

อุปกรณ์บำบัดน้ำเสียโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงซิงค์ออกไซด์

ปณณช สุระชัย^{1*}, ตุลยดา แยมยิ่ง¹, นิรัชพร วรรณะ¹, ดวงแข ศรีคุณ¹, และ ดารารณณ์ เตรียมโพธิ์²

¹โรงเรียนมหิตลวิทยานุสรณ์ ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม

²ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม

* Corresponding author: punyanuch.sur_g33@mwit.ac.th

บทคัดย่อ

ระบบ AOP (Advance Oxidation Process) หรือกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสารมลพิษที่ย่อยสลายได้ยาก ซึ่งหนึ่งในวิธีการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่จำเป็นต้องมีการเติมสารออกซิไดซ์รุนแรง คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst) อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแบบผงสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ยาก ในปัจจุบันมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงชนิดฟิล์มบางบนวัสดุยึดเกาะเพื่อความสะดวกต่อการใช้ซ้ำ งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียต้นแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงประเภทฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) บนแผ่นกระจกสไลด์ โดยมีการบำบัดร่วมกับการใช้หลอดไฟยูวีแบบกันน้ำ เครื่องบำบัดน้ำต้นแบบประกอบด้วยสไลด์เคลือบ nano-ZnO จำนวน 32 แผ่น และ หลอดยูวีแบบกันน้ำ 4 หลอด สามารถบรรจุสารละลายปริมาตรสูงสุด 1.4 ลิตร การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสารละลาย Methylene blue พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัด 31.2 % ในเวลา 60 นาที เครื่องบำบัดน้ำต้นแบบนี้จะอยู่ระหว่างการพัฒนาแบบอัตโนมัติโดยติดตั้งปั้มน้ำเข้าและปั้มน้ำออก เพื่อให้สามารถหมุนเวียนน้ำเข้าออกจากเครื่องบำบัดระหว่างการเปิดไฟยูวี เพื่อลดความเสี่ยงจากการสัมผัสกับแสงยูวี

คำสำคัญ: ซิงค์ออกไซด์ / กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง / ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงประเภทฟิล์มบาง / เครื่องบำบัดน้ำต้นแบบ / สารสีย้อม

ZnO – catalyzed photodegradation unit

Punyanuch Surachai^{1*}, Tulyada Yaemying¹, Niratchaporn Wanna¹, Duangkhae Srikun¹,
and Darapond Triampo²

¹ Mahidol Wittayanusorn, Mahidol University, Thailand

² Faculty of Science, Mahidol University, Thailand

*Corresponding author: punyanuch.sur_g33@mwit.ac.th

Abstract

The AOP (Advanced Oxidation Process) system is a technology used to remove hard-to-degrade pollutants. One environmentally friendly method that does not require the addition of harsh oxidizing agents is the oxidation reaction using a photocatalyst. However, the oxidation reaction using powdered photocatalysts is difficult to reuse. Currently, there has been development of thin-film photocatalysts on substrates for ease of reuse. This research is interested in studying the development of a prototype wastewater treatment device using a thin film photocatalyst of zinc oxide (ZnO) on a glass slide, combined with the use of waterproof UV lamps. The prototype water treatment device consists of 32 slides coated with nano-ZnO and 4 waterproof UV lamps, capable of holding a maximum solution volume of 1.4 liters. The efficiency test of Methylene blue solution treatment showed a treatment efficiency of 31.2% in 60 minutes. This prototype water treatment device is being developed into an automated system by installing inlet and outlet pumps to circulate water in and out of the treatment unit during UV light operation, reducing the risk of UV exposure.

