

การใช้ปฏิกิริยาคลายเพนตันเพื่อสลายสารประกอบไตรโคลคาร์บานในน้ำ

Degradation of Triclocarban in Water by Fenton- like Reaction

นฤพร เข้มเพชร(Naruporn Khempet)*,** กิตติยาภรณ์ นูบาล (Kittiyaporn Nubal)***

ปัญจรัตน์ หลาวเงิน (Panjarat Laowngoen)*** ดร.อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ (Dr.Arthit Neramittagapong)¹**,****

ดร.สุชาสินี เนรมิตตกพงศ์ (Dr.Sutasinee Neramittagapong)** ,****

(Received: November 5, 2019; Revised: January 17, 2020; Accepted: January 22, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสลายไตรโคลคาร์บานด้วยกระบวนการคลายเพนตัน โดยการศึกษาความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ pH เริ่มต้น ในสภาวะการทดลองได้กำหนดให้ความเข้มข้นไตรโคลคาร์บานเริ่มต้น เวลาในการทำปฏิกิริยา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ผงเหล็ก) เท่ากับ 40 ppm 240 นาที และ 1.6 g L^{-1} ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมที่ pH 7 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 mM ความเข้มข้นเริ่มต้นไตรโคลคาร์บาน 40 ppm โดยที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีที่สภาวะ pH 7 และให้ประสิทธิภาพในการสลายไตรโคลคาร์บานได้ถึงร้อยละ 78 ในเวลา 240 นาที จากข้อมูลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงประสิทธิภาพของกระบวนการคลายเพนตันที่ใช้ย่อยสลายไตรโคลคาร์บานด้วยผงเหล็ก และพบว่าปฏิกิริยาการย่อยสลายนี้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน โดยมีค่าที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ $3.8 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$

ABSTRACT

The objective of this study was to the feasibility for Triclocarban degradation using Fenton-like process. The effects of hydrogen peroxide concentration, and initial pH of solution were investigated. The initial concentration of triclocarban, the reaction time were kept constant and catalyst loading (iron-powder) of 40 ppm, 240 min and 1.6 g L^{-1} , respectively. Optimal conditions were determined to be pH 7, hydrogen peroxide 50 mM, triclocarban 40 ppm . The optimal pH was found to be 7 and triclocarban degradation efficiency removal was 78% within 240 min. These promising results clearly demonstrate the potential of the heterogeneous Fenton-like process for the effective degradation of triclocarban by iron-powder. The kinetic analysis implied that the reaction followed pseudo first order kinetics. It's apparent rate constant is calculated to be $3.8 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$.

คำสำคัญ: ปฏิกิริยาคลายเพนตัน ไตร โคลคาร์บาน ผงเหล็ก

Keywords: Fenton-like reaction, Triclocarban, Iron-powder

¹Corresponding author: artner@kku.ac.th

*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**นักวิจัย ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย

ศูนย์เครือข่าย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

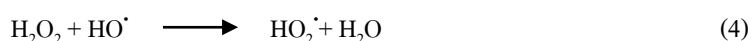
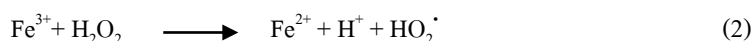
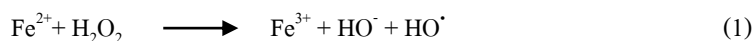
****รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

สารต้านเชื้อแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดที่ใช้อย่างแพร่หลายในครัวเรือนทำให้ปริมาณสารก่อมลพิษเพิ่มมากขึ้น กระบวนการเกี่ยวกับการจัดการสารก่อมลพิษก่อนปล่อยลงสู่แม่น้ำลำธาร และน้ำบาดาลจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยทั่วไปสารเคมีจะปนเปื้อนในน้ำและดิน และมีความเป็นอันตราย เช่น เป็นสารก่อมะเร็ง มีความเป็นพิษ ซึ่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและทำให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพ สารในกลุ่มนี้เป็นที่รู้จัก เช่น ไตรโคลคาร์บาน (Triclocarban) และ ไตรโคลซาน (Triclosan)

