



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการทำให้ลอยตัว ในการ  
จัดการปัญหาน้ำปนเปื้อนน้ำมันดิบและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

(Development of floatation process for the treatment of oil-containing  
wastewater)

โดย

อ.ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล

กรกฎาคม 2552

สัญญาเลขที่ MRG 5080305

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการทำให้ลอยตัว ในการ  
จัดการปัญหาน้ำปนเปื้อนน้ำมันดิบและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

(Development of floatation process for the treatment of oil-containing  
wastewater)

อ.ดร.พิสุทธิ์ เพียรหมกุล

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG 5080305  
ชื่อโครงการ : การพัฒนาเทคโนโลยีด้านการทำให้ลอยตัว ในการจัดการปัญหาห้ำ  
ปนเปื้อนน้ำมันดิบและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม  
ชื่อนักวิจัย : ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล  
อีเมล : pisut114@hotmail.com  
ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี

### บทคัดย่อ :

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนของน้ำมัน และสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) กระบวนการโคอะเลสเซอร์ (Coalescer) กระบวนการอินดิวิจแอโรฟเลชัน (IAF) และกระบวนการที่ประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Modified Induce Air Floatation, MIAF) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษากิจกรรมการทำงาน สภาวะการทำงานที่มีความเหมาะสมและให้ประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการบำบัด อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย 1) อุปกรณ์วิเคราะห์แบบจาร์เทสต์ 2) อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบเส้นใย 3) ตั้งปฏิกิริยาในระบบ ทำให้ลอยตัวโดยมีอุปกรณ์ประกอบ ได้แก่ ชุดอุปกรณ์เติมอากาศ เครื่องวัดอัตราไหลอากาศและความดันลด และระบบถ่ายภาพความเร็วสูง (100 ภาพต่อวินาที) ที่เชื่อมต่อกับโปรแกรมในการวิเคราะห์ภาพถ่าย (Image Analysis Technique) เพื่อศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

จากการทดลองพบว่า ชนิดและความสูงของตัวกลาง มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ซึ่งวัดได้ในรูปของการลดลงของค่าซีโอดี โดยการใช้ความหนาและจำนวนชั้นตอนที่เหมาะสมจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่มีการหมุนเวียนน้ำเสีย สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด รวมไปถึงเพิ่มความหนาให้กับชั้นน้ำมันที่แยกตัวออกมา ด้านบน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อนำน้ำมันที่แยกออกมากลับไปใช้ สำหรับกระบวนการทำให้ลอย และกระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่า ประสิทธิภาพของการบำบัดขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณความเข้มข้นของ สารส้ม ค่าพีเอช อัตราการไหลอากาศ และขนาดฟองอากาศที่เหมาะสม โดยค่าสัดส่วน  $a/G$  ซึ่งเป็นสัดส่วน ระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศ ( $a$ ) และความเร็วเกรเดียนท์ ( $G$ ) จัดเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยรวม โดยค่า  $a/G$  ที่สูงขึ้นนอกจากส่งผลต่อการเพิ่ม โอกาสในการสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคน้ำมันแล้ว ยังสอดคล้องกับความปั่นป่วนที่เหมาะสมจาก พลังงานในการกวนผสมสารเคมี ซึ่งทำให้ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยที่ได้สูงขึ้น และสามารถประยุกต์ใช้เพื่อทำนายประสิทธิภาพการบำบัดได้อีกทางหนึ่ง

คำหลัก : การทำให้ลอย; กระบวนการโคแอกกูเลชัน; โคอะเลสเซอร์; พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ

## Abstract

---

**Project Code :** MRG 5080305  
**Project Title :** Development of floatation process for the treatment of oil-containing wastewater  
**Investigator :** Pisut Painmanakul, Ph.D.  
**E-mail Address :** pisut114@hotmail.com  
**Project Period :** 2 years

### Abstract:

The objective of this work is to study the treatment of oily emulsion with surfactants by using Coagulation process, Coalescer, Induce Air Floatation process (IAF) and also Modified Induce Air Floatation process (MIAF) that is the combined process between IAF and coagulation process. This study can probably provide a better understanding of the oily wastewater treatment mechanism and also the suitable operating conditions for achieving high treatment efficiency. The equipments used in this study are consisted of 1) jar test device 2) fibrous coalescer system and 3) floatation column connected with gas diffuser and the measuring device, like gas flow meter and the pressure gauge. Moreover, the high speed camera (100 image/s) and the Image Analysis program have been used to study the bubble hydrodynamic parameters.

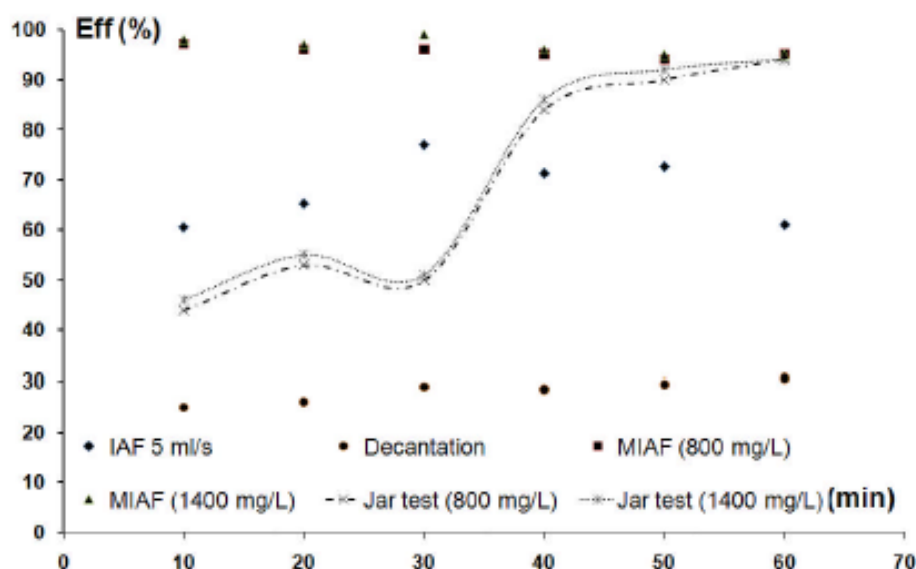
The study has shown that bed type and bed height can affect the overall efficiency of mechanical coalescer. The multi stage bed configuration can improve the efficiency of mechanical coalescer more than 50%. Moreover, by applying liquid recirculation concept with mechanical coalescer, this can not only improve the treatment efficiency, but also enhance the oil phase recovery. For the coagulation and floatation processes, the oily wastewater treatment efficiency was related to the concentration of alum, pH value, gas flow rate and also generated bubble sizes. Moreover, the interfacial area ( $a$ ) obtained experimentally from the bubble hydrodynamic parameters and the velocity gradient ( $G$ ) have been proven to be the important parameter for controlling the floatation process efficiency and operation cost. The simple proposed correlation, based on the  $a/G$  ratio can be applied in order to predict the treatment efficiencies.

**Keywords :** Floatation; Coagulation; Coalescer; Interfacial area

## 2. บทสรุปผู้บริหาร (Executive summary)

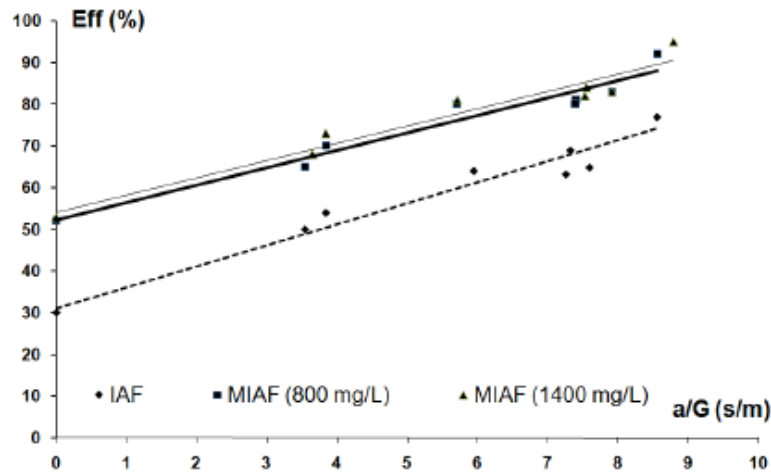
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีด้านการทำให้ลอยตัวในการจัดการปัญหาน้ำปนเปื้อนน้ำมันดิบและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ในการนี้ผู้วิจัยสนใจน้ำเสียในรูปของอิมัลชันของน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด (ประจุลบ ประจุบวก และไม่มีประจุ) ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของขนาดอนุภาคน้ำมันและความคงตัวของอนุภาคดังกล่าว ทำให้ยากต่อการบำบัดด้วยกระบวนการแยกแบบปกติทั่วไป

จากการศึกษาตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการดังกล่าว ได้ประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศชนิดแข็ง (Rigid orifice) สำหรับสร้างฟองอากาศเพื่อดักจับอนุภาคน้ำมัน รวมไปถึงเพิ่มความเร็วในการแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสีย ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มความเร็วในการบำบัดได้อย่างชัดเจน (เมื่อเทียบกับการแยกด้วยถังตกน้ำมัน) รวมไปถึงสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการทางเคมีได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในด้านการบำบัด ระยะเวลา และค่าใช้จ่ายโดยรวม (ดังรูปที่ 1)



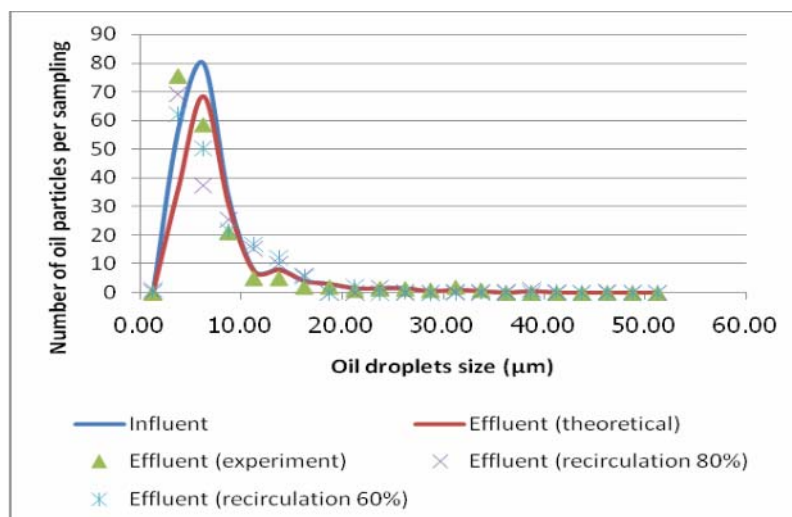
รูปที่ 1 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่เวลาการบำบัดต่างๆ

จากการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ถ่ายเทความเร็วสูง (100 ภาพต่อวินาที) ร่วมกับโปรแกรมการวิเคราะห์ภาพถ่าย ทำให้สามารถวิเคราะห์ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่เกิดขึ้น อาทิ ขนาดฟองอากาศ ความเร็วและความถี่ในการเกิดฟองอากาศ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศ โดยจากงานวิจัยนี้พบว่าค่าสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศและค่าความเร็วเกรเดียนท์ ( $a/G$ ) เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการบำบัด นอกจากนี้ เราสามารถประยุกต์ใช้ค่าดังกล่าว เพื่อสร้างสมการเส้นตรงสำหรับทำนายผลประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยได้อีกทางหนึ่งด้วย (รูปที่ 2)



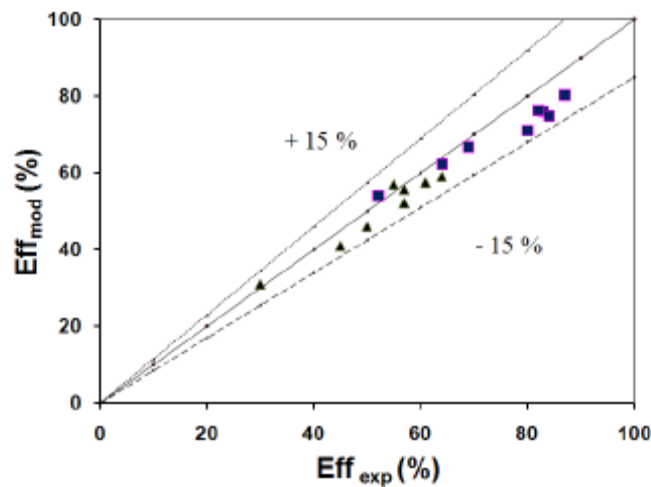
รูปที่ 2 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่สัมพันธ์กับค่าสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัส  
จำเพาะของฟองอากาศและความเร็วเกรเดียนท์ ( $a/G$ )

ในงานวิจัยนี้ เพื่อเพิ่มโอกาสในการสัมผัสระหว่างฟองอากาศและอนุภาคน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ได้ถูกศึกษาเพื่อเพิ่มขนาดของอนุภาคน้ำมัน โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดของตัวกลาง อัตราการไหลของน้ำเสีย รูปแบบการวางตัวกลาง และแนวทางการหมุนเวียนน้ำ ทั้ง เป็นต้น โดยพบว่าการเลือกชนิด ความหนา และการวางตัวกลางแบบขั้นตอนที่เหมาะสมนั้น สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดกว่า 50% ในขณะที่การหมุนเวียนน้ำทั้งสามารถช่วยเพิ่มสัดส่วนการนำกลับน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ รวมไปถึงนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัด (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 การกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันและผลจากการประยุกต์ใช้โมเดลการทำนายผล  
ทั้งนี้ จากการประยุกต์ใช้สมการทำนายผลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่สอดคล้องกับ  
กระบวนการทำให้ลอยทั้งแบบ IAF และ MIAF รวมไปถึงกระบวนการโคอะเลสเซอร์ ซึ่งประยุกต์ใช้  
ค่าสัดส่วน  $a/G$  และโมเดลการกรองเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมัน

ตามลำดับ พบว่าให้ผลที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนในการทำนายผลอยู่ประมาณ 15 – 20% (รูปที่ 4) ซึ่งองค์ความรู้ดังกล่าวทำให้สามารถนำไปใช้เพื่อออกแบบและดำเนินการระบบบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดจากการทดลองและการประยุกต์ใช้  
โมเดลการทำนายผล

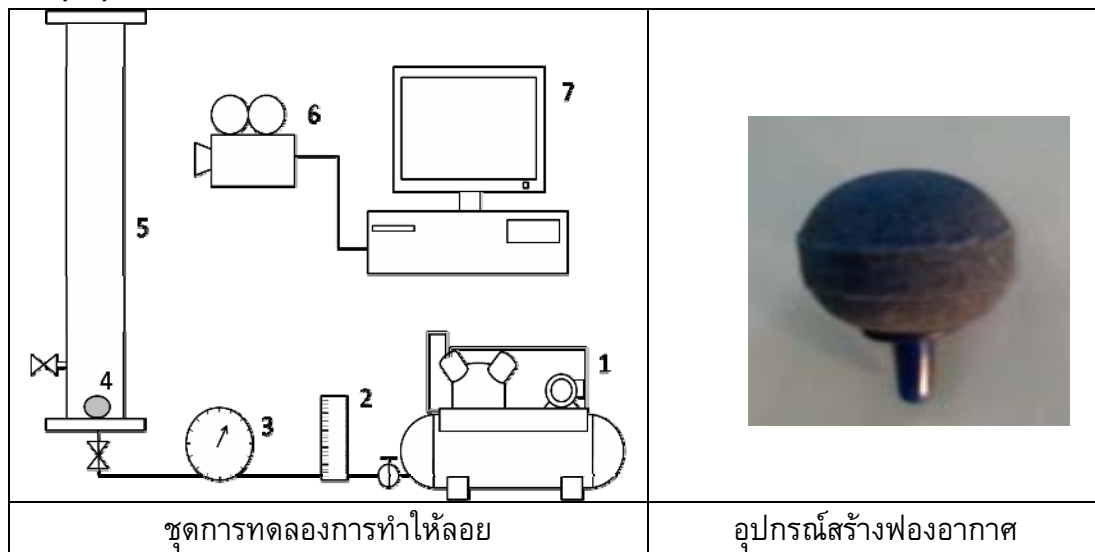
โดยสรุป ผลที่ได้รับจากการวิจัยทำให้ทราบถึงปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อภาพรวมการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว (มีความคงตัวสูงและบำบัดได้ยาก) รวมไปถึงได้แนวทางในการออกแบบ ควบคุมการทำงาน รวมไปถึงการทำนายประสิทธิภาพที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ยังคงพบข้อจำกัดในด้านการผสมผสานกระบวนการทำให้ลอยตัว กระบวนการทางเคมี และกระบวนการโคอะเลสเซอร์เข้าด้วยกันอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การศึกษาในประเด็นดังกล่าวจึงน่าสนใจสำหรับการวิจัยต่อไป ในอนาคต

### 3. วัตถุประสงค์

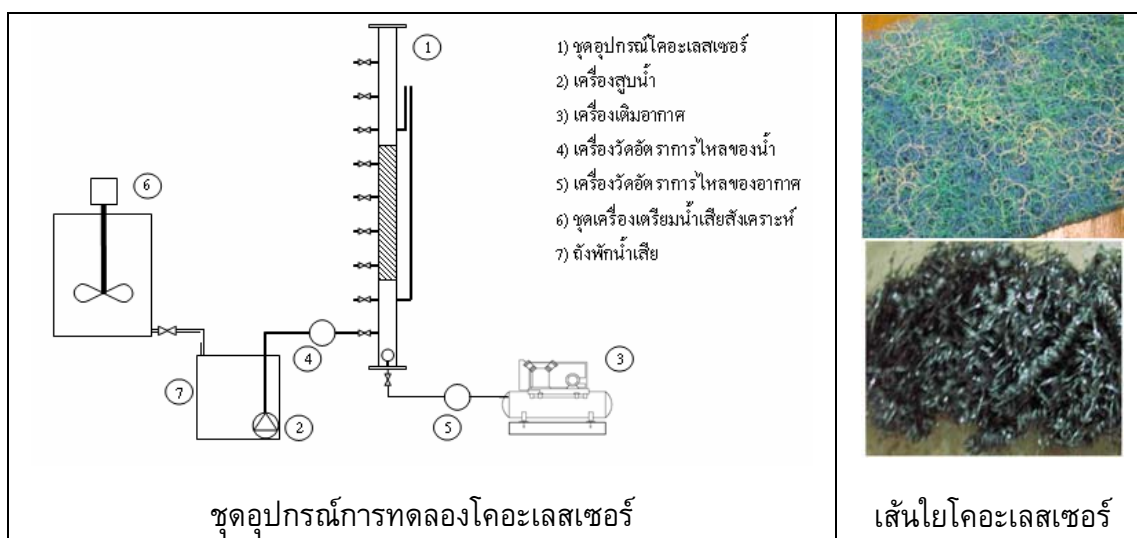
- เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีด้านกระบวนการทำให้ลอยตัว (Floatation) ระบบ Induced Air Floatation (IAF) ในการจัดการปัญหาน้ำปนเปื้อนน้ำมันดิบและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ที่มีประสิทธิภาพสูง ราคาถูก ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และเหมาะสมกับการใช้งานในประเทศไทย
- เพื่อประยุกต์ใช้อุปกรณ์ผลิตฟองอากาศ สำหรับใช้งานในกระบวนการ Floatation อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดงบประมาณในการดูแลรักษา รวมไปถึงพลังงานในการสร้างฟองอากาศ (Energy consumption) โดยนำวัตถุดิบที่มีในประเทศและหาได้ง่ายตามท้องตลาด อาทิ ยางพารา ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจ รวมไปถึงยางรถยนต์หรือวัสดุยืดหยุ่นต่างๆ มาประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์เติมอากาศชนิดใหม่
- เพื่อเข้าใจถึงปัจจัยสำคัญต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน รวมไปถึงการนำเสนอสมการความสัมพันธ์ที่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม
- เพื่อพัฒนาชุดอุปกรณ์ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้งานได้กับสภาพการปนเปื้อนของน้ำมันในรูปแบบต่างๆ ได้ดี ใช้วัสดุภายในประเทศที่หาได้ง่ายและราคาถูก โดยการบูรณาการเทคโนโลยีด้านการทำให้ลอยตัว (Floatation process) การสร้างตะกอนด้วยสารเคมี (Coagulation-Flocculation process) และการเร่งปฏิกิริยาการแยกของตะกอนน้ำมันด้วยกระบวนการ Coalescer
- เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีในการจัดการปัญหาน้ำปนเปื้อนน้ำมันดิบและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศที่เน้นให้มีการนำทรัพยากรไปใช้ประโยชน์อย่างสมดุลและในระดับที่ยั่งยืน

## 4. วิธีการทดลอง

### 4.1 ชุดอุปกรณ์



ชุดอุปกรณ์ทดลองการทำให้ลอย 1) เครื่องเติมอากาศ 2) เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ 3) เครื่องวัดความดัน 4) หัวเติมอากาศ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร 5) คอลัมน์น้ำให้ลอยทำจากท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 2 เมตร ทำการเจาะรูสำหรับการเก็บตัวอย่างที่ความสูง 10 เซนติเมตร 6) กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง 7) คอมพิวเตอร์ โดยวิธีการต่อชุดการทดลองทำการต่อเครื่องเติมอากาศผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล เครื่องวัดความดัน และเข้าสู่หัวเติมอากาศที่อยู่ด้านล่างของ ท่อเติมอากาศ วิธีการเก็บตัวอย่างทำการเก็บตัวอย่างที่ความสูง 10 เซนติเมตร เหนือหัวเติมอากาศ



อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย 1) คอลัมน์โคอะเลสเซอร์ ซึ่งทำจากท่ออะคริลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 1 ม. วัสดุตัวกลางจะใช้ตัวกลางแบบเส้นใย โดยจะทำการศึกษา ตัวกลาง 2 ชนิด คือ เส้นใยสเตนเลส (ฝอยขัดหม้อ) และเส้นใยกรองน้ำตู้ปลา ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก และสามารถหาซื้อได้ทั่วไป และด้านล่างต่อเข้ากับหัวเติมอากาศแบบหัวทราย 2) เครื่องสูบน้ำขนาด อัตราการสูบสูงสุด 1000 ลิตร/ชั่วโมง 3) เครื่องเติมอากาศขนาดอัตราการไหลสูงสุด 6.5 ลิตร/นาที 4) เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำขนาดอัตราการไหลสูงสุด 20 ลิตร/ชั่วโมง 5) เครื่องวัดอัตราการไหลของ อากาศขนาดอัตราการไหลสูงสุด 1.5 ลิตร/นาที 6) ชุดเครื่องเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วย มอเตอร์ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ความเร็วรอบการหมุนสูงสุด 300 รอบ/นาที และถังน้ำพลาสติกขนาด 200 ลิตร

#### 4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ประกอบที่จำเป็น

- เครื่องวัดพีเอช (pH meter) บริษัท Scientific Promotion (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น CG840
- เครื่องปั่น (Motor stirrer) บริษัท เบคไทย (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น IKA LABORTECHIK
- เครื่องเติมอากาศ (Air Pump) ยี่ห้อ Puma
- กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) บริษัท Olympus รุ่น BX50 ที่กำลังขยาย 60 เท่า ร่วมกับอุปกรณ์ช่วยวัดขนาดหยดน้ำมัน State micrometer
- เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ บริษัท New Flow 0 – 10 ลิตรต่อนาที
- เครื่องวัดและควบคุมความดัน บริษัท Nuova Fima 0 - 1 บาร์
- ชุดทดสอบ Jar test
- ชุดอุปกรณ์สำหรับวัดค่า COD (มันซิน, 2546) ทำการวิเคราะห์ค่า COD ด้วยวิธีแบบ ปิด (Closed Reflux) หลอดทดสอบ COD ขนาด 16 x 150 mm พร้อมฝาจุกเกลียวที่ทำด้วย TFE (Tetrafluoroethylene)
- ตู้อบ (Hot air oven) บริษัท Memmert รุ่น 600 ที่สามารถให้ความร้อนอยู่ระหว่าง  $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$
- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 และ 1000 ml
- กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 200 ml
- ปิเปต (Pipet) ขนาด 20 ml
- ชุดถังปฏิกิริยาแบบทำให้ลอยตัวทำจากท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 2 เมตร ทำการเจาะรูสำหรับการเก็บตัวอย่างทุก 10 เซนติเมตร
- อุปกรณ์เติมอากาศเป็นหัวเติมอากาศแบบแข็ง (Rigid diffuser) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร และแบบยืดหยุ่น (Flexible diffuser) ทำจากยางไนรยอนด์

### 4.3 สารเคมี

- กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid,  $H_2SO_4$ ) บริษัท J.T. Baker ความบริสุทธิ์ 98 %
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) บริษัท Carlo ERBA
- สารโคแอกกูแลนต์ (Coagulants)
  - เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride,  $FeCl_3$ ) บริษัท Carlo ERBA
  - สารส้ม (Alum,  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ) บริษัท Carlo ERBA
- สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)
  - Sodium laurylsulfate เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิด Anionic surfactant บริษัท Carlo ERBA
  - Polyoxyethylene (20) Sorbitan monolaurate (Tween 20) เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิด Nonionic surfactant บริษัท Carlo ERBA
  - Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิด Cationic surfactant บริษัท Carlo ERBA
- โคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulant aids) ชนิด Polyacrylamide บริษัท Carlo ERBA
- สาร Potassium Dichromate Digestion ( $K_2Cr_2O_7$ ) บริษัท Carlo ERBA
- สาร Ferrous Ammonium Sulfate ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) บริษัท Carlo ERBA
- สารโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) บริษัท ERBA
- น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันที่ใช้สำหรับการเตรียมน้ำเสียตัวอย่างของ บริษัท มรกต อินดัสรีส์ จำกัด มหาชน โดยลักษณะสมบัติของน้ำมันปาล์ม แสดงดังตารางด้านล่าง

| ตัวอย่าง    | ค่าความหนาแน่น<br>(g/ml) (ที่ 21 °C) | ค่าความหนืด<br>(CP) (ที่ 21 °C) | ค่าความร้อน<br>(kJ/kg) |
|-------------|--------------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| น้ำมันปาล์ม | 0.898                                | 88.6                            | 39,550                 |

