



การบำบัดน้ำล้างทรายปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วยกระบวนการเปอร์ซัลเฟต และกระบวนการโซโน-เปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน

กนกวรรณ คงสม* และ ชมพูนุท ไชยรักษ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 06 1010 6655 อีเมล: 60605095@kmitl.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.07.003

รับเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2564 แก้ไขเมื่อ 11 พฤษภาคม 2564 ตอรับเมื่อ 17 พฤษภาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 5 กรกฎาคม 2565

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสกัดทรายปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH) ในทราย และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนหลังการสกัดออกจากทราย โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตและโซโน-เปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ศึกษาการสกัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในทราย 5,000 มิลลิกรัม/กิโลกรัม โดยใช้สารลดแรงตึงผิว Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) และ Polysorbate 20 (Tween 20) ที่ความเข้มข้น 0.05–0.4 โมลาร์ ระยะเวลา 0–120 นาที พบว่า ที่ความเข้มข้น 0.1–0.4 โมลาร์ และระยะเวลา 20–120 นาที สามารถสกัด TPH ออกจากทรายได้ร้อยละ 98 และ 99 ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนหลังการสกัดออกจากทรายด้วยกระบวนการเปอร์ซัลเฟต และโซโน-เปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน โดยศึกษาความเข้มข้นของเพอร์สอออน และความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสมตั้งแต่ 0.0–0.5 โมลาร์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 2–6 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน 0–60 นาที และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาโซโน-เปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน 0–50 นาที จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดในน้ำเสียปนเปื้อนหลังการสกัดด้วย SDS และ Tween20 ดีที่สุดเมื่อใช้เพอร์สอออน 0.1 โมลาร์ เปอร์ซัลเฟต 0.2 โมลาร์ ในน้ำเสียปนเปื้อนหลังการสกัดด้วย SDS และ 0.3 โมลาร์ ในน้ำเสียปนเปื้อนหลังการสกัดด้วย Tween20 ตามลำดับ ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชันที่ 60 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดในน้ำเสียปนเปื้อนหลังการสกัดด้วย SDS และ Tween20 โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตร้อยละ 83.97 และ 75.90 ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการบำบัดโดยกระบวนการโซโน-เปอร์ซัลเฟตออกซิเดชันที่ 40 นาที ร้อยละ 79.66 และ 71.25 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า กระบวนการโซโน-เปอร์ซัลเฟตมีความถี่เหนือแสงเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เร็วกว่ากระบวนการเปอร์ซัลเฟตอีกด้วย

คำสำคัญ: กระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน กระบวนการโซโน-เปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน สารลดแรงตึงผิว

การอ้างอิงบทความ: กนกวรรณ คงสม และ ชมพูนุท ไชยรักษ์, “การบำบัดน้ำล้างทรายปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วยกระบวนการเปอร์ซัลเฟต และกระบวนการโซโน-เปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 1, หน้า 179–189, ม.ค.-มี.ค. 2566.



Remediation of Sand Washing Water Contaminated with Petroleum Hydrocarbon by Persulfate and Sono-Persulfate Oxidation Process

Kanokwan Kongsom* and Chompoonut Chaiyaraksa

Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 06 1010 6655, E-mail: 60605095@kmitl.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.07.003

Received 18 February 2021; Revised 11 May 2021; Accepted 17 May 2021; Published online: 5 July 2022

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The objectives of this research were to study Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) in sand and to study the optimum conditions for the treatment of wastewater contaminated with petroleum hydrocarbons after extraction from sand by persulfate and Sono-persulfate oxidation. This research was divided into 2 parts: Part 1, to study the extraction of petroleum hydrocarbons in sand (5,000 mg/kg) using Sodium dodecyl Sulfate (SDS) and Polysorbate 20 (Tween 20) at a concentration of 0.05–0.4 molar over a period of 0–120 minutes. The findings revealed that at the concentration of 0.1–0.4 molar and the duration of 20–120 minutes, 98% and 99% TPH could be extracted from sand respectively. Part 2, to study the optimum condition for the treatment of wastewater contaminated with petroleum hydrocarbons after extraction from sand by persulfate and Sono-persulfate oxidation. The study focused on optimal ferrous ion and persulfate concentrations ranging from 0.0–0.5 Molar along with pH 2–6, oxidation persulfate reaction time was 0–60 minutes, and Sono-persulfate oxidation reaction time was 0–50 minutes. The findings revealed that treatment efficacy in contaminated wastewater after SDS extraction and Tween20 was the best when using 0.1 molar sulfate 0.2 molar ferrous ion in contaminated wastewater after extraction with SDS and 0.3 molars in contaminated wastewater after extraction with Tween20, respectively. The potential of Hydrogen ion was 3. The duration of the persulfate oxidation reaction was 60 minutes. Treatment efficacy in contaminated wastewater after extraction with SDS and Tween20 by persulfate oxidation was 83.97% and 75.90%, respectively. Treatment efficacy by Sono-persulfate oxidation at 40 minutes was 79.66% and 71.25%, respectively. In addition, Sono-persulfate process had a FLT frequency, causing more rapid oxidation than the persulfate process.

