-04	5529.8	5.36E-04	3.39E-05	2.37E-03	61268.6	6.44E-04	1.72E-03	
7	15	5879.8	5.70E-04	5496.1	5.33E-04	3.72E-05	3.23E-03	64124.8	7.25E-04	2.50E-03	
8	15	5879.8	5.70E-04	5544.4	5.37E-04	3.25E-05	3.23E-03	64561.7	7.38E-04	2.49E-03	
9	17	5879.8	5.70E-04	5535.9	5.37E-04	3.33E-05	3.66E-03	65388.7	7.64E-04	2.90E-03	
10	17	5879.8	5.70E-04	5504.2	5.34E-04	3.64E-05	3.66E-03	65833.1	7.78E-04	2.88E-03	
11	20	5879.8	5.70E-04	5557.3	5.39E-04	3.13E-05	4.31E-03	66228.5	7.91E-04	3.51E-03	
12	20	5879.8	5.70E-04	5623.6	5.45E-04	2.48E-05	4.31E-03	65637.3	7.72E-04	3.53E-03	
13	30	5879.8	5.70E-04	5498.6	5.33E-04	3.70E-05	6.46E-03	69039.6	8.90E-04	5.57E-03	
14	30	5879.8	5.70E-04	5600.5	5.43E-04	2.71E-05	6.46E-03	68912	8.85E-04	5.57E-03	
15	35	5879.8	5.70E-04	5446.4	5.28E-04	4.20E-05	7.54E-03	69907.5	9.23E-04	6.61E-03	
16	35	5879.8	5.70E-04	5408.8	5.24E-04	4.57E-05	7.54E-03	69481.2	9.06E-04	6.63E-03	

ตาราง ข-11 แอดโซลูชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมออกทานอล  
ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5  
อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส (ต่อ)

Tube	Alumina (g)	Surf <sub>(in-eq)</sub> (M)	q (mole/g)	q (molecule/nm <sup>2</sup> )	Styrene <sub>(in-eq)</sub> (M)	X <sub>adm</sub>	X <sub>aq</sub>	avg X <sub>adm</sub>	avg X <sub>aq</sub>	K <sub>adm</sub>	log K <sub>adm</sub>
1	0.0103	4.08E-05	1.58E-04	6.15E-01	6.64E-04	0.94	7.43E-06	0.9616	7.43E-06	1.29E+05	5.11
2	0.0101	1.28E-05	5.06E-05	1.97E-01	6.64E-04	0.98	7.43E-06				
3	0.0105	4.83E-05	1.84E-04	7.15E-01	9.92E-04	0.95	9.27E-06	0.9691	9.32E-06	1.04E+05	5.02
4	0.0099	1.55E-05	6.26E-05	2.43E-01	9.87E-04	0.98	9.37E-06				
5	0.0098	3.51E-05	1.43E-04	5.57E-01	1.73E-03	0.98	1.15E-05	0.9804	1.15E-05	8.49E+04	4.93
6	0.0098	3.39E-05	1.38E-04	5.38E-01	1.72E-03	0.98	1.16E-05				
7	0.0099	3.72E-05	1.50E-04	5.84E-01	2.50E-03	0.99	1.31E-05	0.9862	1.32E-05	7.49E+04	4.87
8	0.0098	3.25E-05	1.33E-04	5.15E-01	2.49E-03	0.99	1.33E-05				
9	0.0098	3.33E-05	1.36E-04	5.28E-01	2.90E-03	0.99	1.38E-05	0.9881	1.39E-05	7.12E+04	4.85
10	0.0102	3.64E-05	1.43E-04	5.55E-01	2.88E-03	0.99	1.40E-05				
11	0.0103	3.13E-05	1.21E-04	4.72E-01	3.51E-03	0.99	1.42E-05	0.9921	1.41E-05	7.05E+04	4.85
12	0.0099	2.48E-05	1.00E-04	3.90E-01	3.53E-03	0.99	1.39E-05				
13	0.0103	3.70E-05	1.44E-04	5.57E-01	5.57E-03	0.99	1.60E-05	0.9943	1.60E-05	6.22E+04	4.79
14	0.0101	2.71E-05	1.07E-04	4.16E-01	5.57E-03	1.00	1.59E-05				
15	0.0099	4.20E-05	1.70E-04	6.59E-01	6.61E-03	0.99	1.66E-05	0.9934	1.65E-05	6.0E+04	4.78
16	0.0098	4.57E-05	1.86E-04	7.24E-01	6.63E-03	0.99	1.63E-05				

