การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 64
The 64th Kasetsart University Annual Conference

การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ไอบูโพรเฟนโดยกระบวนการโอโซเนชันร่วมกับถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

Treatment of Synthetic Ibuprofen-Contaminated Wastewater by Ozonation Coupled with Magnetic Biochar

ชญานิน เหมวรรณานุกูล[a,*], ชลอ จารุสุทธิรักษ์[a]

[a]ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนไอบูโพรเฟน (IBU) โดยกระบวนการโอโซเนชันร่วมกับถ่านชีวภาพแม่เหล็ก โดยถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์จาก $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ และ $FeCl_3$ ผ่านกระบวนการตกตะกอนร่วม ยืนยันการก่อตัวของชั้นเหล็กออกไซด์ Fe_3O_4 ด้วย FTIR จากผลการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด IBU พบว่า กระบวนการโอโซเนชันร่วมกับถ่านชีวภาพแม่เหล็กให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ pH 9.0 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ IBU 20 มิลลิกรัม/ลิตร ระยะเวลา 60 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด 65.90% การศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่าปฏิกิริยาการบำบัด IBU สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสอง โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ของกระบวนการโอโซเนชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.00065–0.00119 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$ ซึ่งสูงกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.00009 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$ หลังการใช้งานแต่ละครั้ง ถ่านชีวภาพแม่เหล็กสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายด้วยสนามแม่เหล็ก การศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กซ้ำ จำนวน 4 ครั้ง พบว่า สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ โดยประสิทธิภาพลดลงจาก 65.90% เหลือ 55.50%

บทนำ

- ไอบูโพรเฟน (IBU) เป็นยาในกลุ่ม NSAIDs ที่ใช้แพร่หลาย และถูกขับออกจากร่างกายบางส่วน ทำให้ตกค้างในน้ำเสียจากโรงพยาบาล อุตสาหกรรมยา และฟาร์มปศุสัตว์
- วิธีบำบัด เช่น เมมเบรนและกระบวนการชีวภาพ ซึ่งมีข้อจำกัดด้านต้นทุน การจัดการของเสียเข้มข้นสูง และประสิทธิภาพที่ลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารมลพิษสูง
- โอโซน (O_3) เป็นสารออกซิไดซ์ที่มีศักยภาพสูง สามารถย่อยสลาย IBU ได้ทั้งผ่านปฏิกิริยาโดยตรงกับสารมลพิษและปฏิกิริยาโดยอ้อมผ่านไฮดรอกซิลเรดิคอล (•OH) ในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs)
- ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยกระตุ้นการสลายตัวของโอโซนและเพิ่มการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคอล ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงแต่แยกออกจากน้ำได้ยาก
- ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุรองรับ เนื่องจากมีโครงสร้างพรุนและพื้นที่ผิวสูง เมื่อดัดแปลงให้มีสมบัติแม่เหล็ก ถ่านชีวภาพแม่เหล็กสามารถแยกออกจากน้ำหลังการบำบัดได้ง่าย ลดการสูญหายและลดเวลาการตกตะกอน
- งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพแม่เหล็กเพื่อการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซเนชัน เพื่อกำจัด IBU โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด IBU เช่น เวลา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้น และ pH รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์และศักยภาพการใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กซ้ำ