Keywords: Persulfate Oxidation, Sono-Persulfate Oxidation, Petroleum Hydrocarbons, Surfactant

Please cite this article as: K. Kongsom and C. Chaiyaraksa, "Remediation of sand washing water contaminated with petroleum hydrocarbon by persulfate and Sono-persulfate oxidation process," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 1, pp. 179–189, Jan.–Mar. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

สารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน หรือน้ำมันเป็นสารที่ส่งผลกระทบต่อที่รุนแรง จัดว่ามีความสำคัญมากซึ่งถูกนำไปใช้ในกิจกรรมในด้านต่างๆ ของมนุษย์ รวมถึงความต้องการพลังงานเพิ่มมากขึ้นทำให้มีการขุดเจาะน้ำมันทั้งบนบกและในทะเลเพิ่มขึ้น รวมทั้งมีการขนส่งในรูปแบบน้ำมันดิบ และน้ำมันสำเร็จรูปโดยทางเรือ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดมลภาวะจากน้ำมันในทะเล ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนบริเวณท้องทะเลริมชายฝั่งมาจากหลายสาเหตุ ได้แก่ การขุดเจาะน้ำมัน การขนส่งน้ำมัน อุบัติเหตุจากเรือบรรทุกน้ำมัน และกิจกรรมบริเวณชายฝั่ง ได้แก่ ชุมชน เกษตรกรรม อุตสาหกรรม ท่าเทียบเรือ รวมทั้งมาจากบรรยากาศ และการซึมผ่านขึ้นมาจากธรรมชาติ ผลกระทบของปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนนอกจากก่อให้เกิดความสกปรกแล้วยังมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและห่วงโซ่อาหาร ซึ่งปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนบางชนิดมีความเป็นพิษสูงซึ่งเป็นได้ทั้งสารก่อมะเร็ง และสารก่อกลายพันธุ์

จึงได้มีการนำสารลดแรงตึงผิวผสมพร้อมกับการก่อกำจัดคราบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนออกจากทรายเป็นการใช้สารลดแรงตึงผิว (Interfacial tension) ระหว่างน้ำกับน้ำมันทำให้สามารถสกัดน้ำมันได้ในปริมาณมากขึ้น โดยทำให้เกิดอิมัลชัน สารลดแรงตึงผิวจะดึงโมเลกุลน้ำมันออกจากดินเกิดเป็นวัฏภาคต่างๆ ขึ้น (Phase Separation) ได้แก่ ชั้นน้ำ (Aqueous Phase) ชั้นไมโครอิมัลชัน (Microemulsion Phase) และชั้นน้ำมัน (Oil Phase) ซึ่งลอยอยู่เหนือชั้นไมโครอิมัลชัน การสกัดน้ำมันด้วยสารลดแรงตึงผิวได้มีการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย โดยศึกษาการสกัดน้ำมันด้วยสารลดแรงตึงผิวพบว่า มีประสิทธิภาพในการสกัดสูงถึงประมาณร้อยละ 80-99 ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ Sodium Dodecyl Sulphate (SDS), Polysorbate 20 (Tween20) เป็นตัวทำอิมัลชันที่มีประจุลบและไม่ประจุ [1]-[6] มีการศึกษาการแยกคราบน้ำมันออกจากน้ำเสีย โดยใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับวิธีการ Froth Flotation สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบและสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุมาใช้ในการกำจัด Ortho-dichlorobenzene ซึ่งเป็นสารอะโรมาติกที่ใช้ใน

อุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมผลิตสี และสารนี้ยังพบทั่วไปในน้ำใต้ดิน นอกจากนี้สารชนิดนี้ยังมีความเป็นพิษสูงแม้ว่าที่ความเข้มข้นต่ำ และมีฤทธิ์ทำลายระบบประสาท การใช้สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดน้ำเสียนั้น ต้องมีปริมาณและช่วงสภาวะที่เหมาะสม เช่น ชนิดความเข้มข้นของสารตึงผิว ความเข้มข้นของอนุภาคในน้ำเสีย อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่าง ทั้งนี้ เพราะการใช้สารลดแรงตึงผิวเกินปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าใช้จ่าย ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ตกค้างปล่อยออกมา กับน้ำที่บำบัด และระยะเวลาในการย่อยสลายสารลดแรงตึงผิว ในการวิเคราะห์ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่หรือตกค้างนั้น ใช้เทคนิคทางวิทยาศาสตร์ได้หลายวิธีขึ้นกับคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมกับแต่ละวิธี และเทคนิคทางวิทยาศาสตร์ [7]-[9]

การแยกปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนออกจากทรายเป็นทำให้เกิดน้ำเสีย หรือน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนขึ้น จึงใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes; AOPs) ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ย่อยสลายยากได้โดยเปอร์ซัลเฟตที่แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของซัลเฟต ($SO_4^{\cdot-}$) เป็นตัวเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์

การบำบัดการปนเปื้อนจากปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนมักนิยมใช้วิธีการบำบัดโดยกระบวนการทางชีวภาพ แต่ไม่สามารถบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอในสภาวะที่ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนมีการปนเปื้อนที่สูง และยังใช้เวลานานในการบำบัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการบำบัดโดยวิธีการออกซิเดชันทางเคมีที่มีประสิทธิภาพสูง เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการสกัดคราบปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วยสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุและไม่ประจุ รวมทั้งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย (น้ำล้างทราย) ที่มีปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนและสารอินทรีย์สูงโดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชันที่มีเหล็ก (เฟอร์รัสไอออน) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และกระบวนการโซโน-เปอร์ซัลเฟตที่มีเหล็ก (เฟอร์รัสไอออน) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และความถี่เหนือเสียงเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมทรายปนเปื้อน