$K_{adm}$  from slope of isotherm = 3759

$\log K_{adm} = 3.58$

ตาราง ข-12 แอดโซลูบิลิเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโตนอกคา  
 นอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช  
 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

Tube	Styrene ( $\mu\text{L}$ )	Surf_initial		Surf_equilibrium		Surf <sub>(in-eq)</sub> (M)	Styrene_initial		Styrene_equilibrium		Styrene <sub>(in-eq)</sub> (M)
		Area	Conc. (M)	Area	Conc. (M)		Conc. (M)	Area	Conc. (M)		
1	5	2039	3.80E-04	1880.2	3.50E-04	2.96E-05	1.08E-03	57536.9	5.51E-04	5.26E-04	
2	5	2039	3.80E-04	1870.6	3.49E-04	3.14E-05	1.08E-03	57604.9	5.53E-04	5.24E-04	
3	8	2039	3.80E-04	1880.2	3.50E-04	2.96E-05	1.72E-03	67284.8	8.27E-04	8.95E-04	
4	8	2039	3.80E-04	1954.8	3.64E-04	1.57E-05	1.72E-03	68557.2	8.72E-04	8.50E-04	
5	10	2039	3.80E-04	1872.2	3.49E-04	3.11E-05	2.15E-03	69588.4	9.10E-04	1.24E-03	
6	10	2039	3.80E-04	1936.8	3.61E-04	1.90E-05	2.15E-03	69507.3	9.07E-04	1.25E-03	
7	13	2039	3.80E-04	1962.6	3.66E-04	1.42E-05	2.80E-03	72606.9	1.03E-03	1.77E-03	
8	13	2039	3.80E-04	1945.1	3.63E-04	1.75E-05	2.80E-03	72932.7	1.05E-03	1.75E-03	
9	18	2039	3.80E-04	1937.5	3.61E-04	1.89E-05	3.88E-03	75255.2	1.15E-03	2.72E-03	
10	18	2039	3.80E-04	1915.5	3.57E-04	2.30E-05	3.88E-03	75989.3	1.19E-03	2.69E-03	
11	20	2039	3.80E-04	1740.2	3.24E-04	5.57E-05	4.31E-03	69637.3	9.12E-04	3.39E-03	
12	20	2039	3.80E-04	1915.7	3.57E-04	2.30E-05	4.31E-03	76042.2	1.19E-03	3.11E-03	
13	25	2039	3.80E-04	1900.6	3.54E-04	2.58E-05	5.38E-03	75944.1	1.19E-03	4.20E-03	
14	25	2039	3.80E-04	1919.4	3.58E-04	2.23E-05	5.38E-03	76437.9	1.21E-03	4.17E-03	
15	28	2039	3.80E-04	1853.7	3.45E-04	3.45E-05	6.03E-03	75447.3	1.16E-03	4.87E-03	
16	28	2039	3.80E-04	1911.3	3.56E-04	2.38E-05	6.03E-03	75998.7	1.19E-03	4.84E-03	
17	30	2039	3.80E-04	1891.1	3.52E-04	2.76E-05	6.46E-03	75988.5	1.19E-03	5.27E-03	
18	30	2039	3.80E-04	1701	3.17E-04	6.30E-05	6.46E-03	74154.4	1.10E-03	5.36E-03	
19	35	2039	3.80E-04	1801.3	3.36E-04	4.43E-05	7.54E-03	74646.6	1.12E-03	6.41E-03	
20	35	2039	3.80E-04	1826.5	3.40E-04	3.96E-05	7.54E-03	75342	1.16E-03	6.38E-03	

ตาราง ข-12 แอดโซลูบิลิเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโตนคคา  
นอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช  
8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส (ต่อ)

