

การบำบัดและการแยกน้ำเสียปน เปื้อนน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการ อิเล็กโทรสตาทิกโคอะเลสเซอร์

สุดสิริ ลีตสุภวัฒน์ และ พิสุทธิ เพียรมนกุล*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

E-mail : namoun_ny@hotmail.com, pisut.p@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ โดยประยุกต์ใช้กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ จากการศึกษาด้วยการเดินระบบแบบทีละเท พบว่าการเลือกใช้ขั้วอะลูมิเนียมที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตรให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าการใช้ขั้วเหล็กและขั้วแกรไฟต์ที่ระยะห่างต่างๆ ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกการแยกด้วยการรวมตะกอนทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ทั้งในด้านความสามารถในการละลายของไอออนประจุบวกเพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมัน ความว่องไวในการทำปฏิกิริยา รวมถึงข้อจำกัดด้านอุทกพลศาสตร์ในการลอยตัวของฟองก๊าซที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 5 ลิตร/ชั่วโมงนั้น พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดกว่า 2 เท่า (จาก 35 เป็น 70 เปอร์เซ็นต์) รวมถึงเพิ่มความหนาของชั้นน้ำมันเข้มข้นด้านบน เมื่อเดินระบบที่ค่าความต่างศักย์ต่ำๆ โดยแนวทางดังกล่าวสัมพันธ์กับกลไกการรวมอนุภาคทางไฟฟ้า ซึ่งเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในอนาคตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดและการนำกลับน้ำมันจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความคงตัวสูง

คำสืบค้น

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม, การรวมตะกอนทางไฟฟ้า, อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์, กลไกการรวมอนุภาคทางไฟฟ้า, การนำกลับน้ำมันจากน้ำเสีย

TREATMENT AND SEPARATION OF PALM OILY-WASTEWATER BY ELECTROSTATIC COALESCER PROCESS

Sutsiri Titasupawat and Pisut Painmanakul*

Department of Environmental Engineering,
Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Bangkok, Thailand 10330
E-mail: namoun_ny@hotmail.com, pisut.p@chula.ac.th*

ABSTRACT

The objective of this research was to study the treatment of palm oily-wastewater containing with anionic surfactant by combining Electro-coagulation (EC) and Coalescer processes. In batch system, the result has shown that the highest treatment efficiencies were obtained with 3 cm aluminum electrode: the difference of electro-coagulation/flotation mechanism, electrode dissolution and related bubble hydrodynamic / mixing parameters should be responsible for these results. By applying the suitable Electro-coagulation system with coalescer at 5 L/hr as continuous liquid flow rate, the treatment efficiencies can be enhanced for 2 times (from 35% to 70%) as well as, the oil layer thickness, especially at low applied voltage. In conclusion, this corresponds with electrostatic coalescence mechanism for applying, in future, in order to augment the treatment efficiency, and also the oil recovery from stabilized oily-wastewater.

KEYWORDS

palm oily-wastewater, electro-coagulation, Coalescer, electrostatic coalescence mechanism, oil recovery

I. บทนำ

น้ำมันจัดเป็นสารปนเปื้อนชนิดหนึ่งที่มักพบในน้ำเสีย ทั้งในน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันมีอยู่หลายรูปแบบ คือ น้ำมันที่อยู่ในรูปฟิล์มลอยอยู่บนผิวน้ำ น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว และน้ำมันที่สามารถละลายน้ำได้ แต่ที่ก่อให้เกิดผลกระทบมากที่สุดคือ น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว จะมีเสถียรภาพและยากต่อการบำบัดมากที่สุด โดยทั่วไป น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการตกตะกอน การทำให้ลอย การใช้โคอะเลสเซอร์ อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน การดูดซับ กระบวนการกรองและการกลั่นหรือการเพิ่มอุณหภูมิ เป็นต้น [1]

การประยุกต์ใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (Coalescer) จัดเป็นแนวทางการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความคงตัวต่ำ (Less-stabilized oily emulsion) โดยอนุภาคน้ำมันจะไหลผ่านชั้นตัวกลางที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic media) เพื่อเพิ่มโอกาสในการสัมผัสและรวมตัวของอนุภาค ทำให้อนุภาคน้ำมันขนาดเล็กรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มสูงขึ้นของความเร็วในการแยกอนุภาคน้ำมันจากเฟสน้ำตามกฎของสโตก (Stoke's law) ถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้และบำรุงรักษาง่าย แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องการบำบัดหรือการแยกอนุภาคน้ำมันที่มีเสถียรภาพ (10 ไมครอน) และการเดินระบบด้วยอัตราการไหลสูงๆ [2]

ในปัจจุบัน กระบวนการรวมอนุภาคทางไฟฟ้า (Electrostatic coalescence process) จัดเป็นอีกหนึ่งแนวทางการบำบัดและแยกอนุภาคน้ำมันออกจากน้ำเสีย โดยประยุกต์ใช้หลักการของการผ่านสนามไฟฟ้าในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมันปนเปื้อนสูง เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันและเพิ่มความสามารถในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันที่เคลื่อนผ่านบริเวณดังกล่าวถูกทำลายเสถียรภาพ ดังนั้น อนุภาคน้ำมันที่อยู่ใกล้กันจึงสามารถรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่มากขึ้นและเคลื่อนตัวขึ้นสู่ผิวน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3] นอกจากนี้ ระหว่างเดินระบบข้างต้นยังอาจเกิดกระบวนการรวมและการลอยตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro-Coagulation/Flotation) ได้อีกด้วย [3, 4] เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (REDOX process) หรือการสลายตัวขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งสอดคล้องกับชนิดของขั้วไฟฟ้า (แอโนดและแคโทด) ที่เลือกใช้ อาทิ ขั้วอะลูมิเนียม ขั้วเหล็กและขั้วแกรไฟต์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1

ปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้า

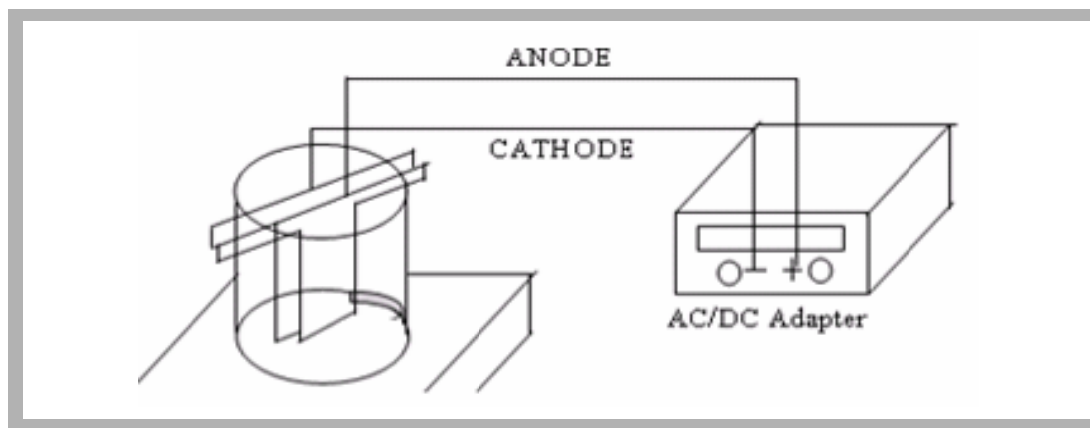
ขั้วไฟฟ้า	Al	Fe	Gr
Oxidation	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{e}^-$	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
Reduction	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$
Redox	$2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{Al}^{3+} + 6\text{OH}^-$	$2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{Fe}^{2+} + 6\text{OH}^-$	$4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{OH}^-$

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าส่วนใหญ่จะแยกศึกษาระหว่างอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์กับกระบวนการทางไฟฟ้า [1 - 4] ซึ่งทั้งสองวิธีนี้สามารถให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้น รวมถึงเป็นแนวการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดรวมถึงการนำกลับอนุภาคน้ำมันจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งหมายที่จะพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดและแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียที่มีความคงตัวสูงด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการ

ทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เพื่อเข้าใจถึงกลไกการทำงาน ปัจจัยสำคัญ และแนวทางการออกแบบที่เหมาะสม

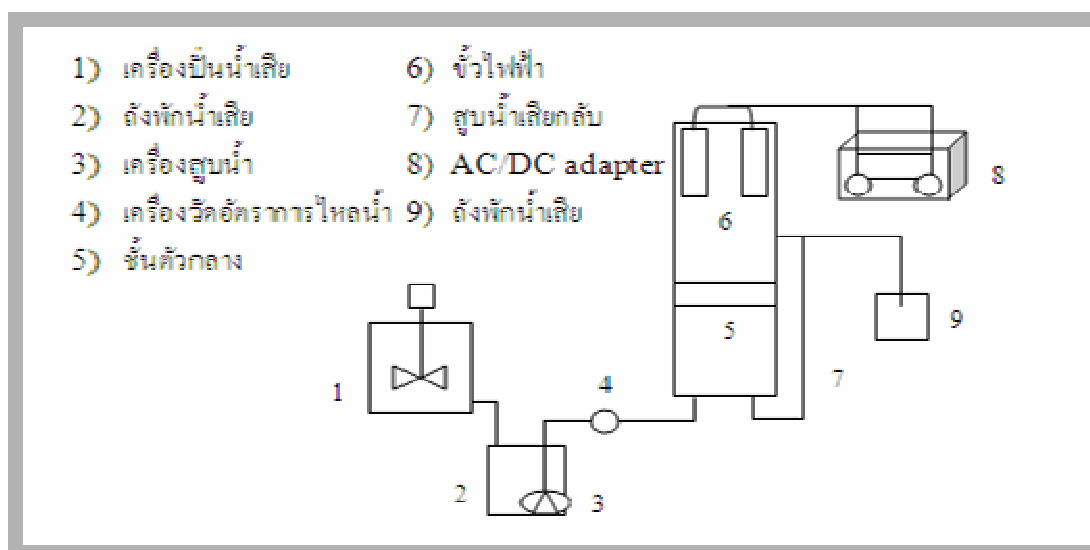
II. อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ในการศึกษาทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความคงตัวสูงจากน้ำมันปาล์มความเข้มข้น 5 กรัม/ลิตร ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Sodium Dodecyl Sulfate, SDS) ที่ความเข้มข้น 1 CMC [5] โดยข้อไฟฟ้า 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลองคือ ขั้วอะลูมิเนียม ขั้วเหล็ก และขั้วแกรไฟต์ สำหรับภาพรวมชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับชุดการทดลองที่ 1 ถึง 4 ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 1

แผนผังแสดงการต่อชุด
อุปกรณ์กระบวนการ
รวม และการลอย
ตะกอนด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 2

แผนผังแสดงการต่อชุด
อุปกรณ์กระบวนการอิ
เล็กโทรลิตาติกโคอะ
เลสเซอร์

2.1 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ เลือกใช้เส้นใยโพลีเอสเตอร์ (Polyester base) สำหรับกรองน้ำตู้ปลา ซึ่งได้มีการศึกษาคุณสมบัติและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานในงานวิจัยที่ผ่านมา [6] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3

ตัวกลางโคอะเลสเซอร์
ที่ใช้ในการทดลอง

2.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ทำการปั่นกวนน้ำเสียด้วยเครื่องเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แล้วปั๊มเข้าสู่เครื่องวัดอัตราการไหลผ่านเข้าสู่อุปกรณ์โดยวางขั้วไฟฟ้าไว้ภายในที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านเครื่องแปลงไฟฟ้าเป็นกระแสตรงและทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่จุดน้ำออกตามเวลา

1. ศึกษากระบวนการทางไฟฟ้าในด้านชนิดขั้วไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างขั้วไฟฟ้า และการสลายขั้วไฟฟ้า โดยทำการทดลองแบบที่ละเท ใช้ตัวอย่าง 0.75 ลิตร และระยะเวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที (รูปที่ 1)
2. ศึกษาการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพด้วยวิธีจาร์เทสต์ (กวนเร็ว 100 รอบต่อนาที นาน 1 นาที และกวนช้า 30 รอบต่อนาที นาน 40 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที) [5] โดยใช้สารส้มและเพอร์ริกคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์
3. ศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลน้ำเสียและการเติมสารเคมีสำหรับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์โดยใช้ตัวกลางแบบเส้นใยพลาสติกเนื่องจากมีค่าความไม่ชอบน้ำสูง [6] และมีการเติมสารเคมีทำลายเสถียรภาพ (สารส้ม)
4. ศึกษากระบวนการทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่เดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยวิเคราะห์ผลกระทบของชนิดและตำแหน่งขั้วไฟฟ้า รวมไปถึงค่าความต่างศักย์ในการเดินระบบ (รูปที่ 2)

2.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ เพื่อคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน รวมถึงเพื่อเข้าใจถึงกลไกการทำงานโดยรวม โดยพิจารณาค่าความขุ่น (Turbidity) และค่าซีโอดี (COD) เพื่อเป็นตัวแทนของปริมาณน้ำมันในเฟสน้ำ สำหรับค่า COD ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด [7] โดยน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าซีโอดีเริ่มต้น (COD_0) เท่ากับ 13,860 มิลลิกรัม/ลิตร นอกจากนี้ ได้วิเคราะห์ขนาดอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) โดยประยุกต์ใช้กล้องจุลทรรศน์ (Nikon รุ่น YS2-H ที่กำลังขยาย 40 เท่า) ร่วมกับอุปกรณ์วัดขนาดอนุภาคน้ำมัน State micrometer ทั้งนี้ ขนาดของอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) ใช้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_{mean}) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแบบชอเทอร์ (D_{32}) เป็นตัวแทน โดยค่า D_{mean} และ D_{32} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ [8]

$$D_{mean} = \sum D_i / n \quad (1)$$

$$D_{32} = \frac{\sum D_i^3}{\sum D_i^2} \quad (2)$$

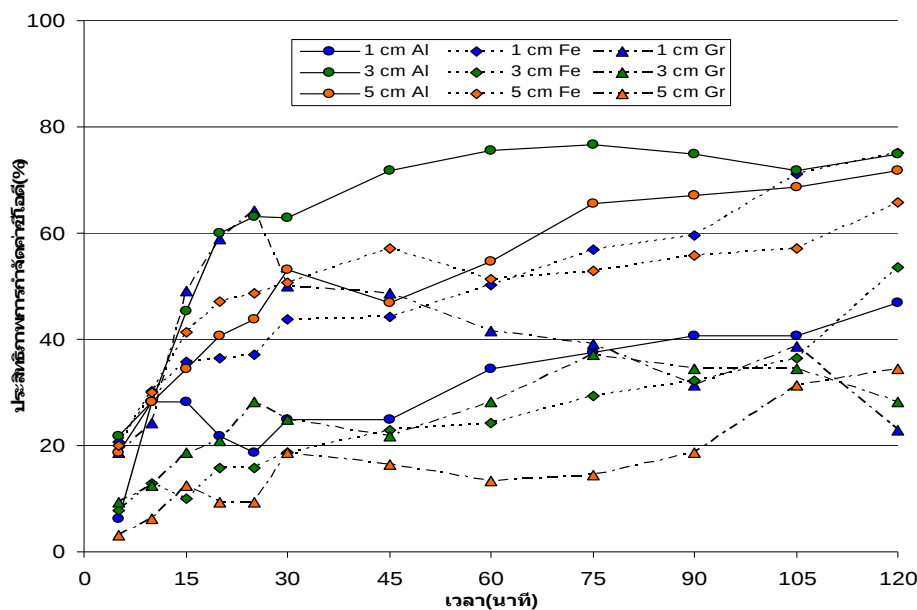
โดยที่ D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมัน และ n คือจำนวนอนุภาคน้ำมัน นอกจากนี้ ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและค่าพีเอชที่ระยะเวลาการเดินระบบต่างๆ ทั้งนี้ ค่าประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวม (Overall treatment efficiency, %Eff) สามารถคำนวณได้จากสมการ 3