นำทราย 1 กิโลกรัม มาผสมเข้ากับน้ำมันดิบจากบริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม คนด้วยแท่งแก้วให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 2 สัปดาห์ โดยทำการกวน เป็นระยะ จากนั้นนำไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Drying) เก็บไว้โดยการห่อพอลิเอทิลีนให้มิดในภาชนะแก้ว

2.2 การสกัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH) ด้วย SDS และ Tween20

นำทรายปนเปื้อน 5 กรัม เติม SDS และ Tween20 ใน ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน 0.05–0.4 โมลาร์ 20 มิลลิลิตร และ น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร กวนด้วย Magnetic Stirrer เป็นเวลา 20, 30, 60 และ 120 นาที จากนั้นแยกทรายและน้ำออกจากกัน เพื่อไปวิเคราะห์ในแต่ละชุดการศึกษาจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.3 การวิเคราะห์ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH) ใน ทรายปนเปื้อน

ส่วนของทรายนำไปวิเคราะห์หาปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน ที่คงเหลือด้วยวิธี US EPA: Method 3540C [10] โดยนำทราย ที่ผ่านการสกัดด้วย SDS และ Tween20 ใส่ในภาชนะสกัด (Extraction Thimber) ใส่ตัวทำละลายเฮกเซน 200 มิลลิลิตร ในขวดกั้นกลมทำการสกัดด้วยสภาวะรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จากนั้นนำปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้ ไประเหยตัวทำละลายเฮกเซน และนำออกด้วยเครื่องกลั่น แบบหมุน (Rotary Vacuum Evaporator) และนำทราย ไปอบแห้งในตู้อบความร้อน (Oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้น และนำเข้าสู่ตู้ดูดความชื้น (Desiccator) จนอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องแล้วนำมาชั่ง น้ำหนักปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้ ในแต่ละชุดการศึกษา จะทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.4 การวิเคราะห์ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH) ใน น้ำปนเปื้อน

ส่วนของน้ำปนเปื้อนนำไปวิเคราะห์หาปิโตรเลียม

ไฮโดรคาร์บอนที่คงเหลือด้วยวิธี IOC/ONESCO1984 [11] ใส่ตัวทำละลายเฮกเซน 50 มิลลิลิตร ตามด้วยน้ำปนเปื้อน 120 มิลลิลิตร ลงในกรวยแยก (Separatory Funnel) ปิดฝาเขย่า ให้น้ำปนเปื้อนละลายผสมกับตัวทำละลายเฮกเซนตั้งทิ้งไว้ จนแยกชั้น เฮกเซนจะละลายปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ใน น้ำลอยขึ้นแยกชั้น จากนั้นไขน้ำที่อยู่ด้านล่างออกเก็บไว้ รอการสกัดซ้ำ ไขชั้นเฮกเซนเก็บในขวดรูปชมพู่ (Flask) ทำซ้ำ 3 ครั้ง นำสารสกัดในขวดรูปชมพู่ที่สกัดแล้วไปผ่านคอลัมน์ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เพื่อดูดน้ำที่อาจหลงเหลืออยู่ เล็กน้อย นำสารสกัดที่ได้มาให้ความร้อนอย่างช้าให้ระเหย นำไปอบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำสารละลาย ที่ได้ไปวิเคราะห์ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย UV-visible Spectrophotometer ที่ทำการดูดกลืนแสง 360 นาโนเมตร ในแต่ละชุดการศึกษาจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.5 หาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำปนเปื้อน ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH)

นำน้ำเสียที่ได้จากการสกัดทรายไปบำบัดโดย กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชันนั้น และโซโน-เปอร์ซัลเฟตออกซิเดชันทดลองโดยหาสภาวะที่ เหมาะสมในการบำบัดน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน การทดลองมีขั้นตอนดังนี้ คือการนำขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร มาเติมน้ำปนเปื้อนปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้ว ปรับพีเอช 2, 3, 4, 5 และ 6 ด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลาร์ เติม เฟอร์รัสไอออน 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 โมลาร์ เติม เปอร์ซัลเฟต 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 โมลาร์ นำไป เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ระยะเวลา ในการเขย่าในกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน 0, 20, 30, 40, 60 และ 70 นาที เมื่อเขย่าครบตามเวลาแล้ว นำออก มาปรับพีเอชให้เป็น 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอน 60 นาที และนำมากรอง ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ นำส่วนละลายใส่ไปวิเคราะห์หา ค่า TPH และ COD [12] ตามลำดับ และศึกษาระยะเวลา ในการเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกที่ความถี่ 395 กิโลเฮิร์ตซ์ ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโซโน-เปอร์ซัลเฟต

ออกซิเดชันที่เวลา 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมของเปอร์ซัลเฟต เฟอร์รัสไอออน และความเป็นกรด-ด่างของกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชันในแต่ละชุดการศึกษาจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.6 สถิติที่ใช้ในการวิจัย

ในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะเงื่อนไขต่างๆ จะวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการหาค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ทดสอบความแตกต่างของผลการทดลองด้วย t-test และทดสอบความแปรปรวนทางสถิติของข้อมูลด้วย ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($p = 0.05$)