Tube	Alumina (g)	Surf <sub>(in-eq)</sub> (M)	q (mole/g)	q (molecule/nm <sup>2</sup> )	Styrene <sub>(in-eq)</sub> (M)	X <sub>adm</sub>	X <sub>aq</sub>	avg X <sub>adm</sub>	avg X <sub>aq</sub>	K <sub>adm</sub>	log K <sub>adm</sub>
1	0.0099	2.96E-05	1.20E-04	4.64E-01	5.26E-04	0.95	9.92E-06	0.9451	9.93E-06	9.52E+04	4.98
2	0.0101	3.14E-05	1.24E-04	4.83E-01	5.24E-04	0.94	9.95E-06				
3	0.0102	2.96E-05	1.16E-04	4.51E-01	8.95E-04	0.97	1.49E-05	0.9749	1.53E-05	6.37E+04	4.80
4	0.0101	1.57E-05	6.21E-05	2.41E-01	8.50E-04	0.98	1.57E-05				
5	0.0103	3.11E-05	1.21E-04	4.69E-01	1.24E-03	0.98	1.64E-05	0.9803	1.64E-05	5.99E+04	4.78
6	0.0101	1.90E-05	7.54E-05	2.93E-01	1.25E-03	0.98	1.63E-05				
7	0.0102	1.42E-05	5.58E-05	2.17E-01	1.77E-03	0.99	1.86E-05	0.9911	1.87E-05	5.30E+04	4.72
8	0.0104	1.75E-05	6.73E-05	2.61E-01	1.75E-03	0.99	1.88E-05				
9	0.0101	1.89E-05	7.49E-05	2.91E-01	2.72E-03	0.99	2.08E-05	0.9923	2.11E-05	4.71E+04	4.67
10	0.0101	2.30E-05	9.12E-05	3.54E-01	2.69E-03	0.99	2.14E-05				
11	0.0105	5.57E-05	2.12E-04	8.24E-01	3.39E-03	0.98	1.64E-05	0.9883	1.89E-05	5.22E+04	4.72
12	0.0098	2.30E-05	9.38E-05	3.64E-01	3.11E-03	0.99	2.14E-05				
13	0.0099	2.58E-05	1.04E-04	4.05E-01	4.20E-03	0.99	2.14E-05	0.9943	2.16E-05	4.61E+04	4.66
14	0.0101	2.23E-05	8.83E-05	3.43E-01	4.17E-03	0.99	2.18E-05				
15	0.0101	3.45E-05	1.37E-04	5.31E-01	4.87E-03	0.99	2.09E-05	0.9940	2.12E-05	4.70E+04	4.67
16	0.0101	2.38E-05	9.43E-05	3.66E-01	4.84E-03	1.00	2.14E-05				
17	0.0098	2.76E-05	1.13E-04	4.37E-01	5.27E-03	0.99	2.14E-05	0.9916	2.06E-05	4.81E+04	4.68
18	0.0102	6.30E-05	2.47E-04	9.59E-01	5.36E-03	0.99	1.98E-05				
19	0.0100	4.43E-05	1.77E-04	6.88E-01	6.41E-03	0.99	2.02E-05	0.9935	2.05E-05	4.84E+04	4.68
20	0.0101	3.96E-05	1.57E-04	6.09E-01	6.38E-03	0.99	2.08E-05				

K<sub>adm</sub> from slope of isotherm = 4070

log K<sub>adm</sub> = 3.61

ตาราง ข-13 แอคโบลูปีไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสม  
โตนเดคานอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของไซเตียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์  
พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Tube	Ethyl ( $\mu\text{L}$ )	Surf_initial		Surf_equilibrium		Surf <sub>(in-eq)</sub> (M)	Ethyl_ initial	Ethyl_equilibrium		Ethyl <sub>(in-eq)</sub> (M)
		Area	Conc. (M)	Area	Conc. (M)		Conc. (M)	Area	Conc. (M)	
1	3	3103.8	4.28E-04	2888.6	3.98E-04	2.96E-05	5.23E-04	307.1	1.56E-04	3.67E-04
2	3	3103.8	4.28E-04	2974.3	4.10E-04	1.78E-05	5.23E-04	320.7	1.60E-04	3.63E-04
3	5	3103.8	4.28E-04	2897.7	3.99E-04	2.84E-05	8.71E-04	746.5	2.86E-04	5.85E-04
4	5	3103.8	4.28E-04	2955.1	4.07E-04	2.05E-05	8.71E-04	754.1	2.88E-04	5.83E-04
5	6	3103.8	4.28E-04	2886.6	3.98E-04	2.99E-05	1.05E-03	850.1	3.17E-04	7.29E-04
6	6	3103.8	4.28E-04	2932.9	4.04E-04	2.35E-05	1.05E-03	803.5	3.03E-04	7.42E-04
7	9	3103.8	4.28E-04	2909.4	4.01E-04	2.68E-05	1.57E-03	1356.1	4.67E-04	1.10E-03
8	9	3103.8	4.28E-04	2968.4	4.09E-04	1.86E-05	1.57E-03	1441.1	4.93E-04	1.08E-03
9	10	3103.8	4.28E-04	2900	3.99E-04	2.81E-05	1.74E-03	1481.4	5.05E-04	1.24E-03
10	10	3103.8	4.28E-04	2905	4.00E-04	2.74E-05	1.74E-03	1560.3	5.28E-04	1.21E-03
11	11	3103.8	4.28E-04	2904.7	4.00E-04	2.74E-05	1.92E-03	1811.5	6.03E-04	1.31E-03
12	11	3103.8	4.28E-04	2869.8	3.95E-04	3.22E-05	1.92E-03	1585.3	5.35E-04	5.35E-04
13	13	3103.8	4.28E-04	2917.5	4.02E-04	2.57E-05	2.27E-03	1846.9	6.13E-04	1.65E-03
14	13	3103.8	4.28E-04	2931.9	4.04E-04	2.37E-05	2.27E-03	1849.1	6.14E-04	1.65E-03
15	15	3103.8	4.28E-04	2879.7	3.97E-04	3.09E-05	2.61E-03	1899.2	6.29E-04	1.99E-03
16	15	3103.8	4.28E-04	2884	3.97E-04	3.03E-05	2.61E-03	1966.3	6.49E-04	1.97E-03
17	17	3103.8	4.28E-04	2910.1	4.01E-04	2.67E-05	2.96E-03	2099.2	6.88E-04	2.27E-03
18	17	3103.8	4.28E-04	2899.9	3.99E-04	2.81E-05	2.96E-03	2088.6	6.85E-04	2.28E-03