Keywords: Zinc oxide / Advanced Oxidation Process / Thin – film photocatalyst / The prototype water treatment device / Dyes

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนของสิ่งแวดล้อมค้ำจุนน้ำจากแหล่งต่าง ๆ เช่น จากอุตสาหกรรมสีย้อม อุตสาหกรรมยา เกษตรกรรม เป็นต้น เป็นปัญหาที่สำคัญ เนื่องจากน้ำเสียจากแหล่งเหล่านี้มักมีสารมลพิษที่ย่อยสลายได้ยาก ซึ่งระบบ AOP (Advanced Oxidation Process) หรือกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง จึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียประเภทดังกล่าวอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งหนึ่งในวิธีการที่เป็นที่สนใจ คือ ปฏิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิริยาเชิงแสง (Photocatalyst) เนื่องจากเป็นปฏิริยาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นปฏิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและไม่จำเป็นต้องมีการเติมสารออกซิไดซ์รุนแรง โดยตัวเร่งปฏิริยาเชิงแสง เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂), ไอร์ออน(III) ออกไซด์ (Fe₂O₃) หรือ เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO) [1]

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่สามารถสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของวัสดุนาโน สมบัติทางแสงของ ZnO ขึ้นกับลักษณะและขนาดของผลึก โดยทั่วไปซิงค์ออกไซด์จะมีโครงสร้างแบบเวอร์ตไซต์ (wurtzite) หรือเฮกซะโกนัล (hexagonal) มีช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) กว้างประมาณ 3.37 eV ซึ่งมีความยาวคลื่นเท่ากับ 368 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงของรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง ZnO สามารถถ่ายเทพลังงานให้กับแก๊สออกซิเจนและน้ำให้เกิด reactive oxygen species ซึ่งสามารถทำปฏิริยาเพื่อสลายพิษเคมีในสารอินทรีย์

ข้อจำกัดของการใช้ตัวเร่งปฏิริยาประเภทนี้ คือ การแยกของตัวเร่งออกจากน้ำที่บำบัดแล้ว วิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหาคือการเคลือบตัวเร่งปฏิริยาเชิงแสงบนวัสดุยึดเกาะประเภทของแข็ง งานวิจัยโดยเปมิกาและคณะ [2] พบว่ากระจกสไลด์ที่มีการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมา เมื่อนำมาเคลือบด้วย nano-ZnO สามารถให้ตัวเร่งปฏิริยาเชิงแสงที่สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนเมทิลีนบลูได้สูงถึง 86% ในเวลา 1 ชั่วโมง และสามารถใช้ซ้ำได้ไม่ต่ำกว่า 5 ครั้งโดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพ

โครงการนี้เป็นโครงการวิจัยการประดิษฐ์เชิงต่อยอดเพื่อพัฒนาเครื่องบำบัดน้ำดื่มแบบที่ใช้กระจกสไลด์เคลือบ ZnO เป็นตัวเร่งปฏิริยาเชิงแสงร่วมกับการใช้หลอดไฟยูวีชนิดจุ่มน้ำขนาด 5W ซึ่งปกติมีการใช้หลอดไฟชนิดนี้เพื่อกำจัดสาหร่ายในตู้ปลาสวยงาม ผู้วิจัยเลือกใช้หลอดไฟยูวีชนิดจุ่มน้ำเพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการเคลื่อนที่ของแสงผ่านตัวกลาง เครื่องปฏิกรณ์แบบประกอบด้วยระบบอัตโนมัติ ได้แก่ ระบบถ่ายเทน้ำเข้าและน้ำออกด้วยปั๊มแบบรีดสาย ระบบการปิดเปิดหลอดไฟยูวี และระบบการวัดค่าการดูดกลืนสีของน้ำเสียระหว่างการบำบัด ซึ่งในโครงการได้สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) ข้อที่ 6 (การจัดการน้ำสะอาดและสุขาภิบาล) โดยเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อบำบัดน้ำเสียให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างปลอดภัย ข้อที่ 9 (อุตสาหกรรม นวัตกรรม และโครงสร้างพื้นฐาน) โดยมุ่งเน้นการพัฒนานวัตกรรมเครื่องบำบัดน้ำดื่มแบบที่มีต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย และสามารถต่อยอดไปสู่การผลิตในระดับชุมชนหรืออุตสาหกรรมขนาดเล็กได้ในอนาคต รวมถึง ข้อที่ 12 (การบริโภคและการผลิตอย่างยั่งยืน) ด้วยการลดการใช้สารเคมีรุนแรงในการบำบัดน้ำเสีย และส่งเสริมการใช้วัสดุซ้ำอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ตัวเร่งปฏิริยา ZnO ที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายรอบ

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเครื่องบำบัดน้ำดื่มแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิริยาเชิงแสงประเภทฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) บนกระจกสไลด์
2. เพื่อศึกษาสถานะของการใช้งานเครื่องบำบัดน้ำดื่มแบบที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด

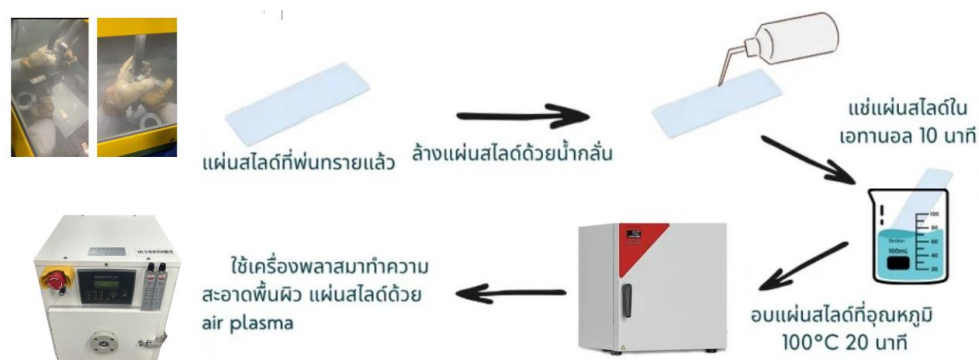
3. ขอบเขตของการศึกษา

งานนี้เป็นการพัฒนาเครื่องบำบัดน้ำดื่มแบบที่ใช้บำบัดสารสี้อม โดยใช้ Methylene blue เป็นสารตัวอย่างในการทดลอง และใช้หลอดไฟยูวีกันน้ำชนิด UV-C

4. วิธีการศึกษา

4.1 การเตรียมพื้นผิวกระจกสไลด์

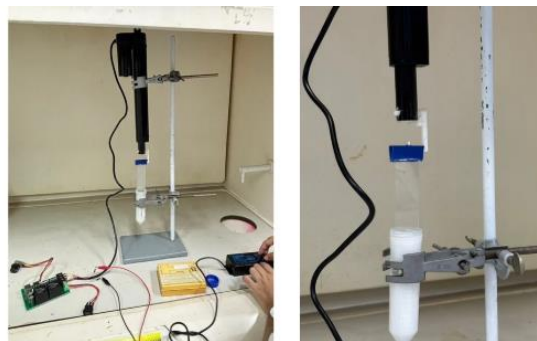
นำกระจกสไลด์ไปทำการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยการพ่นทราย ซึ่งใช้แรงดันอากาศเพื่อส่งเม็ดทรายจำนวนมากไปกระทบพื้นผิวของกระจกอย่างรวดเร็ว โดยกระจกสไลด์ที่พ่นทรายแล้วจะมีความขุ่นเล็กน้อย จากนั้นนำกระจกสไลด์ที่ผ่านการพ่นทรายล้างด้วยน้ำกลั่น แช่ในเอทานอลใน Ultrasonic bath เป็นเวลา 30 นาที อบให้แห้งโดยใช้อุณหภูมิ 100°C 20 นาที แล้วนำไปทำความสะอาดพื้นผิวโดยใช้เครื่องพลาสมาชนิดความดันต่ำ (PE-50, Plasma Etch, USA) โปรแกรมการทำความสะอาดพื้นผิวโดยใช้ air plasma ตั้งค่า RF power 20 W เป็นเวลา 3 นาที (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 การทำความสะอาดพื้นผิวของกระจกสไลด์