3. ผลการทดลอง

3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH) ออกจากทรายเป็นก้อน

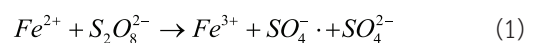
ทำการสกัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนออกจากทรายเป็นก้อนโดยแปรผันความเข้มข้นของ SDS และ Tween20 จาก 0.05–0.4 โมลาร์ แปรผันเวลาในการสกัด ดังนี้ 20–120 นาที แสดงดังตารางที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อสกัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS และ Tween20 โดยใช้ความเข้มข้น 0.1–0.4 โมลาร์ มีผลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P=0.05$) และสกัดที่เวลา 30–120 นาทีให้ผลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P=0.05$) ดังรูปที่ 1 (ก)–(ง) ดังนั้นการสกัดด้วย SDS และ Tween20 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และระยะเวลา 30 นาที ดังรูปที่ 1 (ข) จึงเหมาะสมที่สุดในการสกัด TPH ออกจากทรายซึ่งสามารถสกัด TPH ออกจากทรายได้ร้อยละ 98 และ 99 ตามลำดับ ผลการสกัดของ SDS และ Tween20 มีผลไม่แตกต่างกันเนื่องจากคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ SDS และไม่มีประจุ Tween20 มีความสามารถในการชะล้างไม่แตกต่างกัน แต่จะแตกต่างกันตรงที่มีความสามารถในการเกิดฟองซึ่งสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบจะเกิดฟองมากกว่าที่ไม่มีประจุจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และใช้เวลานานในการย่อยสลายได้

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการวิเคราะห์

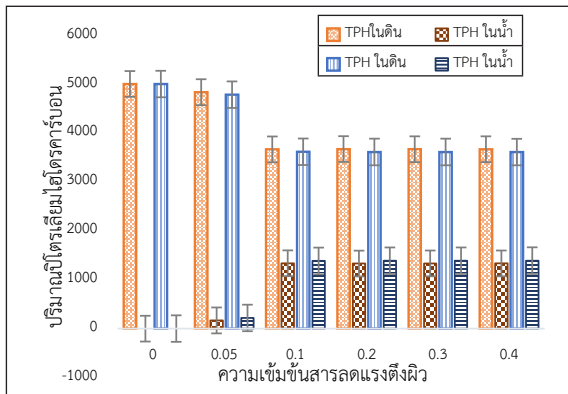
พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
TPH	US EPA: Method 3540C (ในทราย) IOC/ONESCO1984 (ในน้ำ)
COD	Close reflux Method
ความเข้มข้น	COD, TPH
pH	pH Meter
ระยะเวลา	Digital Timer

3.2 การศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของเฟอร์รัสไอออน

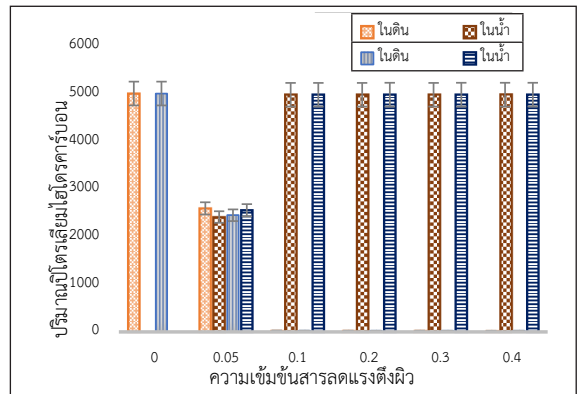
การศึกษาผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมของเฟอร์รัสไอออนที่มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน ทดลองโดยแปรผันความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนดังนี้ 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 โมลาร์ ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 0.3 โมลาร์ พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที พบว่า เฟอร์รัสไอออนที่ความเข้มข้น 0.0 โมลาร์ เฟอร์รัสไอออน 0.3 โมลาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TPH ประมาณร้อยละ 99 เนื่องจากเปอร์ซัลเฟตสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ แต่อนุมูลอิสระของซัลเฟตเกิดขึ้นได้น้อย เนื่องจากไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด COD ในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS และ Tween20 ประมาณร้อยละ 27.72 และ 25 ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัด COD แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$) เมื่อความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 0.1 โมลาร์ การบำบัด COD เพิ่มขึ้นประมาณ 47.28 และ 50 ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 75 ของการบำบัดซึ่งเป็นช่วงความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัด COD และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงดังรูปที่ 2 เมื่อเฟอร์รัสไอออนทำปฏิกิริยาก่กระตุ้นจะเกิดปฏิกิริยาการผลิตอนุมูลอิสระซัลเฟต ($SO_4^{\bullet-}$) ดังสมการที่ (1)



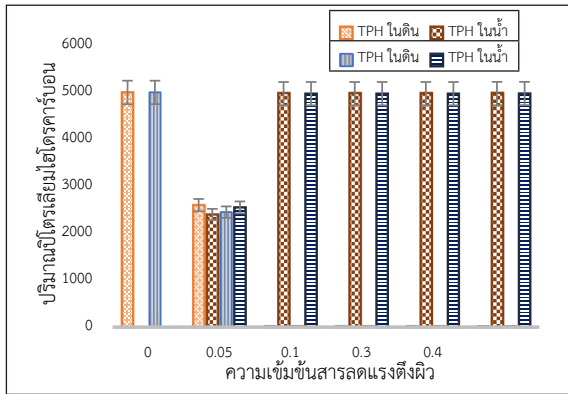
ซึ่งย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ แต่เมื่อเฟอร์รัสไอออนมีความเข้มข้นมากกว่าระดับที่เหมาะสมพบว่า สามารถลด