อุปกรณ์และวิธีการ

การติดตั้งถังปฏิกิริยาและการเดินระบบ

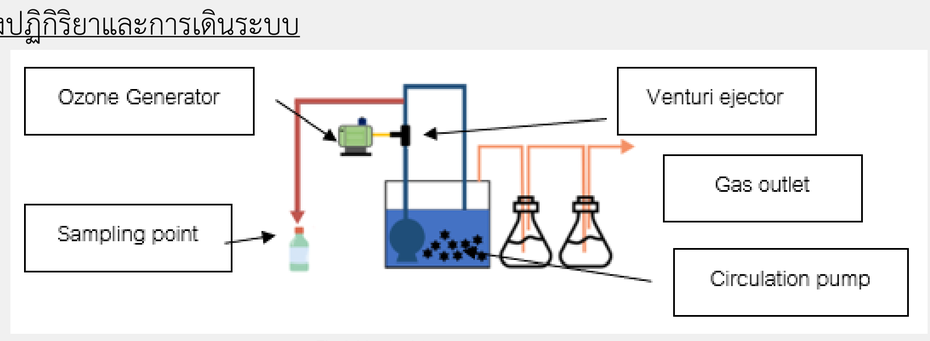

Fig.1 Venturi-type ozone reactor

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

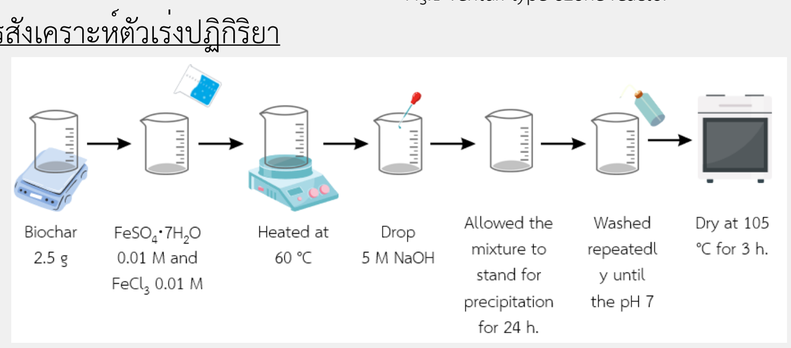

Fig.2 Synthesis of catalyst from bamboo biochar (Xin et al., 2024)

Fig.3 Magnetic separation of magnetic biochar using a magnet

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

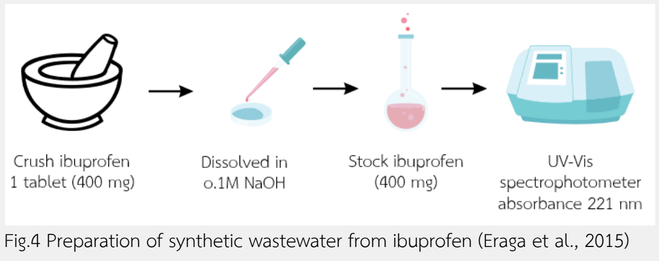

Fig.4 Preparation of synthetic wastewater from ibuprofen (Eraga et al., 2015)

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

Table 1. The factors used to study the efficiency of ibuprofen treatment using catalyst ozonation process.

Factor	Values studied	Control factors
1.Contact time	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 120 min	- pH - Ibuprofen concentration - catalyst dosage
2. Ibuprofen concentration	1, 5, 10, 20 mg/L	- pH - contact time - catalyst dosage
3.pH	3, 5, 7, 9	- contact time - Ibuprofen concentration - catalyst dosage
4.Catalyst dosage	2 g/L	- contact time - pH - Ibuprofen concentration

การศึกษาการใช้ซ้ำของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

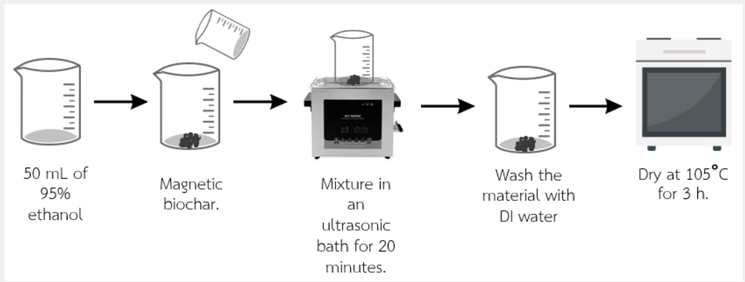

Fig.5 Investigation of the reusability of magnetic biochar (Chakhtouna et al. 2021)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัดไอบูโพรเฟน

Table 2. Reaction order equation

Zero-Order Reaction	$C_t = C_0 - kt$
First-Order Reaction	$\ln C_t = \ln C_0 e^{-kt}$
Second-Order Reaction	$1/C_t = 1/C_0 + kt$

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนวิจัยเพื่อการพัฒนาบัณฑิตศึกษา คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการทดลอง

การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

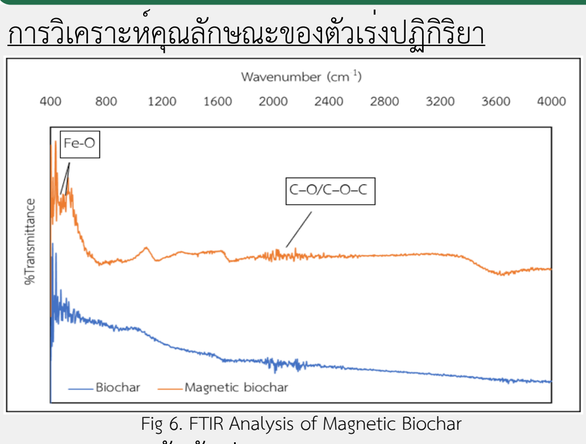

Fig 6. FTIR Analysis of Magnetic Biochar

- ผลการวิเคราะห์ลักษณะของถ่านชีวภาพแม่เหล็กด้วยเครื่อง FTIR พบว่าที่พีค 588 และ 400 cm^{-1} ซึ่งเป็นพันธะ Fe-O ยืนยันการเกิดโครงสร้างแม่เหล็ก Fe_3O_4 บนพื้นผิวถ่านชีวภาพ

ผลของความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการบำบัด

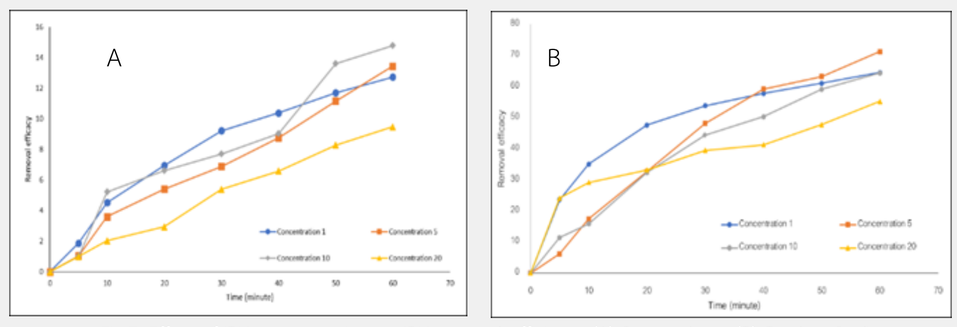

Fig 7. Effect of IBU concentration on IBU removal efficiency (A) Ozone alone, (B) Catalyst 2 g/L.

ผลของความเข้มข้น 1, 5, 10 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ pH 7.0 เวลา 60 นาที การใช้ โอโซนเพียงอย่างเดียวประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ที่ 9.48–14.80% ขณะที่ โอโซนร่วมถ่านชีวภาพแม่เหล็ก 2 กรัม/ลิตร ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 55.24–71.22% เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคอล (•OH) ทำให้การบำบัด IBU มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ผลการศึกษาของ pH ต่อประสิทธิภาพการบำบัด

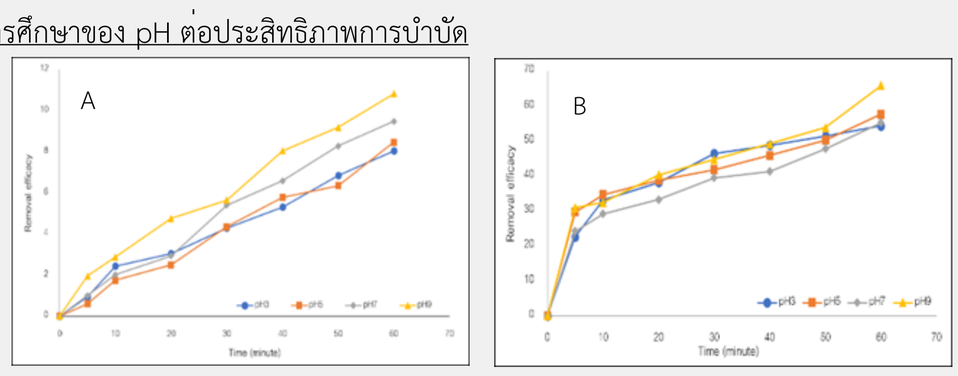

Fig 8. Effect of IBU pH on IBU removal efficiency (A) Ozone alone, (B) Catalyst 2 g/L

โอโซนเพียงอย่างเดียวประสิทธิภาพการบำบัด IBU ค่อนข้างต่ำอยู่ที่ 8.46-10.83% แต่เมื่อใช้ โอโซนร่วมกับถ่านชีวภาพแม่เหล็กจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดเป็น 54.30–65.90% และสูงสุดที่ pH 9.0 เนื่องจากสภาวะด่างช่วยเร่งการสลายตัวของ O_3 และถ่านชีวภาพแม่เหล็กนั้นช่วยให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอล (•OH) มากขึ้นจึงเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด

การนำถ่านชีวภาพแม่เหล็กกลับมาใช้ซ้ำ

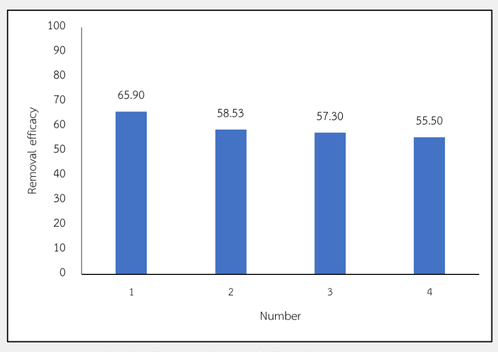

Fig 9. Reusability of Catalyst

ถ่านชีวภาพแม่เหล็กสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ โดยประสิทธิภาพการบำบัดลดลงจาก 65.90% เหลือ 55.50% ในรอบที่ 4 เนื่องจากการยึดเกาะของสารอินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผิวของตัวเร่งแต่ยังคงมีศักยภาพสำหรับการใช้งานในระบบบำบัดจริง

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการบำบัดไอบูโพรเฟน

Table 3. Kinetic study of the ibuprofen degradation reaction

pH	Secondary order reaction			
	Ozone alone		Catalytic ozonation	
	Rate constant ($L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$)	R^2	Rate constant ($L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$)	R^2
3	0.000067	0.9875	0.00087	0.9279
5	0.000072	0.9885	0.00085	0.9081
7	0.000087	0.9934	0.00065	0.9304
9	0.000092	0.9893	0.00119	0.8988

ปฏิกิริยาการบำบัด IBU ด้วยโอโซนและโอโซนร่วมกับถ่านชีวภาพแม่เหล็ก สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับสอง โดยการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว มีค่า k สูงสุด เท่ากับ 0.00009 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$ ที่ pH 9 ส่วนการใช้โอโซนร่วมถ่านชีวภาพแม่เหล็ก มีค่า k สูงกว่าโอโซนโดยมีค่า อยู่ในช่วง 0.00065–0.00119 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยสร้าง •OH ส่งผลให้ปฏิกิริยาการบำบัด IBU เกิดได้เร็วกว่าและมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น

สรุป

- ถ่านชีวภาพแม่เหล็กสังเคราะห์จาก $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ และ $FeCl_3$ ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม โดย FTIR ยืนยันการเกิด Fe_3O_4 จากพีค Fe–O ที่ 588 และ 433 cm^{-1}
- การใช้ โอโซนร่วมถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ให้ประสิทธิภาพบำบัด IBU สูงกว่าโอโซนเดี่ยว เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยสร้างไฮดรอกซิลเรดิคอล (•OH) ที่มีศักยภาพออกซิเดชันสูง
- ประสิทธิภาพสูงสุดพบที่ pH 9.0 สามารถกำจัด IBU ได้ 65.90% และปฏิกิริยาเป็นไปตาม จลนพลศาสตร์อันดับสอง โดยมีค่า k = 0.00065–0.00119 $L \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$
- ถ่านชีวภาพแม่เหล็กสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ โดยประสิทธิภาพลดลงจาก 65.90% เหลือ 55.50% ในรอบที่ 4 อาจเกิดจากการหลุดของเหล็กออกไซด์และการอุดตันของรูพรุน ทำให้การเกิด •OH ลดลง

เอกสารอ้างอิง

Chakhtouna, H., Benzeid, H., Zari, N., Qaiss, A. el K., & Bouhfid, R. (2021). Functional CoFe2O4-modified biochar derived from banana pseudostem as an efficient adsorbent for the removal of amoxicillin from water. Separation and Purification Technology, 266(118592), 118592.

Eraga, S. O., Arhewoh, M. I., Chibuogwu, R. N., & Iwuagwu, M. A. (2015). A comparative UV–HPLC analysis of ten brands of ibuprofen tablets. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 5(10), 880–884.

Quero-Pastor, M. J., Garrido-Perez, M. C., Acevedo, A., & Quiroga, J. M. (2014). Ozonation of ibuprofen: a degradation and toxicity study. The Science of the Total Environment, 466–467, 957–964.

Xin, H., Yang, J., Lu, Y., Xiao, H., Wang, H., Eltohamy, K. M., Zhu, X., Liu, C., Fang, Y., Ye, Y., & Liang, X. (2024). Potentials of emergent plant residue derived biochar to be alternative carbon-based phosphorus fertilizer by Fe(II)/Fe(III) magnetic modification. Biochar, 6(1).

ติดต่อเพิ่มเติม

099 254 5289 chayanin.h@ku.th