4.2 การสังเคราะห์นาโนซิงออกไซด์ (nano-ZnO) บนกระจกสไลด์

ชุบกระจกสไลด์ในสารละลายสารตั้งต้นของการสังเคราะห์ nano-ZnO [3] ซึ่งประกอบด้วย Zinc acetate 1 g, Ethanol 50 mL และ Ethanolamine 10 mL จากนั้นนำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง การชุบเคลือบใช้เครื่อง DIY Dip coating ที่ประกอบขึ้นเองจาก 12 V Linear motor และ Motor voltage regulator (รูปที่ 2)



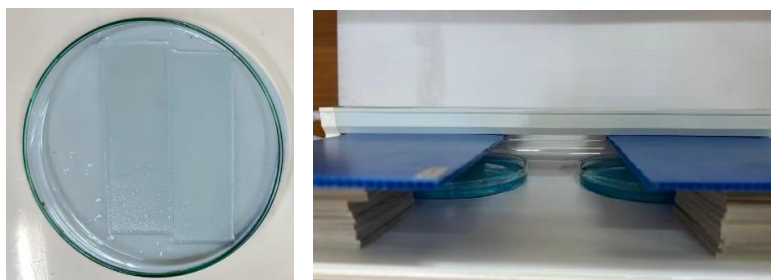
รูปที่ 2 การชุบเคลือบกระจกสไลด์ด้วยสารตั้งต้นของการสังเคราะห์ nano-ZnO

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

นำแผ่นกระจกสไลด์ 2 แผ่น วางเรียงในถาดแก้ว petri dish จากนั้นเติมสารละลาย methylene blue 5 ppm 25 mL วัดค่าดูดกลืนแสงเมื่อเวลาผ่านไป 30 และ 60 นาที เพื่อวิเคราะห์การดูดซับ methylene blue โดย nano-ZnO จากนั้นติดหลอดไฟ UV ให้ห่างจากกระจกสไลด์ 5 cm แล้ววัดค่าดูดกลืนแสงต่อเมื่อเวลาผ่านไป 90 และ 120 นาที วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (รูปที่ 3)

ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาวิเคราะห์จากการบำบัดสารสี Methylene blue โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 664 nm ด้วยเครื่อง UV- Vis spectrometer (LabQuest2-SpectroVisPlus, Vernier Science Education, USA) คำนวณประสิทธิภาพการบำบัด (% degradation efficiency) โดยใช้สมการ

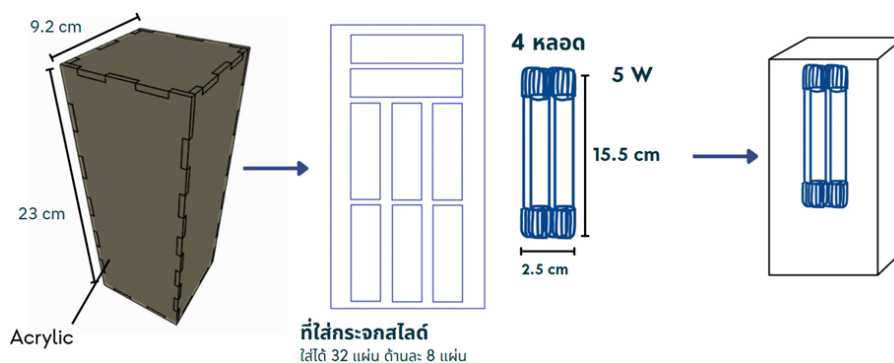
$$\text{Degradation Efficiency (\%)} = \frac{(\text{ค่าดูดกลืนแสงเริ่มต้น} - \text{ค่าดูดกลืนแสงสิ้นสุด})}{\text{ค่าดูดกลืนแสงเริ่มต้น}} \times 100\%$$



รูปที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพของกระจกสไลด์เคลือบ nano-ZnO

4.4 การออกแบบอุปกรณ์บำบัดน้ำต้นแบบ

อุปกรณ์มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมที่ทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 4 mm ฟันสีดำ โดยมีขนาดกว้าง 9.2 cm ยาว 9.2 cm และสูง 23 cm มีฝาปิดที่สามารถติดกับหลอดไฟได้ และมีแท่นสำหรับเสียบกระจกสไลด์เพื่อยึดกระจกสไลด์ให้คงที่และสามารถเปลี่ยนกระจกสไลด์ที่ใช้ทดสอบ โดยสามารถใส่กระจกสไลด์ได้สูงสุด 32 แผ่น และบรรจุน้ำได้สูงสุด 1.5 L (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์บำบัดน้ำเพื่อใช้กับกระจกสไลด์เคลือบ nano-ZnO

