

การกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วย  
วิธีทางกายภาพและเคมี

**Grease and Oil Removal from Biodiesel Production Process Wastewater by  
Physico - Chemical Method**

เอนก สภาวะอินทร์

**Aneak Sawain**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Environmental Engineering  
Prince of Songkla University**

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

๑

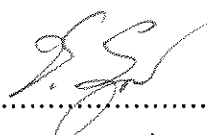
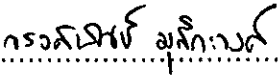
เลขที่	TD 758.5.037 ๑๗3 2552 ๑.2
Unit Key	316895
	17 ก.พ. 2553


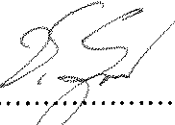
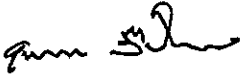
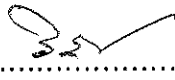
(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์                    การกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วย  
     วิธีทางกายภาพและเคมี

ผู้เขียน                                นายเอนก สวาอินทร์

สาขาวิชา                            วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

<p>อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก</p> <p>.....              (ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)</p>	<p>คณะกรรมการสอบ</p> <p>.....              ประธานกรรมการ            (ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์)</p>
--	--

<p>อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม</p> <p>.....              (รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมผล พีชนิไพบลุย์)</p>	<p>.....กรรมการ            (รองศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ทองลิ้มปี่)</p> <p>.....กรรมการ              (ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)</p> <p>.....กรรมการ              (รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมผล พีชนิไพบลุย์)</p> <p>.....กรรมการ              (ดร.วีรัช ทวีปรีดา)</p>
---	--

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม

.....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)  
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีทางกายภาพและเคมี
ผู้เขียน	นายเอนก สวาทอินทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2552

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดขั้นต้นในการกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลให้ได้มากที่สุด โดยใช้วิธีการทางกายภาพ คือ กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ และวิธีการทางเคมี คือ วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอน เนื่องจากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมีไขมันและน้ำมันปริมาณมากกว่า 7,000 mg/L จึงเป็นสาเหตุหลักทำให้น้ำเสียมีความสกปรกในรูปค่าซีโอดีและบีโอดีสูง อย่างไรก็ตามผลการศึกษาการใช้กระบวนการตะกอนลอยบำบัดน้ำเสียโดยตรง พบว่ามีประสิทธิภาพต่ำมากและไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพอิมัลชันของน้ำเสียได้

สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด คือ กรดไฮโดรคลอริก (1 N HCl) และกรดซัลฟิวริก (1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) เพื่อปรับค่าพีเอชให้ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 3 มีผลทำให้ไขมันและน้ำมันเกิดการรวมตัวและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้มาก และระยะเวลาที่กักหนานานขึ้นมีผลให้ไขมันและน้ำมันเกิดการรวมตัวและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้มากขึ้น โดยที่ระยะเวลาที่กักหนาท่อกับ 3 วัน สามารถกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียได้มากกว่าร้อยละ 80

นอกจากนี้การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและเพิ่มทางเลือกสำหรับการบำบัดน้ำเสีย ผลจากการทดสอบพบว่า การควบคุมค่าพีเอชระหว่างการทำโคแอกกูเลชันของสารช่วยรวมตะกอนมีผลต่อการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันอย่างมาก โดยช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของสารช่วยรวมตะกอน คือ การเติมสารส้ม และเฟอรริกคลอไรด์ มีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5 – 7 โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6 – 7 ส่วนการทดสอบใช้น้ำทะเล พบว่าสามารถใช้เป็นสารช่วยรวมตะกอนได้ แต่มีผลให้ค่าของแข็งละลายของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดมีค่าสูง สำหรับการทดสอบใช้สารช่วยรวมตะกอนประเภทสารอินทรีย์คือ โคลโคซาน และเฟอรริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine พบว่าโคลโคซานมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6 – 7 และ เฟอรริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine มีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง

6 – 8 โดยค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการเติมสารส้ม เพอร์ริกคลอไรด์ และ โพลีอะลูมิเนียม-คลอไรด์มีค่าความเข้มข้นมากกว่าและเท่ากับ 1.0 g/L น้ำทะเลที่ค่าความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 50 โดยปริมาตร ไคโตซานมีค่าความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 6 โดยปริมาตร และการเติมเพอร์ริกคลอไรด์ (0.5 g/L) ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine พบว่าต้องใช้ Quaternary cationic polyamine ที่ค่าความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 0.05 โดยปริมาตร โดยประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของทุกสารช่วยรวมตะกอนที่สภาวะดังกล่าวมากกว่าร้อยละ 95

จากผลการทดลองใช้วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด พบปัญหาของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าพีเอชต่ำและยังคงมีปริมาณไขมันและน้ำมันเหลืออยู่มาก ส่วนการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันต้องใช้สารช่วยรวมตะกอนปริมาณมาก งานวิจัยนี้จึงศึกษาใช้วิธีการและกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั้งสองร่วมกับกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ ผลการทดสอบใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันต่ำและอาจมีผลทำให้เกิดปัญหาที่ครื่องมืออุปกรณ์ที่เป็นโลหะได้ ดังนั้นจึงศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตะกอนลอยร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและกระบวนการโคแอกกูเลชัน เนื่องจากการใช้วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดช่วยลดปริมาณไขมันและน้ำมันในน้ำเสีย ทำให้ปริมาณการใช้สารส้มลดลงต่ำกว่า 250 mg/L แต่พบว่ามีตะกอนไขมันและน้ำมันในน้ำมากกว่า 150 mg/L หลังจากกระบวนการโคแอกกูเลชันซึ่งไม่สามารถลอยหรือตกจมได้ จึงต้องใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศกำจัดตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นดังกล่าว และพบว่าระบบ *Full-stream Pressurization* ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเนื่องจากตะกอนไขมันและน้ำมันเปราะและแตกง่าย ส่วนระบบ *Recycle-stream Pressurization* พบว่ามีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเมื่อใช้ค่าความดันในถังอัดความดันเท่ากับ 4 bar gauge ระยะเวลาพักในถังอัดความดันเท่ากับ 4 นาที และที่ค่าอัตราส่วนการ *Recycle (R)* เท่ากับร้อยละ 20 และ 40 ของน้ำเข้าสามารถกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียได้สูงถึงร้อยละ 98 – 99.6 แต่ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชันมีผลต่อค่าอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณตะกอน (A/S Ratio) และจะต้องควบคุมค่า A/S ให้อยู่ในช่วง 0.005 – 0.060 โดยค่าอัตราส่วนการ *Recycle*



**Thesis Title** Grease and Oil Removal from Biodiesel Production Process Wastewater  
by Physico - Chemical Method

**Author** Mr. Aneak Sawain

**Major Program** Environmental Engineering

**Academic Year** 2009

### ABSTRACT

The biodiesel wastewater contains high concentration of grease and oil, higher than 7,000 mg/L. The grease and oil are organic substances and they are the main cause of high COD and BOD<sub>5</sub> existed in the biodiesel wastewater.

Therefore this study aimed to investigate the efficiency of physical method, Dissolved Air Flotation (DAF), and chemical methods, acidification and coagulation, for pretreatment the biodiesel wastewater in objective of grease & oil removal. The result of study was found that DAF could not change emulsion form of the wastewater therefore it has low efficiency for treatment the wastewater.

For the result of acidification using 1 N HCl and 1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, it was found that either HCl or H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> could conduct a coalescence of oil droplet in wastewater. When the pH was adjusted to equal and lower than 3, the coalescence of oil droplet occurred well and the increase of oil droplet coalescence made more grease & oil removed by flotation to the water surface. The increase of retention time also increased a coalescence of oil droplet. At 3 days of retention time, grease & oil in the wastewater could be removed more than 80 %.

In addition, this research studied the wastewater treatment by coagulation for comparing with acidification. The result was found that the pH control during coagulation, using coagulant was strongly affected on a flocculation of grease & oil. The optimal pH depended on coagulant type. The optimal pH for alum and ferric chloride were in rang of 5 – 7 whereas the optimal pH for poly aluminium chloride was in rang of 6 – 7. The optimum concentration of these inorganic salt coagulants was more than 1.0 g/L. Seawater could be also used as a coagulant for this wastewater coagulation but it yielded high concentration of total dissolved solid in the effluence. For the result of coagulation with organic coagulant, it showed the optimal pH for

chitosan use was in rang of 6 – 7 whereas the use of ferric chloride (0.5 g/L) with quaternary cationic polyamine showed the optimal pH was in rang 6 – 8. The optimum concentration of chitosan and quaternary cationic polyamine was more than 6.0 % (v/v) and 0.05 % (v/v) respectively. At this condition, the grease & oil removal efficiency of all coagulant obtained was more than 95 %.

To investigate an alternative treatment method from acidification that had a problem of strong acid effluent and coagulant process that use high chemical quantity, the studies of these processes combined with DAF to treat the wastewater were conducted. The combination of acidification and DAF was found that it did not appropriate therefore the use of three methods combination, acidification, coagulation and DAF was determined. When grease & oil contaminated in this wastewater was firstly removed by acidification then the alum quantity required in coagulation process decreased to lower than 250 mg/L. However, more than 150 mg/L of oily sludge that still suspended in wastewater sample after coagulation was removed by DAF. But the full – stream pressurization was not appropriate to be used in this case because the oily sludge was weak and broken easily. The recycle – stream pressurization was found as an appropriate system to remove oily sludge. The use of 4 bar gauge of pressure, 4 minutes of retention time and recycle rate by 20 % and 40 % of influent could remove grease & oil from the wastewater by 98 – 99.6 %. In addition the sludge from coagulation process had an effect on Air/Solid ratio (A/S) used. The appropriate A/S ratio found was 0.005 – 0.060 that could obtain by recycle rate control.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ.ดร.อุดมผล พิชนันท์ไพบูลย์ และ ดร.วิรัช ทวีปรีดา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.ธันวดี เตชะภักทวรกุล สุขสาโรจน์ และคณะกรรมการทุกท่าน ที่กรุณาให้โอกาส ให้ความรู้ ให้ คำปรึกษา คำแนะนำในการค้นคว้าวิจัยและความรู้ด้านอื่นๆ ตลอดจนช่วยเหลือไขข้อบกพร่องต่างๆ เป็นผลให้การทำวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว. – อุตสาหกรรม (MAG Window I: MRG - WI515E122) และคณะวิศวกรรมศาสตร์ (ทุนพัฒนานักวิจัย ENG-51-2-7-01-0010-S) และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย โรงงานสกัดน้ำมันพืชและผลิตไบโอดีเซลครบวงจร (มูลนิธิชัยพัฒนา) อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี ที่ได้ให้ความร่วมมือและให้ข้อมูลต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ พี่ๆ เจ้าหน้าที่สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์ม และพี่น้ำมัน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในการอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียสำหรับใช้ในการทดลอง และให้ข้อมูลความรู้เกี่ยวกับการผลิตไบโอดีเซล และข้อมูลอื่นๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้ และให้คำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อรอบ สาวะอินทร์ และคุณแม่เพิ่ม สาวะอินทร์ อย่างหาที่เปรียบมิได้ ที่คอยให้ความรัก ความห่วงใย และเป็นแรงกายแรงใจเสมอมา ตลอดจนให้การสนับสนุนเงินทุนจนสำเร็จการศึกษา

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ นักศึกษาปริญญาโท และปริญญาตรี ที่ได้เป็นกำลังใจให้กันเสมอมา ตลอดจน พี่ๆ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือด้านงานเอกสาร ขอมอบคุณความดี และประโยชน์ทั้งหลายที่เกิดจากการทำวิจัยนี้ แต่ทุกท่านที่มีส่วนร่วมทำให้งานวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ไปด้วยดี

เอนก สาวะอินทร์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพ	(15)
บทที่	
1. บทนำ	1
บทนำค้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	3
วัตถุประสงค์	51
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	51
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	52
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	64
4. สรุปผลการทดลอง	122
ข้อเสนอแนะ	124
เอกสารอ้างอิง	125
ภาคผนวก	139
ประวัติผู้เขียน	181

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
1	เปรียบเทียบสมบัติระหว่างน้ำมันดีเซลกับไบโอดีเซล	5
2	โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันและเมทิลเอสเทอร์	7
3	ลักษณะสมบัติของกรดไขมันและเมทิลเอสเทอร์	8
4	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล	15
5	การจำแนกระบบอนุภาคคอลลอยด์แบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำดีและน้ำเสีย	23
6	ค่าพีเอชที่มีผลทำให้ประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์บางชนิดที่พบในน้ำธรรมชาติเป็นศูนย์	28
7	พอลิเมอร์สังเคราะห์บางชนิดที่ใช้งานในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ	41
8	ลักษณะสมบัติและการละลายของอากาศในน้ำ	48
9	การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการทางชีววิทยา	49
10	การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมันและมีสภาพเป็นอิมัลชันด้วยวิธีทางกายภาพและเคมี	50
11	พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์	54
12	ค่าความเข้มข้นของการเติมสารช่วยรวมตะกอนสำหรับการทดสอบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล โดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน	57
13	ค่าความดันและระยะเวลาที่กักพักสำหรับการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ	59
14	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่ศึกษา	65
15	ค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีของวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด	75
16	ค่าไขมันและน้ำมันและค่าซีโอดีคิงเหลือในน้ำเสียและประสิทธิภาพการกำจัดของวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด	76
17	ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน	86
18	ช่วงค่าพีเอชสำหรับการควบคุมระหว่างการทำโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนชนิดต่างๆ และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล	101

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
19	ค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีของกระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนชนิดต่างๆ	101
20	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดโดยกระบวนการตะกอนลอยแบบอ็อกอากาศร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและกระบวนการ โคแอกกูเลชัน	113
21	ปริมาณตะกอน ไชมันและน้ำมันจากการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตะกอนลอยแบบอ็อกอากาศร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและกระบวนการ โคแอกกูเลชัน	114
22	ค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีของการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอ็อกอากาศร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและกระบวนการ โคแอกกูเลชัน	114
23	ข้อดีข้อด้อยของวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด กระบวนการ โคแอกกูเลชันและกระบวนการตะกอนลอยแบบอ็อกอากาศ สำหรับบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล	115
24	คำแนะนำจากการทดลองเทียบกับค่าออกแบบทั่วไปสำหรับการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล	116
<b>ตารางภาคผนวก</b>		
ข 1	ลักษณะน้ำเสียจากการผลิตไบ โอดีเซลที่ศึกษา	147
ข 2	ค่าพีเอช ความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้าของน้ำเสียจากการผลิตไบ โอดีเซล	147
ค 1	ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบปรับค่าพีเอชด้วยกรด	149
ค 2	ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดี (mg/L) ของการทดสอบปรับค่าพีเอชด้วยกรด	149
ค 3	ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบปรับค่าพีเอชด้วยกรด	150
ค 4	ปริมาณกรด (mL/L) สำหรับปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบ โอดีเซลที่ค่าต่างๆ	150
ค 5	ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบระยะเวลาพักหลังปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบ โอดีเซลด้วยกรดเท่ากับ 3	150

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางภาคผนวก	หน้า
ก 6 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดี (mg/L) ของการทดสอบระยะเวลาพักหลังปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกรดเท่ากับ 3	151
ก 7 ปริมาณไขมันและน้ำมันที่เกิดจากการใช้วิธีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกรดเท่ากับ 3	151
ก 8 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้าของการทดสอบปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก	152
ง 1 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม	154
ง 2 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	154
ง 3 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์	155
ง 4 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเล	155
ง 5 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมโคโคซานเป็นโคแอกกูแลนท์	155
ง 6 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine	156
ง 7 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดี (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม	156
ง 8 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดี (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	157
ง 9 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดี (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์	157

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางภาคผนวก	หน้า
ง 10 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดี (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชัน ด้วยการเติมโคโคซานเป็นโคแอกกูแลนท์	157
ง 11 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดี (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชัน ด้วยการเติมเพอร์ริคคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine	158
ง 12 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบ กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม	158
ง 13 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบ กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	159
ง 14 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบ กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเพอร์ริคคลอไรด์	159
ง 15 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบ กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมโคโคซานเป็นโคแอกกูแลนท์	160
ง 16 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบ กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเพอร์ริคคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine	160
ง 17 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (NTU) ของการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชัน ด้วยการเติมสารส้ม	160
ง 18 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (NTU) ของการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชัน ด้วยการเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	161
ง 19 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (NTU) ของการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชัน ด้วยการเติมเพอร์ริคคลอไรด์	161
ง 20 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (NTU) ของการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชัน ด้วยการเติมน้ำทะเล	161
ง 21 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (NTU) ของการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชัน ด้วยการเติมโคโคซานเป็นโคแอกกูแลนท์	162
ง 22 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (NTU) ของการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชัน ด้วยการเติมเพอร์ริคคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine	162



## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางภาคผนวก	หน้า
ง 23 ปริมาณอะลูมิเนียมและเหล็กในน้ำหลังการทดสอบกระบวนการ โคลแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก	162
ง 24 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนไขมันและน้ำมันของการทดสอบกระบวนการ โคลแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออนินทรีย์และสารอินทรีย์	163
ง 25 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้าของการใช้กระบวนการ โคลแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม	164
ง 26 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้าของการใช้กระบวนการ โคลแอกกูเลชันด้วยการเติม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์	165
ง 27 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้าของการใช้กระบวนการ โคลแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์	166
ง 28 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้าของการใช้กระบวนการ โคลแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเล	167
ง 29 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้าของการใช้กระบวนการ โคลแอกกูเลชันด้วยการเติมโคโคซานเป็น โคลแอกกูแลนต์	167
ง 30 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้าของการใช้กระบวนการ โคลแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine	168
ง 31 ปริมาณ 1 N KOH (mL/L) สำหรับปรับค่าพีเอชของการใช้กระบวนการ โคลแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก	168
ง 32 ปริมาณ 1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mL/L) สำหรับปรับค่าพีเอชของการใช้กระบวนการ โคลแอกกูเลชันด้วยการเติมสารโคโคซานเป็น โคลแอกกูแลนต์	169
ง 33 ปริมาณ 1 N KOH (mL/L) สำหรับปรับค่าพีเอชของการใช้กระบวนการ โคลแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine	169
จ 1 ผลการเปลี่ยนแปลงออกซิเจนละลายที่ความดันต่างๆ ของชุดทดลอง Dissolved Air Flotation Test Apparatus	171

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางภาคผนวก	หน้า
จ 2 การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อตะกอน (Air to Solids Ratio หรือ A/S Ratio) ของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยด้วยอัตราหมุนเวียนน้ำกลับเพื่ออัดอากาศร้อยละ 20 ของน้ำเข้า	172
จ 3 การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อตะกอน (Air to Solids Ratio หรือ A/S Ratio) ของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยด้วยอัตราหมุนเวียนน้ำกลับเพื่ออัดอากาศร้อยละ 40 ของน้ำเข้า	172
จ 4 การคำนวณอัตราตะกอนลอยของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยด้วยอัตราหมุนเวียนน้ำกลับเพื่ออัดอากาศร้อยละ 20 ของน้ำเข้า	174
จ 5 การคำนวณอัตราตะกอนลอยของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยด้วยอัตราหมุนเวียนน้ำกลับเพื่ออัดอากาศร้อยละ 40 ของน้ำเข้า	175
จ 6 ผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำเสียของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ Recycle 20 % ครั้งที่ 1	176
จ 7 ผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำเสียของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ Recycle 20 % ครั้งที่ 2	176
จ 8 ผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำเสียของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ Recycle 40 % ครั้งที่ 1	177
จ 9 ผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำเสียของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ Recycle 40 % ครั้งที่ 2	177
จ 10 ปริมาณตะกอนไขมันและน้ำมันของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอย	177
จ 11 ปริมาณความต้องการสารเคมีสำหรับปรับค่าพีเอชของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้มก่อนการทดลองระบบตะกอนลอยแบบอัดอากาศ	178

## รายการภาพ

ภาพที่	หน้า
1	4
แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) จากน้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันพืชใช้แล้วและของเสียที่เกิดขึ้น	
2	7
โครงสร้างทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์ กลีเซอรอล กรดไขมัน และเมทิลเอสเทอร์	
3	13
แผนภาพกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของอุตสาหกรรมขนาดเล็ก	
4	16
โครงสร้างทางเคมีทั่วไปของสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล	
5	18
โครงสร้างไมเซลล์ (Micelle) (a) การรวมตัวกันเป็นแกนน้ำมัน (Micelle core) และ (b) การเกิดพันธะระหว่างส่วนหัว (Hydrophilic head) ของโมเลกุลสบู่ (Surfactant) ของไมเซลล์กับน้ำ	
6	19
ที่มาของประจุไฟฟ้าของอนุภาคดินเหนียว	
7	20
การแตกตัวเป็นไอออนของอนุภาคโปรตีน	
8	22
แผนภาพแสดง Electrical double layer บริเวณพื้นผิวร่วมระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับน้ำ (Solid-liquid interface)	
9	24
ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับอนุภาคคอลลอยด์	
10	27
การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta potential) บนผิวอนุภาคคอลลอยด์ (a) เติมสารประกอบที่มีประจุต่างกัน (b) ลักษณะเฉพาะของการคอลลิดผิวด้วยประจุที่ต่างกัน (c) การเปลี่ยนค่า pH ที่มีต่อประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์	
11	31
พอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging)	
12	33
การแยกประเภทการปนเปื้อนน้ำมันในน้ำตามขนาดหยดน้ำมันและวิธีการบำบัด	
13	38
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสารประกอบไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมที่ละลายในน้ำ ณ ค่าพีเอชต่างๆ	
14	38
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสารประกอบไฮดรอกไซด์ของเหล็กที่ละลายในน้ำ ณ ค่าพีเอชต่างๆ	
15	44
ระบบการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ (Dissolved Air Flotation, DAF)	
16	55
เครื่องทดสอบจาร์เทส ผลิตภัณฑ์ PHIPPS & BIRD™	
17	56
แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด	

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการ โคลแอกกูเลชัน	57
19	ชุดทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ (Dissolved Air Flotation Test Apparatus)	58
20	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการตะกอนลอยร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด	60
21	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการตะกอนลอยร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและกระบวนการ โคลแอกกูเลชัน	61
22	น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล	64
23	ลักษณะน้ำเสียหลังการปรับค่าพีเอชด้วยกรดเท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 (กรดไฮโดรคลอริก 1 N HCl; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	67
24	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 20 เท่า แสดงพฤติกรรมรวมตัวของหยดน้ำมันในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล เมื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลลดลงเท่ากับ 7, 5, 3 และ 1 (กรดไฮโดรคลอริก 1 N HCl; กรดซัลฟิวริก 1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	69
25	การเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมันของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลหลังผ่านการปรับค่าพีเอชด้วยกรดเท่ากับ 1, 3, 5, และ 7 (ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง; C <sub>0</sub> คือค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน ของน้ำเสียเริ่มต้น; C คือค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน ณ ค่าพีเอชต่างๆ)	71
26	การเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน และค่าซีไอของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลหลังผ่านการปรับค่าพีเอชด้วยกรดเท่ากับ 1, 3, 5, และ 7 (ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง; C <sub>0</sub> คือค่าไขมันและน้ำมันและค่าซีไอของน้ำเสียเริ่มต้น; C คือค่าไขมันและน้ำมันและค่าซีไอ ณ ค่าพีเอชต่างๆ)	71
27	การทดสอบหาระยะเวลากักพัก (Retention time) ของวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด (กรดไฮโดรคลอริก 1 N HCl; ปรับพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 3)	73

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
28	73
การเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันและน้ำมันที่ระยะเวลาพักต่างๆ หลังผ่านการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลเท่ากับ 3 (เติม 1 N HCl)	
29	74
ปริมาณการเติมกรดไฮโดรคลอริก (1 N HCl) และ กรดซัลฟิวริก (1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) สำหรับปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล	
30	75
ไขมันและน้ำมันที่ได้จากวิธีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกรด (A, B, C คือ จุดแยกระหว่างชั้นไขมันกับชั้นน้ำมัน)	
31	79
ผลของค่าพีเอชของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กต่อประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน (ความเข้มข้นของสารช่วยรวมตะกอนเท่ากับ 1.5 g/L; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
32	80
ปริมาณการเติมสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (1 N KOH) สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก	
33	82
การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก (ความเข้มข้นของสารช่วยรวมตะกอน 0.5 – 2.5 g/L; pH = 6; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
34	83
ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน และสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้มที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ (ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
35	83
ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน และสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ (ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
36	84
ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน และสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ (ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
37	84
ค่าความขุ่นของน้ำหลังผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก (ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
38	86
ตะกอนไขมันและน้ำมันจากการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 20 เท่า)	
39	90
การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมไคโตซาน (ไคโตซาน 2 – 10 % (v/v); ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง; พีเอชเท่ากับ 7)	
40	90
ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันและสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมไคโตซานที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
41	91
ตะกอนไขมันและน้ำมันจากการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมไคโตซาน (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 20 เท่า)	
42	92
ปริมาณการเติมกรดไฮโดรคลอริก ( $1 \text{ N H}_2\text{SO}_4$ ) สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมไคโตซาน (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7)	
43	94
การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเล (น้ำทะเล 10 – 50% (v/v); ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
44	94
ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเล ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ (Salinity = 30.7 ppt; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
45	95
ตะกอนไขมันและน้ำมันจากการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเล (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 20 เท่า)	
46	97
การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine ( $\text{FeCl}_3 = 0.5 \text{ g/L}$ ; ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
47	ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันและสารอินทรีย์ในรูปค่าซีไอดีของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine ( $\text{FeCl}_3 = 0.5 \text{ g/L}$ ; ความคุมพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	98
48	ตะกอนไขมันและน้ำมันจากการบำบัดน้ำเสียการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 20 เท่า)	98
49	ปริมาณการเติมสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (1 N KOH) สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine ( $\text{FeCl}_3 = 0.5 \text{ g/L}$ ; ความคุมพีเอชเท่ากับ 7)	99
50	ผลระยะเวลาพักต่อค่าออกซิเจนละลาย ที่ค่าความดันในถังอัดอากาศต่างๆ (อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ $32.5^\circ\text{C}$ )	103
51	การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้มหลังการทำ Acidification และแยกไขมันและน้ำมันส่วนบนออกแล้ว (ความเข้มข้นของสารส้มเท่ากับ $250 \text{ mg/L}$ ; พีเอชเท่ากับ 6 ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	106
52	การเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมันของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม หลังการทำ Acidification และแยกไขมันและน้ำมันส่วนบนออกแล้ว (ความคุมพีเอชเท่ากับ 6; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง; FOG หมายถึง Fat, Oil และ Grease)	107
53	ตะกอนไขมันและน้ำมันต่อค่า A/S Ratio ของการใช้กระบวนการตะกอนลอย ที่ค่าการ Recycle ร้อยละ 20 และ 40	109
54	ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ ที่ค่าการ Recycle ร้อยละ 20 และ 40	111
55	ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปค่าซีไอดีของการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ ที่ค่าการ Recycle ร้อยละ 20 และ 40	112

## รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
56	112
ค่าตะกอนไขมันและน้ำมันคงเหลือในน้ำส่วนล่างหลังผ่านกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศด้วยระบบ <i>Recycle-stream Pressurization</i>	
57	117
ระบบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขั้นต้นสำหรับโรงงานขนาดเล็กหรือชุมชน	
58	119
ระบบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขั้นต้นสำหรับโรงงานขนาดกลาง	
59	120
ระบบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขั้นต้นสำหรับโรงงานขนาดใหญ่	
<b>ภาพภาคผนวก</b>	
ก 1	141
ลักษณะน้ำเสียหลังการปรับค่าพีเอชด้วยกรดเท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 (กรดไฮโดรคลอริก 1 N HCl; ซัลฟูริก 1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
ก 2	142
การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้สารส้ม (สารส้ม 0.5 – 2.5 g/L; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
ก 3	143
การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 0.5 – 2.5 g/L; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
ก 4	144
การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ (เฟอร์ริกคลอไรด์ 0.5 – 2.5 g/L; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
ก 5	144
การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้สารส้มก่อนการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ (สารส้ม 50 – 250 mg/L; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)	
ก 6	145
การทดสอบระยะเวลาพักสำหรับถังลอยตะกอน (Flotation Cell)	
ฉ 1	180
ผลอัตราส่วนการ Recycle ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศกับน้ำเสียหลังผ่านวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด	



## บทที่ 1

### บทนำ

#### บทนำต้นเรื่อง

ปัจจุบันการศึกษาวิจัยการพัฒนาพลังงานทดแทนมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากน้ำมันที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมมีปริมาณลดลง ทำให้มีราคาสูงขึ้น น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อภาคอุตสาหกรรมและการขนส่ง ภาวะราคาน้ำมันปิโตรเลียมสูงขึ้นอย่างมาส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นและกระทบต่อการพัฒนาของประเทศ แหล่งปิโตรเลียมที่มีอย่างจำกัดและจำเป็นต้องสำรวจและขุดเจาะเพิ่มขึ้นด้วย เทคโนโลยีที่ทันสมัยมากขึ้น แนวโน้มราคาน้ำมันจึงสูงขึ้นเรื่อย ๆ (ชวลิต งามจรุสศรีวิชัย, 2551) จากวิกฤติการณ์ด้านราคาน้ำมันปิโตรเลียมที่เกิดขึ้น ทำให้หลายประเทศหาแนวทางพัฒนาพลังงานทดแทนอื่นเพื่อลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ไบโอดีเซลจัดเป็นพลังงานที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมได้เป็นอย่างดี (ฐิติมน ชะคารัตน์, 2552) และได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีคุณลักษณะคล้ายกับน้ำมันดีเซลที่ได้จากปิโตรเลียม (Ramadhass *et al.*, 2004a) โดยในปัจจุบันไบโอดีเซลนิยมผลิตด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (กู๋จันท์ จันท์ทองอ่อน, 2549; ชาคริต ทองอุไร และคณะ, 2544; สุวภัทร์ อภัยสุวรรณ และ มานพ เจริญไชยตระกูล, 2551) อย่างไรก็ตามการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันก่อเกิดของเสียซึ่งแบ่งได้เป็นสองส่วน ส่วนแรก คือกลีเซอรินที่เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งถูกแยกออกจากถังปฏิกิริยาและขายให้กับอุตสาหกรรมอื่นเพื่อนำไปทำให้บริสุทธิ์ โดยอุตสาหกรรมที่มีการใช้กลีเซอรินบริสุทธิ์เป็นวัตถุดิบ ได้แก่ อุตสาหกรรมยา อาหาร บูหรี วัตถุประสงค์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ (กิตติยา อัสภาชน์, 2545) ส่วนที่สอง คือน้ำเสียจากการใช้น้ำในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลหลังจากทำการถ่ายกลีเซอรินออกจากถังปฏิกิริยาเรียบร้อยแล้ว การล้างไบโอดีเซลมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสบู่ และสารตั้งต้นอื่นๆ ที่เหลือเนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ (ชาคริต ทองอุไร และคณะ, 2544; วิศรุต ประยูรคำ และคณะ, 2551) ทำให้น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณไขมันและน้ำมัน ซีโอลี บีโอลี สูง (จารุวรรณี เรืองคง และคณะ, 2551) ผลจากการปนเปื้อนสารอินทรีย์สูงและมีแหล่งไนโตรเจนน้อย ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลจึงยากต่อการบำบัดโดยวิธีการทางชีวภาพ (Biological treatment)

เพราะองค์ประกอบของน้ำเสียไม่เหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Microbial) นอกจากนี้บางอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลขนาดเล็ก (Small – Scale plants) การเดินระบบเพื่อผลิตไบโอดีเซลโดยองค์กรที่ไม่หวังผลกำไร (Nonprofit organization (NPOs) หรือกลุ่มชาวบ้าน จึงทำให้การผลิตไบโอดีเซลไม่มีเทคนิค หรือทักษะในการเดินระบบการผลิตไบโอดีเซลที่ดี ดังนั้นในมุมมองของการรักษาสิ่งแวดล้อมจึงควรมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล เพราะน้ำเสียดังกล่าวบำบัดได้ยากมาก (Suchara *et al.*, 2005) ถ้าหากขาดการจัดการและการบำบัดที่เหมาะสมแล้วน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ (วิศรุต ประยูรคำ และคณะ, 2551; จารุวรรณี เรื่องคง และคณะ, 2551)

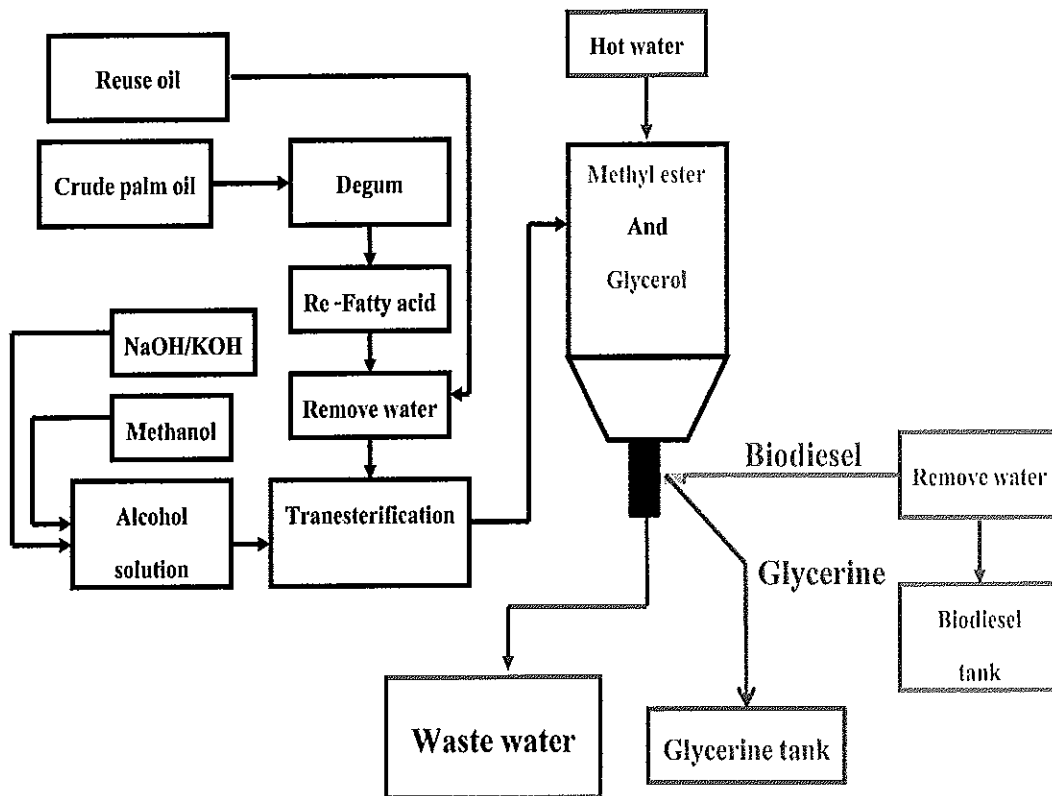
ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลจำเป็นต้องมีวิธีการบำบัดที่จำเพาะแตกต่างจากการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอื่น ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาหาวิธีการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล ด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียตามหลักวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โดยใช้วิธีทางกายภาพและเคมี (Physico – Chemical) ในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลในขั้นต้น (Pretreatment) โดยมุ่งเน้นกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียให้ได้มากที่สุด เพื่อง่ายต่อการนำกลับมาใช้ประโยชน์หรือบำบัดต่อไป ซึ่งเป็นการป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะสิ่งแวดล้อมของแหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการจัดการน้ำเสียและเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งแนวโน้มมีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นในอนาคต

## การตรวจเอกสาร

### 1. ไบโอดีเซล

“เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Esters)” หรือเป็นที่รู้จักทั่วไปคือ “ไบโอดีเซล (Biodiesel)” เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งของเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์และต้องการตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมักใช้เบสแก่ โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า “ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification)” (Gerpen, 2005) ตัวอย่าง เช่น สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ (ภาพที่ 1) และโรงงานสกัดน้ำมันพืชและผลิตไบโอดีเซลครบวงจร (มูลนิธิชัยพัฒนา) อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี มีขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยเน้นการใช้น้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้วและน้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล (ชาคริต ทองอุไร และคณะ, 2544) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ขจัดยางเหนียวและลดกรด (กรณีน้ำมันปาล์มดิบ) นำน้ำมันปาล์มดิบใส่ในถังลดกรดไขมันอิสระ ให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำมันปาล์มดิบให้อยู่ในช่วง 80 – 85 องศาเซลเซียส ใส่โซดาไฟ และเข้กกรดไขมันอิสระให้เหลือไม่เกิน 1%
2. ขจัดน้ำออก โดยให้ความร้อนกับน้ำมัน (น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันใช้แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 1 %) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ประมาณ 20 นาที
3. ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน น้ำมันที่ถูกขจัดน้ำออกแล้ว จะถูกทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมเมทานอลและ โซดาไฟ ทิ้งไว้ประมาณ 3 – 4 ชั่วโมง
4. ถ่ายกลีเซอริน กลีเซอรอลจะแยกตัวจากน้ำมัน โดยจะอยู่ที่ก้นถัง ถ่ายกลีเซอรินใส่ภาชนะที่ตั้งทิ้งไว้ เมื่อเย็นตัวลงจะแข็งตัวเป็นของแข็ง
5. การล้างสิ่งปนเปื้อนออก ล้างด้วยน้ำอุ่นหลายครั้ง ซึ่งการล้างครั้งแรกกระทำโดยการพ่นละอองน้ำลงด้านบนของถังเพื่อให้หยดน้ำเล็กๆ พาสั่งปนเปื้อนตกลงด้านล่างของถัง
6. การขจัดน้ำออกครั้งสุดท้าย โดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 20 นาที เป็นการขจัดน้ำที่หลงเหลือในชั้นเมทิลเอสเทอร์
7. ถ่ายน้ำมันดิบในภาชนะ ถ่ายน้ำมันที่ผ่านการขจัดน้ำออกครั้งสุดท้ายหลังจากที่ตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลง บรรจุน้ำมันดีเซล เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จะมีค่าต่างๆ ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) จากน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันพืชใช้แล้วและของเสียที่เกิดขึ้น

ที่มา : ดัดแปลงจาก ชาคริต ทองอุไร และคณะ (2544)

การเปรียบเทียบสมบัติเชิงเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากน้ำมันทอดที่ใช้แล้วกับมาตรฐานน้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลที่กำหนดไว้แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมทิลเอสเทอร์มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาก มีความหนืดที่สูงกว่าเล็กน้อย ความหนาแน่นที่อยู่ในระดับเดียวกัน ช่วงจุดเดือดในช่วงเดียวกัน ค่าจุดวาบไฟที่สูงกว่า ซึ่งทำให้มีความปลอดภัยในการเก็บรักษาที่ดีกว่า เมทิลเอสเทอร์มีค่าซีเทนที่สูงกว่า โดยค่าซีเทนที่สูงจะทำให้ค่า Ignition delay สั้น ทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่สะสมในห้องเผาไหม้ลดลงก่อนการลุกติดไฟ ทำให้สามารถควบคุมการเผาไหม้ได้ดีขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เพิ่มสูงขึ้น แต่จุดไหลเทและจุดขุ่นของเมทิลเอสเทอร์จะสูงกว่าน้ำมันดีเซลมาก ดังนั้นจึงมีอุปสรรคในการใช้ที่อุณหภูมิต่ำ (ชาคริต ทองอุไร และคณะ, 2544)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบสมบัติระหว่างน้ำมันดีเซลกับไบโอดีเซล

Standard Test	ASTM D975	ASTM PS121	Thai Regulation	
Fuel	Diesel Fuel	Biodiesel	High Speed Diesel	Methyl Ester from Used Frying Oil
Major Substance	Hydrocarbon C10 – C21	Fatty Acid Methyl Ester C12 – C22		Fatty Acid Methyl Ester C14 – C18
Higher Heating Value, MJ/kg	-	-	44.3	38.6
Kinematic Viscosity, cSt @ 40°C	1.3 – 4.1	1.9 – 6.0	1.8 – 4.1	6.0
Specific gravity, kg/l @ 60°C	0.85	0.88	0.81 – 0.87	0.86
Water Content, ppm by wt.	161	0.05%max	0.05%max	-
Carbon, wt%	87	77	-	76.75 (cal.)
Hydrogen, wt%	13	12	-	12.12 (cal.)
Oxygen, wt%	0	11	-	11.13 (cal.)
Sulfur, wt%	0.05 max	0	0.05 max	-
Boiling Point Range, °C	188 – 343	182 – 338	-	170 – 359
Flash Point, °C	>52	100 – 170	>52	172
Cloud Point, °C	-15 to 5	-3 to 12	-	5
Pour Point, °C	-35 to -15	-15 to 6	<10	3
Cetane Number	>47	-	>47	60

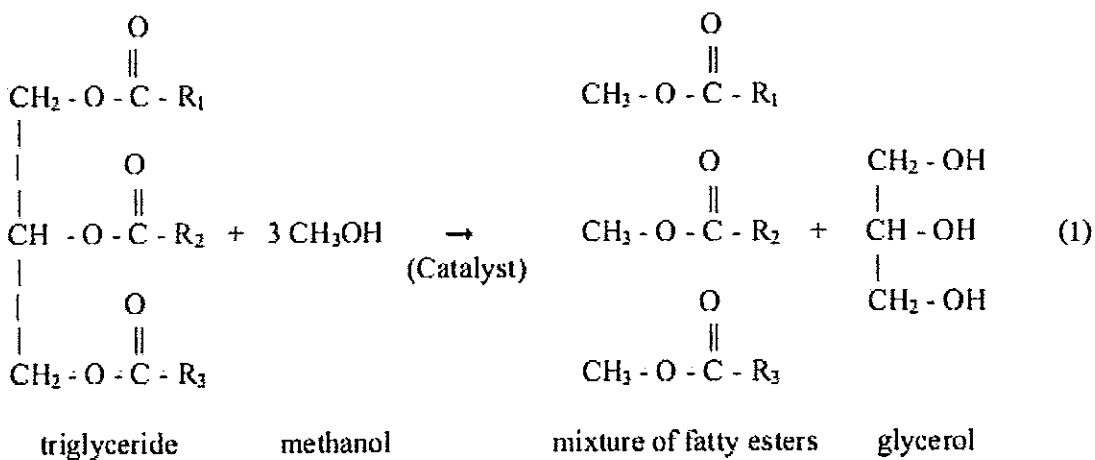
ที่มา: ชากริต ทองอุไร และคณะ (2544)

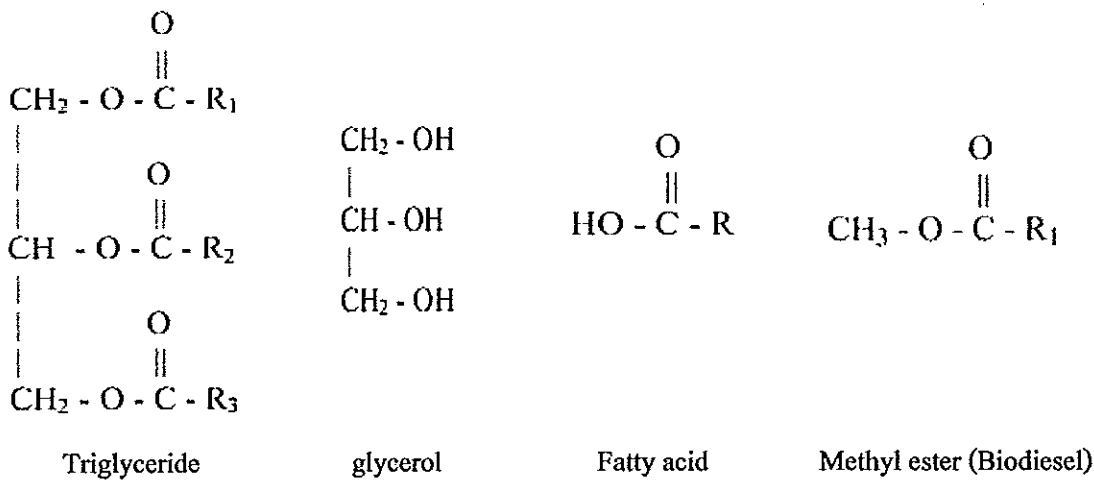
### 1.1 ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลนอกจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันที่เป็นปฏิกิริยาหลักสำหรับการผลิตไบโอดีเซลดังกล่าวแล้ว ยังมีปฏิกิริยาอื่นๆที่เกี่ยวข้องและสำคัญต่อการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน รวมถึงคุณภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolyzes) ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ (Saponification) และปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) (Gerpen, 2005) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1.1.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (สมการที่ 1) มีวัตถุประสงค์คือ น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ (Vegetable oil, Animal fats), แอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล (Methanol) หรือเอทานอล (Ethanol) และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารเร่งปฏิกริยา โดยที่น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่มีส่วนประกอบหลักคือไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งประกอบขึ้นจากโครงสร้างโมเลกุลของ กลีเซอรอล (Glycerol) กับโซ่กรดไขมัน (Long-chain fatty acid (R)) (ภาพที่ 2) ผลลัพธ์ของปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันคือ เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Esters) (ไบโอดีเซล) และกลีเซอรอล (Gerpen *et al.*, 2004) โดยสัญลักษณ์ R แทน โซ่ยาวของคาร์บอนและไฮโดรเจนอะตอมของกรดไขมัน ซึ่งจำนวนคาร์บอนและไฮโดรเจนอะตอมขึ้นอยู่กับชนิดของกรดไขมัน ตารางที่ 2 แสดงโครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันและเมทิลเอสเทอร์ ตารางที่ 3 แสดงลักษณะสมบัติของกรดไขมันและเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากกรดไขมันชนิดนั้นๆ





ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์ กลีเซอรอล กรดไขมัน และเมทิลเอสเทอร์

ที่มา : Gerpen *et al.* (2004)

ตารางที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันและเมทิลเอสเทอร์

Fatty acid (trivial name/ rational name);	Structure <sup>a)</sup>	Common acronym	Methyl ester (trivial name/ rational name)
Palmitic acid / Hexadecanoic acid	$\text{R}-(\text{CH}_2)_{14}-\text{CH}_3$	C16:0	Methyl palmitate/ Methyl hexadecanoate
Stearic acid / Octadecanoic acid	$\text{R}-(\text{CH}_2)_{16}-\text{CH}_3$	C18:0	Methyl stearate/ Methyl octadecanoate
Oleic acid /9 (Z)- Octadecenoic acid;	$\text{R}-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}_3$	C18:1	Methyl oleate / Methyl 9(Z)-octadecenoate
Linolenic acid / 9(Z),12(Z)- Octadecadienoic acid;	$\text{R}-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}_3$	C18:2	Methyl linolenate / Methyl 9 (Z),12(Z)- octadecadienoate
Linolenic acid / 9(Z),12(Z), 15(Z)- Octadecatrienoic acid;	$\text{R}-(\text{CH}_2)_7-(\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2)_2-\text{CH}_3$	C18:3	Methyl linolenate / Methyl 9 (Z),12(Z), 15(Z)- octadecadienoate

R = COOH (CO<sub>2</sub>H) or COOCH<sub>3</sub> (CO<sub>2</sub>H); (CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>=CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>; etc.

ที่มา : Gerpen *et al.* (2004)

### ตารางที่ 3 ลักษณะสมบัติของกรดไขมันและเมทิลเอสเทอร์

Fatty acid	Formula	Molecular weight	Melting point (°C)
<b>Methyl ester</b>			
Palmitic acid /	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	256.428	63 – 64
Methyl pamitate	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	270.457	30.5
Stearic acid	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	284.481	70
Methyl stearate	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	298.511	39
Oleic acid	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	282.465	16
Methyl oleate	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	296.495	-20
Linolec acid	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	280.450	-5
Methyl linoleate	C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	294.479	-35
Linolenic acid	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	278.434	-11
Methyl linolenate	C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	292.463	-52 / -57

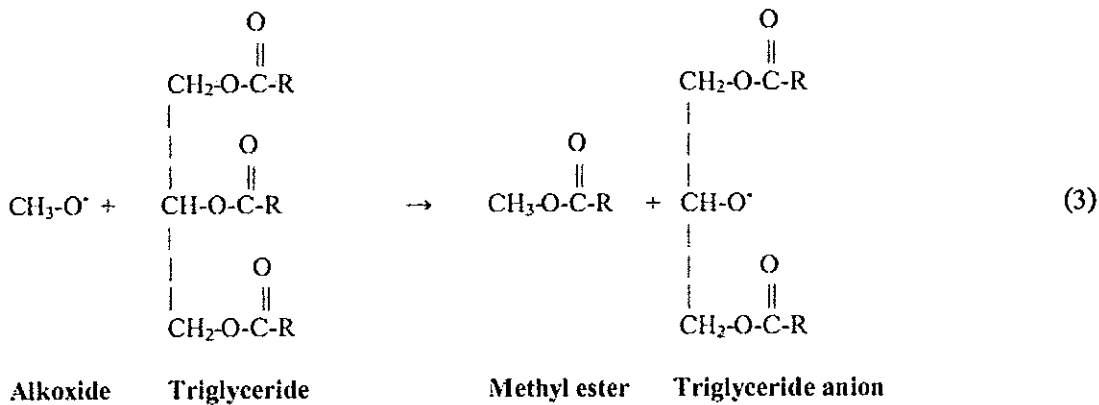
ที่มา : Gerpen *et al.* (2004)

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน มีขั้นตอนการผลิตเริ่มต้นคือการเตรียมสารละลายแอลกอฮอล์ (ผสมสารเร่งปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์) ตัวอย่างของการเตรียมสารละลายแอลกอฮอล์กรณีใช้เมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ และใช้สารเร่งปฏิกิริยา คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงปฏิกิริยาดังสมการที่ (2) (Gerpen *et al.*, 2004) ซึ่งจะได้ CH<sub>3</sub>ONa และ น้ำ เป็นผลิตภัณฑ์

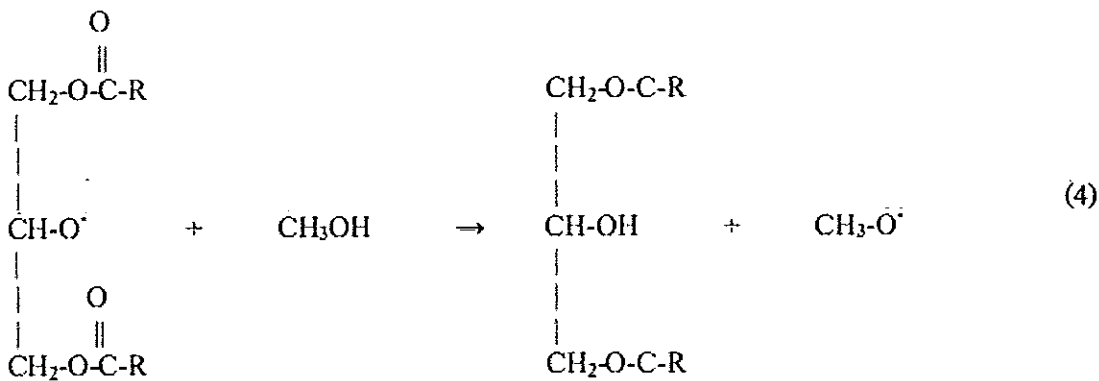


CH<sub>3</sub>ONa ประกอบด้วยหมู่ CH<sub>3</sub>O<sup>-</sup> (Alkoxide; Alkylate) และ Na<sup>+</sup> เมื่อเติมผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสมการที่ (2) ซึ่งเป็นสารละลายแอลกอฮอล์เข้าทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่าง CH<sub>3</sub>O<sup>-</sup> แสดงดังสมการที่ (3) (Gerpen *et al.*, 2004)





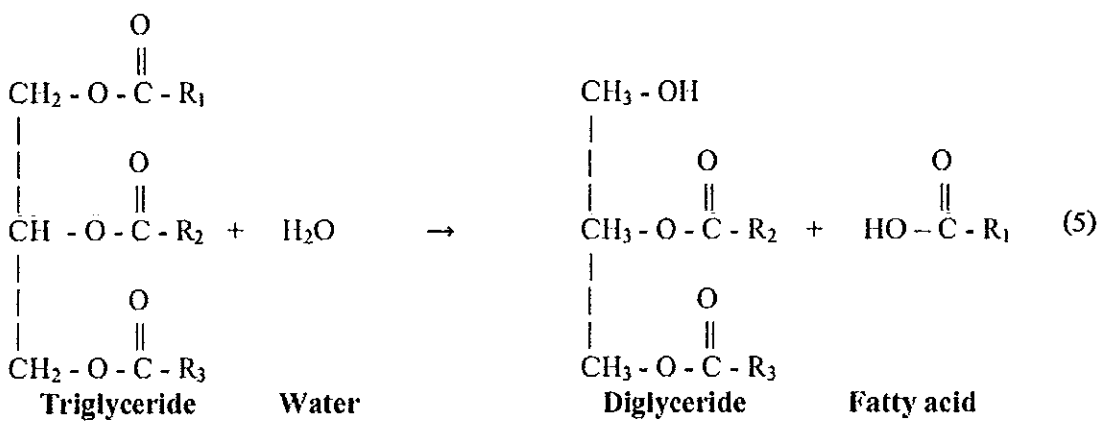
เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยานี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ โมเลกุลของเมทิลเอสเทอร์ (ไบ โอดีเซล) และไอออนลบของ ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride anion) ซึ่งต้องการ โปรตอน ( $\text{H}^+$ ) เพื่อให้โมเลกุลมีเสถียรภาพ ซึ่งถ้า โปรตอนได้มาจากเมทานอลจะทำให้ได้  $\text{CH}_3\text{O}^\ominus$  กลับคืนมาแสดงดังสมการที่ (4) (Gerpen *et al.*, 2004)



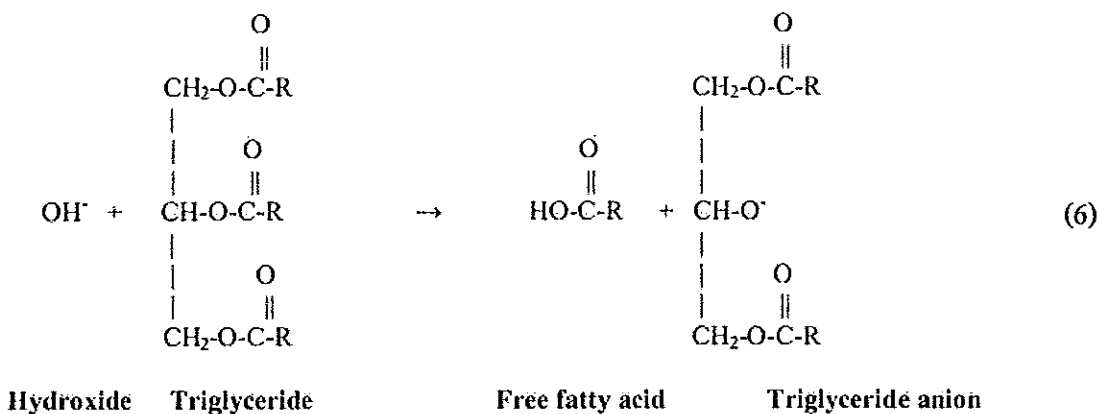
เมื่อปฏิกิริยาทั้ง (3) และ (4) สิ้นสุดลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือเมทิลเอสเทอร์ และกลีเซอรอล แต่ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน มักเกิดปฏิกิริยาอื่นร่วมด้วย คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาการเกิดสบู่ จึงอาจกล่าวได้ว่าเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Gerpen *et al.*, 2004) แสดงรายละเอียดของปฏิกิริยาดังกล่าว ดังต่อไปนี้