### 4.4 รูปแบบการทดลอง

#### ประสิทธิภาพในการบำบัด

ในการศึกษานี้ ปริมาณน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจะถูกวิเคราะห์ในรูปของค่าซีโอดีที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาต่าง ๆ ดังนั้น ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัด (Removal Efficiency, %Remove) สามารถแสดงได้ดังสมการด้านล่าง

$$\%Eff = \frac{COD_{in} - COD_{out}}{COD_{in}}$$

### อุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic)

- ขนาดฟองอากาศ (Bubble diameter,  $D_B$ ) ซึ่งวิเคราะห์จากการเก็บภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงความเร็ว 100 ภาพต่อวินาที (100 – 150 ฟอง) และวัดขนาดด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ภาพถ่าย
- ความถี่ของการฟองอากาศ (Bubble frequency,  $f_B$ ) คือจำนวนของฟองอากาศที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งวินาที โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$f_B = \frac{Q_G}{V_B} = \frac{6 \cdot Q_G}{\pi \cdot D_B^3}$$

- ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity) ซึ่งหาค่าได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วในการลอยตัวและขนาดฟองอากาศของ[6] ซึ่งมีการวิเคราะห์ทั้งในส่วนของเฟสน้ำที่สะอาดและที่มีการปนเปื้อนจากสิ่งสกปรก

### การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมัน

ในงานวิจัยนี้ พื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย จะสัมพันธ์กับปริมาณน้ำมันในน้ำเสีย ดังนั้นในการหาปริมาณน้ำมันที่ถูกกำจัดจึงสามารถหาได้จากผลต่างของกราฟการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียเข้ากับน้ำทิ้ง โดยจะทำการหาขนาดและจำนวนของอนุภาคน้ำมันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์

### พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area, $a$ )

ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) คือสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของฟองอากาศที่เกิดขึ้น ( $S_B$ ) ต่อปริมาตรทั้งหมดของระบบ ( $V_{TOTAL}$ ) โดยตัวแปรนี้ขึ้นกับค่าตัวแปรสำคัญได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ ( $D_B$ ) ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ( $f_B$ ) และความเร็วในลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_B$ ) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้งสามตัวนั้นสามารถวัดค่าได้อย่างละเอียดและถูกต้องจากการทดลองโดยอาศัยระบบ Image analysis ดังที่กล่าวถึงในข้างต้น ค่าของ  $a$  ในงานทดลองนี้สามารถคำนวณได้ด้วยสมการด้านล่าง

$$a = N_B \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}}$$

### ค่าความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient $G$ )

ค่าความเร็วเกรเดียนท์ ( $G$ ) แสดงถึงความปั่นป่วนของน้ำซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันหรือสามารถประยุกต์ใช้เพื่อพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการกวนผสมที่เกิดจากอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ โดยสามารถแสดงได้ดังสมการด้านล่าง

$$G = \left( \frac{P}{\mu_L \cdot V_L} \right)^{0.5} \quad (4)$$

$\mu_L$  คือความหนืดของน้ำตัวอย่าง  $V_L$  คือปริมาตรของน้ำในระบบและ  $P$  คือระดับพลังงานที่ใช้ในการปั่นกวน

#### 4.5 รูปแบบการทดลอง

การทดลองนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ส่วน หลักคือ

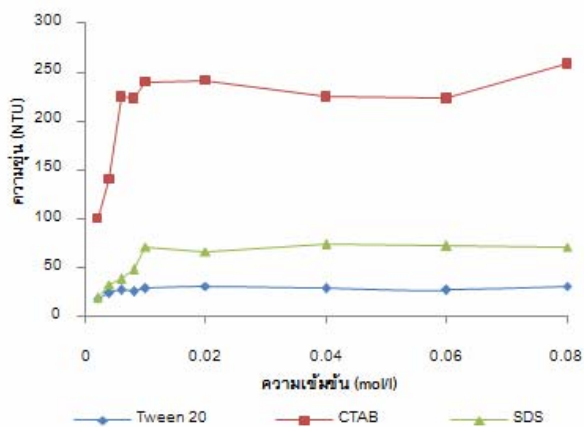
- การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองศึกษาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) ชนิดประจุลบ Polysorbate 20 (Tween 20) ชนิดไม่มีประจุ และ Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB) ชนิดประจุบวกที่เหมาะสม (1CMC) โดยทำการวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่น เพื่อนำปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่มีความเหมาะสมมาใช้เตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ในรูปอิมัลชัน และการทดลองศึกษาลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวสำหรับการวิจัย
- การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองหาความสัมพันธ์ของอัตราการไหลอากาศ ระยะเวลาในการทำให้ลอย และขนาดของฟองอากาศที่เหมาะสมสูงสุด สำหรับการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันด้วยกระบวนการทำให้ลอยแบบอินดิวิชแอร์โฟลเทชัน (IAF)
- การทดลองที่ 3 เป็นการทดลองเพื่อหาค่าพีเอช (pH) ปริมาณความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ สารโพลีเมอร์ และเกลือแกง ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันด้วยกระบวนการทางเคมีหรือโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน รวมไปถึงนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการทดลองที่ 4
- การทดลองที่ 4 เป็นการศึกษาระบวนการที่ประยุกต์ใช้กระบวนการ IAF ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันหรือกระบวนการโมดิฟายด์อินดิวิชแอร์โฟลเทชัน (Modified Induce Air Flootation, MIAF) รวมไปถึงนำเสนอสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน
- การทดลองที่ 5 เป็นการทำการศึกษาระบวนการโคอะเลสเซอร์แบบเส้นใย สำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดยวิเคราะห์ผลกระทบจากชนิดตัวกลาง อัตราไหลน้ำเสีย ความหนา รูปแบบการวางตัวกลาง และแนวทางการหมุนเวียนน้ำทิ้ง รวมไปถึงนำเสนอสมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

## 5. ผลการทดลอง

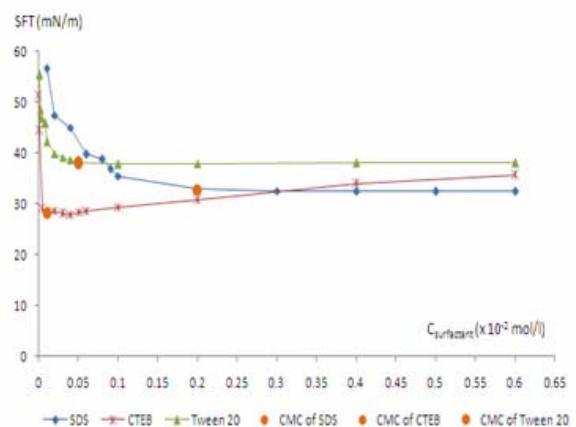
### การศึกษาลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

#### • การศึกษาค่าความขุ่นสำหรับเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์

ในส่วนนี้ เป็นการศึกษาค่าความขุ่นที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว โดยใช้ไขมันปาล์ม 5 กรัมต่อลิตร ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Sodium Dodecyl Sulphate (SDS), Polysorbate 20 (Tween 20) และ Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB) ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าความขุ่น ที่ขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในช่วง 0.001-0.08 โมลต่อลิตร รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นกับปริมาณสารลดแรงตึงผิว SDS, CTAB และ Tween 20 ที่ความเข้มข้นต่างๆ



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นกับปริมาณสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด

จากรูปที่ 5 ก แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นกับค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสามชนิดที่เพิ่มขึ้น โดยสามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่นของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นได้ช่วง 2 ได้แก่

- ช่วงที่ 1 ค่าความขุ่นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS, CTAB และ Tween 20 ในช่วง 0.002-0.008, 0.002-0.006 และ 0.002-0.004 โมลต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากการลดลงของค่าแรงตึงผิวระหว่างหยดน้ำมันกับน้ำ และหยดน้ำมันยังมีพื้นที่ผิวมากพอในการดูดซับโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว
- ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนค่าความขุ่นน้อยมากจนถึงคงที่ที่เกิดในช่วงความเข้มข้นของ SDS, CTAB และ Tween 20 ที่ 0.008-0.08, 0.006-0.08 และ 0.004-0.08 โมลต่อลิตร เนื่องจากค่าแรงตึงผิวที่เริ่มคงที่และพื้นที่ผิวของหยดน้ำมันที่แตกตัวเกิดการดูดซับกับโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจนเต็มไม่สามารถเกิดการดูดซับกับโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวได้อีกทำให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่เหลือเกิดการรวมตัวเกิดเป็นไมเซลล์ ซึ่งการรวมตัวเป็นไมเซลล์ของ SDS, CTAB และ

Tween 20 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่นน้อยมาก ชูลีกร (2547) ได้ทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS, CTAB และ Tween 20 ที่ส่งผลต่อการลดลงของค่าแรงตึงผิว พบว่าการลดลงของแรงตึงผิวเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น 2 ช่วง ในช่วงที่ 1 ของความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวต่ำจะส่งผลทำให้เกิดการลดลงของแรงตึงผิวอย่างรวดเร็ว และช่วงที่ 2 เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้นทำให้การเปลี่ยนแปลงของแรงตึงผิวมีแนวโน้มลดลงและคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้น จากผลการทดลองของชูลีกรแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับค่าความขุ่นที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

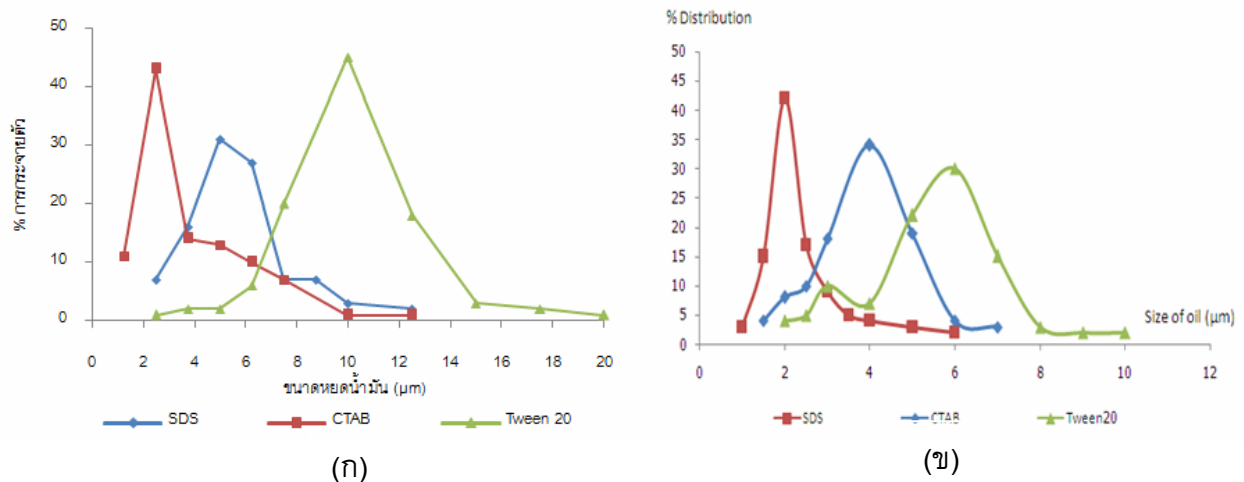
ดังนั้นความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ให้ค่าความขุ่นสูงสุดที่ได้จากการทดลองนี้สำหรับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (SDS) ค่าความเข้มข้นที่มีความเหมาะสม 0.008 โมลต่อลิตร ให้ค่าความขุ่นสูงสุด 71.17 NTU สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (CTAB) ค่าความเข้มข้นที่มีความเหมาะสม 0.006 โมลต่อลิตร ให้ค่าความขุ่นสูงสุด 225 NTU และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween 20 ค่าความเข้มข้นที่มีความเหมาะสม 0.004 โมลต่อลิตร ให้ค่าความขุ่นสูงสุด 27.5 NTU จะนำไปประยุกต์ใช้ในการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวสำหรับการทดลองในงานวิจัยต่อไป

ส่วนการศึกษากการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, CTAB และ Tween 20 (ดังรูปที่ 5 ข) พบการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงตึงผิว (STF) ในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว ยังคงสามารถแบ่งการเปลี่ยนของค่าแรงตึงผิวได้ 2 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวในช่วง 0- 0.1 โมลต่อลิตร และในช่วงที่ 2 ช่วงความเข้มข้น 0.1-0.5 โมลต่อลิตร พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของแรงตึงผิวเกิดขึ้นในลักษณะแบบคงที่ ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับการศึกษาในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มร่วมกับสารลดแรง ตึงผิว ดังนั้นความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ให้ค่าความขุ่นสูงสุดที่ได้จากการทดลองนี้สำหรับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (SDS) ค่าความเข้มข้นที่มีความเหมาะสม  $0.2 \times 10^{-2}$  โมลต่อลิตร สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (CTAB) ค่าความเข้มข้นที่มีความเหมาะสม  $0.01 \times 10^{-2}$  โมลต่อลิตร และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween 20 ค่าความเข้มข้นที่มีความเหมาะสม  $0.05 \times 10^{-2}$  โมลต่อลิตร โดยค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมจะนำไปประยุกต์ใช้ในการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิวสำหรับการทดลองในงานวิจัยต่อไป

- **การศึกษาลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ ขนาดหยดน้ำมัน ค่าความหนืด และค่าซีโอดี (COD)**

จากผลการศึกษาค่าความขุ่นที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ จึงได้นำค่าความเข้มข้นของ SDS, CTAB และ Tween 20 ที่ 0.008, 0.006 และ 0.004 โมลต่อลิตร มาเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวที่มีความคงตัวสูง (Stabilized emulsion) ที่มีความเข้มข้นของน้ำมัน 5 กรัมต่อลิตร (Ahmad และคณะ, 2006) แล้วทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ขนาดหยดน้ำมันในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด (SDS, CTAB และ Tween 20 ที่ความเข้มข้น 0.008, 0.006 และ 0.004 ตามลำดับ) ทำการ

วิเคราะห์หาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์พร้อมเฟสคอนทราสต์ (Light Microscope with Contrast Condenser) ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX50 ที่กำลังขยาย 60 เท่า ร่วมกับอุปกรณ์ช่วยวัดขนาดหยดน้ำมัน State micrometer ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6 ค่าความหนืด (Viscosity) ทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดค่าความหนืด (Brookfield Digital Rheometer) ยี่ห้อ Brookfield รุ่น DV-III และการวิเคราะห์ค่า COD ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1



รูปที่ 6 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวกับขนาดหยดน้ำมันในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม (ก) และน้ำมันเครื่อง (ข) ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด

จากรูปที่ 6 ก พบว่าขนาดของหยดน้ำมันมีเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวสูงสุดในตัวอย่างน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, CTAB และ Tween 20 มีขนาดอยู่ที่ 5, 2.5 และ 10 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างของขนาดหยดน้ำมันที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าแรงตึงผิวที่เกิดจากชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสามารถเรียงลำดับค่าแรงตึงผิว และขนาดหยดน้ำมันได้ดังนี้

แรงตึงผิว Tween20 > SDS > CTAB

ขนาดหยดน้ำมัน Tween20 > SDS > CTAB

นอกจากนี้ความแตกต่างขนาดของหยดน้ำมันที่เกิดขึ้นพบว่ามีผลสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความขุ่นคือ ตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB มีขนาดหยดน้ำมันที่เล็กที่สุดมีความสอดคล้องในการให้ค่าความขุ่นสูงสุด รองลงมาเป็นตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS และในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 มีขนาดหยดน้ำมันที่ใหญ่ที่สุดมีความสอดคล้องในการให้ค่าความขุ่นต่ำที่สุด (รูปที่ 7 ก ข และ ค)

ส่วนการศึกษาขนาดของหยดน้ำมันในตัวอย่างน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, CTAB และ Tween 20 ดังรูปที่ 6 ข มีเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวขนาดหยดน้ำมันสูงสุดอยู่ที่ 2, 4 และ 6 ไมโครเมตร ตามลำดับ (ดังรูปที่ 7 ง จ และ ฉ) ซึ่งความแตกต่างของขนาดหยดน้ำมันที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความแตกต่างของมวลโมเลกุลที่เกิดจากชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียสามารถเรียงลำดับค่าแรงตึงผิว และขนาดหยดน้ำมันได้ดังนี้

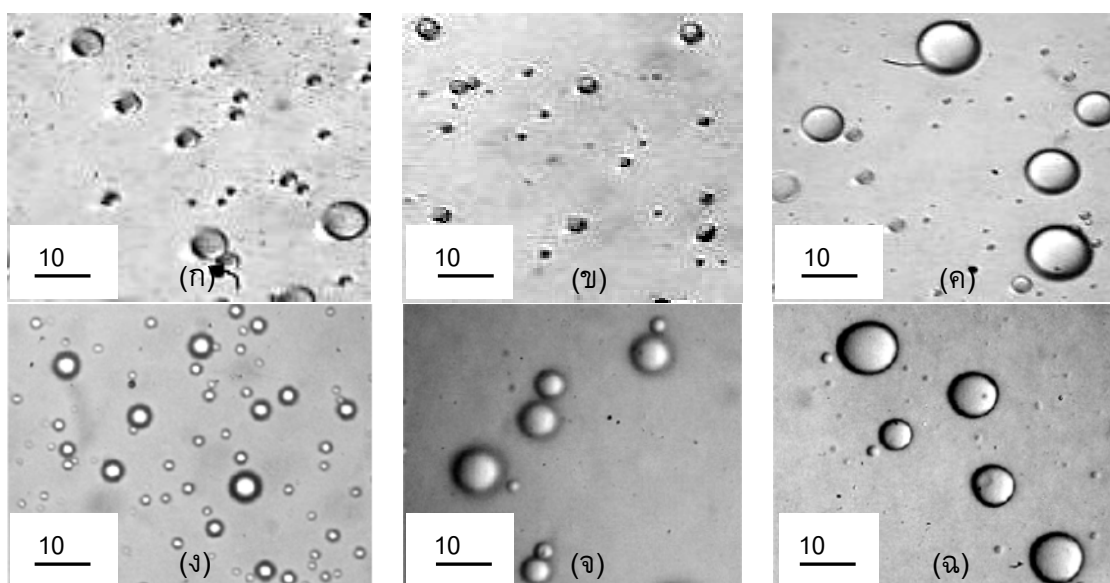
มวลโมเลกุล

Tween20 > CTAB > SDS

ขนาดหยดน้ำมัน

Tween20 > CTAB > SDS

เมื่อทำการเปรียบเทียบปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันในตัวอย่าน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มร่วมกับสารลดแรงตึงผิวคือ ค่าแรงตึงผิวของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างน้ำเสีย ในส่วนของตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิวพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของขนาดหยดน้ำมันความแตกต่างของมวลโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างน้ำเสีย



รูปที่ 7 รูปของหยดน้ำมันถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 60 เท่าในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม (ดังรูป ก ข และ ค) และน้ำมันเครื่อง (ดังรูป ง จ และ ฉ) ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด

SDS, CTAB และ Tween 20 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่าของลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด

| สารลดแรงตึงผิว | ความขุ่น<br>(NTU) | COD<br>(mg/l) | CMC     |       | $\mu_L$<br>(cps) | D <sub>oil</sub><br>(µm) |
|----------------|-------------------|---------------|---------|-------|------------------|--------------------------|
|                |                   |               | (mol/l) | (g/l) |                  |                          |
| SDS            | 71.17             | 10190.47      | 0.008   | 2.31  | 19.7             | 5                        |
| CTAB           | 225               | 10984.12      | 0.006   | 2.19  | 19.3             | 2.5                      |
| Tween 20       | 27.5              | 17714.27      | 0.004   | 4.91  | 18.9             | 10                       |

จากตารางที่ 1 แสดงค่า COD ของตัวอย่างน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS, CTAB และ Tween 20 มีค่าเท่ากับ 10190.47, 10984.12 และ 17714.27 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการเปลี่ยนแปลงค่า COD ที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างน้ำเสีย โดยพบว่าปริมาณของ Tween 20 ใช้ในการเตรียมตัวอย่างน้ำเสียเท่ากับ 4.91 กรัมต่อ

ลิตร ซึ่งใช้ปริมาณมากที่สุดส่งผลต่อการเกิดค่า COD สูงสุด ในขณะที่ SDS และ CTAB มีค่า COD ที่ใกล้เคียงกันเป็นผลเนื่องมาจากการใช้ปริมาณสารลดแรงตึงผิวไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้ค่าความหนืดของตัวอย่างน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS, CTAB และ Tween 20 มีค่าเท่ากับ 19.7, 19.3 และ 18.9 เซนติพอยส์ (Centipoises, cps) ตามลำดับ ซึ่งค่าความหนืดของตัวอย่างน้ำเสียทั้ง 3 ชนิดไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

## 5. ผลการทดลอง

### การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ด้วยกระบวนการทำให้ลอยแบบอินดิวิชแอโรฟเลชัน (IAF)

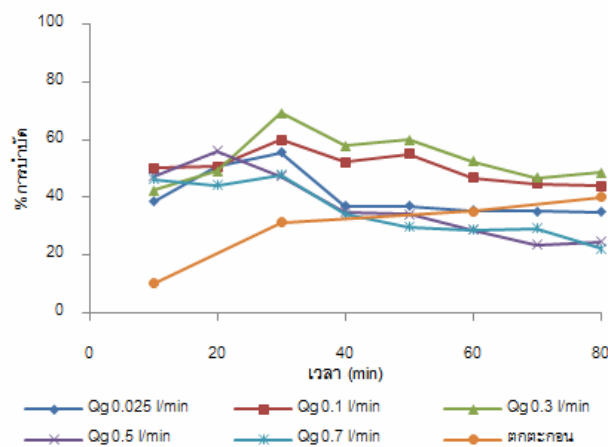
เป็นการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ SDS, CTAB และ Tween 20 ด้วยกระบวนการ IAF โดยปัจจัยทำการศึกษาคือ อัตราการไหลอากาศในช่วง 0.025-0.7 ลิตรต่อนาที และระยะเวลาการบำบัดในช่วง 0-80 นาที

- การศึกษาอัตราการไหลอากาศที่เหมาะสมต่อการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด 3 ชนิด ได้แก่ SDS, CTAB และ Tween 20 ด้วยกระบวนการ IAF

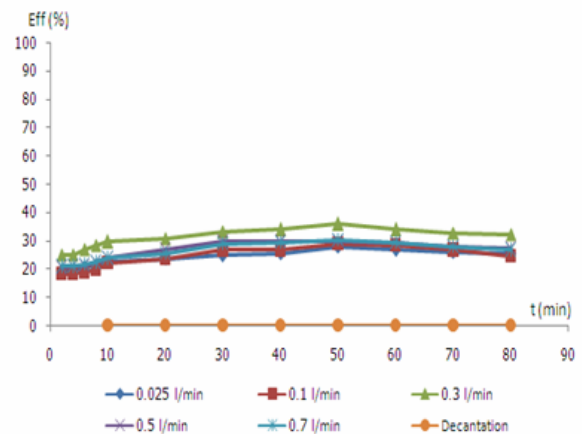
โดยทำการทดลองเพื่อทำการศึกษาราคาการไหลอากาศ และระยะเวลาในการบำบัดที่มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด

- การศึกษาอัตราการไหลอากาศที่เหมาะสมต่อการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS ด้วยกระบวนการ IAF

โดยผลการทดลองแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS กับเวลาการบำบัดที่อัตราการไหลอากาศในช่วง 0.025-0.7 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 8



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มและน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS กับเวลาการบำบัดที่อัตราการไหลอากาศต่างๆ

จากรูปที่ 8 พบว่ากระบวนการ IAF ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS อยู่ที่ 69.82 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ใน

เวลา 30 นาที เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการไหลอากาศและช่วงระยะเวลาอื่น ทำให้กล่าวได้ว่าไม่มี ความจำเป็นในการเติมอากาศที่เวลานานเพื่อการบำบัด เนื่องจากประสิทธิภาพมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อ เวลาการเติมอากาศนานขึ้น ทั้งนี้จากการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลาต่างๆ สามารถ แบ่งช่วงกลไกการบำบัดได้ 3 ช่วง ได้แก่

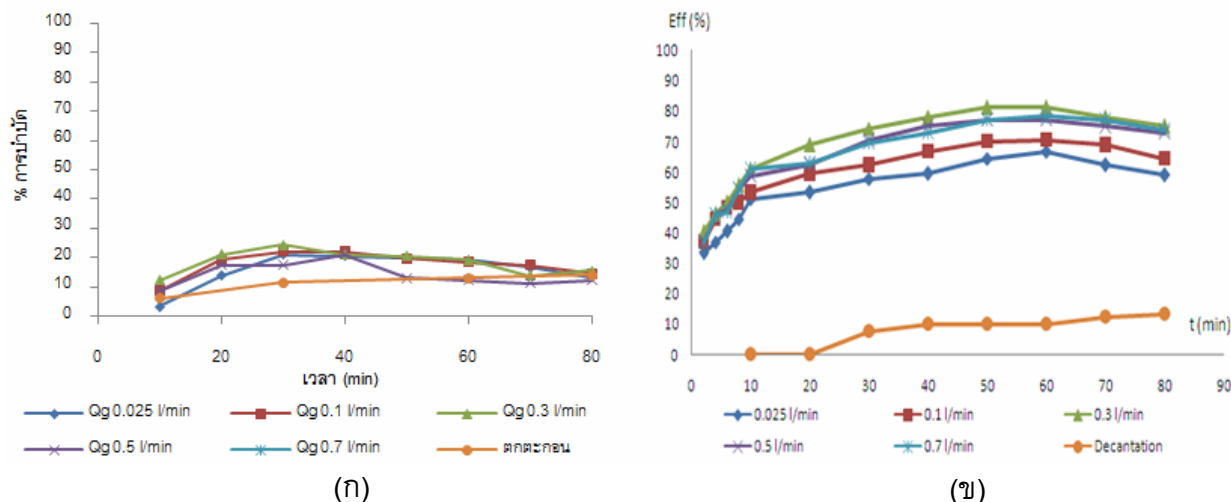
- Free surface zone ซึ่งในช่วงนี้ กล่าวได้ว่าอนุภาคน้ำมันยังมีพื้นที่ว่างสำหรับจับหรือสัมผัส กับฟองอากาศ ทำให้ค่าอัตราการไหลอากาศไม่ค่อยมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัด
- Attachment zone ในช่วงนี้เป็นกลไกในการเกาะติดระหว่างอนุภาคน้ำมันและฟองอากาศจะ เป็นตัวแปรสำคัญในการบำบัดโดยการแยกอนุภาคน้ำมันออกสู่ด้านบนของระบบบำบัด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าอัตราการไหลอากาศมีผลกระทบค่อนข้างมากต่อค่าประสิทธิภาพการ บำบัดที่ได้ โดยค่าอัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที นั้นเป็นสภาวะที่เหมาะสมสูงสุดที่ ก่อให้เกิดการเกาะติดของหยดน้ำมันและฟองอากาศ ในขณะที่อัตราการไหลอากาศที่สูง เกินไปอาจส่งผลต่อพลังงานในการกวนผสมที่สูงเกินไปจนทำให้ลดความสามารถในการ เกาะติด รวมไปถึงการลดลงของประสิทธิภาพโดยรวมในที่สุด
- Breaking zone ในช่วงนี้เห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมของระบบมีแนวโน้มที่ จะลดลง โดยเกิดมาจากการแตกตัวของระหว่างหยดน้ำมันที่รวมตัวกับฟองอากาศ นอกจากนี้ระยะเวลาที่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวจะแปรผกผันกับค่าอัตราการไหลของอากาศ ที่ใส่เข้าระบบ

โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างกระบวนการ IAF กับการตกตะกอน พบว่าที่เวลาเท่ากัน (30 นาที) กระบวนการ IAF ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในช่วงประมาณ 40-70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการตกตะกอน (31.52 เปอร์เซ็นต์) เป็นผล เนื่องจากฟองอากาศที่จับตัวกับหยดน้ำมันทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างค่าความหนาแน่นของหยด น้ำมันกับน้ำ ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกตามสมการของสโตค (Stokes' law)

ส่วนการศึกษาการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วย กระบวนการ IAF (ดังรูปที่ 8 ข) พบว่าระยะเวลา และอัตราการไหลอากาศในการบำบัดไม่ส่งผลทำให้ เกิดความแตกต่างของประสิทธิภาพการบำบัด โดยอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด เท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 0.3 ลิตรต่อนาที บำบัดนาน 50 นาที

- การศึกษาอัตราการไหลอากาศที่เหมาะสมต่อการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับ สารลดแรงตึงผิวชนิด CTAB ด้วยกระบวนการ IAF

โดยผลการทดลองแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การบำบัดตัวอย่าง น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB กับเวลาการบำบัดที่อัตราการไหลอากาศในช่วง 0.025-0.7 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม และ น้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB กับเวลาการบำบัดที่อัตราการไหลอากาศต่างๆ

จากรูปที่ 9 พบว่ากระบวนการ IAF ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB อยู่ที่ 24.33 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที่ ในเวลา 30 นาที เมื่อทำการเปรียบเทียบกับอัตราการไหลอากาศและระยะเวลาอื่นๆ พบว่าอัตราการไหลอากาศ และระยะเวลาบำบัด มีผลน้อยมากต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

- ขนาดหยดน้ำมันของตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB มีขนาดเล็กเพียง 2.5 ไมโครเมตร โดยขนาดหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กยังส่งผลเสียต่อค่าความเร็วสุดท้าย ( $V_t$ ) ของการแยกตามสมการของสโตค โดยค่าความเร็วสุดท้ายจะแปรผันตรงกับขนาดของอนุภาคยกกำลังสอง ตามสมการ (Moosai และ Dawe, 2003)

$$V_t = \frac{g(\rho_p - \rho)D_p^2}{18\mu}$$

ดังนั้นการที่ขนาดหยดน้ำมันของตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB มีขนาดเล็กทำให้การแยกเกิดขึ้นได้ช้าซึ่งส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดเป็นอย่างมาก

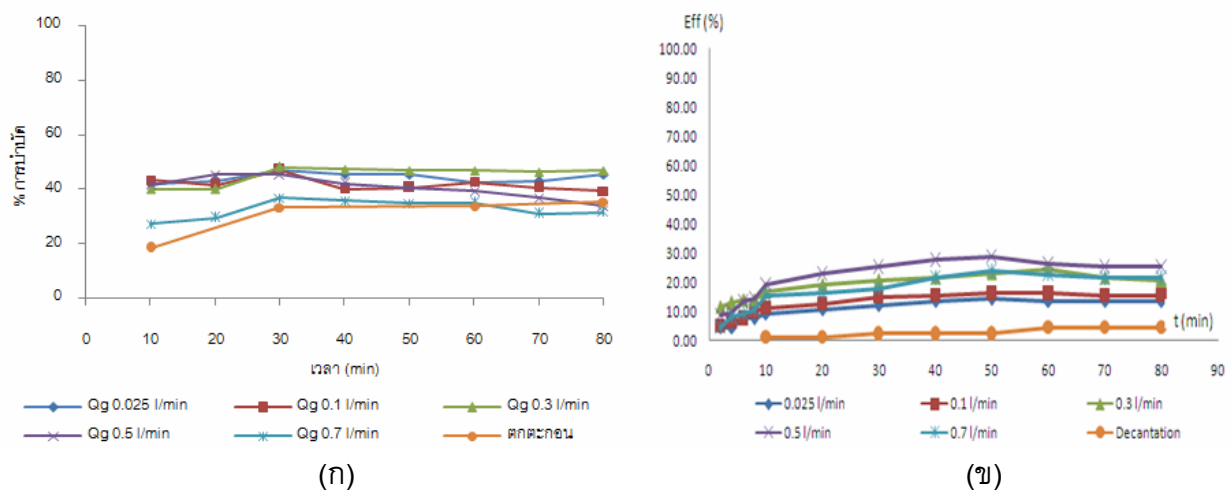
- แรงผลักระหว่างประจุบวกบนพื้นผิวของหยดน้ำมันที่เกิดจากการดูดซับโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว CTAB ทำให้โอกาสในการชนและการเกาะติดกับฟองอากาศเกิดได้ลดลง

โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างกระบวนการ IAF กับการตกตะกอนพบว่าที่เวลาเท่ากัน (30 นาที) กระบวนการ IAF ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในช่วงประมาณ 13-25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการตกตะกอนเพียงเล็กน้อย (11.23 เปอร์เซ็นต์) เป็นผลเนื่องจากฟองอากาศไม่มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด หรือมีผลน้อยมากๆ โดยสามารถกล่าวได้ว่าขนาดของหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กมากๆจนทำให้การสัมผัสกับฟองอากาศเกิดขึ้นได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ

ส่วนการศึกษาการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB ด้วยกระบวนการ IAF (ดังรูปที่ 9 ข) พบว่าสามารถแบ่งช่วงของกลไกการบำบัดได้ 3 ช่วง Free surface zone, Attachment zone และ Breaking zone โดยอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 0.3 ลิตรต่อนาที บำบัดนาน 50 นาที

- การศึกษาอัตราการไหลอากาศที่เหมาะสมต่อการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด Tween 20 ด้วยกระบวนการ IAF

โดยผลการทดลองแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 กับเวลาการบำบัดที่อัตราการไหลอากาศในช่วง 0.025-0.7 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม (ก) และน้ำมันเครื่อง (ข) ร่วมกับ Tween 20 กับเวลาการบำบัดที่อัตราการไหลอากาศต่างๆ

จากรูปที่ 10 ก พบว่ากระบวนการ IAF ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 อยู่ที่ 48.19 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ในเวลา 30 นาที เมื่อทำการเปรียบเทียบกับอัตราการไหลอากาศและระยะเวลาอื่นๆ พบว่าอัตราการไหลอากาศ และระยะเวลามีผลน้อยมากต่อประสิทธิภาพการบำบัด ยกเว้นที่อัตราการไหลอากาศที่ 0.7 ลิตรต่อนาที เนื่องจากอัตราการไหลอากาศที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดการปั่นป่วนจนทำให้ชั้นของน้ำมันที่แยกด้านบนเกิดการกวนผสม ซึ่งจะส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดรวมของระบบ โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสามารถสรุปได้ดังนี้

- ขนาดของหยดน้ำมันในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 มีขนาดใหญ่ (10 ไมโครเมตร) ส่งผลทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากพอจนทำให้การชน และการเกาะติดกับฟองอากาศเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- พื้นที่ผิวของหยดน้ำมันในตัวอย่างน้ำเสียที่มีการปนเปื้อน Tween 20 ไม่มีประจุส่งผลทำให้การชนและการสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันกับฟองอากาศเกิดขึ้นอย่างไม่มีประสิทธิภาพมากนัก

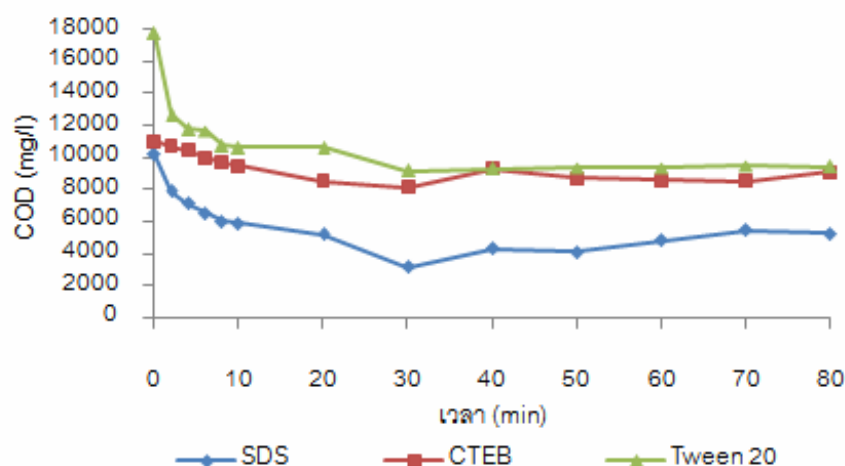
เนื่องจากประจุไฟฟ้าจะมีส่วนช่วยการชนและการสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันกับฟองอากาศ โดยอาศัยคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวในส่วนที่มีประจุในการเกาะติดกับฟองอากาศ และคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวในส่วนที่ไม่มีประจุในการดูดซับกับหยดน้ำมันทำให้การชนและการสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันกับฟองอากาศมีประสิทธิภาพมากขึ้น

โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างกระบวนการ IAF กับการตกตะกอนพบว่าที่เวลาเท่ากัน (30 นาที) กระบวนการ IAF ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในช่วงประมาณ 35-49 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการตกตะกอน (33.41 เปอร์เซ็นต์) เป็นผลเนื่องจากฟองอากาศที่จับตัวกับหยดน้ำมันซึ่งมีขนาดใหญ่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างค่าความหนาแน่นของหยดน้ำมันกับน้ำ ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกตามสมการของสโตค อย่างไรก็ตามจากผลกระทบของประจุบนพื้นผิวของหยดน้ำมันทำให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ต่ำกว่าตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS

ส่วนการศึกษาการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB ด้วยกระบวนการ IAF (ดังรูปที่ 10 ข) พบว่าสามารถแบ่งช่วงของกลไกการบำบัดได้ 3 ช่วง Free surface zone, Attachment zone และ Breaking zone โดยอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที บำบัดนาน 50 นาที

- การศึกษาจลนศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด 3 ชนิด ได้แก่ SDS, CTAB และ Tween 20 ด้วยกระบวนการ IAF ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด

โดยผลการทดลองแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่า COD ของตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด 3 ชนิด กับระยะเวลาการบำบัดในช่วง 0-80 นาที ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า COD กับเวลาการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด 3 ชนิด ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 11 พบว่ากลไกการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS CTAB และ Tween 20 ด้วยกระบวนการ IAF สามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงได้ 3 ช่วงหลักได้แก่

- ช่วงที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงค่า COD ลดลงอย่างรวดเร็วเกิดในช่วง 0-10 นาที ในกระบวนการ IAF สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, CTAB และ Tween 20 โดยพบว่ามีการลดลงค่า COD จาก 10190.5-5863.354, 10984.12-9448.8 และ 17714.27-10604.74 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเท่ากับประสิทธิภาพในการบำบัดที่ 42.46, 12.02 และ 40.13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีสาเหตุจากในช่วงที่ 1 ปริมาณของหยดน้ำมันยังคงสูง ทำให้โอกาสที่เกิดการชนและการเกาะติดเกิดขึ้นได้มากส่งผลให้เกิดการลดลงของค่า COD อย่างรวดเร็วในช่วงเวลานี้
- ช่วงที่ 2 การเปลี่ยนแปลงค่า COD ลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงเวลา 10-30 นาที ในการบำบัดสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, CTAB และ Tween 20 โดยเปลี่ยนแปลงค่า COD จาก 5863.354-3130.435, 9448.8-8125.968 และ 10604.74-9178.368 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเท่ากับประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงขึ้นเพียง 26.82, 12.32 และ 8.05 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากช่วงที่ 1 เนื่องจากปริมาณของหยดน้ำมันที่เหลือในช่วงที่ 2 มีปริมาณลดลงทำให้โอกาสเกิดการชนและการเกาะติดเกิดขึ้นได้น้อยลง ทำให้อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการบำบัดเกิดได้ลดลง
- ช่วงที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่า COD สูงขึ้นในช่วง 30-80 นาที ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, CTAB และ Tween 20 ให้ค่า COD เพิ่มขึ้นจาก 3130.435-5217.391, 8125.968-9070.848 และ 9178.368-9395.424 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเท่ากับประสิทธิภาพในการบำบัดที่ลดลงจากช่วงที่ 2 เท่ากับ 20.48, 8.79 และ 1.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เป็นผลจากการเติมอากาศในกระบวนการบำบัดที่นานเกินไปส่งผลทำให้เป็นการเพิ่มพลังงานในการกวนผสมของระบบทำให้เกิดการแตกตัวของชั้นน้ำมันที่ถูกแยกด้านบน

ดังนั้นแนวทางการดำเนินระบบของกระบวนการ IAF ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางสรุปผลศึกษาจลนศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ด้วยกระบวนการ IAF

| สารลดแรงตึงผิว | อัตราการไหลอากาศ<br>(l/min) | เวลา<br>(min) | ประสิทธิภาพ<br>(%) |
|----------------|-----------------------------|---------------|--------------------|
| SDS            | 0.3                         | 30            | 69.28              |
| CTAB           | 0.3                         | 30            | 24.33              |
| Tween 20       | 0.3                         | 30            | 48.19              |

จากตารางที่ 2 เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิดได้ดังนี้

$$\% \text{การบำบัด}_{\text{SDS}} > \% \text{การบำบัด}_{\text{Tween 20}} > \% \text{การบำบัด}_{\text{CTAB}}$$

โดยปัจจัยที่มีผลต่อความแตกต่างของประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักคือ

- ขนาดหยดน้ำมัน ( $D_{oil}$ ) โดยขนาดของหยดน้ำมันที่เกิดขึ้นในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB (2.5 ไมโครเมตร) ทำให้ยากต่อการชนและเกิดการเกาะติดกับฟองอากาศ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับหยดน้ำมันในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS (5 ไมโครเมตร) และ Tween 20 (10 ไมโครเมตร) ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB แนวโน้มของประสิทธิภาพการบำบัดที่ต่ำกว่าตัวอย่างน้ำเสียชนิดอื่น
- ประจุบนพื้นผิวของหยดน้ำมัน โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 กับ SDS พบว่าตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงกว่าตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 เนื่องจากประจุไฟฟ้า (ลบ) บนพื้นผิวของหยดน้ำมันในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS จะมีส่วนช่วยทำให้การชนและการสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันกับฟองอากาศมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 ซึ่งทำให้เกิดหยดน้ำมันที่ไม่มีประจุไฟฟ้าบนพื้นผิว
- ลักษณะของโฟม (Foam) ที่เกิดขึ้นบริเวณด้านบนผิวน้ำในกระบวนการบำบัดจะแสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ออกจากระบบบำบัด โดยพบว่าในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS จะมีลักษณะของการเกิดโฟม ที่มากกว่ากระบวนการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS มีค่าที่สูงกว่าตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20

ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า ขนาดของหยดน้ำมัน ประจุบนพื้นผิวหยดน้ำมัน และลักษณะของการเกิดโฟมบริเวณด้านบนผิวน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ IAF นอกจากนี้การศึกษาการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการ IAF ในหัวข้อที่ผ่านมายังพบข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ IAF ต่อไป

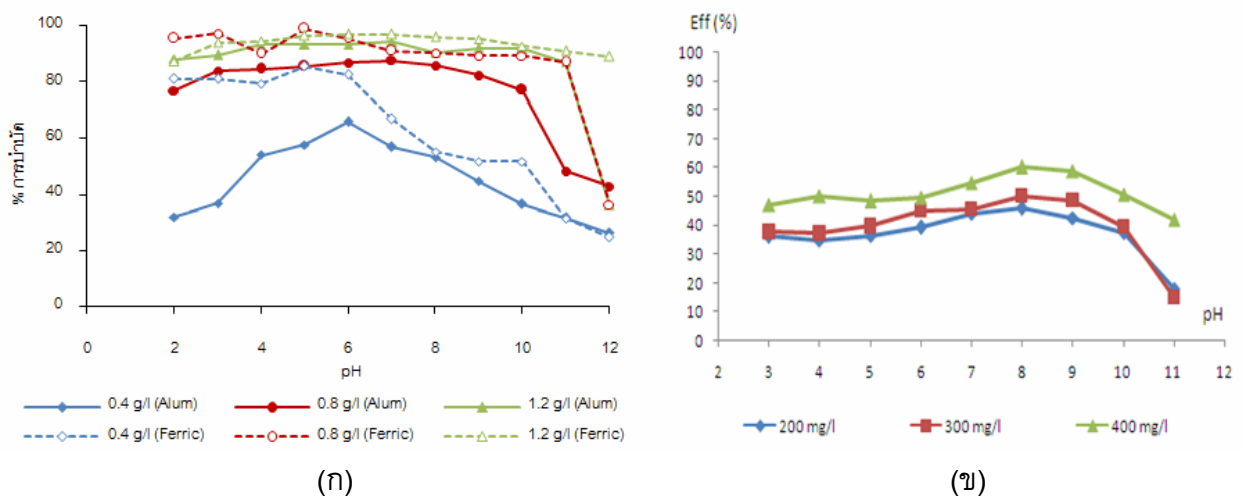
## 5. ผลการทดลอง

### การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ด้วยกระบวนการทางเคมี (โคเอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน) ในอุปกรณ์จาร์ทดสอบ

ในส่วนนี้จะเป็นการทดลองเพื่อศึกษาค่า pH เริ่มต้นที่มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ SDS, CTAB และ Tween 20 ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่า pH เริ่มต้นทำการศึกษาในช่วง 2-12 ปริมาณความเข้มข้นของสารโคเอกกูเลชันที่ทำการศึกษา ในช่วง 0.4-1.2 กรัมต่อลิตร และชนิดของสารโคเอกกูเลชัน ได้แก่ สารส้ม และเฟอริกคลอไรด์

- การศึกษาค่า pH เริ่มต้นที่มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS ด้วยสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์

โดยผลการทดลองแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับการเปลี่ยนแปลงค่า pH เริ่มต้นในช่วง 2-12 สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.4, 0.8 และ 1.2 กรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับค่า pH เริ่มต้นในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม (ก) และน้ำมันเครื่อง (ข) ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์

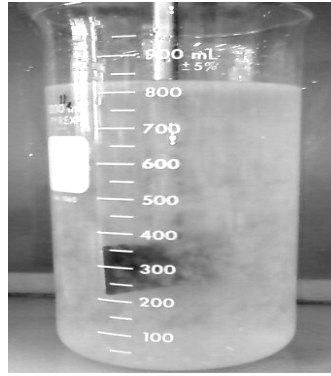
จากรูปที่ 12 ก ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้มที่ความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร เท่ากับ 6 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 65.77 เปอร์เซ็นต์, 0.8 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 7 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 87.7 เปอร์เซ็นต์ และ 1.2 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 7 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 94.26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยเฟอริกคลอไรด์ สำหรับความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 5 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 85.67 เปอร์เซ็นต์, 0.8 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 5 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 98.91 เปอร์เซ็นต์ และ 1.2 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 6 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 97.02 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

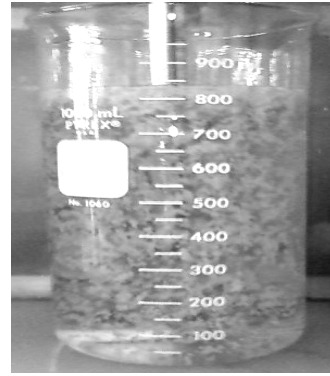
ส่วนการศึกษากการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้ม 0.2 กรัมต่อลิตร (ดังรูปที่ 12 ข) ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 45 เปอร์เซ็นต์, 0.3 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 50 เปอร์เซ็นต์ และ 0.4 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 60 เปอร์เซ็นต์ โดยค่า pH ที่มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดด้วยสารส้มมีค่าเท่ากับ 8

โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการบำบัดประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่

- ปริมาณความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามปริมาณสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมสารโคแอกกูแลนต์ที่ปริมาณต่ำทำให้ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ไม่มากเพียงพอสำหรับการทำลายเสถียรภาพในกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ (Charge neutralization) และกลไกการห่อหุ้มคอลลอยด์ (Sweep coagulation) ของหยดน้ำมัน และเมื่อปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้มีปริมาณสูงขึ้นทำให้ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์มีมากเพียงพอสำหรับกลไกการทำลายเสถียรภาพส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น
- ค่า pH เริ่มต้น พบว่าเมื่อแนวโน้มของค่า pH เริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่า pH เริ่มต้นต่ำๆเนื่องมาจากที่ค่า pH เริ่มต้นเป็นกรดและกลางจะทำให้เกิดฟล็อกสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ที่มีประจุบวก เช่น  $Al^{3+}$ ,  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_3$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Fe(OH)^{2+}$  และ  $Fe(OH)_2^+$  ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แต่เมื่อทำการเพิ่มค่า pH เริ่มต้นเป็นด่างจะทำให้ประจุลบ ( $OH^-$ ) เกิดการดูดซับบนพื้นผิวของหยดน้ำมัน และอยู่ในสารละลายทำให้ปริมาณสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ไม่เพียงพอที่จะทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมัน ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงตามค่า pH เริ่มต้นที่เพิ่มสูงขึ้น (ชูลีกร, 2547)
- ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ พบว่าเฟอริกคลอไรด์มีให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการบำบัดด้วยสารส้ม เนื่องจากฟล็อกที่เกิดขึ้นจากการใช้สารส้มเป็นฟล็อกที่มีความชอบน้ำสูงกว่า (Al-Shamrania และคณะ, 2002) ฟล็อกที่เกิดจากเฟอริกคลอไรด์ โดยลักษณะ ฟล็อกของสารส้มที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นปุยขาว และชั้นของฟล็อกหนากว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ ฟล็อกที่เกิดจากใช้เฟอริกคลอไรด์เป็นที่ฟล็อกมีขนาดใหญ่ และอัดตัวกันแน่น ดังรูปที่ 13



(ก)

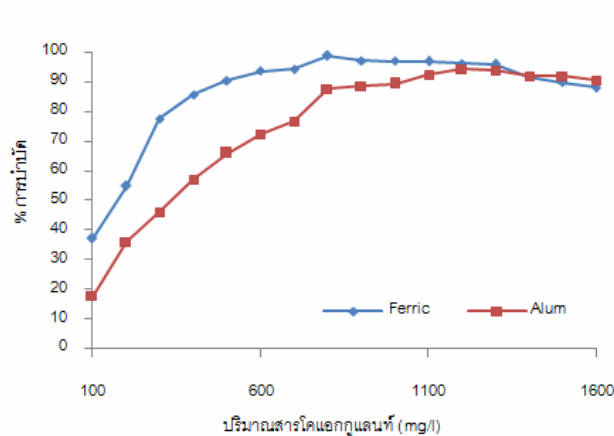


(ข)

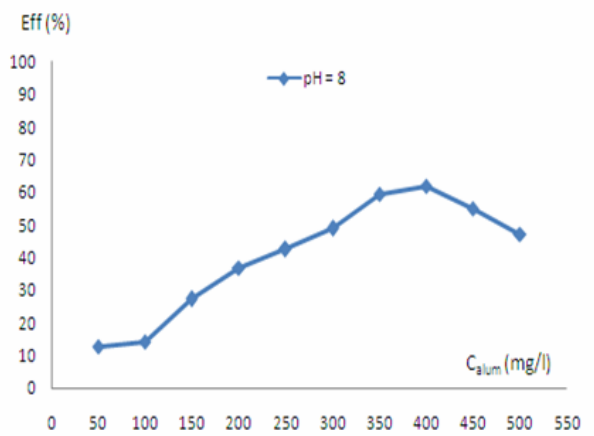
รูปที่ 13 แสดงตัวอย่างลักษณะฟลอคของสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ ดังภาพ ก และ ข ตามลำดับ ในวิธีจารีต

- การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS ด้วยสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์

โดยผลการทดลองแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ในช่วงความเข้มข้น 0.1-1.6 กรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 14



(ก)



(ข)

รูปที่ 14 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม (ก) และน้ำมันเครื่อง (ข) กับความเข้มข้นสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์

จากรูป 14 ก พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด SDS ด้วยสารส้มให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 1.2 กรัมต่อลิตร ที่ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด 94.26 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เฟอร์ริกคลอไรด์ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเข้มข้น 0.8 กรัมต่อลิตร ที่ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 5 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัด 98.84 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถแบ่งช่วงของการเปลี่ยนแปลงได้ 2 ช่วง ได้แก่