ไตรโคลคาร์บาน 3-(4-chlorophenyl)-1-(3,4-dichlorophenyl) urea (TCC) เป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อย มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย มักใช้เป็นสารฆ่าเชื้อ เช่น ผสมในสบู่ ผงซักฟอก เครื่องสำอาง และยาสีฟัน มีการตรวจพบไตรโคลคาร์บาน $4 \mu\text{g/L}$ ในประเทศสหรัฐอเมริกา แหล่งน้ำผิวดินในยุโรปและญี่ปุ่น เป็นพิษอย่างมากในสัตว์ที่อาศัยอยู่ในน้ำเพราะไตรโคลคาร์บานจะถูกย่อยสลายโดยแสงไปเป็นคลอโรไดออกซิน (chlorodioxins) หากมีปริมาณไตรโคลคาร์บานจำนวนมากอาจจะมีผลต่อสุขภาพ หรือมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของฮอร์โมน [1-3] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดไตรโคลคาร์บานก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลดการเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีการบำบัดแต่ละวิธีมีข้อจำกัดของการใช้งานที่แตกต่างกัน มีการรายงานเกี่ยวกับการสลายไตรโคลคาร์บานด้วยวิธีต่างๆ กระบวนการสลายทางชีวภาพจะใช้เวลาในการสลายนาน การสลายไตรโคลคาร์บานด้วยวิธีโอโซน กระบวนการมีความซับซ้อนและยุ่งยาก [2] การสลายไตรโคลคาร์บานด้วยวิธีอิเล็กโตร-เฟนตัน ต้นทุนมีราคาสูง มีข้อจำกัดในเรื่องเวลาและการใช้พลังงานไฟฟ้าในการย่อยสลาย [1]

การสลายทางเคมีจึงเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารปนเปื้อนที่มีความเป็นพิษ กระบวนการออกซิเดชันทางเคมีมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารปนเปื้อนของสารอินทรีย์ เช่น Electro-fenton [1] และ Ozonation [2] เป็นต้น แต่กระบวนการเหล่านี้เป็นกระบวนการที่ซับซ้อน และต้นทุนมีราคาสูง กระบวนการเฟนตัน เป็นหนึ่งในกระบวนการสลายทางเคมีที่มีประสิทธิภาพสูงในการสลายสารที่มีความเป็นพิษ และได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดดินและน้ำใต้ดิน โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ทำปฏิกิริยากับสารละลายเหล็ก (Fe^{2+}) เรียกว่าปฏิกิริยาเฟนตัน สามารถทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ($\text{HO}^\cdot$) ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน ($\text{O}_2^\cdot$) และไฮโดรเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ($\text{HO}_2^\cdot$) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์เป็น CO_2 และ H_2O ดังสมการ(1-5) [4-5]



จากการศึกษารายงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้กระบวนการคล้ำยเฟนตันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ในการสลายสารละลายสีขม โดยใช้เหล็กไนโอออนออกไซด์ ($\text{NiFe}(\text{C}_2\text{O}_4)_x$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารละลายสีขมถูกกำจัดไปร้อยละ 98 ในเวลา 20 นาที ที่ pH 3-10 ซึ่งเป็นช่วง pH ที่กว้าง [6] มีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการการสลายสีขมสีแดงสมนึก เบอร์ 9 ด้วยปฏิกิริยาคล้ำยเฟนตัน โดยใช้ผงเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่าย และปฏิกิริยานี้