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัด (\%Eff)} = \frac{(COD_0 - COD)}{COD_0} \times 100\% \quad (3)$$

III. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 การศึกษากระบวนการรวมและการลอยตะกอนทางไฟฟ้า

รูปที่ 4 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการเดินระบบแบบที่ละเทที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ด้วยการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด (ขั้วอะลูมิเนียม ขั้วเหล็กและขั้วแกรไฟต์) ที่มีระยะห่างที่แตกต่างกัน (1, 3 และ 5 เซนติเมตร) โดยพบว่าสามารถพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) **ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว (Reactive phase)** จะมีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มตามเวลาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยามีความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันสูงประกอบกับฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะช่วยดักจับให้อนุภาคน้ำมันสามารถลอยขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นจะเกิด 2) **ส่วนคงที่ (Steady phase)** ซึ่งจะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากการลดลงของจำนวนอนุภาคน้ำมันซึ่งทำให้ปริมาณการสลายตัวของขั้วไฟฟ้าไม่มีผลต่อการบำบัดโดยรวม [3]



รูปที่ 4

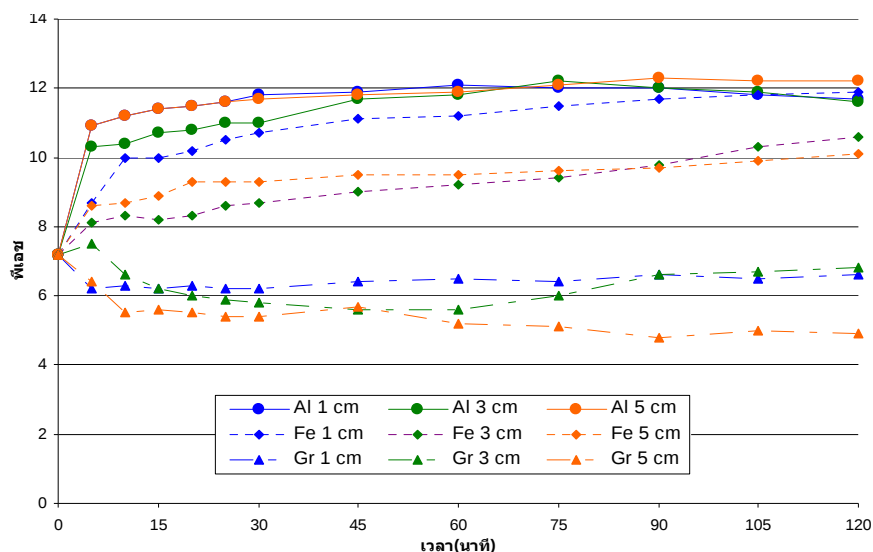
จลศาสตร์ (Kinetic) ของประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากกระบวนการรวมและลอยตะกอนทางไฟฟ้าด้วยขั้วไฟฟ้าต่างๆ

นอกจากนี้ พบว่าการใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีเมื่ออยู่ในน้ำ [3] โดยเมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสขึ้น จะทำให้ขั้วอะลูมิเนียมเกิดการกัดกร่อนและเกิดการละลายน้ำของประจุในรูป Al^{3+} ในขณะที่ ขั้วแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำเพิ่มขึ้น รวมถึงทำให้เกิดผลึกไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งสัมพันธ์กับกลไกการสร้างผลึกเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาจับ (Sweep Coagulation) เพื่อให้เกิดเป็นฟlocsขนาดใหญ่ รวมถึงถูกกำจัดออกด้วยฟองก๊าซไฮโดรเจน (H_2 gas bubble) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดอีกทางหนึ่งด้วย จากกลไกข้างต้นทำให้สามารถให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีค่าค่อนข้างสูงประมาณ 60-70% ในขณะที่การใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้านั้น กล่าวได้ว่าจะเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดและแคโทดคล้ายกับการใช้ขั้วอะลูมิเนียมที่กล่าวถึงข้างต้น แต่มีประสิทธิภาพโดยรวมที่ต่ำกว่าซึ่งมีสาเหตุมาจากความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าจึงมีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 50 - 60% [4] ส่วนการใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าจะเกิดกลไกการลอยตะกอนอย่างเดียวไม่มีการทำลายเสถียรภาพเกิดขึ้น จึงให้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำ กล่าวคือเมื่อเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสที่ขั้วแอโนดจะไม่เกิดการแตกตัวเนื่องจากมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้น้อยจึงไม่มีไอออนของโลหะช่วยในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันและการรวมตะกอนแต่จะเกิดฟองก๊าซออกซิเจนแทน และที่ขั้วแคโทดจะ

เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับกระบวนการลอยตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro-Floatation process) โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด (ประมาณ 20-40%) นอกจากนี้ จากการให้ไฮโดรเจน (H^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่ขั้วแอโนดและแคโทด ตามลำดับนั้น [9] ยังส่งผลทำให้ค่าพีเอชของน้ำไม่สูงขึ้นมากนักเมื่อเทียบกับการใช้งานขั้วไฟฟ้าสองชนิดข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 5

รูปที่ 5

จลศาสตร์ (Kinetic) การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชที่ได้จากกระบวนการรวมและลอยตะกอนทางไฟฟ้าด้วยขั้วไฟฟ้าต่างๆ



ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะห่างในการวางขั้วไฟฟ้ามีผลต่อค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดในระบบ (สนามไฟฟ้า = ศักย์ไฟฟ้า/ระยะห่างระหว่างขั้ว) กล่าวได้ว่าการวางขั้วไฟฟ้าที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร จะเกิดฟองก๊าซจำนวนมาก ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มสูงขึ้นของพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของฟองอากาศ (Bubble interfacial area, a) ทำให้สามารถดักจับอนุภาคน้ำมันได้มากขึ้น [7] โดยเห็นได้จากค่าประสิทธิภาพการบำบัดในกรณีที่ใช้ขั้วแกรไฟต์ที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับสองขั้วไฟฟ้าที่เหลือ อย่างไรก็ตาม พบว่าขั้วแกรไฟต์มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานโดยเฉพาะคือเมื่อความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น รวมถึงเป็นกลไกการลอยตะกอนด้วยไฟฟ้าอย่างเดียว จึงทำให้การเลือกใช้งานขั้วอะลูมิเนียมจะมีประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าขั้วแกรไฟต์โดยเฉพาะที่เวลาการบำบัดสูงๆ สำหรับที่ระยะห่าง 3 และ 5 เซนติเมตร ทั้งที่มีสนามไฟฟ้าต่ำกว่าและมีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดเท่านั้น ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวน่าจะเป็นผลมาจากการละลาย Al^{3+} ที่ช่วยในการทำลายเสถียรภาพจึงเกิดการรวมตะกอนขึ้นภายในระบบและถูกแยกออกด้วยการทำให้ลอยตัวด้วยฟองก๊าซไฮโดรเจน (ดังที่กล่าวถึงข้างต้น)