- ช่วงที่ 1 ที่ค่าความเข้มข้นสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ เท่ากับ 0.1-1.2 และ 0.1-0.8 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์เพิ่มขึ้นเพื่อให้เพียงพอสำหรับการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมัน
- ช่วงที่ 2 ที่ค่าความเข้มข้นสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ 1.2-1.6 และ 0.8-1.6 กรัมต่อลิตร ซึ่งประสิทธิภาพมีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากการเติมสารโคแอกกูแลนต์ที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพขึ้นมาใหม่ (Restabilization or Charge reversible) ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของการบำบัดมีแนวโน้มที่ลดลง

โดยค่า pH และปริมาณสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ที่มีความเหมาะสมในการให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดสรุปดังตารางที่ 3

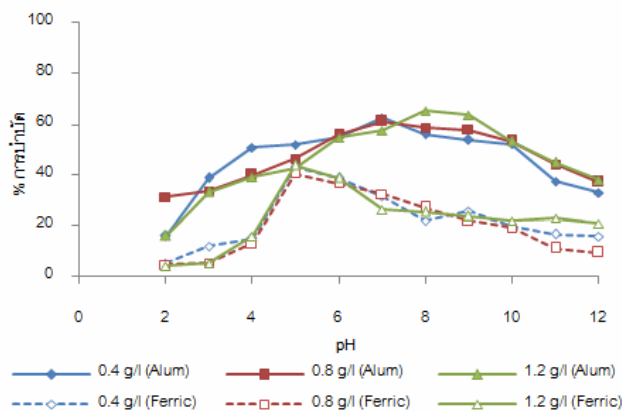
**ตารางที่ 3** ตารางสรุปผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์

| สารลดแรงตึงผิว | โคแอกกูแลนต์    | pH<br>(เริ่มต้น) | ปริมาณ<br>(g/l) | ประสิทธิภาพ<br>(%) | pH<br>(สุดท้าย) |
|----------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| SDS            | สารส้ม          | 7                | 1200            | 94.26              | 6.52            |
|                | เฟอร์ริกคลอไรด์ | 5                | 800             | 98.84              | 2.46            |

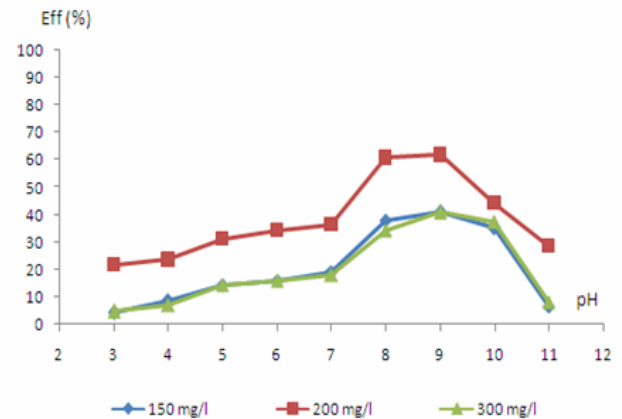
ในการศึกษาความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS (ดังรูปที่ 14 ข) โดยประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดเท่ากับ 61.82 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 0.4 กรัมต่อลิตร แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงกลไกการบำบัดได้ 2 ช่วง เหมือนกับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มร่วมกับสารลดแรงตึงผิว

- การศึกษาค่า pH เริ่มต้นที่มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด CTAB ด้วยสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์

โดยผลการทดลองแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับการเปลี่ยนแปลงค่า pH เริ่มต้นในช่วง 2-12 สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อน CTAB ด้วยสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 15



(ก)



(ข)

รูปที่ 15 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับค่า pH เริ่มต้นในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม (ก) และน้ำมันเครื่อง (ข) ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB ด้วยสารส้มและเฟอริกคลอไรด์

จากรูปที่ 15 ก พบว่าการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB ด้วยสารส้มที่ค่าความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 7 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 62.36 เปอร์เซ็นต์, 0.8 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 7 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 60.94 เปอร์เซ็นต์ และ 1.2 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 7 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 65.19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB ด้วยเฟอริกคลอไรด์ สำหรับที่ความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 5 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 43.16 เปอร์เซ็นต์, 0.8 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 5 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 40.49 เปอร์เซ็นต์ และ 1.2 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 5 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด 43.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการบำบัดประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่

- ปริมาณความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ พบว่าปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ที่ 0.4, 0.8 และ 1.2 กรัมต่อลิตร ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้อยมากเนื่องจากตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด CTAB ทำให้บนพื้นผิวของหยดน้ำมันถูกดูดซับด้วยโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว CTAB มีประจุเป็นบวก ทำให้เมื่อใช้สารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ที่มีประจุเป็นบวกในกระบวนการโคแอกกูเลชันทำให้สารโคแอกกูแลนต์ทั้ง 2 ชนิดไม่สามารถเกิดการทำลายเสถียรภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากมีประจุบวกเหมือนกัน
- ค่า pH เริ่มต้นพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เริ่มต้นเพิ่มจาก 2-7 และ 2-5 ในสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อค่า pH เริ่มต้นสูงขึ้นส่งผลทำให้ประจุบวกที่ดูดซับบนพื้นผิวของหยดน้ำมัน และในสารละลายลดลง ทำให้หยดน้ำมันมีเสถียรภาพลดลงสามารถเคลื่อนที่เข้าใกล้กันได้มากขึ้น และมีความสามารถเกิดฟ

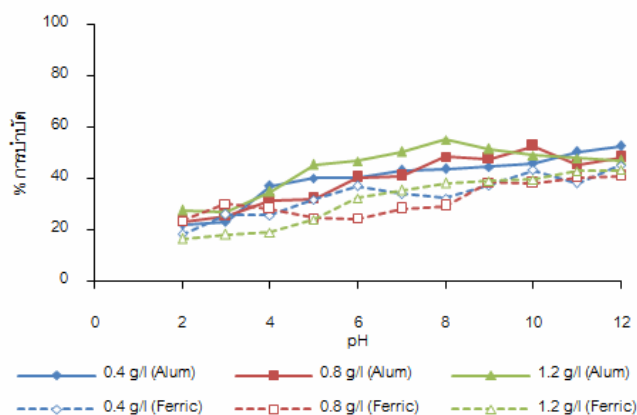
ลือกขึ้นได้บ้างเล็กน้อยส่งผลทำให้ประสิทธิภาพมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 และ 5 สำหรับสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ตามลำดับ ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้หยดน้ำมันเกิดเสถียรภาพต่ำที่สุด และเมื่อค่า pH เริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 7-12 และ 5-12 ในสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ ตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากค่า pH เริ่มต้นเป็นด่างทำให้ประจุลบ ( $\text{OH}^-$ ) เกิดการดูดซับบนพื้นผิวของหยดน้ำมัน และอยู่ในสารละลาย ทำให้ปริมาณสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ไม่เพียงพอที่จะทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมัน รวมทั้งอาจส่งผลให้หยดน้ำมันและฟล็อกเกิดเสถียรภาพขึ้นมาใหม่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงตามค่า pH เริ่มต้นที่เพิ่มสูงขึ้น (ชูลีกร, 2547)

- ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของสารส้มมีค่าสูงกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเฟอริกคลอไรด์ เนื่องจากในกระบวนการโคแอกกูเลชันสารส้มใช้ระยะเวลาในการแยกของฟล็อกที่เกิดขึ้นนานกว่าเป็นผลเนื่องจากค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตี (EN) หรือความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนของ  $\text{Al}^{3+}$  (EN=1.61) ในสารส้มซึ่งมีค่าต่ำกว่า  $\text{Fe}^{3+}$  (EN=1.83) ในเฟอริกคลอไรด์ ทำให้ฟล็อกที่เกิดจากสารส้มเกิดได้ช้ากว่า ฟล็อกที่เกิดจากเฟอริกคลอไรด์ทำให้มีโอกาสเกิดการดูดซับกับหยดน้ำมันขนาดเล็กในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB ได้ดีกว่าฟล็อกที่เกิดจาก เฟอริกคลอไรด์ซึ่งมีขนาดใหญ่เกิดการแยกได้เร็วกว่า (McNaught และ Wilkinson, 1997)

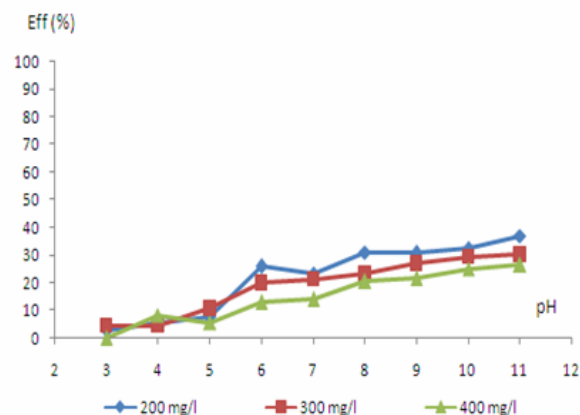
ในการศึกษาความเข้มข้นของสารส้ม และค่า pH ที่เหมาะสมการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB (ดังรูปที่ 15 ข) โดยประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดเท่ากับ 41 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 0.15 กรัมต่อลิตร, 62 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 0.2 กรัมต่อลิตร และ 40 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 0.3 กรัมต่อลิตร โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ปริมาณสารส้ม และค่า pH ดังที่กล่าวข้างต้น

- การศึกษาค่า pH เริ่มต้นที่มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิด Tween 20 ด้วยสารส้ม และเฟริกคลอไรด์

โดยผลการทดลองแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับการเปลี่ยนแปลงค่า pH เริ่มต้นในช่วง 2-12 สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 ด้วยสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 16



(ก)



(ข)

รูปที่ 16 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบดกับค่า pH เริ่มต้นในการบดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม (ก) และน้ำมันเครื่อง (ข) ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 ด้วยสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์

จากรูปที่ 16 ก พบว่าการบดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 ด้วยสารส้มที่ค่าความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 8 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบด 43.59 เปอร์เซ็นต์, 0.8 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 8 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบด 48.57 เปอร์เซ็นต์ และ 1.2 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 8 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบด 55.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สำหรับการบดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 ด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ค่าความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 12 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบด 45.04 เปอร์เซ็นต์, 0.8 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 12 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบด 40.83 เปอร์เซ็นต์ และ 1.2 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 12 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบด 43.29 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการบดประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่

- ปริมาณความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ พบว่าปริมาณความเข้มข้นสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ 0.4, 0.8 และ 1.2 กรัมต่อลิตร ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบดน้อยมากเนื่องจากตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 ทำให้ไม่มีประจุบนพื้นผิวของหยดน้ำมัน ซึ่งถูกดูดซับด้วยโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวชนิดดังกล่าว ทำให้เมื่อใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ที่มีประจุเป็นบวกในกระบวนการโคแอกกูเลชันไม่สามารถเกิดการทำลายเสถียรภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- ค่า pH เริ่มต้น พบว่าแนวโน้มประสิทธิภาพของสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เริ่มต้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อค่า pH เริ่มต้นต่ำในสภาวะกรดส่งผลทำให้ประจุบวก ( $H^+$ ) เกิดการดูดซับบนพื้นผิวของหยดน้ำมัน และอยู่ในสารละลายทำให้หยดน้ำมันมีความเสถียรภาพทำให้ไม่สามารถเกิดฟล็อกกับสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ได้ แต่เมื่อค่า pH เริ่มต้น

เพิ่มขึ้นในสภาวะที่เป็นด่างทำให้ประจุลบ ( $\text{OH}^-$ ) เกิดการดูดซับบนพื้นผิวของหยดน้ำมันและอยู่ในสารละลายทำให้สารส้ม และเฟอริกคลอไรด์มีความสามารถทำลายเสถียรภาพหยดน้ำมันทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น (Al-Shamran et al., 2002)

- ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดด้วยสารส้ม มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดด้วยเฟอริกคลอไรด์ เนื่องจากการกระบวนกรโคแอกกูเลชันของสารส้มใช้ระยะเวลาในการแยกของฟล็อกที่เกิดขึ้นนานกว่าฟล็อกที่เกิดจากเฟอริกคลอไรด์ ส่งผลให้ฟล็อกมีโอกาสมัธส และการดูดซับกับหยดน้ำมันได้ดีกว่าฟล็อกที่เกิดจากเฟอริกคลอไรด์ซึ่งคล้ายกับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB

ในการศึกษาความเข้มข้นของสารส้ม และค่า pH ที่เหมาะสมการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 (ดังรูปที่ 16 ข) โดยประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดเท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 0.2 กรัมต่อลิตร, 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 0.3 กรัมต่อลิตร และ 26 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารส้ม 0.4 กรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่า การเติมสารส้มไม่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเช่นเดียวกันกับการศึกษาการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มร่วมกับสารลดแรงตึงผิว โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณสารส้ม และค่า pH ดังที่กล่าวข้างต้น

โดยตารางที่ 4 เป็นตารางสรุปการศึกษาค่า pH เริ่มต้นและความเข้มข้นที่มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, CTAB และ Tween 20 ด้วยสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ จากตารางแสดงให้เห็นว่าช่วงค่า pH เริ่มต้นที่มีความเหมาะสมสำหรับสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์เท่ากับ 6-8 และ 5-6 ตามลำดับ และค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.4-1.2 กรัมต่อลิตร และมีผลอย่างมากต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด โดยที่เฟอริกคลอไรด์จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าสารส้มเนื่องจากเฟอริกคลอไรด์มีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีที่สูงกว่าสารส้ม แต่สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB และ Tween 20 การเพิ่มความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์จาก 0.4-1.2 กรัมต่อลิตร มีผลน้อยมากต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด นอกจากนี้การใช้สารส้มในการทำลายเสถียรภาพและการสร้างฟล็อก พบว่าให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าการใช้เฟอริกคลอไรด์เป็นผลเนื่องจากฟล็อกที่เกิดจากสารส้มจะใช้เวลาในการเกิดฟล็อกที่นานกว่าฟล็อกเฟอริกคลอไรด์ทำให้ฟล็อกของสารส้มมีโอกาสในการมัธสและดูดซับหยดน้ำมันได้ดีกว่า

**ตารางที่ 4** ตารางสรุปการศึกษาค่า pH เริ่มต้นและสุดท้ายที่มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับ SDS, CTAB และ Tween 20 ด้วยสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์

| สารลดแรงตึงผิว | โคแอกกูแลนต์  | ปริมาณ (g/l) | pH (เริ่มต้น) | ประสิทธิภาพ (%) | pH (สุดท้าย) |
|----------------|---------------|--------------|---------------|-----------------|--------------|
| SDS            | สารส้ม        | 0.4          | 6             | 65.77           | 4.15         |
|                |               | 0.8          | 7             | 87.70           | 3.96         |
|                |               | 1.2          | 7             | 94.26           | 3.65         |
|                | เฟอริกคลอไรด์ | 0.4          | 5             | 85.67           | 2.69         |
|                |               | 0.8          | 5             | 98.91           | 2.46         |
|                |               | 1.2          | 6             | 97.02           | 2.25         |
| CTAB           | สารส้ม        | 0.4          | 7             | 62.36           | 4.23         |
|                |               | 0.8          | 7             | 60.94           | 4.06         |
|                |               | 1.2          | 8             | 65.19           | 3.82         |
|                | เฟอริกคลอไรด์ | 0.4          | 5             | 43.16           | 3.01         |
|                |               | 0.8          | 5             | 40.49           | 2.55         |
|                |               | 1.2          | 5             | 43.75           | 2.34         |
| Tween 20       | สารส้ม        | 0.4          | 8             | 43.59           | 4.41         |
|                |               | 0.8          | 8             | 48.57           | 4.22         |
|                |               | 1.2          | 8             | 55.09           | 3.70         |
|                | เฟอริกคลอไรด์ | 0.4          | 12            | 45.04           | 8.47         |
|                |               | 0.8          | 12            | 40.83           | 5.48         |
|                |               | 1.2          | 12            | 43.29           | 2.52         |

ดังนั้น การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดในหัวข้อต่อไปสำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS เลือกใช้ความเข้มข้นของสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์เท่ากับ 0.2-0.8 กรัมต่อลิตร ที่ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 และ 5 ตามลำดับ ตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB จะทำการศึกษาเฉพาะความเข้มข้นสารของสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ 0.4 กรัมต่อลิตร ที่ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 และ 5 ตามลำดับ และตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 จะทำการศึกษาเฉพาะความเข้มข้นสารของสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ 0.4 กรัมต่อลิตร ที่ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 8 และ 5 ตามลำดับ (เพื่อสะดวกในการเตรียมน้ำเสียตัวอย่าง) โดยในหัวข้อต่อไปจะเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิดด้วยกระบวนการทางเคมีร่วมกับการประยุกต์ใช้เกลือ (NaCl) กับโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุ (Nonionic polymer) ในกระบวนการบำบัดทางเคมี

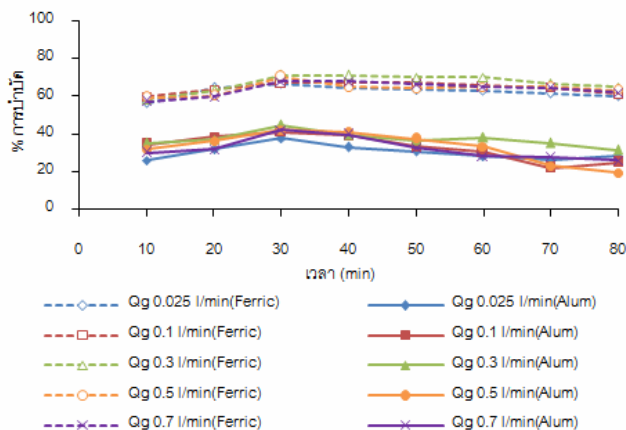
## 5. ผลการทดลอง

### การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ด้วยกระบวนการโมดิฟายด์ อินดิวิจแอโรฟเลชัน (Modified Induce Air Floatation, MIAF)

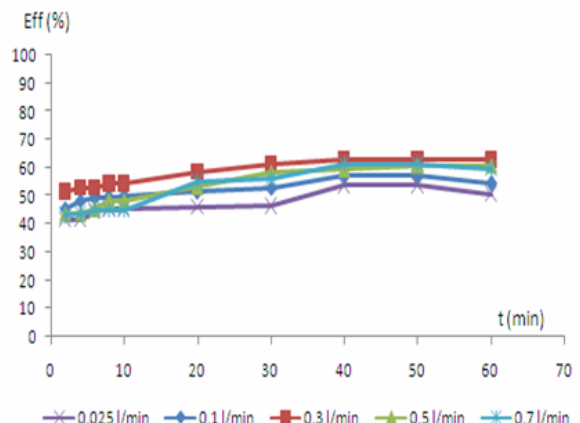
ในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาหาเวลาการบำบัด และอัตราการไหลอากาศ ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ SDS, CTAB และ Tween 20 ด้วยกระบวนการ MIAF สำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลอากาศในช่วง 0.025-0.7 ลิตรต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างเวลา การบำบัดในช่วง 10-80 นาที และประยุกต์ใช้ปริมาณสารส้ม และ เฟอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 กรัมต่อลิตร ในกรณีทำการทดลองกับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB และ Tween 20 ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลอากาศในช่วง 0.025-0.7 ลิตรต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลาการบำบัดในช่วง 10-80 นาที และใช้ปริมาณสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร

- การศึกษาอัตราการไหลอากาศที่เหมาะสมต่อการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ SDS, CTAB และ Tween 20 ด้วยกระบวนการ MIAF

รูปที่ 17, 18 และ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับเวลาการบำบัดที่อัตราการไหลอากาศต่างๆ ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

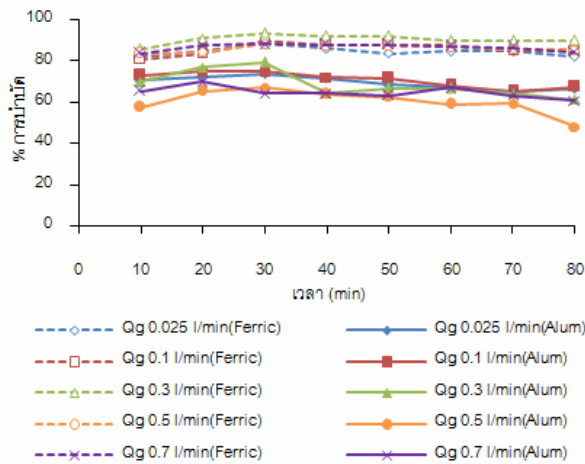


(ก)

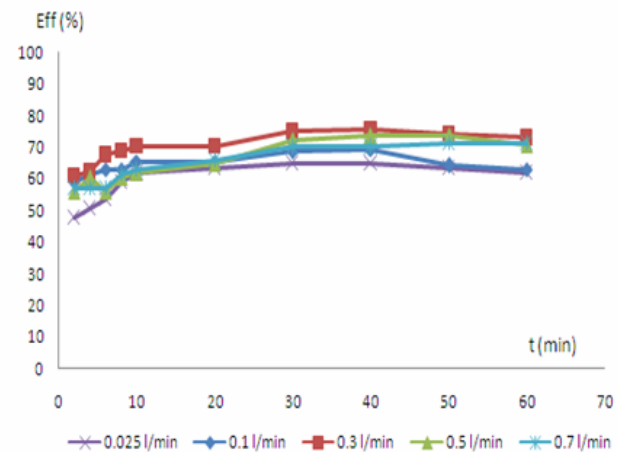


(ข)

รูปที่ 17 ก และข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับเวลาการบำบัด ที่อัตราการไหลอากาศ ต่างๆในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ 0.2 กรัมต่อลิตร

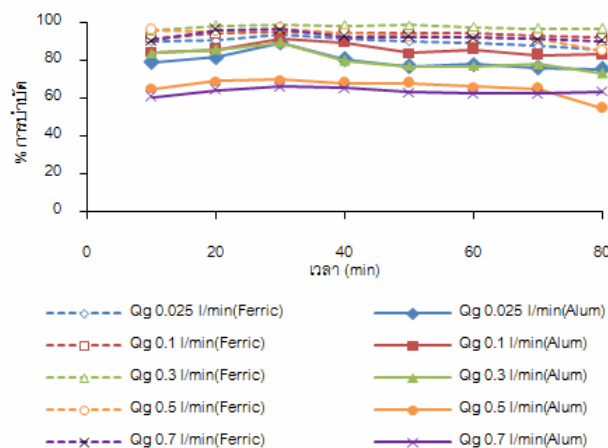


(ก)

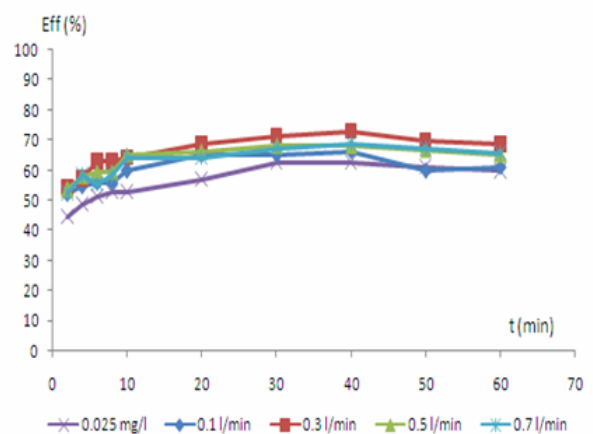


(ข)

รูปที่ 18 ก และข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับเวลาการบำบัด ที่อัตราการไหลอากาศต่างๆ ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ 0.4 กรัมต่อลิตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 19 ก และข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับเวลาการบำบัด ที่อัตราการไหลอากาศต่างๆ ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ 0.8 กรัมต่อลิตร

จากการใช้ปริมาณสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ เท่ากับ 0.2 กรัมต่อลิตร (รูปที่ 17 ก) พบว่าการบำบัดกระบวนการ MIAF ด้วยสารส้มให้ประสิทธิภาพสูงสุด 44.7 เปอร์เซ็นต์ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที ในขณะที่เฟอร์ริกคลอไรด์ให้ประสิทธิภาพสูงสุด 71.28 เปอร์เซ็นต์ที่ อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที จากรูปที่ 17 ข สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้ม 0.2 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด 63 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที

จากรูปที่ 18 ก การใช้ปริมาณสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ 0.4 กรัมต่อลิตร พบว่าการบำบัด กระบวนการ MIAF ด้วยสารส้มให้ประสิทธิภาพสูงสุด 79.73 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตร ต่อนาที ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที และเฟอร์ริกคลอไรด์ให้ประสิทธิภาพสูงสุด 93.67 เปอร์เซ็นต์ ที่ อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที จากรูปที่ 18 ข สำหรับการบำบัด ตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้ม 0.4 กรัมต่อลิตร ให้ ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด 76 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาใน การบำบัด 30 นาที

จากรูปที่ 19 ก การใช้ปริมาณสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ เท่ากับ 0.8 กรัมต่อลิตร พบว่าการบำบัด กระบวนการ MIAF ด้วยสารส้มให้ประสิทธิภาพสูงสุด 89.38 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตร ต่อนาที ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที และเฟอร์ริกคลอไรด์ให้ประสิทธิภาพสูงสุด 98.93 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที จากรูปที่ 19 ข สำหรับการบำบัด ตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ด้วยสารส้ม 0.8 กรัมต่อลิตร ให้ ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด 73 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาใน การบำบัด 30 นาที

จากผลการทดลองด้านบนกล่าวได้ว่าที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที และระยะเวลาการทำ ให้ลอยนาน 30 นาที ให้ประสิทธิภาพสูงสุดทุกๆชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ โดยปัจจัย ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดประกอบด้วย 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่

