



การกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิตกร่วมกับตัวเร่ง
ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนทิวบ์

**Color Removal from Synthetic Wastewater by Photocatalytic Process
with TiO₂-nanotubes Photocatalyst**

กาญจนา ลอยทะเล¹ ชรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์^{1*} และ สัญญา สิริวิथाปกรณ²

Kanjana Loytala¹ Thammasak Rojviroon^{1*} and Sanya Sirivithayapakorn²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี ประเทศไทย

²ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

¹Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand

²Environmental Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

*Corresponding author, E-mail: thammasak@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิตกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเตรียมขึ้นโดยกระบวนการแอนโนไดเซชัน ที่ค่าความต่างศักย์แตกต่างกัน 4 ค่า โดยใช้ 2 ชนิด ได้แก่ IC และ RB5 รวมถึงศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นด้วยอุปกรณ์ FE-SEM และ XRF ซึ่งระบุองค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาและ แสดงให้เห็นพื้นที่ผิว เป็นหลุมในลักษณะท่อ (Nanotubes) สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสี IC และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิตกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาข้างต้น และกับแหล่งกำเนิดแสง UVA ที่มีความเข้มแสง 1,580 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ พบว่ากระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดสี เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำสุดของสี IC เท่ากับ 0.8 μM , RB5 เท่ากับ 2.0 μM โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดสีของ IC และ RB5 เท่ากับ 76.19% และ 65.59% ตามลำดับ และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของสี IC และ RB5 มีค่าเท่ากับ 0.0176 min^{-1} และ 0.013 min^{-1} ตามลำดับ

คำสำคัญ: แอนโนไดเซชัน โฟโตออกซิเดชัน นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

Abstract

This research aimed to study the performance of color removal from synthetic wastewater by photocatalytic process with TiO₂-nanotubes photocatalyst prepared by the anodizing process with four different electric potentials and using two types of colors, i.e. IC and RB5. The physical characteristics of the prepared photocatalysts were investigated by XRF and FE-SEM that identified the elements of the catalysts and revealed nanotube characteristic of the surface. The results of color removal efficiency of IC and RB5 by this process with



TiO₂-nanotubes photocatalyst under UVA light source of 1,580 μW/cm² revealed that the highest efficiency were 76.19% and 65.59%, respectively for IC and RB5 with the initial concentrations of IC and RB5 of 0.8 μM and RB5 2.0 μM, respectively. The kinetics of the color removal from synthetic wastewater by photocatalytic process with TiO₂-nanotubes photocatalyst under UVA light source were described by the 1st-order equation kinetics model. The specific rates of the color removal for IC and RB5 were 0.0176 min⁻¹ and 0.013 min⁻¹, respectively.

Keywords: Anodization, Photo-oxidation, Nano-TiO₂

1. บทนำ

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีหลายด้าน โดยได้มีการประยุกต์และการนำวัสดุนาโนมาใช้ในการต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น การแพทย์ วิศวกรรม เกษตรกรรม และเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นต้น (Mangematin and Walsh 2012, AlKahtani 2018, Villena de Francisco and García-Esteba 2018) ในส่วนของงานทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ได้มีการนำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) มาใช้ในการบำบัดมลพิษด้านต่างๆ เช่น มลพิษทางน้ำ อากาศ การยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และการกำจัดกลิ่น เป็นต้น (Ren, Koshy et al. 2017, Javid, Kumar et al. 2019, Maurer and Koziel 2019) เนื่องจาก TiO₂ มีคุณสมบัติที่ดีโดยมีช่องว่างพลังงานที่แคบสามารถดูดกลืนแสง และการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ดี มีความสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ มีความคงทนต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี อีกทั้งยังไม่มีความเป็นพิษและราคาถูก (Rojviroon and Sirivithayapakorn 2018) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกซึ่งเตรียมได้โดยกระบวนการแอโนไดเซชัน เนื่องจากวิธีการนี้ทำได้ง่ายมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน ราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆที่กล่าวมาข้างต้น [3] ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น และนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นไปทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดสี 2 ชนิด ได้แก่ Indigo Carmine (IC) และ Reactive Black 5 (RB5) รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ในการบำบัดสีทั้ง 2 ชนิดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น