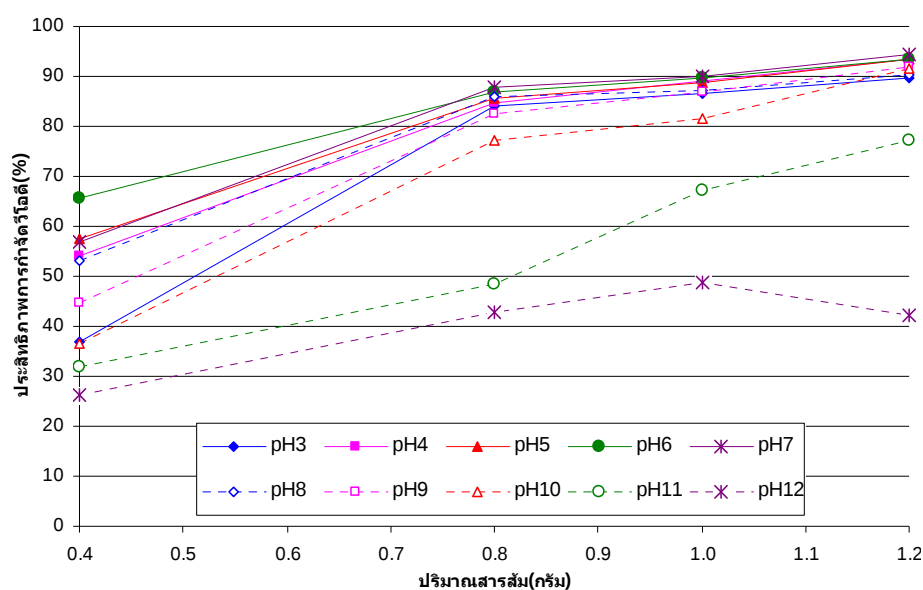
ทั้งนี้ ความปั่นป่วน (Turbulent condition) ภายในเฟสน้ำเสียจากจำนวนฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ค่าสนามไฟฟ้าสูงๆ นั้น จะส่งผลเสียต่อการกวนผสมหรือสร้างสัมผัสอย่างทั่วถึงภายในระบบ ดังนั้นพบว่าที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร จึงให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุดในกรณีของขั้วอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตาม ในกรณีของขั้วเหล็กซึ่งไอออน Fe^{3+} มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำกว่า Al^{3+} ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของโมเลกุลนั้น (มวลโมเลกุล: Al = 26.98, Fe = 55.85 กรัมต่อโมล) อาจเป็นข้อจำกัดต่อการเคลื่อนที่หรือการแพร่ของประจุ Fe^{3+} ดังนั้นที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร จึงสามารถให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด เนื่องจากระบบได้ข้อดีทั้งจากการมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมากและความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคน้ำมันที่มีความคงตัว นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ 1 เซนติเมตร จะมีค่าพีเอชสูงกว่าการวางที่ 3 และ 5 เซนติเมตร (ดังแสดงในรูปที่ 5) เนื่องจากมีค่าสนามไฟฟ้า (E) ที่สูงที่สุดจึงส่งผลให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน

ออกมามากที่สุด แต่เนื่องจากค่าพีเอชที่วัดได้มีค่ามากกว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับทำปฏิกิริยา (7 - 8) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุดเท่ากับ 80% เท่านั้น ดังนั้น กล่าวได้ว่าการควบคุมค่าพีเอชของเฟสน้ำเสียมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการเดินระบบบำบัดทางไฟฟ้าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น จึงควรมีการคุมค่าอัลคาไลน์ดีของน้ำเสียให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

โดยสรุป กล่าวได้ว่าถ้าระยะห่างเพิ่มขึ้นค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลง [3] และส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพในการบำบัด นอกจากนี้ เราควรพิจารณาถึงผลกระทบจากความปั่นป่วนในเฟสน้ำเสียและความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าที่เลือกใช้ ดังนั้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดควรวางขั้วอะลูมิเนียมไว้ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร (ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 70%) และวางขั้วเหล็กไว้ที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร โดยสภาวะข้างต้นจะถูกประยุกต์ใช้สำหรับการทดลองต่อไปเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าศักย์ไฟฟ้าของระบบ ในขณะที่ขั้วแกรไฟต์เนื่องจากเป็นกระบวนการลอยตะกอนทางไฟฟ้า ซึ่งเหมาะสมกับการจัดการอนุภาคน้ำมันที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูง จึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้สำหรับการทดลองต่อไป

3.2 การศึกษากระบวนการทางไฟฟ้าเทียบกับการเติมโคแอกกูแลนต์ด้วยวิธีจาร์เทสต์

ในส่วนนี้ วิธีจาร์เทสต์ (Jar test method) จะถูกประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารเคมีและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดอนุภาคน้ำมันคงตัวที่แขวนลอยในน้ำเสีย ซึ่งประกอบด้วยสองกลไกหลักคือ ส่วนแรกจะเป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคด้วยการเติมสารเคมีลงในถังกวนเร็วซึ่งจะช่วยให้การกระจายตัวของสารเคมีและการสัมผัสกับอนุภาคน้ำมัน ส่วนที่สองจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงโดยการกวนช้า ซึ่งตะกอนจะรวมกันเป็นฟล็อกและตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้ [5] โดยในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบกระบวนการทางไฟฟ้ากับกระบวนการทางเคมีทั่วไป โดยรูปที่ 6 และ 7 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดในช่วงพีเอช 3-12 และปริมาณสารเคมีในช่วง 0.4-1.2 กรัม/ลิตร สำหรับสารส้มและเพอร์ริกคลอไรด์ ตามลำดับ