4.5 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำโดยอุปกรณ์ต้นแบบ

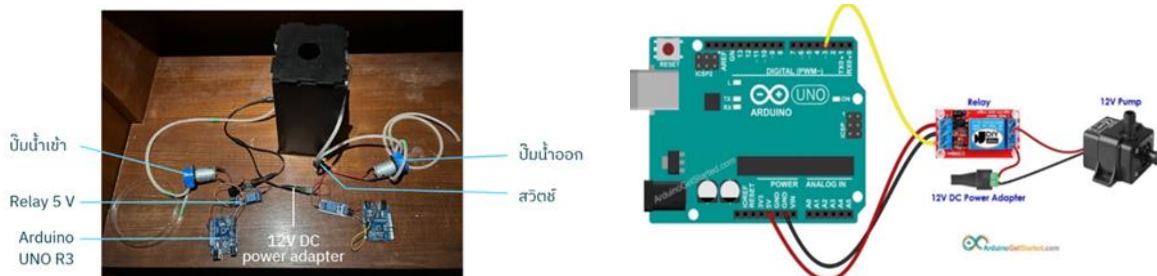
นำกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วย nano-ZnO 32 แผ่น วางเรียงในแท่นสี่เหลี่ยม จากนั้นใส่ในเครื่องบำบัดน้ำต้นแบบ (รูปที่ 5) เติม methylene blue (MB) 5 ppm 1.4 L ปิดฝาพร้อมหลอดไฟ UV-C 4 หลอด วางเครื่องบำบัดน้ำต้นแบบในตู้กันยูวี วัด ดูดกลืนแสงเมื่อเวลาผ่านไป 30 และ 60 นาที โดยมีชุดควบคุม คือ สารละลาย methylene blue 5 ppm ที่ไม่ได้ฉายแสงยูวี



รูปที่ 5 การบำบัดน้ำปนเปื้อนสีครามโดยอุปกรณ์ต้นแบบ

4.6 การติดตั้งระบบหมุนเวียนน้ำอัตโนมัติในอุปกรณ์บำบัดน้ำต้นแบบ

ระบบหมุนเวียนน้ำอัตโนมัติประกอบด้วยปั้มน้ำ 2 ตัว เพื่อทำหน้าที่ถ่ายเทน้ำปนเปื้อนสีครามเข้าสู่อุปกรณ์บำบัด และ ถ่ายเทน้ำที่ผ่านการบำบัดออกจากอุปกรณ์ ปั้มน้ำจะถูกควบคุมโดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO ซึ่งเชื่อมต่อกับ Relay (รูปที่ 6) ปั้มน้ำมีอัตราการทำงานที่คงที่ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมปริมาณน้ำโดยการกำหนดเวลาทำงานของปั้ม