สามารถสลายสารประกอบอินทรีย์ที่มีพิษ [7] นอกจากนี้ยังมีการรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการใช้สลายไดอะซีนอน ด้วยปฏิกิริยาคัลลีสเฟนตัน บนตัวเร่งปฏิกิริยา Cu-Fe bimetallic สามารถกำจัดไดอะซีนอนได้ถึงร้อยละ 50 ในเวลา 30 นาที [8] กระบวนการคัลลีสเฟนตันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogenous) พบว่าสามารถทำปฏิกิริยาได้ที่ขอบเขตค่า pH ที่กว้าง นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยายังสามารถแยกออกจากสารละลายได้ง่าย ปัจจัยที่สำคัญในระบบคัลลีสเฟนตันแบบวิวิธพันธุ์ต้องเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและสภาวะที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม [6,9] ผู้วิจัยได้มองเห็นการนำผงเหล็กสำเร็จรูปมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาคัลลีสเฟนตัน ซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่าย และปฏิกิริยานี้สามารถสลายสารประกอบอินทรีย์ที่มีพิษ แต่ยังไม่พบรายงานการสลายไตรโคลอคาร์บอนโดยใช้ผงเหล็ก

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษการสลายไตรโคลอคาร์บอน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ผงเหล็ก) ด้วยปฏิกิริยาคัลลีสเฟนตัน เนื่องจากปฏิกิริยาคัลลีสเฟนตันมีข้อจำกัดตรงที่ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในรูปสารละลายจึงทำให้เหล็กปนเปื้อนไปกับน้ำ ทำให้ยากต่อการแยกก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ จึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของแข็ง และมีรายงานความเข้มข้นของสารไตรโคลอคาร์บอนที่พบในแหล่งน้ำประเทศจีนและอเมริกาอยู่ในช่วง 0.001-5 ppm ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าที่ต้นน้ำอาจมีการปนเปื้อนของสารไตรโคลอคาร์บอนที่สูงกว่า 5-10 เท่า เพื่อให้ครอบคลุมในการบำบัด ดังนั้นจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้จึงเลือกทำการทดลองที่ช่วงความเข้มข้นไตรโคลอคาร์บอน 40 ppm และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสลายไตรโคลอคาร์บอน เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และค่า pH ที่แตกต่างกัน (ในช่วง 3-7) วิเคราะห์การสลายไตรโคลอคาร์บอนด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatography, HPLC)

วิธีการวิจัย

1. วัสดุอุปกรณ์

สารละลายมาตรฐานไตรโคลอคาร์บอน (99% Analytical standard sigma-Aldrich, Singapore) ผงตะไบเหล็ก (Gammaco, Thailand) อะซิโตนไทรล์ (99.9% RCILabscan, Thailand)) เอทานอลบริสุทธิ์ (99.8% Analar normapur ACS, Reag.Ph.Eur, France) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% w/v QR&C, New Zealand) อะซิโตน (99.5% RCI Labscan, Thailand) วัสดุสำหรับกรองสาร Nylon Syringe Filter (Pore size 0.22 μm Micron CNW, China)

2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

นำผงเหล็กช่วงขนาด (100-500 mesh) มาล้างด้วยน้ำ RO (Reverse Osmosis) ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำผงเหล็กมาล้างด้วยเอทานอลบริสุทธิ์ 99% และพักไว้ให้แห้งในตู้ดูดควัน แล้วนำอบในตู้อบอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3. การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

วัดพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดหรือคายซับของก๊าซไนโตรเจน (ASAP 2010, Micromeritics, USA) โดยใช้สมการของ BET วิเคราะห์โครงสร้างผลึก โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD Model D8 Discover, Bruker AXS, Germany) และหาค่าการละลายของเหล็กที่ละลายในน้ำหลังการบำบัดโดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAAnalyst 100, Perkinelmer Elmer instrument, USA)

4. การสลายตัวของไตรโคลอคาร์บอน

ทดสอบปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 500 mL โดยเติมสารละลาย TCC ความเข้มข้น 40 ppm ปริมาตร 250 mL และเก็บตัวอย่างในช่วงเวลา 30 60 90 120 180 และ 240 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.6 g L⁻¹ ความ