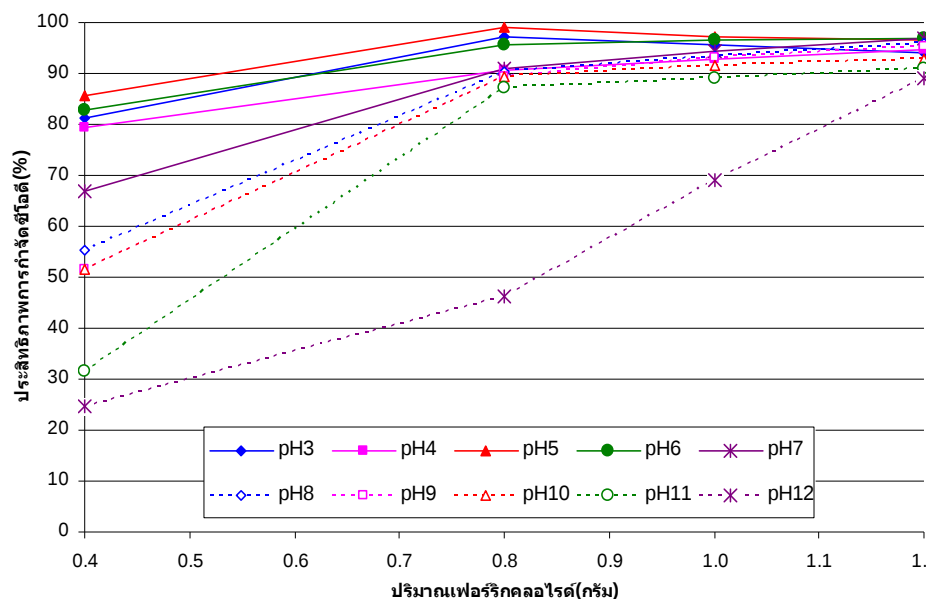


รูปที่ 6

ประสิทธิภาพการบำบัดด้วยสารส้มที่ความเข้มข้นและพีเอชต่างๆ

รูปที่ 7

ประสิทธิภาพการ
บำบัดด้วยเฟอริกคลอ
ไรด์ที่ความเข้มข้นและ
พีเอชต่างๆ

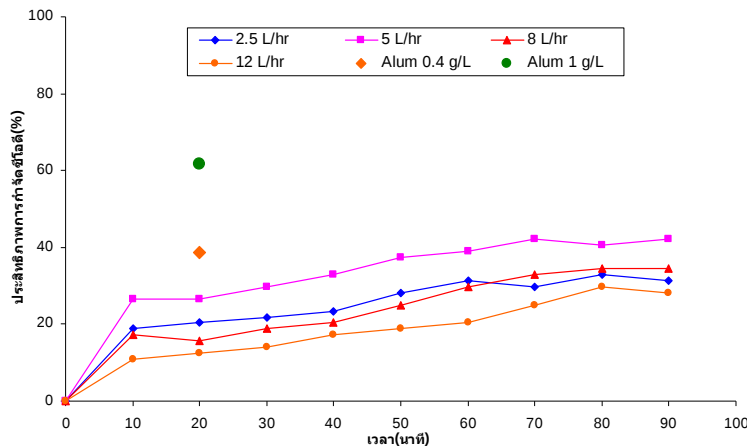


จากการทดลองพบว่าปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมคือ 1 กรัม/ลิตร โดยที่สารส้มจะทำงานได้ดีในช่วงพีเอชเริ่มต้น 6 - 7 (ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 85%) ส่วนเฟอริกคลอไรด์จะทำงานได้ดีในช่วงพีเอชเริ่มต้น 5 - 6 (ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 90%) ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ทั้งนี้ การเติมเฟอริกคลอไรด์จะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าเนื่องจากฟล็อกที่เกิดจากสารส้ม (เป็นปุ๋ยสีขาว) มีความชอบน้ำมากกว่าฟล็อกที่เกิดจากเฟอริกคลอไรด์ซึ่งอัดตัวกันแน่นและมีขนาดใหญ่ [10] นอกจากนี้ กล่าวได้ว่าการบำบัดทางเคมีด้วยวิธีจาร์เทสต์ซึ่งมีการเติมสารเคมีลงน้ำเสียโดยตรงที่ทำการควบคุมค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมนั้น จะสามารถให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูง (90%) กว่า การบำบัดด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า (80%) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยอาจมีสาเหตุจากปัจจัยการกวนผสม (Mixing condition) การที่ไม่มีการปรับหรือควบคุมค่าพีเอชเริ่มต้นของเฟอริกคลอไรด์ (pH adjustment) รวมถึงปริมาณการละลายของไฮดรอกไซด์จากขั้วไฟฟ้าที่อาจมีค่าต่ำกว่าปริมาณสารเคมีที่เติมในวิธีจาร์เทสต์ (1 กรัม/ลิตร) ดังนั้น จึงสนใจที่จะศึกษาการเติมสารเคมีลงในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ เพื่อลดเวลาและประหยัดพลังงานในการกวนผสมสารเคมี รวมถึงอาจช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมของระบบ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.3 การศึกษาการประยุกต์อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีความคงตัวสูง

โดยทั่วไป วัสดุที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์นั้น ควรเลือกวัสดุที่ชอบน้ำมันหรือมีความไม่ชอบน้ำ (Oleophilic or Hydrophobic material) ซึ่งชอบที่จะให้น้ำมันเกาะมากกว่าน้ำ และเกิดการยึดเกาะของน้ำมันที่ผิวของตัวกลางมีค่าสูงจึงสามารถรวมตัวกันได้ดีก่อนที่จะหลุดออกจากชั้นตัวกลาง โดยในการทดลองนี้เลือกใช้เส้นใยกรองน้ำตุ้มปลาที่ทำจากโพลีเอสเตอร์ (Polyester base) มีค่ามุมสัมผัสระหว่างตัวกลางกับเมื่อน้ำมัน 87.88 องศา และน่าจะมีเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานเป็นตัวกลางโคอะเลสเซอร์ [6] และจากการทดลองพบว่า ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมในการเดินระบบคือ 5 ลิตร/ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 25 - 40% ทั้งนี้ ค่าอัตราการไหลที่ได้สัมพันธ์กับค่าความเร็วในการไหลผ่านตัวกลางที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ กล่าวคืออยู่ในช่วง 0.83 - 2.18 มิลลิเมตรต่อวินาที [11] เนื่องจากที่อัตราการไหลดังกล่าวส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการชน (Collision efficiency) และการเกาะติด (Attachment efficiency)

ระหว่างตัวกลางและอนุภาคน้ำมันที่เหมาะสม โดยที่เมื่ออัตราการไหลมีค่าที่ต่ำเกินไปจะทำให้อนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่แบบบราวเนียนและเกิดการชนกันเองน้อยลง ในขณะที่ถ้าอัตราการไหลสูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนภายในตัวกลางซึ่งส่งผลทำให้อนุภาคน้ำมันจึงเกิดการแตกตัวและหลุดออกจากตัวกลางได้ง่าย ดังนั้น สภาพการทำงานทั้งสองกล่าวได้ว่าส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ [11]



รูปที่ 8

ประสิทธิภาพการบำบัดด้วยอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่อัตราการไหลของน้ำเสียและความเข้มข้นของสารส้มต่างๆ

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการเดินระบบรวมกับการเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 0.4 และ 1 กรัม/ลิตร พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากโคแอกกูแลนต์มีผลต่อการทำลายเสถียรภาพในกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ (Charge neutralization) และกลไกการห่อหุ้มคอลลอยด์ (Sweep coagulation) ของอนุภาคน้ำมัน [5] โดยการเติมสารส้มในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ที่ 0.4 กรัม/ลิตร (ความเข้มข้นต่ำ) มีผลทำให้อนุภาคน้ำมันรวมตัวกันโดยมีสารส้มเป็นตัวเชื่อมทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยสู่ผิวน้ำอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและส่วนที่เหลือจะลอยขึ้นอย่างช้าๆ ในขณะที่การเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร (ความเข้มข้นสูง) พบว่าอนุภาคน้ำมันจะจับตัวกับสารส้มเกิดเป็นตะกอนขนาดใหญ่มากและติดค้างอยู่ที่ตัวกลาง ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อความดันลดและการอุดตันที่เกิดขึ้นภายในชั้นตัวกลาง ดังนั้น ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดของการเติมสารส้มในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ คือ 0.4 กรัม/ลิตร เนื่องจากจะไม่ทำให้เกิดการสะสมของตะกอนขึ้นที่ตัวกลางการกรอง และทำให้มีการรวมของอนุภาคน้ำมันลดลงและเกิดการอุดตันขึ้นที่ตัวกลางได้ [6] ทั้งนี้ จากการทดลองข้างต้นเกี่ยวกับกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้า (Electro-Coagulation process) ทำให้ทราบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าแล้วจะเกิดการละลายของประจุลงสู่ฟอสน้ำ ซึ่งสามารถทำลายเสถียรภาพและเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความคงตัวสูง ในขณะที่การใช้อุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ส่งผลดีทำให้อนุภาคน้ำมันที่ไหลผ่านชั้นตัวกลางเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ รวมถึงการเติมสารส้มเพื่อเป็นสารโคแอกกูแลนต์นั้น ก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้อีกทางหนึ่ง

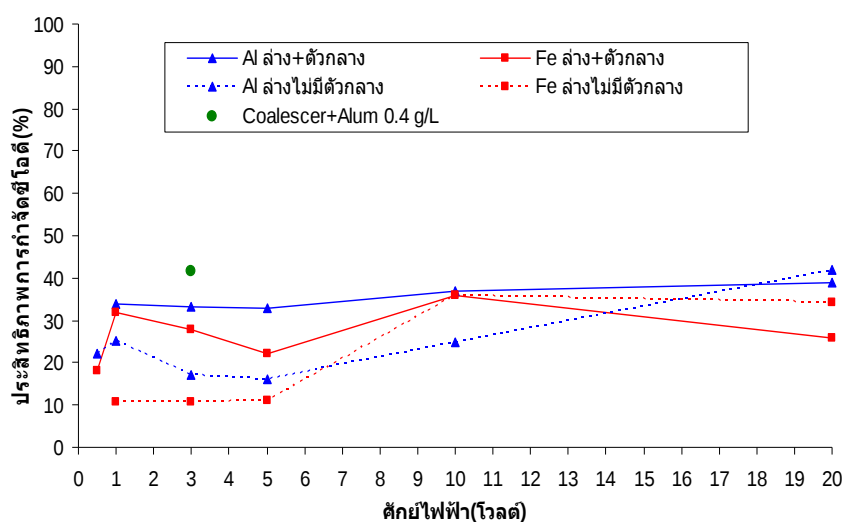
ดังนั้น ในส่วนต่อไปจะเป็นการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้า (วางขั้วไฟฟ้าด้านล่าง) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ เพื่อลดความยุ่งยากในการเติมสารเคมีในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) ซึ่งน่าจะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการบำบัด และการนำกลับน้ำมันจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความคงตัวสูง ในอนาคต