รูปที่ 6 วงจรสำหรับควบคุมปั้มน้ำในอุปกรณ์บำบัดน้ำต้นแบบ

5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

5.1 การดูดซับและการบำบัด methylene blue โดยใช้กระจกสไลด์เคลือบ nano-ZnO

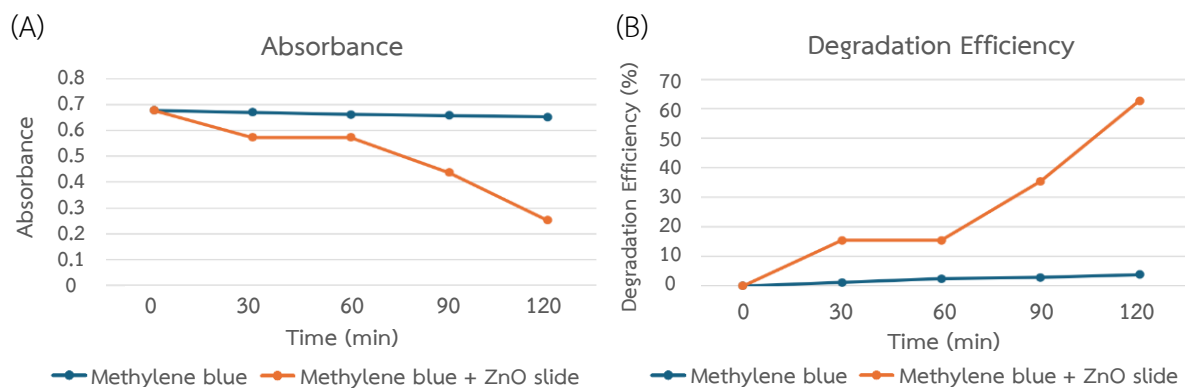
การบำบัดสารละลาย methylene blue 5 ppm 25 mL ในจานเลี้ยงเชื้อโดยใช้หลอดไฟยูวีส่องจากด้านบน มีการวิเคราะห์การกำจัดสารสีจากทั้งการดูดซับและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง การทดลองเก็บสารละลายใน ที่มีดเป็นเวลา 60 นาที พบว่า กระจกสไลด์เคลือบ nano-ZnO สามารถดูดซับ methylene blue ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของ

สารละลายลดลง คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 15.5% สมดุลของการดูดซับเกิดขึ้นภายในเวลา 30 นาที ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้เมื่อเวลา 30 และ 60 นาที มีค่าไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 1, รูปที่ 7)

เมื่อนำสารละลาย methylene blue ไปทำการทดลองต่อในสภาวะที่มีแสงยูวีพบว่า การมีแสงยูวีกระตุ้นให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันของ methylene blue ในชุดการทดลองที่มีกระจกสไลด์เคลือบด้วย nano-ZnO ทำให้มีค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายลดลงอย่างชัดเจนเทียบกับชุดควบคุม โดยมีประสิทธิภาพการบำบัด 62.8% หลังจากการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 60 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระจกสไลด์เคลือบ nano-ZnO สามารถบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อมโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นหลัก ค่าประสิทธิภาพการบำบัดของกระจกสไลด์เคลือบ nano-ZnO ในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าผลการทดลองของเปมิกาและคณะที่ทำการทดลองโดยวิธีเดียวกันแต่ได้ค่าการบำบัดสูงถึง 86% ในเวลา 60 นาที [2] เนื่องจากสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ nano-ZnO ในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการเติมยูเรีย จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพต่ำกว่า N-Dope ZnO ที่ใช้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [2, 4] นอกจากนี้ลักษณะของ nano-ZnO บนกระจกสไลด์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเชิงแสง ปัจจุบันมีเทคนิคการสังเคราะห์ ZnO ที่สามารถควบคุมลักษณะและขนาดของอนุภาคได้แม่นยำขึ้น เช่น การสังเคราะห์ ZnO โดยใช้กระบวนการแบบ 2 ขั้นตอน เพื่อให้ได้ ZnO ในลักษณะแท่ง hexagonal rod ที่มีความหนาแน่นสูงขึ้น [5]

ตารางที่ 1 การบำบัด methylene blue โดยใช้หลอดไฟยูวีร่วมกับกระจกสไลด์เคลือบ nano- ZnO

การทดลอง	ค่าการดูดกลืนแสง (ประสิทธิภาพการบำบัด %)				
	ในที่มืด			ใต้แสงยูวี	
	0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที
Methylene blue	0.678	0.670 (1.2 %)	0.661 (2.5 %)	0.658 (2.9 %)	0.652 (3.8 %)
Methylene blue และ กระจกสไลด์เคลือบ nano-ZnO	0.678	0.573 (15.5 %)	0.573 (15.5 %)	0.437 (35.5 %)	0.252 (62.8 %)



รูปที่ 7 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อมโดยใช้กระจกสไลด์เคลือบ nano-ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