2. วัตถุประสงค์

- 1 ศึกษาวิธีการเตรียมและศึกษาลักษณะสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ที่มีผลึกแบบ Nanotubes
- 2 ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น

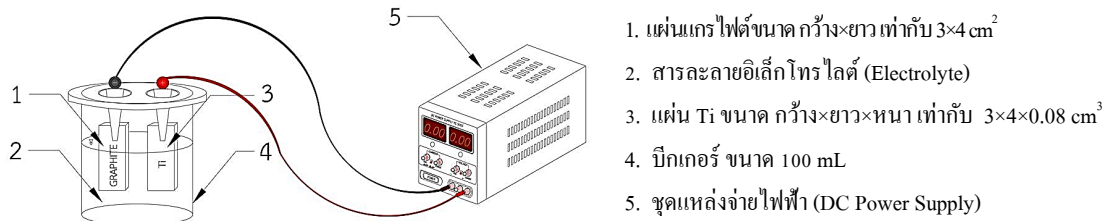
3. อุปกรณ์และวิธีการ / วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน

เตรียมแผ่น Ti ขนาด กว้าง×ยาว×หนา เท่ากับ 3×4×0.08 cm³ นำมาขัดด้วยกระดาษทราย แล้วล้างด้วยเครื่อง Ultrasonic ในตัวทำละลาย อะซีโตน เอทานอล และน้ำ DI ตามลำดับ โดยใช้เวลารั้งละ 15 นาที แล้วเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน ในการเริ่มต้นกระบวนการแอโนไดเซชันนั้น เริ่มจากนำแผ่น Ti ต่อกับขั้วบวกและแผ่นแกรไฟต์ต่อกับ



ขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า จุ่มลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วย Ethylene Glycol, NH₄F และ HF ปรับความต่างศักย์ให้มีค่าแปรผันอยู่ในช่วง 20-50 V เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหลังจากนั้นล้างด้วยน้ำ DI ใช้เครื่อง Ultrasonic เป็นเวลา 30 นาที และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 1 อุปกรณ์เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน

3.2 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes

ในส่วนลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes สามารถวิเคราะห์ในพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว และองค์ประกอบของธาตุ ทั้งนี้วิธีการและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 1

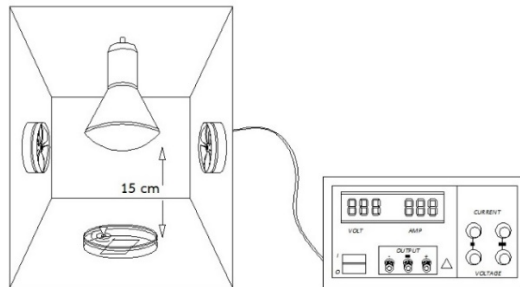
ตารางที่ 1 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes

ลักษณะสมบัติที่วิเคราะห์	วิธีการ/อุปกรณ์
ลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างของวัสดุ	Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) FEI รุ่น versat3D
วิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุ	X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)

3.3 การหาประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตชนิดเอ ทำการศึกษาโดยใช้สี 2 ชนิด ได้แก่ IC และ RB5

3.3.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้สี IC มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 μM และวัดค่าสีเริ่มต้นในหน่วย American Dye Manufacturers Institute (ADMI) แล้วทำการทดลองใน Photoreactor โดยใส่น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 50 mL ในจานแก้วแล้วใส่แผ่น Ti ซุบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง UVA ที่มีความเข้มแสง 1,580 μW/cm² เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลา 0, 5, 15, 30, 60 และ 90 min แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 610 nm ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อหาค่าสีและความเข้มข้นของสีที่เปลี่ยนแปลงไป ในส่วนของการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้สี RB5 ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 μM แล้วทำการทดลองเช่นเดียวกันกับการทดลองโดยใช้สี IC แตกต่างกันเพียงค่าความยาวคลื่นที่ใช้วิเคราะห์สำหรับสี RB5 จะนำไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 597 nm โดยที่ความเข้มข้นสีที่ใช้มีค่าแตกต่างกันเนื่องจากให้ค่าสีที่มีค่า ADMI ใกล้เคียงกัน