### 1.1.2 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

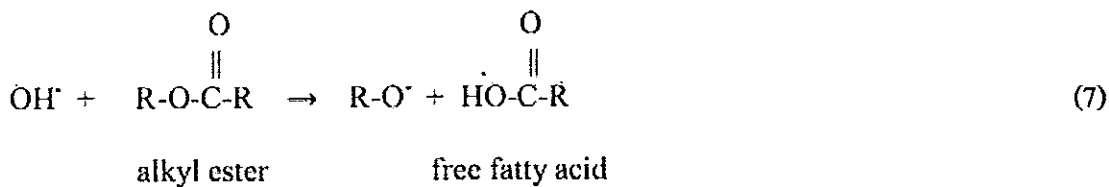
การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolyzes) ระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับน้ำ (สมการที่ (5)) เป็นผลจากการปนเปื้อนน้ำในน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล หรือน้ำที่เกิดจากการเตรียมสารละลายแอลกอฮอล์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสคือกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) หรือบางครั้งอาจเรียกว่ากรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) (Gerpen *et al.*, 2004) โดยมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



จากสมการที่ (3) จะเห็นว่าไตรกลีเซอไรด์สามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ได้ ดังนั้นไตรกลีเซอไรด์จึงสามารถทำปฏิกิริยาน้ำในรูปของ  $\text{OH}^-$  เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ แสดงดังสมการ (6)

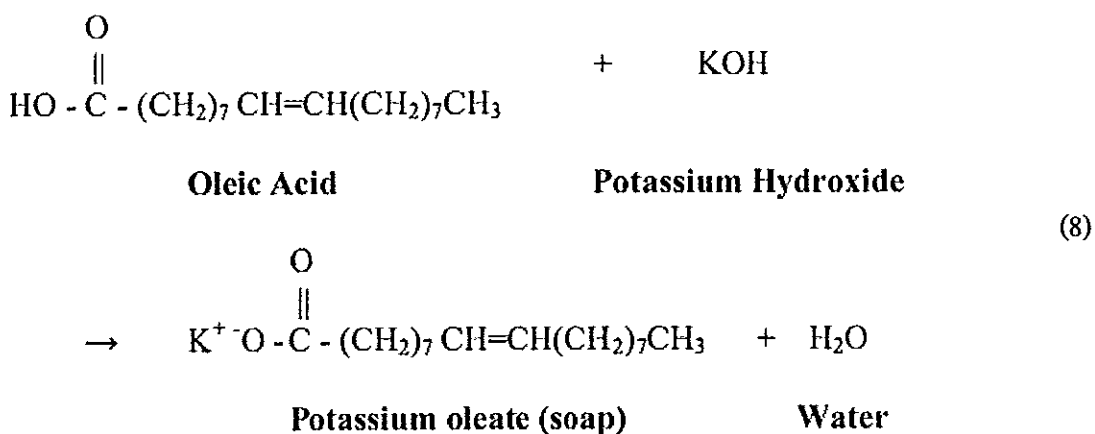


นอกจากนี้การเกิดกรดไขมันอิสระยังสามารถเกิดจากเมทิลเอสเทอร์ได้ด้วย เกิดขึ้นจากการแทนหมู่ไฮโดรคาร์บอน (R) ด้วยหมู่ OH<sup>-</sup> แสดงดังสมการที่ 7 ซึ่งมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตเกิดการสูญเสียผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ส่วนหนึ่งไปด้วย



### 1.1.3 ปฏิริยาการเกิดสบู่

ปฏิริยาการเกิดสบู่ “Saponification” เกิดขึ้นเมื่อมีการปนเปื้อนกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล และจากการใช้สารเร่งปฏิริยาชนิดต่างคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นผลให้เกิดปฏิริยาข้างเคียง คือปฏิริยาการเกิดสบู่ สมการที่ (8) แสดงปฏิริยาการเกิดสบู่เมื่อใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิริยา (Gerpen *et al.*, 2004)



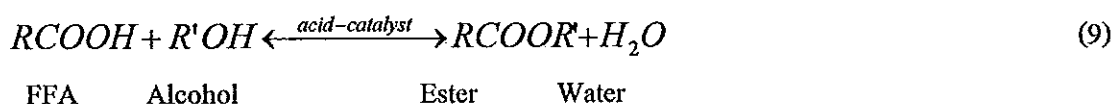
อย่างไรก็ตามปฏิริยาการเกิดสบู่มีอัตราการเกิดปฏิริยาช้ากว่าปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเนื่องจาก CH<sub>3</sub>-O<sup>-</sup> เป็นเบสแก่มากกว่า OH<sup>-</sup> แต่หากน้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมีน้ำปนเปื้อนหรือใช้สารเร่งปฏิริยามากเกินไปจะเป็นผลให้เกิดสบู่ปริมาณมากขึ้นเช่นกัน ปฏิริยาการเกิดสบู่เป็นปฏิริยาที่ไม่พึงปรารถนาเพราะจะขัดขวางปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในการ

ผลิตไบโอดีเซล สบู่ที่เกิดขึ้นและปนเปื้อนอยู่ในเมทิลเอสเทอร์สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีการล้างด้วยน้ำสะอาด อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลหากตรวจสอบพบว่าน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีปริมาณกรดไขมันปนเปื้อนมากกว่าร้อยละ 2 จะทำการลดกรดไขมันอิสระโดยการใช้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Gerpen *et al.*, 2004) แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1.1.4 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

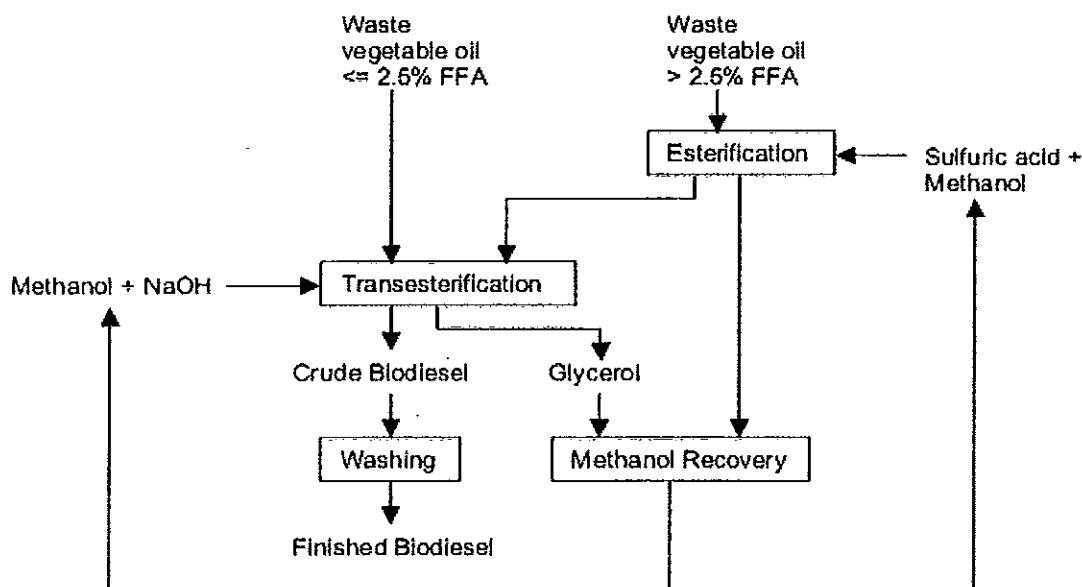
ปัจจุบันต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลยังมีมูลค่าสูง เนื่องจากในกระบวนการผลิตใช้วัตถุดิบเป็นน้ำมันทั่วไปที่ใช้บริโภค (Eatable grade) ร่วมกับการใช้น้ำมันคุณภาพต่ำที่มีการปนเปื้อนกรดไขมันสูง (Chongkhong *et al.*, 2007) ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลแบบ Two – step process จึงถูกเสนอขึ้น (Ramadhas *et al.*, 2004b; WMRC, 2006; Chongkhong *et al.*, 2007) โดยขั้นตอนแรกเป็นการลดกรดไขมันที่ปนเปื้อนในน้ำมันด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) โดยเป็นการเตรียมน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบก่อนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ขั้นตอนที่สองคือการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Wang *et al.*, 2006; Chongkhong *et al.*, 2007; Caetano *et al.*, 2009)

เนื่องจากในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยค่าจําเป็นต้องควบคุมปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบน้ำมันให้ต่ำกว่าร้อยละ 2 ซึ่งโดยทั่วไปจะลดให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 1 (Gerpen *et al.*, 2004) ดังนั้นในกระบวนการที่ใช้วัตถุดิบราคาถูกและมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง เช่น ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันพืชใช้แล้ว (Hanh *et al.*, 2009) จําเป็นต้องมีขั้นตอนการกำจัดกรดไขมันอิสระออก โดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันพืชด้วยแอลกอฮอล์ และมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งนิยมใช้กรดซัลฟิวริก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันคือเอสเทอร์และน้ำ แสดงสมการที่ (9) (สุวรรณ อภัยสุวรรณ และมานพ เจริญไชยตระกูล, 2551; Gerpen *et al.*, 2004)



ปัจจุบันการศึกษาสถานะที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาการผลิตไบโอดีเซลแบบ Two – step process มีเพิ่มมากขึ้น (Minami, 2006; Wang *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2009) โดยศึกษาการใช้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเพื่อลดปริมาณกรดไขมันในน้ำมันที่ปนเปื้อนกรดไขมันสูง (ลลิตา บุรีรักษ์

และคณะ, 2550; Ni *et al.*, 2007; Marchetti *et al.*, 2008) เช่น การใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันลดปริมาณกรดไขมันที่ปนเปื้อนในน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้ว (waste cooking oil) (Ozbay *et al.*, 2008) น้ำมันปาล์มดิบ (ชินินทร์ จินตนาวงศ์ และคณะ, 2550; Yajaroen *et al.*, 2009) น้ำมันจากดอกทานตะวัน (Berrios *et al.*, 2007) เป็นต้น ในขั้นตอนการลดกรดไขมันด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยทั่วไปใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันสูงเช่นเดียวกับปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชัน เนื่องจากปฏิกิริยานี้มีน้ำเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม จึงจำเป็นต้องแยกน้ำออกโดยการระเหย การปล่อยให้แยกชั้น หรือการปั่นเหวี่ยง เพื่อกำจัดน้ำก่อนนำเอสเทอร์และไตรกลีเซอไรด์ที่ได้ผ่านเข้าสู่การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต่อไป (Gerpen *et al.*, 2004)



ภาพที่ 3 แผนภาพกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

ที่มา: Waste Management and Research Center (WMRC) (2006)

Waste Management and Research Center (WMRC) (2006) แนะนำให้อุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลขนาดเล็ก (Small Scale Biodiesel Production) ใช้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบ Two – step process (ภาพที่ 3) โดยน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่า 2.5 % จะต้องทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบปกติ เพื่อป้องกันปฏิกิริยาการเกิดสบูระหว่างการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลขนาดเล็กมักใช้น้ำมันที่ผ่านการใช้

แล้วที่มีปริมาณกรดไขมันมากกว่า 2.5 % เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ร่วมกับน้ำมันพืชที่มีปริมาณกรดไขมันน้อยกว่า 2.5 % (น้ำมันทั่วไปที่ใช้บริโภค (Eatable grade))

เมื่อเสร็จสิ้นปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน และทำการถ่ายกลีเซอรินที่แยกชั้นอยู่บริเวณด้านล่างของถังปฏิกิริยาออก จะเป็นขั้นตอนของการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำสะอาด เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนและสารตั้งต้นที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา ดังนั้นการล้างไบโอดีเซลจึงก่อให้เกิดน้ำเสียขึ้นในกระบวนการผลิต ซึ่งน้ำเสียที่ออกจากรับรองขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลมีลักษณะแตกต่างจากน้ำเสียอุตสาหกรรมอื่นๆ แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

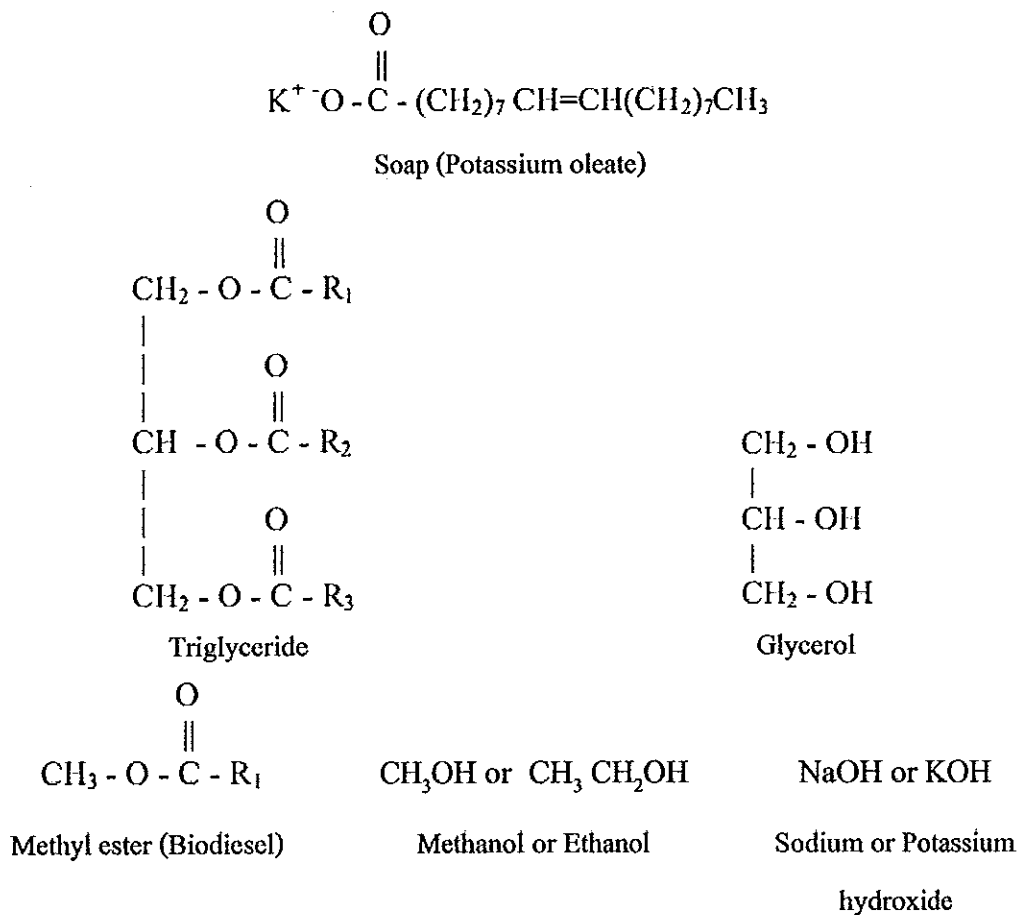
## 1.2 น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เกิดขึ้นจากขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน เช่น สบู่ และสารตั้งต้นอื่นๆที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ (ชาคริต ทองอุไร และคณะ, 2544; วิศรุต ประยูรคำ และคณะ, 2551) ซึ่งโดยปกติใช้น้ำล้างในอัตราส่วนระหว่างน้ำสะอาดต่อปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลในอัตราส่วน 1 : 1 โดยปริมาตร (น้ำล้าง:ผลผลิตไบโอดีเซล = 1:1) ดังนั้นปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะเท่ากับปริมาณการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลปนเปื้อนไขมันและน้ำมันปริมาณมาก เป็นผลให้ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่า ซีโอดี บีโอดี สูง (คารินทร์ ภูกิ่งงาม และคณะ, 2551; จารุวรรณี เรืองคง และคณะ, 2551) ผลจากการปนเปื้อนสารอินทรีย์สูงประกอบกับมีแหล่งไนโตรเจนน้อย ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ เป็นสาเหตุให้น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลยากต่อการบำบัดโดยวิธีชีวภาพ (Biological treatment) เพราะองค์ประกอบของน้ำเสียไม่เหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Microbial) (Suchara *et al.*, 2005) อีกทั้งผลจากการใช้ด่าง (NaOH หรือ KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชสูง สำหรับลักษณะน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลจากผู้ที่เคยทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

พารามิเตอร์	ค่าจากการวิเคราะห์
pH	8.40 – 8.59
COD (mg/L)	175,000 – 545,000
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	105,000 – 300,000
Total Solid (mg/L)	15,750 – 49,050
Suspended Solid (mg/L)	10,224 – 28,790
Grease & Oil (mg/L)	37,580 – 44,330
Volatize Fatty Acid (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	200 – 400
Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	350 – 550
Nitrogen (mg/L)	268 – 420
Methanol (mg/L)	7,690 – 7,940
ที่มา: จารุวรรณี เรืองคง และคณะ (2551)	
pH	8.4
COD (mg/L)	63,200
Suspended Solid (mg/L)	690
Grease & Oil (mg/L)	3,155
Methanol (mg/L)	11,000
Glycerol (mg/L)	1,373
Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	330
ที่มา: คารินทร์ กู้กิ่งงาม และคณะ (2551)	
pH	11
Grease & Oil (mg/L)	15,100
Carbon (mg/L)	14,800
Nitrogen (mg/L)	64.7
C/N ratio	229
Solid content (mg/L)	2,670
ที่มา: Suehara <i>et al.</i> (2005)	

น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมีสภาพเป็นอิมัลชัน (Emulsion) โดยมีสาเหตุของการเกิดสภาพอิมัลชัน คือ การปนเปื้อนสบู่ที่เกิดจากปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (Gerpen *et al.*, 2004) สบู่เป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) สามารถรวมตัวกับไขมันและน้ำมันกลายเป็นโครงสร้างที่เรียกว่าไมเซลล์ (Micelle) (Wade, 2003; Jones, 2005) สารดังกล่าวสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำ เกิดการตกจมหรือลอยแยกออกจากน้ำได้ยาก เป็นผลทำให้น้ำเสียมีสภาพเป็นอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (Oil in Water, O/W) (Zaki, 1997; Ichikawa *et al.*, 2006; Calderon and Schmitt, 2008) โครงสร้างทางเคมีทั่วไปของสารต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลแสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีทั่วไปของสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

ที่มา: Gerpen *et al.* (2004)



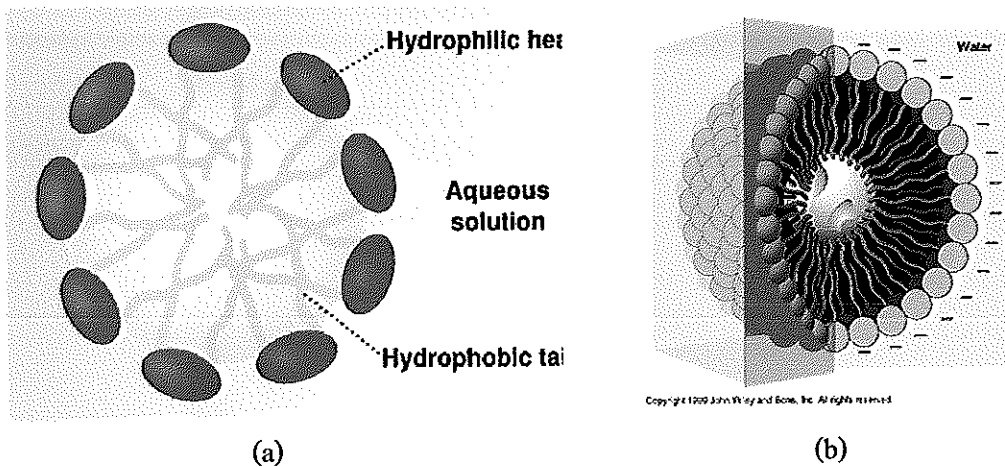
## 2. ไมเซลล์

การเกิดสภาพอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (Oil in Water, O/W Emulsion) ของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล เป็นผลจากการปนเปื้อนสบู่ (Soap) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ชนิดหนึ่ง และไขมันและน้ำมันที่หลุดลอกออกมาระหว่างการล้าง เนื่องจากสบู่มีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยส่วนหัว (Head) ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอกซิล (-COO) และส่วนหาง (Tail) ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, R) ซึ่งปรากฏการณ์ทั่วไปที่พบเห็นในชีวิตประจำวันของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับสบู่ คือการอาบน้ำหรือการใช้สบู่ในการทำความสะอาดขนาน้ำมันบนภาชนะต่างๆ (Wade, 2003; Jones, 2005) จากการทบทวนเอกสารพบว่า การก่อรูปของไมเซลล์ (Micelle formation) ที่เกิดขึ้นในน้ำ (ภาพที่ 5) อาจสรุปและสามารถจำแนกตามลักษณะการปนเปื้อนของอนุภาคหยคน้ำมันในน้ำเสียได้เป็น 2 กรณี แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 น้ำปนเปื้อนอนุภาคหยคน้ำมัน เป็นผลให้ไมเซลล์ (Micelle) ก่อรูปขึ้นโดยส่วนหางของโมเลกุลสบู่ (Hydrophobic tail) รวมตัวกับหยคน้ำมันกลายเป็นแกนน้ำมัน (Micelle core) ของโครงสร้างไมเซลล์และเป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว ส่วนหัวของโมเลกุลสบู่ (Hydrophilic head) จะอยู่บริเวณโดยรอบแกนน้ำมันและสร้างพันธะกับน้ำ เป็นผลให้แขวนลอยอยู่ในน้ำได้

กรณีที่ 2 ไมเซลล์ (Micelle) ก่อรูปขึ้นจากโมเลกุลของสบู่เพียงอย่างเดียว โดยส่วนหางของโมเลกุลสบู่ (Hydrophobic tail) จะรวมตัวกันเองจนกลายเป็นแกนน้ำมัน (Micelle core) คล้ายหยคน้ำมัน และเป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว ส่วนหัวของโมเลกุลสบู่ (Hydrophilic head) จะอยู่บริเวณโดยรอบแกนน้ำมันและสร้างพันธะกับน้ำ ทำให้แขวนลอยอยู่ในน้ำได้ เช่นเดียวกับกรณีที่ 1

ทั้งสองกรณีเกิดได้เมื่อสบู่ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวปรากฏในรูปของสารแขวนลอย (Suspension) ในน้ำมากกว่าค่าที่น้อยที่สุดที่เริ่มมีไมเซลล์เกิดขึ้น ซึ่งเรียกว่า Critical Micelle Concentration (CMC) (Wade, 2003; Jones, 2005; en.wikipedia.org, 2009a อ้างจาก McBain, 1913; Hartley, 1936; Turro *et al.*, 1978; Seddon and Templer, 1995; Baeurle and Kroener, 2004) ดังนั้น ผลจากการปนเปื้อนสบู่ ไขมันน้ำมัน แขวนลอยอยู่ในน้ำและจัดเรียงโครงสร้างเป็นไมเซลล์ ซึ่งอาจจัดเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่มีประจุลบและเป็นแบบชอบน้ำ หรือไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) แขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นผลให้กลายเป็นสภาพอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (Oil in Water Emulsion) (Becher, 1977; Reynolds and Richards, 1996) ดังเช่นน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล



ภาพที่ 5 โครงสร้างไมเซลล์ (Micelle) (a) การรวมตัวกันเป็นแกนน้ำมัน (Micelle core) และ (b) การเกิดพันธะระหว่างส่วนหัว (Hydrophilic head) ของ โมเลกุลสบู่ (Surfactant) ของไมเซลล์กับน้ำ

ที่มา: (a) en.wikipedia.org (2009b) และ (b) Flatow (2009)

### 3. คอลลอยด์

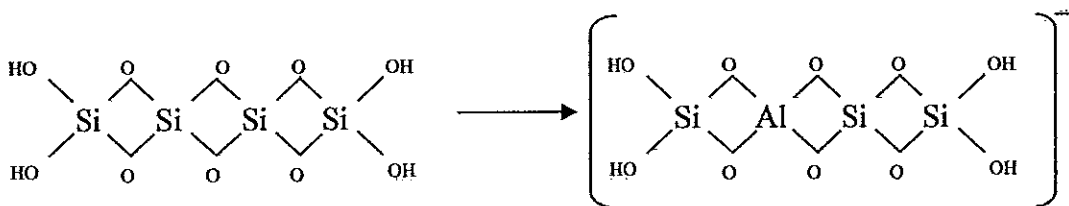
กลไกหลักที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ (Colloids) ทั้ง Hydrophobic และ Hydrophilic มีเสถียรภาพสูงคือแรงผลัทางไฟฟ้า (Electrostatic repulsion) โดยที่บริเวณผิวอนุภาคคอลลอยด์แบบ Hydrophobic จะมีการสะสมของอนุภาคส่วนเกิน (Excess ion) ทั้งประจุบวกหรือประจุลบซึ่งเรียกบริเวณดังกล่าวว่าชั้น Interface จึงทำให้เกิดแรงผลักับอนุภาคที่มีประจุเหมือนกัน ส่วนกรณีบริเวณผิวของอนุภาคพวก Hydrophilic นั้นประจุทางไฟฟ้าจะเกิดจากการแยกตัว (Dissociate) ของพวกกลุ่มสารอนินทรีย์ (Inorganic group) เช่น กลุ่ม Carboxyl หรือ กลุ่มกรดอินทรีย์ (Organic acid group) ที่อยู่บริเวณผิวอนุภาคหรือบริเวณชั้น Interface แรงผลัทางไฟฟ้างดังกล่าวส่วนใหญ่ค่อนข้างที่จะเสถียรเนื่องจาก โมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับล้อมรอบอนุภาค จึงทำให้เหมือนมีชั้นของเหลวกันอยู่ระหว่างอนุภาคและทำให้เกิดการปะทะชนกัน (Stumm and Morgan, 1981) การเกิดประจุทางไฟฟ้าที่บริเวณผิวอนุภาคคอลลอยด์อาจแบ่งได้ดังต่อไปนี้

### 3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์

สิ่งที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีความแตกต่างจากตะกอนแขวนลอย อะตอม และโมเลกุลขนาดเล็ก คือ ขนาด และคุณสมบัติทางไฟฟ้า อนุภาคคอลลอยด์อาจมีประจุบวกหรือลบก็ได้ แต่ที่มักพบในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมมักเป็นอนุภาคประจุลบ การที่อนุภาคคอลลอยด์มีประจุทางไฟฟ้า ทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคต่างๆ แพร่กระจาย (Dispersion) อยู่ในน้ำโดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนซึ่งเรียกว่า ฟล็อก (Floc) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าประจุทางไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญทำให้อคอลลอยด์มีเสถียรภาพ (Stability) ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้รับประจุมาจากหลายทาง แสดงดังต่อไปนี้ (มันสิน คณกุลเวศม์, 2542)

#### 3.1.1 ความไม่บริสุทธิ์ของผลึกสาร

อนุภาคคอลลอยด์ได้ประจุไฟฟ้ามาจากการแลกเปลี่ยนอะตอม ของผลึกอนุภาคกับอะตอมจากภายนอกซึ่งมีประจุทางไฟฟ้าไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น Colloidal mineral เช่น ดินเหนียว (Clays) มีประจุทางไฟฟ้า (Electrostatic charge) เมื่อ  $Al^{3+}$  แลกที่กับ  $Si^{4+}$  ซึ่งอยู่ในโครงสร้างผลึกของดินเหนียว (ภาพที่ 6) ทำให้อนุภาคดินเหนียวมีประจุบวกลดลง จึงแสดงอำนาจของประจุลบดังเช่นการเกิดความขุ่นในน้ำผิวดิน (มันสิน คณกุลเวศม์, 2542; Bunnaul, 1999)



ภาพที่ 6 ที่มาของประจุไฟฟ้าของอนุภาคดินเหนียว

ที่มา: มันสิน คณกุลเวศม์ (2542); Bunnaul (1999)

#### 3.1.2 ประจุไฟฟ้าของไอออนที่ถูกดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์

ฟองก๊าซ ละอองน้ำมันหรืออนุภาคคอลลอยด์อีกหลายชนิด ได้ประจุไฟฟ้าบนผิวเนื่องจากมันสามารถเลือกดูดไอออน (ที่มีประจุลบหรือบวกก็ได้) บางชนิดมาติดบนผิวได้ ไอออนที่ถูกดูดติดเรียกว่า Peptizing Ions อนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายอยู่ในน้ำมักชอบดูดไอออนลบมากกว่า

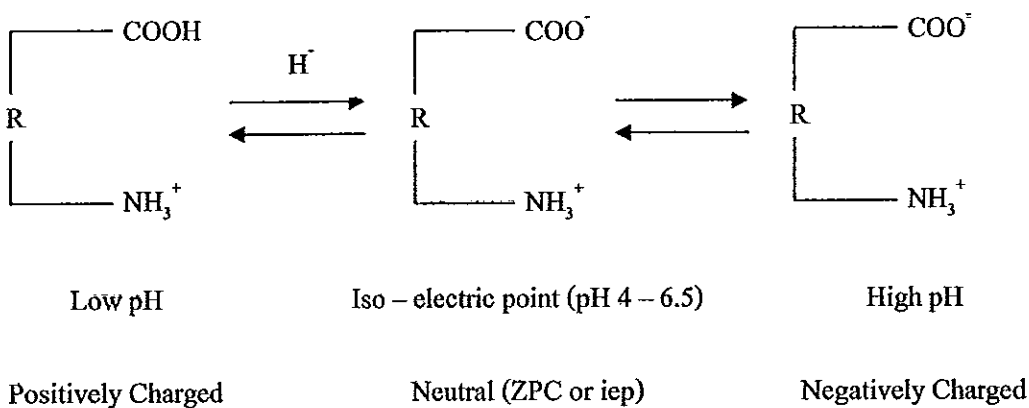
ไอออนบวก เพราะไอออนบวกจะมีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบอยู่ (เช่น  $Al(H_2O)_6^{+3}$  หรือ  $Fe(H_2O)_6^{+3}$ ) ทำให้ไอออนบวกไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้แบบชิดเท่ากับไอออนลบ โมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนสิ่งกีดขวางการจับตัวระหว่างไอออนบวกและอนุภาคคอลลอยด์ ด้วยเหตุนี้กล่าวอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำจึงมักมีประจุลบมากกว่าบวก (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542; Bunnaul, 1999)

### 3.1.3 การละลายตัวของไอออน

อนุภาคคอลลอยด์บางชนิดมีประจุไฟฟ้า ถ้าการละลายตัวไอออน (Ion Dissolution) ต่างชนิดที่ประกอบกันเป็นอนุภาคละลายน้ำได้ไม่เท่ากัน (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542)

### 3.1.4 การแตกตัวเป็นไอออนของหมู่ฟังก์ชันบนผิวอนุภาค

อนุภาคคอลลอยด์จำนวนมากได้ประจุไฟฟ้า เนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนหมู่ฟังก์ชันบนผิวอนุภาค (Functional Group) ตัวอย่างเช่น โปรตีนได้ประจุไฟฟ้ามาจากการแตกตัวเป็นไอออนของหมู่อะมิโน (Amino Group) หรือหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ (ภาพที่ 7) เมื่อมีพีเอชต่ำ โปรตีนจะมีประจุบวก และมีประจุลบที่พีเอชสูง โปรตีนอาจไม่มีประจุไฟฟ้าเลยที่ระดับพีเอชระหว่างค่าสูงและค่าต่ำ ระดับพีเอชนี้เรียกว่า Isoelectric pH (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542; Bunnaul, 1999)



ภาพที่ 7 การแตกตัวเป็นไอออนของอนุภาคโปรตีน  
ที่มา:มันสิน ตันจุลเวศม์ (2542); Bunnaul (1999)

### 3.2 เสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์

ส่วนมากระบบคอลลอยด์จะคงอยู่ในสารแขวนลอย (Suspension) หรือเรียกว่า เสถียรภาพ (Stabilization) ซึ่งเป็นผลจากแรงไฟฟ้าสถิตของตัวมันเอง คอลลอยด์ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติส่วนใหญ่มีประจุเป็นลบและผลักกัน (Repulsive) เนื่องจากมีประจุเหมือนกัน คอลลอยด์จึงคงอยู่และแพร่กระจาย (Dispersion) ในสารแขวนลอยได้ซึ่งเป็นผลของแรงผลัก (Repulsion force) แต่อนุภาคคอลลอยด์ประจุลบจะดึงดูดประจุตรงกันข้ามจากน้ำที่อยู่โดยรอบมาติดกับประจุที่อยู่บนผิวของตัวมันเอง เสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ประจุลบสามารถอธิบายได้ด้วยโครงสร้างของ Double layer (ภาพที่ 8) ชั้น Compact layer มีแรงปะทะกันระหว่างประจุ (Counterions) หรือเรียกว่าชั้น Fixed Layer ส่วนชั้นนอกต่อจากชั้น Fixed Layer คือ ชั้น Diffused Layer ชั้นทั้งสองมีทั้งไอออนบวกและลบกระจายอยู่ โดยมีไอออนลบมากกว่าไอออนบวก (ถ้ามีประจุบวกมากกว่าประจุลบชั้นทั้งสองจะแสดงไอออนในชั้นสลับกัน) แรงปะทะมีมากที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ และลดลงเมื่ออยู่ในขอบเขตชั้นนอก แรงเฉือนในแนวราบ (Shear plane) หรือแรงเฉือนที่ผิวของอนุภาค (Shear surface) มีบทบาทสำคัญกับอนุภาคคอลลอยด์ การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของแรงเฉือนในแนวราบหรือแรงเฉือนที่ผิวของอนุภาค ด้วยการวัดค่า Zeta potential ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความมีเสถียรภาพ (Stability) ของสารแขวนลอย

สารแขวนลอยจะมีเสถียรภาพสูงถ้าอนุภาคในสารแขวนลอยไม่จับกันเป็นก้อน (Coagulate) ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของขนาดแรงดึงดูด (Attraction) เนื่องจากแรง Van der waals และแรงผลัก (Repulsion) ที่เกิดจากแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ของอนุภาคคอลลอยด์ที่แพร่กระจายอยู่ใกล้เคียงกัน ขนาดของแรงนี้วัดโดย ค่า Zeta potential ( $\zeta$ )

$$\zeta = \frac{4\pi qd}{D}$$

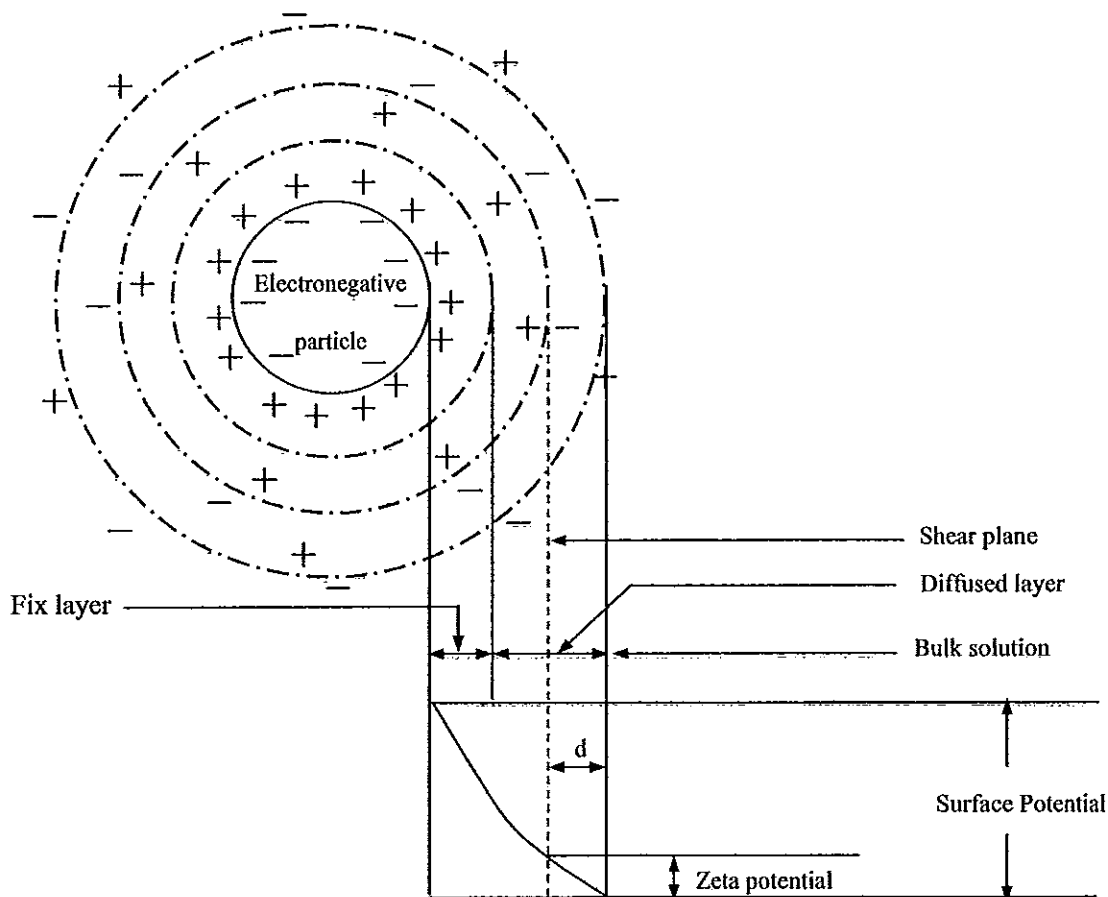
เมื่อ  $\zeta$  = Zeta potential

q = Charge per unit area

d = thickness of the layer surrounding the shear surface through which the charge is effective.

D = dielectric constant of the liquid

ดังนั้นการวัดค่า Zeta potential เป็นการวัดประจุของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะที่แรงของประจุส่งผลไปถึง ความแรงของแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์มากเป็นผลให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพสูง ยิ่งไปกว่านั้นการปรากฏของชั้นน้ำ (Bound water layer) และความหนาของชั้นนี้มีผลต่อเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ เนื่องจากชั้นน้ำจะขัดขวางการสัมผัสกันของอนุภาคคอลลอยด์ เมื่อพิจารณาแรงเฉือนที่ผิวของอนุภาค (Shear surface) อาจกล่าวได้ว่าอนุภาคคอลลอยด์ไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) มีตำแหน่งของแรงเฉือนที่ผิวของอนุภาค (Shear surface) อยู่ที่นอกขอบเขตชั้นน้ำ ส่วนอนุภาคคอลลอยด์ไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) มีตำแหน่งของแรงเฉือนที่ผิวของอนุภาคอยู่ที่นอกขอบเขตชั้น Fixed Layer. (Clark *et al.*, 1971; Viessman and Hammer, 1985, Reynolds and Richards, 1996; Bunnaul, 1999; Qasim *et al.*, 2000)



ภาพที่ 8 แผนภาพแสดง Electrical double layer บริเวณพื้นผิวร่วมระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับน้ำ (Solid-liquid interface)

ที่มา : Reynolds and Richards (1996)

### 3.3 ระบบคอลลอยด์

การจำแนกระบบคอลลอยด์ (Colloid) ที่เกี่ยวข้องกับ การบำบัดน้ำดีและน้ำเสีย (ตารางที่ 5) สามารถจำแนกตามสถานะได้เป็นระบบแบบ Solid dispersed in liquid (Sols) เมื่อสารแขวนลอยในน้ำเป็นสารอินทรีย์ (Organic) เช่น จุลินทรีย์ (Microbes) สารอนินทรีย์ (Inorganic) เช่น ดินเหนียว (Clay) และระบบคอลลอยด์แบบ Liquid dispersed in liquid (Emulsion) เมื่อสารแขวนลอยในน้ำเป็นของเหลว เช่น น้ำมัน นอกจากนี้ระบบคอลลอยด์อาจจำแนกตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคต่างๆ (Dispersed Phase) กับตัวกลาง (Dispersing Phase) คือ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวมีกำลังอ่อน ระบบคอลลอยด์เรียกว่า Hyophobic แต่ถ้านแรงยึดเหนี่ยวมีกำลังแรง ระบบคอลลอยด์เรียกว่า Hyophilic ในกรณีที่ตัวกลางเป็นน้ำ ศัพท์ที่ใช้จะเป็น ไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) และ ไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ตามลำดับ ตัวอย่างของอนุภาคแบบไฮโดรโฟบิก ได้แก่ ดินเหนียว ทอง และโลหะอื่นๆ ส่วนตัวอย่างของอนุภาคแบบไฮโดรฟิลิก ได้แก่ โปรตีน สบู่ และผงซักฟอก คอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิกสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่าคอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิก เหตุผลต่างๆ คือ คอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิก (ชอบน้ำ) มีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ จึงต้องใช้แรงมากในการบังคับให้อนุภาคต่างๆ เกาะจับกันเป็นกลุ่มก้อนเพราะ โมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนสิ่งกีดขวางที่ป้องกันมิให้อนุภาคต่างๆ เข้าใกล้และจับตัวกัน (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542; Reynolds and Richards, 1996) ดังนั้นน้ำเสียจากการผลิต ไบโอดีเซลซึ่งปนเปื้อนสบู่ ไขมันและน้ำมัน จึงอาจจัดเป็นระบบคอลลอยด์แบบ Liquid dispersed in liquid (emulsion) หรือระบบคอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic)

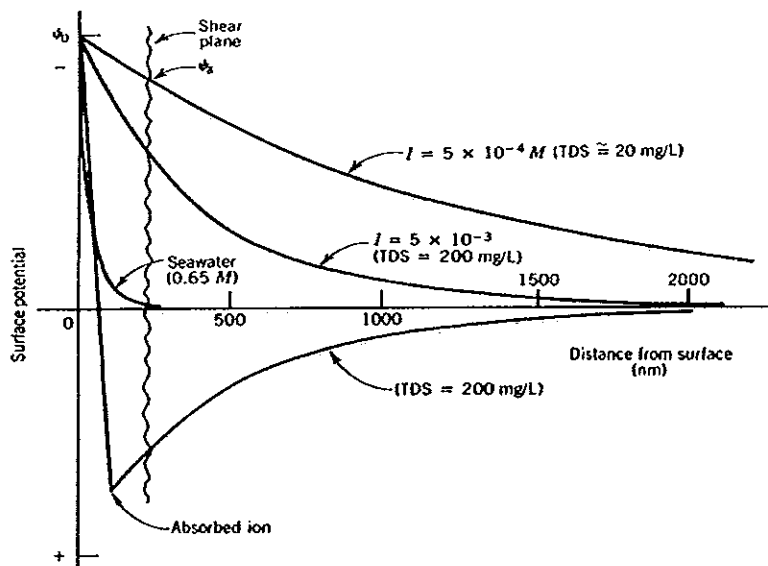
ตารางที่ 5 การจำแนกระบบอนุภาคคอลลอยด์แบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การบำบัดน้ำดีและน้ำเสีย

Disperse medium	Disperse phase	Name	Type of Colloids	Example
Liquid	Solid	Sol	Hyophobic	Clay turbidity in water
Liquid	Liquid	Emulsion	Hyophilic	Oil in water

ที่มา: ดัดแปลงจาก มันสิน ตัณฑุลเวศม์ (2542) และ Reynolds and Richards (1996)

### 3.4 กลไกการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์

โครงสร้างของ Double layer แสดงให้เห็นแรงจากความต่างศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากประจุบวกส่วนเกินเพิ่มขึ้นและมีแรงสูงสุดในบริเวณใกล้ผิวอนุภาค ซึ่งลดลงแบบ Exponential ตามระยะห่างจากผิวอนุภาคคอลลอยด์ แสดงดังภาพที่ 9 การเพิ่มขึ้นของค่า Ionic strength ของสารละลายซึ่งมักแทนด้วยการเพิ่มขึ้นของค่าของแข็งละลาย (Total dissolved solids, TDS) ทำให้เกิดการอัดตัว (Layer compression) ของชั้น Diffuse layer กราฟทั้งสามเส้นแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าสำหรับค่าความเข้มข้นของแข็งละลายสามค่าในช่วง 20 – 35,000 mg/L



ภาพที่ 9 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับอนุภาคคอลลอยด์

ที่มา: Montgomery (1985)

ซึ่งเป็นค่าของแข็งละลายในน้ำทะเล จะเห็นได้ว่าอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำทะเลแสดงค่า Zeta potential ที่ต่ำมาก เนื่องจากการถูกบีบอัดของชั้น Double layer แต่กระบวนการนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่เสถียรเนื่องจากไม่สามารถคำนวณค่าที่เหมาะสมของปริมาณไอออนที่ต้องเติมได้ โดยส่วนใหญ่เป็นการเกิดตามธรรมชาติ เช่น การเกิดกลไกในระบบธรรมชาติทางทะเล ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปรากฏการณ์ลอยตัวของหยดน้ำมันในทะเล (Zouboulis, 2000) และปรากฏการณ์การทับถมของตะกอนบริเวณปากแม่น้ำที่ไหลลงสู่ทะเลเนื่องจากน้ำในแม่น้ำมีค่า Ionic strength ต่ำ (Low Ionic Strength) ส่วนน้ำทะเลมีค่า Ionic strength สูง (High Ionic Strength) (Montgomery,



1985) นอกจากนี้ไอออนบางชนิดสามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคได้ ดังนั้นประจุที่ผิวอนุภาค คอลลอยด์จะเกิดการเปลี่ยนเป็นประจุตรงกันข้าม (Charge reversal) เช่น ไอออนบวก (Cationic) ดูก ติดบนผิวอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุลบ เป็นผลให้ประจุของอนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนเป็นประจุบวก อย่างไรก็ตามยังมีกลไกการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์อื่นๆ อีก โดยสามารถแบ่งกลไกการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ได้เป็น 4 กลไก (มันลีน คัทซูลเวสม์ 2542) แสดงรายละเอียด ดังต่อไปนี้

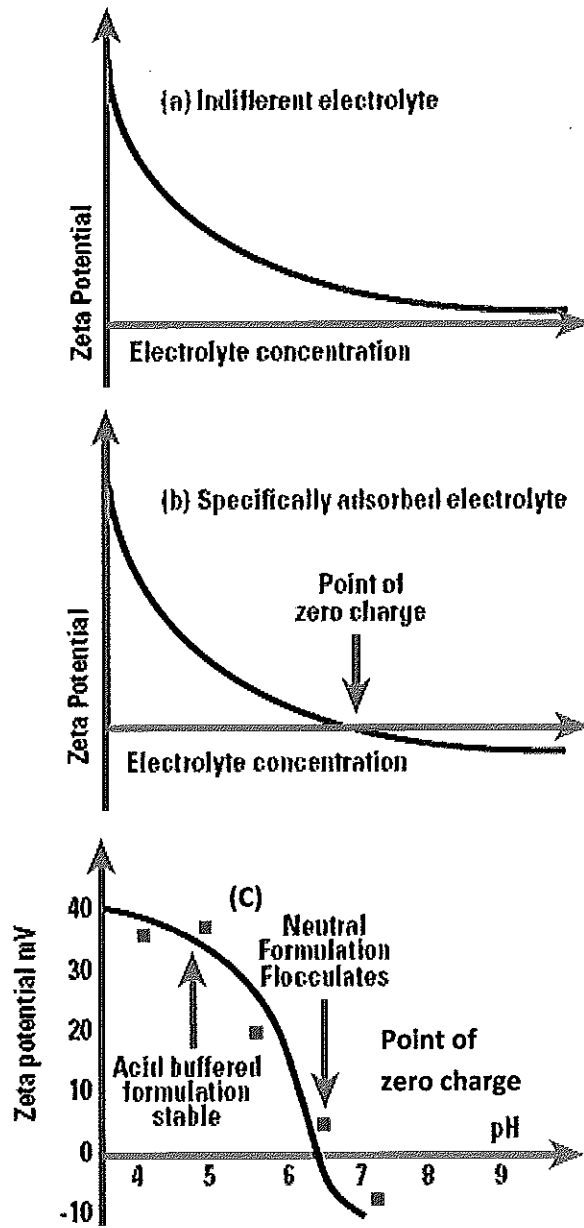
### 3.4.1 กลไกการลดความหนาของชั้นกระจาย

การลดความหนาของชั้นกระจาย (Double layer Compression) ดังตัวอย่างรูปแบบของกราฟในภาพที่ 9 เมื่อ Ionic strength เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการบีบอัดของชั้น Double layer เนื่องมาจากการลดลงของความหนาของชั้นดังกล่าว เป็นผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta potential) ลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการมีประจุบวกออกันอยู่ใกล้ผิวอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้นเป็นผลให้อำนาจประจุลบของอนุภาคลดลง ไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม และพบว่าเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน Coagulation ได้อย่างรวดเร็วมาก ปริมาณของไอออนละลายน้ำที่ทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันได้อย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า Critical Coagulation Concentration (CCC) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคและชนิดของไอออนละลายน้ำ (Rudolph, 1952) โดยที่ไอออนที่มีวาเลนซ์ (Valence) เท่ากับ 1, 2, และ 3 มีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจายเป็นสัดส่วนเท่ากับ 1:10:1,000 ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น  $Al^{3+}$  ให้ผลดีกว่า  $Ca^{2+}$  ถึง 1,000 เท่า อย่างไรก็ตามไอออนบวกต่างๆ ไม่สามารถดำรงอยู่ในน้ำได้อย่างอิสระ โดยมักมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ เช่น  $Al^{3+}$  มีน้ำห่อหุ้มอยู่ 6 โมเลกุล ซึ่งเรียกว่า Aqua Complex และสูตรโมเลกุลที่ถูกต้อง คือ  $Al(H_2O)_6^{3+}$  อย่างไรก็ตามการเขียนสูตรโมเลกุลนี้เป็นเรื่องยุ่งยากและไม่นิยมจึงมักละเว้นการเขียนสูตรโมเลกุลของน้ำ การที่  $Al^{3+}$  หรือโลหะอื่นๆ มีโมเลกุลของน้ำจับอยู่ด้วยเป็นข้อเสียเพราะว่าโมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนเกราะป้องกันการสัมผัสโดยตรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับไอออนบวกของโลหะ เป็นผลให้ไม่สามารถดูดติดผิวและทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ได้ดีเท่าที่ควร การลดโมเลกุลของน้ำเป็นการทำให้ไอออนบวกและอนุภาคคอลลอยด์เข้าใกล้กันมากขึ้น เช่น  $Al(OH)(H_2O)_5^{+2}$  หรือ  $Al(OH)_2(H_2O)_4^+$  สามารถเกาะติดผิวอนุภาคคอลลอยด์ได้ อย่างไรก็ตามการลดความหนาของชั้นกระจาย ด้วยการเติมสารละลายเกลือต่างๆ เพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ และไม่ว่าเติมไอออนบวกมากเพียงใดจะไม่ทำให้คอลลอยด์เปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวกได้ (มันลีน คัทซูลเวสม์, 2542; Bunnau, 1999)

### 3.4.2 กลไกการทำลายประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์หรือกลไกการดูดติดผิว

อนุภาคคอลลอยด์สามารถถูกทำลายเสถียรภาพ (Destabilized) โดยกลไกการทำลายประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์หรือกลไกการดูดติดผิว (Electrostatic Attraction) ปรากฏเมื่อประจุบนพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ถูกเปลี่ยนเป็นประจุตรงข้าม (เช่น จากลบเป็นบวก) เป็นผลให้เกิดการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ (มันลีน ดัชนีจุลเวศม์ 2542) แต่ทว่าอนุภาคคอลลอยด์ที่พบในน้ำธรรมชาติมีพื้นผิวประจุลบไปด้วยประจุบวกหรือประจุลบขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำ (ภาพที่ 10) ซึ่งค่า pH ของน้ำจะสอดคล้องกับความเป็นประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์ คือ ณ ค่า pH ที่มีผลให้ประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์เป็นศูนย์ (Zero) จะเรียกว่า Point of Zero Charge (PZC) ส่วนค่า pH ที่เหนือกว่าค่า PZC ผิวของอนุภาคคอลลอยด์จะมีประจุเป็นลบ (Anionic) และถ้าค่า pH ต่ำกว่าค่า PZC ผิวของอนุภาคคอลลอยด์จะมีประจุเป็นบวก ค่า pH ที่มีผลให้ประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์ของสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ที่พบในน้ำธรรมชาติบางชนิดเป็นศูนย์ (PZC) (Bunnaul, 1999) แสดงดังตารางที่ 6

การลดลงของประจุบริเวณพื้นผิวอนุภาค โดยการปรับ pH หรือเติมไอออนบางชนิดสามารถที่จะใช้ในการทำให้เกิดสภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า (Neutralization) และเกิดการทำลายเสถียรภาพ Destabilization ของอนุภาคในน้ำ (Packham, 1962; Bunnaul, 1999) สำหรับกลไกการทำลายประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์หรือกลไกการดูดติดผิว เมื่อเติมสารเคมีบางชนิดเช่น สารประกอบอะลูมิเนียมและเหล็ก ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีความสำคัญอย่างมากในการกำหนดกลไกของกระบวนการ โคแอกกูเลชัน โดยไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวกต่างๆ จะต้องเกิดกลไกการทำลายประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์หรือกลไกการดูดติดผิวภายในเวลา  $10^{-4}$  – 1 วินาที ไม่เช่นนั้น ไอออนคอมเพล็กซ์จะไฮโดรไลซิสก่อนจนเกิดเป็นผลึก ปัจจัยที่ขัดขวางกลไกการทำลายประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์หรือกลไกการดูดติดผิว คือ การสัมผัสกันระหว่างไอออนคอมเพล็กซ์กับอนุภาคคอลลอยด์ยากที่จะทำให้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายในเวลา  $10^{-4}$  – 1 วินาที ดังนั้นในทางปฏิบัติการออกแบบและควบคุมให้โคแอกกูเลชันแบบนี้ไม่สามารถกระทำได้ แต่มักเกิดเป็นปฏิกิริยาร่วมในระหว่างการทำโคแอกกูเลชัน (มันลีน ดัชนีจุลเวศม์, 2542)



ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta potential) บนผิวอนุภาคคอลลอยด์ (a) เดิมสารประกอบที่มีประจุต่างกัน (b) ลักษณะเฉพาะของการดูดติดผิวด้วยประจุที่ต่างกัน (c) การเปลี่ยนค่า pH ที่มีต่อประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์

ที่มา: Malvern (2005)

ตารางที่ 6 ค่าพีเอชที่มีผลทำให้ประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์บางชนิดที่พบในน้ำธรรมชาติเป็นศูนย์

Particles/minerals	pH at PZC
Quartz	2–4
Hematite (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.5–9
Goethite (FeOOH)	6.7–7
Kaolinite	3.4
Montmorillonite	Below 3
Rutile	6
Latex	5
Protein	5

ที่มา: Bunnaul (1999)

### 3.4.3 กลไกห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบของโลหะ

การเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงในน้ำในปริมาณที่เพียงพอจะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในผลึกดังกล่าวเพื่อทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรืออาจจับตัวรวมกับผลึก ลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ อาจถือว่าการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ เป็นผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542) ดังเช่นกระบวนการทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคแขวนลอยด้วยการเติมเกลือของเหล็กและอลูมิเนียม เช่น สารส้ม, เฟอริกคลอไรด์, แมกนีเซียมคาร์บอเนต และปูนขาว สามารถทำให้เกิดโคแอกกูเลชันได้ โดยการสร้างไฮดรอกซอเมทัลคอมเพล็กซ์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxo metal complex) คือ Al(OH)<sub>3</sub>, Fe(OH)<sub>3</sub>, Mg(OH)<sub>2</sub>, และ CaCO<sub>3</sub> ซึ่งล้วนแต่เป็นผลึกสาร (Precipitate) ไม่ละลายน้ำ ลักษณะของกระบวนการทำลายเสถียรภาพแบบนี้เรียกว่า กลไกแบบ Sweep floc Coagulation หรือ Sweep Coagulation (Packham, 1965; Stumm and O'Melia, 1968)

สารประกอบแคลเซียมไม่เหมาะสมในการใช้งานในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เนื่องจากสารประกอบของโลหะบางชนิด เช่น อลูมิเนียม เหล็ก หรือ แมกนีเซียม เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปผลึกสาร ไม่ละลายน้ำและสามารถตกตะกอนได้เร็วและดีกว่า ดังนั้นปริมาณความเข้มข้นที่ใส่ลงในน้ำจึงน้อยกว่า อนุภาคคอลลอยด์ในน้ำจะถูกอนุภาคผลึกสารของโลหะดังกล่าวจับไว้เกิดการฟอรัมตัวกันเป็นรูปร่างที่ไม่แน่นอน ซึ่งจะรวบรวม

อนุภาคอื่นมาเกาะติดกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น เกล็ดอลูมิเนียมหรือเกล็ดของเหล็กถูกใช้ในปริมาณที่มากเกินไปเพื่อที่จะให้เกิด (Hydroxo metal complex) ในรูปของแข็งคั่งกล่าวเกิดขึ้นมาก (Stumm and O'Melia, 1968) แต่ควรระวังในเรื่องของปริมาณอลูมิเนียมหรือเหล็กส่วนเกินที่อาจเกิดความเป็นพิษต่อร่างกายได้