ตาราง ข-13 แอดโซลูชันไอโซเทอรั่มของเอทิลไซโคลเฮกเซนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสม  
โตนคานอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของไซเตียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์  
พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส (ต่อ)

Tube	Alumina (g)	Surf <sub>(in-eq)</sub> (M)	q (mole/g)	q (molecule/nm <sup>2</sup> )	Ethyl <sub>(in-eq)</sub> (M)	X <sub>adm</sub>	X <sub>aq</sub>	avg X <sub>adm</sub>	avg X <sub>aq</sub>	K <sub>adm</sub>	log K <sub>adm</sub>
1	0.0099	2.96E-05	1.20E-04	4.65E-01	3.67E-04	0.93	2.80E-06	0.9392	2.84E-06	3.31E+05	5.52
2	0.0100	1.78E-05	7.13E-05	2.77E-01	3.63E-04	0.95	2.87E-06				
3	0.0099	2.84E-05	1.15E-04	4.45E-01	5.85E-04	0.95	5.15E-06	0.9599	5.17E-06	1.86E+05	5.27
4	0.0100	2.05E-05	8.19E-05	3.18E-01	5.83E-04	0.97	5.19E-06				
5	0.0101	2.99E-05	1.18E-04	4.60E-01	7.29E-04	0.96	5.71E-06	0.9649	5.58E-06	1.73E+05	5.24
6	0.0102	2.35E-05	9.23E-05	3.59E-01	7.42E-04	0.97	5.46E-06				
7	0.0105	2.68E-05	1.02E-04	3.96E-01	1.10E-03	0.98	8.41E-06	0.9796	8.64E-06	1.13E+05	5.05
8	0.0101	1.86E-05	7.39E-05	2.87E-01	1.08E-03	0.98	8.87E-06				
9	0.0099	2.81E-05	1.13E-04	4.40E-01	1.24E-03	0.98	9.08E-06	0.9779	9.29E-06	1.05E+05	5.02
10	0.0100	2.74E-05	1.10E-04	4.25E-01	1.21E-03	0.98	9.51E-06				
11	0.0101	2.74E-05	1.09E-04	4.22E-01	1.31E-03	0.98	1.08E-05	0.9832	1.02E-05	9.60E+04	4.98
12	0.0102	1.85E-05	7.24E-05	2.81E-01	1.38E-03	0.99	9.64E-06				
13	0.0100	2.57E-05	1.03E-04	3.99E-01	1.65E-03	0.98	1.10E-05	0.9853	1.10E-05	8.92E+04	4.95
14	0.0101	2.37E-05	9.38E-05	3.64E-01	1.65E-03	0.99	1.11E-05				
15	0.0102	3.09E-05	1.21E-04	4.70E-01	1.99E-03	0.98	1.13E-05	0.9848	1.15E-05	8.56E+04	4.93
16	0.0101	3.03E-05	1.20E-04	4.66E-01	1.97E-03	0.98	1.17E-05				
17	0.0104	2.67E-05	1.03E-04	3.99E-01	2.27E-03	0.99	1.24E-05	0.9881	1.24E-05	7.99E+04	4.90
18	0.0103	2.81E-05	1.09E-04	4.24E-01	2.28E-03	0.99	1.23E-05				