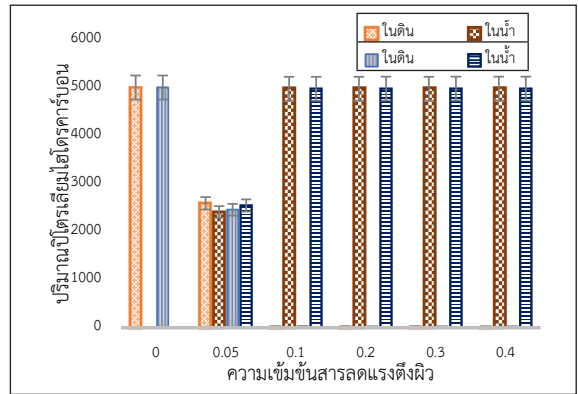
(ก)



(ค)



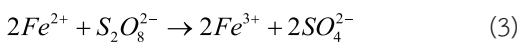
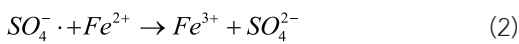
(ข)



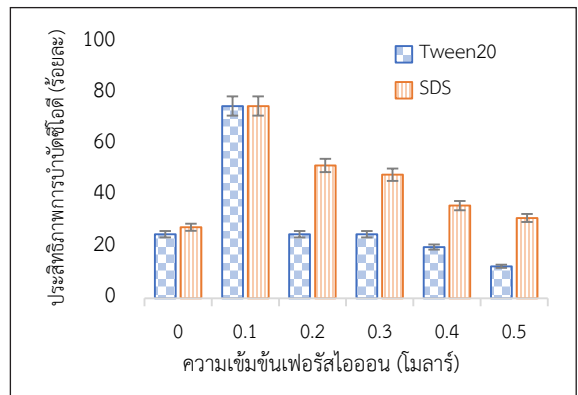
(ง)

รูปที่ 1 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนหลังการสกัดด้วย Tween20 และ SDS (ก) ที่ระยะเวลา 20 นาที (ข) ที่ระยะเวลา 30 นาที (ค) ที่ระยะเวลา 60 นาที และ (ง) ที่ระยะเวลา 120 นาที

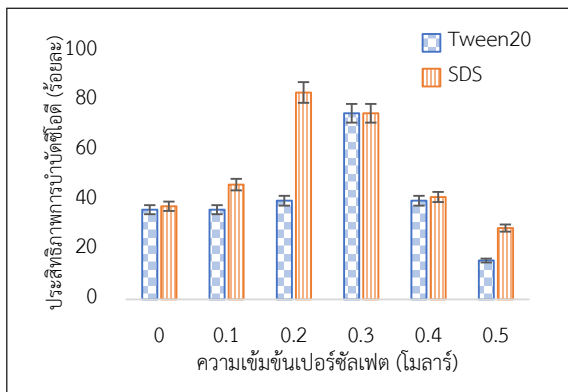
ปริมาณอนุมูลอิสระซัลเฟตลงได้ดังสมการที่ (2) และ (3) จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง



จากรูปที่ 2 พบว่า ความสามารถในการบำบัดน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ความเข้มข้นเพอร์สไอออนสูงชันจะส่งผลเสียต่อการทำงานของ Tween20 มากกว่า SDS เนื่องจากเพอร์สไอออนสามารถจับกับ SDS ที่มีประจุทำให้เกิดการรวมตัวเป็นก้อนแล้วตกตะกอนได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่า Tween20 ซึ่งไม่มีประจุ [13]



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (ร้อยละ) ที่ความเข้มข้นเพอร์สไอออน 0.0-0.5 โมลาร์ ความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟต 0.3 โมลาร์ pH=3 และระยะเวลา 60 นาที



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (ร้อยละ) ที่ความเข้มข้นเพอร์ซัลเฟต 0.0-0.5 โมลาร์ ความเข้มข้นเพอร์ซัลเฟต 0.1 โมลาร์ pH=3 และระยะเวลา 60 นาที

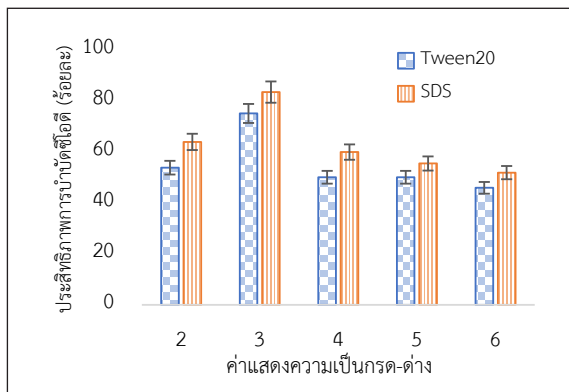
3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมของเพอร์ซัลเฟต

การศึกษาผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมของเพอร์ซัลเฟตที่มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทดลองโดยแปรผันความเข้มข้นของเพอร์ซัลเฟตดังนี้ 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 โมลาร์ ตามลำดับ โดยใช้เพอร์ซัลเฟต 0.1 โมลาร์ พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที พบว่า เพอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.0 โมลาร์ เพอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด TPH ประมาณร้อยละ 99 เนื่องจากเพอร์ซัลเฟตทำให้ไฮโดรคาร์บอนแตกตัวจึงทำให้สามารถบำบัด TPH ได้ แต่ประสิทธิภาพในการบำบัด COD ในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS และ Tween20 ประมาณร้อยละ 37.5 และ 36.14 ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัด COD แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P=0.05$) จากรูปที่ 2 และรูปที่ 3 พบว่า ที่ความเข้มข้น 0.0 โมลาร์ ประสิทธิภาพของเพอร์ซัลเฟตดีกว่าเพอร์ซัลเฟต เนื่องจากอนุมูลอิสระของซัลเฟต ($SO_4^{\cdot-}$) เกิดขึ้นได้น้อยมาก ถ้าในปฏิกิริยานั้นไม่มีไอออนของเหล็กเป็นตัวกระตุ้น [13] จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เร็วกว่าประสิทธิภาพการบำบัด COD จึงสูงกว่า เมื่อความเข้มข้นของเพอร์ซัลเฟตเพิ่มขึ้นที่ 0.2 โมลาร์ พบว่า ในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS มีประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นประมาณ

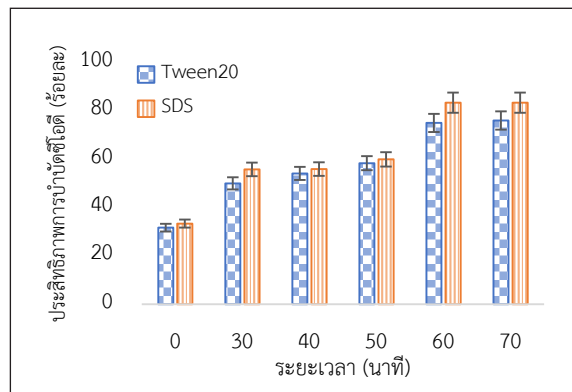
ร้อยละ 47.13 คิดเป็นร้อยละ 83.37 ของการบำบัดซึ่งเป็นช่วงความเข้มข้นของเพอร์ซัลเฟตที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัด COD และในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย Tween20 ความเข้มข้นของเพอร์ซัลเฟตที่ 0.3 โมลาร์ มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD เหมาะสมที่สุดคิดเป็นร้อยละ 75 เนื่องจาก SDS ย่อยสลายได้ดีทำให้เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วในช่วงความเข้มข้นเพอร์ซัลเฟตที่น้อยกว่าใน Tween20 [14] และจากการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของเพอร์ซัลเฟตเพิ่มขึ้นพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัด COD ลดลง เนื่องจากปริมาณของเพอร์ซัลเฟตที่มากเกินไปนั้นจะไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของซัลเฟต ($SO_4^{\cdot-}$) และไปยับยั้งการสลายตัวของสารที่ต้องการบำบัด [15], [16]

3.4 การศึกษาผลของสภาวะความเป็นกรด-ด่าง

การศึกษาผลของสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการตกตะกอนของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเพอร์ซัลเฟตทำการทดลองในช่วงค่า pH 2, 3, 4, 5 และ 6 ในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS และ Tween20 โดยความเข้มข้นของเพอร์ซัลเฟต 0.1 โมลาร์ และความเข้มข้นของเพอร์ซัลเฟตในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS 0.2 โมลาร์ และในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย Tween20 0.3 โมลาร์ และระยะเวลา 60 นาที พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการตกตะกอนของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเพอร์ซัลเฟต คือ ที่พีเอช 3 จะส่งผลให้เพิ่มอนุมูลอิสระของซัลเฟต ($SO_4^{\cdot-}$) มีปริมาณเหมาะสม [17] ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ซึ่งทำได้ค่าประสิทธิภาพการบำบัด COD ในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย Tween20 และ SDS ได้แก่ ร้อยละ 75 และ 83.97 ตามลำดับ และที่พีเอช <3 อนุมูลอิสระของซัลเฟตมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นซึ่งไม่ได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดมากขึ้นตามไปด้วย แต่กลับให้ประสิทธิภาพลดลงมีเหตุผลมาจากเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระของซัลเฟตกับเพอร์ซัลเฟตไอออนจะเกิดขึ้นได้ง่าย และรวดเร็วกว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระของซัลเฟตกับสารปนเปื้อนในทางกลับกันพบว่า ค่าพีเอชเมื่อค่าเข้าใกล้สภาวะกลาง



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (ร้อยละ) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 2-6 ความเข้มข้นเพอร์ซอไอออน 0.1 โมลาร์ ความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟตในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS 0.2 โมลาร์ และในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย Tween20 0.3 โมลาร์ และระยะเวลา 60 นาที



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (ร้อยละ) โดยกระบวนการบำบัดด้วยเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน ความเข้มข้นเพอร์ซอไอออน 0.1 โมลาร์ ความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟตในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS 0.2 โมลาร์ และในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย Tween20 0.3 โมลาร์ และที่ระยะเวลา 0-70 นาที

หรือต่างจะส่งผลให้อนุภาคลิษระของซัลเฟตมีปริมาณลดลง เป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง [18]