#### 3.4.4 การใช้สารพอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์

พอลิเมอร์อินทรีย์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมีวัตถุประสงค์เพื่อทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์และก่อให้เกิดอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น (Flocculation) มีความต้านทานต่อแรงเสียดทานมากขึ้น อย่างไรก็ตามกระบวนการทำลายเสถียรภาพประจุของอนุภาคในน้ำด้วยพอลิเมอร์สามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่เหมาะสม รวมถึงการใช้พอลิเมอร์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ได้ผลต้องทำให้พอลิเมอร์แพร่กระจายให้ทั่วถึงเพื่อการติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์อย่างทั่วถึง และการเลือกชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์ที่ใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physico – chemical) ของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งกลไกของพอลิเมอร์ในการกำจัดคอลลอยด์น้ำคืดและน้ำเสียแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้ (มันสิน ดันกุลเวศม์, 2542; Avcı *et al.*, 2002; Besraa *et al.*, 2002; Blachier *et al.*, 2009; Ahmad, *et al.*, 2006; Bratskaya *et al.*, 2006; Yue *et al.*, 2007; Fenault *et al.*, 2009)

##### 3.4.4.1 การทำให้ประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์เป็นกลาง

การทำให้ประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์เป็นกลาง (Charge Neutralization) เนื่องจากในแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีค่า pH ในช่วง 6 – 8 มีประจุของอนุภาคคอลลอยด์ส่วนใหญ่เป็นลบ (Clays, Humic acids, Bacteria) ดังนั้นพอลิเมอร์ประจุบวกจึงใช้ได้ดีเพื่อสะเทินประจุอนุภาคคอลลอยด์แบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ในกระบวนการทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) โดยสามารถใช้งานร่วมกับสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออนินทรีย์ (Inorganic coagulant) พอลิเมอร์ประจุบวกจะติดไปกับผิวของอนุภาคคอลลอยด์ในลักษณะปะติดปะต่อกันเป็นหย่อมๆ ทำให้ลดแรงผลักทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นอนุภาคคอลลอยด์จึงสามารถสัมผัสกันและเกาะกันได้ โดยทั่วไปแล้วพบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสม (Optimum dose) จะเกิดขึ้นเมื่อผิวของอนุภาคถูกพอลิเมอร์ปกคลุมบางส่วนเท่านั้น (ประมาณน้อยกว่าร้อยละ 50) การเติมพอลิเมอร์มาก

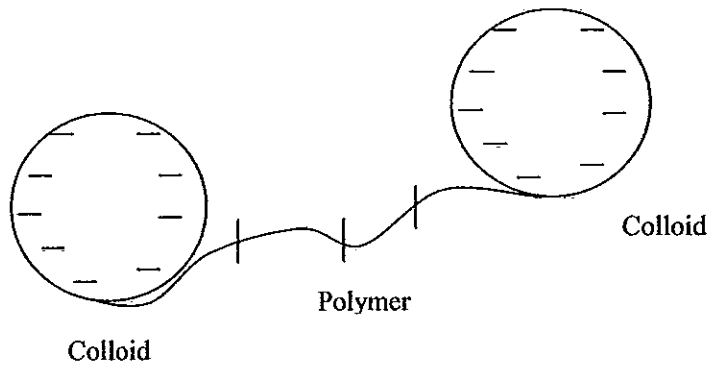
ไป (Over dosing) จะทำให้เกิดเสถียรภาพกลับคืนมา (Restabilization) ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวอนุภาคคอลลอยด์ที่มากขึ้น

สำหรับอนุภาคชอบน้ำ (Hydrophilic) เช่นกรดฮิวมิก (Humic acids) กลไกในการตกตะกอนถือกันว่าหรือยืนยันได้ชัดเจนเกิดจากการทำปฏิกิริยากันพอดี ระหว่างปริมาณพอลิเมอร์ (ที่เหมาะสม) กับความเข้มข้นของกรดฮิวมิก สำหรับกลไกดังกล่าวนี้ปริมาณประจุของพอลิเมอร์ (Charge density) มีความสำคัญมากกว่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ แต่อย่างไรก็ตามในการควบคุมปริมาณที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ คือที่ความเข้มข้นอนุภาคคอลลอยด์สูง ( $>10^{14}$  particles/L, or about 100 mg/L, clay with  $d=0.1$  micrometer) การเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จะช่วยลดปริมาณความเข้มข้นของพอลิเมอร์ได้ จึงทำให้ต้องทำการทดลองเป็นกรณีไป

ตัวแปรต่างๆ ในสารละลายก็ส่งผลต่อปริมาณพอลิเมอร์ที่ใช้เช่นกัน ถ้าปริมาณประจุของพอลิเมอร์ขึ้นกับค่า pH ดังนั้นปริมาณความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมจะแปรผันตามค่า pH ซึ่งโดยทั่วไปจะลดลงเมื่อค่า pH ลดต่ำลง เช่นปริมาณประจุของพอลิเมอร์ชนิด Quaternized polymer แต่ในกรณีของ Poly(DADMAC) ค่า pH การเปลี่ยนแปลงจะมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น องค์ประกอบของไอออนไม่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่ต้องใช้มากไปกว่าช่วงปกติทั่วไปที่ใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (TDS between 50 and 500 mg/L) (มันสิน ตันทุลเทศน์, 2542; Avci *et al.*, 2002; Besraa *et al.*, 2002; Blachier *et al.*, 2009; Ahmad, *et al.*, 2006; Bratskaya *et al.*, 2006; Yue *et al.*, 2007; Fenault *et al.*, 2009)

#### 3.4.4.2 พอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์

พอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging) เกิดจากการที่พอลิเมอร์สายโซ่ข้างใดข้างหนึ่งติดติดไปกับพื้นผิวอนุภาคคอลลอยด์และเหลืออีกข้างหนึ่งลอยไปในสารละลายจนไปจับกับอีกอนุภาคหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะคล้ายการสร้างสะพาน (Bridge) ระหว่างผิวอนุภาคคอลลอยด์ (ภาพที่ 11) แต่ถ้าพอลิเมอร์ไม่สามารถหาอนุภาคคอลลอยด์อื่นๆ เกาะได้ก็จะไม่เกิดการเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นจึงอาจเกิดการปกคลุม (Coverage) หรือการติดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์ของพอลิเมอร์เพียงอนุภาคเดียว และเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Aggregation)



ภาพที่ 11 พอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging)

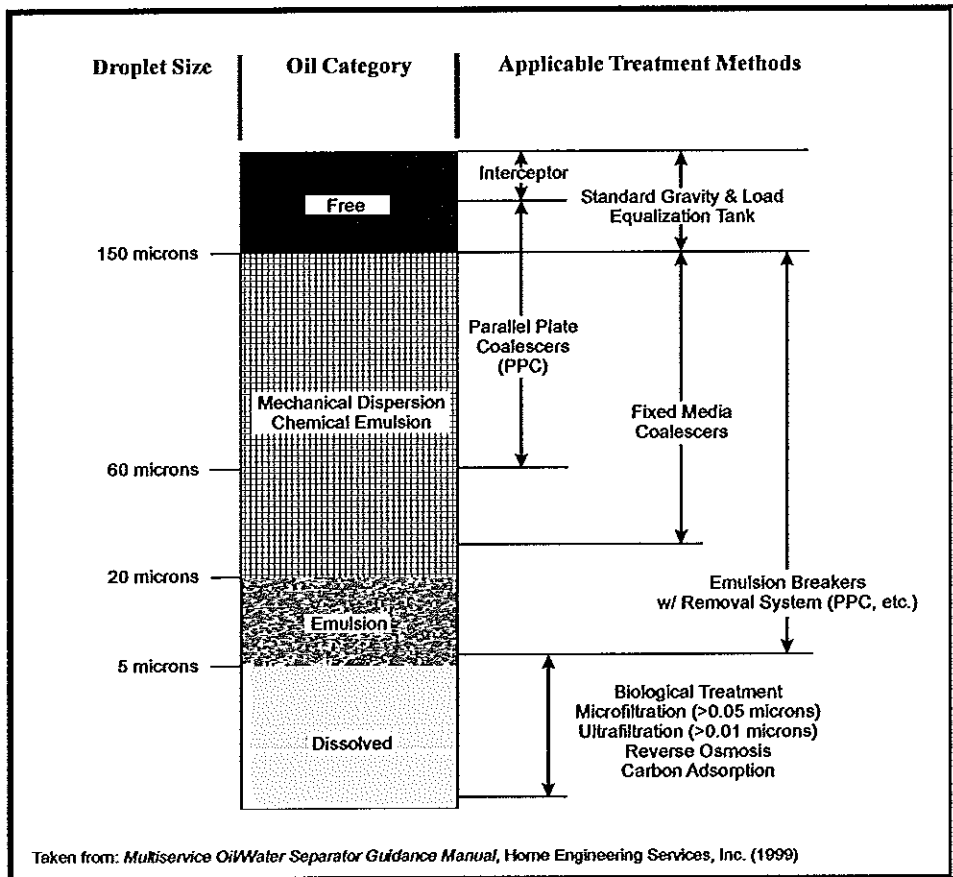
เนื่องจากกลไก Polymer Bridging เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อพอลิเมอร์ดูดติด (Adsorption) บนผิวอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นปริมาณพอลิเมอร์ที่เหมาะสมจึงเป็นสัดส่วนต่อปริมาณความเข้มข้นของอนุภาค ทั้งพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก ลบ หรือประจุเป็นกลาง อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ประจุลบและพอลิเมอร์ไม่มีประจุใช้ได้กว้างขวางกว่า เนื่องจากธรรมชาติของพอลิเมอร์ทั้งสองมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าพอลิเมอร์ประจุบวก การที่น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้นจะมีข้อได้เปรียบเพราะพอลิเมอร์จะมีขนาดใหญ่มากขึ้นเป็นผลให้ศักยภาพในการเกิดเป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Bridging) เพิ่มขึ้น สำหรับพอลิเมอร์ประจุลบค่าความหนาแน่นประจุที่เหมาะสม (Optimum charge density) อาจจะมีผลมากกว่าน้ำหนักโมเลกุลเพราะว่า ถ้าค่าความหนาแน่นประจุ (Charge density) ต่ำจะทำให้อัตราการดูดติดผิวลดลง แต่ถ้าเพิ่มค่าความหนาแน่นประจุมากขึ้นจะทำให้เกิดการดูดติดผิวในลักษณะเป็นระนาบแบนทำให้ลดศักยภาพในการเกิดสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ นอกจากนี้คุณสมบัติของสารละลาย (Solution properties) เช่น pH และความเข้มข้นของไอออน (Ionic content) ส่งผลต่อการก่อรูปร่างของพอลิเมอร์ในสารละลายและที่ Interface ของอนุภาคในสารละลาย ถ้าในสารละลายมีค่า Ionic strength สูง จะมีแนวโน้มทำให้พอลิเมอร์บิดเป็นเกลียวไม่เป็นแขนที่ยาวออกไปเหมือนปกติ เป็นผลให้ขนาดของแขนหรือความยาวของพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาที่ซับซ้อนของพอลิเมอร์สำหรับแต่ละกรณีใช้งานจึงต้องทำการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสม (Optimum dose) สภาวะการกวนผสม (Mixing condition) และช่วงค่า pH ที่เหมาะสม โดยทั่วไปอาจกล่าวได้ว่า พอลิเมอร์ประจุลบเหมาะสมที่จะใช้เป็น Coagulant aids โดยปริมาณที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.1 – 5 mg/L ขณะที่พอลิเมอร์ไม่มีประจุมักใช้เป็นตัวช่วยในกระบวนการกรองซึ่งมีปริมาณที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.01 – 0.1 mg/L ส่วนการเลือกพอลิเมอร์เพื่อการทำ Sludge conditioning จะขึ้นกับคุณสมบัติของ Sludge คุณสมบัติของพอลิเมอร์ สภาวะในการผสมและกลไก Bridging จะเป็นกลไกหลักในการใช้พอลิเมอร์ในการทำ Sludge conditioning ด้วย

คังนั้นน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ในกรณีนี้จึงเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542; Avci *et al.*, 2002; Besraa *et al.*, 2002; Blachier *et al.*, 2009; Ahmad, *et al.*, 2006; Bratskaya *et al.*, 2006; Yue *et al.*, 2007; Fenault *et al.*, 2009)

#### 4. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันและมีสภาพเป็นอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ

สำหรับน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันและมีสภาพเป็นอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (Oil in water Emulsion) การบำบัดน้ำเสียดังกล่าวด้วยกระบวนการทั่วไปทำได้ยาก คังนั้นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว คือการทำลายสภาพความเป็นอิมัลชัน (Breaking the oil in water emulsion) โดยการใช้วิธีการทางเคมี วิธีทางกายภาพ หรือวิธีทางไฟฟ้า วิธีการดังกล่าวเป็นการทำลายเสถียรภาพ (Destabilizing) ของหยดน้ำมันที่กระจายอยู่ในน้ำโดยตรง ซึ่งการใช้วิธีการทางเคมีด้วยการเติมสารเคมีบางชนิดเป็นวิธีที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยการผสมเร็ว (Rapidly mixing) ระหว่างสารช่วยรวมตะกอนกับน้ำเสีย ตามด้วยการกวนช้า (Slowly mixing) หรือกระบวนการสร้างตะกอน (Flocculation) และ กระบวนการตกตะกอน (Setting) หรือ ลอยตะกอน (Flotation) นอกจากนี้กระบวนการเติมกรด (Acidification) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพความเป็นอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (Patterson, 1975; Eckenfelder, 2000; Wengi *et al.*, 2006) ส่วนวิธีทางกายภาพที่มีการใช้สำหรับทำลายเสถียรภาพความเป็นอิมัลชัน เช่น การให้ความร้อน (Heating) การปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) และการกรอง (Filtration) (Patterson, 1975; Horne Engineering Services, 1999) นอกจากนี้ยังมีการใช้วิธีการลดอุณหภูมิ หรือแช่เย็น (Freeze) เนื่องจากไขมันและน้ำมันสามารถรวมตัวกันเป็นไขและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้เมื่ออุณหภูมิน้ำเสีย ที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมันลดลง (Saito *et al.*, 1999; Thanasukarn *et al.*, 2004; Supratim *et al.*, 2006; Thanasukarn *et al.*, 2006; O'Regan and Mulvihill, 2009) การใช้กระบวนการตะกอนลอย (Flotation) โดยการทำให้เกิดฟองอากาศในน้ำ เช่น การอัดอากาศ (Dissolve Air Flotation, DAF) เป็นวิธีการอาศัยกลไกการดูดติดระหว่างหยดน้ำมันกับฟองอากาศทำให้เกิดการลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันในภาคอุตสาหกรรม (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2535; อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล, 2538; Eckenfelder, 2000; Metcalf & Eddy, 2004) อย่างไรก็ตามการใช้วิธีการทางกายภาพบางวิธี เช่น การใช้วิธีการทางไฟฟ้าโดยตรงเหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีสภาพอิมัลชันเป็นหลักและมีปริมาณน้ำเสียน้อย จึงจะสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Patterson, 1975)





ภาพที่ 12 การแยกประเภทการปนเปื้อนน้ำมันในน้ำตามขนาดหยดน้ำมันและวิธีการบำบัด

ที่มา: Home Engineering Services, Inc. (1999)

Gayle *et al.*, 2009 ได้เสนอแนวทางการเลือกใช้วิธีการหรือกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตามลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามขนาดของหยดน้ำมัน (Oil droplet size) คือ Free oil, Emulsion oil และ Dissolved oil (ภาพที่ 12) ขนาดของหยดน้ำมันเป็นสิ่งบ่งบอกถึงความต้องการวิธีการบำบัดหรือกำจัด หยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่สามารถเลือกวิธีการบำบัดได้ง่ายโดยใช้วิธีการบำบัดพื้นฐาน เช่น Flotation tank หรือ Plate separator (Eckenfelder, 2000) แต่หากหยดน้ำมันมีขนาดเล็กหรือมีสภาพเป็นอิมัลชันวิธีการบำบัดจะมีความยุ่งยากและค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดสูง ระดับความยากของการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย ขึ้นอยู่กับอัตราการปล่อยจากแหล่งกำเนิด (Rise rate) ขนาดหยดน้ำมัน (Droplet Size) และความเร็วของการลอยขึ้น (Vertical velocity) ของหยดน้ำมัน ซึ่งหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่จะมีความเร็วของการลอยขึ้นสูงจะง่ายต่อการแยกออกจากน้ำเสีย (Gayle *et al.*, 2009) อย่างไรก็ตาม บางครั้งไม่อาจสามารถบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการหรือกระบวนการบำบัดเพียงขั้นตอนเดียวได้ ดังนั้น

กระบวนการบำบัดจึงต้องใช้งานร่วมกันหลายขั้นตอน เช่น การใช้วิธีการทางกายภาพและเคมีในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันและมีลักษณะเป็นอิมัลชัน โดยการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ร่วมกับกระบวนการตะกอนลอย เป็นการใช้วิธีการทางเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพอิมัลชันและใช้กระบวนการทางกายภาพเพื่อแยกตะกอนไขมันและน้ำมัน (Oily Sludge) ออกจากน้ำ (Zouboulis, 2000; Shamrani *et al.*, 2002a; Shamrani *et al.*, 2002b; Bensadok *et al.* 2007) หรือใช้วิธีการปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) สำหรับแยกตะกอนไขมันและน้ำมัน (Patterson, 1975) ซึ่งสิ่งสำคัญของการเลือกกระบวนการบำบัดน้ำเสียคือ ประสิทธิภาพการบำบัด ค่าใช้จ่าย รวมถึงการจัดการน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการบำบัด รวมถึงตะกอนไขมันและน้ำมัน เพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียให้ได้มากที่สุด

#### 4.1 การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี

จากการศึกษาเอกสารเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียที่มีสภาพเป็นอิมัลชัน พบว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี คือ วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด (Acidification) และกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอน เป็นวิธีการที่นิยมใช้ลดสภาพอิมัลชันหรือก่อให้เกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมัน เพื่อง่ายต่อการแยกไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียด้วยวิธีการทางกายภาพ แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

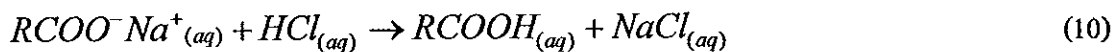
##### 4.1.1 วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด

การใช้วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด (Acidification) มีการใช้งานบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันหรือมีสภาพเป็นอิมัลชันเพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย (Patterson, 1975; Eckenfelder, 2000; Wengi *et al.*, 2006) ซึ่งอาจใช้เป็นวิธีการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) เนื่องจากมีผลทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีนี้มีความเป็นกรด โดยจะต้องทำให้น้ำเสียมีสภาพเป็นกลางหลังจากแยกน้ำมันออกจากน้ำ โดยค่าพีเอชที่ต้องการสำหรับการทำลายเสถียรภาพอิมัลชันขึ้นอยู่กับธรรมชาติของน้ำเสียนั้นๆ มีรายงานการวิจัยบำบัดน้ำเสียด้วยการปรับค่าพีเอชลดต่ำลงเท่ากับ 2 – 3 (Patterson, 1975 อ้างจาก Vaughn and McCurdy, 1973) โดยการใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) สามารถทำให้หยคน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียรวมตัวกันและลอยแยกออกจากน้ำเสียได้ (Patterson, 1975 อ้างจาก Werner, 1972) วิธีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียด้วยการเติมกรดเพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียเป็นวิธีการที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันที่

ปนเปื้อนในน้ำเสีย ซึ่งน้ำมันที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้อาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในรูปของกรดไขมัน เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ (คู่จันทร์ จันทร์ทองอ่อน, 2549; ญาใจ วิทยะพงศ์ 2548; จูติมน ชะคาร์ตัน และคณะ 2552)

วิธีการปรับค่าพีเอชโดยการเติมกรดแก่ เช่น กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) หรือกรดซัลฟิวริก (Sulfuric) (Patterson, 1975; EPAP, 2002) เป็นวิธีการทำให้โครงสร้างเกล็ดของกรดคาร์บอกซิลิกหรือสบู่ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียเกิดปฏิกิริยาปลดปล่อยกรดคาร์บอกซิลิกหรือกรดไขมันอิสระ (Liberating the fatty acid) (EPAP, 2002; G.P.A., 2009) แสดงผังสมการที่ 10 และ 11

กรณีใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl)



กรณีใช้กรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)



การเติมกรดแก่สามารถเปลี่ยน โครงสร้างของสบู่ทั้งที่อยู่ในรูป โมเลกุลเดี่ยวและอยู่ในรูปของไมเซลล์ ให้กลายเป็นกรดคาร์บอกซิลิกและรวมตัวกันกลายเป็นหยดน้ำมัน เมื่อหยดน้ำมันมีปริมาณมากและอยู่ชิดติดกันจนเกิดการรวมตัวกันระหว่างหยดน้ำมัน (Coalescence) กลายเป็นหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Chen *et al.*, 2000; Dukhin *et al.*, 2001; Ichikawa *et al.*, 2004; Wengi *et al.*, 2006; Ichikawa, 2007) เป็นผลให้แรงลอยตัวของหยดน้ำมันมากพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างหยดน้ำมันกับน้ำ เนื่องจากน้ำมันมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ดังนั้นหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่จึงลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จากรายงานการวิจัยของ S. Fujii *et al.* (2007) ได้อธิบายปรากฏการณ์การเกิดการอิมัลชันที่ค่าพีเอชสูง และการรวมตัวหลังจากการปรับค่าพีเอชให้ต่ำลง เรียกว่าการลดอิมัลชัน (Demulsification) โดยปฏิกิริยาดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช ซึ่งสามารถเปลี่ยนกลับไปได้ (Reversible) ด้วยการปรับค่าพีเอช (Emulsion – Demulsification Cycle) คือ ถ้าค่าพีเอชมีค่าสูง (มากกว่า 7.7) จะเป็นอิมัลชันที่มีเสถียรภาพสูง (Stable emulsion) แต่เมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5.0 – 6.1 จะอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลง (Emulsification – Demulsification) หรือเป็นอิมัลชันที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable emulsion) และที่ค่าพีเอชต่ำ (ต่ำกว่า 4.0) จะเกิดการเปลี่ยนเฟสกลายเป็นหยดน้ำมันขนาดใหญ่และลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ (Fujii *et al.*, 2007)

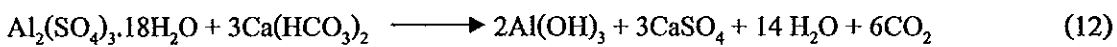
#### 4.1.2 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

กระบวนการบำบัดน้ำและน้ำเสียทั่วไป ให้ความสำคัญกับกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอน (Coagulant) ประเภทเกลืออนินทรีย์ (Inorganic Coagulant) เช่น เกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก (Ahmad, 2006; Fenault, 2009) เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย และราคาไม่สูงมากและมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการทำลายเสถียรภาพอิมัลชัน แต่ตะกอนไขมันและน้ำมันที่ประกอบด้วยสารประกอบอะลูมิเนียมหรือเหล็ก (Hydroxide Sludge) กำจัดน้ำ (Dewater) ออกได้ยาก อีกทั้งอาจสร้างปัญหาจากการมีปริมาณของแข็งละลาย (Dissolved Solids) ปริมาณมากในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัด ซึ่งการเลือกใช้สารอินทรีย์เป็นสารช่วยรวมตะกอนเพื่อทำลายเสถียรภาพอิมัลชันเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง แต่มีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งมีผลต่อการพิจารณาใช้งาน โดยอาจเลือกใช้กับน้ำเสียที่มีปริมาณน้อย หรือมีการปนเปื้อนน้ำมันน้อย (Patterson, 1975) ดังนั้นการเลือกใช้สารช่วยรวมตะกอนจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน เนื่องจากมีผลต่อค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดน้ำเสีย รวมถึงการพิจารณาจัดการน้ำเสียหลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้น จากการค้นคว้าเอกสารเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมันและมีสภาพเป็นอิมัลชันในอุตสาหกรรมบางประเภท พบว่าปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันมีอยู่ 2 แบบ แบบแรก คือ การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอน (Rios *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2005; Bratskaya *et al.*, 2006) และแบบที่สอง คือ การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันทางไฟฟ้า (Electrochemical Coagulation) (Canizares *et al.*, 2007; Yang, 2007; Bensadok *et al.*, 2008) ซึ่งโรงบำบัดน้ำเสียทั่วไปนิยมใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอน เนื่องจากควบคุมดูแลระบบง่าย และมีประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันทางไฟฟ้า (Canizares *et al.*, 2008; Canizares *et al.*, 2009) มีรายงานการวิจัยผลการศึกษาคณะการเติมสารช่วยรวมตะกอนหลากหลายชนิด เพื่อเพิ่มทางเลือกสำหรับการนำไปใช้งาน และผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูเลชันหลังเติมสารช่วยรวมตะกอนชนิดต่างๆ เป็นการควบคุมเพื่อให้กลไกการทำงานของกระบวนการโคแอกกูเลชันเกิดขึ้นได้ดีที่สุดและมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด (Zhang *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2005; Bratskaya *et al.*, 2006; Canizares *et al.*, 2009)

#### 4.1.2.1 สารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออนินทรีย์

สาร Coagulant สองตัวที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในระบบบำบัดน้ำดีและน้ำเสียคือ เกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งอยู่ในรูปของ Hydrolysis form ของประจุบวกกับซัลเฟตหรือคลอไรด์ ทั้งของเหลวและของแข็งเช่น aluminum sulfate ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ), Ferric Chloride ( $\text{FeCl}_3$ ), Ferric Sulfate ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ), Ferrous Sulfate ( $\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )

สารส้ม (Aluminum sulfate, Alum,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ )

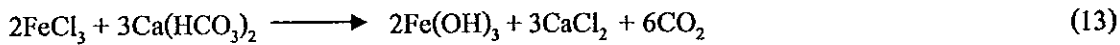


สารส้มมีสีน้ำตาลอ่อนๆ หรือสีเทาเขียว มีน้ำหนักประมาณ 960 – 1010 กก/ม<sup>3</sup> สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่ pH = 4.5 – 8.0 (ภาพที่ 13) อะลูมิเนียมจากสารส้มเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำจะอยู่ในรูปแบบสารประกอบ  $[\text{Al}^{3+}$  หรือ  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}]$  ที่ไม่รวมตัวกับอนุภาคของคอลลอยด์เนื่องจากถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนสารประกอบในรูปแบบสารประกอบดังกล่าวเป็น  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ด้วยวิธีการปรับค่าพีเอชของน้ำให้มีค่าสูงขึ้น สารประกอบ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  สามารถรวมตัวกับคอลลอยด์ได้ โดยการเกิดกลไกการกำจัดคอลลอยด์ที่เรียกว่า Sweep Coagulation (มันลิน ดัชนีจุลเวศม์, 2542; Reynolds and Richards, 1996)

โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminium Chloride, PACl)

โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นเกลืออะลูมิเนียมชนิดหนึ่ง ซึ่งมีข้อได้เปรียบมากกว่าสารส้ม (Alum) ในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ เนื่องจากมีการทำสะเทิน (Neutralization) อนุภาคคอลลอยด์เป็นกลไกหลักที่เกิดขึ้นก่อนขั้นตอนทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ตัวอย่างโครงสร้างของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ คือ  $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}]^{+17}$  หรือ  $\text{Al}^{+13}$

เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride,  $\text{FeCl}_3$ )



สาร  $\text{FeCl}_3$  มีสีเขียวเข้มหรือสีน้ำตาลเข้ม มีน้ำหนักประมาณ 1,360 – 1,444 กก/ม<sup>3</sup> ซึ่งช่วงของพีเอชที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นสารประกอบ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ได้คืมีช่วงของพีเอชกว้างมากกว่าสารส้มคืออยู่ในช่วงพีเอชประมาณ 4 – 12 (ภาพที่ 14) การเกิดสารประกอบเหล็กคล้ายกับสารส้ม คือถ้าพีเอชของน้ำต้นเหล็กจะอยู่ในรูปแบบสารประกอบ  $[\text{Fe}^{3+}$  หรือ  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}]$  ที่ไม่รวมตัวกับอนุภาคของคอลลอยด์ เนื่องจากถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ ดังนั้นจึงต้องปรับค่าพีเอชให้มีค่าสูงขึ้นเพื่อให้เกิดสารประกอบ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  และทำให้เกิดกลไกการกำจัดคอลลอยด์ ที่เรียกว่า “Sweep Coagulation” เช่นเดียวกับกับสารส้ม (Reynolds and Richards, 1996) ซึ่งในทางปฏิบัติจะต้องใช้ค่า เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เติมลงไปเพื่อปรับพีเอชให้มีค่าสูงขึ้นในช่วงของการเกิดสารประกอบเหล็ก  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2542; Reynolds and Richards, 1996) และการทดสอบปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5, 6 และ 7 ของการทดสอบใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลก็อยู่ในช่วงของการเกิดสารประกอบ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  เช่นเดียวกัน

#### 4.1.2.2 สารช่วยรวมตะกอนประเภทสารอินทรีย์

สารช่วยรวมตะกอนประเภทสารอินทรีย์ Organic Coagulation เช่น Organic polymers มีการใช้งานเป็นสารช่วยรวมตะกอน (Coagulant) อย่างแพร่หลายใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำในอเมริกามาตั้งแต่ต้นศตวรรษ 1950 พอลิเมอร์มีโมเลกุลสายโซ่ยาวประกอบไปด้วยกลุ่มที่เหมือนกันทางเคมีหลายๆหน่วย ซึ่งโครงสร้างถูกออกแบบให้มีข้อเด่นในคุณสมบัติเคมี-ฟิสิกส์ (Physicochemical) หน่วยเคมีดังกล่าวปกติจะมีลักษณะตามธรรมชาติเป็นไอออนซึ่งบางตัวมีประจุทางไฟฟ้าในสายโซ่ของพอลิเมอร์ ดังนั้นบางครั้งจึงเรียก Organic polymers ว่า Polyelectrolyte ซึ่งพอลิเมอร์ถูกใช้ในทางปฏิบัติเป็นสารช่วยรวมตะกอนในหลากหลายเทคโนโลยี โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านอุตสาหกรรมเหมืองแร่ กระดาษ ประปาและบำบัดน้ำเสีย ในการประยุกต์ด้านปรับปรุงคุณภาพน้ำ Organic polymers จะถูกออกแบบให้สามารถละลายน้ำได้ ดูดซับ (Adsorb) หรือทำปฏิกิริยาได้เร็วกับอนุภาคคอลลอยด์ และมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมาะสมกับการใช้งาน ทั้งการใช้เป็นสารช่วยรวมตะกอนหรือใช้เป็นสารช่วยรวมตะกอนร่วมกับสารอื่น (Coagulant aids) และใช้เป็น Sludge conditioning เมื่อนำมาใช้เป็น Primary coagulant กลไกการกำจัดอนุภาค

คอลลอยด์ ของพอลิเมอร์จะตรงข้ามกับอะลูมิเนียมหรือเหล็ก คือไม่มีการผลิต Flocc ขนาดใหญ่จำนวนมาก (Voluminous flocc volumes) ตัวอย่างเช่นเมื่อต้องการใช้กับ Granular media filters ในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์จะทำให้ไม่เกิดการอุดตันเร็วจนเกินไป แม้ว่าพอลิเมอร์มีศักยภาพที่ดีมากในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ แต่ก็ยังถูกใช้ไม่มากนักเนื่องจากมีราคาแพงและความไม่แน่นอนในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีสารเคมีปนมาด้วย ดังนั้นพอลิเมอร์บางชนิดเท่านั้นที่อนุญาตหรือสามารถใช้ได้กับกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้

ชนิดของพอลิเมอร์ (Types of Polymers) การจำแนกพอลิเมอร์ทั่วไปอาจแบ่งได้เป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งอย่างหลังนี้ใช้มากในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ พอลิเมอร์ธรรมชาติบางชนิด เช่น Sodium alginate ซึ่งเป็นสารประกอบที่สกัดจากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล และไคโตซาน (Chitosan) ที่ได้มาจากเปลือกของสัตว์ที่มีกระดอง ก็ถูกใช้เป็น Coagulant แต่มีราคาสูงกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์มาก พอลิเมอร์อินทรีย์สังเคราะห์มักถูกสังเคราะห์ขึ้นจาก Homopolymerization of the monomer หรือโดยการ Copolymerization of two monomers พอลิเมอร์สังเคราะห์สามารถถูกปรับแต่งให้มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ประจุ (Charge) ความหนาแน่นประจุต่อสายพอลิเมอร์ (Charge density) และโครงสร้าง (Linear or Branched) ที่ต่างกัน ได้ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเพื่อสังเคราะห์ให้เกิดพอลิเมอร์ที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น Polyacrylamide ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ไม่ประจุ (Nonionic polymer) เมื่อทำการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) polyacrylamide ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง (Basic pH) จะก่อให้เกิด พอลิเมอร์ที่มีประจุลบ (Anionic charges) โดยกลุ่มไฮดรอกซิลในกรณีนี้คือ หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ส่วนพอลิเมอร์ประจุบวก (Positive charge or Cationic polymer) มีประจุบวกอยู่ที่สายโซ่พอลิเมอร์ ตัวอย่างพอลิเมอร์สังเคราะห์บางชนิดที่ใช้งานในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำแสดงดังตารางที่ 7 (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2542; มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542; Reynolds and Richards, 1996; Eckenfelder, 2000; Avci *et al.*, 2002; Besraa *et al.*, 2002; Ahmad, *et al.*, 2006; Bratskaya *et al.*, 2006; Yue *et al.*, 2007; Blachier *et al.*, 2009; Fenault *et al.*, 2009)

ตารางที่ 7 พอลิเมอร์สังเคราะห์บางชนิดที่ใช้งานในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

Examples	Molecular Weight Range	Uses	Observations
1. Polyacrylamide	$10^5 - 10^7$	Coagulant acid, Filter acid	Use to increase floc strength, available as powder or emulsion, used mostly as filter acid
2. Partially hydrolyzed polyacrylamide	$10^4 - 10^7$	Coagulant acid, Filter acid, sludge conditioning	Produced by controlled of polyacrylamide; rang of MW, change density available, change depends on pH
3. poly DADMAC or poly (DMDAAC) polymer	$10^4 - 10^6$	Primary coagulant, turbidity/color removal, sludge conditioning	Most widely use primary coagulant; may be used in conjunction with inorganic coagulant; chlorine resistant; charge density not pH sensitive; available in liquid form
4. Quarternized polyamines	$10^4 - 10^5$	Primary coagulant, turbidity/color removal	Mostly widely used primary coagulant for color removal; properties similar to poly (DADMAC)
5. Polyamines	$10^4 - 10^7$	Primary coagulant, also Coagulant acid	Includes several types of polymers; less widely used as primary coagulant, reacts with chlorine; charge density depends on pH



## 4.2 การบำบัดโดยวิธีทางกายภาพ

วิธีการทางกายภาพที่มีการใช้งานสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมันมีอยู่หลากหลายวิธีดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น แต่วิธีการที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพสูงในการแยกไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสีย คือ กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ (Dissolved Air Flotation, DAF) (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2542; ภาณุพันธ์ มั่นถึง และคณะ 2546; อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล, 2538; Eckenfelder, 2000; Metcalf & Eddy, 2004) นอกจากนี้ยังมีการใช้งานกระบวนการตะกอนลอยร่วมกับวิธีการทางเคมีเพื่อลดสภาพอิมัลชันของน้ำเสีย หรือก่อให้เกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเพื่อง่ายต่อการแยกออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการตะกอนลอย เช่น กระบวนการ โคลแอกกูเลชัน (Zouboulis and Avranas, 2000; Shamrani *et al.*, 2002a; Shamrani *et al.*, 2002a; Bensadok *et al.*, 2007) ทั้งนี้เนื่องจากหยดน้ำมันหรือตะกอนไขมันและน้ำมันมีความหนาแน่นต่ำจึงง่ายต่อการทำให้ลอยขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กระบวนการตะกอนลอยทดสอบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล รวมถึงการทดสอบร่วมกับวิธีการทางเคมี โดยมีรายละเอียดของกระบวนการทางกายภาพดังต่อไปนี้

### 4.2.1 การทำให้ตะกอนลอย (Flotation)

การทำให้ตะกอนลอย (Flotation) เป็นการแยกตะกอนออกโดยการทำให้ตะกอนในน้ำเสยลอยขึ้นบนผิวน้ำโดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็กแล้วกวาดทิ้งออกไป นิยมใช้กับสิ่งแขวนลอยที่ตกตะกอนได้ยาก เช่น ตะกอนแขวนลอยที่มีน้ำหนักเบา ไขมันต่าง ๆ การทำให้ตะกอนลอยใช้เวลาในการแยกสารแขวนลอยน้อยกว่าวิธีการตกตะกอนโดยธรรมชาติ เมื่อตะกอนซึ่งมีน้ำหนักเบาอยู่ในลักษณะครึ่งจมครึ่งลอยร่วมกับฟองอากาศ เป็นผลให้ความถ่วงจำเพาะของฟองอากาศที่รวมกับตะกอนมีค่าน้อยกว่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเสีย ดังนั้นฟองอากาศจึงพาตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ (Metcalf & Eddy, 2004) กระบวนการตะกอนลอยสามารถจำแนกตามวิธีการทำให้เกิดฟองอากาศได้ 4 ประเภท (อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล, 2538) คือ

1. Dispersed Air Flotation หรือ Foam Flotation เป็นระบบที่ทำงานโดยการเป่าอากาศเข้าไปในน้ำผ่านหัวจ่าย ให้อากาศกระจายตัว ฟองอากาศจะพาส่งสกปรกขึ้นสู่ผิวน้ำ วิธีนี้จะได้ฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่

2. Froth Flotation เป็นระบบที่ทำงานโดยการเติมอากาศผ่านใบกวนความเร็วรอบสูง ฟองอากาศจะถูกตีให้แตกกระจายเป็นฟองขนาดเล็ก พาตะกอนแขวนลอยลอยขึ้นสู่ด้านบนผิวน้ำ วิธีนี้นิยมนำไปใช้งานมากในการแยกสกินแร่

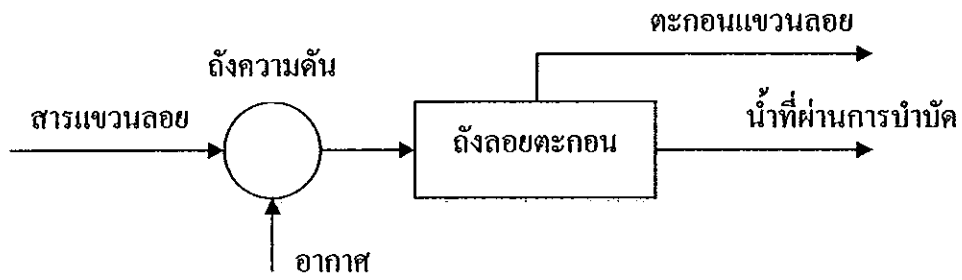
3. Electrolytic Flotation ระบบนี้เป็นการทำงานโดยการผลิตฟองอากาศเพื่อใช้ในการแยกตะกอนแขวนลอย โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเข้าไปที่ขั้วอิเล็กโทรด ที่ขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กพาตะกอนแขวนลอยลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ

4. Dissolved Air Flotation (DAF) เป็นระบบที่ทำงานโดยอัดอากาศเข้าไปในน้ำภายใต้ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศเพื่อให้อากาศละลายในน้ำมากขึ้น เมื่อลดความดันของน้ำลงไป ที่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว อากาศส่วนที่เกินจากจุดอิ่มตัวจะแยกตัวออกมาเป็นฟองก๊าซขนาดเล็ก DAF ยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ (อนุรักษ์ ปิตรีรักษ์กุล, 2538) ดังนี้

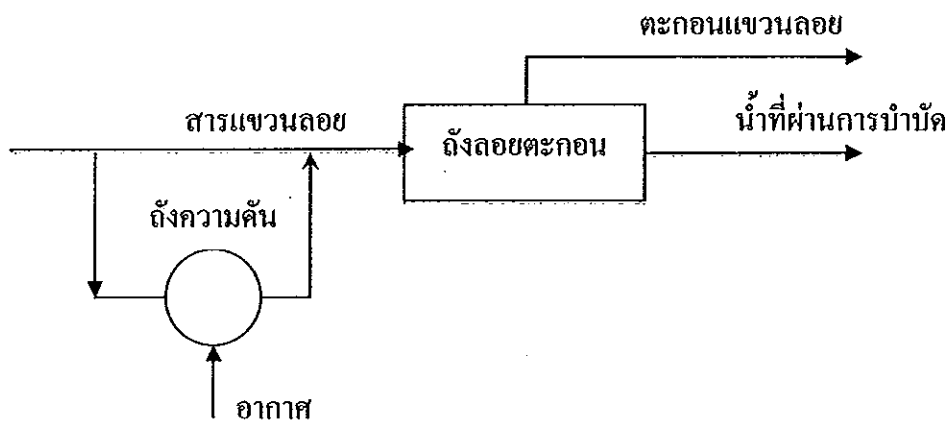
ก) *Full-stream Pressurization* เป็นกระบวนการที่ผ่านน้ำ ที่มีตะกอนทั้งหมดเข้าไปอัดอากาศที่ถึงความดัน และส่งต่อไปยังถังลอยตะกอน (ภาพที่ 15 ก) วิธีนี้ใช้ได้ดีเมื่อมีตะกอนแขวนลอย ในน้ำที่มาก แต่มีข้อเสีย คือ ตะกอนที่รวมตัวกันส่วนหนึ่ง จะถูกทำให้แตกตัวเนื่องจากอุปกรณ์เพิ่มความดัน ทำให้ยากต่อการดักเก็บตะกอน

ข) *Split-stream Pressurization* เป็นกระบวนการที่มีการแยกน้ำที่มีตะกอนออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งจะนำมาอัดอากาศ แล้วจึงไปรวมกับน้ำที่มีตะกอนอีกส่วน ก่อนที่จะส่งต่อไปยังถังลอยตะกอน (ภาพที่ 15 ข) ระบบนี้เหมาะสำหรับน้ำทิ้ง ที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยในปริมาณต่ำ

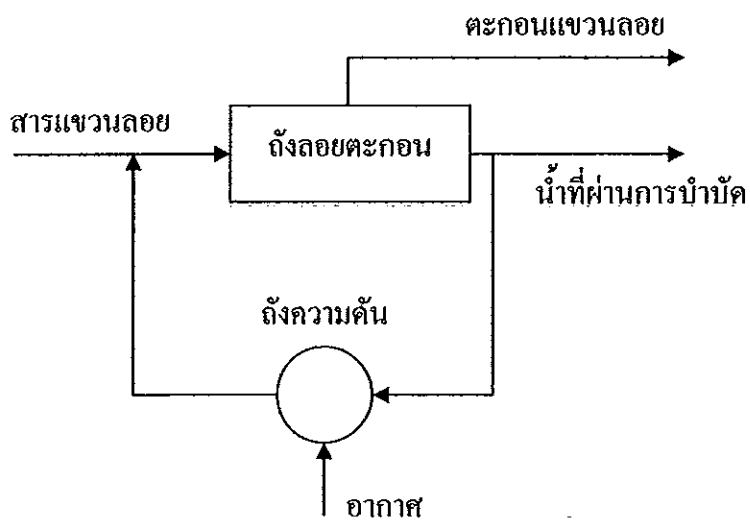
ค) *Recycle-stream Pressurization* เป็นกระบวนการที่นำเอาน้ำที่ผ่านการแยกตะกอนออกแล้วหรือน้ำ effluent มาอัดอากาศ ก่อนที่จะนำไปรวมกับน้ำขาเข้า ที่ประกอบด้วยตะกอนของแข็ง แล้วปล่อยเข้าสู่ถังลอยตะกอน (ภาพที่ 15 ค) ระบบนี้เป็นระบบที่นิยมใช้งานมากที่สุด เนื่องจากทั้ง 2 ระบบข้างต้นทำให้ตะกอน ที่เกิดขึ้นเกิดการแตกตัว ขณะเพิ่มความดัน และการนำน้ำ Effluent มาอัดอากาศแทนน้ำเสียจะเกิดผลดีกว่า คืออากาศในถังอัดความดันสามารถละลายในน้ำได้มากขึ้น แต่ระบบนี้จะมีขนาดของอุปกรณ์ที่ใหญ่กว่า 2 แบบแรก



ก. Full-stream Pressurization



ข. Split-stream Pressurization



ค. Recycle-stream Pressurization

ภาพที่ 15 ระบบการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ (Dissolved Air Flotation, DAF)

ที่มา : อนุรักษ์ ปีติรักษ์กุล (2538)

#### 4.2.2 การเกิดฟอง (bubble formation)

ฟองอากาศในน้ำที่เกิดจากสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated) มีสาเหตุ 2 ประการ ประการแรกเกิดจากการเหนี่ยวนำให้เกิดฟองอากาศในของเหลวขณะที่ลดความดันระบบลง ซึ่งสามารถเกิดได้กับระบบเนื้อเดียว (Homogeneous) และระบบเนื้อผสม (Heterogeneous) ประการที่สองเป็นผลจากการรวมตัวของฟองอากาศขนาดเล็กมากที่เกาะอยู่ตามผิวของอนุภาคของแข็ง ซึ่งการศึกษาการเกิดฟองอากาศประกอบด้วยพารามิเตอร์ ดังนี้

1. กลไกของการเกิดฟองใน DAF ฟองอากาศขนาดเล็กจากกระบวนการ DAF มีสาเหตุจากการเกิด Cavitations ของน้ำอิ่มตัวที่ความดันสูง เมื่อน้ำไหลผ่านอุปกรณ์ที่ทำให้ความดันของน้ำลดลง อุปกรณ์ที่วางน้ในทางปฏิบัติได้แก่ วาล์วรูเข็ม (Needle valve) แผ่นออริฟิส เป็นต้น จากการศึกษาภาพถ่าย พบว่าฟองอากาศขนาดเล็กเกิดขึ้นที่บริเวณอุปกรณ์ลดความดัน ไม่ใช่เกิดในถังลอยตะกอน

2. ขนาดของฟองอากาศใน DAF พบว่าขึ้นกับลักษณะของอุปกรณ์ลดความดันและคุณลักษณะการไหลของของเหลวขณะที่ลดความดัน ถ้าคุณลักษณะการไหลทำให้เกิดการไหลปั่นป่วน (Large eddies) ฟองอากาศเกิดการไหลหมุนวนทำให้เวลาในการกระจายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น โอกาสที่เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่จะมีค่าเพิ่มขึ้น

3. อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่อการเกิดฟองอากาศ พบว่าคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารละลายจะมีผลต่อการเกิดฟองอากาศ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล มีผลโดยตรงต่อการละลายของอากาศ สารละลายหรือน้ำเสียจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลค่าน้ำบริสุทธิ์ ปริมาณอากาศที่ละลายในน้ำเสียจึงมีค่าต่ำ ปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นจึงน้อยกว่าน้ำบริสุทธิ์ แรงตึงผิวเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดฟองอากาศ พบว่าสารละลายที่มีค่าแรงตึงผิวสูงจะเกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ และสารละลายที่มีแรงตึงผิวต่ำจะเกิดฟองอากาศขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังมีผลของความดันที่อัดเข้าไปในสารละลาย พบว่าเมื่อเพิ่มความดันมากขึ้นฟองอากาศจะมีขนาดเล็กลง และมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มความดันขึ้นไปถึงระดับหนึ่ง และพบว่าที่อุณหภูมิค่าการละลายของอากาศในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณฟองอากาศที่ปลดปล่อยจึงมีค่าสูงขึ้น

การศึกษากการสัมผัสของฟองอากาศและตะกอนในระบบตะกอนลอยแบบ Dissolved Air Flotation (DAF) ขึ้นตอนนี้มีผู้ศึกษาน้อยมาก โดย Vrablok, E.R., 1959 ได้เสนอกลไกการชนระหว่างฟองอากาศกับตะกอนในระบบตะกอนลอยแบบ Dissolved Air Flotation (DAF) 3 กลไก คือ

1. การยึดติด (Adhesion) ของฟองอากาศบนตะกอนแขวนลอย

2. การยึดจับทางกายภาพ (Physical entrapment) ของฟองอากาศในโครงสร้างของตะกอนแขวนลอย

3. การรวมตัวกัน หรือ "Incorporation" ของฟองก๊าซขณะที่เกิดตะกอน การเกิดการยึดติดอาจเป็นผลมาจากการชนกันระหว่างฟองอากาศและตะกอนของแข็งแขวนลอยหรือเนื่องจากการตกตะกอนของตะกอนของแข็งชนกับฟองก๊าซ

#### 4.2.3 ระบบตะกอนลอยแบบอัดอากาศ

หลักการของระบบตะกอนลอยแบบอัดอากาศ Dissolved Air Flotation (DAF) คือการเป่าอากาศลงในน้ำเสียภายใต้ความดันมากกว่าความดันบรรยากาศ จากนั้นจึงปล่อยให้เข้าสู่สถานะของความดันบรรยากาศ ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันมีอยู่ 2 ระบบด้วยกัน คือระบบแบบไม่มีการหมุนเวียน และระบบแบบมีการหมุนเวียนกลับ ความดันภายในถังอัดอากาศประมาณ 3 – 5 bar gauge และระยะเวลาพักในถังความดันประมาณ 1 – 4 นาที (Eckenfelder, 2000; Metcalf & Eddy, 2004) เพื่อปล่อยโอกาสให้อากาศละลายอยู่ในน้ำ จากนั้นจึงปล่อยน้ำออกจากถังความดันไปยังถังลอยตะกอน (Flotation tank) โดยมี Pressure Reducing Valve (PRV) เพื่อควบคุมความดันน้ำที่ไหลเข้าถังลอยตะกอน ระบบแบบไม่มีการหมุนเวียนนิยมใช้กับน้ำที่มีตะกอนชนิดไม่เปราะแตกง่าย ส่วนระบบแบบมีการหมุนเวียนกลับนิยมใช้กับน้ำเสียที่มีตะกอนชนิดเปราะแตกง่าย ซึ่งไม่เหมาะที่จะให้น้ำเสียไหลเข้าสู่ถังความดันโดยตรง เพราะตะกอนอาจแตกกระจายไป (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2535; Eckenfelder, 2000; Metcalf & Eddy, 2004)

#### 4.2.4 การวิเคราะห์ระบบลอยตะกอนแบบอัดอากาศ

การวิเคราะห์ระบบตะกอนลอยขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนในน้ำเสียที่ต้องการแยกออกมา ดังนั้นในการออกแบบระบบตะกอนลอย วิศวกรจะต้องทราบข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับการแยกตะกอนในน้ำเสียนั้นๆ ข้อมูลที่ต้องทราบเพื่อการออกแบบระบบลอยตะกอนคือ ความเข้มข้นของตะกอน ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในระบบ ความเร็วการลอยขึ้นของตะกอน Solid Loading Rate (SLR) หรือ Rise rate และอุณหภูมิของน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2535) ข้อมูลที่สำคัญอย่างยิ่งอีกหนึ่งข้อมูล คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศต่อค่าความเข้มข้นของตะกอนในน้ำเสีย หรือค่า A/S Ratio โดยปริมาณอากาศที่พ่นลงในน้ำเสียจำเป็นต้องมีปริมาณที่เหมาะสมกับความเข้มข้นของตะกอนในน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2535; Eckenfelder, 2000; Metcalf & Eddy, 2004)

โดยค่า A/S มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าปริมาณตะกอนส่วนที่ลอยขึ้นมาลดลง เป็นผลให้ค่าความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย (TSS) ในน้ำที่ผ่านระบบแล้ว (Effluent) มีค่าเพิ่มขึ้น (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2535) สูตรการคำนวณค่า A/S Ratio ทั้งสองระบบแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.2.4.1 กรณีไม่มีการหมุนเวียนน้ำกลับมาอัดอากาศ

$$\frac{A}{S} = \frac{s_a(fP-1)}{S_a} \quad (14)$$

#### 4.2.4.2 กรณีมีการหมุนเวียนน้ำกลับมาอัดอากาศ

$$\frac{A}{S} = \frac{1.3s_a(fP-1)R}{S_aQ} \quad (15)$$

เมื่อ	A/S	=	Air to Solids ratio (mg Air/mg Sludge)
	$s_a$	=	Air Solubility, (mL/L) (ตารางที่ 8)
	f	=	Fraction of Air Dissolved at pressure (0.5 – 0.8) usually 0.5
	P	=	Pressure, atm
		=	$(p + 14.70)/14.70$ (U.S. Customary Units)
		=	$(p + 101.35)/101.35$ (SI Units)
	P	=	Gauge Pressure, lb/in <sup>2</sup> (1 bar gauge = 14.70 lb/in <sup>2</sup> ) หรือ kPa (1 bar gauge = 100 kPa)
	$S_a$	=	Sludge Solids, mg/L
	R	=	Recycle Ratio
	Q	=	Wastewater Influence
	1.3	=	Air Unit factor (usually, 1.3 g/L = 1.3 mg/mL)

ตารางที่ 8 ลักษณะสมบัติและการละลายของอากาศในน้ำ

Temperature		Volume solubility		Weight solubility		Density	
°C	°F	mL/L	ft <sup>3</sup> /thousand gal	mg/L	lb/thousand gal	g/L	lb/ft <sup>3</sup>
0	32	28.8	3.86	37.2	0.311	1.293	0.0808
10	50	23.5	3.15	29.3	0.245	1.249	0.0779
20	68	20.1	2.70	24.3	0.203	1.206	0.0752
30	86	17.9	2.40	20.9	0.175	1.166	0.0727
40	104	16.4	2.20	18.5	0.155	1.130	0.0704
50	122	15.6	2.09	17.0	0.142	1.093	0.0682
60	140	15.0	2.01	15.9	0.133	1.061	0.0662
70	158	14.9	2.00	15.3	0.128	1.030	0.0643
80	176	15.0	2.01	15.0	0.125	1.00	0.0625
90	194	15.3	2.05	14.9	0.124	0.974	0.0607
100	212	15.9	2.13	15.0	0.125	0.949	0.0591

Values presented in absence of water vapor and at 14.70 lb/in<sup>2</sup> abs pressure (1 atm)

ที่มา: Eckenfelder (2000)

## 5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิธีการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่เป็นการบำบัดด้วยวิธีการทางชีววิทยา (ตารางที่ 9) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่าการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี และ บีโอดีมีค่าสูง อย่างไรก็ตามผลการศึกษาพบว่าการบำบัดด้วยวิธีการดังกล่าวพบว่าการบำบัดมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขาดธาตุอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการ ซึ่งหากต้องการทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นจะต้องทำการเติมธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน ลงไปในน้ำเสีย แต่จากการศึกษารายงานการวิจัยพบว่ามีการศึกษาใช้วิธีการทางเคมีหรือวิธีการทางกายภาพบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมันและมีสภาพเป็นอิมัลชัน (ตารางที่ 10) ซึ่งผลการวิจัยส่วนใหญ่พบว่ามีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดไขมันและน้ำมัน

ตารางที่ 9 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการทางชีววิทยา

รูปแบบวิธีการบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัด	อ้างอิง
แบบใช้อากาศ	บำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล โดยไม่มีการเจือจาง สามารถบำบัดค่าซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 30,000 mg/L ลดลงเหลือ 200 mg/L ที่การควบคุมค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.5, ค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนเท่ากับ 30:1 และระยะเวลาการบำบัด 12 – 17 วัน	วิศรุต ประยูรคำ และคณะ, 2551
	บำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล โดยไม่มีการเจือจาง สามารถบำบัดไขมันและน้ำมันได้ร้อยละ 97 ที่การควบคุมค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6.8 และค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในช่วง 17 – 68	Suehara <i>et al.</i> , 2005
แบบไม่ใช้อากาศ	บำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล โดยไม่มีการเจือจาง สามารถบำบัดค่าซีโอดีและไขมันและน้ำมันได้ร้อยละ 37.5 และ 32.4 ที่การควบคุมค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.0 แต่ไม่มีการเติมไนโตรเจน สามารถบำบัดค่าซีโอดีและไขมันและน้ำมันได้ร้อยละ 60.2 และ 60.0 ที่การควบคุมค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.0 และค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนเท่ากับ 100:1	จารุวรรณี เรืองคง และคณะ, 2551
	บำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล นำเสียเจือจาง ร้อยละ 10 (น้ำเสียไบโอดีเซล 10 เปอร์เซ็นต์) สามารถบำบัดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 98 ที่การควบคุมค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6.8 – 7.2, ค่าอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนมากเกินไป	คารินทร์ ภูักังงาม และคณะ, 2551.