1. แหล่งกำเนิดแสง UVA
2. พัดลมระบายความร้อน
3. แผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes
4. จานแก้วบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์
5. Power supply

รูปที่ 2 ชุดทดลอง Photoreactor

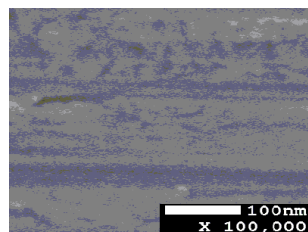
3.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในน้ำเสียสังเคราะห์

สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ IC และ RB5 ที่ผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO₂ Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาสมการจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

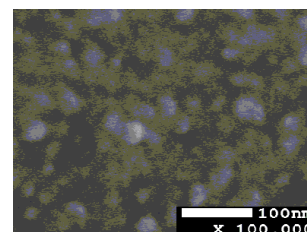
4. ผลการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์หาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes

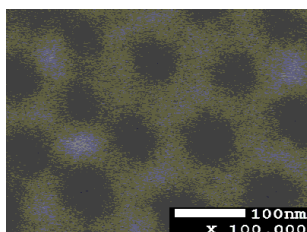
4.1.1 การวิเคราะห์หาลักษณะของพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes ด้วยอุปกรณ์ FE-SEM ผลการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ดังกล่าวแสดงเป็นภาพถ่าย 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 3



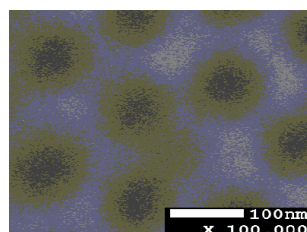
ก. Blank



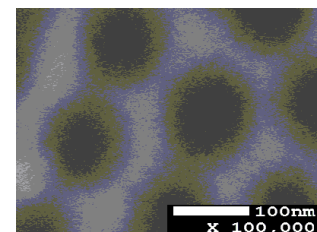
ข. 20 V



ค. 30 V



ง. 40 V



จ. 50 V

รูปที่ 3 ภาพถ่าย 3 มิติของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes ที่วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ FE-SEM ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า

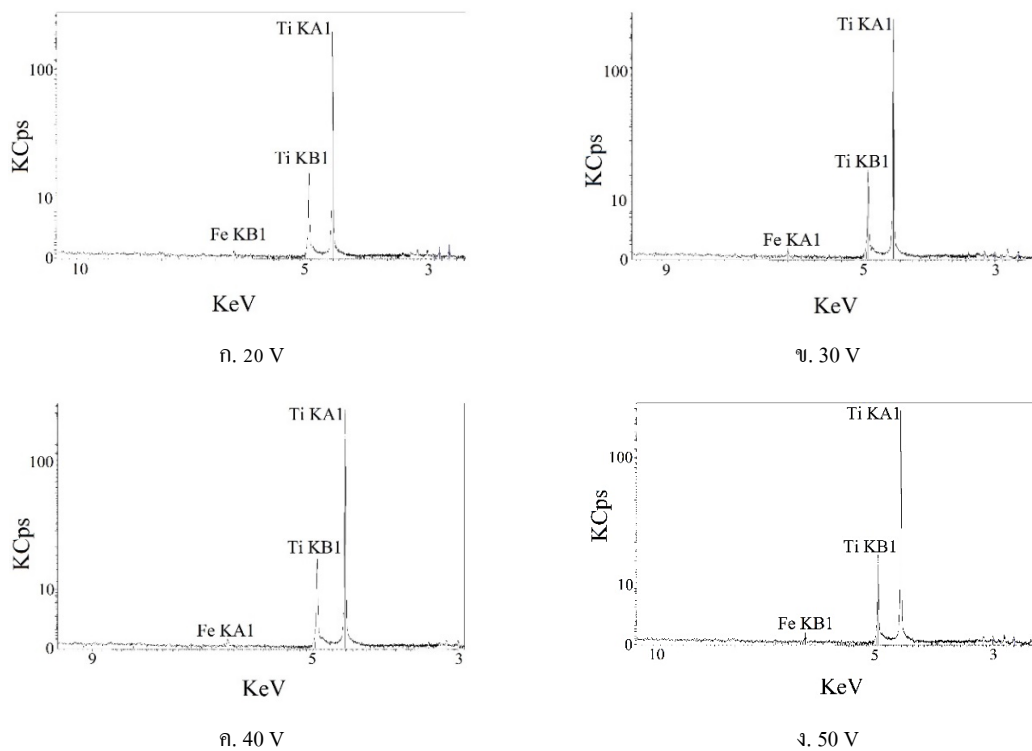
จากรูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes ด้วยอุปกรณ์ FE-SEM ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงให้เห็นว่ากระบวนการแอนโนไดเซชันสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของแผ่น