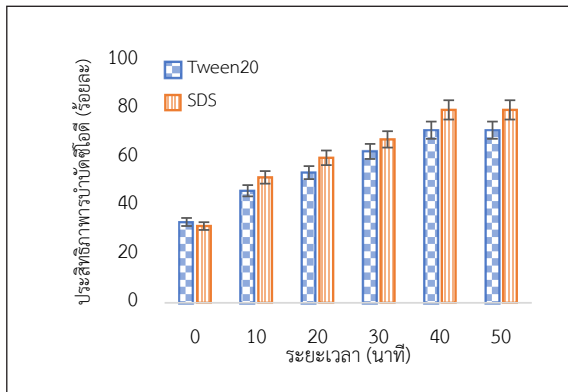
3.5 การศึกษาผลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน

การศึกษาผลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเหมาะสมในการตกตะกอนของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตโดยทำการทดลองในช่วงระยะเวลา 0, 20, 30, 40, 60 และ 70 นาที ในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS และ Tween20 ความเข้มข้นของเพอร์ซอไอออน 0.1 โมลาร์ และความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS 0.2 โมลาร์ และในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย Tween20 0.3 โมลาร์ พีเอช 3 พบว่า ที่ 60 นาที เป็นระยะเวลาที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากจะส่งผลให้เพิ่มอนุภาคลิษระของซัลเฟต (SO_4^{2-}) มีปริมาณเหมาะสมซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น [14], [19] และหลังจาก 60 นาที จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพ

ในการบำบัดมีค่าคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$) ดังรูปที่ 5

3.6 การศึกษาผลของกระบวนการไฮโน-เปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน

การศึกษาผลของระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเหมาะสมในการตกตะกอนของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟต โดยทำการทดลองด้วยเครื่องอัลตราโซนิกในช่วงระยะเวลา 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย Tween20 และ SDS ความเข้มข้นของเพอร์ซอไอออน 0.1 โมลาร์ และความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS 0.2 โมลาร์ และในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย Tween20 0.3 โมลาร์ พีเอช 3 จากรูปที่ 6 เมื่อเกิดปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตที่ 0 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ได้ทันทีที่ประมาณร้อยละ 31.69 และ 33.37 ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดยังไม่ดีพอซึ่งพบว่า ที่ 40 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากการใช้เครื่องอัลตราโซนิก หรือ



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (ร้อยละ) โดยกระบวนการบำบัดด้วยโซโน-เปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน ความเข้มข้นเพอร์สไอออน 0.1 โมลาร์ ความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟตในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS 0.2 โมลาร์ และในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย Tween20 0.3 โมลาร์ ที่ระยะเวลา 0-50 นาที

ความถี่เหนือเสียงจะทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาได้รวดเร็ว และมีเวลาที่อนุโมลอิสระซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) จับตัวแล้วทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้นานขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้เพิ่มขึ้น [15], [20], [21] และเมื่อระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่ 50 นาที สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซึ่งแตกต่างกันอย่างไม่มีความสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$)

4. อภิปรายผลและสรุป

ในการสกัดทรายเป็นอนิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS และ Tween20 ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 โมลาร์ ในการสกัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนออกจากทรายเป็นพบว่า สารลดแรงตึงผิวมีความสามารถในการสกัดได้ดี และแตกต่างกันอย่างไม่มีความสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p = 0.05$) โดยประสิทธิภาพในการสกัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนออกจากทรายเป็นด้วย SDS และ Tween20 ประมาณร้อยละ 99 และ 98 ตามลำดับ งานวิจัยนี้เลือกใช้

ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และระยะเวลาที่ 30 นาที เนื่องด้วยความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และใช้ระยะเวลาในการสกัด การศึกษาการบำบัดน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน และโซโน-เปอร์ซัลเฟตออกซิเดชันพบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมของเพอร์สไอออน คือ 0.1 โมลาร์ ความเข้มข้นที่เหมาะสมของเปอร์ซัลเฟตในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS คือ 0.2 โมลาร์ และความเข้มข้นที่เหมาะสมของเปอร์ซัลเฟตในน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย Tween20 คือ 0.3 โมลาร์ ตามลำดับ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมเท่ากับ 3 และระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตที่ 60 นาที ในปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD คิดเป็นร้อยละ 83.97 และ 75.90 ตามลำดับ และระยะเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาโซโน-เปอร์ซัลเฟตที่ 40 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD คิดเป็นร้อยละ 79.66 และ 71.25 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า กระบวนการบำบัดน้ำปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนหลังการสกัดด้วย SDS และ Tween20 ที่เหมาะสมควรใช้กระบวนการโซโน-เปอร์ซัลเฟต เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว เหมาะที่จะทำการบำบัดหลายตัวอย่างใช้เวลาอันน้อยซึ่งช่วยให้ประหยัดพลังงานในทางอ้อมด้วย จากการสกัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วย SDS และ Tween20 แม้จะให้ผลใกล้เคียงกันแต่ในการสกัดควรใช้ Tween20 เนื่องด้วยราคาที่แตกต่างกันและความปลอดภัยทางสิ่งแวดล้อมซึ่ง SDS สามารถเกิดฟองได้มากกว่า Tween20 เมื่อปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากจะทำลายสุนทรียภาพของแม่น้ำแล้วยังส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและอาจจะต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์น้ำมันดิบที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเงินทุนในการทำวิจัย และขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้