ตารางที่ 10 การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมันและมีสภาพเป็นอิมัลชันด้วยวิธีทางกายภาพและเคมี

วิธีการบำบัด	น้ำเสียที่ใช้ศึกษา	ประสิทธิภาพการบำบัด	อ้างอิง
Acidification	Coal Gasification Wastewater	สามารถบำบัดค่าซีไอดีและน้ำมันได้ร้อยละ 3.1 – 11.3% และ 25.2 และ 57.4 ตามลำดับ	Wengi <i>et al.</i> , 2006
Coagulation by inorganic salt	Cutting oil emulsion	สามารถลดค่าความขุ่นของน้ำของการทดสอบใช้สาร $AlCl_3$ ได้ร้อยละ 99 โดยมีค่าความขุ่นของน้ำคงเหลือต่ำกว่า 14 FAU	Yang <i>et al.</i> , 2007
Dissolved Air Flotation (DAF) + Coagulation	น้ำเสียจากโรงงาน ประกอบชิ้นส่วนรถยนต์	ความสามารถกำจัดไขมันและน้ำมันของการทดสอบ Full Stream+ สารส้ม (pH 5.5) Full และ Recycle Stream+PAC (pH 7) ได้สูงสุด 63.6 และ 51.04 ตามลำดับ	ภานุพันธ์ มั่นถึง และคณะ, 2546
Dissolved Air Flotation (DAF) + Coagulation	น้ำเสียเตรียมจากการผสมน้ำมัน 1630 ppm กับ Surfactant	ความสามารถกำจัดไขมันและน้ำมันของการทดสอบ Aluminum sulphate (pH = 8) และ Ferric sulphate (pH = 7) ได้สูงสุดร้อยละ 99.3 และ 99.94 ตามลำดับ	Shamrani <i>et al.</i> , 2002
Dissolved Air Flotation (DAF) + Coagulation		ความสามารถลดค่าความขุ่นของน้ำของการทดสอบ Full Stream + $CaCl_2$ และ Full Stream + $Al_3(SO)_4$ ได้ร้อยละ 99	
Dissolved Air Flotation (DAF) + Coagulation	Cutting oil emulsion	สามารถกำจัดไขมันและน้ำมันของการทดสอบที่อัตราส่วน Recycle 30 % + Ferric Chloride (pH = 6) ได้ร้อยละ 95	Zouboulis and Avranas, 2000

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหารูปแบบการกำจัดไขมันและน้ำมันด้วยกระบวนการตะกอนลอย (Dissolved Air Flotation, DAF) ที่เหมาะสมกับน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีการปนเปื้อนไขมันและน้ำมันสูง
2. ศึกษาการใช้สารช่วยรวมตะกอนเพื่อกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล
3. ศึกษาการใช้กระบวนการตะกอนลอย (Dissolved Air Flotation, DAF) ร่วมกับการใช้สารช่วยรวมตะกอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมันในน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตไบโอดีเซล

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้รูปแบบการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีตะกอนลอย (DAF) ที่เหมาะสม หรือ ร่วมกับการใช้สารช่วยรวมตะกอนที่เหมาะสมและราคาถูก ซึ่งสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตไบโอดีเซล ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ได้รูปแบบการแยกไขมันและน้ำมันในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล โดยการใช้สารช่วยรวมตะกอนอย่างเหมาะสมและต้นทุนต่ำ สามารถนำไปใช้งานได้จริง
3. ช่วยแก้ไขปัญหาการย่อยสลายได้ยากโดยวิธีทางชีวภาพ เนื่องจากสามารถกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลได้มาก
4. รูปแบบหรือวิธีการในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่ได้นั้น สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาให้มีรูปแบบและวิธีการที่มีความเหมาะสมกับโรงงานผลิตไบโอดีเซลต่อไป เช่น การลดความสกปรกจนสามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนกับน้ำเสียอื่นๆ ที่มีสารอาหารสูง หรือนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น

## บทที่ 2

### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

#### 1. วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์

##### 1.1 สารเคมี

- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) (Analytical reagent grade ผลิตภัณท์ Labscan)
- กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) (Analytical reagent grade ผลิตภัณท์ Labscan)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Analytical reagent grade ผลิตภัณท์ Labscan)
- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (Analytical reagent grade ผลิตภัณท์ Labscan)
- สารส้ม ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ) (Analytical reagent grade ผลิตภัณท์ Ajax)
- โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ [ $Al_3O_4(OH)_{24}$ ]<sup>17</sup> (Commercials grade)
- เฟอริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) (Analytical reagent grade ผลิตภัณท์ Ajax)
- พอลิเมอร์ (Quaternary cationic polyamine) (Commercials grade)
- ไคโตซาน (Commercials grade)
- สารเคมีสำหรับวิเคราะห์บีโอดี (BOD<sub>5</sub>)
- สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ซีโอดี (COD)
- สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ไขมันและน้ำมัน (Grease & Oil)

##### 1.2 ตัวอย่างน้ำเสีย

น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลได้รับการอนุเคราะห์จากสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมันมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (Specialized R&D Center for Alternative Energy from Palm Oil and Oil Crops) ซึ่งเป็นน้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนการแยกเมทานอลและไบโอดีเซลที่หลงเหลืออยู่ยกแล้ว

### 1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องทดสอบจาร์เทส ผลิตภัณฑ์ PHIPPS & BIRD™
- ชุดทดลองกระบวนการตะกอนลอย (Dissolved Air Flotation Test Apparatus)
- พีเอชมิเตอร์ (pH meter) ผลิตภัณฑ์ HACH รุ่น Sension 1
- เครื่องวัดค่าความขุ่น (Turbidity meter) ผลิตภัณฑ์ HACH รุ่น 2100N
- เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity instrument) ผลิตภัณฑ์ YSI รุ่น 3200
- แผ่นกรองใยแก้ว GF/C (Whatman®) (pore size 1.2 ไมโครเมตร)
- แผ่นกรองใยแก้ว GF/C (Whatman®) (pore size 0.7 ไมโครเมตร)
- ปิ์มสุญญากาศ ผลิตภัณฑ์ Gast
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ผลิตภัณฑ์ Chyo รุ่น JK-200
- ตู้อบ ผลิตภัณฑ์ Memmert รุ่น 12880-K
- ชุดเตาหลุมวิเคราะห์ COD และ Oil & Grease ผลิตภัณฑ์ Electrothermal
- โถดูดความชื้น (Desiccators)
- เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- ถังเก็บน้ำพลาสติกสำหรับเก็บน้ำตัวอย่าง ขนาด 35 ลิตร
- ถังเก็บน้ำพลาสติกสำหรับเก็บรักษาน้ำตัวอย่างขนาด 75 ลิตร

## 2. พารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนและหลังการทดลอง

ตารางที่ 11 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์

พารามิเตอร์	เทคนิควิเคราะห์
พีเอช (pH)	Standard Methods 4500 - H <sup>+</sup> B.
ความขุ่น (Turbidity)	Standard Methods 2130 B.
ตะกอนไขมันและน้ำมัน (Oily Sludge)	Standard Methods 2540 D.
ไขมันและน้ำมัน (Grease & Oil)	Standard Methods 5520 D.
บีโอดี (BOD <sub>5</sub> )	Standard Methods 5210 B.
ซีโอดี (COD)	Standard Methods 5220 B.
อะลูมิเนียม (Al)	Standard Methods 3500-Al C.
เหล็ก (Fe)	Standard Methods 3500-Fe C.
ค่าสะaponนิฟิเคชัน (Saponification Number)	ASTM D 94

หมายเหตุ การวิเคราะห์ค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (Oily Sludge) ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย (SS)

## 3. วิธีการวิจัย

### 3.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

เก็บข้อมูลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจำนวน 6 ครั้ง ระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2551 ถึงเดือน เมษายน พ.ศ. 2552 และทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติน้ำเสีย ตามวิธีที่ปรากฏใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA and WEF., 1998) แสดงดังตารางที่ 11

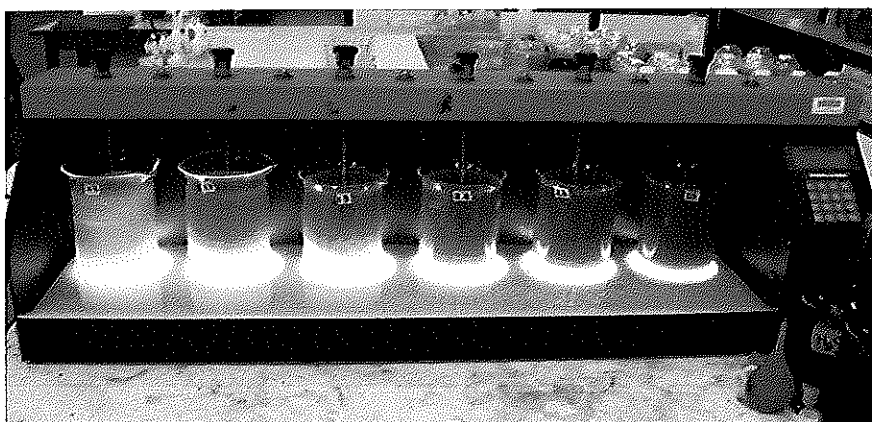
### 3.2 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด

#### 3.2.1 การศึกษานำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด

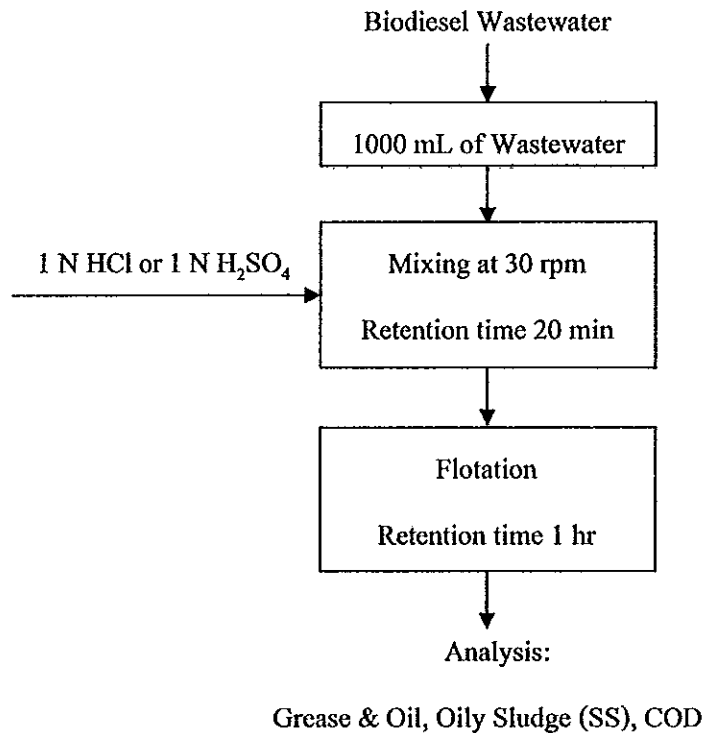
การศึกษานำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสีย ทำการทดสอบด้วยการปรับพีเอชเท่ากับ 1, 3, 5, และ 7 ของน้ำเสียปริมาตร 1,000 mL ด้วยกรด ไฮโดรคลอริก (1 N HCl)/ซัลฟิวริก (1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) โดยใช้เครื่องทดสอบจาร์เทส (ผลิตภัณฑ์ PHIPPS & BIRD™) (ภาพที่ 16) เพื่อควบคุมให้เข้ากัน เมื่อผ่านการควบคุมด้วยความเร็วรอบในการกวน 30 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาทีและวางทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (กรณีการ สิริสิงห์, 2544; เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียส่วนล่าง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางความลึก ของบีกเกอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณไขมันและน้ำมัน ค่าซีไอดี และค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน ด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย (SS) แสดงขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 17

#### 3.2.2 การศึกษาระยะเวลากักพักของวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด

การศึกษาระยะเวลากักพักของวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด ทำการทดลองโดยการ ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลปริมาตร 10 ลิตร โดยเลือกใช้ชนิดกรดและค่าพีเอช ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.2.1 ทำการตัดไขมันและน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำและ ใส่ไว้ในกระบอกตวงขนาด 100 mL เพื่อตรวจวัดปริมาณไขมันและน้ำมัน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย ส่วนล่างเพื่อวิเคราะห์ค่าไขมันและน้ำมันทุกๆวัน



ภาพที่ 16 เครื่องทดสอบจาร์เทส ผลิตภัณฑ์ PHIPPS & BIRD™



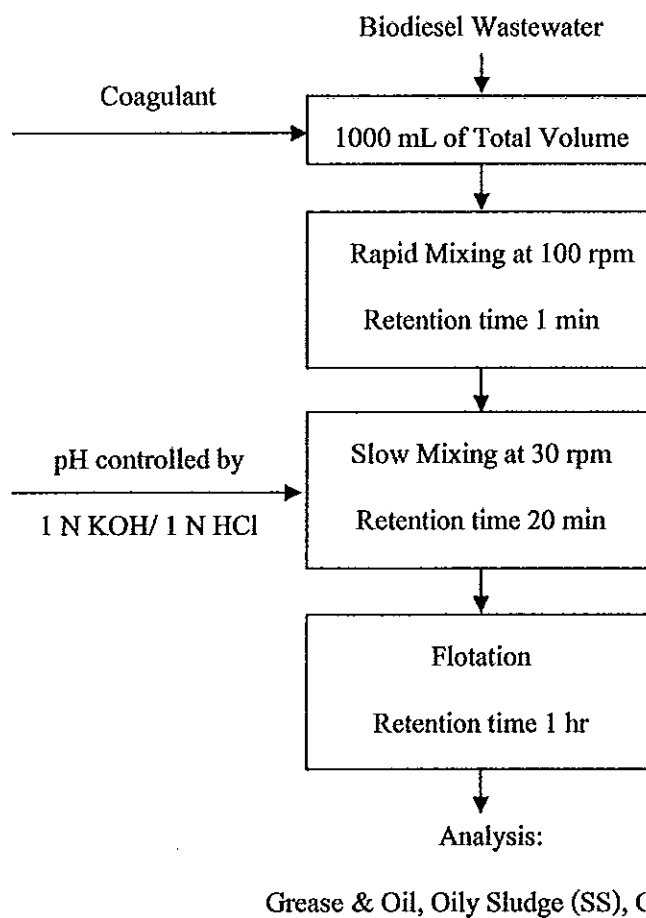
ภาพที่ 17 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด

### 3.3 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

การทดสอบกำจัดไขมันและน้ำมันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนใช้วิธีทดสอบจาร์เทสที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเครื่องทดสอบจาร์เทส (ผลิตภัณฑ์ PHIPPS & BIRD™) เพื่อวิเคราะห์หาชนิด ปริมาณสารช่วยรวมตะกอน และค่าพีเอชที่เหมาะสม โดยการเติมสารช่วยรวมตะกอนลงในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลให้ได้ค่าความเข้มข้นต่างๆกัน แสดงดังตารางที่ 12 และมีปริมาตรรวม 1,000 mL ทำการทดสอบจาร์เทส ด้วยการกวนเร็วที่ค่าความเร็วกวนในการกวน 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที และทำการกวนช้าต่อเนื่องจากกวนเร็วที่ค่าความเร็วกวนในการกวน 30 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที (กรรณิการ์ สิริสิงห์, 2544; เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2542) ทำการปรับค่าพีเอชในระหว่างการกวนช้า เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการกวนเร็ว – กวนช้า นำบีกเกอร์ออกจากเครื่องจาร์เทสและวางทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียส่วนล่างหรือส่วนบนของน้ำใสที่ตำแหน่งกึ่งกลางความลึกของบีกเกอร์ เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณไขมันและน้ำมัน ค่าซีโอดี และค่าตะกอนไขมันและน้ำมันด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย (SS) แสดงขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 18

ตารางที่ 12 ค่าความเข้มข้นของการเติมสารช่วยรวมตะกอนสำหรับการทดสอบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการ โคแอกกูเลชัน

Coagulant	Unit	Concentration
Alum	g/L	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
Poly Aluminium Chloride	g/L	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
Ferric chloride	g/L	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
Seawater	% (v/v)	10, 20, 30, 40, 50, 60
Chitosan	% (v/v)	2, 4, 6, 8, 10
Ferric chloride (0.5 g/L) + Quaternary cationic polyamine	% (v/v)	0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125

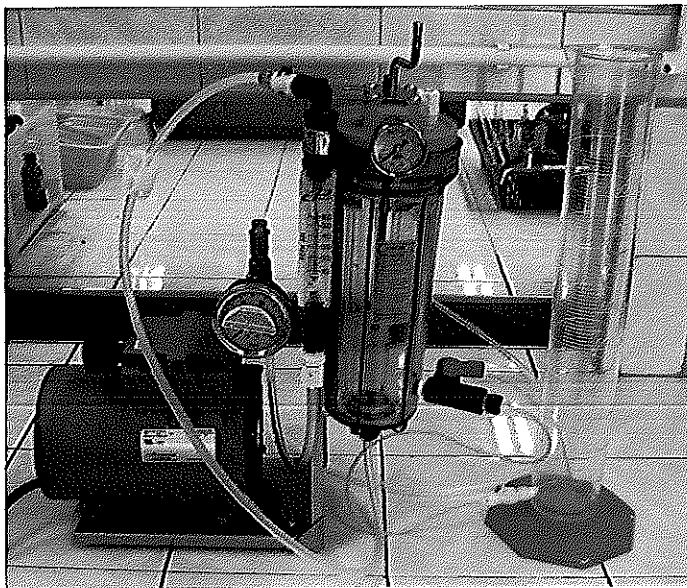


ภาพที่ 18 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการ โคแอกกูเลชัน



### 3.4 การนำขี้ดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ

การศึกษาระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศทุกการทดลองในงานวิจัยนี้เป็น การทดสอบแบบ Batch ด้วยชุดทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ (Dissolved Air Flotation Test Apparatus) (ภาพที่ 19)



ภาพที่ 19 ชุดทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ (Dissolved Air Flotation Test Apparatus)

#### 3.4.1 การทดสอบหาค่าความดัน และระยะเวลาักักในถังอัดอากาศที่เหมาะสม

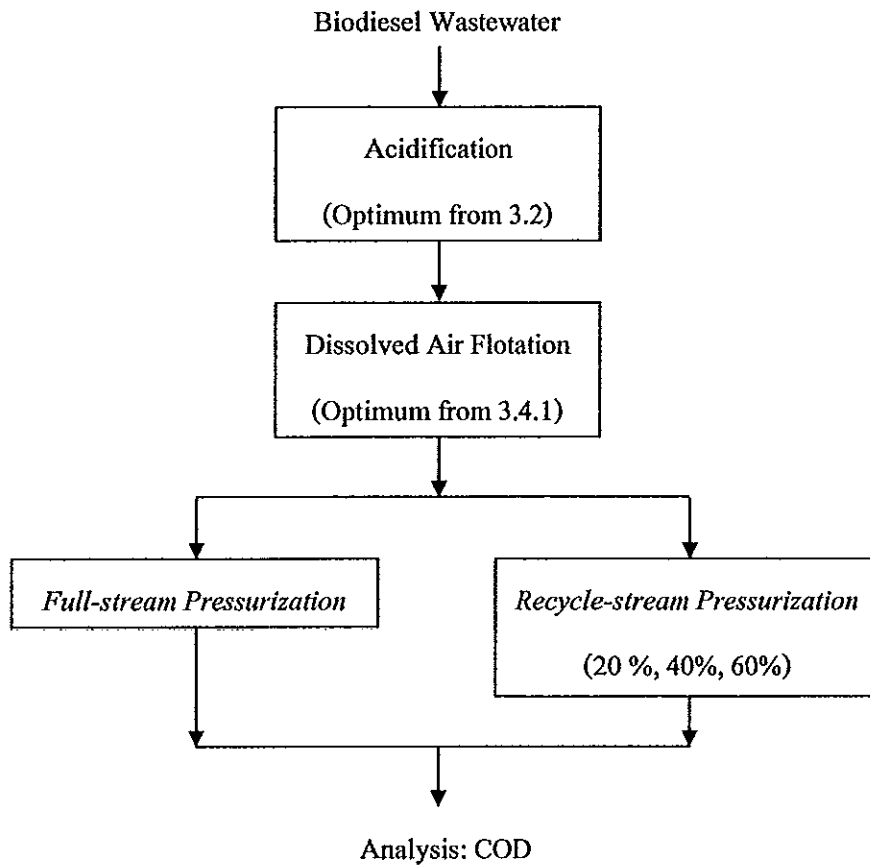
การหาค่าความดันและระยะเวลาักัก (Retention time) ในถังอัดความดัน (Pressure Cell) ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ ทำการทดสอบโดยการ บรรจุน้ำประปาปริมาตร 750 mL ในถังอัดความดัน ทำการทดสอบอัดอากาศด้วยค่าความดันและ ระยะเวลาักักต่างกันแสดงดังตารางที่ 13 พิจารณาความสามารถในการอัดอากาศของชุด ทดสอบด้วยการวิเคราะห์หาค่าออกซิเจนละลาย (Dissolved Oxygen) ตามวิธีที่ปรากฏใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA and WEF., 1998) เนื่องจากค่าอิ่มตัวของอากาศในน้ำขึ้นอยู่กับความสามารถละลายได้ของก๊าซออกซิเจนและ ไนโตรเจนในน้ำซึ่งแปรผันตามค่าความดัน (Henry's Law) (Eckenfelder, 2000)

ตารางที่ 13 ค่าความดันและระยะเวลาพักสำหรับการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบ  
อัดอากาศ

Parameter	Unit	Value
Pressures	bar gauge	3, 4, 5
Retention time	min	2, 4, 6, 8, 10

3.4.2 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ  
ร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด

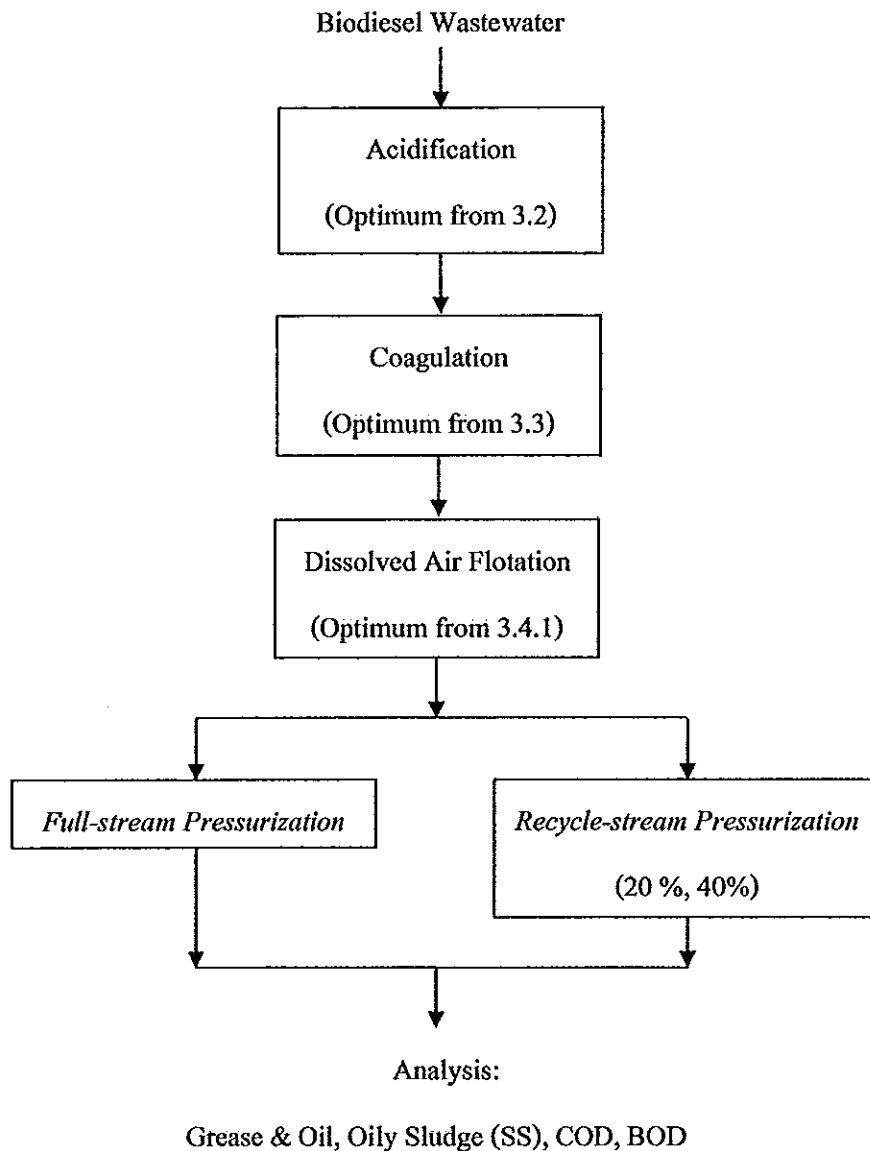
การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการตะกอนลอยร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดแสดงขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 20 ทำการทดสอบบำบัดน้ำเสียโดยใช้วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด โดยใช้ชนิดกรด ค่าพีเอชและระยะเวลาพักที่เหมาะสมจากการทดลองในหัวข้อที่ 3.2 นำน้ำเสียส่วนล่างทดสอบโดยชุดทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ (Dissolved Air Flotation Test Apparatus) ด้วยระบบ *Full-stream Pressurization* และ *Recycle-stream Pressurization* (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2535; อนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล, 2538; Eckenfelder, 2000; Shamrani *et al.*, 2002a; Metcalf & Eddy, 2004) ที่ค่าอัตราส่วนการ Recycle (R) น้ำกลับมาอัดอากาศเท่ากับร้อยละ 20, 40 และ 60 ของน้ำเข้า (Influent) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย ณ ตำแหน่งกึ่งกลางความลึกของถังลอยตะกอน (Flotation Cell) หลังผ่านการกักพักน้ำเสียเป็นเวลา 20 นาที เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดีตามวิธีที่ปรากฏใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA and WEF., 1998) เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัด



ภาพที่ 20 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการตะกอนลอยร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด

### 3.4.3 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการตะกอนลอยร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด และกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ศึกษากระบวนการตะกอนลอยร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอช และกระบวนการโคแอกกูเลชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมันและลดปริมาณสารช่วยรวมตะกอนสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันแสดงขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 21 ทำการทดสอบบำบัดน้ำเสียโดยใช้วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด ควบคุมค่าพีเอชและระยะเวลาพักที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.2 นำน้ำเสียส่วนล่างทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยวิธีการทดสอบจาร์เทส ด้วยการเลือกใช้นิโคตินสารช่วยรวมตะกอน และการควบคุมค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.3 นำน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันทดสอบต่อด้วยกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศโดยชุดทดสอบ (Dissolved Air Flotation Test Apparatus)



ภาพที่ 21 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการตะกอนลอยร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศด้วยระบบ *Full-stream Pressurization* และระบบ *Recycle-stream Pressurization* (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2535; อนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล, 2538; Eckenfelder, 2000; Shamrani *et al.*, 2002a; Metcalf & Eddy, 2004) ที่ค่าอัตราส่วนการ Recycle (R) น้ำกลับมายัดอากาศเท่ากับร้อยละ 20 และ 40 ของน้ำเข้า (Influent) จดบันทึกปริมาตรตะกอนที่ลอยขึ้นในถังลอยตะกอนทุกๆ 1 นาที เพื่อใช้สำหรับการหาค่าระยะเวลา

กักตักของถังลอยตะกอนและคำนวณอัตราตะกอนลอย (Rise Rate) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย ณ ตำแหน่งกึ่งกลางความลึกของถังลอยตะกอน (Flotation Cell) หลังผ่านการกักตักน้ำเสียเป็นเวลา 20 นาที เพื่อวิเคราะห์ปริมาณไขมันและน้ำมัน ค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และค่าตะกอนไขมันและน้ำมันของน้ำเสีย ณ ตำแหน่งกึ่งกลางความลึกของถังลอยตะกอน (Flotation Cell) แต่ละค่าอัตราส่วนการ Recycle (R) ทำการทดลอง 2 ครั้ง ครั้งแรกทดสอบโดยการใช้น้ำประปาเป็นน้ำสำหรับ Recycle และครั้งที่สองทดสอบโดยการใช้น้ำที่ผ่านการแยกตะกอนไขมันและน้ำมันออกแล้วในครั้งแรกเป็นน้ำสำหรับ Recycle เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัด

#### 4. การคำนวณค่าประสิทธิภาพการบำบัด

ค่าประสิทธิภาพการบำบัดค่าไขมันและน้ำมัน

$$= \left[ \frac{\text{ค่าไขมันและน้ำมันเริ่มต้น} - \text{ค่าไขมันและน้ำมันหลังบำบัด}}{\text{ค่าไขมันและน้ำมันเริ่มต้น}} \right] \times 100$$

ค่าประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดี

$$= \left[ \frac{\text{ค่าซีไอดีเริ่มต้น} - \text{ค่าซีไอดีหลังบำบัด}}{\text{ค่าซีไอดีเริ่มต้น}} \right] \times 100$$

ค่าประสิทธิภาพการบำบัดตะกอนไขมันและน้ำมัน

$$= \left[ \frac{\text{ค่าตะกอนไขมันและน้ำมันเริ่มต้น} - \text{ค่าตะกอนไขมันและน้ำมันหลังบำบัด}}{\text{ค่าตะกอนไขมันและน้ำมันเริ่มต้น}} \right] \times 100$$

## 5. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลด้วยการอธิบายเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลของค่าลักษณะน้ำเสียต่างๆ เพื่อประเมินความสามารถของวิธีการหรือกระบวนการบำบัดที่ใช้ทดสอบ รวมถึงวิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลก่อนและหลังการบำบัด ร่วมกับการพิจารณาความเป็นไปได้ถึงการนำไปใช้งานสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลในทางปฏิบัติจริง

## 6. สถานที่ศึกษา

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการเคมี สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ประเทศไทย

### บทที่ 3

#### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

##### 1. ลักษณะน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งได้รับการอนุเคราะห์จากสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (Specialized R&D Center for Alternative Energy from Palm Oil and Oil Crops) เนื่องจากในกระบวนการผลิตมีขั้นตอนการนำเมทานอลกลับไปใช้ใหม่ก่อนทำการล้างไบโอดีเซล และมีขั้นตอนการแยกไบโอดีเซลที่ปนเปื้อนออกมาพร้อมกับน้ำเสียแล้วเช่นกัน ดังนั้นน้ำเสียจึงปนเปื้อนเมทานอลและไบโอดีเซลปริมาณน้อย จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ พบว่าน้ำเสียมีสีขาวขุ่นและมีสภาพเป็นอิมัลชัน (Emulsion) (ภาพที่ 22) มีการปนเปื้อนสบู่ไขมันและน้ำมันปริมาณมาก แสดงดังตารางที่ 14 ซึ่งมีลักษณะน้ำเสียคล้ายกับรายงานการวิจัยของคารินทร์ ภูเก็ตงาม และคณะ (2551) และ K.I. Suehara *et al.*, (2005) (รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4 ในบทที่ 1) ซึ่งเป็นรายงานการวิจัยโดยใช้ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตไบโอดีเซลอื่นที่มีกระบวนการผลิตโดยใช้ด่างเป็นสารเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและใช้น้ำสะอาดสำหรับล้างไบโอดีเซลเหมือนกับสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ภาพที่ 22 น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

ตารางที่ 14 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่ศึกษา

Parameter	Unit	Value
Color	-	White (Emulsion)
pH	-	8.5 – 10.5
Oily Sludge	(mg/L)	1,500 – 5,000
Chemical Oxygen demand (COD)	(mg/L)	60,000 – 150,000
Biological Oxygen demand (BOD <sub>5</sub> )	(mg/L)	30,000 – 60,000
Grease & Oil (mg/L)	(mg/L)	7,000 – 15,000
Saponification Number	(mg.KOH/g)	4.77 – 18.79
Free Fatty Acid (FFA)	% Palmitic acid	0.14

ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล พบว่า ปริมาณไขมันและน้ำมัน (Grease & Oil) ซึ่งเป็นผลรวมของไขมันและน้ำมันทั้งหมดที่ปนเปื้อนมีค่าสูง ก็มีค่าอยู่ในช่วง 7,000 – 15,000 mg/L ผลจากการปนเปื้อนไขมันและน้ำมันปริมาณมากและเป็นสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบเป็นสารไฮโดรคาร์บอน (Wade, 2003; Jones, 2005) เป็นสาเหตุให้ค่าตัวแปรลักษณะสมบัติอื่นๆ สูงตามไปด้วย คือ ปริมาณการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดี (COD) และบีโอดี (BOD) ในช่วง 60,000 – 150,000 mg/L และ 30,000 – 60,000 mg/L ส่วนการวิเคราะห์ค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1,500 – 5,000 mg/L อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน พบว่ามีสารขนาดโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนของกระดาษกรอง (Glass Microfiber, GF/C 47 mm, Particle retention in liquid 1.2  $\mu\text{m}$  ผลิตภัณฑ์ Whatman, 2009) ลอดผ่านไปได้ สังเกตได้จากน้ำเสียที่ผ่านกระดาษกรองยังมีสีขาวขุ่นคล้ายน้ำเสียเริ่มต้น ผลจากการวิเคราะห์ค่าสะaponนิฟิเคชัน (Saponification Number) ของตัวอย่างน้ำเสียพบว่ามีค่าเท่ากับ 4.77 – 18.80 g.KOH/g ซึ่งมีค่าสูงเมื่อเทียบกับน้ำเสียทั่วไป น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลปนเปื้อนสบู่เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสะaponนิฟิเคชัน (Saponification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาข้างเคียงระหว่างการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นผลจากการปนเปื้อนกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ในน้ำมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นและการใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Gerpen *et al.*, 2004) โครงสร้างโมเลกุลของสบู่เป็นเกลือโซเดียมหรือโพแทสเซียมของสายโซ่กรดไขมัน ( $\text{RCOONa}^+$  หรือ  $\text{RCOOK}^+$ ) มีทั้งส่วนที่มีขั้ว (Carboxyl ion,  $-\text{COO}^-$ ) และไม่มีขั้ว (ไฮโดรคาร์บอน, R) สามารถสร้างพันธะกับน้ำและน้ำมันได้ และกรณีที่น้ำมีการปนเปื้อนสบู่ ไขมันและน้ำมัน มัก



เกิดการจับเรียงโครงสร้างที่เรียกว่าไมเซลล์ (Micelle) (Wade, 2003; Jones, 2005; en.wikipedia.org, 2009 อ้างจาก McBain, 1913; Hartley, 1936; Turro *et al.*, 1978; Seddon and Templer, 1995; Baeurle and Kroener, 2004) สารดังกล่าวสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้โดยไม่ลอยหรือตกจมเป็นเหตุให้น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมีสภาพเป็นอิมัลชัน (Emulsion) ชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil in Water, O/W) ซึ่งจัดเป็นระบบคอลลอยด์แบบหนึ่ง โดยสภาพอิมัลชันดังกล่าวเป็นระบบคอลลอยด์ที่มีอนุภาคประจุลบที่เกิดจากส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งในกรณีของน้ำเสียไบโอดีเซลนี้ประจุลบเกิดจากหมู่ฟังก์ชันของสบู่น้ำมันของหยดน้ำมันคิงคูดโมเลกุลของน้ำมันล้อมรอบเป็นผลให้เกิดการรวมตัวกันได้ยาก จึงจัดเป็นระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูง (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542; Clark *et al.*, 1971; Becher, 1977; Viessman and Hammer, 1985; Reynolds and Richards, 1996; Bunnaul, 1999; Qasim *et al.*, 2000; Zaki, 1997; Ichikawa *et al.*, 2006; Calderon and Schmitt, 2008)

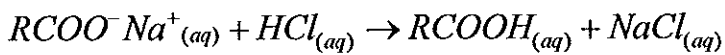
เนื่องจากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมีสภาพเป็นอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (Oil in Water Emulsion) ซึ่งเป็นผลจากการปนเปื้อนสบู่ ไขมันและน้ำมันปริมาณมาก จากการคำนวณอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดี (BOD<sub>5</sub>/COD) มีค่าประมาณ 0.4 – 0.5 ซึ่งมีแนวโน้มค่อนข้างต่ำ ถึงแม้ว่าสารที่ปนเปื้อนส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ แต่ขาดธาตุอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการ การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีชีวภาพ (Biological treatment) จึงมีประสิทธิภาพต่ำหรือบำบัดได้ยาก เพราะองค์ประกอบของน้ำเสียไม่เหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Microbial) (Suehara *et al.*, 2005) จากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสีย พบว่าการใช้วิธีการทางกายภาพและเคมีสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีสภาพเป็นอิมัลชันได้และมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดไขมันและน้ำมัน ซึ่งสามารถช่วยลดความสกปรกของน้ำเสียลงในระดับหนึ่งได้ก่อนทำการบำบัดขั้นต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการทางกายภาพและเคมีทดสอบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้ประโยชน์สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลในขั้นต้น (Pretreatment) แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 2. การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด

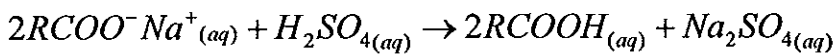
เนื่องจากไขมันและน้ำมันเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับผลิตไบโอดีเซลมีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid, RCOO) สามารถทำปฏิกิริยากับด่าง (Saponification) ที่ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือของกรดคาร์บอกซิลิก หรือ

สบู่ (Wade, 2003; Gerpen *et al.*, 2004; Jones, 2005) และป็นเป็อนออกมากับน้ำล้างไบโอดีเซล ดังนั้นวิธีการปรับค่าพีเอชโดยการเติมกรดแก่ (Acidification) เช่น กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) หรือกรดซัลฟิวริก (Sulfuric) เป็นการทำให้โครงสร้างโมเลกุลเกลือของกรดคาร์บอกซิลิกหรือสบู่เกิดปฏิกิริยาปลดปล่อยกรดคาร์บอกซิลิกหรือกรดไขมันอิสระ (Liberating the Fatty acid) (Patterson, 1975; EPAP, 2002; G.P.A., 2009) และรวมตัวกันกลายเป็นหยดน้ำมัน รายละเอียดดังแสดงไว้ในบทที่ 1 หัวข้อที่ 5.1.1 สมการที่ 10 และ 11 คือ

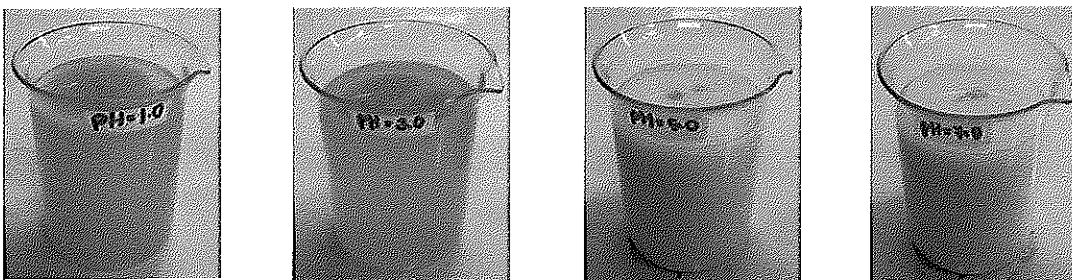
กรณีใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl)



กรณีใช้กรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)



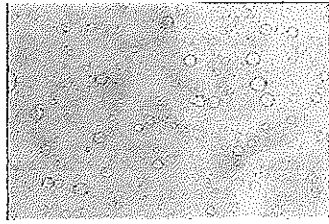
เมื่อหยดน้ำมันมีปริมาณมากและอยู่ชิดติดกันจนเกิดการรวมตัวกันระหว่างหยดน้ำมัน (Coalescence) กลายเป็นหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้น (Chen *et al.*, 2000; Dukhin *et al.*, 2001; Ichikawa *et al.*, 2004; Wengi *et al.*, 2006; Ichikawa, 2007) เป็นผลให้แรงลอยตัวของหยดน้ำมันมากพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างน้ำกับหยดน้ำมันเนื่องจากน้ำมันมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ดังนั้นหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่จึงลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ



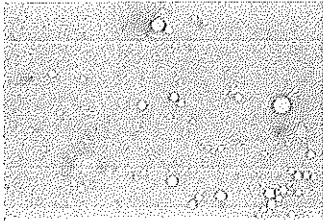
ภาพที่ 23 ลักษณะน้ำเสียหลังการปรับค่าพีเอชด้วยกรดเท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 (กรดไฮโดรคลอริก 1 N HCl; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)

การทดลองวิธีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยการเติมกรด 2 ชนิด คือ กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) และ กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ความเข้มข้น 1 Normal โดยทำการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 9.90 ให้มีลดลงเท่ากับ 7, 5, 3 และ 1 (ภาพที่ 23) (ภาพภาคผนวก ก 1) ลักษณะทางกายภาพจากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าการใช้กรดทั้งสองชนิดมีผลเหมือนกัน คือ ค่าพีเอชที่ลดลงจากการเติมกรดมีผลทำให้ไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเกิดพฤติกรรมการรวมตัวกัน (Coalescence) (Chen *et al.*, 2000; Dukhin *et al.*, 2001; Ichikawa *et al.*, 2004; Wengi *et al.*, 2006; Ichikawa, 2007) ที่เวลาเริ่มต้นหลังจากการปรับค่าพีเอชของน้ำเสีย ( $t = 0$ ) ปริมาณไขมันและน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวหน้าแปรผกผันกับค่าพีเอชของน้ำเสีย คือ ค่าพีเอชของน้ำเสียค่าลงมีผลทำให้ไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียเกิดการรวมตัวกันและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำมากขึ้น โดยที่การปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 3 และ 1 มีปริมาณไขมันน้ำมันลอยอยู่บนผิวหน้ามากกว่าที่พีเอชเท่ากับ 7 และ 5 มาก ( $1 > 3 \gg 5 > 7$ ) ต่อมาเมื่อระยะเวลาที่กัก (Retention time) หลังปรับค่าพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 1 ชั่วโมง ( $t = 1$  hr) ปริมาณไขมันและน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวหน้าของทุกชุดการทดลองมีปริมาณเพิ่มจากเดิม โดยเฉพาะการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 3 และ 1 สามารถสังเกตเหตุปริมาณไขมันและน้ำมันลอยอยู่บนผิวหน้าเพิ่มขึ้นจากเดิม ( $t = 0$ ) มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเกิดการแยกตัวลอยขึ้นสู่ผิวน้ำปริมาณมาก แต่ความขุ่นของน้ำส่วนล่างยังมีค่าสูงจนเครื่องวัดค่าความขุ่นของน้ำ (Turbidity meter) ไม่สามารถวัดค่าได้ (ขีดความสามารถเครื่องวัดค่าความขุ่นของน้ำได้สูงสุดไม่เกิน 4,200 NTU) แสดงให้เห็นว่าน้ำส่วนล่างยังคงมีการปนเปื้อนสิ่งสกปรกมาก

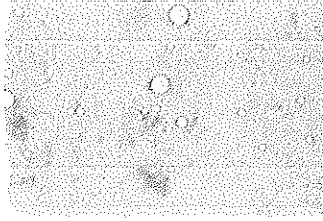
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (ภาพที่ 24) แสดงการรวมตัวของหยดน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลหลังการปรับพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก (1 N HCl) และ กรดซัลฟิวริก (1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) จากภาพของการทดลองปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลลดลงเท่ากับ 7 และ 5 แสดงให้เห็นการรวมตัวกันของหยดน้ำมันในน้ำเสียหลังการปรับพีเอช โดยสามารถสังเกตเห็นที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 มีขนาดหยดน้ำมันใหญ่และปริมาณมากกว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 แสดงถึงการปรับค่าพีเอชให้มีค่าลดลงด้วยการเติมกรดเพิ่มมากขึ้น มีผลให้เกิดปฏิกิริยาปลดปล่อยกรดไขมันอิสระได้มากขึ้นและรวมตัวกันเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็ก เมื่อหยดน้ำมันขนาดเล็กมีปริมาณมากและอยู่ชิดติดกันจนเกิดการรวมตัวกัน (Coalescence) ระหว่างหยดน้ำมันขนาดเล็กกลายเป็นหยดน้ำมันขนาดใหญ่ (Chen, *et al.*, 2000; Dukhin *et al.*, 2001; Ichikawa *et al.*, 2004; Wengi *et al.*, 2006; Ichikawa, 2007)



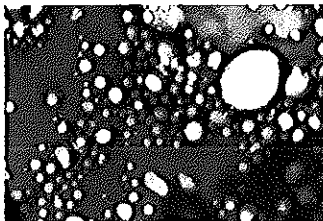
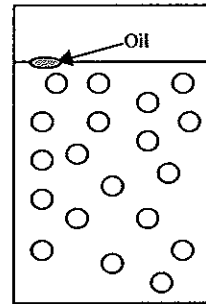
Raw wastewater (pH = 8.5 – 10.5)



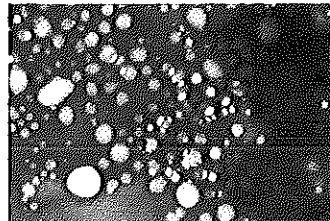
pH = 7 (HCl)



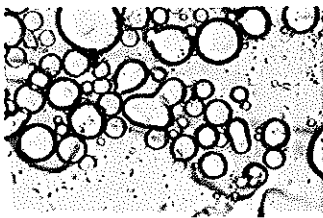
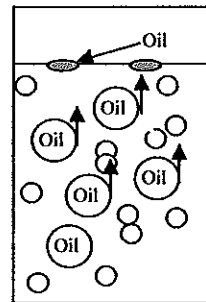
pH = 7 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)



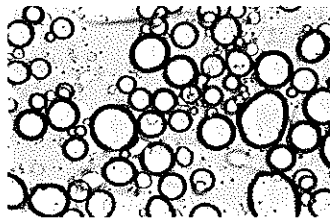
pH = 5 (HCl)



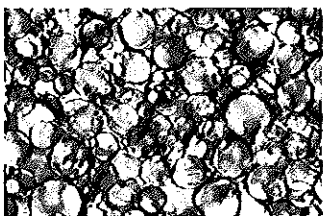
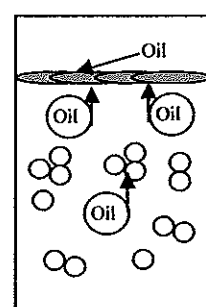
pH = 5 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)



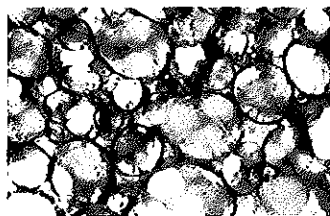
pH = 3 (HCl)



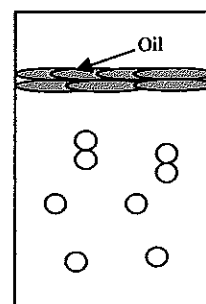
pH = 3 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)



pH = 1 (HCl)



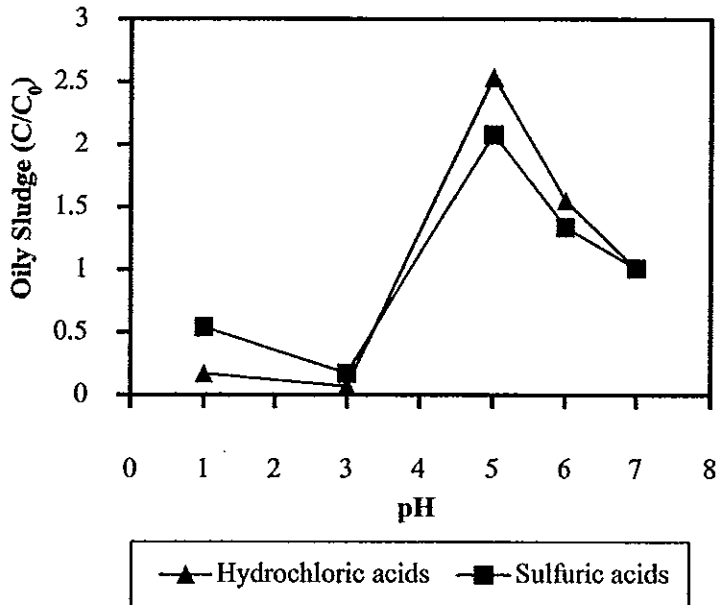
pH = 1 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)



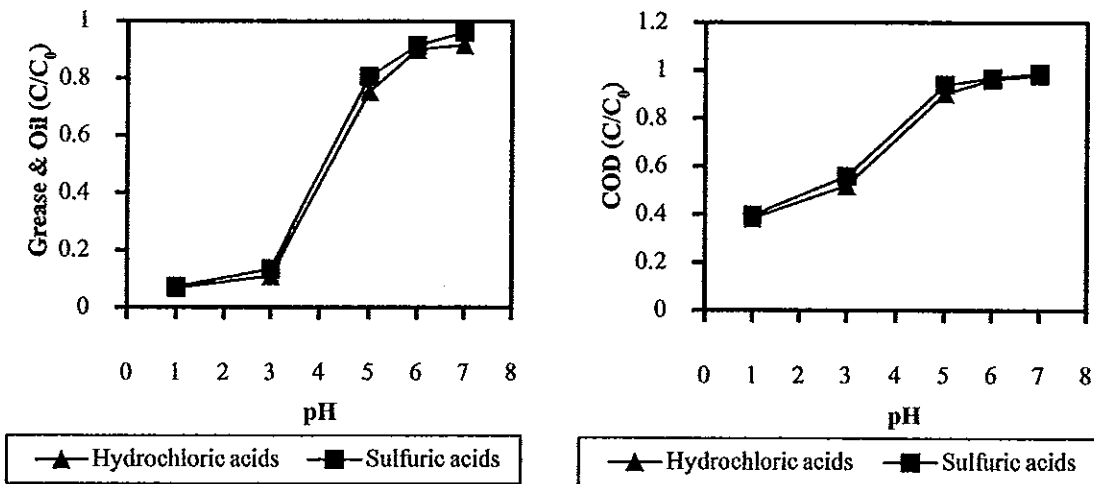
ภาพที่ 24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 20 เท่า แสดงพฤติกรรมการรวมตัวของหยดน้ำมันในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล เมื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลลดลงเท่ากับ 7, 5, 3 และ 1 (กรดไฮโดรคลอริก 1 N HCl; กรดซัลฟิวริก 1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

เมื่อหยดน้ำมันมีขนาดใหญ่จนมีแรงลอยตัวมากพอที่จะเอาชนะแรงพันธะระหว่างน้ำกับน้ำมันจึงสามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ จากนั้นเมื่อหยดน้ำมันขนาดใหญ่ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้หยดน้ำมันที่อยู่เหนือผิวน้ำมีปริมาณมากและอยู่ชิดติดกันจนเกิดการรวมตัวกันระหว่างหยดน้ำมันขนาดใหญ่กลายเป็นชั้นของน้ำมัน (Clear Oil) (Yan, *et al.*, 1996) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมกรด (กรดไฮโดรคลอริก (1 N HCl) หรือ กรดซัลฟิวริก (1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียลดลงต่ำกว่าหรือเท่ากับ 3 รวมถึงระยะเวลาพักหลังจากการปรับค่าพีเอชนาน มีผลทำให้ไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเกิดการรวมตัวกันและลอยแยกออกจากน้ำได้มากขึ้น เป็นเหตุให้เกิดการลดสภาพอิมัลชัน (Demulsification) ในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

ผลการวิเคราะห์ค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (Oily Sludge) ของชุดการทดลองบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดทั้งสอง 2 ชนิด ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าของแข็งแขวนลอย (SS) ของตัวอย่างน้ำเสีย ณ ตำแหน่งกึ่งกลางความลึกของบีกเกอร์ ซึ่งในกรณีนี้ค่าตะกอนไขมันและน้ำมันที่ตรวจวิเคราะห์ได้ คือ สารประกอบของสบู่ ไขมันและน้ำมันที่มีขนาดโครงสร้างใหญ่กว่าวุ้นของกระดาษกรองที่ใช้ในการวิเคราะห์ (GF/C, Particle retention in liquid 1.2  $\mu$ m ผลิตภัณฑ์ Whatman, 2009) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (C/C<sub>0</sub>) ณ ค่าพีเอชต่างๆ แสดงดังภาพที่ 25 พบว่าการทดลองใช้กรดทั้ง 2 ชนิดปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลได้ผลการสังเคราะห์กราฟที่มีลักษณะคล้ายกัน คือ ในช่วงการลดลงของ ค่าพีเอชจาก 7 ถึง 5 เส้นกราฟแสดงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (C/C<sub>0</sub>) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่าน้ำเสียเริ่มต้น (C/C<sub>0</sub> > 1) ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาปลดปล่อยกรดไขมันอิสระและรวมตัวกันเป็นหยดน้ำมัน หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นผลจากค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 5 มีผลให้หมู่ฟังก์ชันกรดคาร์บอกซิล (-COO<sup>-</sup>) บนผิวหยดน้ำมันมีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง (Neutral, ZPC or Ioelectric pH) (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542; Bunnaul, 1999) เป็นผลให้หยดน้ำมันสามารถอยู่ชิดติดกันและเกิดการรวมตัวกันได้ แต่เนื่องจากน้ำมันมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ดังนั้นเมื่อหยดน้ำมันรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นจนมีแรงลอยตัวของหยดน้ำมันมากพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างน้ำกับหยดน้ำมัน หยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่จึงสามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ สังเกตได้จากกราฟในช่วงค่าพีเอชต่ำกว่า 5 ค่าตะกอนไขมันและน้ำมันมีปริมาณลดลง เนื่องจากไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเมื่อปรับค่าพีเอชต่ำกว่า 5 เกิดการรวมตัวกันและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้มากขึ้น สามารถสังเกตได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและค่าไขมันและน้ำมัน (C/C<sub>0</sub>) ณ ค่าพีเอชต่างๆ แสดงดังภาพที่ 26



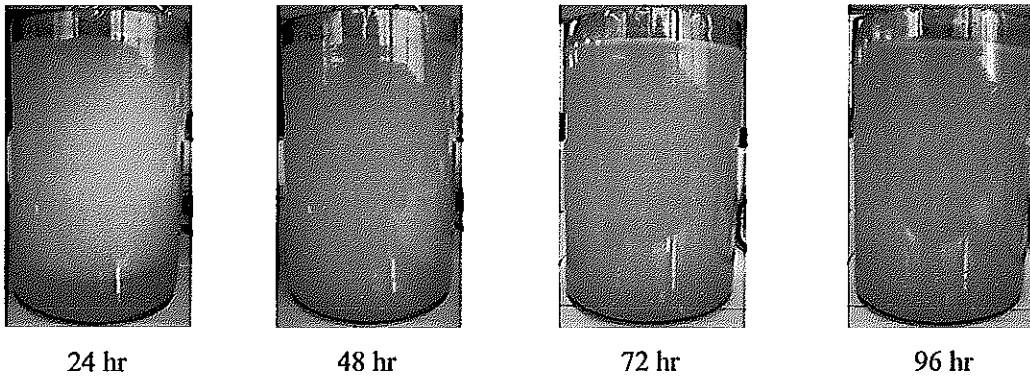
ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมันของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลหลังผ่านการปรับค่าพีเอชด้วยกรดเท่ากับ 1, 3, 5, และ 7 (ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง; C<sub>0</sub> คือค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน ของน้ำเสียเริ่มต้น; C คือค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน ณ ค่าพีเอชต่างๆ)