3.4 การศึกษากระบวนการทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์

ในส่วนนี้ การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าจะทำการผ่านกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด) ซึ่งจะเป็นเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นและส่งผลให้อนุภาคน้ำมันที่เคลื่อนผ่านบริเวณดังกล่าวถูกทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ดังนั้น ในขั้นตอนงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าสนามไฟฟ้าที่มีค่าต่ำที่สุด (ค่าศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์) [12] ของการเดินระบบบำบัดในทุกๆ รูปแบบ เพื่อศึกษาจนศาสตร์ของระบบและวิเคราะห์หาระยะเวลาที่สภาวะคงตัว (Steady state time) สำหรับนำไปใช้วิเคราะห์ผลกับความต่างศักย์อื่นๆ ในการวิเคราะห์ค่าซีไอดีและคำนวณค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะคงตัว โดยพบว่าเวลาที่เหมาะสมคือ 70 นาที ซึ่งค่าดังกล่าวจะนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ผลในกรณีอื่นๆ ต่อไป

รูปที่ 9

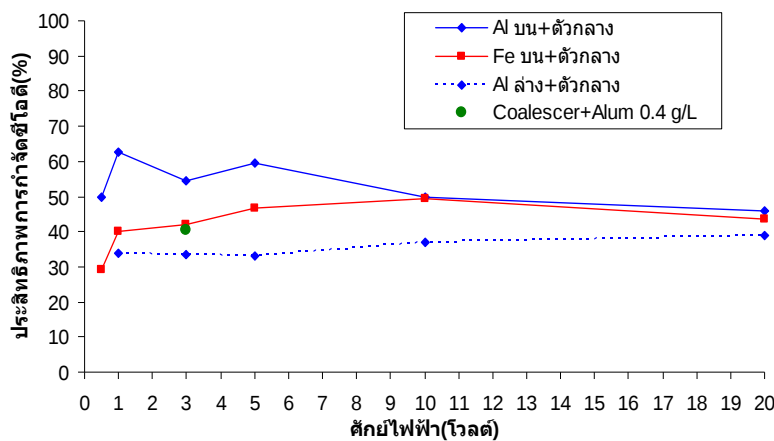
ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อวางขั้วไฟฟ้าด้านล่าง (ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็ก) แบบมีตัวกลางกับไม่มีตัวกลางโคอะเลสเซอร์



รูปที่ 9 แสดงประสิทธิภาพการบำบัด (เดินระบบแบบต่อเนื่อง) ในกรณีที่วางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่างทั้งแบบมีตัวกลางและแบบที่ไม่มีตัวกลางในโคอะเลสเซอร์ ด้วยการประยุกต์ใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตรและ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ พบว่าในกรณีที่ไม่มีตัวกลางขั้วอะลูมิเนียมจะสามารถบำบัดน้ำเสียได้ประมาณ 20 – 25 % ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้เมื่อเลือกใช้ขั้วเหล็กซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 10% เนื่องจากขั้วอะลูมิเนียมมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเมื่ออยู่ในน้ำ [9] รวมถึงทำให้เกิดผลึกไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งสัมพันธ์กับกลไกการสร้างผลึกเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาจับ (Sweep Coagulation) เพื่อให้เกิดเป็นฟlocsขนาดใหญ่และถูกกำจัดโดยก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทดทำให้สามารถลดค่าซีไอดีของน้ำเสียได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับกรณีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับวางตัวกลางโคอะเลสเซอร์ซึ่งพบว่า ค่าประสิทธิภาพการบำบัดของขั้วอะลูมิเนียมจะมากกว่าขั้วเหล็กคือ 35% และ 30% ตามลำดับ นอกจากนี้ กล่าวได้ว่าการวางขั้วไฟฟ้าด้านล่างและใส่ตัวกลางในโคอะเลสเซอร์ในการเดินระบบนั้น จะให้ค่าการบำบัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันสองครั้ง คือ 1) อนุภาคน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพจากกระบวนการทางไฟฟ้าและ 2) เมื่ออนุภาคน้ำมันเคลื่อนผ่านชั้นตัวกลางนั้น จะเกิดการชนและเกาะติดระหว่างตัวกลางและอนุภาคน้ำมันได้ นอกจากนี้ การใช้ขั้วอะลูมิเนียมจะเกิดกลุ่มของอนุภาคน้ำมัน (ขนาด 2 มิลลิเมตร) เรียงตัวอยู่บริเวณด้านบนรอบๆ ถึงปฏิกิริยา ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีการเติมสารส้ม (Alum feeding system) พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่า (40%) เนื่องจากปริมาณสารเคมีที่สูงกว่าซึ่งส่งผลต่อฟlocsที่เกิดขึ้นที่สะสมช่วยในกลไกการกรองภายใน

ตัวกลางโคเอสเลอร์ อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าวางในโคเอสเลอร์น่าจะมีข้อได้เปรียบตรงที่ลดความยุ่งยากและค่าใช้จ่ายในระบบการเติมสารเคมี

รูปที่ 10 แสดงประสิทธิภาพของการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนที่มีตัวกลางในอุปกรณ์โคเอสเลอร์ด้วยการประยุกต์ใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็กที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตรและ 1 เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่าถ้าใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นขั้วอะลูมิเนียมจะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงถึง 60% ส่วนขั้วเหล็กสามารถบำบัดได้เพียง 40% เนื่องจากระยะห่างของขั้วไฟฟ้าของขั้วเหล็กอยู่ใกล้กันมากกว่าจึงมีความหนาแน่นของฟองก๊าซมากทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในเฟสน้ำเสีย นอกจากนี้ การที่ไอออน Fe^{3+} มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำกว่า Al^{3+} จึงส่งผลเสียต่อการเคลื่อนที่หรือการแพร่ของประจุ Fe^{3+} รวมทั้งประสิทธิภาพการบำบัดด้วย



รูปที่ 10

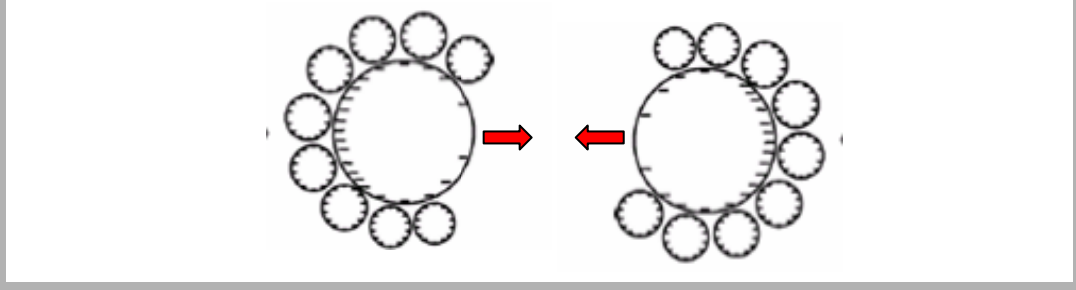
ประสิทธิภาพการบำบัด
เมื่อวางขั้วไฟฟ้าด้านบน
(ขั้วอะลูมิเนียมและขั้ว
เหล็ก) แบบมีตัวกลาง
กับไม่มีตัวกลางโคเอส
เลอร์