ความกรุณาในการประเมินและให้ข้อเสนอแนะการปรับปรุง
แก้ไขให้บทความวิจัยนี้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Y. Ushikubo and R. L. Cunha, "Stability mechanisms of liquid water in oil emulsions," *Food Hydrocolloids*, vol. 34, pp. 145–153, January 2014.
- [2] J. Deng, Y. Shao, N. Gao, Y. Deng, C. Tan, and S. Zhou, "Zero-valent iron/persulfate (Fe⁰/PS) oxidation acetaminophen in water," *Environmental Science and Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 881–890, 2013.
- [3] M. Pacwa-Płociniczak, J. Czaplą, T. Płociniczak, and Z. Piotrowska-Seget, "The effect of bioaugmentation of petroleum-contaminated soil with *Rhodococcus erythropolis* strains on removal of petroleum from soil," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 196, pp. 615–622, 2019.
- [4] C. Uzochukwu, Ugochukwu, A. Ochonogor, C. M. Jidere, A. Chizoba, N. Frida, E. John, and Virginia U. Okwu-Delunzu, "Exposure risks to polycyclic aromatic hydrocarbons by humans and livestock (cattle) due to hydrocarbon spill from petroleum products in Niger-delta wetland," *Environmental International*, vol. 115, pp. 38–47, 2018.
- [5] A. Naksuk, D. A. Sabatini, and C. Tongcumpou, "Microemulsion-based palm kernel oil extraction using mixed surfactant solutions," *Industrial Crops and Products*, vol. 30, pp. 194–198, 2009.
- [6] M. Fingasa and B. Fieldhouseb, "Studies on water-in-oil products from crude oils and petroleum products," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 64, pp. 272–283, 2012.
- [7] I. K. Sezin, T. T. Phan, and A. S. David, "Surfactant based oil extraction of corn germ," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 88, no. 6, pp. 863–869, 2011.
- [8] L. D. Do and D. A. Sabatini, "Aqueous extended-surfactant based method for vegetable oil extraction," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 87, no. 10, pp. 1211–1220, 2010.
- [9] W. Phoochinda, D. A. White, and B. J. Briscoe, "An algal removal using a combination of flocculation and flotation processes," *Environmental Technology*, vol. 25, pp. 1385–1395, 2004.
- [10] EL Moaty and S. Ibrahim, "Surfactant properties of corrosion inhibitors," Ph.D. dissertation, Nalco Chemical Company, University of Hull, 2011.
- [11] M. A. Aboulhassan, S. Souabi, A. Yaacoubi, and M. Baudu, "Removal of surfactant from industrial wastewaters by coagulation flocculation process," *Environmental Science and Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 327–332, 2006.
- [12] S. A. Awatif, H. K. Basim, and K. A. Sura, "Evaluating water stability indices from water treatment plants in baghdad city," *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 6, no. 14, pp. 1344–1351, 2014.
- [13] E. Chamarro, A. Marco, and S. Esplugas, "Use of fenton reagent to improve organic chemical biodegradability," *Water Research*, vol. 35, no. 4, pp. 1047–1051, 2001.
- [14] L. Chenju, H. Chiu-Fen, and C. Yan-Jyun,

- “Potential for activated persulfate degradation of BTEX contamination,” *Water Research*, vol. 42, no. 15, pp. 4091–4100, 2008.
- [15] L. Hui, G. Jing, Y. Lijiao, and L. Yeqing, “Degradation of methyl orange by sodium persulfate activated with zero-valent zinc,” *Separation and Purification Technology*, vol. 132, pp. 168–173, 2014.
- [16] J. R. Milton, “Surfactants and interfacial phenomena,” *Surfactant Research Institute Brooklyn College the City University of New York*, vol. 3, pp. 1–32, 2004.
- [17] F. Guo-Dong, D. D. Dionysios, Z. Dong-Mei, Y. Wang, Z. Xiang-Dong, F. Jian-Xin, C. Long, and W. Yu-Jun, “Transformation of polychlorinated biphenyls by persulfate at ambient temperature,” *Chemosphere*, vol. 90, no. 5, pp. 1573–1580, 2013.
- [18] P. Nikolaos, F. Zacharias, A. Maria, K. Ioannis, and M. Dionissios, “Oxidation of bisphenol: A in water by heat-activated persulfate,” *Journal of Environmental Management*, vol. 195, pp. 125–132, 2017.
- [19] L. Chenju, J. B. Clifford, C. M. Michael, and L. S. Kenneth, “Persulfate oxidation for in situ remediation of TCE. I. Activated by ferrous ion with and without a persulfate-thiosulfate redox couple,” *Chemosphere*, vol. 55, no. 9, pp. 1213–1223, 2004.
- [20] Z. Guangyin, L. Xueqin, S. Lianghu, K. Takuro, K. Gopalakrishnan, Z. Tao, X. Kaiqin, L. Yu-You, Z. Xuefeng, and Z. Youcai, “Unraveling the catalyzing behaviors of different iron species (Fe^{2+} vs. Fe^0) in activating persulfate-based oxidation process with implications to waste activated sludge dewaterability,” *Water Research*, vol. 134, pp. 101–114, 2018.
- [21] G. Ivana, S. Ana, K. Natalija, and V. Domagoj, “Global parameter of ultrasound exploitation (GPUE) in the reactors for wastewater treatment by sono-Fenton oxidation,” *Ultrasonics Sonochem*, vol. 19, no. 2, pp. 270–279, 2012.