เข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 - 50 mM และค่า pH เริ่มต้น 3-7 โดยเก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนดนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงและหาร้อยละการสลายไตรโคลคาร์บอนจากสมการที่ (6) ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatography, HPLC) ($\lambda_{\max} = 265 \text{ nm}$)

$$\% \text{Removal} = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลาย TCC (ppm)

C_t คือ ความเข้มข้นสารละลาย TCC ณ เวลา t ใดๆ (ppm)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลจากการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา (ผงเหล็ก) โดยใช้เทคนิคของ BET พบว่ามีพื้นที่ผิวเท่ากับ $3.932 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีรายงานการใช้ผงเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีการระบุสถานะของผงเหล็กว่าเป็น Fe^0 [4] เนื่องจากใช้แม่เหล็กดูดได้ ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างของผงเหล็ก โดยใช้เครื่องมือ XRD ยืนยันว่าโครงสร้างของผงเหล็กอยู่ในรูปของเหล็กประจุนัย เนื่องจากแสดงพีคเด่นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 44.88° และ 65.25° ซึ่งแสดงถึงพีคของโครงสร้างผลึกของเหล็กประจุนัย (Fe^0) สอดคล้องกับโครงสร้างของ Fe (JCPDS 06-0696)

2. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการสลายไตรโคลคาร์บอนของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการทดสอบการสลายไตรโคลคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ผงเหล็ก) ที่สภาวะต่างๆ ทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นไตรโคลคาร์บอน 40 ppm ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 mM ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.6 g L^{-1} pH ของสารละลายเท่ากับ 7

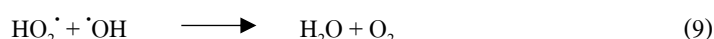
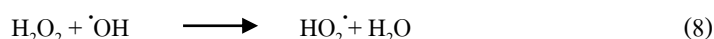
จากตารางที่ 1 สังเกตเห็นได้ว่าสารประกอบ TCC มีการสลายโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แต่ไม่ถึงร้อยละ 1 ที่สภาวะเดียวกันในขณะที่ใช้เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe^0 และการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ให้ผลการสลายสารประกอบ TCC เพียงร้อยละ 6 และร้อยละ 9 ตามลำดับ ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยามีอนุภาคขนาดเล็กมากจึงไม่เกิดกระบวนการดูดซับ โดยมีความเป็นไปได้ว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และผงเหล็กเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพไม่สูงพอที่จะย่อยสลายสารประกอบ TCC ได้ แต่เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่ามีประสิทธิภาพการสลายร้อยละ 17 เกิดการสลายได้ดีกว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิด $\cdot\text{OH}$ ที่เป็นตัวออกซิไดซ์รุนแรง เป็นการแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพ่นสามารถย่อยสลายสารประกอบ TCC ได้

ภาพที่ 2 ผลการสลายสารประกอบ TCC เมื่อเปลี่ยนค่า pH เริ่มต้นเป็น pH 3 pH 5 และ pH 7 ประสิทธิภาพการย่อยสลายมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ หากทำปฏิกิริยาที่ pH เป็นกรดประสิทธิภาพการสลายลดลงเนื่องจากในระบบมี H^+ มากเกินไป H^+ สามารถประจุตัวเป็นตัวค้ำกับอนุมูลไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ ดังสมการที่ 7 [4] แต่เมื่อเพิ่มค่า pH ทำให้ประสิทธิภาพการสลายเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ pH เป็นเบสแก่จะทำให้ประสิทธิภาพการสลายลดลงเนื่องจากความไม่เสถียรของ H_2O_2 และศักยภาพในการออกซิไดซ์ของอนุมูลไฮดรอกซิลลดลง [10] ดังนั้นการปรับค่า pH ในการทำ

ปฏิกิริยาจึงมีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายของสารประกอบ TCC จึงเป็นผลให้ในงานนี้สามารถทำปฏิกิริยาได้สูงที่สุดที่ pH 7