K<sub>adm</sub> from slope of isotherm = 4734

log K<sub>adm</sub> = 3.68

ตาราง ข-14 โขลูปี้ไลเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิด ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Tube	Styrene ( $\mu\text{L}$ )	Surfactant concentration (M)	Styrene initial (M)	Styrene equilibrium		
				Area	Conc. (M)	Conc. <sub>ave</sub> (M)
1	5	1.00E-05	1.08E-03	61201.3	6.42E-04	6.95E-04
2	5	1.00E-05	1.08E-03	64882.4	7.48E-04	
3	5	3.00E-05	1.08E-03	58872.6	5.82E-04	6.39E-04
4	5	3.00E-05	1.08E-03	63137.5	6.96E-04	
5	5	5.00E-05	1.08E-03	58510.2	5.74E-04	6.07E-04
6	5	5.00E-05	1.08E-03	61106.2	6.39E-04	
7	8	8.00E-05	1.72E-03	75387.2	1.16E-03	1.13E-03
8	8	8.00E-05	1.72E-03	74263.5	1.11E-03	
9	10	1.00E-04	2.15E-03	74777.7	1.13E-03	1.14E-03
10	10	1.00E-04	2.15E-03	75323.2	1.16E-03	
11	10	2.00E-04	2.15E-03	63983.8	7.21E-04	1.15E-03
12	10	2.00E-04	2.15E-03	82714.2	1.57E-03	
13	10	3.00E-04	2.15E-03	78128.5	1.30E-03	1.44E-03
14	10	3.00E-04	2.15E-03	82848.3	1.58E-03	
15	13	5.00E-04	2.80E-03	90468.5	2.17E-03	2.16E-03
16	13	5.00E-04	2.80E-03	90217.7	2.15E-03	
17	13	6.00E-04	2.80E-03	93901.1	2.51E-03	2.55E-03
18	13	6.00E-04	2.80E-03	94759.7	2.60E-03	
19	13	7.00E-04	2.80E-03	90865.1	2.21E-03	2.41E-03
20	13	7.00E-04	2.80E-03	94817.8	2.60E-03	
21	15	8.00E-04	3.23E-03	98752.3	3.07E-03	3.14E-03
22	15	8.00E-04	3.23E-03	99775.7	3.20E-03	
23	18	1.00E-03	3.88E-03	97066.9	2.86E-03	3.08E-03
24	18	1.00E-03	3.88E-03	100443.5	3.29E-03	



ตาราง ข-15 โอลิโกเปปไทด์ของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมบิวทานอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Tube	Styrene ( $\mu\text{L}$ )	Surfactant concentration (M)	Styrene initial (M)	Styrene equilibrium		
				Area	Conc. (M)	Conc. <sub>ave</sub> (M)
1	5	1.00E-05	1.08E-03	62652.9	6.82E-04	6.78E-04
2	5	1.00E-05	1.08E-03	62398.4	6.75E-04	
3	5	3.00E-05	1.08E-03	60975.2	6.36E-04	6.61E-04
4	5	3.00E-05	1.08E-03	62829.1	6.87E-04	
5	8	5.00E-05	1.72E-03	63849.8	7.17E-04	9.82E-04
6	8	5.00E-05	1.72E-03	77148.6	1.25E-03	
7	8	8.00E-05	1.72E-03	74506.4	1.12E-03	1.06E-03
8	8	8.00E-05	1.72E-03	72088.7	1.01E-03	
9	10	1.00E-04	2.15E-03	81973.9	1.53E-03	1.50E-03
10	10	1.00E-04	2.15E-03	81252.9	1.48E-03	
11	10	2.00E-04	2.15E-03	82665.5	1.57E-03	1.56E-03
12	10	2.00E-04	2.15E-03	82270.3	1.54E-03	
13	13	3.00E-04	2.80E-03	90576.8	2.18E-03	2.16E-03
14	13	3.00E-04	2.80E-03	90023.3	2.13E-03	
15	13	5.00E-04	2.80E-03	90810.7	2.20E-03	2.18E-03
16	13	5.00E-04	2.80E-03	90383.8	2.17E-03	
17	15	6.00E-04	3.23E-03	95393.9	2.67E-03	2.65E-03
18	15	6.00E-04	3.23E-03	95153.7	2.64E-03	
19	15	7.00E-04	3.23E-03	90779.3	2.20E-03	2.51E-03
20	15	7.00E-04	3.23E-03	96647.8	2.81E-03	
21	18	8.00E-04	3.88E-03	94955.6	2.62E-03	2.87E-03
22	18	8.00E-04	3.88E-03	99136.9	3.12E-03	
23	18	1.00E-03	3.88E-03	99333.1	3.14E-03	3.17E-03
24	18	1.00E-03	3.88E-03	99720.5	3.20E-03	