Ti ได้ โดยเกิดเป็นหลุมในลักษณะท่อ (Nanotubes) ลึกลงไปจากพื้นผิวหน้าของแผ่น Ti ที่มีกรดเตรียมขึ้น ทั้งนี้เมื่อมีการเพิ่มค่าความต่างศักย์ให้สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขรุขระที่พื้นผิวของแผ่น Ti มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

4.2 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes ด้วยอุปกรณ์ XRF

สำหรับการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณองค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes ด้วยเครื่อง XRF โดยอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes ที่เตรียมขึ้นด้วยกระบวนการเอโนโดเซชัน ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4 และตารางที่ 2



รูปที่ 4 ผลวิเคราะห์ TiO₂ Nanotubes ที่เตรียมด้วยความต่างศักย์ต่างๆ โดยอุปกรณ์ XRF

ตารางที่ 2 ปริมาณธาตุที่พบในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes ที่เตรียมขึ้น

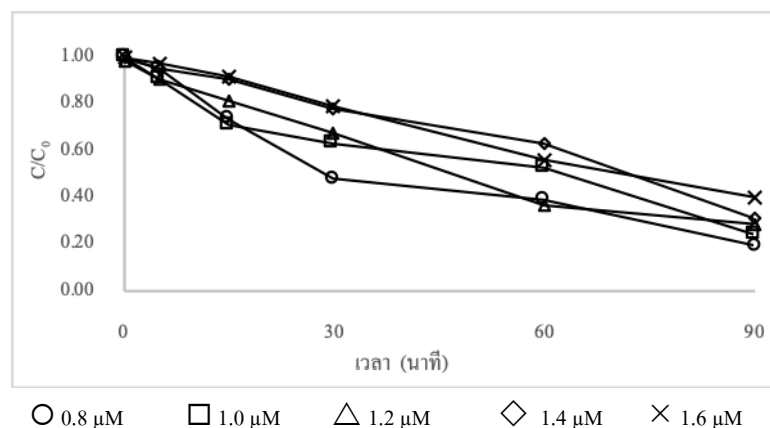
ความต่างศักย์ (V)	ปริมาณองค์ประกอบของธาตุ	
	Ti (%)	Fe (%)
Blank	91.1	0.12
20	92.1	0.18
30	99.4	0.11
40	98.8	0.11
50	97.7	0.11