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาเมื่อเปรียบเทียบการใช้ขั้วอะลูมิเนียมวางด้านบนกับการวางไว้ด้านล่างพบว่า การวางไว้ด้านบนจะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูง (60%) เมื่อเทียบกับการวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านล่าง (35%) ที่ให้ค่าการบำบัดต่ำกว่า รวมถึงสามารถบำบัดได้มากกว่ากรณีการเติมสารส้มซึ่งให้ประสิทธิภาพประมาณ 40% ด้วย โดยที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ จะไม่เกิดเป็นกลุ่มของอนุภาคน้ำมันเหมือนในกรณีที่ผ่านมา แต่จะพบขั้วน้ำมัน (ขนาด 2 - 3 มิลลิเมตร) ลอยอยู่ที่ผิวหน้าและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้ำมันที่วัดได้เท่ากับ 19.88 ไมครอน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากตอนเริ่มต้น (ประมาณ 5 ไมครอน) โดยประสิทธิภาพการบำบัดที่เพิ่มสูงขึ้นนั้น จะสัมพันธ์กับที่ศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ (1 - 5 โวลต์) ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันสองครั้ง คือเมื่ออนุภาคน้ำมันเคลื่อนผ่านชั้นตัวกลางซึ่งเกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันครั้งแรกแล้วนั้น จะเกิดการชนและเกาะติดระหว่างตัวกลางร่วมกับอนุภาคน้ำมันถูกทำลายเสถียรภาพจากกระบวนการทางไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งบริเวณด้านบน ซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การรวมอนุภาคน้ำมันทางไฟฟ้า (Electrostatic Coalescence phenomena) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้หลักการของการผ่านสนามไฟฟ้าต่ำๆ ในกับน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความเข้มข้นสูง [3] เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันและเพิ่มความสามารถในการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งทำให้อนุภาคน้ำมันที่เคลื่อนผ่านบริเวณดังกล่าวถูกทำลายเสถียรภาพ ดังนั้นอนุภาคน้ำมันที่อยู่ใกล้กันจึงสามารถรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่มากขึ้นและเคลื่อนตัวขึ้นสู่ผิวน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ความเสถียรของระบบขึ้นอยู่กับอัตราการรวมตัวของอนุภาค ซึ่งสัมพันธ์กับค่าพลังงานศักย์ที่ขวางกั้นการรวมตัว (Height of potential energy barrier) ระหว่าง 2 อนุภาค ดังนั้น การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจะต้องลดพลังงานระหว่างอนุภาคลง เพื่อลดแรงผลัก (Repulsion force) ระหว่างอนุภาคน้ำมัน

รวมถึงทำให้การเคลื่อนที่ของประจุที่บริเวณผิวสัมผัสของอนุภาคน้ำมัน เพื่อก่อให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น รวมทั้งยังประหยัดค่าเดินระบบด้วย เนื่องจากต้องการค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ เพื่อให้ประจุที่ผิวหน้าอนุภาคน้ำมันเคลื่อนออกเท่านั้น นอกจากนี้ ยังอาจประยุกต์ใช้เพื่อการนำกลับน้ำมันจากน้ำเสีย (Oil recovery from wastewater) ได้อีกทางหนึ่งด้วย

รูปที่ 11

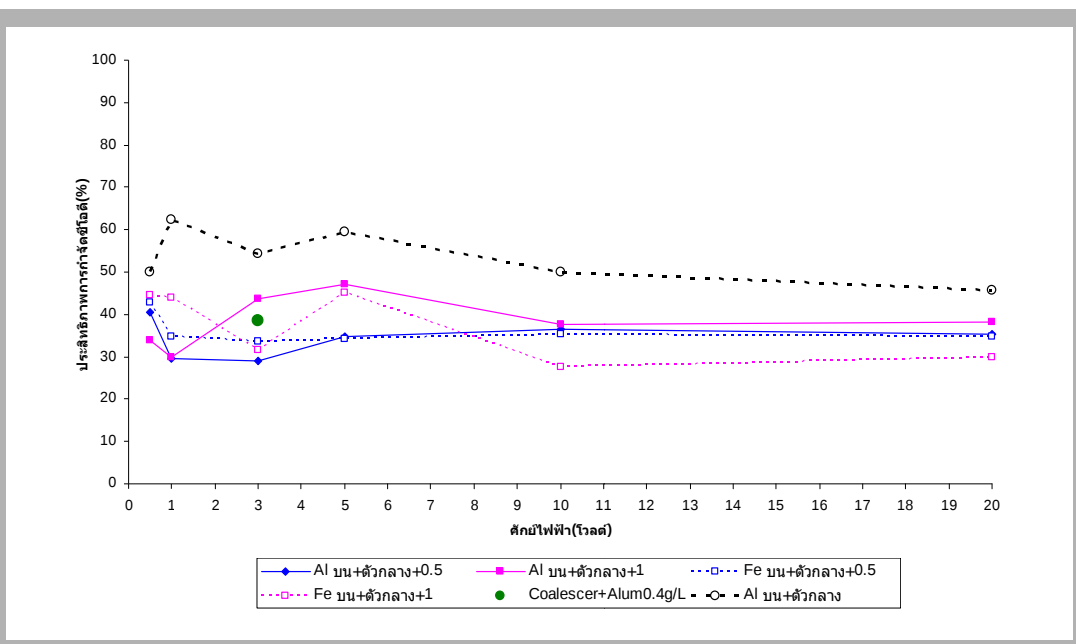
กลไกการรวมตัวของอนุภาคน้ำมันที่สอดคล้องกับสอดคล้องกับปรากฏการณ์การรวมอนุภาคน้ำมันทางไฟฟ้า



ในหัวข้อถัดไป จะทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการข้างต้นด้วยการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution) ชนิด Na_2SO_4 ที่ความเข้มข้นต่างๆ (0.5 และ 1 มิลลิโมลต่อลิตร) เมื่อวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบน โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 12

รูปที่ 12

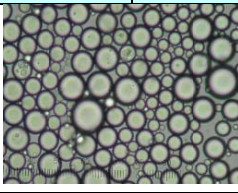
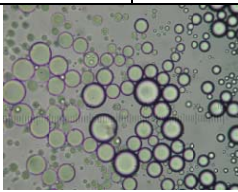
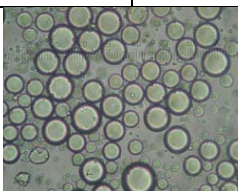
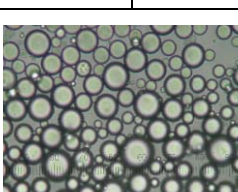
ผลกระทบจากสารอิเล็กโทรไลต์ (Na_2SO_4) ต่อประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อวางขั้วไฟฟ้าด้านบน ในกรณีที่มีและไม่มีตัวกลางโคอะเลสเซอร์



จากรูปที่ 12 กล่าวได้ว่าการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมทั้งจากการใช้ขั้วอะลูมิเนียมและขั้วเหล็ก เนื่องจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Na_2SO_4) มีคุณสมบัติในการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าให้กับสารละลาย ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับประจุที่ละลายออกมาจากขั้วไฟฟ้า (แอโนด) จะเกิดเป็นตะกอนโลหะซัลเฟต [13] ในกรณีนี้ เราจึงพบการลดลงของประสิทธิภาพการบำบัดอย่างชัดเจนโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่การเดินระบบที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ ซึ่งมีปริมาณการละลายของประจุบวกที่ต่ำ นอกจากนี้ เมื่อเติมโซเดียมซัลเฟตลงไปในระบบบนานๆ จะส่งผลให้ระบบแย่งทั้งนี้เนื่องจากการสะสมของเกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) โดยที่เมื่อมีการสะสมของเกลือซัลเฟตเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ นั้นจะส่งผลให้กลายเป็นฉนวนถาวร ซึ่งไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ต่อไป

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาปริมาณฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบพบว่า จะมีสภาพความปั่นป่วน (Turbulent condition) ของเฟสน้ำเสียที่สูงขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ข้างต้นจะสัมพันธ์กับการนำไฟฟ้าที่เพิ่ม