- อัตราการไหลอากาศ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้นจาก 0.025-0.3 ลิตรต่อนาที เป็นผลเนื่องมาจากปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลอากาศ ที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟองอากาศมีโอกาสชนและสัมผัสกับหยดน้ำมันได้เพิ่มสูงขึ้น และประสิทธิภาพ ลดลงเมื่ออัตราการไหลอากาศเพิ่มขึ้นจาก 0.3-0.7 ลิตรต่อนาที เนื่องจากอัตราการไหลอากาศที่ สูงเกินไปทำให้ปริมาณฟองอากาศ ขนาดของฟองอากาศเพิ่มขึ้น และความเร็วของฟองอากาศ เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลให้เกิดความปั่นป่วนและผลเสียการชนและสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันกับ ฟองอากาศ และระยะเวลาที่ฟองอากาศอยู่ในคอลัมน์ลดลง
- ระยะเวลาการเติมอากาศ พบว่าการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการบำบัดเกิดขึ้นอย่างไม่ชัดเจน โดยจะสูงขึ้นเมื่อเวลาในการทำให้อยเพิ่มสูงขึ้นจาก 10-30 นาที ซึ่งอยู่ในช่วง Free surface Zone และ Attachment Zone จากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดมีแนวโน้มคงที่ และลดลงเมื่อเวลาใน การทำให้อย เพิ่มขึ้น 30-50 นาที ซึ่งอยู่ในช่วง Breaking Zone เนื่องจากการทำให้อยที่นาน เกินไปทำให้เกิดการปั่นป่วนทำให้ชั้นน้ำมันและฟล็อกที่ถูกแยกด้านบนแตกตกกลับมาใหม่
- ปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ พบว่าเมื่อปริมาณสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์เพิ่มขึ้นจากค่าความ เข้มข้น 0.2, 0.4 ถึง 0.8 กรัมต่อลิตร ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเมื่อปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์มีมาก เพียงพอในการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมัน เกิดฟล็อกที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นตามปริมาณสาร โคแอกกูแลนต์ที่เพิ่มขึ้น

- ชนิดของสารโคเอกกูแลนท์ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของเพอร์ริกคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงกว่าการเมื่อเปรียบเทียบกับบำบัดด้วยสารส้ม เนื่องจากฟล็อกที่เกิดขึ้นจากเพอร์ริกคลอไรด์มีขนาดของฟล็อกที่ใหญ่และมีความหนาแน่นของฟล็อกสูงกว่าฟล็อกที่เกิดจากสารส้มซึ่งมีความชอบน้ำสูง ซึ่งทำให้ฟล็อกที่เกิดจากเพอร์ริกคลอไรด์มีความเหมาะสมต่อการชนและการเกาะติดระหว่างฟล็อกกับฟองอากาศที่เกิดขึ้นในการบำบัดด้วยกระบวนการ MIAF

ดังนั้นเมื่อนำกระบวนการ MIAF ที่ความเข้มข้นต่างๆที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาการทำให้ลอยนาน 30 นาที มาทำการเปรียบเทียบกับวิธีจาร์เทสต์ ในด้านประสิทธิภาพการบำบัด ระยะเวลาการบำบัด และค่าความเร็วแกรเดียนท์ (G) ซึ่งเป็นค่า  $G_{avg}$  เฉลี่ยจากกระบวนการกวนเร็ว และกวนช้า สำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS แสดงได้ดังตารางที่ 5

**ตารางที่ 5** ตารางแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด และค่าความเร็วแกรเดียนท์ (G) ระหว่างกระบวนการ MIAF ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาการทำให้ลอย 30 นาที กับวิธีจาร์เทสต์ สำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS

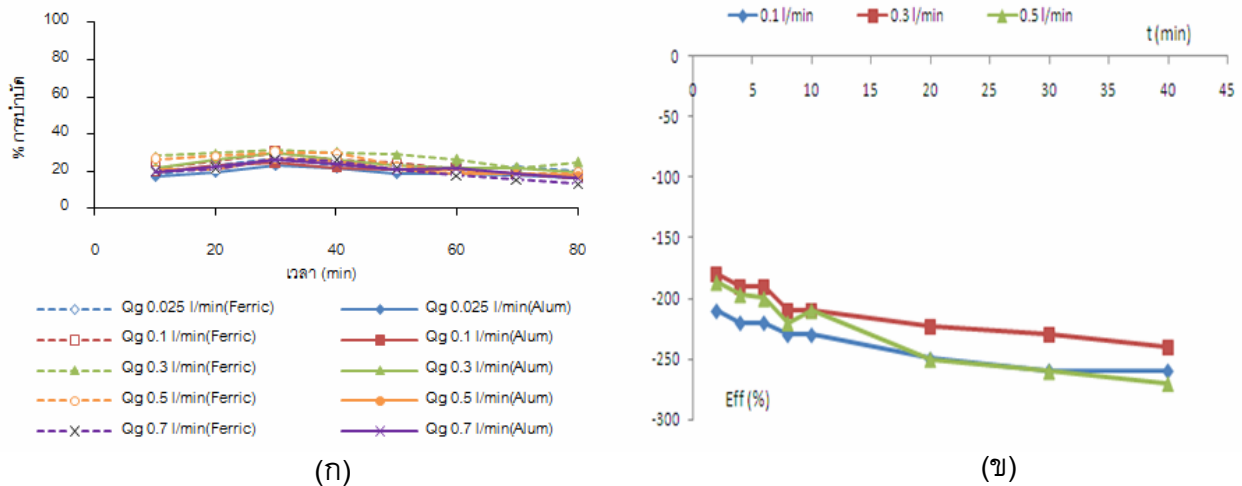
| สารโคเอกกูแลนท์ | ปริมาณ (g/l) | การบำบัด (%) MIAF | G ( $s^{-1}$ ) | การบำบัด (%) จาร์เทสต์ | $G_{avg}$ ( $s^{-1}$ ) |
|-----------------|--------------|-------------------|----------------|------------------------|------------------------|
| สารส้ม          | 0.2          | 44.70             | 173.59         | 36.10                  | 35.03                  |
|                 | 0.4          | 79.73             | 173.59         | 65.77                  | 35.03                  |
|                 | 0.8          | 89.38             | 173.59         | 87.7                   | 35.03                  |
| เพอร์ริกคลอไรด์ | 0.2          | 71.28             | 173.59         | 54.96                  | 35.03                  |
|                 | 0.4          | 93.67             | 173.59         | 85.67                  | 35.03                  |
|                 | 0.8          | 98.93             | 173.59         | 98.91                  | 35.03                  |

จากตารางที่ 5 ตารางแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด และค่าความเร็วแกรเดียนท์ (G) ระหว่างกระบวนการ MIAF กับวิธีจาร์เทสต์แสดงให้เห็นว่า

- ประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากกระบวนการ MIAF ของตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS สูงกว่าวิธีจาร์เทสต์
- ระยะเวลาในการบำบัดจากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ MIAF มีประสิทธิภาพด้านระยะเวลาในการบำบัดสูงกว่าการบำบัดด้วยวิธีจาร์เทสต์ โดยกระบวนการ MIAF ใช้ระยะเวลา (30 นาที) ในการบำบัดสั้นกว่าวิธีจาร์เทสต์ (60 นาที) แต่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงกว่า
- ค่า G ของกระบวนการ MIAF มีค่าเท่ากับ  $173.59 s^{-1}$  ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า  $G_{avg}$  ที่ได้จากวิธีจาร์เทสต์ มีค่าเท่ากับ  $35.03 s^{-1}$  และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า G ของกระบวนการ MIAF กับค่า G ของวิธีจาร์เทสต์ในขั้นตอนกวนเร็ว ( $G=185.82$ ) และกวนช้า ( $G=30.53$ ) พบว่าค่า G ของกระบวนการ MIAF มีค่าใกล้เคียงกับค่า G ของขั้นตอนกวนเร็ว แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ

MIAF มีประสิทธิภาพในด้านการกวนผสมดีใกล้เคียงกับวิธีจาร์เทสต์ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกวนผสมสารเคมี และกระบวนการแยกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รูปที่ 20 ก และข แสดงผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับระยะเวลาการบำบัด ที่อัตราการไหลอากาศต่างๆในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม (ก) และน้ำมันเครื่อง (ข) ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB ด้วยสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 20 ก และข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับระยะเวลาการบำบัด ที่อัตราการไหลอากาศต่างๆ ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB ด้วย สารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 20 ก พบว่าการบำบัดด้วยกระบวนการ MIAF ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที ด้วยสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ให้ประสิทธิภาพสูงสุด 29.54 และ 37.83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากรูปที่ 20 ข สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่อง ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB โดยใช้สารส้ม 0.2 กรัมต่อลิตร ร่วมกับกระบวนการ MIAF จากการทดลองพบว่าส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงต่ำกว่าการบำบัดด้วยกระบวนการ IAF และกระบวนการตกตะกอน

โดยสามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการบำบัดได้ 3 ช่วงอย่างไม่ชัดเจน ได้แก่ 1) Free surface zone 2) Attachment zone 3) Breaking Zone เหมือนที่พบในกระบวนการ IAF โดยเมื่อนำกระบวนการ MIAF มาทำการเปรียบเทียบกับวิธีจาร์เทสต์ ในด้านประสิทธิภาพการบำบัด ระยะเวลา และค่าความเร็วแกรเดียนท์ (G) สำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6

**ตารางที่ 6** ตารางแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด และค่าความเร็วแกรเดียนท์ (G) ระหว่างกระบวนการ MIAF และวิธีจาร์เทสต์ สำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับ สารลดแรงตึงผิว CTAB

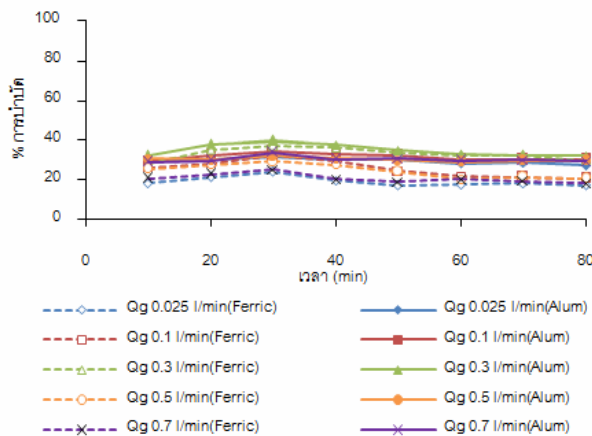
| สารโคแอกกูแลนต์ | ปริมาณ (g/l) | การบำบัด (%) MIAF | G (s <sup>-1</sup> ) | การบำบัด (%) จาร์เทสต์ | G <sub>avg</sub> (s <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|--------------|-------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------|
| สารส้ม          | 0.4          | 29.54             | 173.59               | 62.36                  | 35.03                               |
| เฟอริกคลอไรด์   | 0.4          | 31.31             | 173.59               | 43.16                  | 35.03                               |

จากตารางที่ 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด และค่า G แสดงให้เห็นว่า

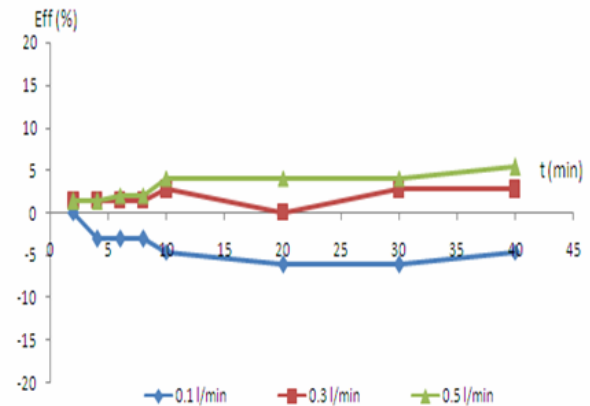
- ประสิทธิภาพการบำบัดกระบวนการ MIAF มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ต่ำกว่าวิธีจาร์เทสต์ เป็นผลเนื่องมาจากการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB ด้วยสารส้มและเฟอริกคลอไรด์ซึ่งส่งผลให้เกิดฟล็อกของสารส้มและเฟอริกคลอไรด์ที่มีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพน้อยมาก ดังนั้นแทนที่ฟองอากาศจะทำหน้าที่ในการแยกอนุภาคฟล็อกออกจากตัวอย่างน้ำเสีย แต่กลับจะส่งผลเสียโดยการทำให้เกิดการกวนผสมและการแตกตัวของฟล็อกแทนซึ่งส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัด ซึ่งต่างจากวิธีจาร์เทสต์ที่เมื่อสารส้มและเฟอริกคลอไรด์ในการบำบัดทำให้เกิดฟล็อกที่ไม่มีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพมากนัก แต่ยังมีช่วงการตกตะกอนเป็นช่วงที่อนุภาคฟล็อกและน้ำมันสามารถแยกได้เองตามธรรมชาติ
- ระยะเวลาการบำบัดพบว่าวิธีจาร์เทสต์จะใช้เวลาการบำบัดนานกว่า และให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงกว่ากระบวนการ MIAF
- ค่า G (เหมือนในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS)

นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบกระบวนการ MIAF กับกระบวนการ IAF พบว่ากระบวนการ MIAF ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงกว่ากระบวนการ IAF (24.33 เปอร์เซ็นต์) ทั้งในการใช้สารส้มและเฟอริกคลอไรด์ เนื่องจากการเติมสารโคแอกกูแลนต์ส่งผลทำให้เกิดอนุภาคของฟล็อกที่ใหญ่กว่าหยดน้ำมันปกติส่งผลทำให้ความสามารถในการชนและการเกาะติดเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น

รูปที่ 21 ก และ ข แสดงผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับระยะเวลาการบำบัด ที่อัตราการไหลอากาศต่างๆ ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 ด้วยสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 21 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การบำบัดกับเวลาการบำบัด ที่อัตราการไหลอากาศต่างๆ ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 ด้วยสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 21 ก พบว่าการบำบัดด้วยกระบวนการ MIAF ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาการทำให้อยู่ 30 นาที ด้วยสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ให้ประสิทธิภาพสูงสุด 39.85 และ 37.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยสามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการบำบัดได้ 3 ช่วงอย่างไม่ชัดเจน ได้แก่ 1) Free surface zone 2) Attachment zone 3) Breaking Zone เหมือนที่พบในกระบวนการ IAF จากรูปที่ 21 ข สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 โดยใช้สารส้ม 0.4 กรัมต่อลิตร ร่วมกับกระบวนการ MIAF จากการทดลองพบว่าไม่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด และให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงต่ำกว่าการบำบัดด้วยกระบวนการ IAF และกระบวนการตกตะกอน

โดยเมื่อนำกระบวนการ MIAF มาทำการเปรียบเทียบกับวิธีจาร์เทสต์ ในด้านประสิทธิภาพการบำบัด ระยะเวลาการบำบัด และค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G) สำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 แสดงได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตารางแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด และค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G) ระหว่างกระบวนการ MIAF และวิธีจาร์เทสต์ สำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20

| สารโคแอกกูแลนต์ | ปริมาณ (g/l) | การบำบัด (%) MIAF | G (s <sup>-1</sup> ) | การบำบัด (%) จาร์เทสต์ | G (s <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|--------------|-------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| สารส้ม          | 0.4          | 39.85             | 173.59               | 43.59                  | 35.03                |
| เฟอร์ริกคลอไรด์ | 0.4          | 37.25             | 173.59               | 45.04                  | 35.03                |

จากตารางที่ 7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด และค่า G แสดงให้เห็นว่า

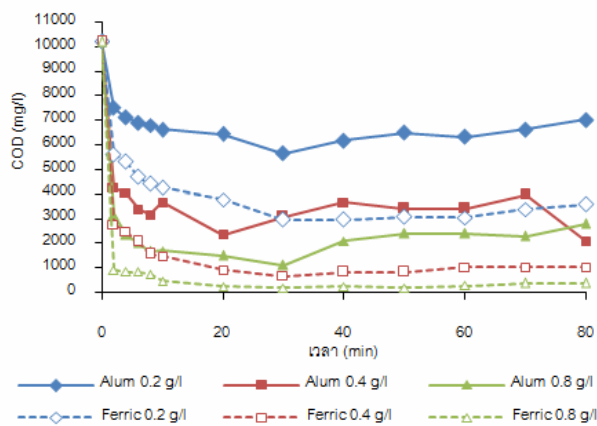
- ประสิทธิภาพของวิธีจาร์เทสต์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่ากระบวนการ MIAF เล็กน้อยเป็น ซึ่งเป็นเหตุผลเช่นเดียวกันกับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB
- ระยะเวลาการบำบัดพบว่าวิธีจาร์เทสต์จะใช้เวลานานกว่า แต่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงกว่ากระบวนการ MIAF
- ค่า G (เหมือนในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS)

ทั้งนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างกระบวนการ MIAF กับ IAF (48.19 เปอร์เซ็นต์) พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของกระบวนการ IAF มีแนวโน้มที่สูงกว่าเนื่องจากการเติมสารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ส่งผลทำให้เกิดการดูดซับของไอออนบวกของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al^{3+}$ ) และเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ดูดซับบนพื้นผิวของหยดน้ำมันส่งผลต่อการเกิดเสถียรภาพระหว่างหยดน้ำมันกับหยดน้ำมันและหยดน้ำมันกับฟองอากาศสูงเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการชนและการเกาะติดลดลง

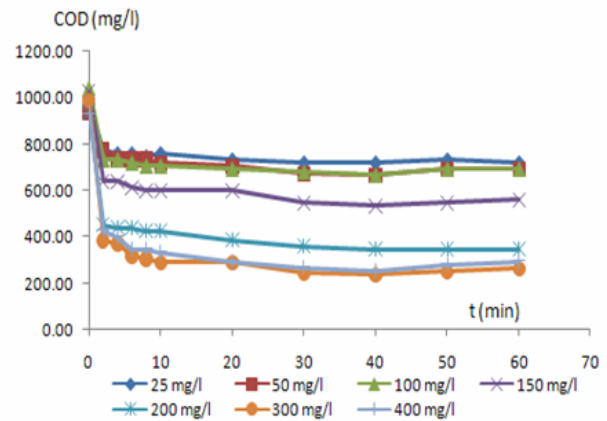
ดังนั้นสามารถกล่าวโดยสรุปว่าประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการ MIAF จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดเมื่อเลือกใช้ชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่มีความเหมาะสมในการสร้างฟล็อกที่มีความสามารถในการสัมผัสกับฟองอากาศเพื่อเกิดการแยก ภายในระยะเวลาในการเติมอากาศที่เหมาะสม นอกจากนี้ ข้อดีอีกประการหนึ่งของกระบวนการ MIAF ที่เหนือกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันคือมีความเป็นไปได้ที่กระบวนการ MIAF จะใช้ปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์ในการบำบัดน้อยกว่าแต่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกัน ( $\% \text{การบำบัด}_{0.4 \text{ MIAF}} \approx \% \text{การบำบัด}_{0.8 \text{ Jar test}}$ ) และมีความสามารถในการกวนผสมที่ใกล้เคียงกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน ( $G_{\text{MIAF}} \approx G_{\text{Jar test}}$ )

- การศึกษาจลนศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ SDS, CTAB และ Tween 20 ด้วยกระบวนการ MIAF

เป็นการทดลองเพื่อศึกษากลไกการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ SDS, CTAB และ Tween 20 ด้วยกระบวนการ MIAF สำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาการบำบัด โดยทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเวลา 0-30 นาที ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที และปริมาณสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 กรัมต่อลิตร สำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB และ Tween 20 ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาการทำให้ลอย ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเวลา 0-30 นาที ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที และปริมาณสารส้ม และเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.4 กรัมต่อลิตร โดยรูปที่ 22 ก และ ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่า COD กับเวลาการบำบัด ที่ความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนต์ต่างๆ ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม และตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 22 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างค่า COD กับเวลาการบำบัด ที่ความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนต์ต่างๆ ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที

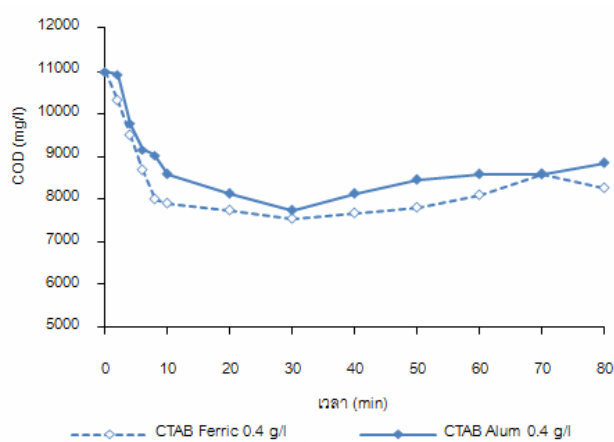
จากรูปที่ 22 ก และ ข พบว่ากลไกการบำบัดด้วยกระบวนการ MIAF เมื่อใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์สามารถแบ่งช่วงของการเปลี่ยนแปลงได้ 3 ช่วงหลัก

- ช่วงที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงค่า COD ลดลงอย่างรวดเร็วเกิดในช่วง 0-10 นาที ของการบำบัดด้วยสารส้มที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 กรัมต่อลิตร ทำให้ค่า COD ของตัวอย่างน้ำเสียลดลงจาก 10190.5-6607.29, 10190.5-3639.32 และ 10190.5-1672.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, และ 0.8 กรัมต่อลิตร ทำให้ค่า COD ลดลงจาก 10190.5-4243.68, 10190.5-1483.02 และ 10190.5-448.137 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงที่ 1 ปริมาณหยดน้ำมัน และปริมาณฟล็อกจากการทำลายเสถียรภาพด้วยสารโคแอกกูแลนต์ที่มีปริมาณมากทำให้ฟองอากาศมีโอกาที่จะเกิดการชนและเกาะติดเกิดขึ้นได้มาก ส่งผลทำให้ค่า COD ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงนี้
- ช่วงที่ 2 การเปลี่ยนแปลงค่า COD ลดลงอย่างช้าๆในช่วง 10-30 นาที ของการบำบัดด้วยสารส้มที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 กรัมต่อลิตร ทำให้ความเข้มข้นในการบำบัดลดลงจาก 6607.29-5635.36, 3639.32-3049.16 และ 1672.12-1081.96 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ สำหรับเฟอร์ริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 กรัมต่อลิตร ทำให้ความเข้มข้นในการบำบัดลดลงจาก 4243.68-2926.8, 1483.02-644.63 และ 448.13-149.379 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของหยดน้ำมันและปริมาณฟล็อกที่เกิดจากการทำลายเสถียรภาพด้วยสารโคแอกกูแลนต์ที่มีปริมาณน้อยลง เนื่องจากความสามารถในการบำบัดที่สูงมากในช่วงที่ 1 ส่งผลทำให้โอกาสเกิดการชนและการเกาะติดในช่วงที่ 2 เกิดได้น้อยลงส่งผลทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่า COD เกิดขึ้นได้ลดลงในช่วงที่ 2
- ช่วงที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่า COD เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นในช่วง 30-80 นาที ของการบำบัดด้วยสารส้มที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, และ 0.8 กรัมต่อลิตร ทำให้ค่า COD ในการบำบัดเพิ่มขึ้นจาก 5635.36-

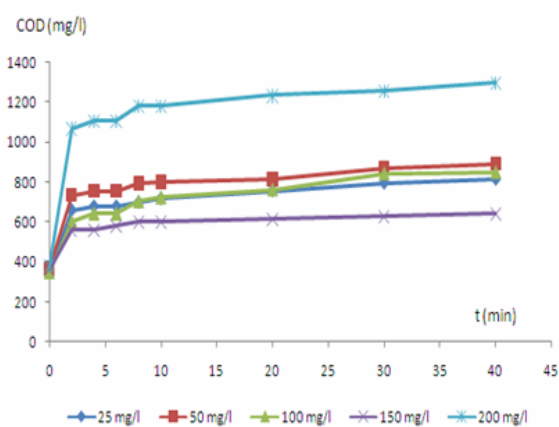
6995.95, 3049.16-3934.4 และ 1081.96-2754.08 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ สำหรับเฟอริกคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4 และ 0.8 กรัมต่อลิตร ทำให้ค่า COD ในการบำบัดเพิ่มขึ้นจาก 2926.8-3560.94, 644.63-991.47 และ 49.379-348.551 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากการเติมอากาศในกระบวนการบำบัดที่นานเกินไปจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง ดังสาเหตุที่กล่าวไว้ในขั้นต้น

จากการทดลองสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อกลไกการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS ได้แก่ 1) ระยะเวลาการเติมอากาศ โดยค่า COD ในการบำบัดจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2-10 นาที ของการบำบัด จากนั้นการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพจะลดลงอย่างช้าๆ ในช่วง 10-30 นาที 2) ชนิดของสารโคแอกกูเลชัน จะมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงของค่า COD โดยพบว่าเมื่อใช้เฟอริกคลอไรด์ในกระบวนการ MIAF จะให้อัตราการลดลงของค่า COD ที่สูงกว่าการใช้สารส้มในกระบวนการ MIAF ในปริมาณเท่ากัน 3) ความเข้มข้นของสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ โดยการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารโคแอกกูเลนต์จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น ตามปริมาณสารโคแอกกูเลนต์ที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 23 ก และ ข แสดงผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่า COD กับระยะเวลาการบำบัด ที่ความเข้มข้นสารโคแอกกูเลนต์ต่างๆ ของตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม (ก) และ น้ำมันเครื่อง (ข) ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที

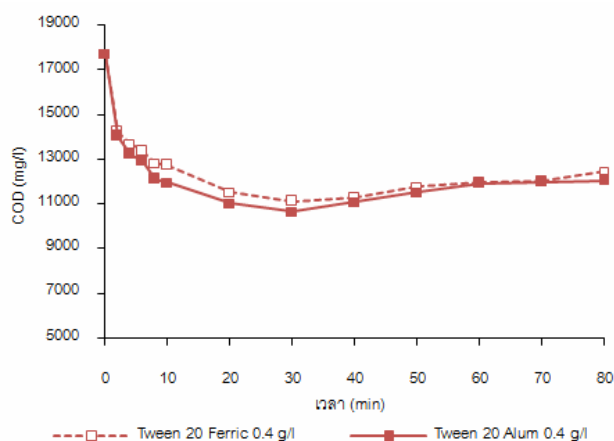


(ก)

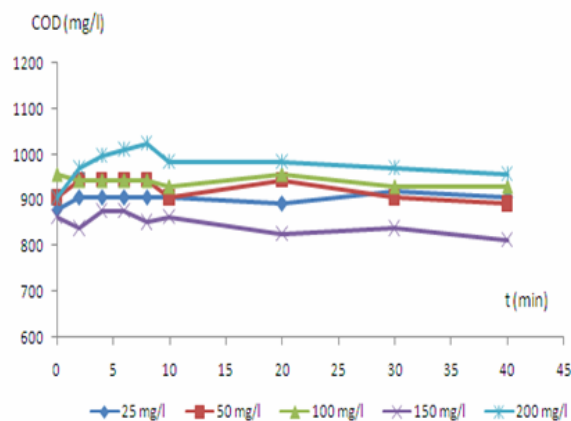


(ข)