ภาพที่ 3 ผลของข้อยสลายสารประกอบ TCC เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 40 50 และ 60 mM จะพบว่าประสิทธิภาพในการสลายสารประกอบ TCC เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 60 mM ที่ความเข้มข้น 60 mM มีประสิทธิภาพในการสลายมากกว่าที่ความเข้มข้น 40 mM ถึง 2 เท่า จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อประสิทธิภาพการสลาย เนื่องจากมีปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากพอในการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ดังสมการที่ 8 และ 9 ดังนั้นในการทำปฏิกิริยาคัลลายเฟนตันในการสลายสารประกอบ TCC ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการสลายด้วย [10-13]



ภาพที่ 4 จากการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการสลายตัวของสารประกอบ TCC ในปฏิกิริยาคัลลายเฟนตัน โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9675 ที่สภาวะความเข้มข้นของสารประกอบ TCC 40 ppm ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 mM และ pH ที่ใช้ทำปฏิกิริยาคือ pH 7 เป็นสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการสลายสารประกอบ TCC ได้สูงสุด และพบว่าปฏิกิริยาการบำบัดนี้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order) มีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาคำนวณได้เป็น $3.8 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ซึ่งมีงานวิจัยการสลายสารประกอบ TCC ที่ความเข้มข้น 100 ppm ด้วยกระบวนการโอโซนโดยเป็นปฏิกิริยาอันดับสองมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา $5.0 \times 10^3 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ สภาวะที่ค่า pH 7 เมื่อพิจารณาการสลายของสารประกอบ TCC ด้วยสองวิธีนี้พบว่าค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา อันดับปฏิกิริยามีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความเข้มข้นของสารประกอบ TCC วิธีการสลายสารประกอบ TCC และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 2 จากการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการสลายตัวของสารประกอบ TCC ด้วยวิธีต่างๆ พบว่ามีงานวิจัยที่สลายสารประกอบ TCC ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (แบคทีเรีย) ที่สภาวะความเข้มข้นของสารประกอบ TCC 4 ppm สามารถสลายสารประกอบ TCC ได้ 35% ในเวลา 5 วัน ซึ่งใช้เวลาในการสลายนาน [3] งานวิจัยที่สลายสารประกอบ TCC ด้วยวิธี Electro-fenton ที่สภาวะความเข้มข้นของสารประกอบ TCC 5 ppm สามารถสลายสารประกอบ TCC ได้ 100% ในเวลา 30 นาที [1] และการสลายสารประกอบ TCC ด้วยกระบวนการโอโซน ที่สภาวะความเข้มข้นของสารประกอบ TCC 100 ppm สามารถสลายสารประกอบ TCC ได้ 90% ในเวลา 20 นาที แต่ในงานวิจัย Chedly et al. ใช้โอโซนที่ความเข้มข้นสูง และโอโซนมีความเป็นพิษ [2] งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนี้กระบวนการมีความซับซ้อน ต้นทุนมีราคาสูง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการสลายสารประกอบ TCC ด้วยกระบวนการคัลลายเฟนตัน พบว่าที่สภาวะความเข้มข้น 40 ppm สามารถสลายได้ 78% ในเวลา 240 นาที อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการสลายสารประกอบ TCC ด้วยกระบวนการคัลลายเฟนตันอาจมีประสิทธิภาพการสลายที่น้อยกว่ากระบวนการ Electro-fenton และ โอโซน แต่

กระบวนการคล้ำยเฟนตันมีต้นทุนที่ต่ำกว่า กระบวนการไม่ซับซ้อน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สามารถแยกออกจากสารละลายได้ง่าย และสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีที่ pH 7

3. คุณภาพน้ำหลังการบำบัด

นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยายังคงมีข้อกำหนดขององค์รอนามัยโลกซึ่งกำหนดปริมาณไอออนเหล็กไว้ไม่เกิน 5 ppm จึงได้ทำการหาปริมาณไอออนเหล็กหลังการบำบัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารประกอบ TCC 40 ppm ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 50 mM เวลา 240 นาที pH 7 พบว่าไม่มีไอออนเหล็กเหลือในน้ำหลังการบำบัด ซึ่งถือว่าตัวเร่งปฏิกิริยา(ผงเหล็ก) ไม่เกิดการละลาย ซึ่งทำให้ง่ายต่อการแยกสารละลายออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา

สรุป

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการสลายสารประกอบไตรโคลคาร์บานในปฏิกิริยาคล้ำยเฟนตัน ซึ่งศึกษา 2 ปัจจัย คือ pH เริ่มต้น และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าทั้ง 2 ปัจจัยมีผลต่อการสลายสารประกอบไตรโคลคาร์บาน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาผงเหล็กทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะให้ประสิทธิภาพในการสลายสารประกอบไตรโคลคาร์บานได้ถึงร้อยละ 78 และสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีที่ pH 7 เนื่องจากหากทำปฏิกิริยาที่ pH เป็นกรดจะทำให้มี H^+ มากเกินไป H^+ สามารถประพติดัวเป็นตัวดักจับอนุมูลไฮดรอกซิลเรดิคัลได้ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายลดลง และไม่พบการละลายของตัวเร่งปฏิกิริยา (ผงเหล็ก) จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ทางเคมีพบว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order) มีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา $3.8 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$

กิตติกรรมประกาศ

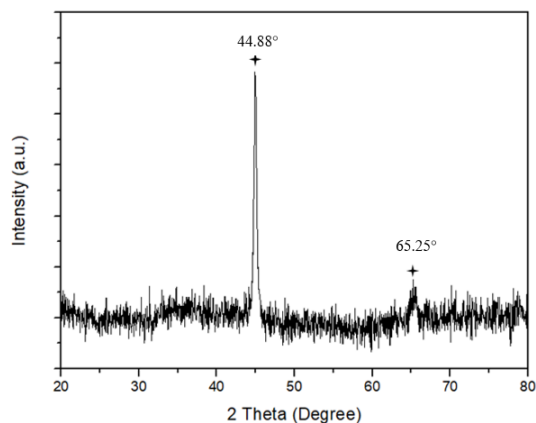
งานวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยสนับสนุนจากภาควิชากรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Sirés I, Oturan N, Oturan MA, Rodríguez RM, Garrido JA, Brillas E. Electro-Fenton degradation of antimicrobials triclosan and triclocarban. *Electrochim Acta*. 2007;52(17):5493–5503.
2. Tizaoui C, Grima N, Hilal N. Degradation of the antimicrobial triclocarban (TCC) with ozone. *Chem Eng Process Process Intensif*. 2011;50(7):637–643.
3. Mulla SI, Hu A, Wang Y, Sun Q, Huang SL, Wang H, et al. Degradation of triclocarban by a triclosan-degrading *Sphingomonas* sp. strain YL-JM2C. *Chemosphere*. 2016;144:292–296.
4. Devi LG, Raju KSA, Kumar SG, Rajashekhar KE. Photo-degradation of di azo dye Bismarck Brown by advanced photo-Fenton process: Influence of inorganic anions and evaluation of recycling efficiency of iron powder. *J Taiwan Inst Chem Eng*. 2011;42(2):341–349.
5. Khataee A, Salapour F, Fathinia M, Seyyedi B, Vahid B. Iron rich laterite soil with mesoporous structure for heterogeneous Fenton-like degradation of an azo dye under visible light. *J Ind Eng Chem*. 2015;26:129–135.
6. Liu Y, Zhang G, Chong S, Zhang N, Chang H, Huang T, et al. $NiFe(C_2O_4)_x$ as a heterogeneous Fenton catalyst for removal of methyl orange. *J Environ Manage*. 2017;192:150–155.