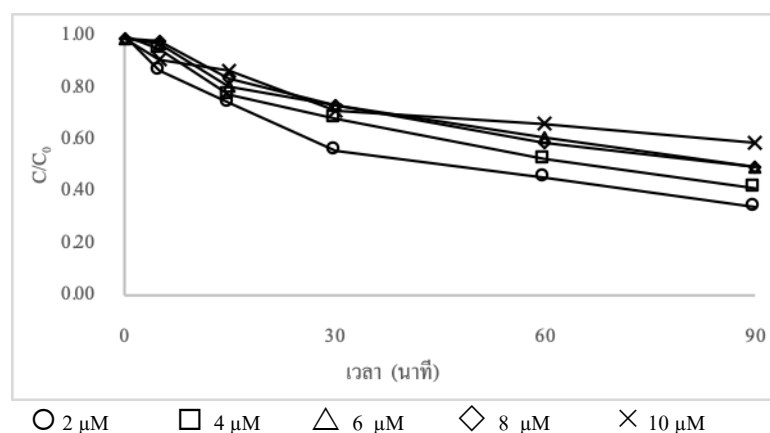
จากรูปที่ 4 และตารางที่ 2 อธิบายผลว่า ผลจากการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ XRF แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของธาตุที่อยู่บนแผ่น Ti ทั้งก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาแอนโนไดเซชัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาแอนโนไดเซชันไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบธาตุเดิมของแผ่น Ti แต่ส่งผลกระทบต่อลักษณะพื้นผิวของแผ่น Ti เท่านั้น

4.3 การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ IC และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO₂ Nanotubes

ในการศึกษาการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ IC และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO₂ Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับสี IC มีการแปรผันของช่วงค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 0.8, 1, 1.2, 1.4 และ 1.6 μM และในส่วนของสี RB5 มีการแปรผันของช่วงค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 μM หลังจากผ่านการบำบัดแล้วทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียดังกล่าวที่เวลา 5, 15, 30, 60 และ 90 min ตามลำดับ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 ของสี IC และ RB5 ที่เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีทั้ง 2 ชนิดที่มีความเข้มข้นลดลงด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6



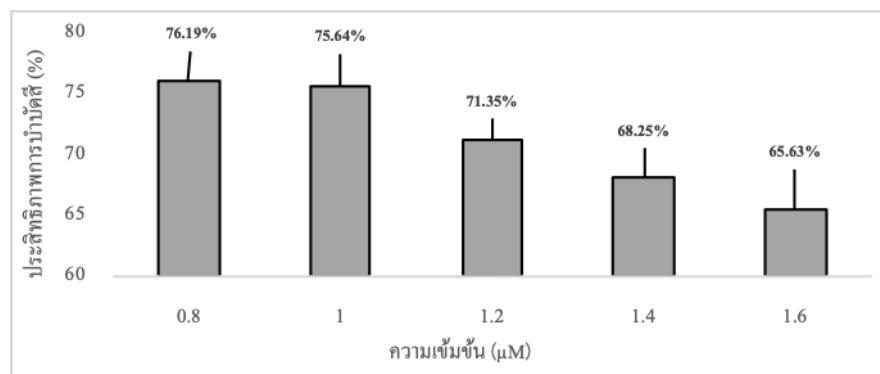
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 ของสี IC ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes



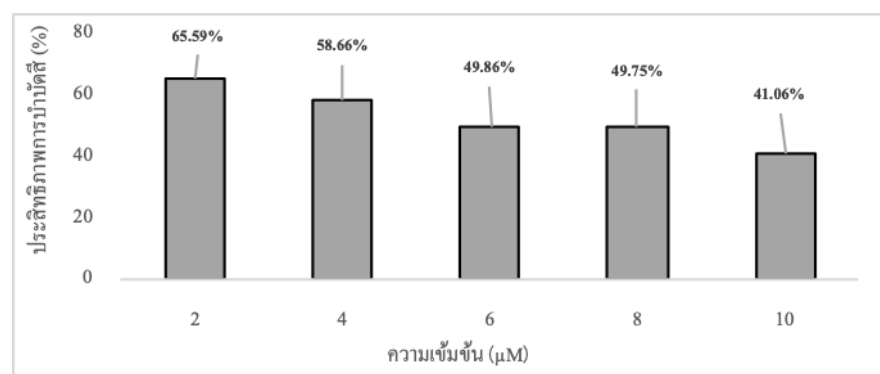
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง C/C_0 ของสี RB5 ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ Nanotubes