(A) ค่าการดูดกลืนแสงต่อเวลา (B) ประสิทธิภาพการบำบัด

5.2 การบำบัดน้ำโดยใช้อุปกรณ์บำบัดน้ำต้นแบบ

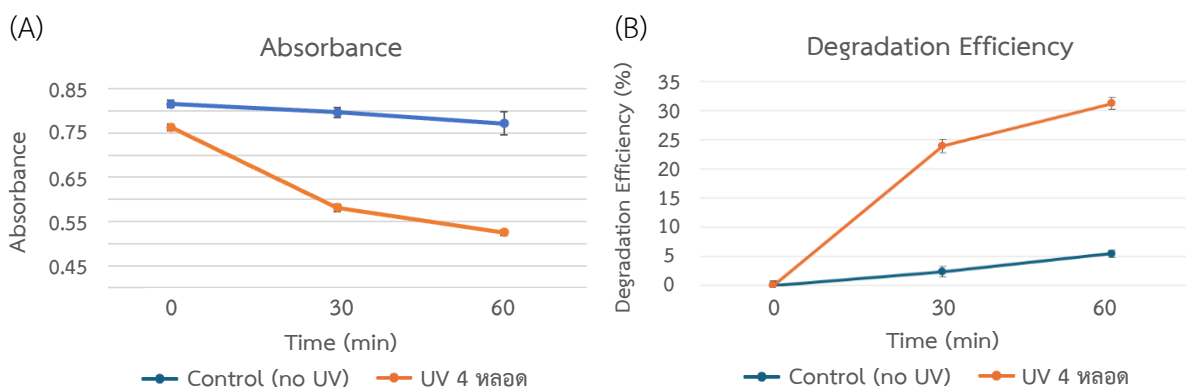
การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม methylene blue ความเข้มข้น 5 ppm ปริมาตร 1.4 L โดยใช้อุปกรณ์บำบัดน้ำต้นแบบ ที่มีกระจกสไลด์เคลือบ nano-ZnO 32 แผ่น รวมกับการใช้หลอดไฟยูวีแบบกันน้ำจำนวน 4 หลอด พบว่า ชุดควบคุมที่ทำการบรรจุน้ำในอุปกรณ์บำบัด แต่ไม่มีการฉายแสงยูวี มีค่าการดูดกลืนแสงลดลงเพียง 5.4 % จากการดูดซับสารสี แต่เมื่อมีการฉายแสงยูวี ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าลดลงแตกต่างจากชุดควบคุมอย่างชัดเจน คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 31.2% หลังการบำบัด 60 นาที (ตารางที่ 2, รูปที่ 8)

ค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม methylene blue ในอุปกรณ์บำบัดน้ำต้นแบบมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองในภาคแก้ว เนื่องจากสัดส่วนปริมาตรน้ำต่อกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน การทดลองในภาคแก้วมีสัดส่วนปริมาตรน้ำ 12.5 mL ต่อกระจกสไลด์หนึ่งแผ่น ในขณะที่อุปกรณ์บำบัดน้ำต้นแบบมีสัดส่วนปริมาตรน้ำ 43.8 mL ต่อกระจกสไลด์หนึ่งแผ่น นอกจากสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาตรน้ำที่ต้องการบำบัดแล้ว ปัจจัยอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณาในการพัฒนาประสิทธิภาพอุปกรณ์บำบัดน้ำ ได้แก่ การลดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและตัวเร่งปฏิกิริยา และการอัตราการไหลของน้ำในกรณีที่เป็นระบบบำบัดแบบไหลต่อเนื่อง [6, 7] รวมถึงอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากแหล่งกำเนิดแสงยูวี

การเปลี่ยนถ่ายน้ำในเครื่องบำบัดน้ำแต่ละรอบจำเป็นต้องทำด้วยความระมัดระวัง เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อกระจกสไลด์ และไม่เกิดอันตรายจากการสัมผัสกับแสงยูวี ซึ่งอาจมีความเสี่ยงกรณีที่เปิดตู้กันแสงยูวีขณะที่ยังไม่ได้ปิดสวิตช์หลอดไฟ ซึ่งอุปกรณ์บำบัดน้ำที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ได้มีการติดตั้งระบบหมุนเวียนน้ำอัตโนมัติจึงเป็นการเพิ่มความสะดวกในการใช้งานและเพิ่มความปลอดภัย