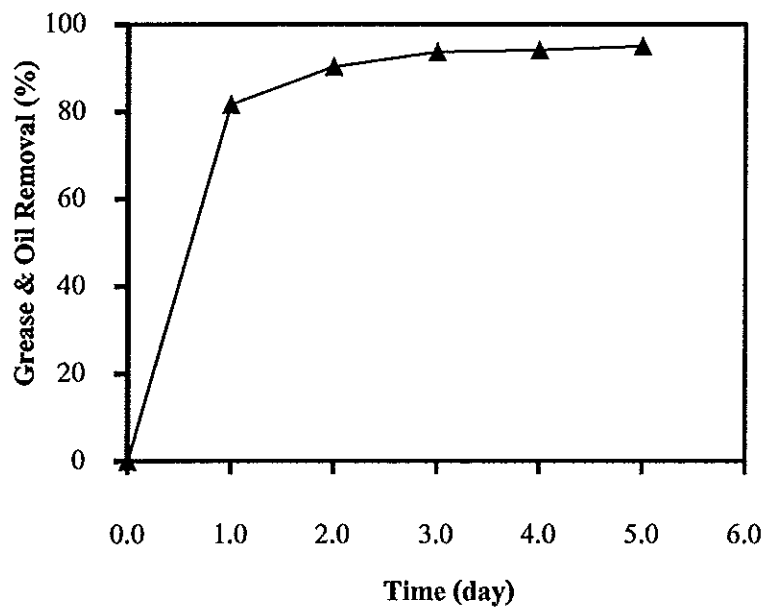
ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน และค่าซีโอดีของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลหลังผ่านการปรับค่าพีเอชด้วยกรดเท่ากับ 1, 3, 5, และ 7 (ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง; C<sub>0</sub> คือค่าไขมันและน้ำมันและค่าซีโอดีของน้ำเสียเริ่มต้น; C คือค่าไขมันและน้ำมันและค่าซีโอดี ณ ค่าพีเอชต่างๆ)

สังเกตเห็นได้ว่าค่าปริมาณไขมันและน้ำมัน ( $C/C_0$ ) ของทุกค่าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 1 แสดงถึงปริมาณไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย (น้ำในส่วนด้านล่างชั้นไขมันและน้ำมัน) หลังผ่านการปรับค่าพีเอชลดลงน้อยกว่าปริมาณไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเริ่มต้น และการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียมียุคต่ำกว่า 3 เป็นผลให้ปริมาณไขมันและน้ำมันในส่วนล่างลดลงมากกว่าร้อยละ 80 ของค่าปริมาณไขมันและน้ำมันของน้ำเสียเริ่มต้น ( $C/C_0 < 0.2$ ) แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาปลดปล่อยกรดไขมันอิสระได้ดีเป็นผลให้ไขมันและน้ำมันรวมตัวกันและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้มาก หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลต่ำกว่า 3 เป็นช่วงค่าพีเอชที่มีค่าต่ำกว่าค่า Isoelectric pH (ZPC) ของหมู่ฟังก์ชันกรดคาร์บอกซิล ( $-COO^-$ ) ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันกรดคาร์บอกซิลจึงกลายเป็นกรดคาร์บอกซิลิก ( $COOH$ ) และเกิดการรวมตัวกันเป็นหยดน้ำมันลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ การลดลงของปริมาณไขมันและน้ำมันซึ่งเป็นสารอินทรีย์เป็นผลให้ค่าความสกปรกของน้ำเสียเนื่องจากการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีลดลงตามไปด้วย ( $C/C_0 < 1$ )

การศึกษาระยะเวลากักพัก (Retention time) ของการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด (ภาพที่ 27) เป็นการศึกษาเพื่อทราบถึงระยะเวลากักพักที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน จากการศึกษาวิธีการปรับพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยการเติมกรดไฮโดรคลอริก (1 N HCl) และกรดซัลฟูริก (1 N  $H_2SO_4$ ) มีค่าเท่ากับ 3 มีผลให้เกิดการแยกไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียได้มาก ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกใช้การปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลให้มีค่าเท่ากับ 3 โดยทำการทดสอบกับน้ำเสียเริ่มต้นที่มีค่าไขมันและน้ำมันเท่ากับ 8,250 และค่าพีเอชเท่ากับ 10.40 ซึ่งผลจากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียแปรผันตามระยะเวลากักพักน้ำหลังการปรับค่าพีเอชที่นานขึ้น (ภาพที่ 28) โดยช่วงระยะเวลากักพักวันแรกประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และในช่วงระยะเวลากักพักนาน 1 ถึง 3 วัน ประสิทธิภาพการแยกไขมันจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย แต่หลังจาก 3 วัน ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเป็นผลจากปริมาณไขมันและน้ำมันที่คงเหลือในน้ำเสียลดน้อยลง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการปรับค่าพีเอช ควรมีระยะเวลากักพักน้ำเสียหลังการปรับค่าพีเอชให้มีค่าต่ำกว่า 3 อย่างน้อย 3 วัน อย่างไรก็ตามกรณีโรงงานผลิตไบโอดีเซลขนาดเล็กที่มักใช้น้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้วเป็นวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งมีช่วงระยะเวลาของการรวบรวมน้ำมันให้เพียงพอกับการผลิตที่ต้องการ และมักใช้เวลานานในการรวบรวมวัตถุดิบ ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการปรับค่าพีเอชให้มีค่าต่ำกว่า 3 สามารถกักพักน้ำเสียจนกว่าจะมีการผลิตไบโอดีเซลในครั้งต่อไป เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้ได้มากที่สุด และช่วยลดภาระในการบำบัดของขั้นตอนต่อไป

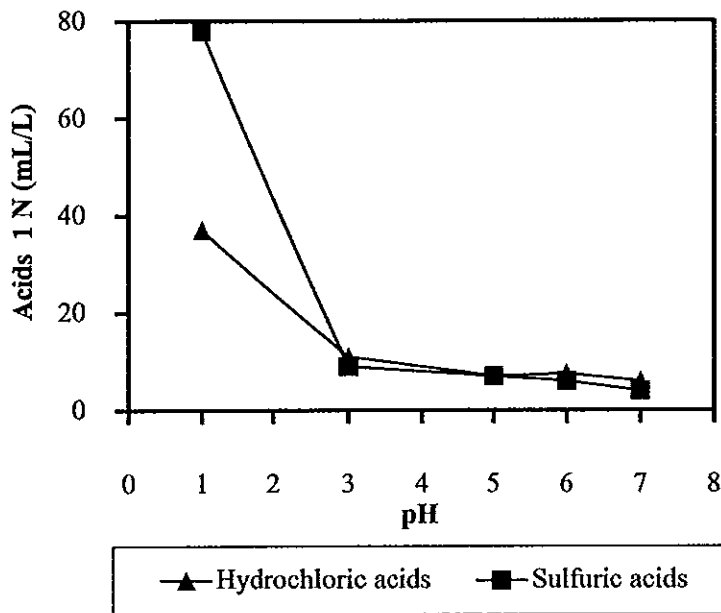


ภาพที่ 27 การทดสอบหาระยะเวลากักพัก (Retention time) ของวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด (กรดไฮโดรคลอริก 1 N HCl; ปรับพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 3)



ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันและน้ำมันที่ระยะเวลากักพักต่างๆ หลังผ่านการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลเท่ากับ 3 (เติม 1 N HCl)





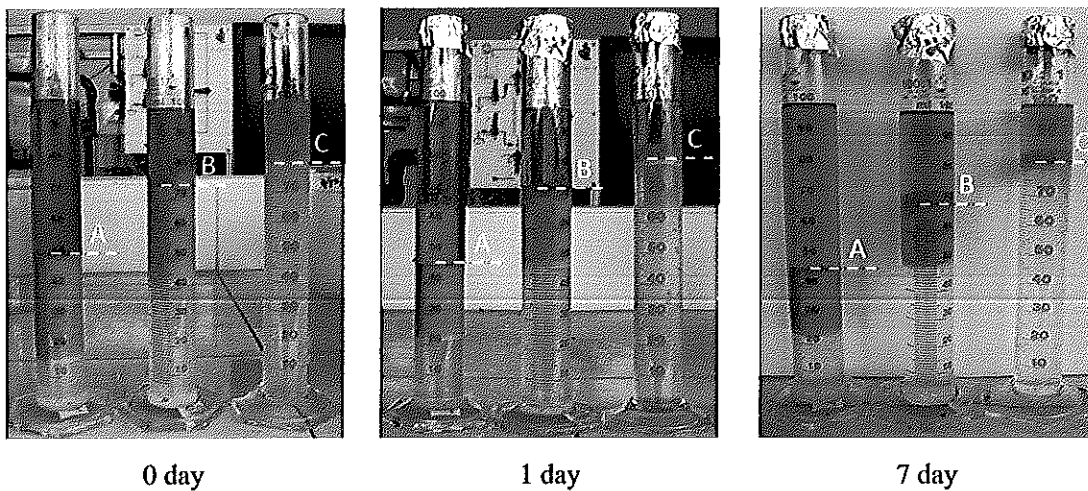
ภาพที่ 29 ปริมาณการเติมกรดไฮโดรคลอริก (1 N HCl) และ กรดซัลฟิวริก (1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) สำหรับปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

ผลจากการทดลองวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดทั้งสองชนิดมีความสามารถกำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียและมีปริมาณการเติมกรดทั้งสองชนิดใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 29) แต่การใช้กรดซัลฟิวริกอาจมีผลทำให้เกิดการปนเปื้อนสารซัลเฟต (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) ในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยวิธีนี้ ซึ่งหากมีการปนเปื้อนสารดังกล่าวในน้ำเสียปริมาณมากอาจส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ กรณีมีการปล่อยน้ำเสียหลังจากระบวนการบำบัดออกนอกโรงงาน หรือส่งผลกระทบต่อภาคีการบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เนื่องจากเกิดก๊าซไข่เน่า (H<sub>2</sub>S) ในระบบบำบัดดังกล่าวได้ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นผู้วิจัยจึงแนะนำให้ใช้กรดไฮโดรคลอริก (1 N HCl) สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด อย่างไรก็ตามการใช้กรดไฮโดรคลอริกจะมีต้นทุนในการบำบัดสูงกว่ากรดซัลฟิวริก (ตารางที่ 15) และโรงงานผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่มีการใช้กรดซัลฟิวริกในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลสำหรับลดกรดไขมันในน้ำมันสารตั้งต้น (Re - Fatty acid) ดังนั้นในทางปฏิบัติสามารถเลือกใช้กรดซัลฟิวริกแทนได้ แต่อาจต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียเพื่อลดปริมาณสารซัลเฟต (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

ตารางที่ 15 ค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีของวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด

Acid	Dosage (mL/L)	Costs (Baht/ m <sup>3</sup> )
Hydrochloric Acid (1 N HCl)	8.0 – 15.0	8.0 – 15.0
Sulfuric Acid (1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	8.0 – 12.0	0.5 – 1.5

หมายเหตุ จำนวนค่าใช้จ่าย ณ เดือน กันยายน พ.ศ. 2552



ภาพที่ 30 ไขมันและน้ำมันที่ได้จากวิธีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกรด (A, B, C คือ จุดแยกระหว่างชั้นไขมันกับชั้นน้ำมัน)

เมื่อพิจารณาไขมันและน้ำมันที่ลอยอยู่เหนือผิวน้ำหลังปรับค่าพีเอชเท่ากับ 3 และระยะเวลาพักเท่ากับ 3 วัน จากการทดลองตรวจวัดปริมาณไขมันและน้ำมันด้วยวิธีการแยกชั้น ไขมันและน้ำมันส่วนบนมากก็พักในกระบอกตวงเป็นเวลา 7 วัน (ภาพที่ 30) พบว่ามีปริมาณไขมันและน้ำมันเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 1.0 – 3.0 โดยปริมาตร (10 – 30 mL Grease & Oil/L of Biodiesel Wastewater) เมื่อเวลาพักเพิ่มขึ้นเป็น 1 และ 7 วัน พบว่าไขมันและน้ำมันจะเกิดปฏิกิริยารวมตัวกันกลายเป็นน้ำมัน (Clear Oil) ได้เล็กน้อย ผลจากการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันในรูปกรดพาลมิติกในส่วนของน้ำมันที่แยกออกมาจากน้ำเสียพบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 18.10 ซึ่งน้ำมันที่แยกได้นี้มีค่ากรดไขมันสูงกว่าร้อยละ 2.0 ดังนั้นอาจพิจารณามากลับมาผลิตไบโอดีเซลใหม่ได้โดยวิธี Two – step processes (Ramadhas *et al.*, 2004b; WMRC, 2006; Chongkhong *et al.*, 2007)

เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการบำบัดเสียจากการผลิตโอดีเซลให้ได้มากที่สุด และเป็น การเพิ่มมูลค่าให้กับไขมันและน้ำมันที่ได้จากการบำบัดน้ำเสีย และช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับการ บำบัดน้ำเสียได้อีกทางหนึ่ง เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดมีต้นทุนการ บำบัดต่อหน่วยสูง แต่ถึงแม้ว่าการใช้วิธีการปรับพีเอชของน้ำเสียจะสามารถลดปริมาณไขมันและ น้ำมันได้ แต่ยังมีปริมาณไขมันและน้ำมัน รวมถึงค่าซีโอดีคงเหลืออยู่ในน้ำเสียหลังผ่านการ ใช้ วิธีการปรับค่าพีเอชสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน และมีค่าพีเอชต่ำ (ตารางที่ 16) จำเป็นจะต้องใช้ กระบวนการบำบัดอื่นเพิ่มเติม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มทางเลือก สำหรับการบำบัดน้ำ เสียจากการผลิตไบโอดีเซล

ตารางที่ 16 ค่าไขมันและน้ำมันและค่าซีโอดีคงเหลือในน้ำเสียและประสิทธิภาพการกำจัดของ วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด

Parameter	Residual (mg/L)	Efficiency (%)
Grease & Oil	400 – 2,000	85 – 95
COD	20,000 – 36,000	50 – 70

หมายเหตุ เติม 1 N HCl; ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 3; ระยะเวลาพักเท่ากับ 3 วัน

### 3. การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ผลการศึกษาการใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอน และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ โคแอกกูเลชันของสารช่วยรวมตะกอนแต่ละชนิด ด้วยวิธีการทดสอบจาร์เทส (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2542) ณ อุณหภูมิห้อง ประกอบด้วย การทดสอบหาชนิดสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออนินทรีย์และประเภทสารอินทรีย์ การวิเคราะห์ ปริมาณสารเคมี ตลอดจนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ โคแอกกูเลชันของสารช่วย รวมตะกอนแต่ละชนิด โดยเฉพาะการควบคุมค่าพีเอช เนื่องจากค่าพีเอชมีความสำคัญอย่างมาก ต่อกลไกของกระบวนการ โคแอกกูเลชัน เพื่อให้เกิดการรวมตะกอน (Flocculation) ได้ดี (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542; Reynolds and Richards, 1996; Canizares *et al.*, 2009) โดยมี รายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.1 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก

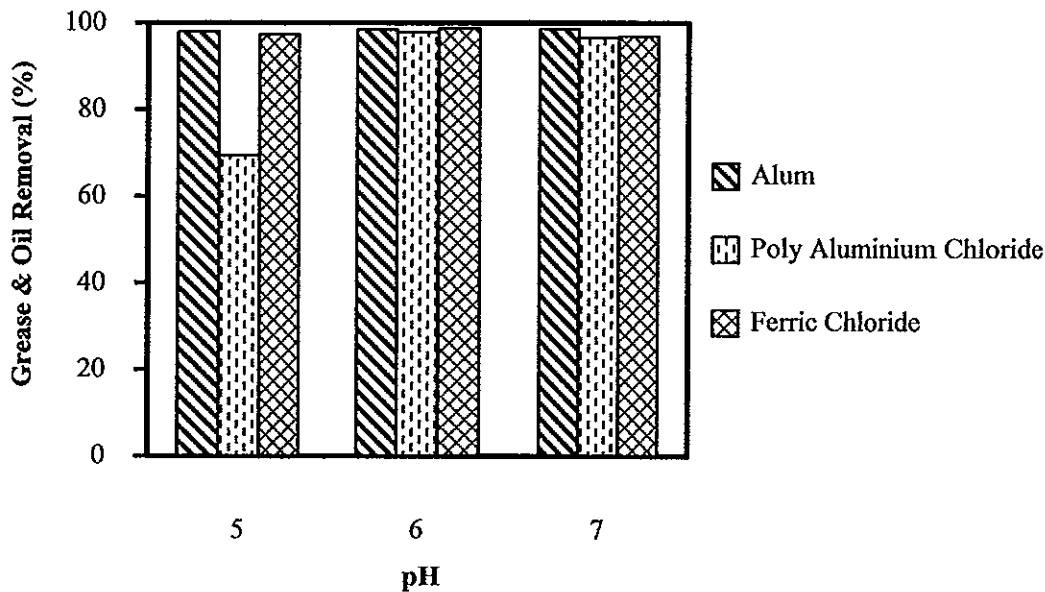
เมื่อพิจารณาผลของค่าพีเอชต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน จากการทดลองใช้เกลืออะลูมิเนียม 2 ชนิด และเกลือของเหล็ก 1 ชนิด คือ สารส้ม (Alum) โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ปริมาณความเข้มข้น 0.5 – 10.0 g/L โดยไม่มีการควบคุมค่าพีเอชระหว่างการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยวิธีการทดสอบจาร์เทส พบว่าการเติมสารช่วยรวมตะกอนทั้งสามชนิดมีผลทำให้เกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้น้อย ทั้งนี้เนื่องจากสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กต้องการค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ของน้ำเหมาะสมเพียงพอเพื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542; Clark *et al.*, 1971; Becher, 1977; Viessman and Hammer, 1985; Reynolds and Richards, 1996) ดังนั้นหากไม่ควบคุมค่าพีเอชจะมีผลให้ค่าพีเอชสุดท้ายต่ำกว่า 4 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมต่อการทำโคแอกกูเลชันและแสดงถึงสภาวะขาดแคลน Alkalinity ในน้ำ จึงถือว่าที่สภาวะดังกล่าวไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควรเทียบกับปริมาณสารช่วยรวมตะกอนที่ใช้ปริมาณมาก ไม่เหมาะสมเพื่อใช้งานในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงทำการศึกษาการควบคุมค่าพีเอช ระหว่างการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กทั้งสามชนิดดังกล่าว

ผลจากการตรวจวัดค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลหลังการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กทั้งสามชนิดที่ค่าความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 g/L ตามลำดับ พบว่ามีผลทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียมีค่าลดลงอยู่ในช่วงที่ค่าเอชเท่ากับ 2 – 4 (ค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลเริ่มต้นเท่ากับ 8.5 – 10.5) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำเสียแปรผกผันกับปริมาณการเติมสารช่วยรวมตะกอน คือ ค่าพีเอชของน้ำเสียลดลงเมื่อปริมาณการเติมสารช่วยรวมตะกอนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าช่วงค่าพีเอชดังกล่าวจะมีค่าต่ำกว่าค่า Isoelectric (Neutral, ZPC) ของหมู่ฟังก์ชันกรดคาร์บอกซิล ( $-COO^-$ ) บนผิวหยคน้ำมันกลายเป็นกรดคาร์บอกซิลิก ( $COOH$ ) (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542; Bunnaul, 1999) แต่ในระหว่างการทดลองไม่สังเกตเห็นหยคน้ำมันเกิดขึ้นในระหว่างการทำโคแอกกูเลชันก่อนปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเพิ่มขึ้นด้วยด่าง จึงอาจกล่าวได้ว่าค่าพีเอชที่ต่ำลงเนื่องจากการเติมสารช่วยรวมตะกอนสำหรับการทำโคแอกกูเลชันไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปลดปล่อยกรดไขมันอิสระหรืออาจเกิดขึ้นน้อยมากหรือใช้เวลานานกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันจนไม่อาจสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าขณะทำโคแอกกูเลชัน

เนื่องจากการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กลงในน้ำเป็นผลให้โมเลกุลของอะลูมิเนียมและเหล็กถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ คือ  $(Al(H_2O)_6)^{3+}$  และ  $(Fe(H_2O)_6)^{3+}$  (หรืออาจเขียนย่อเป็น  $Al^{3+}$  และ  $Fe^{3+}$ ) ซึ่งสารประกอบนี้ไม่รวมตัวกับอนุภาคคอลลอยด์ (มันลิน คัลลิวเวสท์, 2542; Reynolds and Richards, 1996) สารประกอบอะลูมิเนียมและเหล็กสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกลายเป็นสารประกอบ Hydroxo Complex และสามารถทำปฏิกิริยาและรวมตัวกันจนกลายเป็นสารคอมเพล็กซ์ที่มีอะลูมิเนียมหรือเหล็กมากกว่า 1 อะตอมซึ่งเรียกว่า Polymeric Hydroxo Complex โดยค่าพีเอชของน้ำเป็นปัจจัยกำหนดความเข้มข้นและชนิดของไอออนคอมเพล็กซ์ต่างๆ โดยเมื่อค่าพีเอชของน้ำเข้าใกล้ความเป็นกลางจะเกิดสารประกอบ  $Al(OH)_3$  หรือ  $Fe(OH)_3$  ซึ่งเป็นผลึกของแข็งและสามารถรวมตัวกับอนุภาคคอลลอยด์ได้ และกลายเป็นตะกอนแยกออกจากน้ำซึ่งเป็นกลไกการกำจัดคอลลอยด์ที่เรียกว่า Sweep Coagulation (มันลิน คัลลิวเวสท์, 2542) โดยสารประกอบ  $Al(OH)_3$  จะเกิดขึ้นที่ค่าพีเอชเหมาะสมประมาณ 4.5 – 8 ส่วนค่าพีเอชที่ทำให้เกิดสารประกอบ  $Fe(OH)_3$  มีช่วงของค่าพีเอชกว้างมากกว่าสารส้มคืออยู่ในช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมประมาณ 2 – 14 (Reynolds and Richards, 1996) ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงดังกล่าวได้ด้วยการเติมกรดและด่าง

ผลจากการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก คือ สารส้ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ บำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล พบว่าเกิดการรวมตะกอน (Flocculation) เมื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการเติมสารทั้งสามชนิดใกล้เคียงค่าพีเอชเท่ากับ 5 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดค่าสำหรับการควบคุมค่าพีเอชระหว่างการทดสอบจาร์เทสเท่ากับ 5, 6, และ 7 ซึ่งค่าพีเอชดังกล่าวไม่ต่ำหรือสูงจนเกินไปจนอาจส่งผลต่อการกัดกร่อนเครื่องมืออุปกรณ์ในการใช้งานจริง และการใช้พีเอชสูงกว่า 7 จะทำให้ค่าความเป็นด่างมากเกินไปและใกล้เคียงกับน้ำเสียเริ่มต้น ซึ่งจากการทดสอบเติมสารทั้งสามชนิดและควบคุมพีเอชเท่ากับ 5, 6 และ 7 (ภาพที่ 31) พบว่าสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันใกล้เคียงกันคือสามารถกำจัดไขมันและน้ำมัน ได้มากกว่าร้อยละ 95 ทุกการควบคุมค่าพีเอช แต่การใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่าการควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 มีประสิทธิภาพต่ำกว่าร้อยละ 70 แต่มีประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกับสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์เมื่อควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 6 และ 7 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันเพื่อบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยเติมสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์จะต้องควบคุมค่าพีเอชให้มีค่าอยู่ในช่วง 5 – 7 ส่วน โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์จะต้องควบคุมค่าพีเอชให้มีค่าอยู่ในช่วง 6 – 7 จึงจะสามารถทำให้เกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ดี และจากผลการทดลองอาจกล่าวได้ว่าการควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 6 เป็นผลให้

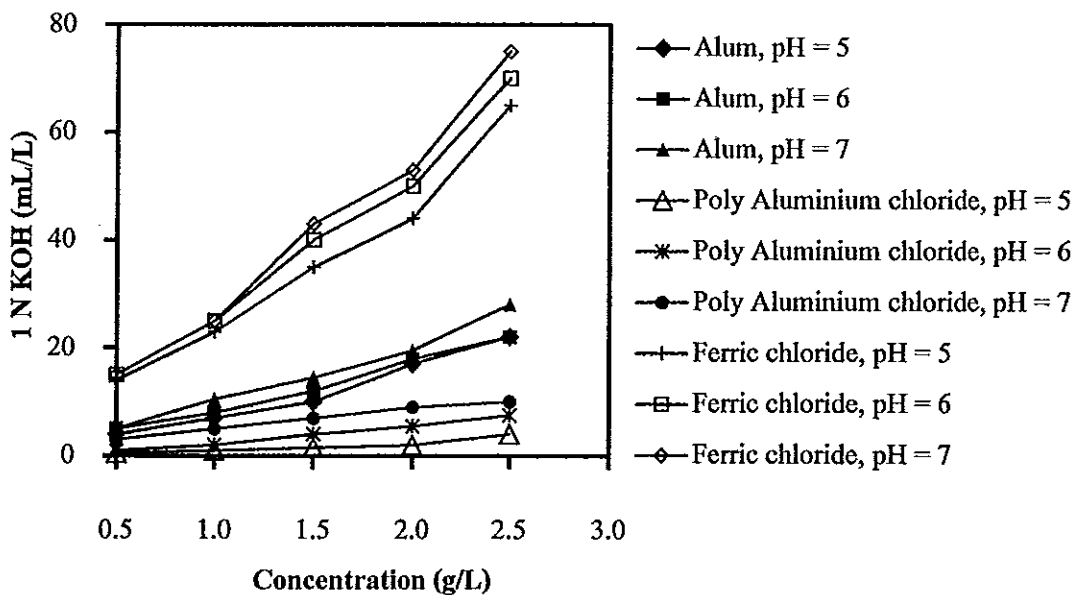
กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันสูงสุด



ภาพที่ 31 ผลของค่าพีเอชของกระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กต่อประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน (ความเข้มข้นของสารช่วยรวมตะกอนเท่ากับ 1.5 g/L; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)

การควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียสำหรับกระบวนการ โคแอกกูเลชัน สามารถเลือกใช้สารเคมีได้หลายชนิด เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และปูนขาว ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากเป็นสารเคมีที่ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นการเลือกใช้สารดังกล่าวทำให้ไม่ต้องจัดหาสารเคมีชนิดอื่นเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งจากการทดลองใช้สารเคมีทั้งสองชนิดที่ค่าความเข้มข้น 1 N เท่ากัน ควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียระหว่างการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชัน พบว่ามีปริมาณการเติมที่ใกล้เคียงกันมาก อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เลือกใช้สาร โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลักสำหรับควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลระหว่างการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก เนื่องจากช่วงระยะเวลาระหว่างการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย การผลิตไบโอดีเซลของโรงงานที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียใช้สาร โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการเติมสาร โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สำหรับควบคุม

ค่าพีเอชของน้ำเสียในการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 g/L (ภาพที่ 32) พบว่าปริมาณการเติมสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมสารช่วยรวมตะกอนทั้งสามชนิดเพิ่มมากขึ้น โดยการเติม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ต้องใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (1 N KOH) สำหรับควบคุมค่าพีเอชน้อยที่สุดเท่ากับ 0.5 – 10 mL/L และการเติมสารส้มต้องใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สำหรับควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 – 30 mL/L ส่วนเฟอร์ริกคลอไรด์ต้องใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สำหรับควบคุมค่าพีเอชมากที่สุดเท่ากับ 15 – 75 mL/L ทั้งนี้เนื่องจากค่าอัตราส่วนโดยโมลของอะลูมิเนียมในโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์  $[Al_13/Al_13O_4(OH)_{24} = 0.03279]$  น้อยกว่าสารส้ม  $[Al_2/Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O = 0.0405]$  และค่าอัตราส่วนโดยโมลของเหล็กในเฟอร์ริกคลอไรด์  $[Fe_3/FeCl_3 = 0.3443]$  แสดงถึงปริมาณความต้องการต่างสำหรับควบคุมค่าพีเอชในการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งมีผลต่อค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามยังต้องพิจารณาปริมาณการเติมสารส้ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมด้วย



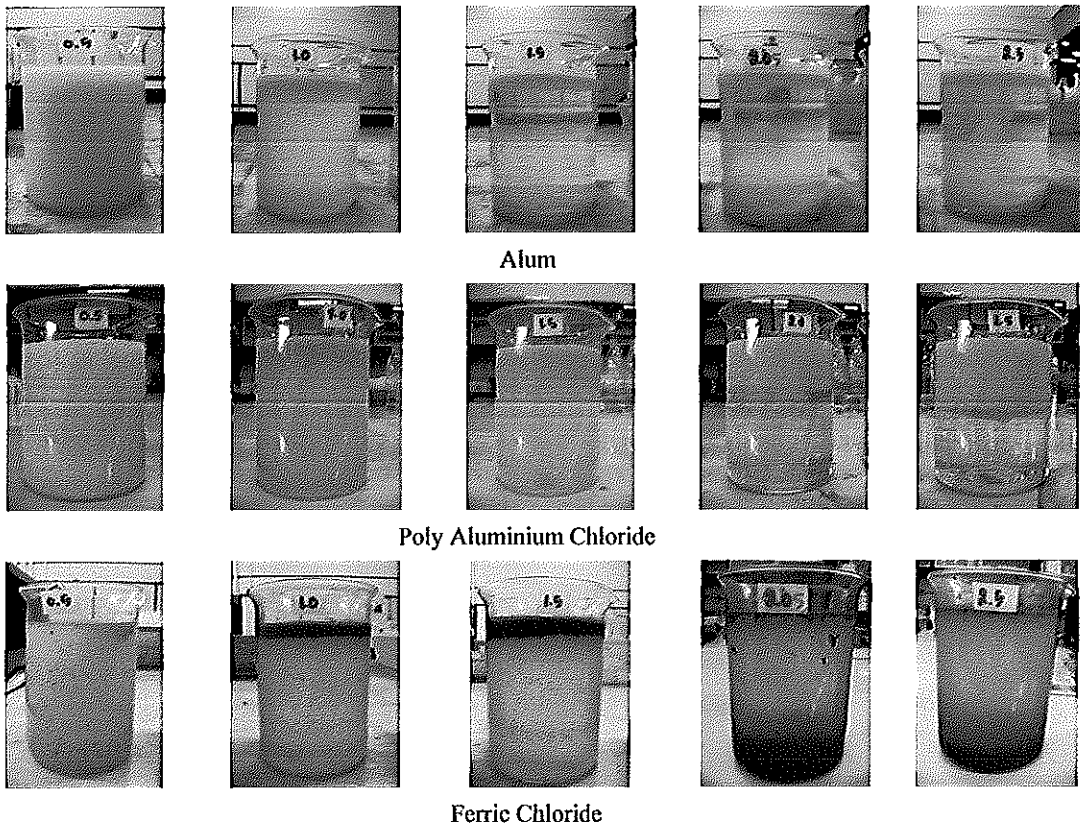
ภาพที่ 32 ปริมาณการเติมสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (1 N KOH) สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของเกลือของอะลูมิเนียมและเหล็ก จากการศึกษากระบวนการโอแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก คือสารส้ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ นอกจากการควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันแล้วยังพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารช่วยรวมตะกอนทั้งสามชนิดด้วยเช่นกัน ซึ่งจากการทดสอบกระบวนการโอแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนทั้งสามชนิดที่ค่าความเข้มข้นเท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 g/L และควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5, 6 และ 7 บำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่มีปริมาณไขมันและน้ำมันปนเปื้อนเท่ากับ 7,120 mg/L (ภาพที่ 33) (ภาพภาคผนวก ก 2, 3 และ 4) พบว่าการเติมสารส้มและการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ความเข้มข้นเท่ากับ 0.5 g/L มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันต่ำกว่าร้อยละ 20 และ 90 ตามลำดับ แต่การเติมสารส้มและการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์เท่ากับ 1.0 g/L พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของสารทั้งสองชนิดสูงกว่าร้อยละ 95 (ภาพที่ 34, 35) แสดงถึงปริมาณความเข้มข้นของสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ใช้เพียงพอกับความต้องการเกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล ส่วนการเติมสารโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ พบว่าการควบคุมค่าพีเอชมีผลต่อปริมาณการเติมสารโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ คือการควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 6 และ 7 และเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เพียง 1.0 g/L มีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันสูงกว่าร้อยละ 90 แต่การควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 จะต้องเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์สูงถึง 2.0 g/L จึงจะมีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันสูงกว่าร้อยละ 90 (ภาพที่ 36) ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการโอแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กจะต้องมีปริมาณมากพอกับความต้องการเกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันในน้ำเสีย รวมถึงการควบคุมค่าพีเอชที่เหมาะสมด้วยเช่นกัน

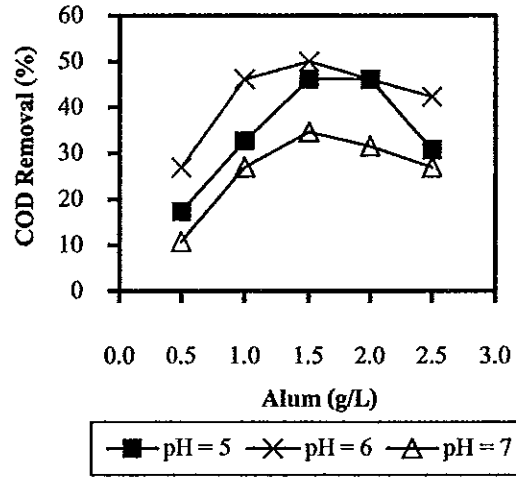
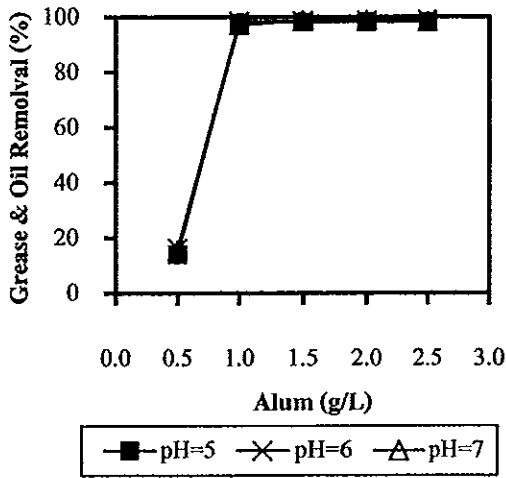
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี พบว่าปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี โดยผลจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีของน้ำส่วนใสหลังผ่านกระบวนการโอแอกกูเลชันด้วยสารส้ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีแปรผันตามค่าความเข้มข้นของสารส้มและเหล็กที่เพิ่มขึ้นในช่วง 0.5 - 1.5 g/L และเมื่อเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นในช่วง 0.5 - 2.0 g/L ทั้งนี้เป็นผลจากอิทธิพลของการกำจัดไขมันและน้ำมันที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีปริมาณสารช่วยรวมเพียงพอกับความต้องการและการควบคุมค่าพีเอชที่เหมาะสมทำให้เกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันและลอยแยกออกจากน้ำได้มาก แต่เมื่อปริมาณการเติมสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์มากกว่า 1.5 g/L และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มากกว่า 2.0 g/L ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้สารช่วยรวม



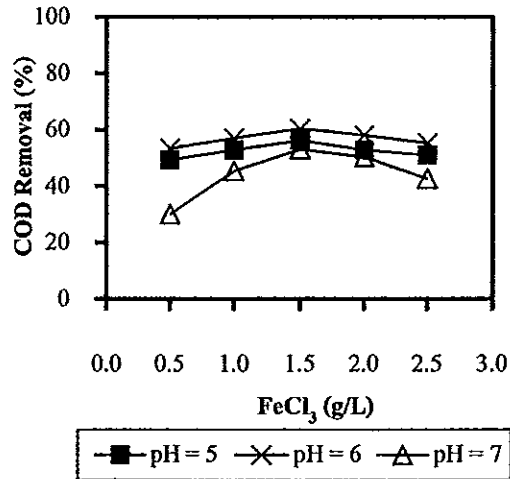
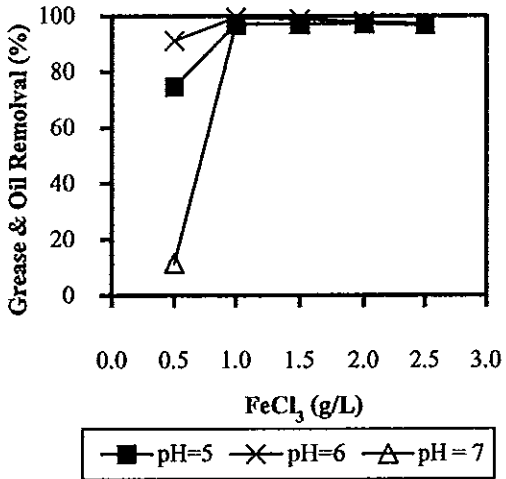
ตะกอนมากเกินไปมีผลทำให้ตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและความหนาแน่นสูง เนื่องจากการปนเปื้อนอะลูมิเนียมหรือเหล็กปริมาณมาก เป็นผลให้ตะกอนไขมันและน้ำมัน บางส่วนไม่สามารถลอยขึ้นสู่อากาศได้ จึงแขวนลอยอยู่ในน้ำ และบางส่วนเกิดการตกตะกอนแทน การลอยขึ้น



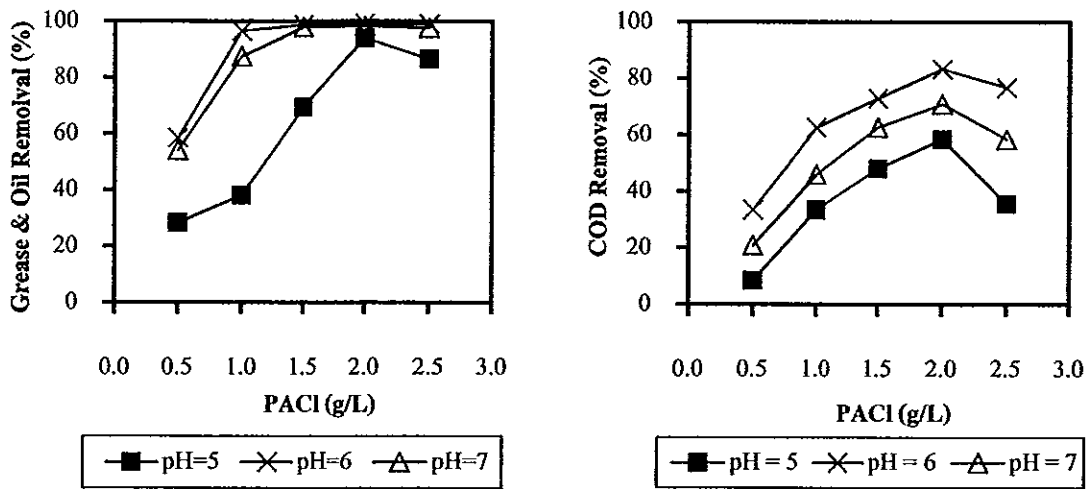
ภาพที่ 33 การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก (ความเข้มข้นของสารช่วยรวมตะกอน 0.5 – 2.5 g/L; pH = 6; ระยะเวลาตกฟัก 1 ชั่วโมง)



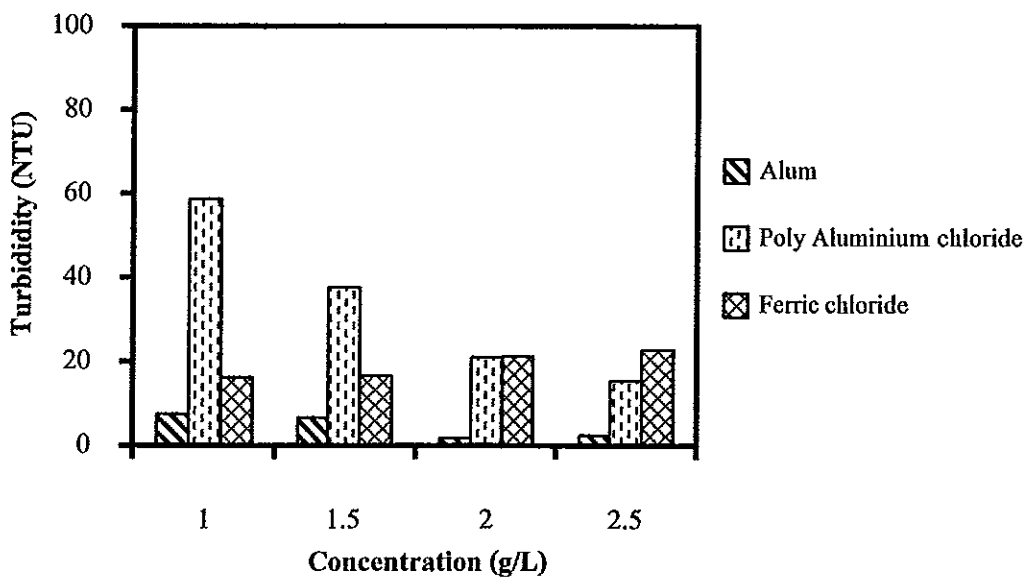
ภาพที่ 34 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน และสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีของการใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้มที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ (ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)



ภาพที่ 35 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน และสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีของการใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ (ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)



ภาพที่ 36 ประสิทธิภาพการกำจัด ไขมันและน้ำมัน และสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีของการใช้ กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ (ระยะเวลาตกพัก 1 ชั่วโมง)



ภาพที่ 37 ค่าความขุ่นของน้ำหลังผ่านกระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและ เหล็ก (ระยะเวลาตกพัก 1 ชั่วโมง)

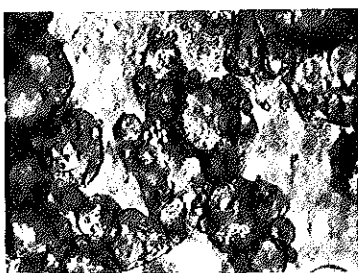
ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเสียหลังผ่านการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก เมื่อพิจารณาจากการวัดค่าความขุ่น (Turbidity) ของน้ำเสีย ซึ่งกรณีของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลเริ่มต้นมีค่าสูงมากจนไม่อาจวัดค่าความขุ่นได้ แต่เมื่อวัดความขุ่นของน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ และควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 6 (ภาพที่ 37) เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้พบว่า การควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 6 ด้วยการเติมสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (1 N KOH) ระหว่างการทำโคแอกกูเลชันมีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันมีค่าสูงที่สุด ซึ่งผลจากการตรวจวัดพบว่าค่าความขุ่นของน้ำเสียหลังผ่านการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันลดลงมาก และพบว่ากรณีเติมสารส้มมีผลทำให้ค่าความขุ่นของน้ำลดลงจนมีค่าต่ำกว่า 10 NTU (ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความขุ่นของน้ำประปาที่มีค่าไม่เกิน 5 NTU) แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้การมองด้วยตาเปล่าหรือจากการวัดค่าความขุ่นจะมีค่าความขุ่นน้อยก็ตาม แต่จากการวิเคราะห์ค่าไขมันและน้ำมันพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กมีค่าสูงสุด ไม่เกินร้อยละ 99 โดยยังคงมีไขมันและน้ำมันเหลืออยู่ในน้ำส่วนใสอีกมากกว่า 100 mg/L ทั้งนี้เนื่องจากยังคงมีตะกอนไขมันและน้ำมันขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำส่วนใสดังกล่าว ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ค่าตะกอนไขมันและน้ำมันของน้ำเสียหลังการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ค่าการควบคุม พีเอชเท่ากับ 5, 6, และ 7 (ตารางที่ 17) (ตารางภาคผนวก ง 7, 8 และ 9) พบว่ายังคงมีตะกอนแขวนลอยอยู่มาก โดยเป็นตะกอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของสารประกอบอะลูมิเนียมหรือเหล็กกับไขมันและน้ำมัน เมื่อทำการสุ่มวิเคราะห์ค่าอะลูมิเนียมในน้ำส่วนใสของชุดทดลองเติมสารส้ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เท่ากับ 1.0 g/L พบว่ามีอะลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) ปนเปื้อนเท่ากับ 0.02 และ 2.9 mg/L ตามลำดับ ส่วนกรณีการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ เท่ากับ 1.0 g/L พบว่ามีเหล็กปนเปื้อนเท่ากับ 0.05 mg/L ซึ่งโมเลกุลของสารที่มีประจุลบและปนเปื้อนในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลสามารถดูดติดกับโมเลกุลของอะลูมิเนียมและเหล็กหรือสารประกอบไฮดรอกซิลของอะลูมิเนียมหรือเหล็กได้ เนื่องจากมีประจุที่ต่างกัน (Yang, 2007; Bensadok, *et al.*, 2008) หรืออาจกล่าวได้ว่า ตะกอนไขมันและน้ำมันส่วนนี้เป็นตะกอนไขมันและน้ำมันส่วนที่ไม่สามารถรวมตัวกันและลอยขึ้นสู่มิวน้ำได้ เนื่องจากตะกอนไขมันและน้ำมันนี้มีขนาดเล็กจนบางส่วนอาจอยู่ในรูปของสารละลายและปนเปื้อนอยู่ในน้ำส่วนใส เป็นผลให้ไม่สามารถกำจัดไขมันและน้ำมันได้ทั้งหมด จึงอาจกล่าวได้ว่าการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กเป็นสารช่วยรวมตะกอนบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมีผลทำให้เกิดการปนเปื้อนอะลูมิเนียมและเหล็กในน้ำหลังผ่านการบำบัดในรูปของตะกอนไขมันและน้ำมันขนาดเล็ก แต่การปนเปื้อนสารทั้งสองชนิด

มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับข้อกำหนดปริมาณโลหะหนักของเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539) จึงไม่ส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมทางน้ำ อย่างไรก็ตามผลจากการปนเปื้อนตะกอนไขมันและน้ำมันขนาดเล็กในน้ำส่วนล่างนี้เป็นสาเหตุให้ค่าการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีมีค่าสูงกว่า 10,000 mg/L ดังนั้นน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กยังต้องการบำบัดด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียต่อไป

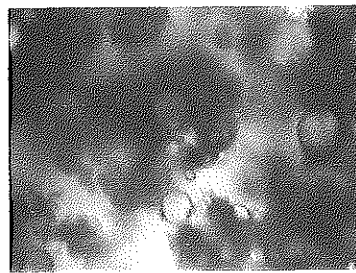
ตารางที่ 17 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

Coagulant	Initial Grease & Oil (mg/L)	Coagulant Dosage (g/L)				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Alum	7,120	2,822	24	7	3	7
Poly Aluminium Chloride	7,120	1,134	219	23	13	72
Ferric Chloride	7,120	216	26	26	19	42

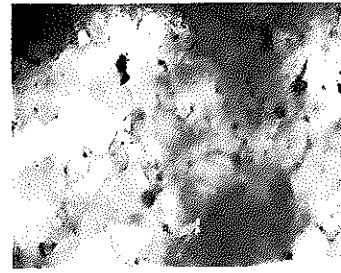
หมายเหตุ ความขุ่นที่เอชเท่ากับ 6; ระยะเวลาตกฟัก 1 ชั่วโมง



Alum



Poly Aluminium Chloride



Ferric chloride

ภาพที่ 38 ตะกอนไขมันและน้ำมันจากการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 20 เท่า)

เมื่อพิจารณาตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก พบว่าสีของตะกอนไขมันและน้ำมันขึ้นอยู่กับชนิดของสารช่วยรวมตะกอน (ภาพที่ 38) โดยตะกอนที่เกิดจากการเติมสารส้มและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีสีเหลืองอ่อนแกมเขียว ส่วนตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดจากการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์มีสีแดงเข้ม ซึ่งเป็นสีของออกไซด์ของอะลูมิเนียมและเหล็กจากการสังเกตตะกอนที่เกิดขึ้นพบว่าเกิดการรวมตัวกันระหว่างหยดน้ำมันที่ปนเปื้อนในตะกอนที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันทำให้หยดน้ำมันที่ปนเปื้อนในตะกอนอยู่ชิดติดกันมากขึ้นเป็นผลให้หยดน้ำมันบางส่วนสามารถเกิดการรวมตัวกันกลายเป็นหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ (Rios, *et al.*, 1998; Yang, 2007) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากมีหยดน้ำมันลอยอยู่เหนือผิวน้ำปะปนกับตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน เมื่อพิจารณาค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน พบว่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารช่วยรวมตะกอนทั้งสามชนิด แต่เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารช่วยรวมตะกอนที่ใช้ในสภาวะการควบคุมค่าพีเอชเท่ากัน พบว่าเกิดตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นจากการใช้สารส้ม โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ มีปริมาณอยู่ในช่วง 100 – 200, 200 – 450, และ 150 – 300 mL Sludge/L Wastewater ตามลำดับ ที่ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันมากกว่าร้อยละ 95

ผลจากการวิเคราะห์ค่าอะลูมิเนียมและเหล็กเริ่มต้นเมื่อใช้สารส้ม โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ 1.0 g/L เท่ากัน พบว่ากรณีใช้สารส้มและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีค่าอะลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) เริ่มต้นเท่ากับ 81 และ 75 mg/L Wastewater ตามลำดับ ส่วนเฟอร์ริกคลอไรด์ที่มีค่าเหล็ก ( $Fe^{3+}$ ) เริ่มต้นเท่ากับ 334 mg/L แต่จากการวิเคราะห์ค่าอะลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) ที่ปนเปื้อนในน้ำส่วนใส หลังการทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.02 และ 2.9 g/L ตามลำดับ และหลังการทำโคแอกกูเลชันด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์มีค่าเหล็ก ( $Fe^{3+}$ ) เท่ากับ 0.05 mg/L ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณอะลูมิเนียมและเหล็กดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอะลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) หรือเหล็ก ( $Fe^{3+}$ ) ส่วนใหญ่ปนเปื้อนอยู่ในตะกอนไขมันและน้ำมัน ซึ่งเป็นผลจากการเกิดกลไกแบบดูดซับ (Adsorption) และกลไกแบบห่อหุ้ม (Sweep Coagulation) ของกระบวนการโคแอกกูเลชัน (มันสิน ตัญฑูเวศม์, 2542; Clark *et al.*, 1971; Becher, 1977; Viessman and Hammer, 1985; Reynolds and Richards, 1996) ดังนั้นตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นนี้จะต้องมีการพิจารณาวิธีการจัดการที่เหมาะสมต่อไป

กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนคอลลอยด์ อาศัย 2 กลไกหลัก คือ กลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ และกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึก (Sweep Coagulation) ซึ่งขึ้นอยู่กับ

กับปริมาณความเข้มข้นของเกลือของอะลูมิเนียมและเกลือของเหล็ก และค่าพีเอชของน้ำ (พีเอชของน้ำหลังผ่านกระบวนการกระบวนการ โคแอกกูเลชันแล้ว) โดยส่วนใหญ่กลไกของกระบวนการ โคแอกกูเลชันในการบำบัดน้ำคืดและน้ำเสียเป็นกลไกแบบ Sweep Coagulation เป็นกลไกหลัก และอาจมีกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุเป็นกลไกร่วมซึ่งมีบทบาทน้อยกว่า เนื่องจากกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุต้องเกิดขึ้นและเสร็จสิ้นภายใน  $10^{-4}$  – 1 วินาที ไม่เช่นนั้นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) จะเปลี่ยนไอออนคอมเพล็กซ์ต่อไปจนเกิดผลึก (Al(OH)<sub>3</sub> หรือ Fe(OH)<sub>3</sub>) และเป็นกลไกกำจัดคอลลอยด์แบบ Sweep Coagulation ซึ่งในทางปฏิบัติการออกแบบควบคุมให้กระบวนการ โคแอกกูเลชันเป็นกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุภายในเวลา  $10^{-4}$  – 1 วินาที ไม่สามารถกระทำได้ (มันสัน คณกุลเวศม์, 2542; Clark *et al.*, 1971; Becher, 1977; Viessman and Hammer, 1985; Reynolds and Richards, 1996) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลือของอะลูมิเนียมและเกลือของเหล็กบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลเป็นกลไกแบบ Sweep Coagulation เนื่องจากการใช้ระยะเวลาการทำการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยวิธีการทดสอบจาร์เทส (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542) มากกว่า 1 วินาที

### 3.2 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทสารอินทรีย์

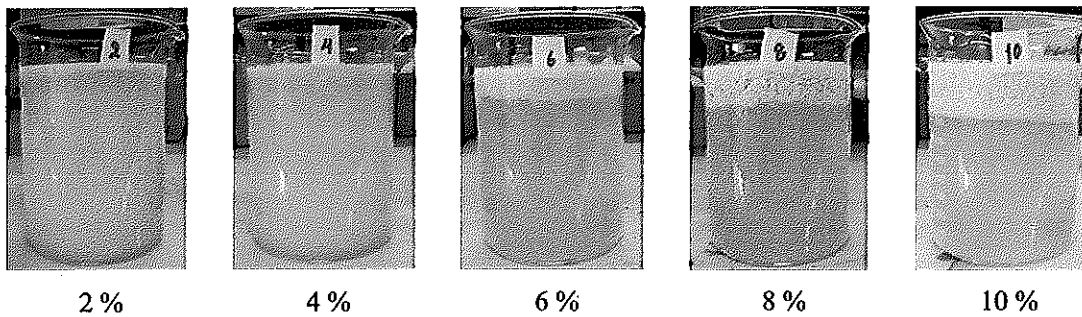
จากการทดลองใช้สารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออนินทรีย์ประสบความสำเร็จในการแยกไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลและมีประสิทธิภาพสูงกว่าร้อยละ 95 แต่การบำบัดด้วยเกลืออนินทรีย์มีผลทำให้ตะกอนไขมันและน้ำมันปนเปื้อนโลหะ (อะลูมิเนียมและเหล็ก) ปริมาณมาก ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับการนำตะกอนดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาใช้สารช่วยรวมตะกอนประเภทสารอินทรีย์ (Organic Coagulant) เพิ่มเติม ซึ่งจากการศึกษารายงานการวิจัยพบว่าไคโตซานสามารถใช้เป็นสารช่วยรวมตะกอนสำหรับบำบัดน้ำเสียได้ (Yue *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2008; Rizzo *et al.*, 2008; Blachier *et al.*, 2009; Fenault *et al.*, 2009;) และมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียที่มีสภาพอิมัลชัน ทั้งที่เกิดจากการปนเปื้อนน้ำมันเพียงอย่างเดียว และที่เกิดจากการปนเปื้อนน้ำมันและสารลดแรงตึงผิว (Bratskaya, *et al.*, 2006) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไคโตซานทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชัน เพื่อศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการบำบัด และที่สำคัญคือการศึกษาความเป็นไปได้สำหรับการนำไปใช้งาน เนื่องจากไคโตซานเป็นสารอินทรีย์ ดังนั้นตะกอนไขมันและน้ำมันจึง

อาจสามารถเลือกวิธีการกำจัด โดยการ ใช้กระบวนการทางชีววิทยา เช่น วิธีการฝังกลบ หรืออาจส่งผลให้มีการศึกษานำตะกอนที่เกิดขึ้น ไปใช้ประโยชน์ เช่น นำไปหมักเป็นปุ๋ย ซึ่งจะเป็นแนวทางในการเลือกใช้สารช่วยรวมตะกอน และเป็นแนวทางจัดการของเสียที่เกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

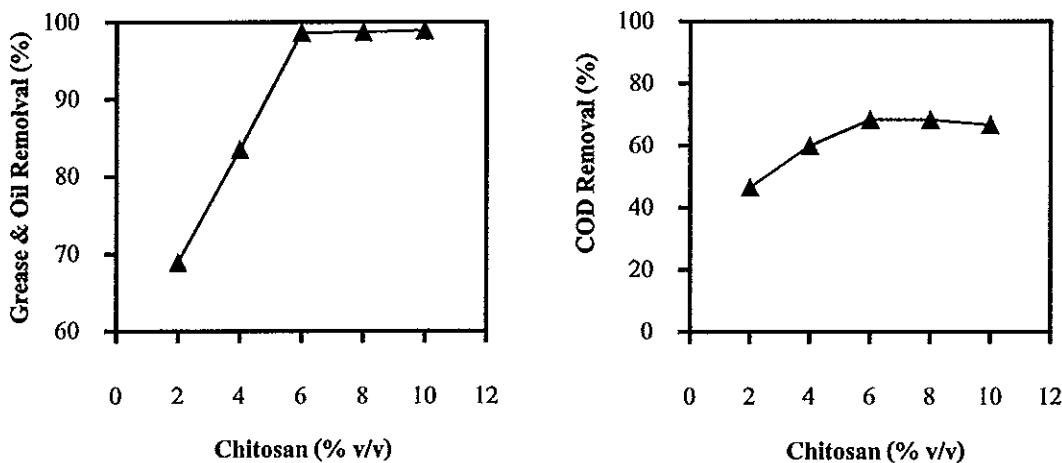
### 3.2.1 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการใช้ไคโตซานเป็นโคแอกกูแลนท์