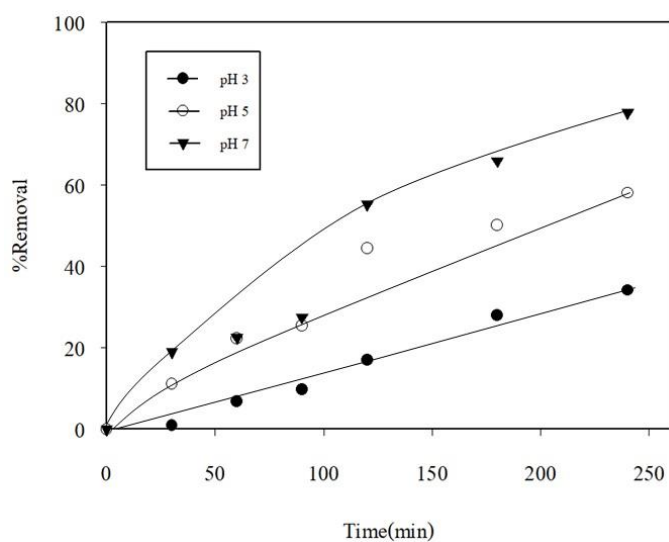
7. Srikhao N, Pilahom K, Nisapi W, Neramittagapong S, Neramittagapong A. Optimization of Decolorization (Somnauk's Red Dye No. 9) Using Fenton-Like Reaction Over Iron Powder by Box-Behnken Design (BBD). Kku Res J. 2018;18(4):12–26.
8. Kongphonpan M, Nisapi W, Neramittagapong S, Neramittagapong A. Degradation of diazinon using Fenton-like reaction over iron base catalyst. 2019;(June):1–13.
9. Huang X, Niu Y, Hu W. Fe/Fe₃C nanoparticles loaded on Fe/N-doped graphene as an efficient heterogeneous Fenton catalyst for degradation of organic pollutants. Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp. 2017;518: 145–150.
10. Fida H, Zhang G, Guo S, Naeem A. Heterogeneous Fenton degradation of organic dyes in batch and fixed bed using La-Fe montmorillonite as catalyst. J Colloid Interface Sci. 2017;490:859–868.
11. Youssef NA, Shaban SA, Ibrahim FA, Mahmoud AS. Degradation of methyl orange using Fenton catalytic reaction. Egypt J Pet. 2016;25(3):317–321.
12. Wang J, Sun Y, Feng J, Xin L, Ma J. Degradation of triclocarban in water by dielectric barrier discharge plasma combined with TiO₂/activated carbon fibers: Effect of operating parameters and byproducts identification. Chem Eng J. 2016;300:36–46.
13. Gao M, Zhang D, Li W, Chang J, Lin Q, Xu D, et al. Degradation of methylene blue in a heterogeneous Fenton reaction catalyzed by chitosan crosslinked ferrous complex. J Taiwan Inst Chem Eng. 2016;67:355–361.



ภาพที่ 1 รูปแบบของโครงสร้างผลึกของผงเหล็ก ที่ตรวจด้วยเครื่อง XRD

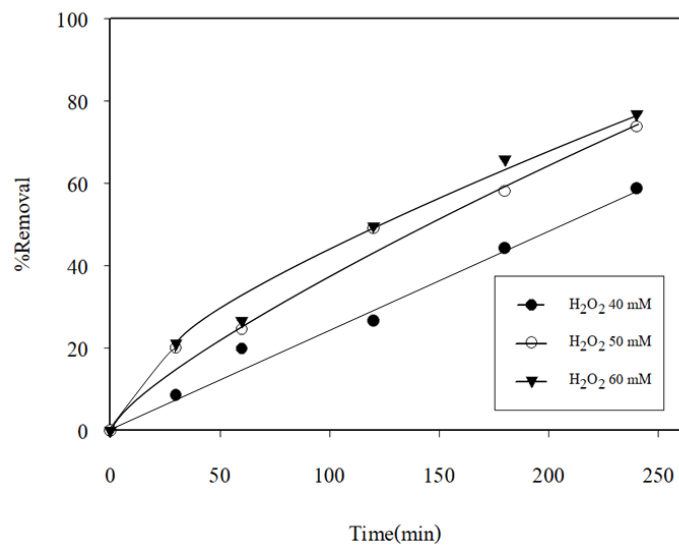
ตารางที่ 1 ผลการสลายไตรโคลคาร์บอนด้วยสภาวะต่างๆ

สภาวะ	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา(g/L)	ปริมาณ H_2O_2 (mM)	pH	เวลา(นาที)	%Removal
With out catalyst	-	-	7	30	0.7
Fe	1.6	-	7	30	6.0
H_2O_2	-	50	7	30	9.0
Fe+ H_2O_2	1.6	50	7	30	17.0



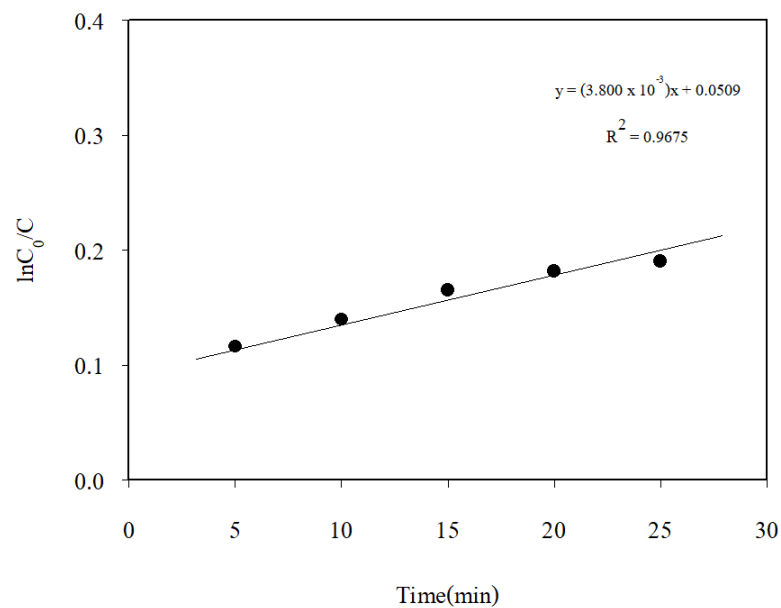
ภาพที่ 2 ผลของ pH

(สภาวะ: ความเข้มข้นเริ่มต้นไตรโคลคาร์บอน 40 ppm, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.6 g L^{-1} , ปริมาณ H_2O_2 50 mM)



ภาพที่ 3 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของ H₂O₂

(สภาวะ: ความเข้มข้นเริ่มต้นไตรคลอโรคาร์บอน 40 ppm, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.6 g L⁻¹, pH 7)



ภาพที่ 4 วิเคราะห์จลนพลศาสตร์ทางเคมีของการสลายตัวของสารประกอบไตรโคลอคาร์บอน

(สภาวะ: ความเข้มข้นเริ่มต้นไตรคลอโรคาร์บอน 40 ppm, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.6 g L⁻¹, ปริมาณ H₂O₂ 50 mM, pH 7)

ตารางที่ 2 การสลายไทรโคคลาร์บานด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการบำบัด	ความเข้มข้น เริ่มต้น TCC (ppm)	สภาวะ	เวลาทำ ปฏิกิริยา	%Re moval	อันดับ ปฏิกิริยา	อ้างอิง
การสลายทาง ชีวภาพ (แบคทีเรีย)	4	แบคทีเรีย strain YL-JM2C	5 วัน	35	-	[3]
Electro-fenton	5	0.20 mM Fe ³⁺ pH 3 60 mA	30 นาที	100	-	[1]
ปฏิกิริยาคัลลายเฟน ตัน	40	Pt/O ₂ diffusion cell ผงเหล็ก 1.6 g/L H ₂ O ₂ 50 mM pH 7	240 นาที	78	อันดับหนึ่ง เสมือน	งานวิจัยนี้
โอโซน	100	O ₃ 60 g/m ³ NTP pH 7	20 นาที	90	อันดับสอง	[2]