ตารางที่ 2 การบำบัด methylene blue โดยใช้เครื่องบำบัดน้ำต้นแบบร่วมกับกระจกสไลด์เคลือบ ZnO

การทดลอง	ค่าการดูดกลืนแสง (ประสิทธิภาพการบำบัด %)		
	0 นาที	30 นาที	60 นาที
ชุดควบคุม (ไม่เปิดไฟยูวี)	0.816	0.797 (2.3 %)	0.772 (5.4 %)
ฉายแสงด้วยไฟยูวีแบบกันน้ำ 4 หลอด	0.763	0.581 (23.9 %)	0.525 (31.2 %)



รูปที่ 8 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อมโดยใช้อุปกรณ์บำบัดน้ำต้นแบบ

(A) ค่าการดูดกลืนแสงต่อเวลา (B) ประสิทธิภาพการบำบัด

6. สรุปผลการศึกษา

การประยุกต์ใช้กระจกสไลด์เคลือบ nano-ZnO เพื่อการบำบัดน้ำเสียในอุปกรณ์บำบัดน้ำต้นแบบ พบว่าสามารถกำจัด methylene blue ในสารละลายปริมาตร 1.4 L ได้ 31.2 % เมื่อใช้เวลาบำบัด 60 นาที อุปกรณ์บำบัดน้ำต้นแบบสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น โดยการปรับลดสัดส่วนปริมาตรน้ำต่อจำนวนกระจกสไลด์ การปรับตำแหน่งของหลอดไฟยูวีให้อยู่ชิดกับกระจกสไลด์มากขึ้น และการปรับเปลี่ยนสูตรผสมของสารตั้งต้นและวิธีการการสังเคราะห์ nano-ZnO

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Joseph, A. & Vijayanandan, A. (2022). Review on support materials used for immobilization of nano-photocatalysts for water treatment applications. *Inorganica Chimica Acta*, 545, 1-11.
- [2] Na-Ranong, P., Sangsri, Y., Kongchanpat, W., Triampo, D. & Srikun, D. (2024). Improving photocatalytic efficiency of zinc oxide immobilized on glass slides by using plasma surface modification. *Proceeding of Pure and Applied Chemistry International Conference*, Bangkok, Thailand. https://paccon2024.kasetsart.org/FILES/PACCON2024_Proceedings.pdf
- [3] Sumaya, M. U., Maria, K. H., Toma, F. T. Z., Zubair, M. A. & Chowdhury M. T. (2023). Effect of stabilizer content in different solvents on the synthesis of ZnO nanoparticles using the chemical precipitation method. *Heliyon*, 9, e20871.
- [4] Yodyingyong, S., Zhou, X., Zhang, Q., Triampo, D., Xi, J., Park, K., Limketkai, B., & Cao, G. (2010). Enhanced photovoltaic performance of nanostructured hybrid solar cell using highly oriented TiO₂ nanotubes. *Journal of Physical Chemistry. C*, 114, 21851-21855.
- [5] Elias, M., Uddin, M. N., Saha, J. K., Hossain, M. A., Sarker, D. R., Akter, S., Siddiquey, I. A., & Uddin, J. (2021). A highly efficient and stable photocatalyst; N-doped ZnO/CNT composite thin film synthesized via simple sol-gel drop coating method. *Molecules*, 26, 1-19.
- [6] Vaiano, V., & Iervolino, G. (2018). Facile method to immobilize ZnO particles on glass spheres for the photocatalytic treatment of tannery wastewater. *Journal of Colloid and Interface Science*, 192-199.
- [7] Lampkin, P., Thompson, B., & Gellman, S. (2021). Versatile open-source photoreactor architecture for photocatalysis across the visible spectrum. *Organic Letters*, 23, 5277-5281.