รูปที่ 23 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างค่า COD กับเวลาการบำบัด ที่ความเข้มข้นสารโคแอกกูเลนต์ต่างๆ ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที



(ก)



(ข)

รูปที่ 24 ก และ ข ความสัมพันธ์ระหว่างค่า COD กับเวลาการบำบัด ที่ความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนท์  
ต่าง ๆ ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20  
ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 23 ก และ 24 ก พบว่ากลไกการบำบัดด้วยกระบวนการ MIAF สำหรับตัวอย่างน้ำเสีย  
ปนเปื้อนน้ำมันปาล์มร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB และ Tween 20 เมื่อใช้สารส้ม และเฟอริกคลอไรด์  
ยังคงสามารถแบ่งช่วงของการเปลี่ยนแปลงได้ 3 ช่วงหลัก ซึ่งช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงค่า COD ที่  
เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกับที่เกิดขึ้นในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS คือ 1)  
ช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า COD ลดลงอย่างรวดเร็ว 2) ช่วงการเปลี่ยนแปลงค่า COD ลดลงอย่างช้าๆ  
3) ช่วงการเปลี่ยนค่า COD มีแนวโน้มที่สูงขึ้น จากรูปที่ 23 ข และ 24 ข พบว่ากลไกการบำบัดด้วย  
กระบวนการ MIAF สำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB และ  
Tween 20 เมื่อใช้สารส้ม 0.4 กรัมต่อลิตร พบว่าไม่ส่งผลดีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด ดังนั้น  
การศึกษากลไกการบำบัดจึงไม่ทำการศึกษาในส่วน of ตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องร่วมกับสาร  
ลดแรงตึงผิว CTAB และ Tween 20

จากการทดลองสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกลไกการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อน  
น้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว Tween 20 และ CTAB ได้แก่ 1) ระยะเวลาการเติมอากาศ โดยค่า COD  
ในการบำบัดจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2-10 นาที ของการบำบัด จากนั้นการเปลี่ยนแปลงของ  
ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างช้าๆ ในช่วง 10-30 นาที และกลับเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 30-80 นาที 2) ชนิดของ  
สารโคแอกกูเลชั่น มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงของค่า COD โดยพบว่าเมื่อใช้เฟอริกคลอไรด์ใน  
กระบวนการ MIAF จะให้อัตราการลดลงของค่า COD ใกล้เคียงกับการใช้สารส้ม

## 5. ผลการทดลอง

### การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการโคalesceอร์แบบเส้นใย (Fibrous coalescer)

- การศึกษาคุณสมบัติของพื้นผิวดักกลาง

คุณสมบัติที่ศึกษา ได้แก่ มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันและตัวกลาง แรงตึงผิววิกฤต (Critical surface tension) ของตัวกลาง และค่าความหนาแน่นของเส้นใยตัวกลาง

- การหาค่ามุมสัมผัส (contact angle) ของหยดน้ำมันและตัวกลาง

ตารางที่ 8 และ 9 แสดงผลการศึกษาการทดลองหยดน้ำมันลงบนตัวกลางในอากาศ เพื่อหาค่ามุมสัมผัส (contact angle) ของหยดน้ำมันและตัวกลาง

ตารางที่ 8 การทดลองหยดน้ำมันลงบนตัวกลางในอากาศ

|                             | เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา | เส้นใยสแตนเลส |
|-----------------------------|---------------------|---------------|
| มุมสัมผัส $\theta$ (degree) | 65.73               | 63.62         |
| $\cos\theta$                | 0.41                | 0.44          |
| $\gamma_c$ (mN/m)           | 34.68               | 33.36         |
| $\gamma_w$ (mN/m)           | 72                  | 72            |
| $\gamma_{wc}$ (mN/m)        | 5.16                | 1.68          |

ตารางที่ 9 การทดลองหยดน้ำมันลงบนตัวกลางในอากาศ

|                             | เส้นใยกรองน้ำตู้ปลา | เส้นใยสแตนเลส |
|-----------------------------|---------------------|---------------|
| มุมสัมผัส $\theta$ (degree) | 0                   | 0             |
| $\cos\theta$                | 1                   | 1             |
| $\gamma_c$ (mN/m)           | 34.68               | 33.36         |
| $\gamma_o$ (mN/m)           | 31                  | 31            |
| $\gamma_{oc}$ (mN/m)        | 3.68                | 2.36          |

จากการประยุกต์ใช้สมการ Young's Equation จะได้ค่าของ  $\gamma_{wc}$  ของเส้นใยตู้ปลาและเส้นใยสแตนเลสเป็น 5.16 และ 1.68 mN/m ตามลำดับ ในขณะที่ค่าของ  $\gamma_{oc}$  ของเส้นใยตู้ปลาและเส้นใยสแตนเลสเป็น 3.68 และ 2.36 mN/m ตามลำดับ โดยจากการคำนวณค่ามุมสัมผัสโดยประยุกต์ใช้สมการ Young's Equation จะได้ค่ามุมสัมผัสของเส้นใยตู้ปลาและเส้นใยสแตนเลสเป็น  $87.89^\circ$  และ  $90.97^\circ$  ตามลำดับ

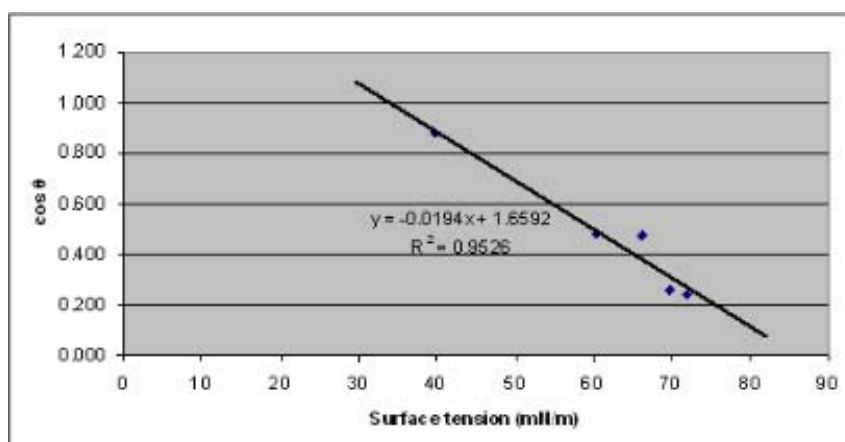
- การหาค่าแรงตึงผิววิกฤต (critical surface tension) ของตัวกลาง

a. เส้นใยตูปลา

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวตัวกลาง (เส้นใยตูปลา) ที่ได้จากการหยดสารละลายของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่ความเข้มข้นและแรงตึงผิวต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 10 และจากรูปที่ 25 สามารถกล่าวได้ว่าค่าแรงตึงผิววิกฤตของเส้นใยตูปลาเท่ากับ 34.68 mN/m

ตารางที่ 10 ตารางแสดงค่ามุมสัมผัส ค่า  $\cos\theta$  และค่าแรงตึงผิวของหยดน้ำผสมสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ ทำกับเส้นใยตูปลา

| ความเข้มข้น SDS (mg/L) | $\theta$ | $\cos\theta$ | $\sigma$ (mN/m) |
|------------------------|----------|--------------|-----------------|
| 0                      | 76.11    | 0.240        | 72              |
| 50                     | 75       | 0.259        | 69.78           |
| 110                    | 61.6     | 0.476        | 66.12           |
| 200                    | 61.4     | 0.479        | 60.45           |
| 1900                   | 28.3     | 0.880        | 39.7            |



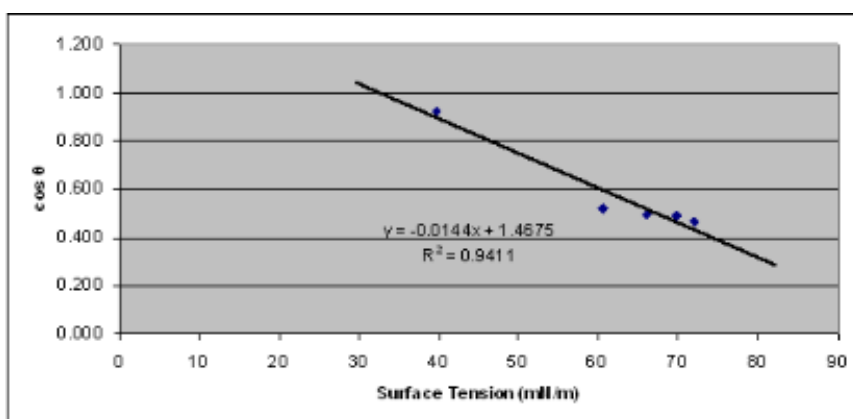
รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวกับค่า  $\cos\theta$  ของเส้นใยตูปลา

b. เส้นใยสแตนเลส

โดยผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวตัวกลาง (เส้นใยสแตนเลส) ที่ได้จากการหยดสารละลายของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่ความเข้มข้นและแรงตึงผิวต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 11 และจากรูปที่ 26 สามารถกล่าวได้ว่าค่าแรงตึงผิววิกฤตของเส้นใยสแตนเลสเท่ากับ 33.36 mN/m

ตารางที่ 11 ตารางแสดงค่ามุมสัมผัส ค่า  $\cos\theta$  และค่าแรงตึงผิวของหยดน้ำผสมสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างๆทำกับเส้นใยสแตนเลส

| ความเข้มข้น SDS (mg/L) | $\theta$ | $\cos\theta$ | $\sigma$ (mN/m) |
|------------------------|----------|--------------|-----------------|
| 0                      | 62.22    | 0.466        | 72              |
| 50                     | 60.8     | 0.488        | 69.78           |
| 110                    | 60.22    | 0.497        | 66.12           |
| 200                    | 58.63    | 0.521        | 60.45           |
| 1900                   | 22.64    | 0.923        | 39.7            |



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวกับค่า  $\cos\theta$  ของเส้นใยตู้ปลา

จากการทำการศึกษเพื่อหาตัวกลางที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นตัวกลางสำหรับโคอะเลสเซอร์ของตัวกลางทั้ง 2 ชนิดพบว่า เส้นใยกรองน้ำตู้ปลามีความเหมาะสมมากกว่าเนื่องจากให้ค่าแรงตึงผิววิกฤตสูงกว่าเส้นใยสแตนเลส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยตู้ปลามีลักษณะไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากกว่าเส้นใยสแตนเลส ซึ่งเป็นลักษณะที่เหมาะสมของตัวกลางสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้จากค่ามุมสัมผัสของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียที่เข้าจับกับเส้นใยตัวกลาง โดยค่ามุมสัมผัสที่น้อยกว่าจะส่งผลให้หยดน้ำมันสามารถยึดเกาะเส้นใยได้ดีกว่า จากผลการทดลอง ค่ามุมสัมผัสของเส้นใยตู้ปลามีค่าน้อยกว่าเส้นใยสแตนเลส

ดังนั้น ในการศึกษาต่อไปจะเลือกใช้เส้นใยตู้ปลาเป็นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ เนื่องจากน่าจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสูงกว่าการใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลาง

- การหาค่าความหนาแน่นในการอัดตัวของเส้นใยตัวกลาง

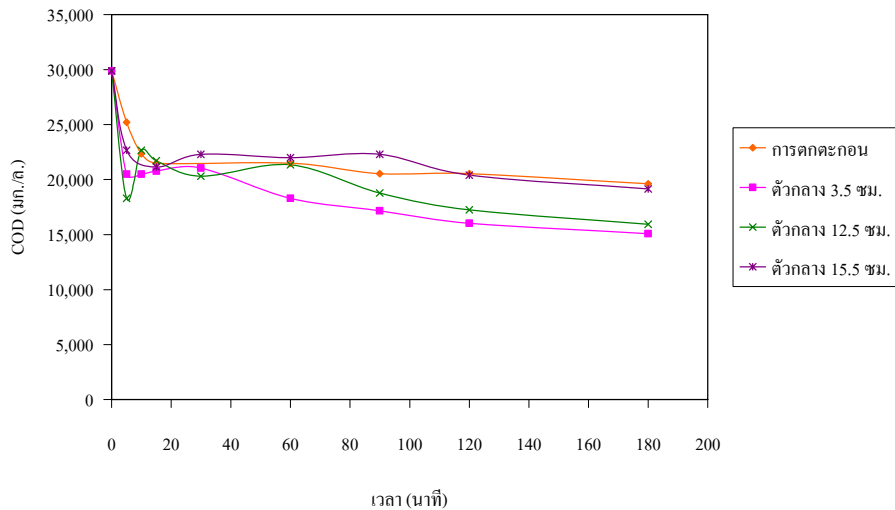
ตารางที่ 12 แสดงค่า Bulk density, True density และความหนาแน่นในการอัดตัวของเส้นใยตัวกลาง เส้นใยตุ้ปลา และเส้นใยสแตนเลส

| ชนิดเส้นใย    | Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> ) | True Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Porosity (%) |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| เส้นใยตุ้ปลา  | 0.053                             | 0.571                             | 90.722       |
| เส้นใยสแตนเลส | 0.226                             | 1.940                             | 88.344       |

จากผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นในการอัดตัวของตัวกลาง พบว่าเส้นใยตุ้ปลาหาค่าความหนาแน่นในการอัดตัวน้อยกว่าเส้นใยสแตนเลส หรือมีความพรุนมากกว่า โดยค่าความพรุนสามารถผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดยค่าความพรุนสูง จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงเนื่องจากอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียสามารถเข้าจับกับเส้นใยได้มากกว่า

● การศึกษาผลกระทบของความสูงของตัวกลางต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบที่ใช้กันทั่วไป

จากการศึกษาผลกระทบของความสูงของตัวกลางต่อประสิทธิภาพการบำบัดของโคอะเลสเซอร์ โดยการทำการทดลองแบบทีละเท ด้วยอัตราการไหลของน้ำเสีย 1.5 มล./วินาที แสดงดังรูปที่ 27 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยโคอะเลสเซอร์มีประสิทธิภาพดีกว่าการตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เนื่องจากสามารถกำจัดค่าซีโอดีของน้ำเสียได้อย่างรวดเร็ว โดยจะเห็นได้ว่า ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก แต่เมื่อผ่านไป 20 นาทีแล้ว ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้เวลาในการบำบัดนานเกินกว่า 20 นาที ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการเดินระบบแบบต่อเนื่องได้ต่อไป นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความสูงของตัวกลางจะทำให้ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากขณะที่หยदन้ำมันเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางส่วนบนจะทำให้หยदन้ำมันที่รวมตัวกันแล้วในส่วนแรก เกิดการแตกตัวอีกครั้ง จึงทำให้มีขนาดเล็กลงทำให้เคลื่อนที่ขึ้นสูงผิวน้ำได้ช้าลงตามกฎของสโตก โดยความสูงของตัวกลางที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด คือ 3.5 ซม.

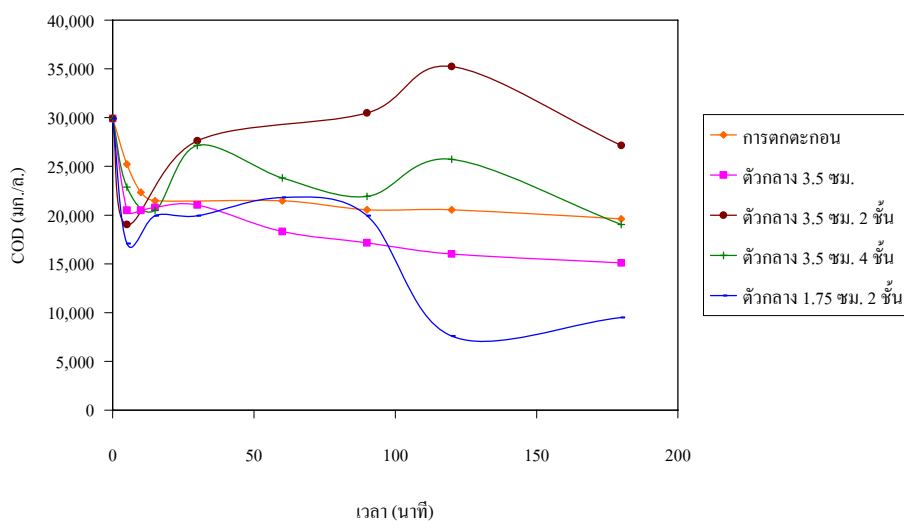


รูปที่ 27 ผลการศึกษาผลกระทบของความสูงของตัวกลางต่อค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่เวลาต่างๆ

## ● การพัฒนาอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

### - การวางตัวกลางแบบขั้นตอน

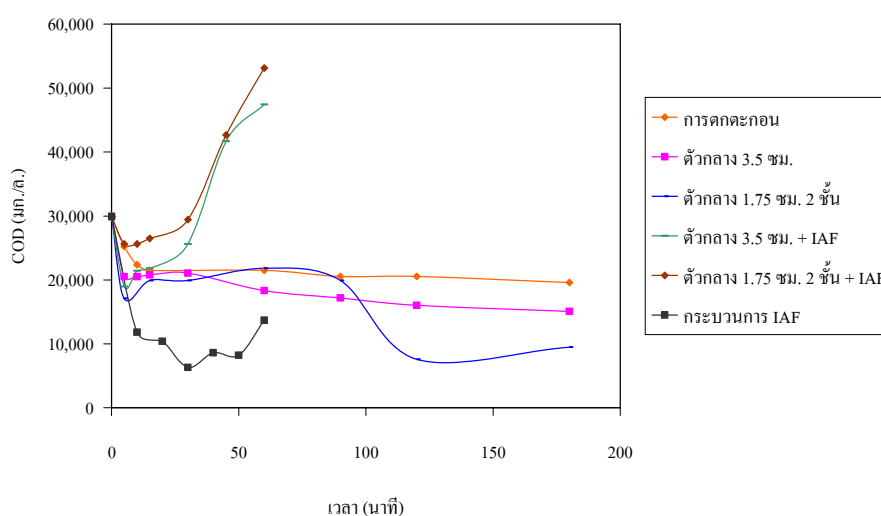
จากกราฟรูปที่ 28 จะพบว่า การวางตัวกลางแบบขั้นตอนจะมีผลต่อประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์ โดยเมื่อความสูงของตัวกลางแต่ละชั้นมีค่ามากจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เนื่องจากหยดน้ำมันที่รวมตัวกันแล้วในชั้นแรกจะเกิดการแตกตัวเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางชั้นต่อไป ทำให้มีขนาดเล็กลง แต่เมื่อจำนวนของชั้นเพิ่มขึ้นก็มีความเป็นไปได้ที่หยดน้ำมันจะเกิดการรวมตัวกันอีกครั้ง โดยจะเห็นได้จากค่าซีโอดีที่ลดลงในกรณีที่ใช้การวางตัวกลางแบบ 4 ชั้น นอกจากนี้หากใช้ตัวกลางที่มีความหนาน้อยๆ จะช่วยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น นั่นคือจะเกิดการรวมตัวแบบต่อเนื่องของหยดน้ำมันจากชั้นที่ 1 ต่อไปยังชั้นที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบระหว่างตัวกลางที่หนา 3.5 ซม. กับตัวกลางที่แบ่งออกเป็น 2 ชั้น ชั้นละ 1.75 ซม. โดยการแบ่งตัวกลางออกเป็นชั้นย่อยๆ จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้นถึง 52.7%



รูปที่ 28 ผลการศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์โดยการวางตัวกลางแบบขั้นตอน

- การประยุกต์ใช้กระบวนการทำให้ลอย

จากกราฟรูปที่ 29 จะเห็นได้ว่าการนำเอากระบวนการอินดิคซ์แอร์โฟลเทชันใช้ร่วมกับโคอะเลสเซอร์แบบที่ละจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เนื่องจากฟองอากาศจะทำให้เกิดการปั่นป่วนของน้ำ ซึ่งส่งผลทำให้หยดน้ำมันไม่เกิดการเกาะติดที่ตัวกลาง จึงไม่สามารถเกิดกลไกการเกาะติดและการรวมตัวกันของหยดน้ำมัน ดังผลการทดลองซึ่งแสดงในกราฟรูปที่ 28 นอกจากนี้ในช่วงท้ายของการทดลองจะพบว่าค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจะมีค่าสูงเกินกว่าค่าซีโอดีในน้ำเสีย ซึ่งน่าจะเกิดจากการให้ฟองอากาศในน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวจะทำให้เกิดฟองที่มีเสถียรภาพสูง ทำให้ปริมาณน้ำส่วนหนึ่งเสียไปในรูปของฟอง ดังนั้นน้ำตัวอย่างที่เหลือในระบบจึงมีความเข้มข้นของน้ำมันค่อนข้างสูง



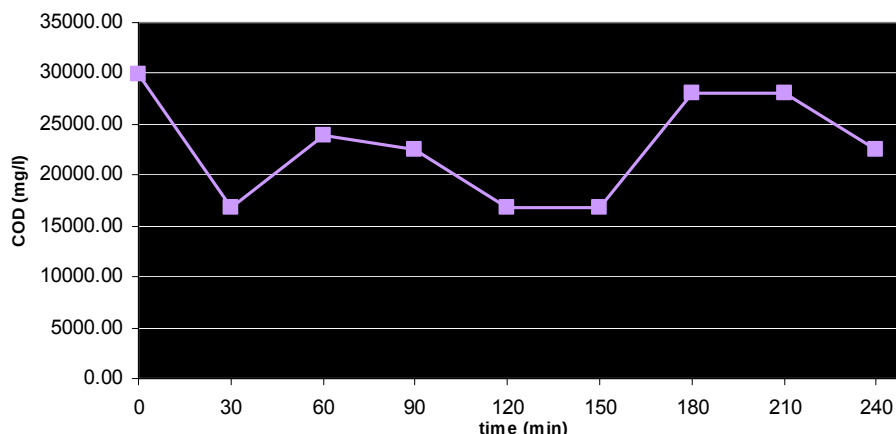
รูปที่ 29 ผลการศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพของโคอะเลสเซอร์โดยใช้กระบวนการอินดิคซ์แอร์โฟลเทชัน

- การหมุนเวียนน้ำทิ้งเข้าสู่ถังปฏิกิริยา

a. การศึกษาผลกระทบจากการหมุนเวียนน้ำเสีย 100%

O อัตราการไหลของน้ำเสีย = 22 ml/s

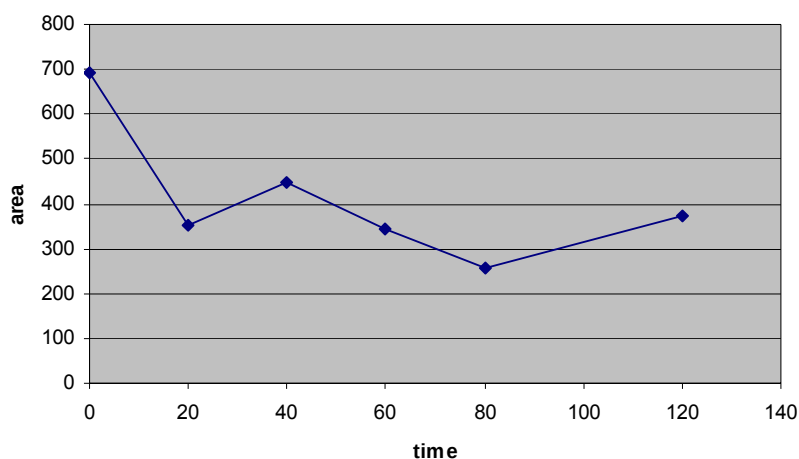
รูปที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีที่เปลี่ยนไปตามเวลาการบำบัดในกรณีที่ใช้เส้นใยตุ้ปลาเป็นตัวกลาง



รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีกับเวลาที่อัตราการไหล 22 ml/s โดยใช้เส้นใยดู่ปลาเป็นตัวกลาง

จากรูปที่ 30 พบว่าอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ โดยสังเกตจากการลดลงของค่าซีโอดีที่เวลา 20 นาทีแรก จะเห็นว่าอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์สามารถลดค่าซีโอดีของน้ำได้สูง แต่เมื่อเวลาผ่านไป 40 นาที จะเห็นได้ว่าค่าซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออนุภาคน้ำมันในน้ำเสียได้เข้าจับกับเส้นใยตัวกลางของโคอะเลสเซอร์ทำให้พื้นที่ผิวของตัวกลางเส้นใยเต็มจนไม่สามารถให้อนุภาคน้ำมันเข้าจับได้อีก เป็นเหตุให้อนุภาคน้ำมันหลุดออกไปกับน้ำทิ้งมากขึ้น และเมื่อมีการหมุนเวียนน้ำเสียกลับเข้ามาและได้ชะอนุภาคน้ำมันที่ติดอยู่กับเส้นใยหลุดออกมา ทำให้ค่าซีโอดีสูงขึ้น จากนั้นเมื่อพื้นที่เส้นใยว่าง อนุภาคน้ำมันก็สามารถเข้าจับกับเส้นใยตัวกลางได้อีกเช่นเดิม ทำให้กราฟซีโอดีมีแนวโน้มลดลงเช่นเดิม เมื่อเวลาผ่านไป 80 นาที จะเห็นได้ว่าซีโอดีจะลดลงถึงจุดต่ำสุดของระบบ จากนั้นเส้นกราฟมีแนวโน้มสูงขึ้นอีกในช่วงเวลาที่นานขึ้น เนื่องจากอนุภาคน้ำมันในน้ำบางส่วนได้รวมตัวและแยกชั้นอยู่ทางด้านบนของโคอะเลสเซอร์แล้วทำให้จำนวนอนุภาคน้ำมันในน้ำมีจำนวนน้อยลง จึงใช้ระยะเวลาในการเข้าจับกับเส้นใยตัวกลางจนเต็มมากขึ้น จากนั้นจะมีแนวโน้มขึ้นลงสลับกันไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเข้าสู่จุดที่ค่าซีโอดีมีค่าคงที่