ตาราง ข-16 โขลูปีไลเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมออกทานอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Tube	Styrene ( $\mu\text{L}$ )	Surfactant concentration (M)	Styrene initial (M)	Styrene equilibrium		
				Area	Conc. (M)	Conc. <sub>ave</sub> (M)
1	8	1.00E-05	1.72E-03	78540.4	1.32E-03	1.32E-03
2	8	1.00E-05	1.72E-03	78631.7	1.33E-03	
3	8	3.00E-05	1.72E-03	77769.1	1.28E-03	1.25E-03
4	8	3.00E-05	1.72E-03	76522.9	1.22E-03	
5	10	5.00E-05	2.15E-03	84779.9	1.71E-03	1.58E-03
6	10	5.00E-05	2.15E-03	80575.6	1.44E-03	
7	10	8.00E-05	2.15E-03	84791.8	1.72E-03	1.59E-03
8	10	8.00E-05	2.15E-03	81094.4	1.47E-03	
9	12	1.00E-04	2.58E-03	88578.3	2.01E-03	1.70E-03
10	12	1.00E-04	2.58E-03	79923	1.40E-03	
11	12	2.00E-04	2.58E-03	86101.5	1.81E-03	1.95E-03
12	12	2.00E-04	2.58E-03	89512.6	2.09E-03	
13	14	3.00E-04	3.01E-03	90102.2	2.14E-03	2.17E-03
14	14	3.00E-04	3.01E-03	90666.6	2.19E-03	
15	15	5.00E-04	3.23E-03	90743.3	2.20E-03	2.29E-03
16	15	5.00E-04	3.23E-03	92648	2.38E-03	
17	15	6.00E-04	3.23E-03	90481.3	2.17E-03	2.30E-03
18	15	6.00E-04	3.23E-03	93130.6	2.43E-03	
19	16	7.00E-04	3.44E-03	94404.2	2.56E-03	2.58E-03
20	16	7.00E-04	3.44E-03	94745.9	2.60E-03	
21	17	8.00E-04	3.66E-03	95173	2.64E-03	2.63E-03
22	17	8.00E-04	3.66E-03	95003	2.63E-03	
23	18	1.00E-03	3.88E-03	98360.1	3.02E-03	3.25E-03
24	18	1.00E-03	3.88E-03	101842.3	3.49E-03	

ตาราง ข-17 โขลูปีไลเซชันของสไตรีนโดยสารลดแรงตึงผิวชีวภาพแรมโนลิพิดที่ผสมโตนคานอล ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Tube	Styrene ( $\mu\text{L}$ )	Surfactant concentration (M)	Styrene initial (M)	Styrene equilibrium		
				Area	Conc. (M)	Conc. <sub>ave</sub> (M)
1	8	1.00E-05	1.72E-03	76959.1	1.24E-03	1.06E-03
2	8	1.00E-05	1.72E-03	68766	8.80E-04	
3	8	3.00E-05	1.72E-03	73871.9	1.09E-03	1.14E-03
4	8	3.00E-05	1.72E-03	75944.1	1.19E-03	
5	10	5.00E-05	2.15E-03	79175.2	1.36E-03	1.09E-03
6	10	5.00E-05	2.15E-03	67141.3	8.22E-04	
7	10	7.00E-05	2.15E-03	74609.9	1.12E-03	1.12E-03
8	10	7.00E-05	2.15E-03	74644.7	1.12E-03	
9	12	1.00E-04	2.58E-03	82979.7	1.59E-03	1.45E-03
10	12	1.00E-04	2.58E-03	78214.1	1.30E-03	
11	13	2.00E-04	2.80E-03	84058.4	1.66E-03	1.67E-03
12	13	2.00E-04	2.80E-03	84119.9	1.67E-03	
13	14	3.00E-04	3.01E-03	80132.2	1.41E-03	1.58E-03
14	14	3.00E-04	3.01E-03	85262	1.75E-03	
15	15	5.00E-04	3.23E-03	83147.1	1.60E-03	1.99E-03
16	15	5.00E-04	3.23E-03	92673.9	2.38E-03	
17	15	6.00E-04	3.23E-03	81502.1	1.50E-03	1.78E-03
18	15	6.00E-04	3.23E-03	89339.2	2.07E-03	
19	16	7.00E-04	3.44E-03	90918.1	2.21E-03	2.03E-03
20	16	7.00E-04	3.44E-03	86674.3	1.86E-03	
21	17	8.00E-04	3.66E-03	86593.1	1.85E-03	2.17E-03
22	17	8.00E-04	3.66E-03	93756.2	2.49E-03	
23	18	1.00E-03	3.88E-03	94030.8	2.52E-03	2.63E-03
24	18	1.00E-03	3.88E-03	96051.3	2.74E-03	