จากรูปที่ 5 และ 6 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสีในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น พบว่า ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ทำให้สีมีความเข้มข้นลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเมื่อแสง UVA ที่มีพลังงานแสงมากกว่า 3.2 eV ส่องผ่านไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes กลไกดังกล่าวทำให้เกิดปฏิกิริยาถูกโซ่เวเลนซ์อิเล็กตรอน ถูกกระตุ้นไปยังแถบการกระตุ้น และเกิดโฮล ที่แถบเวเลนซ์ ทำให้เกิดตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง คือ Hydroxyl Radicals ($\cdot\text{OH}$) และ Superoxide Radicals ($\cdot\text{O}_2^-$) เป็นผลิตภัณฑ์ (Chockalingam, V.S. and Narayanan, S. 2003, Thomas Martinez et al. 2014) ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำเสียได้



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์กับความเข้มข้นของสี IC โดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์กับความเข้มข้นของสี RB5 โดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 7 และ 8 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าต่ำจะให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าความเข้มข้นของสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าสูง เนื่องจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ซึ่งสีที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์จะถูกออกซิไดซ์ด้วย $\cdot\text{OH}$ และ $\cdot\text{O}_2^-$ ทำให้ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง และเมื่อพิจารณาผลจากปฏิกิริยาดังกล่าว พบว่าช่วงเวลา 15-30 นาทีแรก อัตรา



การเกิดปฏิกิริยาจะอยู่สูงสุด เนื่องจากปัจจัยจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล (Mass Transfer Limit) ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยอาศัยกลไกการดูดซับที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดย $\cdot\text{OH}$ ที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Kimfung Li et al. 2014, Kanheya Mehrotra et al. 2003)

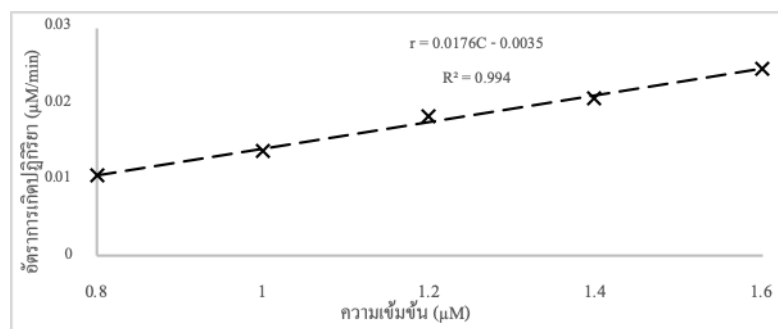
4.4 ศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในน้ำเสียสังเคราะห์

สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC และ RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ TiO_2 Nanotubes เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า สมการที่เหมาะสมในการใช้อธิบายกลไกการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC และ RB5 คือ สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาได้จากสมการ (Vishnuganth, Remya et al. 2016, Ranjbar, Ayati et al. 2018)

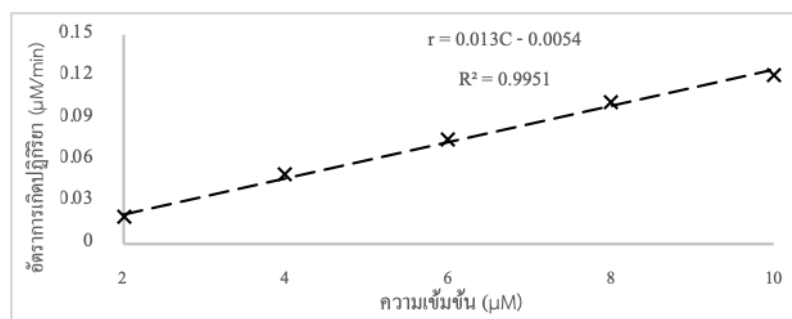
$$\frac{dC}{dt} = -k_1C \quad (4.1)$$

ซึ่ง k_1 เป็นค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังสมการที่ 4.2

$$\ln \frac{C_0}{C} = kt \quad (4.2)$$



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตปฏิกิริยากับเวลาของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผลิตปฏิกิริยากับเวลาของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี RB5