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งในปัจจุบันมีการศึกษาและใช้ประโยชน์เป็นสารช่วยรวมตะกอนสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน เพื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมันและน้ำเสียที่มีสภาพเป็นอิมัลชัน (Meysami and Kasacian, 2005; Bratskaya, *et al.*, 2006; Fenault, *et al.*, 2009) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้ไคโตซานบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล จากการทดลองใช้ไคโตซานในอัตราส่วนโดยปริมาตรต่าง ๆ กัน ด้วยค่าความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 2, 4, 6, 8, และ 10 โดยปริมาตร ตามลำดับ ทดสอบกับน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่มีค่าไขมันและน้ำมันปนเปื้อนเท่ากับ 8,250 mg/L พบว่าการเติมไคโตซานเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการควบคุมค่าพีเอชไม่เกิดการรวมตะกอน เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อการเกิดการรวมตะกอน และพบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียไบโอดีเซลหลังการเติมไคโตซานมีค่าลดลงจาก 8.5 – 10.5 เป็น 7.5 – 9.0 ทั้งนี้เนื่องจากพีเอชเริ่มต้นของไคโตซานมีความเป็นกรด คือมีค่าพีเอชประมาณ 4 ซึ่งเป็นผลจากการเตรียมสารละลายไคโตซานมีการใช้กรดอะซิติกช่วยให้ไคโตซานละลายน้ำ ในช่วงค่าพีเอชดังกล่าวไม่เกิดการรวมตะกอน แต่เมื่อทำการปรับค่าพีเอชลดต่ำลงเท่ากับ 7 ด้วยกรดซัลฟิวริก (1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) พบว่าเกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ (ภาพที่ 39) เป็นผลให้เกิดการแยกชั้นระหว่างส่วนของตะกอนที่ลอยอยู่ด้านบนและส่วนของน้ำใสด้านล่าง





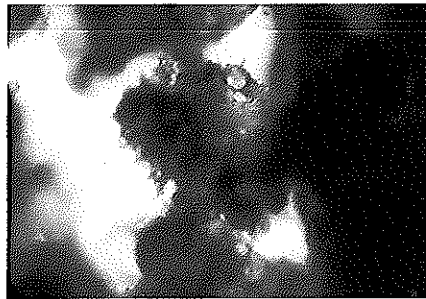
ภาพที่ 39 การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมไคโตซาน (ไคโตซาน 2 – 10 % (v/v); ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง; พีเอชเท่ากับ 7)



ภาพที่ 40 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันและสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีของกระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมไคโตซานที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)

ผลจากการวิเคราะห์น้ำส่วนล่างของการใช้ไคโตซานมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 6 พบว่าน้ำส่วนล่างมีค่าความขุ่นต่ำกว่า 60 NTU ค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน ต่ำกว่า 50 mg/L ซึ่งเป็นผลจากการที่สามารถกำจัดไขมันและน้ำมัน ได้มากกว่าร้อยละ 95 (ภาพที่ 40) ผลจากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าไคโตซานสามารถใช้เป็นสารช่วยรวมตะกอนสำหรับกระบวนการ โคแอกกูเลชัน เพื่อบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลได้และมีประสิทธิภาพสูงเช่นเดียวกับสารช่วยรวมตะกอน ประเภทเกลืออนินทรีย์ แต่จะต้องทำการควบคุมค่าพีเอชให้มีค่าใกล้เคียงพีเอชเท่ากับ 7 ซึ่งอาจเลือก

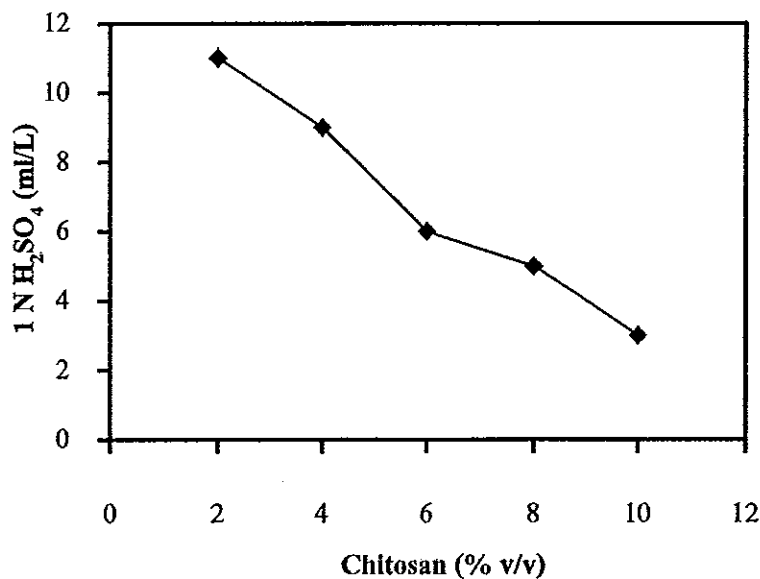
ช่วงค่าที่เอชสำหรับการใช้งานควบคุมระหว่างการใช้กระบวนการ โคอเอกกุลเลชันเพื่อบำบัดน้ำเสีย จากการผลิตไบโอดีเซลเท่ากับ 6 – 7 อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองในช่วงการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มข้นของโคโคซานที่ใช้เท่ากับร้อยละ 6 – 10 โดยปริมาตร แสดงให้เห็นว่าถึงแม้เติมโคโคซานเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 6 โดยปริมาตร ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย คล้ายกับการใช้กระบวนการ โคอเอกกุลเลชันด้วยการเติมเกลืออนินทรีย์ ผลจากการลดลงของไขมันและน้ำมันเป็นผลให้ค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลลดลงตามไปด้วย โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าร้อยละ 65 อย่างไรก็ตามในส่วนล่างยังคงปนเปื้อนสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีสูง ใกล้เคียงกับกรณีใช้กระบวนการ โคอเอกกุลเลชันด้วยการเติมเกลืออนินทรีย์ ซึ่งอาจเกิดจากตะกอนไขมันและน้ำมันขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ รวมถึงสารอินทรีย์ละลายน้ำ อีกทั้งไขมันและน้ำมันรวมถึงโคโคซานต่างก็เป็นสารอินทรีย์ ดังนั้นผลการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีของน้ำส่วนล่างจึงยังคงมีค่าสูง



ภาพที่ 41 ตะกอนไขมันและน้ำมันจากการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการ โคอเอกกุลเลชันด้วยการเติมโคโคซาน (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 20 เท่า)

เมื่อพิจารณาตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นจากการใช้โคโคซานเป็นสารช่วยรวมตะกอน จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่า มีลักษณะสีขาว ขนาดเม็ดตะกอนไขมันและน้ำมัน ใกล้เคียงกับขนาดเม็ดตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียม และเหล็ก แต่ไม่เกิดการรวมตัวกันของหยดน้ำมันทั้งจากการสังเกตด้วยตาและจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (ภาพที่ 41) ทั้งนี้อาจเป็นผลจากโคโคซานมีลักษณะเป็นเส้นใย และมีกระบวนการเกิดการรวมตะกอนระหว่างโคโคซานกับอนุภาคคอลลอยด์ประจุลบเป็นกลไกแบบคูตติคห่อหุ้มหยดน้ำมัน เกิดการปิดช่องว่างระหว่างหยดน้ำมัน และประกอบด้วยกลไก Polymer bridging (Ahmad, et al., 2006; Bratskaya et al., 2006; Fenault et al., 2009) เป็นผลให้หยดน้ำมันที่อยู่ใน

ตะกอนไม่เกิดการสัมผัสกันหรือรวมตัวกันได้ ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากการใช้ไคโตซานพบว่าเกิดขึ้นประมาณ 150 – 350 mL/L โดยตะกอนที่เกิดขึ้นมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำมากกว่ากรณีอื่นๆ จึงไม่เกิดการตกตะกอนแม้ใช้ไคโตซานปริมาณมาก ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน เนื่องจากไม่ต้องใช้กระบวนการอื่นเพิ่มเติมเพื่อช่วยแยกตะกอนไขมันและน้ำมัน การใช้ไคโตซานเป็นสารช่วยรวมตะกอนจะต้องใช้กรดสำหรับควบคุมค่าพีเอช ต่างจากการใช้สารช่วยรวมตะกอนชนิดอื่นๆ ที่จะต้องใช้ค่าพีเอชสำหรับควบคุมค่าพีเอช แต่จากการทดลองพบว่าใช้กรดซัลฟิวริก ( $1 \text{ N H}_2\text{SO}_4$ ) น้อยกว่า 6 mL/L (ภาพที่ 42) และควบคุมค่าพีเอชเป็นกลางประมาณ 6 – 7 จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนอุปกรณ์ที่เป็นโลหะ อย่างไรก็ตามการใช้ไคโตซานมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากไคโตซานมีราคาแพง ดังนั้นการใช้ไคโตซานสำหรับบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลจึงต้องคำนึงถึงการใช้จ่ายประโยชน์จากตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้น โดยอาจนำไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ เพื่อเพิ่มมูลค่าตะกอนไขมันและน้ำมันและช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดน้ำเสีย



ภาพที่ 42 ปริมาณการเติมกรดไฮโดรคลอริก ( $1 \text{ N H}_2\text{SO}_4$ ) สำหรับกระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมไคโตซาน (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7)

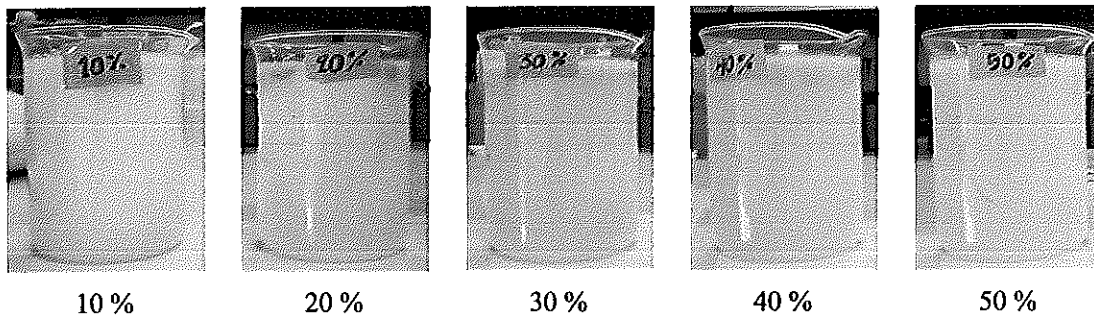
### 3.3 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนเพิ่มเติม

งานวิจัยนี้มีการศึกษาใช้สารช่วยรวมตะกอนชนิดอื่นเพิ่มเติม เพื่อศึกษาการลดค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากผลการศึกษากำจัดไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียได้โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออนินทรีย์ประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดไขมันและน้ำมัน งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจใช้น้ำทะเลทดสอบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากในน้ำทะเลมีเกลืออนินทรีย์ละลายอยู่มาก และมีรายงานการวิจัยศึกษาและแนะนำการใช้น้ำทะเลสำหรับบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีสภาพเป็นอิมัลชัน (Ayoub, 1992; Ayoub, 2000; Zouboulis, 2000) ประกอบกับพื้นที่ทางภาคใต้ของประเทศไทย รวมถึงภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือติดกับทะเลอ่าวไทยและทะเลอันดามัน ซึ่งหากสามารถใช้น้ำทะเลบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลได้จะเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายของโรงงานที่มีที่ตั้งติดกับทะเลได้ อีกทั้งงานวิจัยนี้มีการศึกษาใช้พอลิเมอร์เป็นสารโคแอกกูแลนต์เอง (Coagulant aid) เนื่องจากการพิจารณาถึงการใช้กระบวนการทางชีวภาพเพื่อกำจัดตะกอนไขมันและน้ำมันร่วมด้วย ซึ่งจากการทดลองใช้สารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียมและเหล็กข้างต้น เพอร์ริคคอลลอยด์จึงมีความเหมาะสมมากกว่าสารส้มและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เนื่องจากตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยเพอร์ริคคอลลอยด์ปนเปื้อนสารประกอบเหล็ก ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่พบทั่วไปในดิน

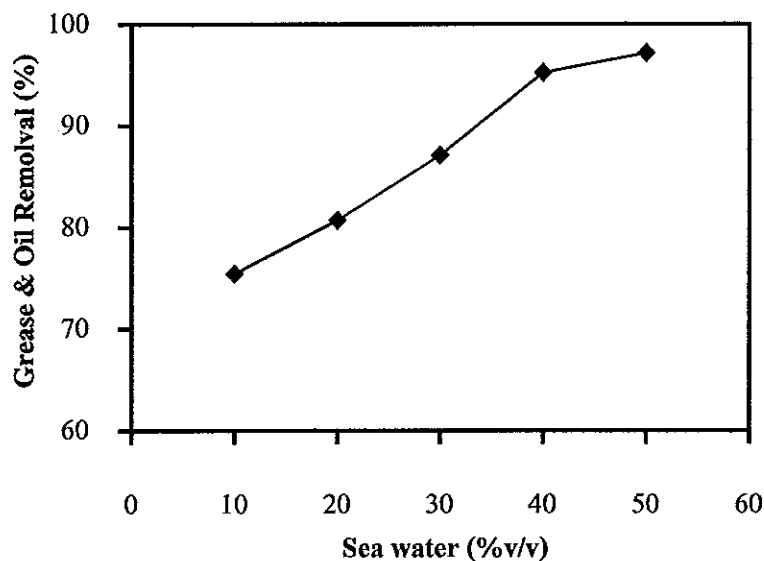
#### 3.3.1 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเล

จากการทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเลจากฝั่งอ่าวไทยบริเวณ จ. สงขลา ช่วงเดือน สิงหาคม พ.ศ. 2551 โดยการทดสอบจาร์เทสด้วยการเติมน้ำทะเลผสมกับน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลในอัตราส่วนโดยปริมาตรต่างๆกัน คือ 10, 20, 30, 40, และ 50 โดยไม่มีการควบคุมค่าพีเอช ทดสอบกับน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่มีปริมาณไขมันและน้ำมันปนเปื้อนเท่ากับ 7,372 mg/L ผลการทดสอบพบว่าน้ำทะเลสามารถก่อให้เกิดการรวมตะกอนกลายเป็นตะกอนไขมันและน้ำมันลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ (ภาพที่ 43) จากการวิเคราะห์ปริมาณไขมันและน้ำมันในน้ำส่วนต่าง พบว่าน้ำทะเลมีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันแปรผันตามปริมาณการเติมน้ำทะเล (ภาพที่ 44) และมีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันสูงสุดเท่ากับร้อยละ 94.3

ที่อัตราส่วนเท่ากับร้อยละ 50 โดยปริมาตร (ค่าไขมันและน้ำมันคงเหลือหลังการเจือจางเท่ากับ 3,686 mg/L) ซึ่งใกล้เคียงกับประสิทธิภาพของการใช้เกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก



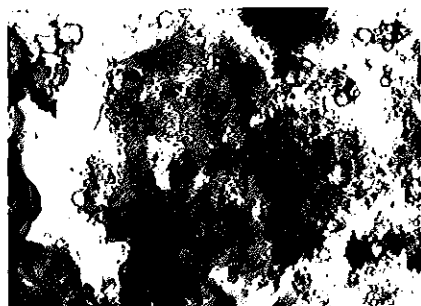
ภาพที่ 43 การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเล (น้ำทะเล 10 – 50% (v/v); ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)



ภาพที่ 44 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของกระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเล ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ (Salinity = 30.7 ppt; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)

ทั้งนี้ความสามารถในการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเนื่องจากน้ำทะเลมีแร่ธาตุละลายอยู่มาก เช่น โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) แมกนีเซียม ( $\text{Mg}^+$ ) แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) (Ayoub, 2000) จากการวัดค่าความเค็ม (Salinity) พบว่าตัวอย่างน้ำทะเลที่นำมาทดสอบมีค่าความเค็มเท่ากับ 30.7 ppt ผลจากการ

มีแร่ธาตุประจุบวกละลายอยู่มากในน้ำทะเลทำให้การเติมน้ำทะเลลงในน้ำเสียที่มีอนุภาคคอลลอยด์เป็นประจุลบและมีค่าความเค็มเท่ากับ 0.2 ppt เป็นการเพิ่มประจุบวกให้กับอนุภาคคอลลอยด์และเกิดการรวมตะกอน เนื่องจากเกิดกลไกทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายและลดอำนาจทางไฟฟ้าของอนุภาคหยดน้ำมันหรือไมเซลล์ ซึ่งจัดเป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุลบ (มันลีนตันซูลเวสม์, 2542; Clark *et al.*, 1971; Viessman and Hammer, 1985; Reynolds and Richards, 1996) ดังนั้นอนุภาคคอลลอยด์จึงรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นและกลายเป็นตะกอนไขมันและน้ำมัน ซึ่งจากการวัดค่าความเค็มในน้ำส่วนล่างพบว่าค่าความเค็มลดลงเหลือ 3.1, 6.0, 9.2, 12.1, 14.6 ppt เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำทะเล และใกล้เคียงกับค่าร้อยละของการเจือจาง แสดงถึงแร่ธาตุส่วนใหญ่ยังอยู่ในส่วนของน้ำใสไม่ได้อยู่ในตะกอนไขมันและน้ำมัน ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันการเกิดกลไกทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายเนื่องจากน้ำทะเลมีค่า Ionic strength สูงทำให้เกิดการอัดตัวของชั้นกระจาย (Compression double layer) ของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งในกรณีนี้คือหยดน้ำมันหรือไมเซลล์ กลไกดังกล่าวนี้สามารถสังเกตได้จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบธรรมชาติทางทะเล คือการลอยตัวของหยดน้ำมันในทะเล (Zouboulis, 2000) และปรากฏการณ์การทับถมของตะกอนบริเวณปากแม่น้ำที่ไหลลงสู่ทะเล เมื่อพิจารณาตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้น จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่ามีส่วนสีขาว ขนาดเม็ดตะกอนไขมันและน้ำมันเล็กกว่าขนาดเม็ดตะกอนที่เกิดขึ้นจากการใช้เกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก มีปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นประมาณ 100 – 200 mL/L และพบว่าไม่เกิดการรวมตัวกันระหว่างหยดน้ำมันที่ปนเปื้อนในตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้น (ภาพที่ 45) ต่างจากตะกอนที่เกิดขึ้นจากการใช้เกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก



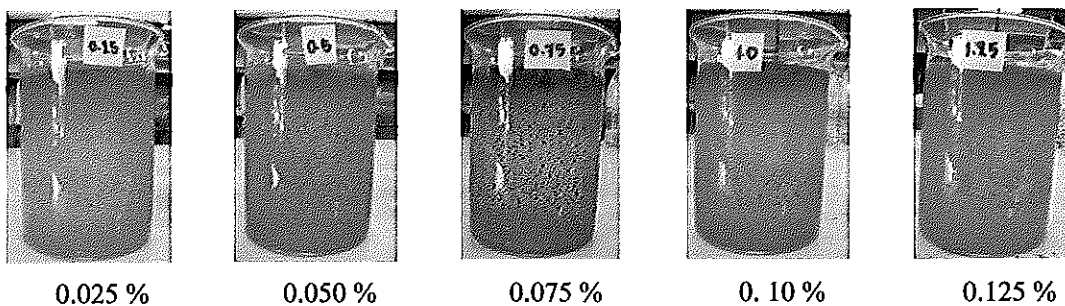
ภาพที่ 45 ตะกอนไขมันและน้ำมันจากการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเล (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 20 เท่า)

ผลจากการทดสอบน้ำทะเลจากฝั่งอ่าวไทยเดิมลงในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลสามารถทำให้เกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบการใช้น้ำทะเลเพิ่มเติม โดยใช้น้ำทะเลจากฝั่งอันดามัน บริเวณ จ. พังงา ณ ช่วงเดือน กันยายน พ.ศ. 2551 ทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยไม่มีการควบคุมค่าพีเอช พบว่าเกิดการรวมตะกอนน้อยมากที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำทะเลเท่ากับร้อยละ 50 และไม่เกิดการรวมตะกอนเมื่อมีอัตราส่วนโดยปริมาตรต่ำกว่าร้อยละ 50 ทั้งนี้อาจเนื่องจากตัวอย่างน้ำทะเลดังกล่าวมีค่าความเค็มเท่ากับ 25.8 ppt ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างน้ำทะเลจากฝั่งอ่าวไทยที่นำมาทดสอบ จึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ไม่เกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมัน เนื่องจากมีปริมาณแร่ธาตุที่ละลายในรูปค่าความเค็มต่ำ จึงมีผลให้ค่า Ionic strength ต่ำกว่าตัวอย่างน้ำทะเลจากฝั่งอ่าวไทย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการนำน้ำทะเลมาใช้เป็นสารช่วยรวมตะกอนสำหรับบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลควบคุมให้เกิดปฏิกิริยารวมตะกอนได้ยาก อย่างไรก็ตามการใช้น้ำทะเลเดิมเป็นสารช่วยรวมตะกอนอาจไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง เนื่องจากผลการตรวจวิเคราะห์ค่าของแข็งละลาย (Total Dissolve Solid, TDS) ของตัวอย่างส่วนล่างหลังผ่านการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่ามีค่าสูงมากกว่า 10,000 mg/L ทั้งนี้เนื่องจากน้ำทะเลมีแร่ธาตุละลายอยู่มากจนไม่อาจวัดค่าของแข็งละลายได้ด้วยเครื่องวัด Conductivity instrument ส่งผลให้การใช้น้ำทะเลเป็นสารช่วยรวมตะกอนจะต้องมีกระบวนการบำบัดเพื่อลดค่าของแข็งละลาย ซึ่งจะเป็นการเพิ่มภาระการบำบัดน้ำเสีย หรือหากพิจารณาปล่อยกลับลงสู่ทะเล จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นอย่างละเอียด ซึ่งหากยังไม่มี การวิจัยที่รองรับว่าสามารถปล่อยลงสู่ทะเลได้ ผู้วิจัยจึงไม่แนะนำการใช้น้ำทะเลเป็นสารช่วยรวมตะกอนบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

### 3.3.2 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine

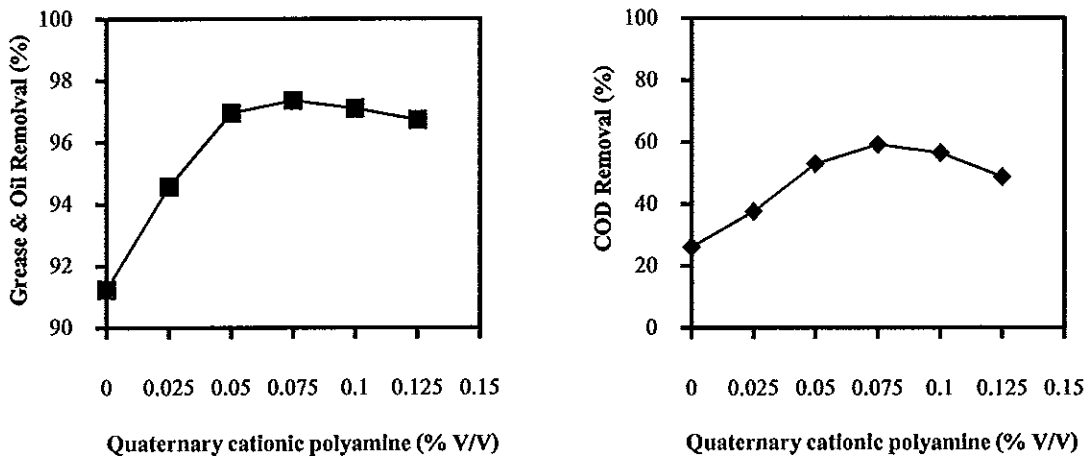
จากการทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมพอลิเมอร์ คือ Quaternary cationic polyamine บำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล พบว่าหากใช้ Quaternary cationic polyamine ดังกล่าวเพียงอย่างเดียวจะต้องใช้ค่าความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 4 โดยปริมาตร คล้ายกับการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโคโคซานที่ต้องใช้ในปริมาณมากเช่นเดียวกัน ทำให้มีค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดแพง ดังนั้นการใช้ Quaternary cationic polyamine เพียงชนิดเดียวอาจไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารเฟอริกคลอไรด์เป็นสารช่วยรวมตะกอน (Coagulant) และใช้ Quaternary cationic polyamine เป็นสารโคแอกกูแลนต์เอง

(Coagulant aid) ทดสอบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการทดสอบจาร์เทส (ภาพที่ 46) ผลการทดสอบพบว่าสามารถลดปริมาณการเติมสารทั้งสองชนิดลงได้ โดยจากการทดสอบกับน้ำเสียที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมันเท่ากับ 7,120 mg/L สามารถลดปริมาณสารเฟอร์ริกคลอไรด์ลงเหลือ 0.5 g/L จากที่ต้องใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เพียงอย่างเดียวประมาณ 1.0 – 2.0 g/L เนื่องจากเฟอร์ริกคลอไรด์มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดไขมันและน้ำมันจากการวิเคราะห์น้ำส่วนล่างพบว่าการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ 0.5 g/L เพียงอย่างเดียวสามารถรวมตะกอนไขมันและน้ำมันได้ดี คือ ปริมาณไขมันและน้ำมันลดลงมากกว่าร้อยละ 90 เป็นผลให้ปริมาณการเติมสาร Quaternary cationic polyamine หลังจากเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ลดลงเหลือร้อยละ 0.05 – 0.10 โดยปริมาตร จากการวิเคราะห์น้ำส่วนใสบพบที่สามารถกำจัดไขมันและน้ำมันได้มากกว่าร้อยละ 95 (ภาพที่ 47) ทั้งนี้ เนื่องจาก Quaternary cationic polyamine เป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุบวกสามารถช่วยให้เกิดการรวมตะกอน (Flocculation) ได้ดีขึ้น โดยการทำลายเสถียรภาพด้วยกลไก Compression of electrical double layers, charge neutralization, adsorption และประกอบด้วยกลไก Polymer-particle bridges (Avcı *et al.*, 2002; Besraa *et al.*, 2002; Yue *et al.*, 2007; Blachier *et al.*, 2009) จากการทดลองพบว่า การเติมสารพอลิเมอร์สามารถทำให้เกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันที่เหลือจากการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ และเกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดจากการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์กลายเป็นตะกอนไขมันและน้ำมันขนาดใหญ่

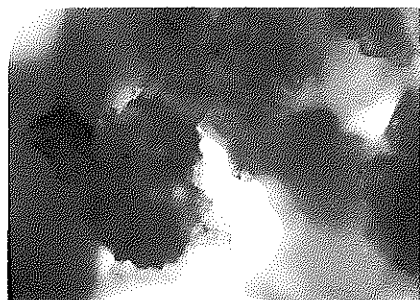


ภาพที่ 46 การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้กระบวนการ โทแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine ( $\text{FeCl}_3 = 0.5 \text{ g/L}$ ; ความเข้มข้นเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)





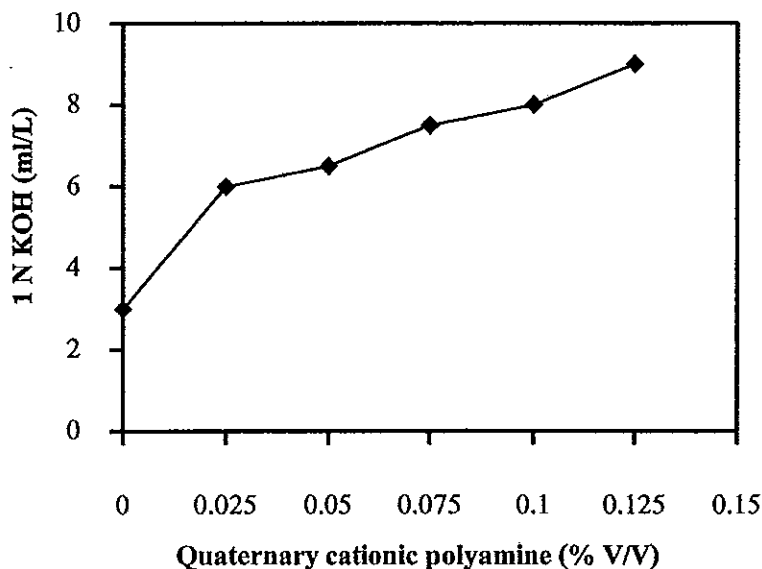
ภาพที่ 47 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันและสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine ( $\text{FeCl}_3 = 0.5 \text{ g/L}$ ; ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)



ภาพที่ 48 ตะกอนไขมันและน้ำมันจากการบำบัดน้ำเสียการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine (ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 20 เท่า)

อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีในน้ำส่วนล่างพบว่ายังมีค่าสูง แสดงถึงยังคงมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในรูปของตะกอนแขวนลอยขนาดเล็กและสารอินทรีย์ในรูปสารละลาย เช่นเดียวกับการใช้เกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก และโคโคซาน ส่วนตะกอนที่เกิดขึ้นมีสีแดงซึ่งเกิดจากสีออกไซด์ของเหล็กและมีขนาดเม็ดตะกอนไขมันและน้ำมันใหญ่กว่าใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เพียงอย่างเดียว (ภาพที่ 48) มีปริมาณตะกอนไขมันและน้ำมันเกิดขึ้นประมาณ 100 – 200 mL/L แต่ไม่เกิดการตกตะกอน ซึ่งอาจเป็นผลจากการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์

ปริมาณน้อย และ Quaternary cationic polyamine เป็นพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำเป็นผลให้ตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการแยกตะกอนไขมันและน้ำมันออกจากน้ำหลังการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน เมื่อพิจารณาการควบคุมค่าพีเอชระหว่างการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่า Quaternary cationic polyamine ทำให้เกิดการรวมตะกอนได้ดีในช่วงค่าพีเอชที่เป็นกลางประมาณ 6 – 8 ซึ่งจากการทดลองพบว่าหลังจากการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์และปรับค่าพีเอชเพื่อให้เกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันของสารประกอบเหล็ก แต่เมื่อเติม Quaternary cationic polyamine พบว่าทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียลดต่ำลงอีกครั้ง คือมีค่าพีเอชลดลงอยู่ในช่วง 4 – 5 ซึ่งไม่เกิดการรวมตะกอนในช่วงพีเอชดังกล่าว จึงต้องทำการปรับค่าพีเอชของน้ำหลังจากเติม Quaternary cationic polyamine ให้มีค่าเท่ากับ 7 เพื่อให้เกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมัน เป็นผลให้การปรับค่าพีเอชสำหรับการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine จำเป็นต้องทำการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันถึง 2 ครั้ง แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการเติมต่างเพื่อควบคุมค่าพีเอช (ภาพที่ 49) น้อยกว่าการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากปริมาณการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ลดลง ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีที่ใช้ควบคุมค่าพีเอชระหว่างการทำโคแอกกูเลชัน



ภาพที่ 49 ปริมาณการเติมสาร โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (1 N KOH) สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine ( $\text{FeCl}_3 = 0.5 \text{ g/L}$ ; ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7)

### 3.4 สรุปและการประเมินประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ผลจากการทดลองใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนพบว่ามีประสิทธิภาพสูงในการแยกไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล และมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ปฏิบัติจริง โดยจะต้องมีการทดสอบจาร์เทสเพื่อเป็นการควบคุมปริมาณสารช่วยรวมตะกอนให้เพียงพอต่อความต้องการสำหรับเกิดการรวมตะกอนและไม่มากเกินไป อย่างไรก็ตามจะต้องควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมสำหรับเกิดการรวมตะกอน เนื่องจากสารช่วยรวมตะกอนแต่ละชนิดมีช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับเกิดการรวมตะกอนแตกต่างกัน ผลจากการวิจัยพบว่าหากเติมสารช่วยรวมตะกอนน้อยหรือมากเกินไปกว่าความต้องการเกิดการรวมตะกอนของอนุภาคคอลลอยด์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล มีผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียต่ำ อีกทั้งปริมาณการเติมสารช่วยรวมตะกอนและปริมาณสารที่ใช้สำหรับควบคุมค่าพีเอชมีผลต่อค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลของสารช่วยรวมตะกอนทั้ง 6 ชนิด ข้างต้น ณ สภาวะที่เหมาะสม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันสูงกว่าร้อยละ 95 (ตารางที่ 18) การใช้ค่าความเข้มข้นของสารช่วยรวมตะกอนและการควบคุมค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันทำให้เกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันลอยขึ้นสู่ผิวน้ำส่วนล่างกลายเป็นน้ำใส ซึ่งจะเห็นได้จากการทดลองบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนทั้ง 6 ชนิดมีประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นการพิจารณาเลือกสารช่วยรวมตะกอนเพื่อใช้งานจริง จึงอาจพิจารณาจากการประเมินด้านค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะค่าใช้จ่ายสำหรับสารช่วยรวมตะกอนและสารเคมีสำหรับควบคุมค่าพีเอช (ตารางที่ 19) ซึ่งพบว่าสารส้มมีค่าใช้จ่ายถูกที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากสารส้มมีราคาถูกเมื่อเทียบกับสารช่วยรวมตะกอนชนิดอื่นๆ ดังนั้นเมื่อพิจารณาด้านค่าใช้จ่ายดังกล่าวแล้ว สารส้มจึงมีความเหมาะสมใช้เป็นสารช่วยรวมตะกอนสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล อย่างไรก็ตามยังต้องพิจารณาถึงความสะดวกในการจัดหาสารช่วยรวมตะกอน และควรมีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการอื่นต่อหลังจากใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันกำจัดไขมันและน้ำมัน เพราะถึงแม้ว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลจนมีลักษณะใสใกล้เคียงกับน้ำประปา แต่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดยังมีความสกปรกในรูปซีไอดีสูง ไม่สามารถปล่อยออกนอกโรงงานได้

ตารางที่ 18 ช่วงค่าพีเอชสำหรับการควบคุมระหว่างการทำโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนชนิดต่างๆ และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

Coagulant	Dosage	pH	Efficiency (%)		
			SS	COD	Grease & Oil
Alum	1.0 – 2.0 (g/L)	5 – 7	95 – 99	30 – 60	95 – 99
FeCl <sub>3</sub>	1.0 – 2.0 (g/L)	5 – 7	95 – 99	40 – 70	95 – 99
PACl	1.0 – 2.0 (g/L)	6 – 7	80 – 99	40 – 80	90 – 99
Seawater*	30 – 50 % (v/v)	7 – 9	60 – 85	-	80 – 98
Chitosan	6 – 8 % (v/v)	6 – 7	95 – 99	40 – 70	95 – 99
FeCl <sub>3</sub> [0.5 g/L] + Quaternary cationic polyamine	0.05 – 0.10 % (v/v)	6 – 8	95 – 99	40 – 60	95 – 99

\*หมายเหตุ Seawater ไม่มีการควบคุมค่าพีเอช (เป็นค่าพีเอชสุดท้ายหลังผ่านการทำโคแอกกูเลชัน)

ตารางที่ 19 ค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนชนิดต่างๆ

Coagulant	Dosage	Cost (Bath/ m <sup>3</sup> )
Alum	1.0 – 2.0 (g/L)	55 – 185
Poly Aluminium Chloride (PACl)	1.0 – 2.0 (g/L)	60 – 160
Ferric Chloride (FeCl <sub>3</sub> )	1.0 – 2.0 (g/L)	200 – 465
Sea Water	30 – 50 % (v/v)	-
Chitosan	6 – 8 % (v/v)	1,200 – 1,750
FeCl <sub>3</sub> and Quaternary cationic polyamine	FeCl <sub>3</sub> [0.5 – 1.0 g/L] + Quaternary cationic polyamine [0.05 – 0.10 % (v/v)]	65 – 120

หมายเหตุ ค่าใช้จ่ายรวมถึงค่าสารเคมีสำหรับควบคุมค่าพีเอชแล้ว (1 N KOH) และคำนวณค่าใช้จ่าย ณ เดือน กันยายน พ.ศ. 2552

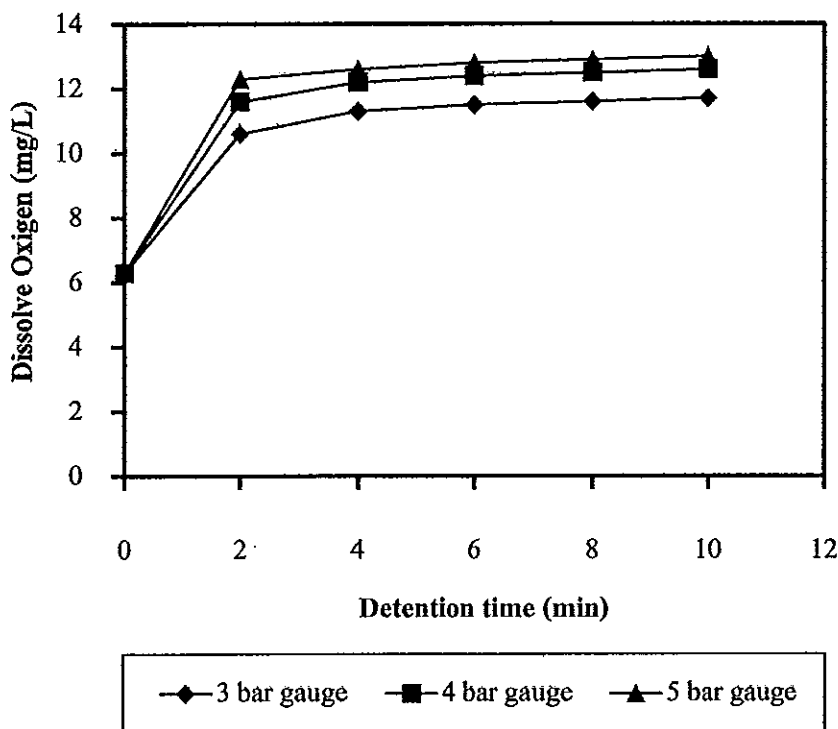
อีกทั้งจะต้องมีการพิจารณาการใช้ประโยชน์ การบำบัด หรือการกำจัดตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกัน ซึ่งกรณีใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก เป็นผลให้ตะกอนไขมันและน้ำมันเกิดการปนเปื้อนอะลูมิเนียม หรือเหล็ก ดังนั้นจะต้องมีการพิจารณาการกำจัดตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสม เพื่อป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งภายในโรงงานและนอกโรงงานผลิตไบโอดีเซล อย่างไรก็ตามองค์ประกอบส่วนใหญ่ของตะกอนไขมันและน้ำมันเป็นสารอินทรีย์ ดังนั้นอาจเลือกใช้วิธีการฝังกลบ หรือใช้วิธีการเผาด้วยอุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดของเสียที่เป็นสารอินทรีย์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่าใช้เวลาน้อยกว่าวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดมาก เนื่องจากการรวมตะกอนของกระบวนการโคแอกกูเลชันเกิดขึ้นภายในระยะเวลาไม่เกิน 30 นาที และระยะเวลาพักพิงสำหรับการลอยตะกอนเท่ากับ 1 ชั่วโมง แต่ระยะเวลากักพักน้ำเสียสำหรับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดจากการทดลองข้างต้นพบว่าจะต้องมากกว่า 3 วัน จึงจะมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันใกล้เคียงกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน แสดงให้ทราบว่าปฏิกิริยาปลดปล่อยกรดคาร์บอกซิลิกหรือกรดไขมันอิสระของวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด ช้ากว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของกระบวนการโคแอกกูเลชันมาก ซึ่งมีผลต่อการเลือกใช้วิธีการหรือกระบวนการสำหรับบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลเนื่องจากการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอน โดยควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 6 ใช้เวลาสำหรับการบำบัดน้อย จึงมีความเหมาะสมกับโรงงานผลิตไบโอดีเซลที่มีพื้นที่ใช้งานน้อยสำหรับก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย

#### 4. การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ

จากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสีย พบว่ามีการแนะนำให้ใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ (Dissolved Air Flotation, DAF) บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมัน โดยกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กและอาศัยกลไกการดูดติดระหว่างฟองอากาศกับหยดน้ำมันและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2542; Eckenfelder, 2000; Metcalf & Eddy, 2004) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศทดสอบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ชุดทดลอง Dissolved Air Flotation Test Apparatus ซึ่งจากการทดสอบระบบการทำงานของชุดทดลองโดยเปรียบเทียบ

ปริมาณอากาศที่ละลายวัดในรูปของออกซิเจนละลายน้ำ (Demand Oxygen, DO) ที่ความดัน 3, 4, 5, bar gauge ณ อุณหภูมิห้อง (ภาพที่ 50) พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นมากในช่วงเริ่มต้นอัดอากาศ คือที่ระยะเวลาพัก 0 – 2 นาที โดยปริมาณออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้นจาก 6.3 mg/L เป็น 10.6, 11.6 และ 12.3 mg/L ตามค่าความดันที่มากขึ้น เนื่องจากค่าอิ่มตัวของอากาศขึ้นกับความสามารถละลายได้ของออกซิเจนและไนโตรเจนในน้ำซึ่งแปรผันตามค่าความดัน (Henry's Law) (Eckenfelder, 2000)



ภาพที่ 50 ผลระยะเวลาพักต่อค่าออกซิเจนละลาย ที่ค่าความดันในถังอัดอากาศต่างๆ (อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 32.5 °C)

จากการทดลองพบว่าค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาพักเพิ่มขึ้นเป็น 4 นาที คือมีออกซิเจนละลายเท่ากับ 11.3, 12.2, และ 12.6 mg/L ตามค่าความดันที่มากขึ้น แต่เมื่อระยะเวลาพักนานกว่า 4 นาที ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเริ่มคงที่เป็นการแสดงถึงน้ำอิ่มตัวด้วยออกซิเจนหรืออากาศ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความดันที่ใช้อัดอากาศจะเห็นได้ว่าค่าออกซิเจนละลายมีความแตกต่างกันไม่มาก ซึ่งจากการตรวจสอบเอกสารเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตะกอนลอยพบว่าค่าความดันและระยะเวลาพักใกล้เคียงกันกับค่าความดันที่แนะนำ

ในการออกแบบระบบตะกอนลอยแบบอัดอากาศ ที่มีการแนะนำให้เลือกใช้ค่าความดันของถังอัดความดันในช่วง 3 – 5 bar gauge และแนะนำให้ใช้ระยะเวลาพักในถังอัดความดันในช่วง 1 – 4 นาที (Eckenfelder, 2000; Metcalf & Eddy, 2004) โดยการวัดค่าออกซิเจนละลายเป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของอากาศ (Air Solubility) ในน้ำ เพื่อที่จะสามารถเลือกใช้ค่าความดันและระยะเวลาพักในถังอัดความดัน จากผลการทดสอบความสามารถของชุดทดลองข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าความดันเท่ากับ 4 bar gauge และระยะเวลาพักในถังอัดความดันเท่ากับ 4 นาที สำหรับการทดสอบใช้กระบวนการตะกอนลอยบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลทุกการทดลอง

จากการศึกษาเอกสารเกี่ยวข้องกับการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ พบว่าระบบของกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศที่นิยมใช้มีสองระบบ คือ ระบบ *Full-stream Pressurization* เป็นกระบวนการที่ผ่านน้ำที่มีตะกอนหรือน้ำเสียเริ่มต้นทั้งหมดเข้าไปอัดอากาศในถังอัดความดันแล้วปล่อยให้ลอยตะกอน และระบบ *Recycle-stream Pressurization* เป็นกระบวนการที่นำเอาน้ำที่ผ่านการแยกตะกอนออกแล้ว (effluent) มาอัดอากาศก่อนที่จะนำไปรวมกับน้ำที่มีตะกอนหรือน้ำเสียเริ่มต้นแล้วปล่อยให้ลอยตะกอน (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2535; ภาณุพันธ์ มั่นถึง, 2546; อนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล, 2538; อนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล, 2546; Eckenfelder, 2000; Metcalf & Eddy, 2004) ซึ่งจากการทดลองใช้กระบวนการตะกอนลอยทั้งสองระบบทดสอบแยกไขมันและน้ำมันกับน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยตรง พบว่าไม่สามารถแยกไขมันและน้ำมันหรือลดสภาพอิมัลชันได้ โดยน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการตะกอนลอยทั้งสองระบบยังคงมีสภาพเป็นอิมัลชันเช่นเดียวกับน้ำเสียเริ่มต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำลายเสถียรภาพหรือลดสภาพอิมัลชันก่อนการใช้กระบวนการตะกอนลอย ซึ่งผลการใช้วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถลดสภาพอิมัลชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้วิธีการและกระบวนการดังกล่าวเพื่อลดสภาพอิมัลชันของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล (Pretreatment) ก่อนใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ ซึ่งจากการศึกษารายงานการวิจัยพบว่าการใช้งานร่วมกันของวิธีการและกระบวนการดังกล่าวสามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมันและมีสภาพเป็นอิมัลชันได้และมีประสิทธิภาพสูง (Zouboulis, 2000; Shamrani et al., 2002a; Shamrani et al., 2002b; Bensadok et al. 2007)

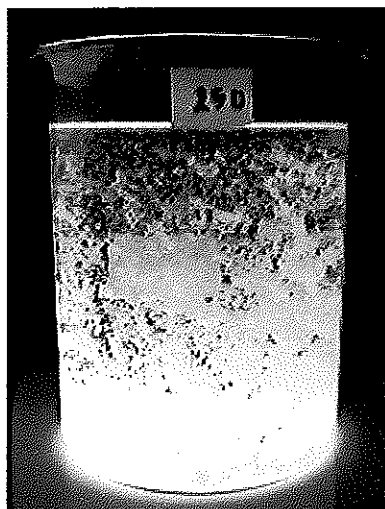
#### 4.1 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการตะกอนลอยร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด

จากการทดสอบปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมีผลทำให้เกิดการรวมตัวของหยดน้ำมันกลายเป็นหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งบางส่วนสามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ แต่บางส่วนยังคงแขวนลอยอยู่ในน้ำ เนื่องจากขนาดหยดน้ำมันยังไม่ใหญ่พอที่จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทดสอบใช้กระบวนการตะกอนลอยศึกษาความสามารถในการแยกไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียหลังการปรับค่าพีเอชเท่ากับ 3 และระยะเวลาพักพักน้ำเสียเท่ากับ 3 วัน จากการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศด้วยระบบ *Full-stream Pressurization* กับน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลหลังผ่านการบำบัดโดยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพอิมัลชันของน้ำเสียและไม่สามารถแยกไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียที่สถานะดังกล่าวได้ ส่วนการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศด้วยระบบ *Recycle-stream Pressurization* โดยใช้อัตราส่วนการ Recycle (R) น้ำกลับมอัดอากาศเท่ากับร้อยละ 20, 40, และ 60 ของน้ำเข้า (Influent) ทำการทดสอบโดยการใช้น้ำประปาเป็นน้ำสำหรับการ Recycle (R) ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีของน้ำหลังผ่านการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศด้วยระบบ *Recycle-stream Pressurization* และเปรียบเทียบค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้จากห้องปฏิบัติการกับค่าซีโอดีที่ได้จากการคำนวณร้อยละการเจือจางพบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก (ภาพภาคผนวก ก 1) แสดงให้ทราบว่า การลดลงของค่าซีโอดีมีผลมาจากการเจือจาง ไม่ใช่มีผลมาจากการแยกไขมันและน้ำมันออกไปได้ ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศด้วยระบบ *Recycle-stream Pressurization* ไม่สามารถแยกไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียหลังผ่านการปรับค่าพีเอชด้วยกรดได้ เช่นเดียวกับระบบ *Full-stream Pressurization* แสดงให้เห็นว่าถึงแม้การใช้วิธีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลสามารถแยกไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียได้มากกว่าร้อยละ 80 และมีผลทำให้หยดน้ำมันที่ปนเปื้อนรวมตัวกันมีขนาดใหญ่กว่าหยดน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลเริ่มต้น แต่ไม่สามารถใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศแยกไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสียได้ ทั้งนี้อาจเนื่องจากหยดน้ำมันเป็นของเหลวมีผลให้เกิดการติดเกาะ (Adhesion) ระหว่างผิวฟองอากาศกับหยดน้ำมันเกิดขึ้นได้ไม่ถี่ อีกทั้งเป็นอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำเสียจัดเป็นชนิดชอบน้ำ มีผลให้โมเลกุลของน้ำล้อมรอบอยู่มาก ดังนั้นฟองอากาศจึงไม่สามารถยึดติดและพาตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้



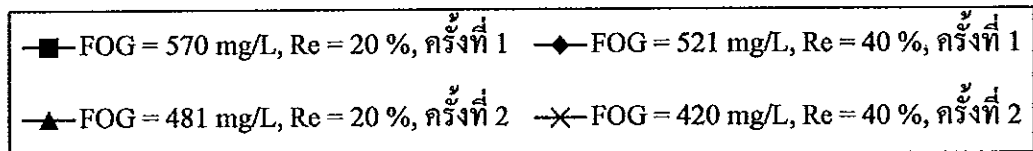
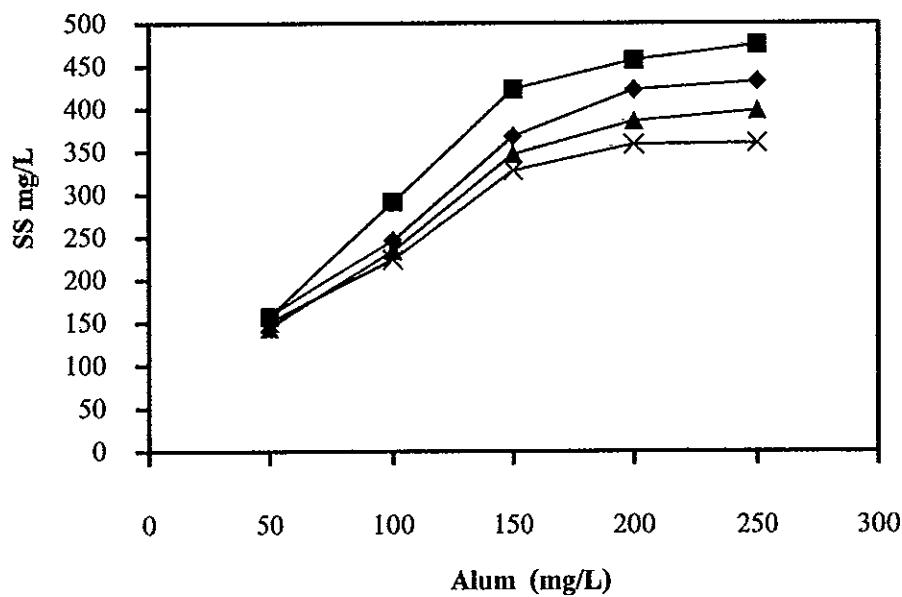
## 4.2 การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการตะกอนลอยร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชและกระบวนการโคแอกกูเลชัน

เนื่องจากการทดสอบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรวดร่วมกับกระบวนการตะกอนลอยแบบอัคคาภาสไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันและน้ำมันดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นจึงพิจารณาใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันต่อเนื่องจากวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรวดเท่ากับ 3 ร่วมกับการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัคคาภาส เริ่มต้นด้วยการใช้วิธีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลให้มีค่าเท่ากับ 3 เพื่อแยกไขมันและน้ำมันบางส่วนออกจากน้ำเสีย เป็นการช่วยลดปริมาณการใช้สารช่วยรวมตะกอนได้ร้อยละ 60 – 90 ซึ่งเป็นการประหยัดปริมาณสารช่วยรวมตะกอน โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้สารส้มเป็นสารช่วยรวมตะกอนสำหรับการทดสอบในขั้นตอนการใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันต่อเนื่อง เนื่องจากมีราคาถูก หาซื้อง่าย และเกิดตะกอนไขมันและน้ำมันน้อยเมื่อเทียบกับสารช่วยรวมตะกอนชนิดอื่นๆ อีกทั้งการลดลงของปริมาณไขมันและน้ำมันจากการใช้วิธีการปรับค่าพีเอชก่อนการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้มเป็นผลให้ตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นน้อยกว่าการใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการใช้วิธีการปรับค่าพีเอชทำให้เกิดไขมันและน้ำมันแยกออกไปก่อนหน้านี้แล้ว แต่พบว่าตะกอนไขมันและน้ำมันแขวนลอยอยู่ในน้ำส่วนล่างมาก (ภาพที่ 51) (ภาพภาคผนวก ก 5)



ภาพที่ 51 การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้มหลังการทำ Acidification และแยกไขมันและน้ำมันส่วนบนออกแล้ว (ความเข้มข้นของสารส้มเท่ากับ 250 mg/L; พีเอชเท่ากับ 6 ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)

แม้ตะกอนไขมันและน้ำมันจะใหญ่แต่ความหนาแน่นไม่มากพอที่จะตกจมได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบของไขมันและน้ำมันรวมอยู่ด้วย ทั้งนี้อาจเป็นผลจากตะกอนไขมันและน้ำมันประกอบด้วยสารประกอบของอะลูมิเนียม  $Al(OH)_3$  ที่มีความหนาแน่นมากรวมอยู่กับไขมันและน้ำมันที่มีความหนาแน่นน้อย จึงกลายเป็นตะกอนของแข็งที่กึ่งจมกึ่งลอยอยู่ใน จากการวิเคราะห์ค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (ภาพที่ 52) พบว่าค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน แปรผันตามปริมาณไขมันและน้ำมันและปริมาณการเติมสารส้ม และส่วนใหญ่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการตะกอนลอยช่วยแยกตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชันลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

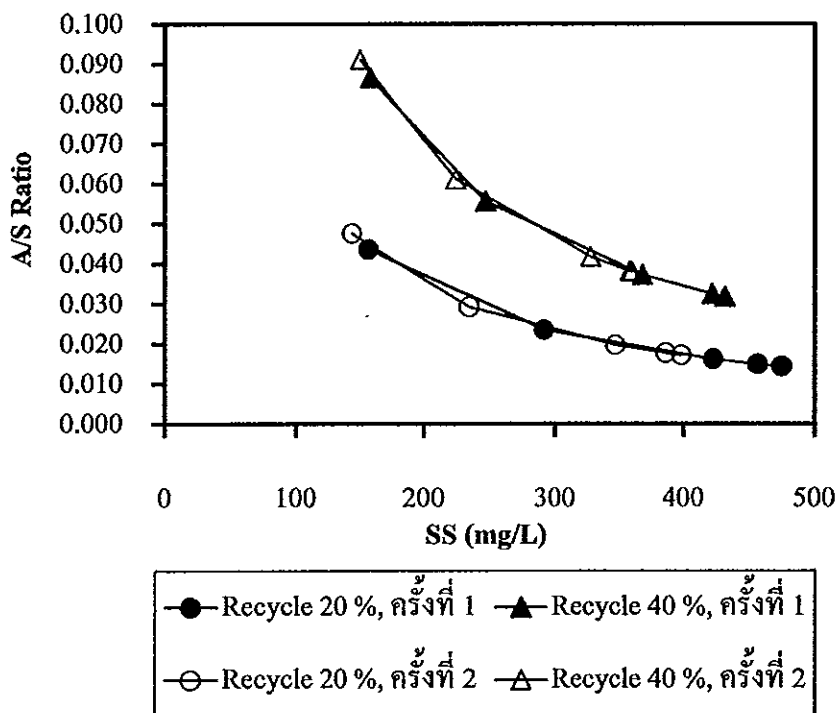


ภาพที่ 52 การเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมันของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม หลังการทำ Acidification และแยกไขมันและน้ำมันส่วนบนออกแล้ว (ควบคุมพีเอชเท่ากับ 6; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง; FOG หมายถึง Fat, Oil และ Grease)

อย่างไรก็ตามตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นเปราะแตกง่ายและมีความหนาแน่นต่ำ เป็นผลให้การใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศในขั้นตอนที่สามด้วยระบบ *Full-stream Pressurization* ไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากตะกอนไขมันและน้ำมันบางส่วนติดค้างอยู่ในถังความดัน และบางส่วนติดค้างในระบบท่อปล่อยน้ำออกจากถังความดันสู่ถังลอยตะกอน (Flotation Cell) ของชุดทดลอง ทำให้ระบบดังกล่าวเกิดการอุดตัน ปัญหาดังกล่าวแสดงถึงความไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศด้วยระบบ *Recycle-stream Pressurization* เพียงระบบเดียว ผลการทดสอบใช้วิธีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 3 และระยะเวลาพักเท่ากับ 3 – 4 วัน พบว่าค่าไขมันและน้ำมันของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 8,250 mg/L ลดลงเหลือต่ำกว่า 800 mg/L เป็นผลให้การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้มเป็นสารช่วยรวมตะกอนและควบคุมพีเอชเท่ากับ 6 ใช้ปริมาณสารส้มต่ำกว่า 250 mg/L