สูงขึ้นของเฟสน้ำเสียจากการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยส่งผลเสียต่อการรวมตัวระหว่างอนุภาคน้ำมันที่ถูกทำลายเสียสภาพแล้ว รวมถึงการแยกอนุภาคดังกล่าวออกจากน้ำเสีย ยกตัวอย่างในกรณีของการวางขั้วไฟฟ้าเหล็กไว้ที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร พร้อมทั้งใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงก็จะยิ่งเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นแม้ว่าน้ำจะใส แต่ก็เกิดฟองก๊าซและตะกอนจำนวนมาก นอกจากนี้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นนั้นยังก่อให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำจนตะกอนหลุดออกมาปนกับน้ำด้านล่างส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าต่ำ (30%) โดยสมมติฐานข้างต้น สอดคล้องกับแนวโน้มการลดลงของน้ำหนักรวมของขั้วไฟฟ้าที่มากขึ้นในกรณีที่มีการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (เมื่อพิจารณาที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะช่วยเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของขั้วไฟฟ้า สังเกตจากปริมาณฟองก๊าซที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ยกตัวอย่างเช่น การลดลงของขั้วอลูมิเนียม (เดินระบบด้วยศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์) ในกรณีที่เติมและไม่เติมสาร Na_2SO_4 ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร จะมีค่าเท่ากับ 0.0256 และ 0.0418 ตามลำดับ ดังนั้น จึงควรเดินระบบด้วยศักย์ไฟฟ้าต่ำเพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูง รวมทั้งยังประหยัดพลังงานมากกว่าด้วยในทางปฏิบัติ โดยตารางที่ 2 แสดงขนาดของอนุภาคน้ำมัน (Oil droplet size) ที่ถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์ร่วมกับอุปกรณ์วัดขนาดอนุภาคน้ำมัน State micrometer รวมถึงความหนาของชั้นน้ำมันด้านบน โดยวางขั้วไฟฟ้าไว้ด้านบนและด้านล่างเพื่อบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลาง

ขั้วไฟฟ้า	ที่ 1 โวลต์	ที่ 5 โวลต์	ที่ 20 โวลต์	$D_{\text{mean}}(\mu\text{m})$	$D_{32}(\mu\text{m})$
Al					
ชั้นน้ำมัน	0.2 cm	1.3 cm	2 cm	17.43	17.93
Fe					
ชั้นน้ำมัน	0.2 cm	1 cm	1.2 cm	16.51	17.03
Al					
ชั้นน้ำมัน	0.3 cm	2 cm	3.8 cm	17.75	18.32
Fe					
ชั้นน้ำมัน	0.3 cm	1.5 cm	2.5 cm	16.85	17.39

ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขนาด
อนุภาคน้ำมันกรณีวาง
ขั้วไฟฟ้าในอุปกรณ์
โคอะเลสเซอร์แบบมี
ตัวกลาง

โดยเมื่อพิจารณาในทุกกรณี พบว่าการวางขั้วอะลูมิเนียมไว้ด้านบนพร้อมทั้งใส่ตัวกลางในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์นั้น จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมที่สูงที่สุด นอกจากนี้ สามารถกล่าวได้ว่าการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมวางด้านบนที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร และเดินระบบด้วยศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ ในอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์แบบมีตัวกลางนั้น จะให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงที่สุด และเป็นการยืนยันว่ากลไกหลักในการบำบัดไม่ได้เกิดจากกลไกการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro-coagulation) หรือกลไกการทำให้ลอย (Electro-flotation) แต่เป็นกลไกการรวมอนุภาคน้ำมันทางไฟฟ้า (Electrostatic Coalescence phenomena) เนื่องจากระบบให้ประสิทธิภาพที่สูงที่การเดินระบบด้วยศักย์ไฟฟ้าต่ำ รวมถึงการที่ได้ขนาดอนุภาคน้ำมันที่ใหญ่ขึ้นและชั้นน้ำมันที่หนาขึ้นในกรณีติดตั้งอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์และวางขั้วไฟฟ้าด้านบน ดังนั้น จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) ในระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและใช้ระยะเวลานานขึ้น เพื่อยืนยันผลการศึกษาลำดับ โดยอาจเป็นแนวทางหนึ่งสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความคงตัวสูง และการนำกลับน้ำมันจากน้ำเสียในอนาคต

IV. สรุปผล

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันปาล์มในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิวด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์ (กระบวนการอิเล็กโทรสตาติกโคอะเลสเซอร์) โดยจากการเดินระบบแบบทีละเท (Batch system) พบว่า ถ้าระยะห่างเพิ่มขึ้นค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลง และส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพในการบำบัด โดยควรพิจารณาถึงผลกระทบจากความปั่นป่วนในเฟสน้ำเสียและความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าที่เลือกใช้ ดังนั้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดควรวางขั้วอะลูมิเนียมไว้ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร (ประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 70%) และวางขั้วเหล็กไว้ที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร ในขณะที่ ขั้วแกรไฟต์มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานโดยเฉพาะคือเมื่อความหนาแน่นของอนุภาคน้ำมันลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นกลไกการลอยตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว โดยเมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์โคอะเลสเซอร์จะได้ว่า ประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงที่สุด (ประมาณ 65%) รวมถึงได้ขนาดอนุภาคน้ำมันและความหนาของชั้นน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) ด้วยอัตราการไหลของน้ำเสีย 5 ลิตร/ชั่วโมง ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ (1 – 5 โวลต์) และวางขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมไว้ด้านบนที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร โดยไม่มีความจำเป็นต้องเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในระบบในอนาคต การเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์และเดินระบบที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำมากๆ (ต่ำกว่า 1 โวลต์) อาจเป็นอีกแนวทางเลือกที่ควรศึกษาทั้งในด้านประสิทธิภาพการบำบัด รวมถึงค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าที่อาจลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ การศึกษาความเป็นไปได้ในการเวียนน้ำกลับของน้ำเสีย (Liquid effluent recirculation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งน้ำมันที่ถูกแยกออกมานั้น น่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ประจำปี 2552

บรรณานุกรม

- [1] B. Wanichkul, "Comparison of ultrafiltration and distillation processes for treatment of cutting oil emulsion." Doctoral dissertation. Department of Environment., The Institut National des Sciences Appliquees of Toulouse, 2000.
- [2] Y. Aurelle. *Treatment of oil-containing wastewater*. Bangkok: Chulalongkorn, 1985.
- [3] T. Ichikawa, K. Itoh, S. Yamamoto and, M. Sumita., "Rapid demulsification of dense oil-in-water emulsion by low external electric field I. Experiment evidence," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Vol. 242, pp. 21-26, Aug. 2004.
- [4] K. Bensadok, S. Benammar, F. Lapique and, G. Nezzal, "Electrocoagulation of cutting oil emulsion using aluminium plate electrode," *Journal of Hazardous Materials*. Vol.152, pp. 423-430, 2008.
- [5] ประจักษ์ ศาสตรเวช, "การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและสารลดแรงตึงผิวด้วยกระบวนการอินดิคซ์แอร์โฟลเทชัน," วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต., ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2551.
- [6] กชกร ก้องกังวาลย์, "การปรับปรุงประสิทธิภาพโคแอสเลเซอร์ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำที่มีสารลดแรงตึงผิว." วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต., ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2552
- [7] P. Painmanakul and G. Hébrard, "Effect of different contaminants on the α -factor: Local experimental method and modeling," *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 86, pp. 1207-1215, 2008.
- [8] C. Chooklin, *Removal of stabilized oil in wastewater emulsion by induced air flotation*. Chulalongkorn University., Bangkok., 2004.
- [9] วรชวรรณ เทียงวรรณกานต์, "การจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใส่กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี." วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต., ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2546.
- [10] AA. Al-Shamrania, A. Jamesa and, H. Xiaob, "Destabilisation of Oil–Water Emulsions and Separation by Dissolved Air Flotation," *Water Research*. Vol. 36, pp. 1503–1512, 2002.
- [11] J. Li and Y. Gu, "Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds," *Separation and Purification*. Vol. 42, pp. 1-13, 2005.
- [12] T. Ichikawa, "Electrical demulsification of oil-in-water emulsion," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol.302, pp. 581-586, 2007.
- [13] สนธยา กริชนวรวัณษ์, (2553, เมษายน 1), "ระบบการจัดการของเสียอันตราย Waste Track: แบทเตอร์รียนต์." [ออนไลน์] Aviable : http://chemsafe.chula.ac.th/waste/index.php?option=com_content&task=view&id=60&Itemid=80