จากรูปที่ 9 และ 10 แสดงให้เห็นถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในลักษณะเดียวกัน แต่ค่า kinetic rate มีความแตกต่างกันระหว่างสีทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากความซับซ้อนของโมเลกุลสี IC มีน้อยกว่า RB5 ทำให้ kinetic rate ของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกกับ IC มีค่าสูงกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 0.0176 min^{-1} ในขณะที่ RB5 มีค่าเท่ากับ 0.013 min^{-1}

5. การอภิปรายผล

5.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ XRF แสดงให้เห็นถึงปริมาณธาตุที่พบบนแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes หลังจากผ่านกระบวนการแอนโนไดเซชัน โดยพบปริมาณของธาตุนบนแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes จำนวน 2 ชนิด ซึ่งเป็นธาตุ 2 ชนิดหลักเช่นเดียวกับแผ่น Ti ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแอนโนไดเซชัน (Blank) ทั้งนี้ ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันที่มีการแปรเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไม่ส่งผลต่อปริมาณธาตุที่อยู่ในแผ่น Ti

5.2 ผลการทดลองพบว่า ทั้งสี IC และ RB5 มีความเข้มข้นลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ทั้งนี้เมื่อพิจารณาตลอดระยะเวลาทำการทดลองที่เวลา 90 min รูปที่ 7-8 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพการบำบัดสีทั้ง 2 ชนิด โดยประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสี IC ต่ำที่สุดเท่ากับ $0.8 \mu\text{M}$ มีประสิทธิภาพเท่ากับ 76.19% และสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสี RB5 พบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RB5 ต่ำที่สุดเท่ากับ $2.0 \mu\text{M}$ มีประสิทธิภาพเท่ากับ 65.59% ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดสี IC และ RB5 ที่เวลา 90 min แปรผันกับความเข้มข้นของสีดังกล่าวที่เตรียมขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเป็นปัจจัยสำคัญต่อการส่องผ่านของแสงอัลตราไวโอเล็ตไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้การทดลองที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีทั้ง 2 ชนิด ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าสูงทำให้การเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกเกิดได้ไม่ดี นอกจากนี้เมื่อพิจารณากระบวนการดังกล่าวพบว่าความเข้มข้นของสีทั้ง 2 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดอนุมูลอิสระที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่รุนแรง $\cdot\text{OH}$ และ $\cdot\text{O}_2^-$ ทำให้สามารถออกซิไดซ์สีที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าวได้ (Inamuddin 2019)

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเวลาของการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC และ RB5 สามารถหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการบำบัดสี IC และ RB5 ได้เท่ากับ 0.0176 min^{-1} และ 0.013 min^{-1} ตามลำดับ ซึ่งสี IC มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่า RB5 เพราะว่าความเข้มข้นที่แตกต่างกัน รวมทั้งสี RB5 มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนกว่าสี IC ทำให้ย่อยสลายได้ยากกว่า (Rojviroon and Sirivithayapakorn 2016)

6. บทสรุป

จากการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes และการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1 คุณสมบัติที่เหมาะสมกับกระบวนการโฟโตคะตะลิติก โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นที่ดีที่สุดที่มีการเตรียมที่ความต่างศักย์เท่ากับ 50 V ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF พบว่าบนแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ที่ผ่านกระบวนการแอนโนไดเซชันที่มีการแปรเปลี่ยนค่าความต่างศักย์จะไม่ส่งผลต่อปริมาณธาตุที่อยู่ในแผ่น Ti