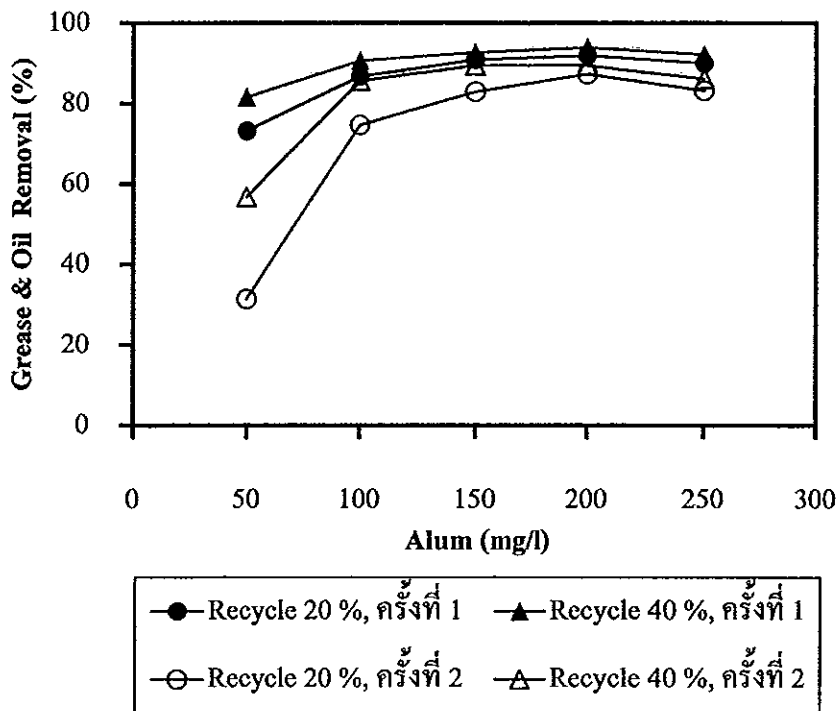
จากการศึกษารายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไขมันและน้ำมันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการใช้กระบวนการตะกอนลอย ร่วมกับการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) (ภานุพันธ์ มั่นถึง และคณะ, 2546; Zouboulis, 2000; Shamrani *et al.*, 2002a; Shamrani *et al.*, 2002b; Bensadok *et al.* 2007) โดยประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณตะกอน (A/S Ratio) (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก จ) โดยช่วงค่าแนะนำ A/S สำหรับการออกแบบระบบตะกอนลอยแบบอัดอากาศควรอยู่ในช่วง 0.005 – 0.06 (kg/kg) (Eckenfelder, 2000; Metcalf & Eddy, 2004) การวิจัยในครั้งนี้จึงเลือกใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศด้วยระบบ *Recycle-stream Pressurization* โดยในครั้งแรกเป็นการใช้น้ำประปาเป็นน้ำสำหรับการ *Recycle* ครั้งที่สองเป็นการนำน้ำผ่านการบำบัดส่วนที่แยกตะกอนไขมันออกแล้วในครั้งแรกเป็นน้ำสำหรับการ *Recycle* และทดสอบใช้ค่าอัตราส่วนการ *Recycle* (R) เท่ากับร้อยละ 20 และ 40 ของน้ำเข้า (Influent) โดยในขั้นตอนของกระบวนการโคแอกกูเลชันใช้ปริมาณสารส้มเท่ากับ 50, 100, 150, 200, และ 250 mg/L เมื่อพิจารณาค่า A/S (ภาพที่ 53) พบว่ามีค่าลดลงตามค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน ที่เพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากการใช้สารส้มเพิ่มมากขึ้นเป็นผลให้เกิดตะกอนไขมันและน้ำมัน ( $Al(OH)_3$  + ไขมันและน้ำมัน) เพิ่มขึ้น โดยที่ค่า A/S ของการทดสอบใช้น้ำประปาในครั้งแรกและใช้น้ำส่วนที่แยกตะกอนไขมันออกแล้วในครั้งแรกในการทดสอบครั้งที่สองมีค่าใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากค่าตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดจากการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันมีค่าใกล้เคียงกัน และพบว่าค่าอัตราส่วนการ *Recycle* (R) มากขึ้นมีผลให้ค่า A/S เพิ่มขึ้น โดยผลการทดสอบค่าอัตราส่วนการ *Recycle* (R) เท่ากับร้อยละ 20 พบว่ามีค่า A/S อยู่ในช่วง 0.01 – 0.05 แต่สำหรับผลการทดสอบค่าอัตราส่วนการ *Recycle* (R)

เท่ากับร้อยละ 40 พบว่ามีค่า A/S อยู่ในช่วง 0.03 – 0.09 ซึ่งมีค่า A/S ค่อนข้างสูงเนื่องจากตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดจากการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้มเกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันน้อยเมื่อใช้ความเข้มข้นสารส้มน้อยกว่าหรือเท่ากับ 150 mg/L ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากรณีของการทดสอบในครั้งนี้การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยค่าอัตราส่วนการ Recycle (R) เท่ากับร้อยละ 20 เพียงพอกับความต้องการแยกตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม อย่างไรก็ตามปริมาณการเติมสารส้มในขั้นตอนของกระบวนการโคแอกกูเลชันต้องเพียงพอกับความต้องการรวมตะกอนไขมันและน้ำมัน ซึ่งจากผลการทดลองในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าจะต้องใช้ปริมาณสารส้มประมาณ 150 – 250 mg/L โดยสำหรับการใช้งานจริงอาจจะต้องหาปริมาณสารส้มที่ต้องเติมด้วยวิธีการทดสอบจาร์เทส



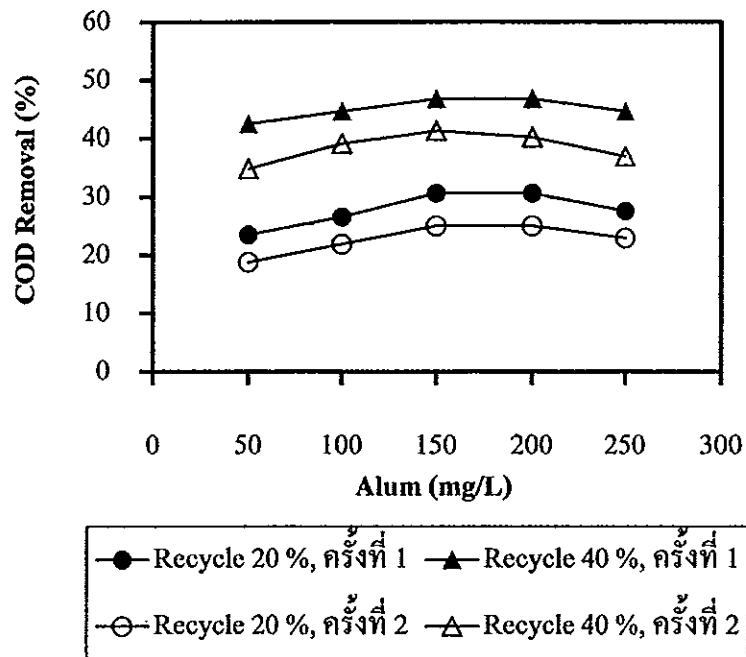
ภาพที่ 53 ตะกอนไขมันและน้ำมันต่อค่า A/S Ratio ของการใช้กระบวนการตะกอนลอย ที่ค่าการ Recycle ร้อยละ 20 และ 40

จากการศึกษาระยะเวลาพัก (Retention time) และอัตราการลอยตะกอน (Rise Rate) สำหรับถังลอยตะกอน (Flotation cell) (ภาพภาคผนวก ก 6) (ตารางภาคผนวก จ 4 และ 5) พบว่าเมื่อใช้ค่าอัตราส่วนการ Recycle (R) เท่ากับร้อยละ 20 และ 40 พบว่าควรมีระยะเวลาพักเท่ากับ 7 และ 9 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับช่วงค่าแนะนำการออกแบบถังลอยตะกอนของ Eckenfelder, 2000 ที่มีการแนะนำให้ใช้ค่าดังกล่าวในช่วง 20 – 30 นาที ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้มมีความหนาแน่นต่ำกว่าตะกอนที่เกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมอื่นๆ จึงสามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้เร็ว ส่วนค่าอัตราการลอยตะกอนซึ่งหมายถึงตะกอนที่ผสมกับอากาศ (Solids – Air mixture) (Eckenfelder, 2000) จากการคำนวณพบว่าเมื่อใช้ค่าอัตราส่วนการ Recycle (R) เท่ากับร้อยละ 20 มีค่าอัตราการลอยตะกอนเท่ากับ 36.7 – 40.8 L/m<sup>2</sup>.min (0.901 – 1.001 GPM/ft<sup>2</sup>) และเมื่อใช้ค่าอัตราส่วนการ Recycle (R) เท่ากับร้อยละ 40 มีค่าอัตราการลอยตะกอนเท่ากับ 20.4 – 28.5 L/m<sup>2</sup>.min (0.500 – 0.701 GPM/ft<sup>2</sup>) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงค่าแนะนำสำหรับการออกแบบถังลอยตะกอนของ Metcalf & Eddy, 2004 ที่แนะนำให้มามีค่าอัตราการลอยตะกอนเท่ากับ 8.0 – 160 L/m<sup>2</sup>.min (0.2 – 4.0 GPM/ft<sup>2</sup>) ซึ่งค่าทั้งสองดังกล่าวจำเป็นต้องทำการศึกษา เนื่องจากจะต้องใช้สำหรับการออกแบบถังลอยตะกอน เพื่อหาขนาดถัง พื้นที่ผิวด้านบนของถัง และความลึกถัง ซึ่งอาจพิจารณาเปรียบเทียบกับช่วงค่าการแนะนำสำหรับการออกแบบถังลอยตะกอนจากเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตะกอนลอย อย่างไรก็ตามกระบวนการโคแอกกูเลชันมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน คือ ปริมาณสารช่วยรวมตะกอนจะต้องเพียงพอกับความต้องการเกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนเมื่อใช้ปริมาณสารช่วยรวมตะกอนและควบคุมค่าพีเอชเหมาะสมกับการเกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมันดังกล่าวก่อให้เกิดตะกอนไขมันและน้ำมันขนาดเล็ก ดังนั้นเมื่อบำบัดต่อด้วยการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ ทำให้เกิดกลไกการดูดซับระหว่างฟองอากาศกับตะกอนไขมันและน้ำมันได้ดี ฟองอากาศที่เกิดขึ้นสามารถพาตะกอนไขมันและน้ำมันลอยขึ้นได้ดีกว่าการใช้กระบวนการตะกอนลอยร่วมรับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด เป็นผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของกระบวนการนี้มีค่าสูง ซึ่งจากการวิจัยในครั้งนี้พบว่าการเติมสารส้มที่ค่าความเข้มข้นเท่ากับ 100 – 250 mg/L มีผลทำให้เกิดการรวมตะกอนได้ดี สามารถแยกตะกอนไขมันและน้ำมันออกจากน้ำได้ง่ายโดยกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ

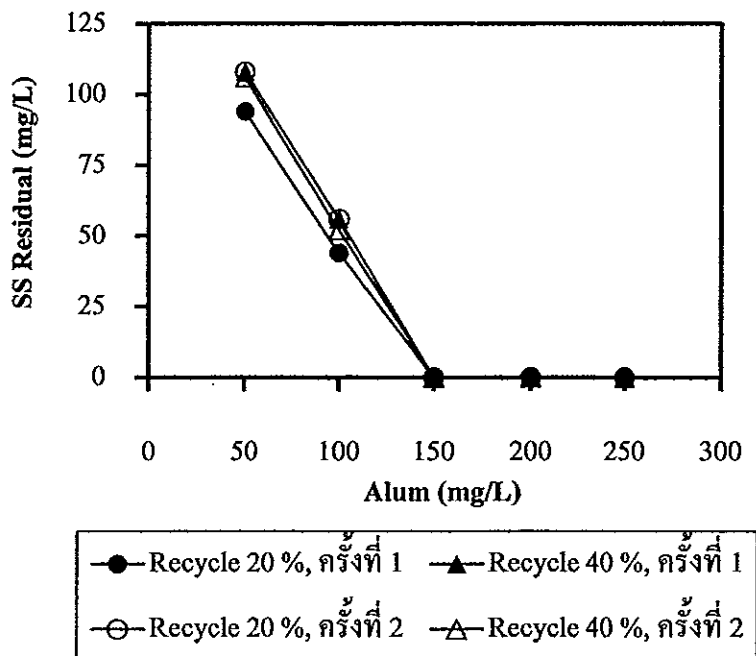


ภาพที่ 54 ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันของการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบ  
 อัดอากาศ ที่ค่าการ Recycle ร้อยละ 20 และ 40

โดยพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน (ภาพที่ 54) ในช่วงปริมาณสารส้มเท่ากับ 100 – 250 mg/L มีค่าร้อยละ 85 – 95 เมื่อเทียบกับปริมาณไขมันและน้ำมันหลังจากใช้วิธีการปรับค่าพีเอช หรือมีค่าสูงถึงร้อยละ 98 – 99.6 เมื่อเทียบกับปริมาณไขมันและน้ำมันของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลเริ่มต้น เป็นผลให้มีปริมาณไขมันและน้ำมันคงเหลืออยู่ในน้ำหลังผ่านกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศประมาณ 30 – 100 mg/L จากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ และคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดเทียบกับค่าซีโอดีหลังผ่านวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด (ภาพที่ 55) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศด้วยค่าอัตราส่วนการ Recycle (R) เท่ากับร้อยละ 20 และ 40 มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 20 – 30 และ 40 – 50 ตามลำดับ



ภาพที่ 55 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีของการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ ที่ค่าการ Recycle ร้อยละ 20 และ 40



ภาพที่ 56 ค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน คงเหลือในน้ำส่วนต่างหลังผ่านกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศด้วยระบบ *Recycle-stream Pressurization*

เมื่อพิจารณาพร้อมกับค่าปริมาณสารแขวนลอยที่ไม่พบว่ามีสารแขวนลอยเหลืออยู่ในกรณีการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้มมากกว่าหรือเท่ากับ 150 mg/L (ภาพที่ 56) แสดงให้เห็นว่าค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้มีผลมากกว่าการปนเปื้อนสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของสารละลาย ซึ่งเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในน้ำส่วนล่างหลังผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนชนิดต่างๆ ที่มีค่าซีโอดีคงเหลือสูงกว่า 10,000 mg/L เช่นเดียวกัน ดังนั้นน้ำเสียหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดเพื่อกำจัดไขมันและน้ำมันออกแล้ว ยังจะต้องผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบอื่นเพื่อลดความสกปรกของน้ำเสียที่ยังคงเหลืออยู่ (ตารางที่ 20) ต่อไป เมื่อพิจารณาตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นพบว่าเมื่อมีตะกอนไขมันเกิดขึ้นประมาณ 5 – 20 mL Sludge/L Wastewater (ตารางที่ 21) ซึ่งมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเพียงอย่างเดียว แสดงถึงการใช้วิธีการร่วมกันนี้ช่วยลดภาระการกำจัดตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นได้ อีกทั้งจากการพิจารณาค่าใช้จ่าย (ตารางที่ 22) พบว่ามีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเพียงอย่างเดียวเช่นกัน อย่างไรก็ตามยังคงต้องมีการพิจารณาค่าใช้จ่าย อื่นๆ อีก เช่น ค่าก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสีย ค่าไฟฟ้า และค่าจ้างบุคลากรสำหรับควบคุมดูแลระบบ ซึ่งมีผลต่อการพิจารณาเลือกวิธีการบำบัดน้ำเสียสำหรับการใช้งานจริง

ตารางที่ 20 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดโดยกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและกระบวนการโคแอกกูเลชัน

Parameter	Unit	Properties		Efficiency (%)
		Raw wastewater	After	
Color	-	White (Emulsion)	Clear (No Color)	-
Turbidity	NTU	Very High	<10	-
pH	-	8.5 – 10.5	6	-
SS	(mg/L)	1,500 – 5,000	< 15	98 – 100
COD	(mg/L)	60,000 – 150,000	10,000 – 20,000	80 - 90
BOD <sub>5</sub>	(mg/L)	30,000 – 60,000	4,000 – 10,000	80 – 90
Grease & Oil	(mg/L)	7,000 – 15,000	30 - 100	98.0 – 99.6

หมายเหตุ ประสิทธิภาพการกำจัดเทียบกับน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลเริ่มต้น



ตารางที่ 21 ปริมาณตะกอนไขมันและน้ำมันจากการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการตะกอนลอยแบบ  
อัดอากาศร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด และกระบวนการ โคแอกกูเลชัน

List	Dosage (mL/L)	Sludge (mL/L)
Acidification (1 N HCl)	8 – 15	10 – 30
Coagulation (10 g Alum/L)	15 – 25	-
Dissolve Air flotation, DAF	-	5 – 20
<b>Total</b>		<b>15 – 50</b>

ตารางที่ 22 ค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีของการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศร่วมกับ  
วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและกระบวนการ โคแอกกูเลชัน

List of Chemical	Dosage	Costs (Baht/ m <sup>3</sup> )
Hydrochloric Acid (1 N HCl)	8 – 15 (mL/L)	9 – 15
Alum (10 g Alum/L)	150 – 250 (mg/L)	2 – 8
Sodium Hydroxide (1 N NaOH)	6 – 8 (mL/L)	7 – 12
<b>Total Costs</b>		<b>18 – 35</b>

หมายเหตุ คำนวณค่าใช้จ่ายเฉพาะค่าสารเคมี ณ เดือน กันยายน พ.ศ. 2552

## 5. การประยุกต์ใช้งาน

จากผลการวิจัยศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการทาง  
กายภาพและเคมีข้างต้น การประยุกต์ใช้งานจริงสามารถเลือกใช้วิธีการบำบัดดังกล่าว โดยเริ่มต้น  
จะต้องมีการกักตักน้ำเสียให้มีระยะเวลาเพียงพอเพื่อแยกไบโอดีเซลและเมทานอลที่หลุดลอย  
ออกมาพร้อมกับน้ำเสียดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ จากนั้นจึงทำการบำบัดน้ำเสียโดยอาจพิจารณาเลือกใช้  
วิธีการหรือกระบวนการบำบัดตามความเหมาะสม เนื่องจากวิธีการและกระบวนการบำบัดที่ได้จาก  
งานวิจัยนี้มีข้อดีและข้อด้อยที่ต่างกันแสดงดังตารางที่ 23 โดยสามารถเลือกใช้คำแนะนำสำหรับการ  
ออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล แสดงดังตารางที่ 24 กระบวนการตะกอนลอย

แบบอัดอากาศ ควรติดตั้งหลังจากกระบวนการ โคแอกกูเลชัน หากพบว่ามีตะกอนไขมันและน้ำมันแขวนลอยอยู่ในน้ำเสียปริมาณมาก ซึ่งการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศช่วยแยกตะกอนไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสีย เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมัน รวมถึงความสกปรกของน้ำเสียในรูปค่าซีโอดีและบีโอดีด้วยเช่นกัน สำหรับในทางปฏิบัติการเลือกใช้วิธีการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล อาจพิจารณาเลือกใช้วิธีการหรือกระบวนการบำบัดน้ำเสียตามกำลังการผลิตและแนวทางการบำบัดน้ำเสียและกำจัดตะกอนที่เกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขั้นต้น ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.1 – 5.4

ตารางที่ 23 ข้อดีข้อด้อยของวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด กระบวนการ โคแอกกูเลชันและกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ สำหรับบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

วิธีการ/กระบวนการ	ข้อดี	ข้อด้อย
Acidification	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. สามารถกำจัดไขมันและน้ำมันได้มากกว่าร้อยละ 80</li> <li>2. ได้ไขมันและน้ำมันกลับคืนมาซึ่งอาจสามารถนำกลับไปผลิตไบโอดีเซลใหม่ได้</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต้นทุนการบำบัดน้ำเสียสูง เนื่องจากต้องใช้กรดแก่ ซึ่งมีราคาค่อนข้างแพง</li> <li>2. น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าพีเอชต่ำ</li> </ol>
Coagulation	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. สามารถกำจัดไขมันและน้ำมันได้มากกว่าร้อยละ 95</li> <li>2. น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าความขุ่นต่ำ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต้องเติมสารช่วยรวมตะกอนปริมาณมาก</li> <li>2. เกิดตะกอนไขมันและน้ำมันปริมาณมาก และบางส่วนแขวนลอยอยู่ในน้ำ</li> </ol>
Acidification and Coagulation	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. สามารถแยกตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันได้มากกว่าร้อยละ 98</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ค่าใช้จ่ายสำหรับก่อสร้างระบบสูง</li> <li>2. สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า</li> </ol>
Dissolved Air Flotation (Recycle)	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. ช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันสูงกว่าร้อยละ 98</li> <li>3. อาจนำน้ำเสียกลับไปใช้ใหม่ในวัตถุประสงค์ต่างๆ ได้</li> </ol>	

ตารางที่ 24 ค่าแนะนำจากการทดลองเทียบกับค่าออกแบบทั่วไปสำหรับการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

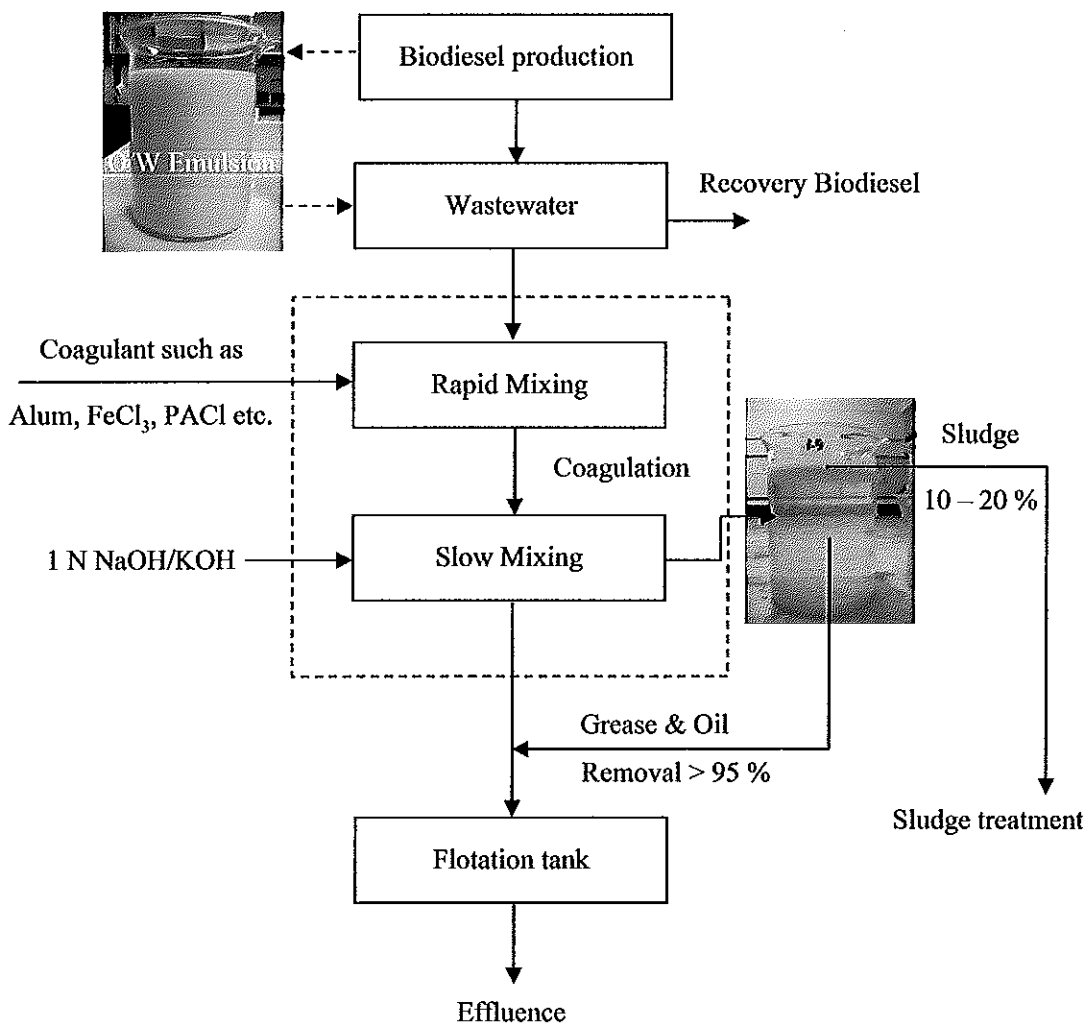
Unit operation	Laboratory	Criteria*	Unit
<b>Unit 1 pH adjustment</b>			
pH control (HCl or H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	≤ 3	-	-
Slow Mixing Velocity Gradient (G)	30	20 – 75	S <sup>-1</sup>
Retention time for Slow Mixing	20	20 – 30	min
Retention time for Reaction	≥ 3	-	day
<b>Unit 2 Coagulation</b>			
pH control (for Alum)	5 – 7	-	-
Rapid Mixing Velocity Gradient (G)	180	180 – 1450	S <sup>-1</sup>
Retention time for Rapid Mixing	1	1 – 2	min
Slow Mixing Velocity Gradient (G)	30	20 – 75	S <sup>-1</sup>
Retention time for Slow Mixing	20	20 – 30	min
<b>Unit 3 Dissolved Air Flotation</b>			
Recycle Ratio	20 – 40	20 – 150	% (Influent)
A/S Ratio	0.005 – 0.06	0.005 – 0.06	Kg/Kg
Pressure	4	3 – 5	bar gauge
Retention time in pressure tank	4	1 – 4	min
Retention time in flotation tank	7 – 9	20 – 30	min
Rise Rate	20.4 – 40.8	8.0 – 160	L/m <sup>2</sup> .min

\*หมายเหตุ ที่มา: เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์ (2535); อนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล (2538); Eckenfelder (2000); Shamrani *et al.* (2002a); Metcalf & Eddy (2004)

### 5.1 ระบบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขั้นต้นสำหรับโรงงานขนาดเล็กหรือชุมชน

โรงงานขนาดเล็กหรือชุมชนที่มีกำลังการผลิตไบโอดีเซลน้อย อาจพิจารณาเลือกใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเพียงขั้นตอนเดียวแสดงดังภาพที่ 57 เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการปรับพีเอชด้วยกรดและกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศมีค่าใช้จ่ายในการ

ก่อสร้างและเดินระบบค่อนข้างสูง ดังนั้นการนำวิธีการบำบัดดังกล่าวมาใช้งานจึงอาจไม่คุ้มทุน อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันหากมีการควบคุมให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสม ทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นลอยขึ้นสู่น้ำได้ดี เป็นผลให้ไม่ต้องใช้กระบวนการเพิ่มเติมเพื่อแยกตะกอนไขมันและน้ำมัน สามารถเลือกเติมสารช่วยรวมตะกอนที่มีราคาถูก เช่น สารส้ม เพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันเพียงอย่างเดียวอาจก่อให้เกิดตะกอนไขมันและน้ำมันปริมาณมาก จึงจำเป็นต้องมีวิธีการกำจัดที่เหมาะสมหรือพิจารณานำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เพื่อป้องกันมลพิษที่อาจเกิดจากตะกอนไขมันและน้ำมัน และยังคงบำบัดน้ำเสียต่อเพื่อลดความสกปรกอีก เพื่อสามารถนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นต่อไป



ภาพที่ 57 ระบบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขั้นต้นสำหรับโรงงานขนาดเล็กหรือชุมชน

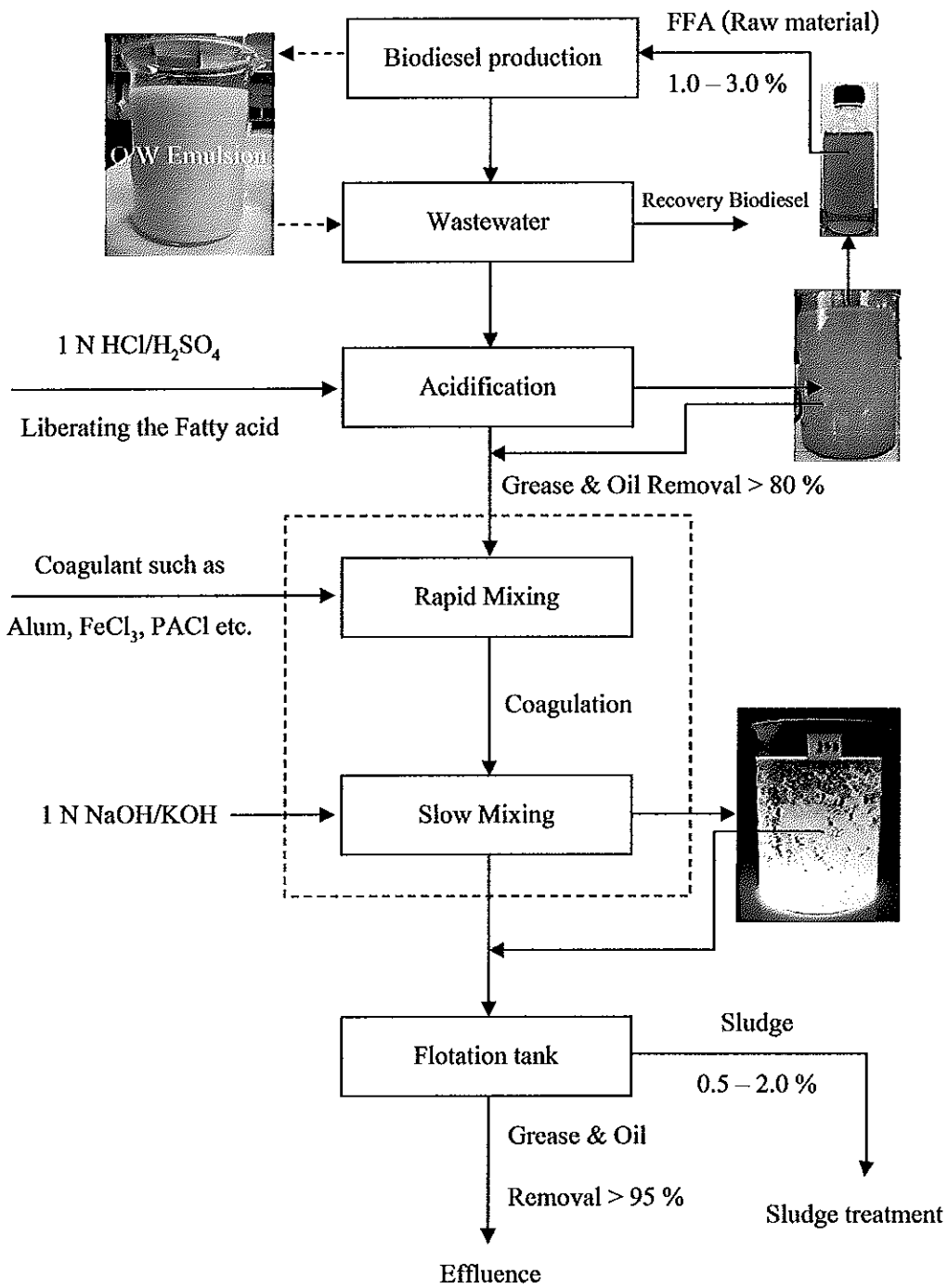
## 5.2 ระบบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขั้นต้นสำหรับโรงงานขนาดกลาง

สำหรับโรงงานขนาดกลางหรือโรงงานที่มีน้ำเสียปนเปื้อนสบู่ ไขมันและน้ำมันปริมาณมาก จึงอาจพิจารณาการบำบัดโดยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด ซึ่งจะได้ไขมันและน้ำมันกลับคืนมา และทำการบำบัดต่อด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอน อย่างไรก็ตาม และต้องมีการกักพักน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน เพื่อให้เกิดการแยกชั้นระหว่างชั้นตะกอนและชั้นน้ำใส (ภาพที่ 58) ซึ่งอาจจะต้องใช้เวลานานหลายวันในการกักพักน้ำเสีย แต่หากพบว่าตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชันแขวนลอยอยู่ในน้ำเสียปริมาณมากและแยกออกจากน้ำได้ยาก การใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศช่วยแยกตะกอนที่เกิดขึ้นจึงอาจเป็นทางเลือกหนึ่ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามยังต้องมีการบำบัดน้ำเสียต่อ เพื่อลดความสกปรกจนสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์อย่างอื่นต่อไปได้

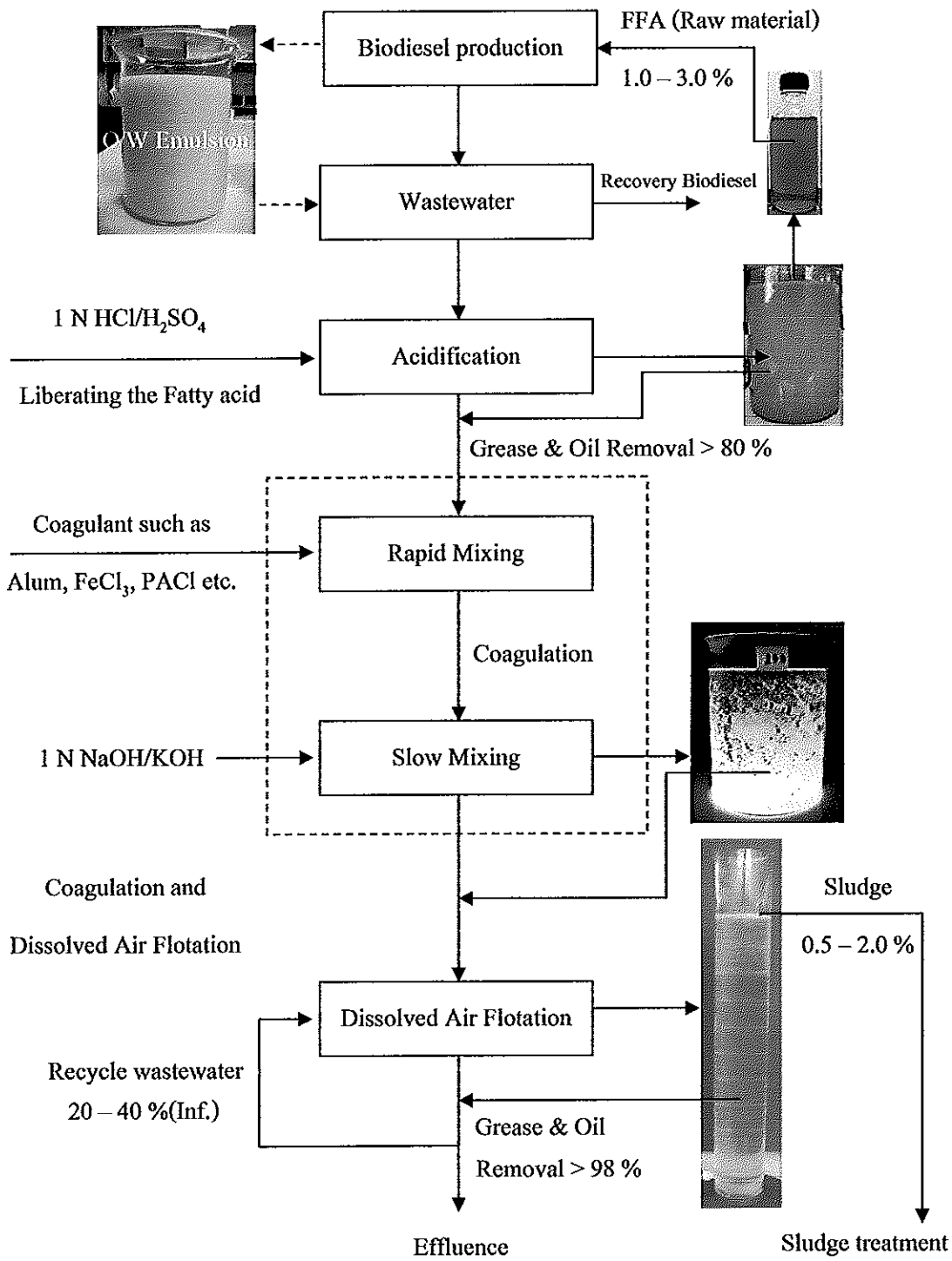
## 5.3 ระบบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขั้นต้นสำหรับโรงงานขนาดใหญ่

สำหรับโรงงานขนาดใหญ่ที่มีกำลังการผลิตไบโอดีเซลมาก การบำบัดน้ำเสียควรใช้วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและแยกไขมันและน้ำมันส่วนหนึ่งออกก่อน เพื่อลดปริมาณการปนเปื้อนไขมันและน้ำมันในน้ำเสียและช่วยลดปริมาณการใช้สารช่วยรวมตะกอนสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน สามารถเลือกเติมสารช่วยรวมตะกอนที่มีราคาถูก เช่น สารส้ม เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งไขมันและน้ำมันที่ได้จากขั้นตอนการใช้วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดอาจนำกลับไปใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้ ซึ่งเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดน้ำเสียได้อีกทางหนึ่ง โดยระบบบำบัดน้ำเสียขั้นต้นสำหรับโรงงานขนาดใหญ่แสดงดังภาพที่ 59

อย่างไรก็ตามหากโรงงานใดมีความพร้อมในการจัดการน้ำเสีย ควรเลือกใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วย วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด กระบวนการโคแอกกูเลชัน และกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศร่วมกัน เนื่องจากจะทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและน้ำมันสูงสุด เป็นการช่วยลดความสกปรกของน้ำเสียในรูปแบบซีโอดีและบีโอดีได้มากที่สุด เป็นผลดีต่อการพิจารณานำน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดไปใช้ประโยชน์ เช่น นำกลับมาล้างไบโอดีเซลใหม่โดยผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง เช่น เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane) ซึ่งจะเป็นการช่วยประหยัดน้ำสำหรับล้างไบโอดีเซลได้อีกทางหนึ่ง



ภาพที่ 58 ระบบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขั้นต้นสำหรับโรงงานขนาดกลาง



ภาพที่ 59 ระบบบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขั้นต้นสำหรับโรงงานขนาดใหญ่

#### 5.4 แนวทางการบำบัดน้ำเสียและกำจัดตะกอนที่เกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขั้นต้น

เนื่องจากรายงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลขั้นต้น ถึงแม้ว่าลักษณะน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการบำบัดดังกล่าวข้างต้นมีลักษณะใส แต่ยังคงมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีสูง ดังนั้นจึงยังต้องมีการบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดขั้นต้น โดยโรงงานขนาดกลางและขนาดใหญ่อาจพิจารณาใช้วิธีการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพ เช่น เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane) หรือกระบวนการบำบัดอื่นที่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ดี เพื่อบำบัดน้ำเสียให้มีความสะอาดและนำกลับไปใช้ใหม่ในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล ซึ่งจะเป็นการประหยัดน้ำและป้องกันผลกระทบจากการปล่อยน้ำเสียออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นสูงก็จะมีค่าใช้จ่ายสูงตามไปด้วย ดังนั้นการใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพอาจเป็นทางเลือกหนึ่ง โดยจากการพิจารณาค่าอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดี (BOD<sub>5</sub>/COD) ของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดโดยวิธีการปรับค่าพีเอช กระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการตะกอนลอยพบว่ามีค่าต่ำกว่า 0.5 แสดงให้ทราบว่าน้ำเสียดังกล่าวยากต่อการบำบัดด้วยวิธีการทางชีววิทยา ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียต่ออาจใช้วิธีการผสมกับน้ำเสียจากแหล่งอื่นที่มีค่าสารอาหาร (Nutrients) สูง เพื่อทำให้เกิดการย่อยทางชีววิทยาได้ดีและอาจผลิตไบโอก๊าซ (Biogas) ได้ ซึ่งโรงงานขนาดเล็กหรือชุมชนที่ไม่สามารถใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นสูงเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้ อาจเลือกใช้วิธีบำบัดนี้ได้ด้วยเช่นกัน

ส่วนตะกอนไขมันและน้ำมัน ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ดังนั้นอาจเลือกใช้วิธีการฝังกลบ หรือใช้วิธีการเผาด้วยอุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ และมีความปลอดภัยในการกำจัดตะกอนไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนโลหะ หรือมีการวิจัยเพิ่มเติม เพื่อนำตะกอนไขมันและน้ำมันดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ เช่น นำไปทำปุ๋ยหมัก อาหารสัตว์ หรือสังเคราะห์เป็น Biopolymer เป็นต้น



## บทที่ 4

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลพบว่ามี การปนเปื้อนสูง ไขมันและน้ำมันปริมาณมาก และมีสภาพเป็นอิมัลชัน เป็นสาเหตุให้การบำบัดน้ำเสีย ด้วยวิธีการทางกายภาพ โดยตรงมีประสิทธิภาพต่ำหรือไม่อาจบำบัดได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการทางเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพอิมัลชันและก่อให้เกิดการรวมตะกอนไขมันและน้ำมัน และใช้วิธีการทางกายภาพเพื่อแยกตะกอนไขมันและน้ำมันออกจากน้ำเสีย ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลอง ของงานวิจัยนี้ได้ดังต่อไปนี้

วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริก (1 N HCl) หรือซัลฟิวริก (1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) สามารถทำให้ไขมันและน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลรวมตัวกันและลอยแยก ออกจากน้ำเสียได้ เมื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ 3 อีกทั้งหากเพิ่มระยะเวลา กักพักน้ำเสียหลังการปรับค่าพีเอชนานขึ้น มีผลทำให้ไขมันและน้ำมันรวมตัวกันและลอยแยกออก จากน้ำได้มากขึ้นด้วย โดยที่หากกักพักน้ำเสียมากกว่า 3 วัน จะสามารถกำจัดไขมันและน้ำมันออก จากน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลได้มากกว่าร้อยละ 80 อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีผลทำให้ค่าพีเอช หลังผ่านการบำบัดค่าและน้ำเสียยังมีการปนเปื้อนไขมันและน้ำมันอีกมาก ดังนั้นน้ำเสียที่ผ่านการ บำบัดด้วยวิธีการนี้จึงยังต้องการบำบัดต่อไป

กระบวนการ โภแอกดูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอน สามารถใช้สำหรับการ บำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลได้ แต่จะต้องใช้ปริมาณการใช้สารช่วยรวมตะกอนเพียงพอ และควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งกรณีที่น้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณ การปนเปื้อนไขมันและน้ำมันมากกว่า 7,000 mg/L จะต้องใช้ค่าความเข้มข้นของสารส้ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ มากกว่า 1.0 g/L โคโคซานจะต้องใช้ที่ค่าความเข้มข้น มากกว่าร้อยละ 6 โดยปริมาตร และการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (0.5 g/L) ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine จะต้องใช้ Quaternary cationic polyamine ที่ค่าความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 0.05 โดย ปริมาตร โดยมีช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารช่วยรวมตะกอนแต่ละชนิด คือ การสารส้ม และ เฟอร์ริกคลอไรด์ มีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5 – 7 โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มีค่าพีเอชที่ เหมาะสมอยู่ในช่วง 6 – 7 โคโคซานมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6 – 7 และเฟอร์ริกคลอไรด์ ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine มีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6 – 8 โดยประสิทธิภาพการ

กำจัดไขมันและน้ำมันของทุกสารช่วยรวมตะกอนที่สภาวะดังกล่าวมากกว่าร้อยละ 95 ส่วนน้ำทะเลสามารถใช้เป็นสารช่วยรวมตะกอนได้ที่ค่าความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 50 โดยปริมาตร แต่มีผลให้ค่าของแข็งละลายของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดมีค่าสูง ดังนั้นจึงอาจไม่เหมาะสมสำหรับการใช้น้ำทะเลบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเพียงอย่างเดียวจะต้องเติมสารช่วยรวมตะกอนปริมาณมาก และก่อให้เกิดตะกอนไขมันและน้ำมันปริมาณมากเช่นเดียวกัน ซึ่งจะต้องพิจารณาวิธีการกำจัดหรือนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศทั้งระบบ *Full-stream Pressurization* และ *Recycle-stream Pressurization* ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงสภาพอิมัลชันของน้ำเสียได้ เช่นเดียวกับการใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศทั้งสองระบบร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด อย่างไรก็ตามหากใช้กระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศด้วยระบบ *Recycle-stream Pressurization* ต่อจากวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและกระบวนการโคแอกกูเลชัน ที่ค่าการ *Recycle* น้ำกลับมาอัดอากาศ เท่ากับร้อยละ 20 และ 40 สามารถกำจัดไขมันและน้ำมันมากกว่าร้อยละ 98 ซึ่งเป็นผลจากการทำโคแอกกูเลชันรวมตะกอนไขมันและน้ำมัน ทำให้ฟองอากาศที่เกิดจากกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศสามารถดูดซับตะกอนไขมันและน้ำมันพาลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ เป็นผลให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีลักษณะใสใกล้เคียงกับน้ำประปา และมีปริมาณการปนเปื้อนไขมันและน้ำมันเหลืออยู่น้อยกว่า 100 mg/L ซึ่งจะต้องมีการบำบัดเพื่อลดความสกปรกของน้ำเสียและนำกลับมาใช้ประโยชน์ต่อไป

## ข้อเสนอแนะ

สำหรับโรงงานที่เลือกใช้วิธีการปรับพีเอชด้วยกรด การกักพักน้ำเสียเป็นระยะเวลานานจะช่วยให้เกิดการแยกไขมันและน้ำมันได้มากขึ้น เป็นการช่วยลดปริมาณการเติมสารช่วยรวมตะกอน และช่วยลดปริมาณตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นเมื่อใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันได้ อีกทั้งไขมันและน้ำมันที่ได้จากวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดอาจสามารถนำกลับไปผลิตไบโอดีเซลใหม่ได้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับไขมันและน้ำมันที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียและช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดน้ำเสียได้อีกทางหนึ่ง เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดมีต้นทุนการบำบัดต่อหน่วยสูง

การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอน ควรมีการทดสอบจาร์เทสเพื่อหาปริมาณการเติมสารช่วยรวมตะกอนที่เหมาะสม เพื่อควบคุมปริมาณสารเคมีและค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดน้ำเสียให้น้อยที่สุด หากสามารถใช้สารช่วยรวมตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น โคลโคซาน หรือ พอลิเมอร์ ที่มีราคาถูกลงได้ จะเป็นผลดีต่อการพิจารณานำตะกอนไขมันและน้ำมันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศโดยใช้ชุดทดลองเป็นแบบ Batch ดังนั้นค่าความดัน ระยะเวลาการกักพักน้ำในถังอัดอากาศ และค่าอัตราส่วนการ Recycle (R) สำหรับการใช้งานจริง ซึ่งเป็นแบบ Continues จึงต้องมีการทดสอบความสามารถของระบบตะกอนลอยแบบอัดอากาศที่นำมาใช้ เนื่องจากการออกแบบระบบอัดอากาศของแต่ละบริษัทมีความแตกต่างกัน ทำให้ค่าความดัน ระยะเวลาการกักพักน้ำในถังอัดอากาศ และค่าอัตราส่วนการ Recycle (R) สำหรับเดินระบบจริงมีความแตกต่างกันด้วย

อย่างไรก็ตามวิธีการและกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นเพียงวิธีการบำบัดขั้นต้น ดังนั้นน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดยังคงจำเป็นต้องมีขั้นตอนการบำบัดด้วยวิธีการหรือกระบวนการบำบัดน้ำเสียรูปแบบอื่นเพิ่มเติม เพื่อลดความสกปรกของน้ำเสียให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง หรือสามารถนำน้ำเสียกลับไปใช้ประโยชน์ได้ และเป็นข้อควรระวังไม่ควรปล่อยน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลลงสู่ทะเล หรือแหล่งน้ำธรรมชาติอื่นๆ เพราะจะทำให้เกิดคราบน้ำมันลอยอยู่เหนือผิวน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของแหล่งน้ำ

## เอกสารอ้างอิง

## เอกสารอ้างอิง

- กิตติยา อัสภาชน์. (2545). ISO1004 กับการกำจัดของเสียในอุตสาหกรรม. สมอสาร.สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. ปีที่ 28 ฉบับที่ 326.
- กรรมธิการ์ สิริสิงห์. 2544. เคมีของน้ำ น้ำโสโครก และการวิเคราะห์. คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. พิมพ์ครั้งที่ 3.
- กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 2539. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. ประกาศ ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13ง ลงวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2539.
- เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์. 2542. การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment). พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์ สยามสเตชันเนอร์รี่พหลาลัยส์: กรุงเทพฯ.
- เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์. 2535. วิศวกรรมบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Engineering). เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์ มิตรนราการพิมพ์: กรุงเทพฯ.
- คู่จันทร์ จันทร์ทองอ่อน. 2549. การผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเสียจากโรงงานปาล์ม. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- จารุวรรณี เรืองคง สันหัชชัย กลิ่นพิกุล ชาคริต ทองอุไร และปิยะรัตน์ บุญแสวง. 2551. การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระบวนการผลิตไบโอดีเซล. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 7. วันที่ 12 – 14 มีนาคม 2551. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

ชาคริต ทองอุไร สันชัย กลิ่นพิกุล จรรย์ บุญกาญจน์ และ พิมพรรณ เกียรติชิมกุล. 2544. การผลิตไบโอดีเซลจากผลิตผลปาล์มน้ำมัน. ว.สงขลานครินทร์ วทท. ปีที่ 23 (ฉบับพิเศษ).

ชนินทร์ จินคนาวงศ์ ณิชูพงษ์ เสาะแสวงหา รัฐพงษ์ โอตาการ และประกอบ กิจไชยา. 2550. จลนศาสตร์เอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม. วิศวกรรมลาดกระบัง. ปีที่ 24 ฉบับที่ 4.

ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย. 2551. เทคโนโลยีและการพัฒนาการผลิตไบโอดีเซล. ศูนย์วิจัยเชื้อเพลิงภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.

ญาใจ วิริยะพงศ์ 2548. การใช้ประโยชน์ของไขมันจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยเอนไซม์ไลเปส: หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์เคมี มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.

ฐิตินน ชะคาร์ตัน สุธรรม สุขมณี ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์. 2552. การเตรียมกรดไขมันอิสระจากบ่อน้ำเสียโรงงานปาล์มเพื่อการผลิตเมทิลเอสเทอร์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7 วันที่ 21 – 22 พฤษภาคม.

คารินทร์ ภู่กิ่งงาม สมชาย คารารัตน์ และ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ . 2551. การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียไบโอดีเซล. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 7. วันที่ 12 – 14 มีนาคม 2551. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

ภานุพันธ์ มั่นถึง มัสลิน ศรีโสภา สาวิตรี ศรีสะอาด สุภาณี เลิศไทรรักษ์ สุภาภรณ์ คักกลาส ละเอียด เฟ็งโสภา และสุวัศสภา พงษ์อำไพ. 2546. การใช้กระบวนการตะกอนลอยเป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นแรกสำหรับการกำจัดไขมันและน้ำมัน. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

มันลิน ดัฒนกุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมกรประปา. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิศรุต ประยูรคำ วุฒิภูมิ ศรีวิชา ศรีชัย เตชะเสน และ วิบูลย์ลักษณ์ ฟุ้งรัมย์. 2551. การบำบัดน้ำเสีย  
จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทางชีวภาพ. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ  
สิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 7. วันที่ 12 – 14 มีนาคม 2551. สมาคมวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

ลลิตา นุรีรักษ์ ธิดิมา อินทร์ดี สุธิดา อรรถยานันทน์ และ ประกอบ กิจไชยา. 2550. การลดปริมาณ  
กรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่ง  
ปฏิกิริยา. วิศวกรรมลาดกระบัง. ปีที่ 24 ฉบับที่ 4.

อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล. 2538. การลอยตะกอนแบบการละลายของอากาศ. วารสารวิชาการพระจอม  
เกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 5 ฉบับที่ 6 ธันวาคม: 39 – 45.

อนุรักษ์ ปิติรักษ์กุล แสงนวล ศรีรัตน์ชัชวาลย์ พรเทพ อ่วมน้อย และสุธิดา ปานแมน. 2546.  
ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคของแข็ง โดยใช้เครื่องลอยตะกอนชนิดละลาย  
อากาศแบบต่อเนื่อง. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 13 ฉบับที่  
4 ตุลาคม – ธันวาคม: 16 – 22.

สุวภัทร์ อภัยสุวรรณ มานพ เจริญไชยตระกูล 2551. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้  
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน. วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 63 ปีที่ 21 ธันวาคม  
2550 – มีนาคม 2551.

Ahmad, A.L., Sumathi S., Hameed B.H., 2006. Coagulation of residual oil and suspended solid in  
palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC. Chemical Engineering  
Journal. 48: (99 – 105).

APHA, AWWA and WEF., 2005. Standard Methods for The Examination of Water and  
Wastewater. 18<sup>th</sup> edition. Maryland: American Public Health Association.

- Avcı, D., Mol N., Dagaşan L., 2002. New cationic polyelectrolytes for flocculation process of bakers, yeast waste water, *Polym. Bull.* 48: 353 – 359.
- Ayoub, G.M., Lee S.-I., Mazidji C.N., Seo I.-S., Cho H.-M., Koopman B. 1992. Seawater flocculation of emulsified oil and alkaline wastewaetrs. *J. Water Research.* 26 (6): 817 – 823.
- Ayoub, G.M., Merhebr F., Acra A., EL-Fadel M., and Koopman B., 2000. Sea water bitterm for the treatment of alkalizen industrial effluents. *J. Water Research.* 34 (2) : 640 – 656.
- Baeurle, S.A., Kroener J., 2004. Modeling effective interactions of micellar aggregates of ionic surfactants with the Gauss-Core potential, *J. Math. Chem.* 36: 409-421
- Becher, P., 1977. *Emulsions.* Robert E. Krieger Publishing Company, Inc. Krieger Drive. Malaber, Florida. USA.
- Bensadok, K., Belkacem M., and Nezzal G. 2007. Treatment of cutting oil/water emulsion by coupling coagulation and dissolved air flotation. *Desalination.* 206: 440-448.
- Bensadok, K., Benammar S., Lopicque F., Nezzal G., 2008. Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes. *J. Hazardous Materials.* 152: 423 – 430.
- Berrios, M., Siles J., Martin M.A., Martin A., 2007. A kinetic study of the esterification of free fatty acid (FFA) in sunflower oil. *Fule.* 86: 2383 – 2388
- Besraa, L., Sengupta, D.K., Roy S.K., Ay P., 2002. Polymer adsorption : its correlation with flocculation and dewatering of kaolin suspension in the presence and absence of surfactants, *Int. J. Miner Process.* 66: 183 – 202.



- Blachier, C., Michot L., Bihannic I., Barres O., Jacquet A., Mosquet M., 2009. Adsorption of polyamine on clay minerals. *J. Colloid and Interface Science*. 336: 599 – 606.
- Bratskaya, S., Avramenko V., Schwarz S., Philippova I., 2006. Enhanced flocculation of oil-in-water emulsions by hydrophobically modified chitosan derivatives. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*. 275: 168 – 176.
- Bunnaul, P., 1999. Advance wastewater treatment technology: flocculation processes and surface chemistry. The international training course in wastewater management, water supply and sanitation. Department of Mining and Materials Engineering. Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Thailand.
- Caetano, C.S., Guerreiro L., Fonseca I.M., Ramos A.M., Vitl J., Castanheiro J.E., 2009. Esterification of fatty acid to biodiesel over polymer with sulfonic acid groups. *Applied Catalysis A: General*. 359: 41 – 46.
- Calderon, F.L., and Schmitt V., 2008. Solid-stabilized emulsion. *Current Operation in Colloid & Interface Science* 13: 217 – 227.
- Canizares, P., Jimenez C., Martiez F., Rodrigo M.A., Saez C., 2009. The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters. *J. Hazardous Materials*. 163: 158 – 164.
- Canizares, P., Martiez F., Jimenez C., Saez C., Rodrigo M.A., 2008. Coagulation and electrocoagulation of oil – in – water emulsions. *J. Hazardous Materials*. 151: 44 – 51.
- Canizares, P., Martiez F., Lobato J., Rodrigo M.A., 2008. Break – up of oil – in – water emulsion by electrochemical techniques. *J. Hazardous Materials*. 145: 233 – 240.