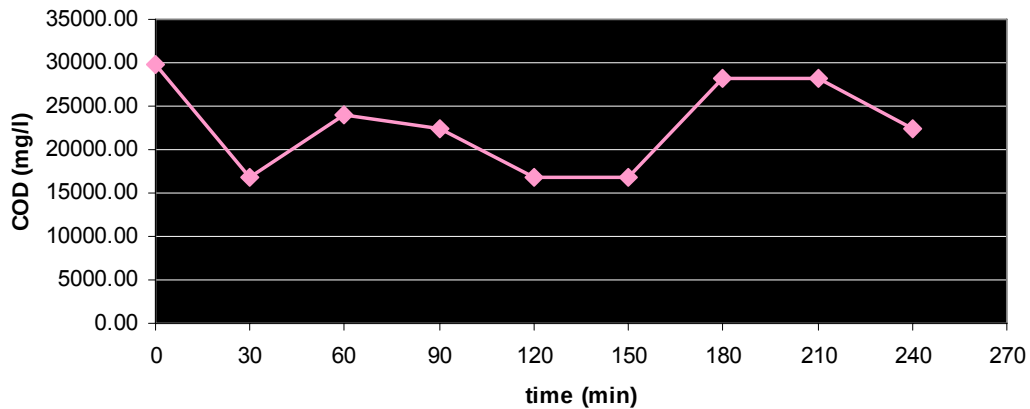
รูปที่ 31 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่างๆที่อัตราการไหล 22 ml/s โดยใช้เส้นใยดู่ปลาเป็นตัวกลาง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีที่ได้จากการวิเคราะห์และค่าพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมัน



รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหล 22 ml/s โดยใช้เส้นใยตุ้ปลาเป็นตัวกลาง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่างๆ จะเห็นได้ว่าจำนวนอนุภาคน้ำมันที่เวลาเริ่มต้นจะมีปริมาณมากและมีขนาดใหญ่ เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที พื้นที่ใต้กราฟจะลดลงเนื่องจากอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียได้เข้าจับกับเส้นใยตัวกลางไปส่วนหนึ่ง ทำให้จำนวนอนุภาคลดลงและอนุภาคน้ำมันที่อยู่ในน้ำทิ้งจะมีขนาดเล็กเป็นส่วนมาก เนื่องจากอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่จะเข้าจับกับเส้นใย เกิดการรวมตัวและลอยขึ้นอยู่ทางด้านบนของโคอะเลสเซอร์ ที่เวลา 40 นาทีพื้นที่ใต้กราฟของอนุภาคน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยตัวกลางมีอนุภาคน้ำมันเข้าจับจนเต็มเส้นใย ทำให้มีอนุภาคน้ำมันออกมาพร้อมกับน้ำทิ้งมากขึ้น โดยมีปริมาณอนุภาคขนาดเล็กมากขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป ค่าพื้นที่ใต้กราฟจะมีค่าน้อยลงเนื่องจากการหมุนเวียนน้ำทิ้งกลับเข้าสู่โคอะเลสเซอร์ทำให้อนุภาคน้ำมันที่ติดอยู่บนเส้นใยถูกชะออก ทำให้เส้นใยมีพื้นที่ว่างให้อนุภาคน้ำมันอื่นเข้าจับ และมีปริมาณอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ลดลงมากเนื่องจาก อนุภาคน้ำมันขนาดเล็กจะเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งจะสามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้เร็วขึ้น จึงทำให้จำนวนของหยดน้ำมันขนาดเล็กลดลงทำให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่างๆ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่เวลาต่างๆ มีแนวโน้มที่คล้ายกัน

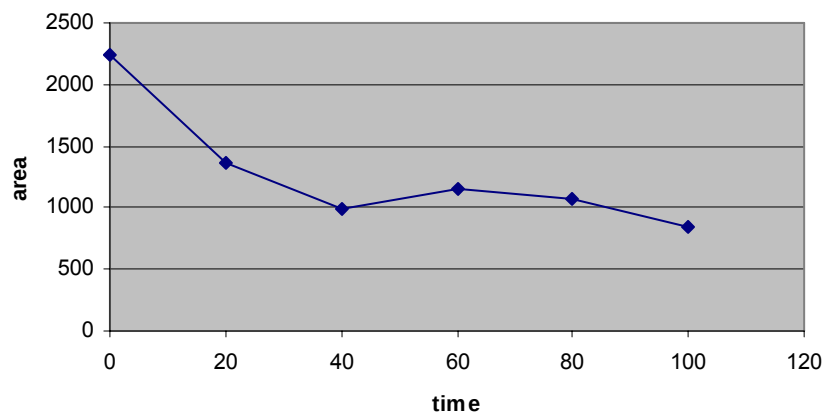
สำหรับการศึกษาในกรณีที่ใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลางสามารถแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่เปลี่ยนไปตามเวลาการบำบัดดังแสดงในรูปที่ 32



รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีกับเวลาที่อัตราการไหล 22 ml/s โดยใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลาง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีกับเวลา แสดงให้เห็นว่าการใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลางในอุปกรณ์โคเอสเซอร์สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ โดยการเพิ่มขึ้น-ลดลงของเส้นกราฟ มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับการใช้เส้นใยตุ้ปลาเป็นตัวกลาง แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดของการใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลางจะน้อยกว่าการใช้เส้นใยตุ้ปลา เนื่องจากการใช้เส้นใยสแตนเลสเป็นตัวกลางจะสามารถลดค่าซีโอดีได้น้อยกว่าซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้จากวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวตัวกลางที่พบว่าเส้นใยตุ้ปลามีความไม่ชอบน้ำสูงกว่าเส้นใยสแตนเลส

รูปที่ 33 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่างๆที่อัตราการไหล 22 ml/s โดยใช้เส้นใยสแตนเลส เป็นตัวกลาง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีที่ได้จากการวิเคราะห์และค่าพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมัน

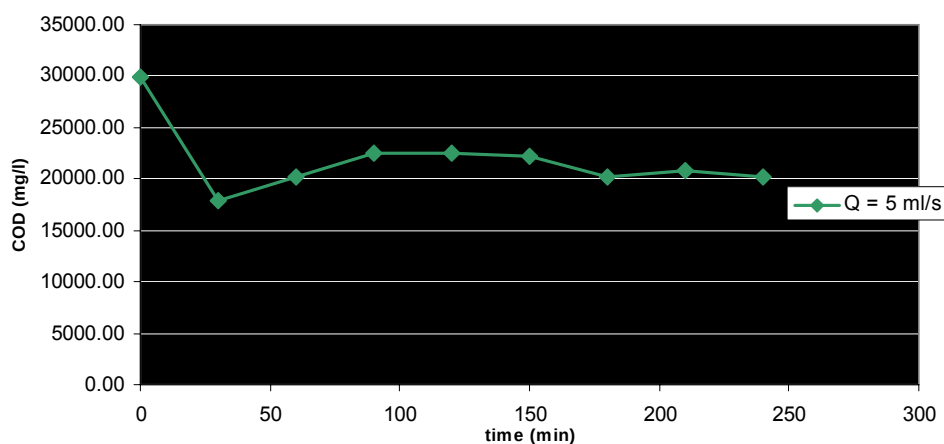


รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่างๆที่อัตราการไหล 22 ml/s โดยใช้เส้นใยเป็นตัวกลาง

จากรูปที่ 33 จะเห็นว่าแนวโน้มของการเพิ่มขึ้น-ลดลงของพื้นที่ใต้กราฟและแนวโน้มลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันที่เวลาต่าง ๆ เมื่อใช้เส้นใยสเตนเลสเป็นตัวกลางมีลักษณะใกล้เคียงกับการใช้เส้นใยตุ้ปลาเป็นตัวกลาง ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่าง ๆ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีที่เวลาต่าง ๆ มีแนวโน้มที่คล้ายกัน

O อัตราการไหลของน้ำเสีย = 5 ml/s

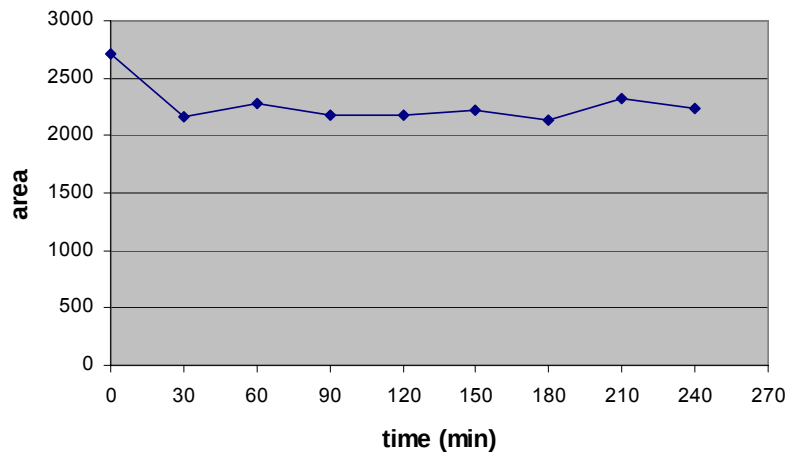
รูปที่ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีที่เปลี่ยนไปตามเวลาการบำบัดในกรณีที่ใช้เส้นใยตุ้ปลาเป็นตัวกลาง



รูปที่ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีกับเวลาที่อัตราการไหล 5 ml/s โดยใช้เส้นใยตุ้ปลาเป็นตัวกลาง

จากรูปที่ 34 แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ใช้เส้นใยตุ้ปลาเป็นตัวกลางที่อัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่สูงกว่าค่าที่ได้จากอัตราการไหลที่ 22 ml/s โดยสังเกตจากการลดลงของค่าซีโอดี โดยลักษณะเส้นกราฟของรูปที่ 34 จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับเส้นกราฟในรูปที่ 30 แต่ในการทดลองนี้ แนวโน้มของเส้นกราฟที่ได้ในรูปที่ 34 มีช่วงของการเพิ่มขึ้นและลดลงของเส้นกราฟของรูปที่ 30 ทำให้ค่าซีโอดีเข้าสู่ค่าสมดุลได้เร็วกว่า

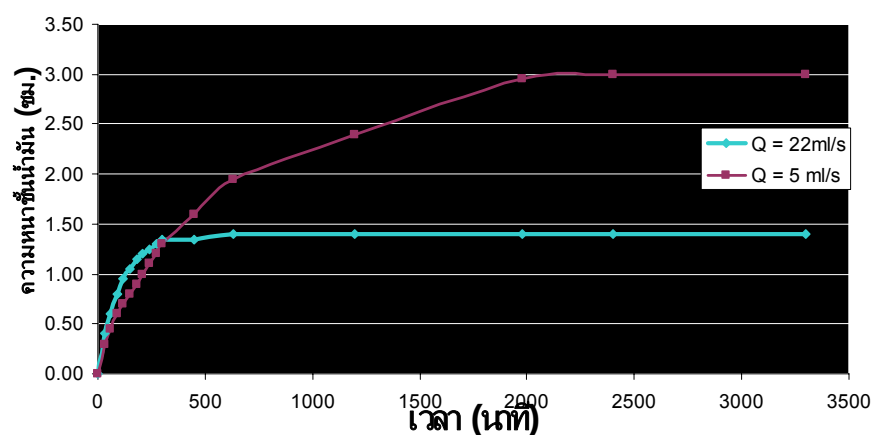
รูปที่ 35 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหล 5 ml/s โดยใช้เส้นใยตุ้ปลาเป็นตัวกลาง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีที่ได้จากการวิเคราะห์และค่าพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมัน



รูปที่ 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหล 5 ml/s โดยใช้เส้นใยดู่ปลาเป็นตัวกลาง

จากรูปที่ 35 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการเพิ่มขึ้น-ลดลงของพื้นที่ใต้กราฟและแนวโน้มลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราการสูบน้ำเสียเป็น 5 ml/s มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน โดยเวลาที่จำนวนอนุภาคน้ำมันในน้ำมีค่าสูง ค่าพื้นที่ใต้กราฟก็จะมีค่าสูงด้วย และเป็นที่น่าสังเกตว่าแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่างๆ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีที่เวลาต่างๆ มีแนวโน้มที่คล้ายกัน ซึ่งจะได้อธิบายถึงในหัวข้อต่อไป

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่อัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีและจำนวนอนุภาคน้ำมันได้ดีกว่าที่อัตราการสูบน้ำเสีย 22 ml/s นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s จะให้ประสิทธิภาพในการแยกชั้นน้ำมันที่แยกออกมาด้านบนมากกว่าที่อัตราการสูบน้ำเสีย 22 ml/s ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 36



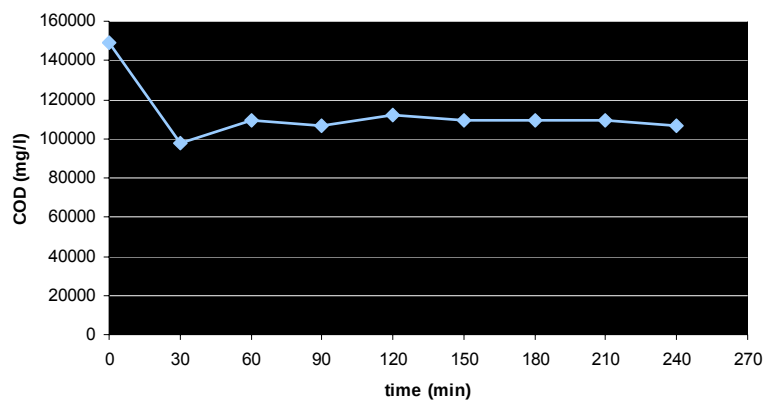
รูปที่ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นน้ำมันที่เวลาต่างๆ ที่อัตราการสูบน้ำเสีย 22 ml/s และ 5 ml/s

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการใช้เส้นใยตูปลาเป็นตัวกลางอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่อัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s สามารถให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ดีที่สุด เนื่องจากสามารถกำจัดค่าซีโอดี กำจัดอนุภาคน้ำมันในน้ำและให้ชั้นน้ำมันที่มีความหนามากที่สุด ดังนั้นในการทดลองต่อไปซึ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบจากอัตราการหมุนเวียนน้ำทั้งต่าง ๆ โดยใช้เส้นใยตูปลาเป็นตัวกลางที่อัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพการลดค่าซีโอดีสูง รวมไปถึงได้ชั้นน้ำมันที่มีความหนาที่เพิ่มขึ้น

b. การศึกษาผลกระทบจากอัตราการหมุนเวียนน้ำทั้งต่าง ๆ ที่อัตราการสูบน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยาคงที่ 5 ml/s

O อัตราการหมุนเวียนน้ำทั้ง = 60%

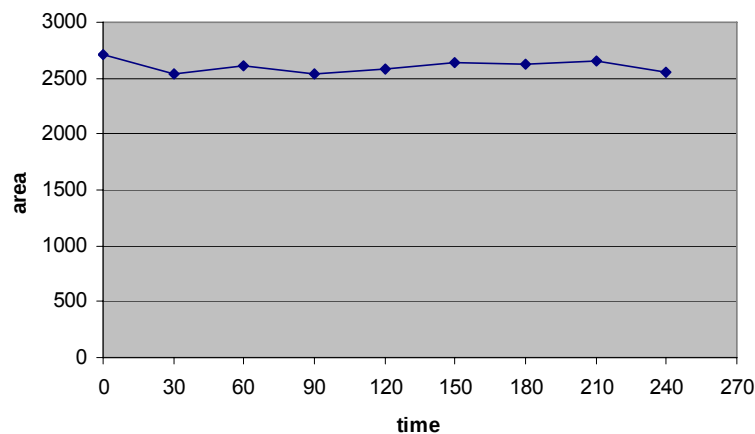
รูปที่ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีกับเวลาโดยมีอัตราการหมุนเวียนน้ำทั้ง 60% ของอัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s



รูปที่ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีกับเวลาโดยมีอัตราการหมุนเวียนน้ำทั้ง 60% ของอัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s โดยใช้เส้นใยตูปลาเป็นตัวกลาง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการที่อัตราการหมุนเวียนน้ำทั้ง 60% ของอัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดจะไม่สูงมากนัก โดยสังเกตได้จากการลดลงของค่าซีโอดี ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุดจะอยู่ในช่วง 20 นาทีแรกที่มีการลดลงของค่าซีโอดีสูงสุด จากนั้นแนวโน้มของการเพิ่มขึ้น-ลดลงของค่าซีโอดีจะคล้ายกันกับรูปที่ 34 แต่จะมีช่วงกว้างของการเพิ่มขึ้น-ลดลงของค่าซีโอดีน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าที่อัตราการหมุนเวียนน้ำทั้ง 60% สามารถทำให้เกิดเข้าสู่จุดสมดุลของการลดค่าซีโอดีได้เร็วกว่าที่อัตราการหมุนเวียนน้ำทั้ง 100% แต่ให้การกำจัดซีโอดีต่ำกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำกว่า

รูปที่ 38 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการหมุนเวียนน้ำทั้ง 60% ของอัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s โดยใช้เส้นใยตูปลาเป็นตัวกลาง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีที่ได้จากการวิเคราะห์และค่าพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมัน

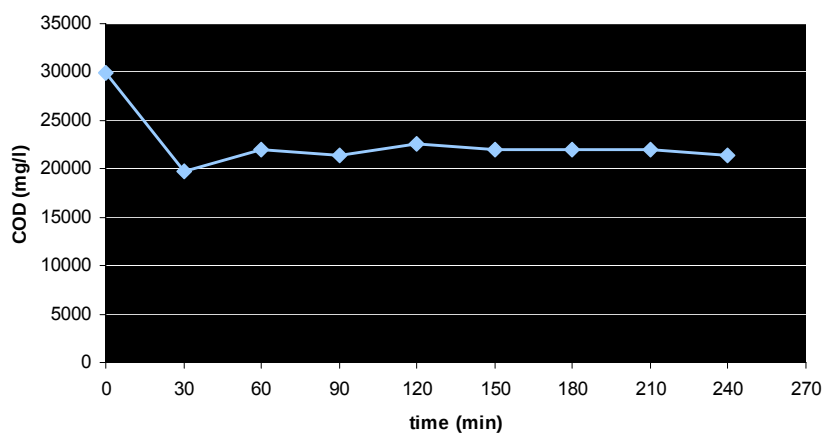


รูปที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่างๆ โดยมีอัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 60% ของอัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s โดยใช้เส้นใยตู้ปลาเป็นตัวกลาง

จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันจะเห็นว่าจำนวนอนุภาคน้ำมันในน้ำทิ้งมีการลดลงน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าการบำบัดน้ำเสียโดยใช้อัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 60% มีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคน้ำมันต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 100% ที่อัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s โดยที่จะพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่างๆ และความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่เวลาต่างๆ มีแนวโน้มที่คล้ายกัน ดังที่พบเห็นในการทดลองที่ผ่านมา

#### O อัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง = 80%

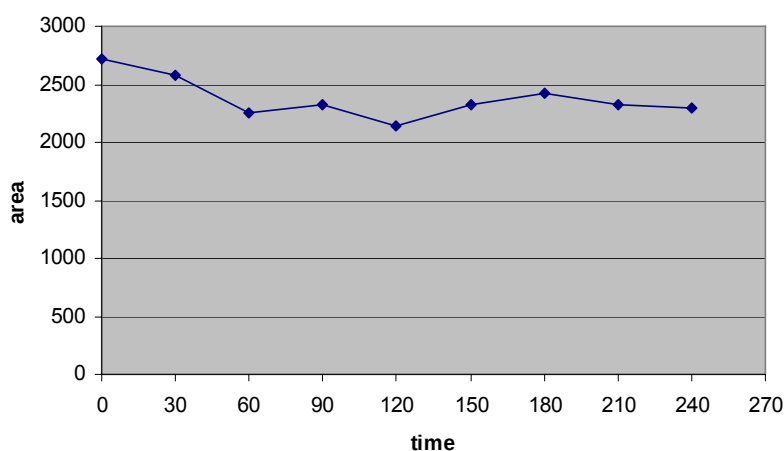
รูปที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีกับเวลาโดยมีอัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 60% ของอัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s



รูปที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีกับเวลาโดยมีอัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 80% ของอัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s

จากผลการวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียของระบบจะดีที่สุดในช่วง 20 นาทีแรก เนื่องจากเป็นช่วงที่ค่าซีโอดีลดลงมากที่สุด ในช่วงหลังจาก 20 นาทีแรก ค่าซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไป โดยค่าซีโอดีที่วัดกลับมีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้ในช่วง 20 นาทีแรก นอกจากนี้ พบว่ากราฟที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกันกับรูปที่ 34 แต่ในรูปที่ 39 จะมีช่วงกว้างของการเพิ่มขึ้นและลดลงของกราฟน้อยกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบนี้สามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้เร็วกว่า

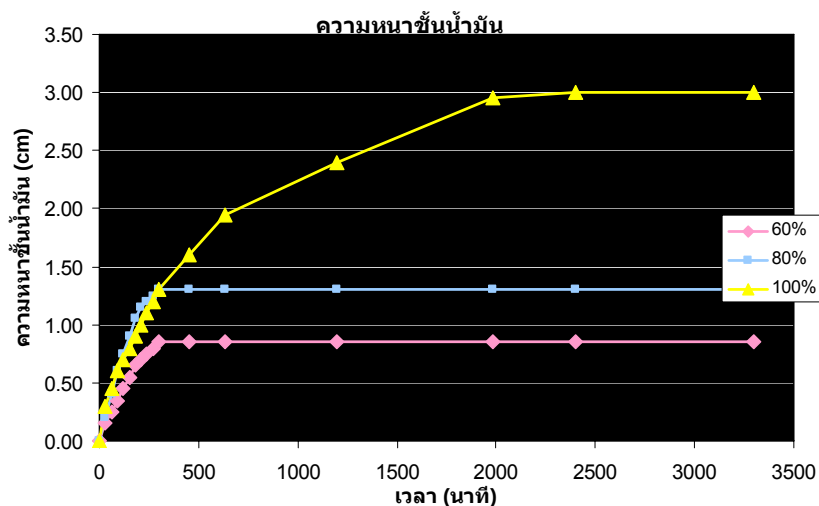
รูปที่ 40 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่างๆ ที่อัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 80% ของอัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s โดยใช้เส้นใยดักปลาเป็นตัวกลาง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีที่ได้จากการวิเคราะห์และค่าพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของอนุภาคน้ำมัน



รูปที่ 40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เวลาต่างๆ

โดยมีอัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 80% ของอัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s

จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันจะเห็นได้ว่าจำนวนอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียมีการลดลงน้อย โดยที่มีประสิทธิภาพการกำจัดจำนวนอนุภาคน้ำมันมากกว่าที่อัตราการหมุนเวียนน้ำเสีย 60% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบำบัดน้ำเสียโดยใช้อัตราการหมุนเวียนน้ำเสีย 80% มีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคน้ำมันที่สูงกว่าที่ 60% แต่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 100% ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการเลือกใช้อัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 100% สามารถให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้มากที่สุด สังเกตได้จากการกำจัดค่าซีโอดี จำนวนอนุภาคน้ำมันในน้ำและความหนาของชั้นน้ำมัน โดยรูปที่ 41 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นน้ำมันที่เวลาต่างๆ ที่อัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ ที่อัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s



รูปที่ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นน้ำมันที่เวลาต่างๆ ที่อัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้งต่างๆ ที่อัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s

จากผลการทดลอง การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยอุปกรณ์โคเอสเสเซอร์ที่อัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 60% 80% และ 100% พบว่าความหนาของชั้นน้ำมันที่จุดอิมิต์ของชั้นน้ำมันซึ่งแยกตัวออกมาจากน้ำคือ 0.85 1.30 และ 3.00 ซม.ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 100% ที่อัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s สามารถให้ชั้นความหนาของน้ำมัน การกำจัดค่าซีโอดี และการกำจัดอนุภาคน้ำมันได้มากที่สุด จากผลการศึกษาในครั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่าที่อัตราการหมุนเวียนน้ำเสีย 100% ของอัตราการสูบน้ำเสีย 5 ml/s โดยใช้เส้นใยตุ้ปลาเป็นตัวกลาง สามารถให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดีที่สุด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์กับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันอื่น ๆ เพื่อลดผลกระทบจากน้ำมันที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม และนำน้ำมันที่แยกออกมานั้นกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ใหม่ในอนาคต

ทั้งนี้ ในอนาคต การศึกษาหาอัตราการสูบน้ำเสียที่เหมาะสมกับอัตราการหมุนเวียนน้ำเสีย 60% และ 80% น่าจะเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยสามารถกำจัดค่าซีโอดีได้สูงและให้ความหนาของชั้นน้ำมันที่แยกออกมาได้มาก

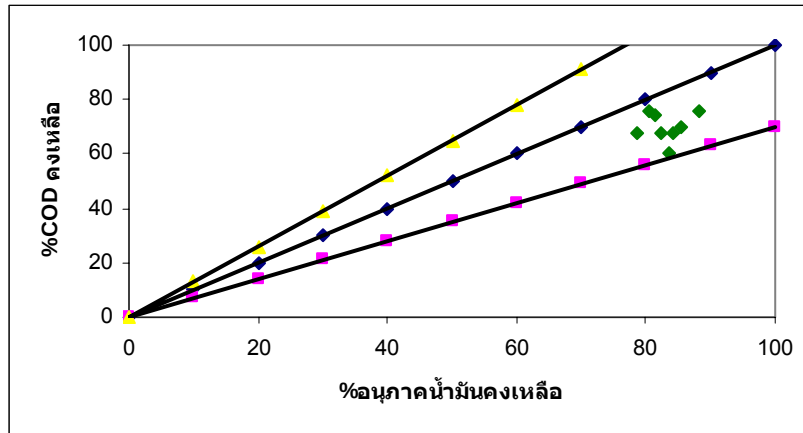
### ● การประยุกต์โมเดลเพื่อทำนายผลการทดลอง

โดยในส่วนนี้ จะทำการประยุกต์ใช้โมเดลเพื่อทำนายผลการทดลอง โดยส่วนแรกคือการทำนายค่า COD จากพื้นที่ใต้กราฟการกระจายอนุภาคน้ำมัน และส่วนที่สองคือการประยุกต์ใช้สมการประสิทธิภาพรวม เพื่อทำนายการกระจายอนุภาคน้ำมันที่สภาวะสมดุล