6.2 จากการศึกษากการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สี IC และ RB5 ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสี IC ต่ำที่สุดเท่ากับ $0.8 \mu\text{M}$ มีประสิทธิภาพเท่ากับ 76.19% และสำหรับประสิทธิภาพ



การบำบัดสี RB5 พบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RB5 ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.0 μM มีประสิทธิภาพเท่ากับ 65.59% ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดสี IC และ RB5 ที่เวลา 90 min แปรผันกับความเข้มข้นของสีดังกล่าวที่เตรียมขึ้น

6.3 จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกจากสี IC และสี RB5 โดยแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับเวลาสามารถหาค่าคงที่ต่าง ๆ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งคือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 Nanotubes ของสี IC และ RB5 มีค่าเท่ากับ 0.0176 min^{-1} และ 0.013 min^{-1} ตามลำดับ

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งทุนงบประมาณสำหรับการทำงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.)ประจำปี 2561 ส่งผลให้การวิจัยดังกล่าวเป็นไปด้วยความเรียบร้อยและสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

- AlKahtani, R. N. (2018). The implications and applications of nanotechnology in dentistry: A review. *The Saudi Dental Journal* 30(2), 107-116.
- Chockalingam, V.S. and Narayanan, S. (2003). Bactericidal and Detoxification Effects of Irradiated Semiconductor Catalyst, TiO_2 , *Current Science*. 85, 10: 1431-1438.
- Inamuddin (2019). Xanthan gum/titanium dioxide nanocomposite for photocatalytic degradation of methyl orange dye. *International Journal of Biological Macromolecules* 121, 1046-1053.
- Javid, A., et al. (2019). Photocatalytic antibacterial study of N-doped TiO_2 thin films synthesized by ICP assisted plasma sputtering method. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 106, 187-193.
- Kimfung, L., et al (2014). A Critical Review of CO_2 Photoconversion: Catalysts and Reactors. *Catalysis Today*. 224:3-12.
- Kanheya, M., et al. (2003). Kinetic Studies of Photocatalytic Degradation in a TiO_2 Slurry System: Distinguishing Working Regimes and Determining Rate Dependences. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 42;11:22732281.
- Mangematin, V. and S. Walsh (2012). The future of nanotechnologies. *Technovation* 32(3), 157-160.
- Maurer, D. L. and J. A. Koziel (2019). On-farm pilot-scale testing of black ultraviolet light and photocatalytic coating for mitigation of odor, odorous VOCs, and greenhouse gases. *Chemosphere* 221, 778-784.
- Ranjbar, P. Z., et al. (2018). Kinetic study on photocatalytic degradation of Acid Orange 52 in a baffled reactor using TiO_2 nanoparticles. *Journal of Environmental Sciences*.
- Ren, H., et al. (2017). Photocatalytic materials and technologies for air purification. *Journal of Hazardous Materials* 325, 340-366.



- Rojviroon, O. and S. Sirivithayapakorn (2016). Photocatalytic decolourisation of dyes using TiO₂ thin film photocatalysts. *Surface Engineering* 32(8), 562-569.
- Rojviroon, T. and S. Sirivithayapakorn (2018). E. coli Bacteriostatic Action Using TiO₂ Photocatalytic Reactions. *International Journal of Photoenergy* 2018, 12.
- Thomas Martinez, Alexandra Bentron, Gilles Eseadeillas, and Erich Ringot (2014). Algal Growth Inhibition on Cement Mortar: Efficiency of Water Repellent and Photocatalytic Treatments under UV/VIS Illumination, *International Biodeterioration & Biodegradation*. 89: 115-125.
- Villena de Francisco, E. and R. M. García-Esteba (2018). Nanotechnology in the agrofood industry. *Journal of Food Engineering* 238, 1-11.
- Vishnuganth, M. A., et al. (2016). Photocatalytic degradation of carbofuran by TiO₂-coated activated carbon: Model for kinetic, electrical energy per order and economic analysis. *Journal of Environmental Management* 181, 201-207.