- Chen, C.M., Lu C.H., Chang C.H., Yang Y.M., 2000. Influence of pH on the stability of oil-in-water emulsions stabilized by a split table surfactant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*. 170: 173 – 179.
- Chen, C.Y., Chang T.H., Kuo J.T., Chen Y.F., Chung Y.C., 2008. Characteristic of molybdate-impregnated chitosan beads (MICB) in terms of arsenic removal from water and the application of a MICB-packed column to remove arsenic from wastewater. *Bioresource Technology*. 99: 7487 – 7494.
- Chongkhong, S., Tongurai C., Chetpattananondh P., Bunyakan C., 2007. Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. *Biomass and Bioenergy*. 31: 563 – 568.
- Clark, J.W., Viessman W.Jr., Hammer M.J. 1971. *Water Supply and Pollution Control*. 2<sup>nd</sup> International Textbook Company, London.
- Dukhin, S.S., Suoblom J., Wasan D.T., Saether Ø., 2001. Coalescence coupled with either coagulation or flocculation in dilute emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*. 180: 223 – 234.
- Eckenfelder, W.W. Jr., 2000. *Industrial water pollution control* 3rd ed., USA: McGraw Hill.
- Egyptian Pollution Abatement Project (EPAP). 2002. *Oil, Soap and Detergents Industry - Inspection manual*.
- en.wikipedia.org. 2009a. *Micelle*. (Online) from <http://en.wikipedia.org/wiki/Micelle>.
- en.wikipedia.org. 2009b. *File:Micelle\_scheme-en.svg*. (Online) from [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Micelle\\_scheme-en.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Micelle_scheme-en.svg).

- Fenault, F., Sancey B., Badot P.-M., Crini G., 2009. Chitosan for coagulation/flocculation processes – An eco-friendly approach. *European Polymer Journal*. 45: (1337 – 1348).
- Flatow, I., 2009. Science: Soap. (Online) from <http://origami-n-stuff4kids.blogspot.com/2009/04/science-soap.html>.
- Fujiia, S., M. Okada and Furuzono T., 2007. Hydroxyapatite nanoparticles as stimulus-responsive particulate emulsifiers and building block for porous materials. *J. Colloid and Interface Science*. 315, 287 – 296.
- Gayle, P., Gilmore H., Wilkerson J., 2009. Oil water separator / grease trap operation and maintenance URS GROUP, INC. Raleigh, North Carolina.
- Gerpen, J.V., 2005. Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology* 86: 1097 – 1107.
- Gerpen, J.V., Shanks B., Pruszko R., Clements D., and Knothe G. 2004. Biodiesel Production Technology Subcontractor Report, NREL/SR-510-36244, July.
- G.P.A., 2009. G.P.A. Estudios y Servicios Petroleros S.R.L. NOTA TECNICA NO 2. (Online) from <http://www.oilproduction.net/gpa.htm>.
- Hanh, H.D., Dong N.T., Okitsu K., Nishimura R., Maeda Y., 2009. Biodiesel production by esterification of oleic acid with short – chan alcohol under ultrasonic irradiation condition. *Renewable Energy*. 34: 780 – 783.
- Hartley, G.S., 1936. *Aqueous Solutions of Paraffin Chain Salts, A Study in Micelle Formation*, Hermann et Cie, Paris.

Horne Engineering Services, Inc., 1999. Multiservice Oil/Water Separator Guidance Manual, 11 June 1999.

Ichikawa, T., 2007. Electrical demulsification of oil-in-water emulsion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*. 302: 581 – 586.

Ichikawa, T., Dohda T., Nakajima Y., 2006. Stability of oil-in-water emulsion with mobile surface charge. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*. 279: 128 – 141.

Ichikawa, T., Itoh K., Yamamoto S., Sumita M., 2004. Rapid demulsification of dense oil-in-water emulsion by low external electric field I. Experimental evidence. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*. 242: 21 – 26.

Jones, M. Jr., 2005. *Organic Chemistry*. 3<sup>th</sup> ed. W.W. Norton & Company, Inc. USA.

Liu, Y., Wang L., Van Y., 2009. Biodiesel synthesis combining pre – esterrification with alkali catalyzed process from rapeseed oil deodorizer distillate. *Fuel Processing Technology*. 90: 857 – 862.

Metcalf and Eddy. 2004. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill inc, New York.

Malvern, 2005. Zeta Potential. Malvern Instruments Ltd. (UK) and Malvern Instruments (US). (Online) from <http://www.azonano.com/details.asp?ArticleID=1234>

Marchetti, j.M., Errazu A.F., 2008. Esterrification of free fatty acid using sulfuric acid as catalyst in the presence of triglycerides. *Biomass & Bioenergy*. 32: 892 – 895.

McBain, J.W., 1913. *Trans. Faraday Soc.* 9: 99.

- Meysami, B., Kasacian A.B., 2005. Use of coagulants in treatment of olive oil wastewater model solutions by induced air flotation. *Bioresource Technology* 96: 303 – 307.
- Minami, E., Saka S., 2006. Kinetics of hydrolysis and methyl esterification for biodiesel production in two – step supercritical methanol process. *Fuel*. 85: 2479 – 2483.
- Montgomery, J.M. 1985. *Water Treatment Principles and Design*, Wiley Interscience Publication.
- Ni, j., Meunier F.C., 2007. Esterification of free fatty acids in sunflower oil over solid acid catalysts using batch and fixed bed-reactors. *Applied Catalysis A: General*. 333: 122 – 130.
- O'Regan, J., Mulvihill D.M., 2009. Heat stability and freeze–thaw stability of oil-in-water emulsions stabilised by sodium caseinate–maltodextrin conjugates. *Food Chemistry*, In Press, Corrected Proof.
- Ozbay, N., Oktar N., Tapan N.A., 2008. Esterification of free fatty acid in waste cooking oils (WCO): Role of ion-exchange resins. *Fuel*. 87: 1789 – 1798.
- Patterson, J.W., 1975. *Wastewater treatment technology*. Ann Arbor Science Publishers, Inc. Michigan, USA.
- Qasim, S.R., Motley E.M., Zhu G., 2000. *Water Works Engineering*. Prentice-Hall international (UK) Limited, London.
- Ramadhas, AS., Jayaraj S., Muraleedharan C., 2004a. Use of vegetable oils as I.C. engine fuel – a review. *Renewable Energy*. 29: 727 – 42.
- Ramadhas, AS., Jayaraj S., Muraleedharan C., 2004b. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil, *Fuel*. 84: 335 – 40.

- Reynolds, T.D. and Richards P.A. 1996. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, PWS Publishing Company.
- Rios G., Pazos C., Coca j., 1998. Destabilization of cutting oil emulsions using inorganic salts as coagulants. *Colloids and Surfaces A*, 138: 383 – 389.
- Rizzo, L., Lofrano G., Grassi M., Belgiorno V., 2008. Pre-treatment of olive mill wastewater by chitosan coagulation and advanced oxidation processes. *Separation and Purification Technology* 63: 648 – 653.
- Rudolph, K.H., 1952. *Colloid science*. Elsevier Pub. Co, New York. USA.
- Saito, H., Kawagishi A., Tanaka M., Tanimoto T., Okada S., Komatsu H., Handa T. 1999. Coalescence of Lipid Emulsions in Floating and Freeze-Thawing Processes: Examination of the Coalescence Transition State Theory. *J. Colloid and Interface Science*. 219 (1, 1): 129-134.
- Seddon, J. M., Templer, R. H., 1995. Polymorphism of Lipid-Water Systems, from the Handbook of Biological Physics, Vol. 1, ed. R. Lipowsky, and E. Sackmann. (c), Elsevier Science B.V. ISBN 0-444-81975-4.
- Shamrani, Al. A.A., James A., and xiao H. 2002a. Destabilisation of oil-water emulsion and separation by dissolved air flotation. *Water research*. 36: 1503-1512.
- Shamrani, Al. A.A., James A., and Xiao H. 2002b. Separation of oil from water by dissolved air flotation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*. 209: 15 - 26.
- Stumm, W. & Morgan J. J., 1981. *Aquatic chemistry*. Wiley-Interscience, New York.

- Suehara, K.I., Kawamoto Y., Fujii E., Kohda J., Nakano Y., and Yano T. 2005. Biological Treatment of Wastewater Discharged from Biodiesel Fuel Production Plant with Alkali-Catalyzed Transesterification. *J. Bioscience and Bioengineering*. 100 (4): 437 – 442.
- Supratim, G., Cramp G. L., Coupland J. N., 2006. Effect of aqueous composition on the freeze-thaw stability of emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*. 272 ( 1-2, 5): 82-88.
- Thanasukarn, P., Pongsawatmanit R., McClements D. J., 2004. Influence of emulsifier type on freeze-thaw stability of hydrogenated palm oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*. 18 (6): 1033-1043.
- Thanasukarn, P., Pongsawatmanit R., McClements D. J., 2006. Utilization of layer-by-layer interfacial deposition technique to improve freeze–thaw stability of oil-in-water emulsions. *Food Research International* 39( 6):721-729.
- Turro, N.J. and Yekta A., *Am J.*, 1978. *Chem. Soc.* 100: 5951.
- Vaughn, S.H., and Mccurdy R.S., 1973. Wastewater treatment at Ford's Winsor Complex. *Ind. Waste* 19 (3): 34 – 43.
- Viessman, W. Jr., Hammer M.J., 1985. *Water Supply and Pollution Control*. 4<sup>th</sup>, Harper & Row, Publishers, Inc. New York.
- Vrablik, E. R., 1959. Fundamental principles of dissolved air flotation of industrial wastes. 14<sup>th</sup> Industrial Waste Conference Proceedings.
- Waste Management and Research Center (WMRC), 2006. Small Scale Biodiesel Production. Feasibility Report.

- Wade, L.G. Jr., 2003. Organic Chemistry. 5<sup>th</sup> ed. Pearson Education, Inc. USA.
- Wang, Y., Ou S., Liu P., Zhang Z., 2006. Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two – step catalyzed process. *Energy Conversion and Management*. 48:184 - 188.
- Wengi, Z., Jun M., Shidong Y., Tao Z., and Yongfeng L., 2006. Pretreatment of Coal Gasification Wastewater by Acidification Demulsion. *Chinese J. Chem. Eng.*, 14 (3): 398 – 401.
- Werner, H.W., 1972. Treatment of Metal Finishing Waste by Robertshaw Controls Company, Resented at 27<sup>th</sup> Ind. Waste Conf. Purdue University.
- Whatman Ltd., 2007-2009. Glass Microfiber Binder Free. (Online). Available from [http://www.whatman. Com/Glass Microfiber Binder Free.aspx](http://www.whatman.Com/Glass Microfiber Binder Free.aspx).
- Yajaroen, D., Goto m., Sasaki M., Shotiruk., 2009. Esterification of palm fatty acid distillate (PFAD) in supercritical methanol: Effect of hydrolysis on reaction reactivity. *Fuel*. 88: 2011 – 2016.
- Yan, N., Masliyah J.H., 1996. Demulsification of solid-stabilized oil-in-water emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*. 117: 15 – 25.
- Yang, C.L., 2007. Electrochemical coagulation for oily water demulsification. *Separation and Purification Technology*. 54: 388 – 395.
- Yue, Q.Y. Gao B.Y., Wang Y.H., Sun Z.X., Wang S.G., Gu R.R., 2007. Synthesis of polyamine flocculant and their potential use in treating dye wastewater. *J. Hazardous materials*. 152: 227.



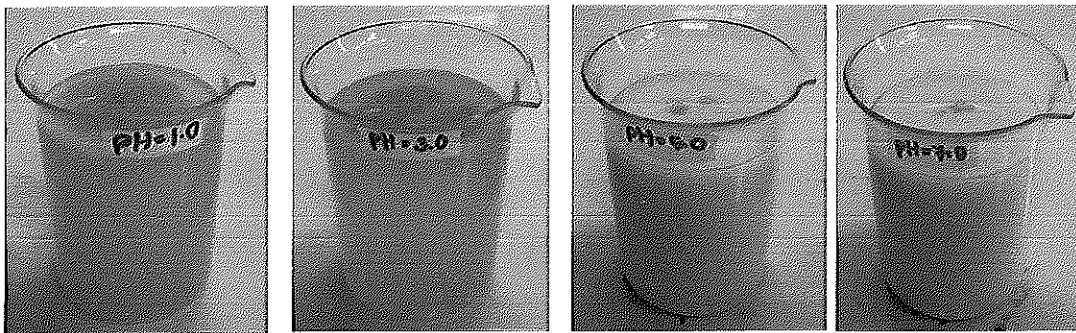
- Zaki, N.N., 1997. Surfactant stabilized crude oil-in-water emulsions for pipeline transportation of viscous crude oils. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*. 125: 19 – 25.
- Zhang, Z., Xu G.Y., Wang F., Dong S.L., Li Y.M., 2004. Characterization and demulsification of poly (ethylene oxide) – block – poly(propylene oxide) – block – poly(ethylene oxide) copolymers. *J. colloid and interface Science*. 277: 464 – 470.
- Zhang, J., Jiang L., 2008. Acid – catalyzed esterification of zanthoxylum bungeanum seed oil with high free fatty acid for biodiesel production. *Bioresource Technology*. 99: 8995 – 8998.
- Zhang, Z., Xu G., Wang F., Dong S., Chen Y., 2005. Demulsification by amphiphilic dendrimer copolymers. *J. colloid and interface Science*. 282: 1 – 4.
- Zouboulis, A.I., and Avranas A., 2000. Treatment of oil-in-water emulsions by coagulation and dissolved-air flotation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*. 172: 153-161.

**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก  
ภาพประกอบงานวิจัย

ภาคผนวก ก

ภาพประกอบงานวิจัย

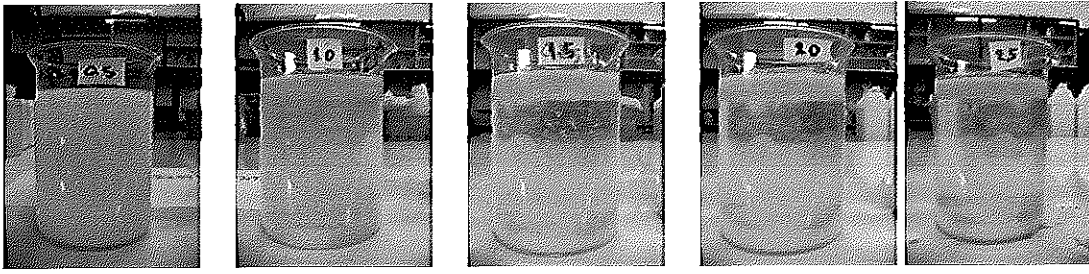


1 N HCl

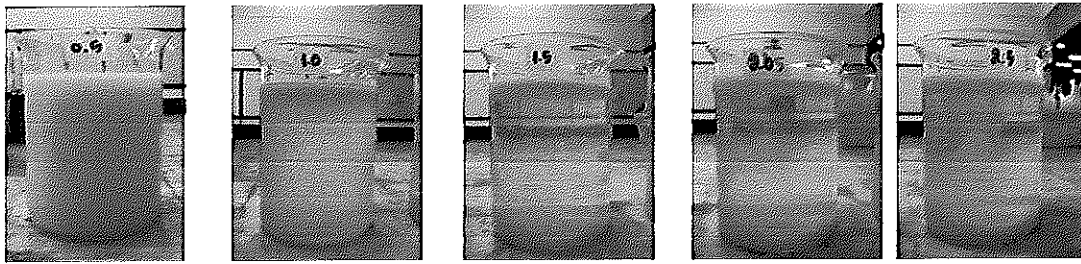


1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

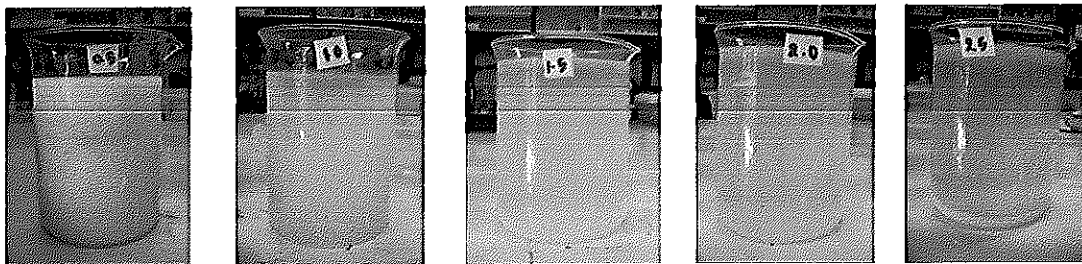
ภาพภาคผนวก ก 1 ลักษณะน้ำเสียหลังการปรับค่าพีเอชด้วยกรดเท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 (กรดไฮโดรคลอริก 1 N HCl; ซัลฟูริก 1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)



pH = 5

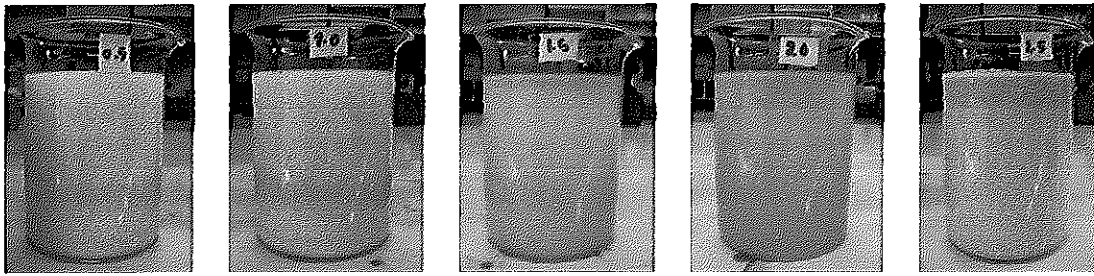


pH = 6

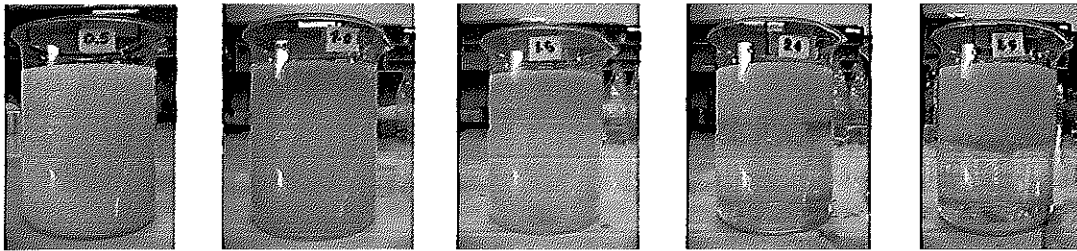


pH = 7

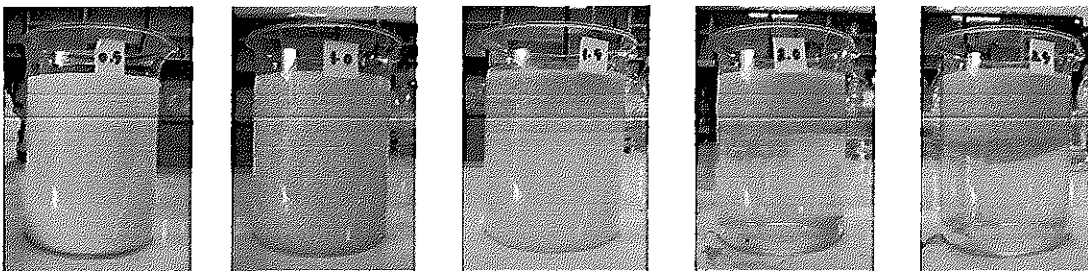
ภาพภาคผนวก ก 2 การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้สารส้ม (สารส้ม 0.5 - 2.5 g/L;  
ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)



pH = 5

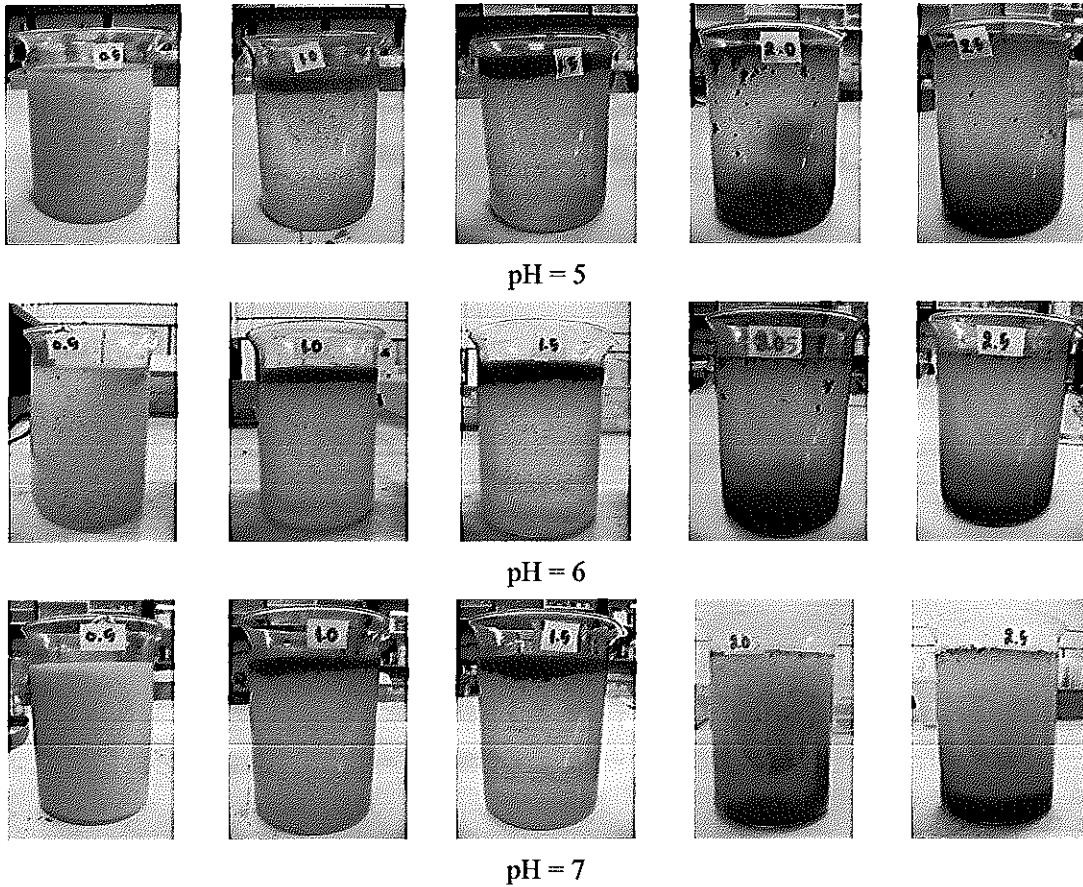


pH = 6

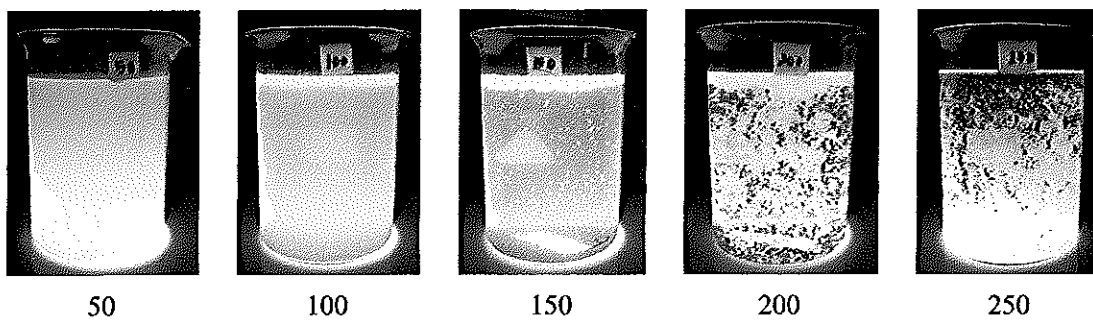


pH = 7

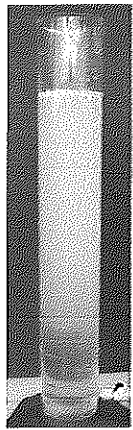
ภาพภาคผนวก ก 3 การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (โพลี-อะลูมิเนียมคลอไรด์ 0.5 – 2.5 g/L; ระยะเวลาที่กัก 1 ชั่วโมง)



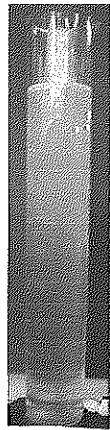
ภาพภาคผนวก ก 4 การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ (เฟอร์ริกคลอไรด์ 0.5 – 2.5 g/L; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)



ภาพภาคผนวก ก 5 การรวมตะกอนไขมันและน้ำมันเมื่อใช้สารส้มก่อนการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศ (สารส้ม 50 – 250 mg/L; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง)



1 min



3 min



5 min



7 min



10 min

ภาพภาคผนวก ก 6 การทดสอบระยะเวลาที่ฟุ้งสำหรับถังลอยตะกอน (Flotation Cell)



ภาคผนวก ข

**ลักษณะน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล**

## ภาคผนวก ข

## ลักษณะน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

ตารางภาคผนวก ข 1 ลักษณะน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่ศึกษา

Parameter	Unit	Value
Color	-	White (Emulsion)
pH	-	8.5 – 10.5
Suspended Solid (SS)	(mg/L)	1,500 – 5,000
Chemical Oxygen Demand (COD)	(mg/L)	60,000 – 150,000
Biological Oxygen Demand (BOD <sub>5</sub> )	(mg/L)	30,000 – 60,000
Grease & Oil (mg/L)	(mg/L)	7,000 – 15,000
Saponification Number	(mg.KOH/g)	4.77 – 18.79
Free Fatty Acid (FFA)	% Palmitic acid	0.14

หมายเหตุ เก็บข้อมูลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลจำนวน 6 ครั้ง ระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2551 ถึงเดือน เมษายน พ.ศ. 2552

ตารางภาคผนวก ข 2 ค่าพีเอช ความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้าของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล

พีเอช	Conductivity (mS/cm)	Temperature (°C)	TDS (mg/L)	Salinity (ppt)	Resistance Ω.cm
8.5 – 10.5	0.5328	28.62	363	0.2	1868

**ภาคผนวก ก****การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด**

ภาคผนวก ก

การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการปรับค่าพีเอช

ตารางภาคผนวก ก 1 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบด้วยกรด

Acid	Initial Grease & Oil (mg/L)	pH			
		1	3	5	6
1 N HCl	7,120	489	783	5,361	6
1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	7,120	523	957	5,749	6

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ก 2 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดี (mg/L) ของการทดสอบปรับค่า

Acid	Initial COD (mg/L)	pH			
		1	3	5	6
1 N HCl	65,000	25,000	33,750	58,750	62,5
1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	65,000	25,800	36,270	61,170	62,9

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ค 3 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบปรับค่าพีเอชด้วยกรด

Acid	Initial Oily Sludge (mg/L)	pH				
		1	3	5	6	7
1 N HCl	1,780	306	121	4,507	2,762	1,795
1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,780	962	307	3,697	2,380	1,797

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ค 4 ปริมาณกรด (mL/L) สำหรับปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลที่ค่าต่างๆ

Acid	Initial pH	pH				
		1	3	5	6	7
1 N HCl	9.9	37	11	7	7.5	6
1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9.9	78	9	7	6	4

หมายเหตุ ค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 9.90

ตารางภาคผนวก ค 5 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบระยะเวลาพักหลังปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกรดเท่ากับ 3

Acid	Initial Grease & Oil (mg/L)	day					
		0	1	2	3	4	5
1 N HCl	8,246	8,246	1,513	803	521	481	409

หมายเหตุ ค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 10.40

ตารางภาคผนวก ค 6 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอโอดี (mg/L) ของการทดสอบระยะเวลาพักหลัง  
ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกรดเท่ากับ 3

Acid	Initial COD (mg/L)	day					
		0	1	2	3	4	5
1 N HCl	71,430	71,400	34,146	25,500	22,273	21,818	20,900

หมายเหตุ ค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 10.40

ตารางภาคผนวก ค 7 ปริมาณไขมันและน้ำมันที่เกิดจากการใช้วิธีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจาก  
การผลิตไบโอดีเซลด้วยกรดเท่ากับ 3

Acid	Initial Grease & Oil (mg/L)	Grease & Oil (%v/v)
1 N HCl	8,246	1.0 – 3.0
1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	8,246	1.0 – 3.0

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 3 วัน

ตารางภาคผนวก ค 8 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้า  
ของการทดสอบปรับค่าพีเอชของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยกรด  
ไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก

Acid	pH	Conductivity (mS/cm)	Temperature (°C)	TDS (mg/L)	Salinity (ppt)	Resistance Ω.cm
1 N HCl	1	15.54	25.99	10,570	9.0	64.29
	3	1.480	25.91	1,005	0.7	676.8
	5	1.042	26.02	708	0.5	960.1
	6	0.9306	26.11	634	0.4	1,073
	7	0.9667	27.43	657	0.4	1,034
1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	16.03	26.63	10,903	9.4	62.38
	3	1.280	26.60	869	0.6	782.1
	5	954.2	26.54	649	0.4	1,048
	6	934.3	26.54	636	0.4	1,070
	7	963.5	26.54	656	0.4	1,037

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

**ภาคผนวก ง**

**การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน**



## ภาคผนวก ง

## การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยการเติมกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ตารางภาคผนวก ง 1 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม

pH	Initial Grease & Oil (mg/L)	Dosage (g/L)				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH = 5	7,120	6,114	151	134	132	135
pH = 6	7,120	5,959	108	104	96	76
pH = 7	7,120	6,021	190	102	90	118

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 2 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

pH	Initial Grease & Oil (mg/L)	Dosage (g/L)				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH = 5	7,120	5,104	4,411	2175	429	956
pH = 6	7,120	4,734	396	150	94	120
pH = 7	7,120	5,237	1,434	235	195	271

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 3 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์

pH	Initial Grease & Oil (mg/L)	Dosage (g/L)				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH = 5	7,120	1,804	199	186	196	245
pH = 6	7,120	624	35	84	142	193
pH = 7	7,120	6,292	215	207	200	206

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 4 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเล

Coagulant	Initial Grease & Oil (mg/L)	Dosage (% v/v)				
		10	20	30	40	50
Seawater	7,370	1,809	1,422	950	350	210

หมายเหตุ น้ำทะเลจากอ่าวไทย; ไม่มีการควบคุมค่าพีเอช; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 5 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมโคโคซานเป็นโคแอกกูแลนต์

Coagulant	Initial Grease & Oil (mg/L)	Dosage (% v/v)				
		2	4	6	8	10
Chitosan	8,250	2,561	1,355	114	104	88

หมายเหตุ ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 6 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine

Coagulant	Initial Grease & Oil (mg/L)	Dosage (% v/v)				
		0.025	0.050	0.075	0.100	0.125
Ferric Chloride (0.5 g/L) + Quaternary cationic polyamine	7,120	386	217	188	206	233

หมายเหตุ ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 7 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดี (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม

pH	Initial COD (mg/L)	Dosage (g/L)				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH = 5	65,000	53,750	43,750	35,000	35,000	45,000
pH = 6	65,000	47,500	35,000	32,500	35,000	37,500
pH = 7	65,000	58,000	47,500	42,500	44,500	47,500

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 8 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดี (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

pH	Initial COD (mg/L)	Dosage (g/L)				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH = 5	65,000	59,459	43,243	33,784	27,027	41,892
pH = 6	65,000	43,234	24,324	17,568	10,811	15,135
pH = 7	65,000	51,351	35,135	24,324	18,919	27,027

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 9 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดี (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์

pH	Initial COD (mg/L)	Dosage (g/L)				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH = 5	65,000	32,955	30,682	28,409	30,628	31,818
pH = 6	65,000	30,250	27,940	25,750	27,250	29,000
pH = 7	65,000	45,500	35,500	30,500	32,250	37,250

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 10 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดี (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมโคโคซานเป็นโคแอกกูแลนท์

Coagulant	Initial COD (mg/L)	Dosage (% v/v)				
		2	4	6	8	10
Chitosan	71,430	38,095	28,571	22,619	22,619	23,810

หมายเหตุ ความเข้มข้นที่เอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 11 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดี (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic polyamine

Coagulant	Initial COD (mg/L)	Dosage (% v/v)				
		0.025	0.050	0.075	0.100	0.125
Ferric Chloride (0.5 g/L) + Quaternary cationic polyamine	71,430	48,000	40,500	30,500	26,500	28,250

หมายเหตุ ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง; ค่าซีโอดีของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 65,000 mg/L

ตารางภาคผนวก ง 12 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบกระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม

pH	Initial Oily Sludge (mg/L)	Dosage (g/L)				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH = 5	1,780	3,197	31	4	8	8
pH = 6	1,780	2,822	24	7	3	7
pH = 7	1,780	2,785	64	17	25	11

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 13 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบ  
กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

pH	Initial Oily Sludge (mg/L)	Dosage (g/L)				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH = 5	1,780	3,357	1,480	775	515	775
pH = 6	1,780	1,134	219	23	13	72
pH = 7	1,780	1,255	466	31	25	74

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 14 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบ  
กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์

pH	Initial Oily Sludge (mg/L)	Dosage (g/L)				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH = 5	1,780	410	9	17	24	25
pH = 6	1,780	216	26	26	19	42
pH = 7	1,780	1,370	44	40	19	48

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 15 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบ  
กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมโคโตะซานเป็นโคแอกกูแลนท์

Coagulant	Initial Oily Sludge (mg/L)	Dosage (% v/v)				
		2	4	6	8	10
Chitosan	3,650	1,255	466	31	25	74

หมายเหตุ ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 16 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าตะกอนไขมันและน้ำมัน (mg/L) ของการทดสอบ  
กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary  
cationic polyamine

Coagulant	Initial Oily Sludge (mg/L)	Dosage (% v/v)				
		0.025	0.050	0.075	0.100	0.125
Ferric Chloride (0.5 g/L) + Quaternary cationic polyamine	3,650	222	150	85	50	52

หมายเหตุ ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง; ค่าตะกอนไขมันและน้ำมันของน้ำ  
เสียเริ่มต้นเท่ากับ 1,780 mg/L

ตารางภาคผนวก ง 17 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (NTU) ของการทดสอบกระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม

pH	Dosage (g/L)				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH = 5	-	2.98	1.21	0.715	0.766
pH = 6	-	7.59	6.71	1.88	2.49
pH = 7	-	174	31.9	51.5	69.36

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 18 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (NTU) ของการทดสอบกระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

pH	Dosage (g/L)				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH = 5	-	-	-	-	-
pH = 6	-	58.8	37.7	21.1	15.5
pH = 7	-	-	43.2	26.8	19.8

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 19 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (NTU) ของการทดสอบกระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์

pH	Dosage (g/L)				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
pH = 5	-	17.0	17.2	23.0	24.3
pH = 6	-	16.3	16.7	21.3	22.9
pH = 7	-	33.0	31.2	42.1	47.7

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 20 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (NTU) ของการทดสอบกระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเล

Coagulant	Dosage (% v/v)				
	10	20	30	40	50
Seawater	2486	34.5	29.3	30.4	36.5

หมายเหตุ น้ำทะเลจากอ่าวไทย; ไม่มีการควบคุมค่าพีเอช; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง



ตารางภาคผนวก ง 21 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (NTU) ของการทดสอบกระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมโคโคซานเป็นโคแอกกูแลนท์

Coagulant	Dosage (% v/v)				
	2	4	6	8	10
Chitosan	-	457	54.3	37.7	21.2

หมายเหตุ ความคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาตกฟัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 22 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น (NTU) ของการทดสอบกระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic  
polyamine

Coagulant	Dosage (% v/v)				
	0.025	0.050	0.075	0.100	0.125
Ferric Chloride (0.5 g/L) + Quaternary cationic polyamine	293	33.4	11.7	88.7	129

หมายเหตุ ความคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาตกฟัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 23 ปริมาณอะลูมิเนียมและเหล็กในน้ำหลังการทดสอบกระบวนการโคแอกกู-  
เลชันด้วยการเติมเกลืออะลูมิเนียมและเหล็ก

Coagulant	Dosage	Metals	
		Al <sup>3+</sup> (mg/L)	Fe <sup>3+</sup> (mg/L)
Alum	1.0 g/L	0.02	-
Poly Aluminium Chloride	1.0 g/L	2.90	-
Ferric chloride	1.0 g/L	-	0.05

ตารางภาคผนวก ง 24 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนไขมันและน้ำมันของการทดสอบ  
กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลือ  
อนินทรีย์และสารอินทรีย์

Coagulant	Dosage	Olly Sludge (mL/L)
Alum	0.5 – 2.5 g/L	100 – 250
Poly Aluminium Chloride	0.5 – 2.5 g/L	200 – 450
Ferric chloride	0.5 – 2.5 g/L	150 – 300
Seawater	10 – 50 % v/v	100 – 200
Chitosan	2.0 – 10.0 % v/v	150 – 350
Ferric Chloride (0.5 g/L) + Polyamine	0.025 – 1.25 % v/v	100 – 200

ตารางภาคผนวก ง 25 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้า  
ของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม

pH	Dosage (g/L)	Conductivity (mS/cm)	Temperature (°C)	TDS (mg/L)	Salinity (ppt)	Resistance $\Omega$ .cm
5	0.5	0.890	27.81	606	0.4	1121
	1.0	1.282	27.80	872	0.6	778.3
	1.5	1.691	27.77	1,151	0.8	590.9
	2.0	2.032	27.93	1,383	1.0	491.4
	2.5	2.637	27.86	1,794	1.4	378.6
6	0.5	1.067	28.35	725	0.5	937.7
	1.0	1.627	28.44	1,106	0.8	615.1
	1.5	2.032	28.35	1,381	1.0	492.5
	2.0	2.787	28.19	1,894	1.4	359.1
	2.5	3.086	28.47	2,100	1.6	323.4
7	0.5	0.843	25.96	574	0.4	1,183
	1.0	1.542	25.75	1,042	0.7	657.2
	1.5	2.007	25.85	1,364	1.0	498.2
	2.0	2.300	25.87	1,565	1.2	434.2
	2.5	2.402	25.89	1,698	1.4	413.3

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 26 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้า  
ของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

pH	Dosage (g/L)	Conductivity (mS/cm)	Temperature (°C)	TDS (mg/L)	Salinity (ppt)	Resistance Ω.cm
5	0.5	1.118	28.75	761	0.5	891.2
	1.0	1.178	28.79	801	0.5	848.7
	1.5	1.200	28.70	816	0.5	833.3
	2.0	1.289	28.43	877	0.6	775.2
	2.5	1.434	28.44	975	0.7	697.5
6	0.5	0.918	28.75	761	0.5	1191.2
	1.0	1.278	28.65	861	0.5	898.7
	1.5	1.296	28.72	897	0.6	793.3
	2.0	1.379	28.53	977	0.6	735.2
	2.5	1.537	28.47	1075	0.7	557.5
7	0.5	0.997	28.35	725	0.5	1037.7
	1.0	1.597	28.44	1,106	0.8	775.0
	1.5	1.931	28.35	1,381	1.0	582.7
	2.0	2.585	28.19	1,894	1.4	456.7
	2.5	2.886	28.47	2,100	1.6	393.4

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 27 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเต็ม ความต้านทานไฟฟ้า  
ของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์

pH	Dosage (g/L)	Conductivity (mS/cm)	Temperature (°C)	TDS (mg/L)	Salinity (ppt)	Resistance $\Omega$ .cm
5	0.5	1.358	26.62	923	0.6	737.7
	1.0	2.419	26.58	1,645	1.2	413.2
	1.5	3.282	26.58	2,235	1.7	304.1
	2.0	4.315	26.57	2,2936	2.3	231.3
	2.5	5.088	26.57	3,462	2.7	196.3
6	0.5	1.333	26.46	906	0.6	750.1
	1.0	2.476	26.37	1,684	1.3	403.3
	1.5	3.467	26.42	2,360	1.8	288.9
	2.0	5.177	26.46	3,522	2.9	193.9
	2.5	5.406	26.51	3,678	2.8	184.8
7	0.5	1.380	26.46	932	0.6	727.6
	1.0	2.488	26.46	1,693	1.3	401.2
	1.5	3.336	26.44	2,267	1.7	299.8
	2.0	4.196	26.48	2,854	2.2	238.0
	2.5	5.178	26.47	3,520	2.8	193.1

หมายเหตุ ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 28 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้า ของการใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมน้ำทะเล

pH	Dosage (% v/v)	Conductivity (mS/cm)	Temperature (°C)	TDS (mg/L)	Salinity (ppt)	Resistance Ω.cm
8	10	5.756	29.46	3,916	3.1	173.3
	20	10.61	29.50	7,243	6.0	93.58
	30	15.81	29.43	10,727	9.2	63.38
	40	20.30	29.35	13,824	12.1	49.07
	50	23.94	29.97	16,345	14.6	41.46

หมายเหตุ ไม่ควบคุมค่าพีเอช; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 29 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้า ของการใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมโคโคซานเป็นโคแอกกูแลนต์

pH	Dosage (% v/v)	Conductivity (mS/cm)	Temperature (°C)	TDS (mg/L)	Salinity (ppt)	Resistance Ω.cm
7	2	0.693	27.96	674	0.2	1,483.6
	4	0.760	28.81	706	0.3	1341.4
	6	0.808	28.65	841	0.4	1291.2
	8	0.957	29.35	885	0.5	1087.7
	10	1.018	28.75	921	0.5	991.2

หมายเหตุ ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 30 ค่าความนำไฟฟ้า อุณหภูมิ ของแข็งละลาย ความเค็ม ความต้านทานไฟฟ้า  
ของการใช้กระบวนการ โคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ  
Quaternary cationic polyamine

pH	Dosage (% v/v)	Conductivity (mS/cm)	Temperature (°C)	TDS (mg/L)	Salinity (ppt)	Resistance Ω.cm
7	0.025	1.180	26.46	861	0.5	881.2
	0.050	1.488	26.46	901	0.5	848.7
	0.075	1.536	26.44	1016	0.5	817.3
	0.100	1.596	26.48	1077	0.6	775.2
	0.125	1.878	26.47	1175	0.7	697.5

หมายเหตุ ความคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7; ระยะเวลาพัก 1 ชั่วโมง

ตารางภาคผนวก ง 31 ปริมาณ 1 N KOH (mL/L) สำหรับปรับค่าพีเอชของการใช้กระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารช่วยรวมตะกอนประเภทเกลืออะลูมิเนียม  
และเหล็ก

Coagulant	pH	Dosage (g/L)				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Alum	5	4.0	7.0	10	17	22
	6	5.0	8.0	12	18	22
	7	5.0	10.5	14.5	19.5	28
Poly Aluminium Chloride	5	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0
	6	1.0	2.0	4.0	5.5	7.5
	7	3.0	5.0	7.0	9.0	10
Ferric chloride	5	14	23	35	44	65
	6	15	25	40	50	70
	7	15	25	43	53	75

หมายเหตุ ค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 9.90

ตารางภาคผนวก ง 32 ปริมาณ 1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (mL/L) สำหรับปรับค่าพีเอชของการใช้กระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารโคโคซานเป็นโคแอกกูแลนต์

Coagulant	pH	Dosage (% v/v)				
		2	4	6	8	10
Chitosan	7	11	9	6	5	3

หมายเหตุ ค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 10.40

ตารางภาคผนวก ง 33 ปริมาณ 1 N KOH (mL/L) สำหรับปรับค่าพีเอชของการใช้กระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ Quaternary cationic  
polyamine

Coagulant	pH	Dosage (% v/v)				
		0.025	0.050	0.075	0.100	0.125
Ferric Chloride (0.5 g/L) + Quaternary cationic polyamine	7	5.5	6.0	6.5	7.5	8.0

หมายเหตุ ค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 9.90



**ภาคผนวก จ**

**การทดสอบกระบวนการตะกอนลอย (Dissolved Air Flotation, DAF)**

## ภาคผนวก จ

## การทดสอบกระบวนการตะกอนลอย (Dissolved Air Flotation, DAF)

ตารางภาคผนวก จ 1 ผลการเปลี่ยนแปลงออกซิเจนละลายที่ความดันต่างๆ ของชุดทดลอง  
Dissolved Air Flotation Test Apparatus

Retention time (min)	Demand Oxygen (mg/L)		
	3 bar, (32.5 °C)	4 bar, (32.5 °C)	5 bar, (32.5 °C)
0	6.3	6.3	6.3
2	10.6	11.6	12.3
4	11.3	12.2	12.6
6	11.5	12.4	12.8
8	11.6	12.5	12.9
10	11.7	12.6	13

ตารางภาคผนวก จ 2 การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อตะกอน (Air to Solids Ratio หรือ A/S Ratio) ของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยด้วยอัตราหมุนเวียนน้ำกลับเพื่ออัดอากาศร้อยละ 20 ของน้ำเข้า

Alum mg/L	First		Seconded	
	SS (s <sub>1</sub> ) mg/L	A/S Ratio	SS (s <sub>2</sub> ) mg/L	A/S Ratio
50	157	0.0437	144	0.0476
100	291	0.0235	234	0.0293
150	423	0.0162	347	0.0198
200	457	0.0150	386	0.0178
250	475	0.0144	398	0.0172

หมายเหตุ ค่าแนะนำ A/S = 0.005 – 0.06 (kg/kg) (Eckenfelder, 2000)

ตารางภาคผนวก จ 3 การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อตะกอน (Air to Solids Ratio หรือ A/S Ratio) ของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยด้วยอัตราหมุนเวียนน้ำกลับเพื่ออัดอากาศร้อยละ 40 ของน้ำเข้า

Alum mg/L	First		Seconded	
	SS (s <sub>1</sub> ) mg/L	A/S Ratio	SS (s <sub>2</sub> ) mg/L	A/S Ratio
50	158	0.0865	150	0.0912
100	246	0.0556	224	0.0612
150	368	0.0372	328	0.0418
200	422	0.0324	358	0.0382
250	432	0.0317	360	0.0381

หมายเหตุ ค่าแนะนำ A/S = 0.005 – 0.06 (kg/kg) (Eckenfelder, 2000)

## ตัวอย่างการคำนวณ

Temperature	30	'C
$s_a$	17.9	mL/L
$p$	4	bars gauge
$f$	0.5	
$S_a$	368	mg/L
$R/Q$	0.25	

จากสูตร 
$$\frac{A}{S} = \frac{1.3s_a(fP-1)R}{S_aQ}$$

$$p = 4 \text{ bar gauge} = 58 \text{ lb/in}^2$$

$$P = (58 + 14.7)/14.7 = 4.94 \text{ atm}$$

$$R/Q = 200 \text{ mL}/1000 \text{ mL} = 0.20$$

## แทนค่า

$$\frac{A}{S} = \frac{(1.3\text{mg/mL})(17.9\text{mL/L})(0.5 \times 4.94 - 1)R}{(386\text{mg/L})Q}$$

$$\frac{A}{S} = \frac{(1.3\text{mg/mL})(17.9\text{mL/L})(0.5 \times 4.94 - 1)0.20Q}{(386\text{mg/L})Q}$$

$$\frac{A}{S} = 0.03725 \text{ (mg.Air / mg.Sludge)}$$

ตารางภาคผนวก จ 4 การคำนวณอัตราตะกอนลอยของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยด้วย  
อัตราหมุนเวียนน้ำกลับเพื่ออากาศร้อยละ 20 ของน้ำเข้า

Rise rate determination (Recycle 20)								
Time (min)	Alum = 100		Alum = 150		Alum =200		Alum =250	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	300	300	300	300	250	250	250	250
2	500	200	500	200	500	250	500	250
3	700	200	700	200	700	200	700	200
4	800	100	800	100	800	100	800	100
5	900	100	900	100	900	100	900	100
6	1000	100	1000	100	1000	100	1000	100
7	1000	0	1000	0	1000	0	1000	0
8	1000	0	1000	0	1000	0	1000	0
9	1000	0	1000	0	1000	0	1000	0
10	1000	0	1000	0	1000	0	1000	0
highest gain (mL)	=	300		300		250		250
lowest gain (mL)	=	200		200		200		200
Average Slope								
(mL)	=	250		250		225		225
Rise Rate in GPM/ft <sup>2</sup>	=	(Average Slope/3725)/.06705						
	=	1.001		1.001		0.901		0.901
L/m <sup>2</sup> /min	=	40.8		40.8		36.7		36.7

หมายเหตุ ค่าแนะนำ Retention time = 20 – 30 min (Eckenfelder, 2000)

Rise Rat = 0.2 – 4.0 GPM/ft<sup>2</sup> (Metcalf & Eddy, 2004)

= 8.0 – 160 L/m<sup>2</sup>/min (Metcalf & Eddy, 2004)

ตารางภาคผนวก ข 5 การคำนวณอัตราการตะกอนลอยของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยด้วย  
อัตราหมุนเวียนน้ำกลับเพื่ออากาศร้อยละ 40 ของน้ำเข้า

Rise rate determination (Recycle 40)								
Time (min)	Alum =100		Alum =150		Alum =200		Alum =250	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	100	100	100	100	100	100
2	200	100	200	100	200	100	200	100
3	350	150	350	150	350	150	300	100
4	550	200	550	200	500	150	450	150
5	750	200	750	200	650	150	600	150
6	900	150	900	150	800	150	700	100
7	1000	100	1000	100	900	100	800	100
8	1000	0	1000	0	1000	100	900	100
9	1000	0	1000	0	1000	0	1000	100
10	1000	0	1000	0	1000	0	1000	0
highest gain (mL)	=	200		200		150		150
lowest gain (mL)	=	150		150		100		100
Average Slope								
(mL)	=	175		175		125		125
Rise Rate in GPM/ft <sup>2</sup>	=	(Average Slope/3725)/.06705						
	=	0.701		0.701		0.500		0.500
L/m <sup>2</sup> /min	=	28.5		28.5		20.4		20.4

หมายเหตุ ค่าแนะนำ Retention time = 20 – 30 min (Eckenfelder, 2000)

Rise Rat = 0.2 – 4.0 GPM/ft<sup>2</sup> (Metcalf & Eddy, 2004)

= 8.0 – 160 L/m<sup>2</sup>/min (Metcalf & Eddy, 2004)

ตารางภาคผนวก จ 6 ผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำเสียของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอย  
แบบอัดอากาศ Recycle 20 % ครั้งที่ 1

Parameters	Dosage (mg/L)					
	Unit	50	100	150	200	250
Grease & Oil	mg/L	129	64	44	39	48
SS	mg/L	94	44	0	0	0
COD	mg/L	17,045	16,364	15,455	15,455	16,316
Turbidity	NTU	213	14.9	7.65	6.17	4.04

หมายเหตุ ค่าไขมันและน้ำมันของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 8,250 mg/L

ตารางภาคผนวก จ 7 ผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำเสียของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอย  
แบบอัดอากาศ Recycle 20 % ครั้งที่ 2

Parameters	Dosage (mg/L)					
	Unit	50	100	150	200	250
Grease & Oil	mg/L	330	122	82	61	56
SS	mg/L	108	56	0	0	0
COD	mg/L	17,273	17,045	16,364	16,364	16,818
BOD	mg/L	8,325	7,575	5,250	4,425	5,775
Turbidity	NTU	206	31.1	19.8	6.61	4.28

หมายเหตุ ค่าไขมันและน้ำมันของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 8,250 mg/L

ตารางภาคผนวก จ 8 ผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำเสียของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอย  
แบบอัดอากาศ Recycle 40 % ครั้งที่ 1

Parameters	Dosage (mg/L)					
	Unit	50	100	150	200	250
Grease & Oil	mg/L	96	49	38	32	41
SS	mg/L	64	34	0	0	0
COD	mg/L	12,273	11,818	11,364	11,364	11,818
Turbidity	NTU	157	37.7	5.57	1.47	1.01

หมายเหตุ ค่าไขมันและน้ำมันของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 8,250 mg/L

ตารางภาคผนวก จ 9 ผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำเสียของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอย  
แบบอัดอากาศ Recycle 40 % ครั้งที่ 2

Parameters	Dosage (mg/L)					
	Unit	50	100	150	200	250
Grease & Oil	mg/L	208	69	51	51	67
SS	mg/L	106	52	0	0	0
COD	mg/L	13,636	12,727	12,273	12,500	13,182
BOD	mg/L	6,572	5,656	3,937	3,380	4,526
Turbidity	NTU	82	40	6.18	2.05	3.14

ตารางภาคผนวก จ 10 ปริมาณตะกอนไขมันและน้ำมันของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอย

Coagulant	Dosage (mg/L)	Sludge (mL/L)
Alum	50 – 250	5 – 20



ตารางภาคผนวก จ 11 ปริมาณความต้องการสารเคมีสำหรับปรับค่าพีเอชของการใช้กระบวนการ  
โคแอกกูเลชันด้วยการเติมสารส้ม ก่อนการทดลองระบบตะกอนลอยแบบ  
อัดอากาศ

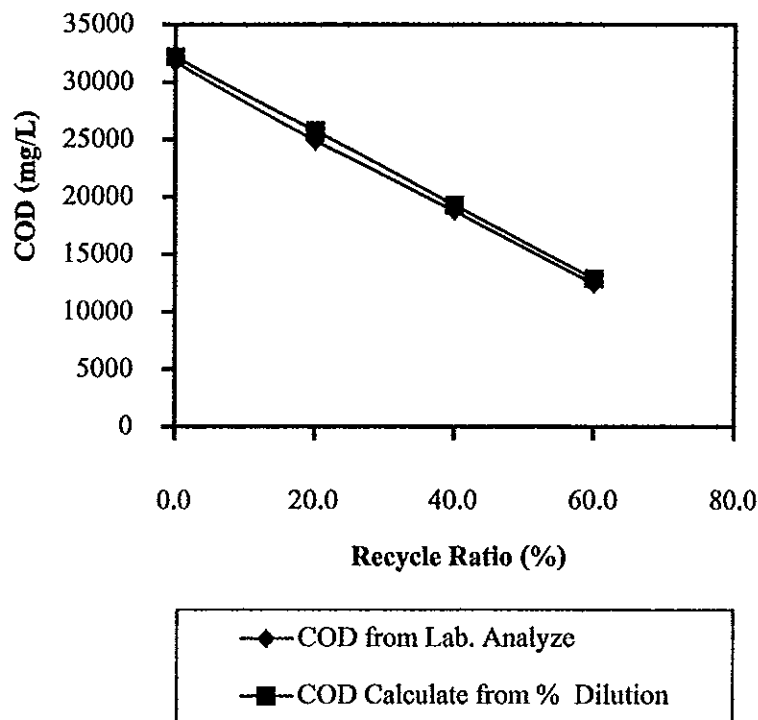
Chemical	pH	Unit	Alum (mg/L)				
			50	100	150	200	250
1 N KOH	6	mL/L	5.0	5.5	6.3	5.8	7.3

**ภาคผนวก ง**

**กราฟวิเคราะห์ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการ  
ตะกอนลอยร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด**

ภาคผนวก ฉ

กราฟวิเคราะห์ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการ  
ตะกอนลอยร่วมกับวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด



ภาพภาคผนวก ฉ 1 ผลอัตราส่วนการ Recycle ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปค่า  
ซีโอดีของการทดสอบกระบวนการตะกอนลอยแบบอัดอากาศกับน้ำเสียหลัง  
ผ่านวิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรด

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายเอนก สภาวะอินทร์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5010120121	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549

### ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนศิษย์ก้นกุฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จ.สงขลา
- ทุนวิจัยมหาดบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว. – อุตสาหกรรม (MAG Window I)

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

เอนก สภาวะอินทร์ วิรัช ทวีปรีดา อุดมพล พิษณุไพบูลย์ และชัยศรี สุขสาโรจน์. 2552. การทำลายเสถียรภาพและการลดอิมัลชันของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยเกลืออะลูมิเนียม. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 8. ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา. วันที่ 25 – 27 มีนาคม 2552.

เอนก สภาวะอินทร์ วิรัช ทวีปรีดา อุดมพล พิษณุไพบูลย์ และชัยศรี สุขสาโรจน์. 2553. การทำลายเสถียรภาพและการลดอิมัลชันของน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยเกลืออะลูมิเนียม. Thai Environmental Engineering Journal, Vol. 24 No. 1, 2010.

Aneak SAWAIN, Wirach TAWEEPRED, Udomphon PUETPAIBOON and Chaisri SUKSAROJ. 2009. The effect of pH on the stability of Grease and Oil in wastewater from biodiesel production process. Oral presentation at The 10<sup>th</sup> Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering. International conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind: MOE.5614(3)-35, School of Agricultural Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand; 1 – 3 April 2009.