ตาราง ข-18 โขลูบิไลเซชันของเอทิลไซโคลเฮกเซนโดยสารลดแรงตึงผิวภาพผิวแรมโนลิพิด  
ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 1.0 มิลลิโมลาร์ พีเอช 8.0 – 8.5 อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส

Tube	Ethylcyclohexane ( $\mu\text{L}$ )	Surfactant concentration (M)	Ethylcyclohexane initial (M)	Ethylcyclohexane equilibrium		
				Area	Conc. (M)	Conc. <sub>ave</sub> (M)
1	3	1.00E-05	5.23E-04	646.2	2.56E-04	2.37E-04
2	3	1.00E-05	5.23E-04	513.4	2.17E-04	
3	5	3.00E-05	8.71E-04	1025.5	3.69E-04	3.07E-04
4	5	3.00E-05	8.71E-04	609.3	2.45E-04	
5	7	5.00E-05	1.22E-03	678	2.66E-04	2.77E-04
6	7	5.00E-05	1.22E-03	753.1	2.88E-04	
7	10	8.00E-05	1.74E-03	1249.2	4.36E-04	4.36E-04
8	10	8.00E-05	1.74E-03	1253.1	4.37E-04	
9	12	1.00E-04	2.09E-03	1390.3	4.78E-04	4.88E-04
10	12	1.00E-04	2.09E-03	1460.2	4.98E-04	
11	14	2.00E-04	2.44E-03	1379.1	4.74E-04	4.52E-04
12	14	2.00E-04	2.44E-03	1230.1	4.30E-04	
13	15	3.00E-04	2.61E-03	1443.6	4.93E-04	5.10E-04
14	15	3.00E-04	2.61E-03	1556.3	5.27E-04	
15	17	5.00E-04	2.96E-03	1739.6	5.81E-04	5.78E-04
16	17	5.00E-04	2.96E-03	1720.5	5.76E-04	
17	18	6.00E-04	3.14E-03	1758.4	5.87E-04	6.06E-04
18	18	6.00E-04	3.14E-03	1887.1	6.25E-04	
19	19	7.00E-04	3.31E-03	2392.4	7.75E-04	7.22E-04
20	19	7.00E-04	3.31E-03	2034.4	6.69E-04	
21	20	8.00E-04	3.48E-03	2567	8.27E-04	7.77E-04
22	20	8.00E-04	3.48E-03	2227.3	7.26E-04	
23	22	1.00E-03	3.83E-03	2880.5	9.20E-04	8.47E-04
24	22	1.00E-03	3.83E-03	2389.4	7.74E-04	

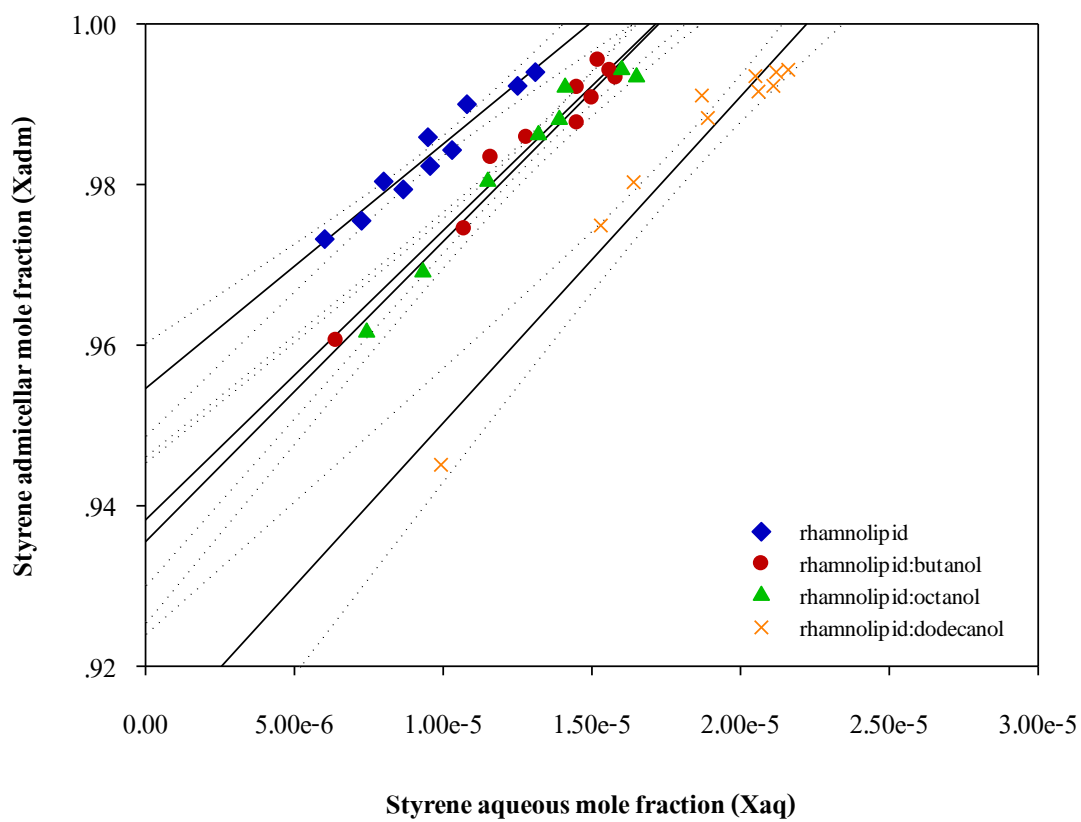
ตาราง ข-19 การสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ  
แรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์