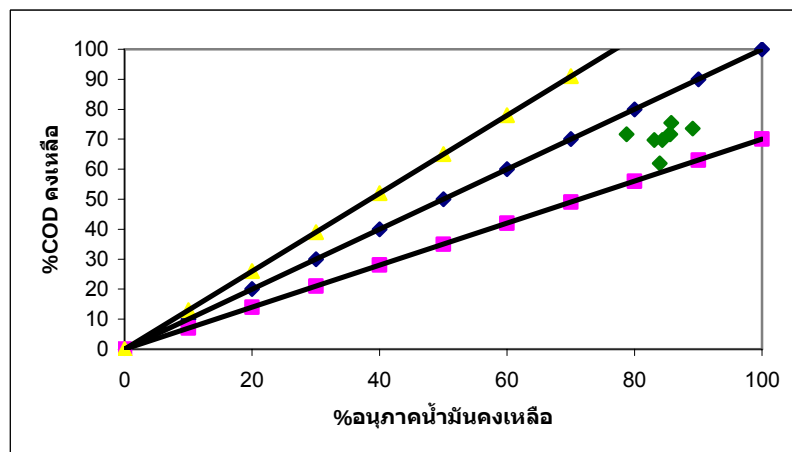
#### - ความสัมพันธ์ระหว่าง COD และพื้นที่ใต้กราฟการกระจายอนุภาคน้ำมัน

จากผลการทดลองการศึกษาลักษณะการผสมผสานการหมุนเวียนน้ำทิ้งค่าต่าง ๆ พบว่าค่าซีโอดีในน้ำตัวอย่างที่เก็บมาวิเคราะห์น่าจะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ใต้กราฟการกระจายอนุภาคน้ำมัน (คือ

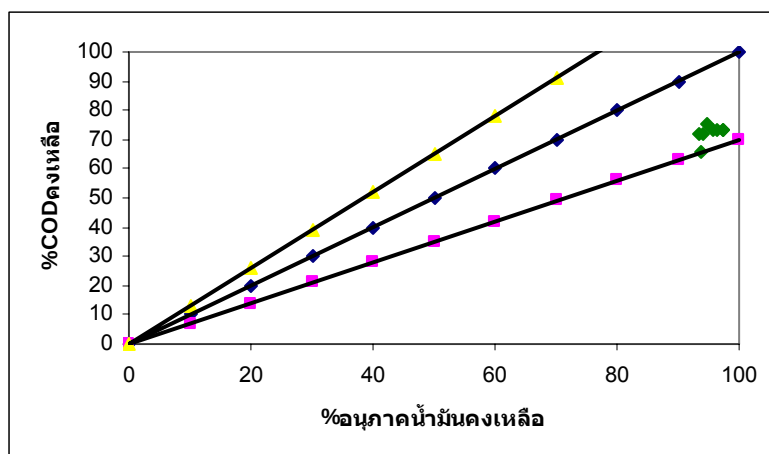
ปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในน้ำ) โดยมีแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยความสัมพันธ์ของ % COD ที่เหลืออยู่ และ %อนุภาคน้ำมันที่เหลืออยู่ในน้ำที่สัดส่วนการหมุนเวียนน้ำทั้ง 100% 80% 60% อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 42 43 และ 44 ตามลำดับ



รูปที่ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %COD ที่เหลืออยู่ และ %อนุภาคน้ำมันที่เหลืออยู่ ที่สัดส่วนการหมุนเวียนน้ำทั้ง 100% อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อวินาที



รูปที่ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %COD ที่เหลืออยู่ และ %อนุภาคน้ำมันที่เหลืออยู่ ที่สัดส่วนการหมุนเวียนน้ำทั้ง 80% อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อวินาที



รูปที่ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %COD ที่เหลืออยู่ และ %อนุภาคน้ำมันที่เหลือยู่  
ที่สัดส่วนการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 60% อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อวินาที

จากรูปที่ 42 43 และ 44 พบว่า ความสัมพันธ์ของค่า COD ที่คงเหลืออยู่ในน้ำจะมีความสัมพันธ์กับอนุภาคน้ำมันที่คงเหลือในน้ำ ในช่วง +30% จากแนวโน้มเส้นตรง ดังนั้น จากแนวโน้มนี้ ทำให้เราสามารถจะประมาณค่า COD ที่เหลืออยู่ในน้ำเมื่อรู้พื้นที่ใต้กราฟการกระจายอนุภาคน้ำมัน หรือปริมาณน้ำมันที่เหลืในน้ำได้นั่นเอง

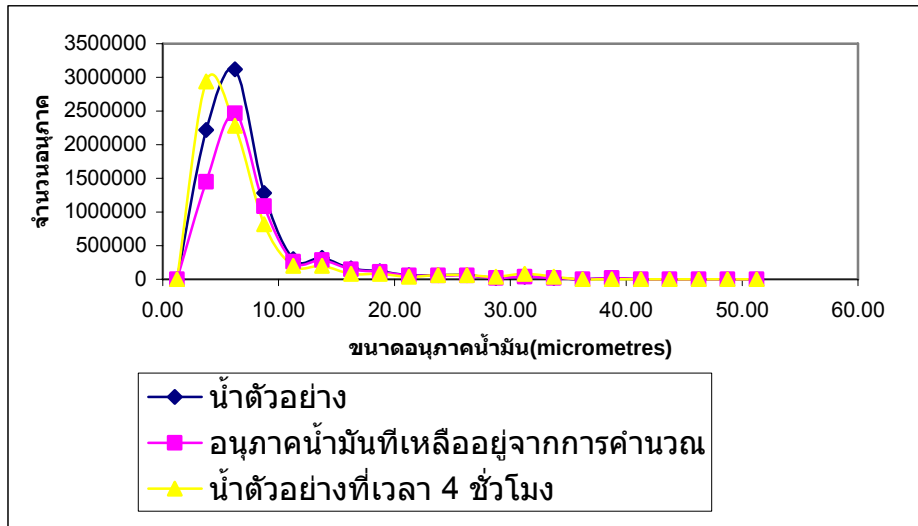
#### - การทำนายประสิทธิภาพของโคเอสเชอร์

จากสมการประสิทธิภาพรวมของโคเอสเชอร์

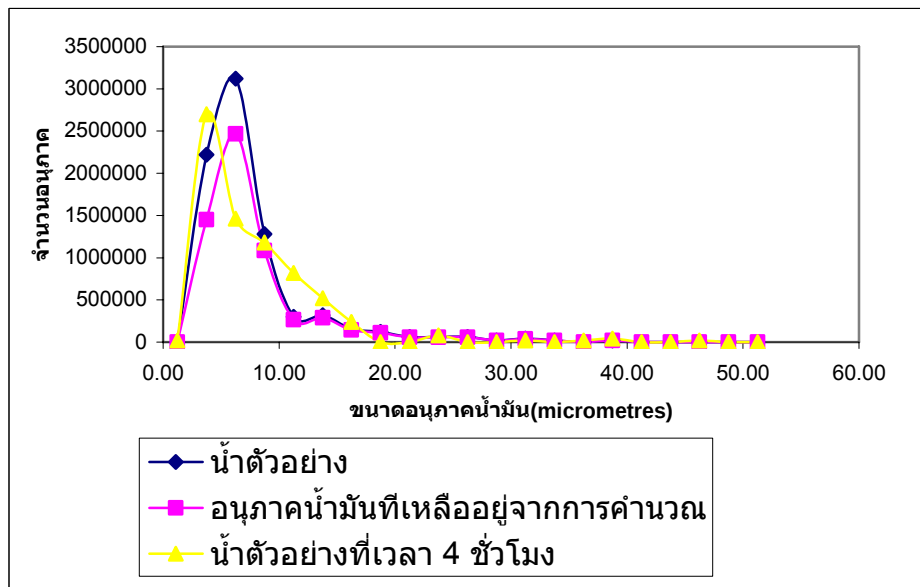
$$\eta_T = \eta_s + \eta_l + \eta_D$$

จะได้ว่า 
$$\eta_T = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_E^2}{18\mu_C \cdot V_0} + \frac{3}{2} \left( \frac{d_E}{d_p} \right)^2 + 0.9 \left( \frac{K \cdot T}{\mu_C \cdot d_E \cdot d_p \cdot V_0} \right)^{2/3}$$

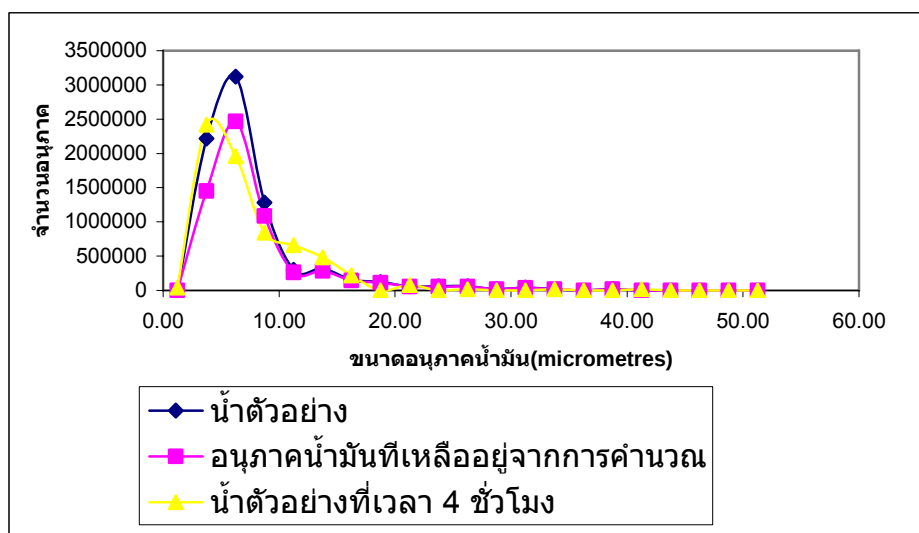
โดยคำนวณค่าขนาดของตัวกลาง ( $d_p$ ) จากผลการทดลองด้วยสมการ ได้ค่า  $d_p=1.22$  เซนติเมตร และใช้ค่า  $d_p$  นี้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดโดยรวมด้วยสมการที่ขนาดอนุภาคต่าง ๆ ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่คำนวณได้จากสมการ คือค่าปริมาณอนุภาคขนาดต่าง ๆ ที่ลดลง ซึ่งเมื่อสร้างกราฟการกระจายอนุภาคน้ำมันเทียบกับน้ำตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้นและจากผลการทดลอง ณ เวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุลแล้วที่สัดส่วนการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 100% 80% 60% อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อวินาที จะได้ผลดังรูปที่ 45 46 และ 47 ตามลำดับ



รูปที่ 45 แสดงการกระจายอนุภาคน้ำมันที่สัดส่วนการหมุนเวียนน้ำทั้ง 100% อัตราการไหล 5 ml/s



รูปที่ 46 แสดงการกระจายอนุภาคน้ำมันที่สัดส่วนการหมุนเวียนน้ำทั้ง 80% อัตราการไหล 5 ml/s



รูปที่ 47 แสดงการกระจายอนุภาคน้ำมันที่สัดส่วนการหมุนเวียนน้ำทิ้ง 60% อัตราการไหล 5 ml/s

จากรูปที่ 45 46 และ 47 ซึ่งเปรียบเทียบการกระจายอนุภาคน้ำมันจากการทดลองที่สัดส่วนการหมุนเวียนน้ำทิ้งต่าง ๆ กับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี จะเห็นว่าการกระจายอนุภาคน้ำมันในน้ำมีแนวโน้มที่ต่างกัน และผลจากการทดลองไม่ได้เป็นไปตามทฤษฎี ซึ่งสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนของขนาดตัวกลางที่มาจากการคำนวณจากสมการ และตัวกลางที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวกลางชนิดเส้นใย ในขณะที่จากสมการเป็นตัวกลางทรงกลม นอกจากนี้อาจเกิดจากการที่ระบบในการทดลองยังไม่เข้าสู่สมดุลอย่างแท้จริง อย่างไรก็ตาม ผลการทำนายนี้มีส่วนที่น่าสนใจก็คือ พื้นที่ใต้กราฟของการกระจายอนุภาค ซึ่งจากการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของผลการทดลองและจากการคำนวณแล้ว จะได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 พื้นที่ใต้กราฟการกระจายอนุภาคน้ำมัน และ %ความแตกต่าง ที่สัดส่วนการหมุนเวียนต่าง ๆ ณ เวลา 4 ชั่วโมง และจากพื้นที่ใต้กราฟจากการคำนวณ

| สัดส่วนการหมุนเวียนน้ำทิ้งที่ 5 ml/s | พื้นที่ใต้กราฟ | %ความแตกต่าง |
|--------------------------------------|----------------|--------------|
| จากการคำนวณ                          | 2234.90        | -            |
| 100%                                 | 2238.75        | 0.17         |
| 80%                                  | 2291.25        | 2.52         |
| 60%                                  | 2557.50        | 14.43        |

จากตารางแสดงพื้นที่ใต้กราฟ จะเห็นว่าที่สัดส่วนการหมุนเวียนน้ำเสียสูง พื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการคำนวณและการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากระบบจะอยู่ในสภาวะคงที่และมีความสมดุล แต่เมื่อสัดส่วนการหมุนเวียนน้ำน้อยลง ความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟจากการทดลองและคำนวณจะแตกต่างกันมากขึ้น จากพื้นที่ใต้กราฟที่เราสามารถทำนายได้จากสมการนั้น เมื่อรวมกับการทำนายค่า COD จากพื้นที่ใต้กราฟแล้ว จะทำให้เราสามารถประมาณค่า COD จากสมการได้

## 6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. กระบวนการ IAF สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, Tween 20 และ CTAB สรุปได้ว่า
  - a. ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, Tween 20 และ CTAB เท่ากับ 69.28, 24.33 และ 48.19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่อัตราการไหลอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที นาน 30 นาที
  - b. จากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการบำบัดไม่มีความจำเป็นในการให้อัตราการไหลอากาศที่สูงและเวลาในการบำบัดนานที่จนเกินไปซึ่งจะส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพและสูญเสียพลังงานที่ใช้ในการบำบัด
2. กระบวนการทางเคมี (โคเอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน) ด้วยอุปกรณ์จาร์เจสท์สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, Tween 20 และ CTAB แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ค่า pH ปริมาณสารโคเอกกูแลนต์และผลกระทบของปริมาณของเกลือและโพลีเมอร์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัด
  - a. การศึกษาค่า pH ในตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, Tween 20 และ CTAB พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารส้มในการบำบัดอยู่ในช่วง 6-7 และค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับเฟอริกคลอไรด์อยู่ในช่วง 5-6
  - b. การศึกษาความเข้มข้นของสารโคเอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, Tween 20 และ CTAB พบว่าตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS พบว่าในกรณีที่เพิ่มปริมาณของสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ ที่ใช้ในกระบวนการบำบัดจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ ตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว CTAB และ Tween 20 พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการบำบัดมากนัก
  - c. การศึกษาผลกระทบของเกลือต่อกระบวนการโคเอกกูเลชัน พบว่าการใช้เกลือไม่ส่งผลดีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด แต่กลับส่งผลเสียทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง
  - d. การศึกษาผลกระทบของโพลีเมอร์ต่อกระบวนการโคเอกกูเลชัน พบว่าส่งผลดีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเฉพาะที่ความเข้มข้นของสารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ที่มีค่าต่ำๆ (0.2 กรัมต่อลิตร) ในการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS เท่านั้นแต่เมื่อใช้กับความเข้มข้นและตัวอย่างน้ำเสียอื่น พบว่าไม่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดมากนัก
3. กระบวนการ MIAF สำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, Tween 20 และ CTAB แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ อัตราการไหลที่เหมาะสม ความเข้มข้นสารโคเอกกูแลนต์ และจลนศาสตร์ที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการบำบัด
  - a. อัตราการไหลอากาศ พบว่าอัตราการไหลที่มีความเหมาะสมสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, Tween20 และ CTAB เท่ากับ 0.3 ลิตรต่อนาที ที่ระยะเวลาในการบำบัดนาน 30 นาที

- b. การศึกษาความเข้มข้นของสารโคเอกกุลแลนท์ที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อน SDS พบว่าในกรณีที่เพิ่มปริมาณของสารส้ม และเพอร์ริกคลอไรด์ที่ใช้ในกระบวนการบำบัดจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของสารส้ม และ เพอร์ริกคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น
- c. การศึกษาด้านจลนศาสตร์ของกระบวนการบำบัด สามารถแบ่งช่วงการบำบัดออกเป็น 3 ช่วงหลัก ได้แก่ ช่วงที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงของค่า COD ลดลงอย่างรวดเร็วใน 0-10 นาที ช่วงที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงของค่า COD ลดลงอย่างช้าๆเกิดขึ้นในช่วง 10-30 นาที และช่วงที่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงของค่า COD เพิ่มขึ้นในช่วง 30 นาทีขึ้นไป
- d. จากการศึกษาด้านจลนศาสตร์ของกระบวนการบำบัดในกระบวนการ IAF และ MIAF ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของค่า  $n$  และ  $\log k$  มาสร้างสมการทำนายประสิทธิภาพได้ดังนี้

$$\% \text{การบำบัด}_{MIAF} = \left(\frac{N}{K}\right) \times \% \text{การบำบัด}_{IAF}$$

4. การศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศของการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SDS, Tween 20 และ CTAB ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) ความเร็วแกรเดียนท์ ( $G$ ) ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) และอัตราส่วน  $a/G$

- a. ขนาดฟองอากาศ ( $D_B$ ) พบว่าอัตราการไหลอากาศที่สูงขึ้น มีผลต่อขนาดฟองอากาศที่เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของสารส้ม และเพอร์ริกคลอไรด์มีผลกระทบน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของฟองอากาศในกระบวนการทำให้ลอย
- b. ความเร็วแกรเดียนท์ ( $G$ ) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น
- c. ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) และอัตราส่วน  $a/G$  ที่ได้จากกระบวนการ MIAF ซึ่งจะให้ค่าสูงสุดที่อัตราการไหลของอากาศที่ 3 ลิตรต่อนาที และที่จุดสูงสุดของค่า  $a$  และ  $a/G$  ยังมีความสอดคล้องกับค่าอัตราการไหลของอากาศที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวทั้ง 3 ชนิด ทำให้สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\% \text{การบำบัด} = a/G \text{ (slope)} + b \quad (b = \text{จุดแกน } y \text{ ของสมการเส้นตรง})$$

5. กระบวนการโคอะเลสเซอร์ด้วยตัวกลางแบบเส้นใยสำหรับการบำบัดตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว สามารถสรุปได้ว่า

- a. เส้นดู่ปลามีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าเส้นใยสแตนเลส เนื่องจากค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำมันกับตัวกลางต่ำกว่า ซึ่งกล่าวได้ว่าเส้นใยดู่ปลามีความไม่ชอบน้ำมากกว่าเส้นใยสแตนเลสซึ่งเป็นลักษณะที่จำเป็นสำหรับการเลือกตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์
- b. การปรับรูปแบบการวางตัวกลางโดยเลือกใช้ความหนาตัวกลาง และจำนวนชั้นที่เหมาะสมจะสามารถช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์
- c. จากการศึกษาผลกระทบจากอัตราการสูบน้ำเสียต่าง ๆ และผลกระทบจากอัตราการหมุนเวียนน้ำเสียต่าง ๆ พบว่าที่อัตราการสูบน้ำเสีย 5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยที่มีอัตราการหมุนเวียนน้ำเสียเป็น 100% จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดีที่สุด

- d. ผลการวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์กับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันอื่น ๆ เพื่อลดผลกระทบจากน้ำมันที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม และนำน้ำมันที่แยกออกมาที่กลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ใหม่ในอนาคต
- e. แนวความคิดในการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคน้ำมันในน้ำ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกับการลดลงของพื้นที่ใต้กราฟการกระจายอนุภาคมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีที่เวลาการบำบัดต่างๆ ต่อไป

## 6. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- a. การพัฒนาอุปกรณ์หรือระบบสร้างฟองอากาศขนาดเล็กเพื่อเพิ่มค่าสัดส่วน a/G
- b. การประยุกต์ใช้แนวทางการปรับสภาพผิวฟองอากาศให้มีความชอบน้ำมันยิ่งขึ้น (Reactive oil bubble)
- c. การพัฒนาแนวทางการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของตัวกลางโคอะเลสเซอร์ให้ชอบน้ำมันยิ่งขึ้น
- d. การประยุกต์ใช้แนวทางการออกซิเดชันขั้นสูงร่วมกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันชั้นพื้นฐาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม
- e. การพัฒนาและยืนยันสมการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดยประยุกต์ใช้น้ำมัน สารลดแรงตึงผิว รวมไปถึงระบบบำบัดที่มีขนาดและสภาพการทำงานอื่นๆ เป็นต้น

## 7. Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

---

### 1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1. Painmanakul P., Sastaravet P., Lersjintanakarn S. and Khaodhiar S. Effect of bubble hydrodynamic and chemical dosage on treatment of oily wastewater by Induced Air Floatation process (IAF). Chemical Engineering Research and Design (under review)
2. Pisut Painmanakul, Kotchakorn Kongkangwarn, and Nattawin Chawaloeshonsiya. Treatment of oily wastewater by fibrous coalescer process: Stage coalescer and model prediction. Chemical Engineering Research and Design (under correction process)

### 2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- เชิงสาธารณะ ได้มีความร่วมมือกับกับทาง บริษัทไทยคาร์บอนแบล็ค จำกัด (มหาชน) เพื่อพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน รวมไปถึงการนำกลับน้ำมันและผงคาร์บอนแบล็ค ด้วยกระบวนการบำบัดแบบผสมผสานระหว่างกระบวนการทำให้ลอย โคอะเลสเซอร์ และกระบวนการทางเคมี
- เชิงวิชาการ ได้มีการพัฒนาการเรียนการสอนโดยนำองค์ความรู้เกี่ยวกับการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียไปบรรยายในรายวิชาหน่วยปฏิบัติการด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (2107662) และวิชากระบวนการถ่ายเทมวลสารและการแยกมวลสาร (2107665) รวมไปถึงสร้างนักวิจัยใหม่ (นิสิตระดับปริญญาโทจำนวน โดยมีรายละเอียดดังนี้
  - นายประจักษ์ ศาสตรเวช “การทำลายเสถียรภาพของน้ำปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันร่วมกับสารลดแรงตึงผิว และทำการแยกด้วยกระบวนการอินดิคซ์แอร์โฟลเทชัน” หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
  - นางสาวสิริพร เลิศจินตนาการ : การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเครื่องในรูปอิมัลชันด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัวร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (TREATMENT OF LUBRICANT OILY EMULSION WASTEWATER BY COMBINING FLOATATION AND COAGULATION PROCESS) หลักสูตรปริญญาการจัดการสิ่งแวดล้อม สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
  - นางสาวกชกร ก้องกังวาลย์ “การปรับปรุงประสิทธิภาพโคอะเลสเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว” หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อยู่ระหว่างทำวิทยานิพนธ์
  - นายวุฒิวัด หล่อตระกูล “การแยกอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียจากสถานบริการน้ำมันด้วยกระบวนการโคอะเลสเซนซ์ที่ใช้เส้นใยสแตนเลสและเส้นใยสแตนเลสที่ปรับปรุงพื้นผิว” หลักสูตร ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อยู่ระหว่างทำวิทยานิพนธ์

- นางสาวสุดสิริ จิตสุภวัฒน์ “การบำบัดและการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสถิติกโคอะเลสเซอร์” หลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อยู่ระหว่างทำวิทยานิพนธ์

### 3. อื่นๆ

- ประจักษ์ ศาสตรเวช และ พิสุทธิ เพียรมนกุล. “การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการอินดิคซ์แอร์โฟลเทชัน (Treatment of Oily Wastewater Containing Surfactant by Induce Air Floatation Process (IAF))”. เอกสารประกอบ (Proceeding) การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 7 ประจำปี 2551
- กชกร ก้องกังวาลย์ และ พิสุทธิ เพียรมนกุล. “การพัฒนากระบวนการโคอะเลสเซอร์สำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและสารลดแรงตึงผิว (Development of Coalescence process for treatment of oily wastewater containing surfactant)”. เอกสารประกอบ (Proceeding) การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 7 ประจำปี 2551
- Siriporn Lersjintanakarn and Pisut Painmanakul. Treatment of lubricant oily wastewater containing surfactants by combining the floatation and coagulation processes) Proceeding of the 8<sup>th</sup> National Environmental Conference (2009)
- Sutsiri Titasupawat, Prajak Sastaravet, Kotchakorn Kongkangworn and Pisut Painmanakul. Treatment of oily wastewater by Modified Induced Air Floatation process (MIAF) Proceedings of the 14th Thailand-Korea conference (2008)
- Nattawin Chawaloephonsiya, Chotiga Suwangindachai and Pisut Painmanakul. Treatment of oily wastewater by fibrous coalescer process: liquid recirculation and model prediction Proceedings of the 15th Thailand-Korea conference (2009)
- พิสุทธิ เพียรมนกุล. “เทคโนโลยีการบำบัดและการใช้ประโยชน์จากน้ำมันปนเปื้อนในน้ำเสีย.” วารสารสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย ประจำปี 2552
- โชติกา สุวรรณจินดาชัย ญัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา และพิสุทธิ เพียรมนกุล “การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันร่วมกับสารลดแรงตึงผิวด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Treatment of oily wastewater in emulsion form by using coalescer)” รายงานโครงการทางวิศวกรรมประจำปีการศึกษา 2550
- ดิษยพงศ์ หกสุวรรณ ธนวัฒน์ จินจักษ์ และพิสุทธิ เพียรมนกุล “การเพิ่มประสิทธิภาพการแยกและบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่ทำ จากวัสดุเซรามิกจากระบบปรับอากาศในกระบวนการทำให้อลอยตัว” รายงานโครงการทางวิศวกรรมประจำปีการศึกษา 2551