Tube	Surfactant	Surf_conc. (M)	Initial		Equilibrium		Alumina (g)	$C_{in} - C_{eq}$ (M)	Sol. (ml)	q (mmol/g)	$q_{ave}$ (mmol/g)
			Area	Conc. (M)	Area	Conc. (M)					
1	Rhamnolid	6.65E-04	7769.5	6.51E-04	7565.6	6.36E-04	0.0104	1.51E-05	40	0.06	0.09
2	Rhamnolid	6.65E-04	7769.5	6.51E-04	7299.5	6.16E-04	0.0105	3.49E-05	40	0.13	
3	Rhamnolid	6.65E-04	7769.5	6.51E-04	7500.1	6.31E-04	0.0102	2.00E-05	40	0.08	
4	Rhamnolipid:butanol	4.75E-04	4464.8	4.87E-04	4248.9	4.67E-04	0.0102	2.03E-05	40	0.08	0.08
5	Rhamnolipid:butanol	4.75E-04	4464.8	4.87E-04	4223.1	4.64E-04	0.0098	2.27E-05	40	0.09	
6	Rhamnolipid:butanol	4.75E-04	4464.8	4.87E-04	4278	4.70E-04	0.0101	1.76E-05	40	0.07	
7	Rhamnolipid:octanol	5.70E-04	7087.5	5.40E-04	6476.1	4.97E-04	0.0103	4.34E-05	40	0.17	0.19
8	Rhamnolipid:octanol	5.70E-04	7087.5	5.40E-04	6475.6	4.97E-04	0.0102	4.35E-05	40	0.17	
9	Rhamnolipid:octanol	5.70E-04	7087.5	5.40E-04	6290.2	4.84E-04	0.0100	5.66E-05	40	0.23	
10	Rhamnolipid:dodecanol	3.80E-04	4178.2	3.03E-04	3848.4	2.80E-04	0.0102	2.23E-05	40	0.09	0.10
11	Rhamnolipid:dodecanol	3.80E-04	4178.2	3.03E-04	3879	2.82E-04	0.0101	2.02E-05	40	0.08	
12	Rhamnolipid:dodecanol	3.80E-04	4178.2	3.03E-04	3709.4	2.71E-04	0.0102	3.17E-05	40	0.12	

ตาราง ข-19 การสูญเสียสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ  
แรมโนลิพิดที่ผสมและไม่ผสมโมเลกุลลิงเกอร์ (ต่อ)

Tube	Surfactant	Surfactant concentration (M)									
		Wash (Time)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Rhamnolid	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2	Rhamnolid	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
3	Rhamnolid	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
4	Rhamnolipid:butanol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
5	Rhamnolipid:butanol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
6	Rhamnolipid:butanol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
7	Rhamnolipid:octanol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
8	Rhamnolipid:octanol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
9	Rhamnolipid:octanol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10	Rhamnolipid:dodecanol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
11	Rhamnolipid:dodecanol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
12	Rhamnolipid:dodecanol	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND : *not detected* or less than detection limit



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจุฑานันท์ คำแพง เกิดเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY