

## การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนและแอนทราควิโนนแบบไหลต่อเนื่อง โดยการใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับการออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

### Studying the Optimal Condition of Continuous Flow Treatment of Diphenylamine and Anthrone Waste by Using $\text{TiO}_2$ -UV Oxidation

พรชัย จันตา<sup>1\*</sup>  
Pornchai Junta<sup>1\*</sup>

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างต้นแบบเตาปฏิกรณ์ออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแบบไหลต่อเนื่องโดยมีสารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสมของระบบและอัตราการไหลที่เหมาะสมของของเสียที่เติมเข้าระบบโดยใช้ต้นแบบเตาปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้น โดยผลการทดลองพบว่า อัตราการไหลที่เหมาะสมของระบบเท่ากับ 10.0 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลที่เหมาะสมของของเสียเท่ากับ 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นสภาวะให้ผลร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงของของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนและแอนทราควิโนนเท่ากับ 92.12 และ 83.39 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของของเสียมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงลดลง อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเตาปฏิกรณ์ต้นแบบสามารถบำบัดของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนและแอนทราควิโนนได้ดี ความน่าสนใจก็คือผลการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับห้องปฏิบัติการเพื่อลดความเป็นพิษของของเสียก่อนทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อม

**คำสำคัญ:** การบำบัดของเสีย ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสง สภาวะที่เหมาะสม ต้นแบบเตาปฏิกรณ์

#### Abstract

This research aimed to build the model of the continuous flow of  $\text{TiO}_2$ -UV oxidation reactor and to study the optimal flow rate of system and waste which added to the system by using this reactor model. The results showed that the optimal flow rate of system was 10 mL/min and the optimal flow rate of waste was 1.5 mL/min. In this condition, diphenylamine and anthrone waste were highest oxidized to 92.12 and 83.39 % respectively. Besides, it found that the increasing of the flow rate of waste decreased the photo-oxidation. However, the result of this study showed that the reactor model was capable of treatment both diphenylamine and anthrone waste. Interestingly, the results from this research could be applied to the laboratory for reduce the waste toxicity before disposing them to the environment.

**Keywords:** waste treatment, photo-oxidation, optimal condition, reactor model

#### บทนำ

ในปัจจุบันปัญหามลภาวะสิ่งแวดล้อมเริ่มขยายวงกว้างมากขึ้นทุกขณะ ฉะนั้นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยชะลอปัญหาดังกล่าวได้ก็คือการร่วมมือกันลดของเสียหรือบำบัดของเสียในองค์กรก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมก็จะช่วยบรรเทาปัญหาดังกล่าวลงได้ ดังจะเห็นได้ว่ามีงานวิจัยมากมายที่มีแนวคิดต่างๆ กันในการบำบัดของเสียทั้งทางน้ำ (Cesaro *et al.*, 2013) และทางอากาศ (อภิชน และ อภิญา, 2555) ซึ่งวิธีการบำบัดที่สะอาดและปราศจากของเสียเพิ่มก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้รับคามสนใจ เช่น การใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาการ

<sup>1</sup> ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

<sup>1</sup> Department of Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200

\*Corresponding author: e-mail: prantbhumi01@gmail.com

Received: 6 October 2018, Revised: 20 November 2018, Accepted: 4 December 2018, Published: 28 December 2018

สลายสารด้วยแสงเพื่อย่อยสลายของเสียเป็นต้น ซึ่งในปฏิกิริยาการสลายโมเลกุลสารด้วยแสงนั้น พลังงานแสง (photon) มีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นโมเลกุลออกซิเจนและโมเลกุลของน้ำให้เกิดเป็นสารโมเลกุลพลังงานสูงที่เรียกว่า reactive oxidizing species (ROS) เช่น hydroxyl radical (OH), และ superoxide radical ( $O_2^-$ ) ซึ่งโมเลกุล ROS เหล่านี้มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและสามารถสลายโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ได้จึงเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสง (photooxidation) นอกจากนี้ยังมีการสารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ เพื่อเป็นสารเร่งการเกิดโมเลกุล ROS ให้เร็วยิ่งขึ้น เช่น สารไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ), สารสังกะสีออกไซด์ (ZnO), สารซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) และสารอลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือสารไทเทเนียมไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามได้มีการนำการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางมาก เช่น ในกระบวนการผลิตน้ำดื่มซึ่งต้องการน้ำสะอาดปราศจากสารปนเปื้อนก็นำหลักการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงโดยใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไปช่วยกำจัดจุลินทรีย์และสารปนเปื้อนในน้ำ (Sarathy and Mohseni, 2009) นอกจากนี้ยังมีการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียเพื่อช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำให้น้อยลงเป็นการเพิ่มคุณภาพน้ำให้ดียิ่งขึ้น (Shiller *et al.*, 2006; Crook *et al.*, 2015; Shrivastava, 2012) และยังมีการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมฟิล์มกรองแสงโดยเติมสารไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเป็นตัวดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น (Yang *et al.*, 2003)

เนื่องจากในการทดลองชีวเคมีส่วนใหญ่จะเกิดผลพลอยได้ที่ไม่พึงประสงค์นั้นคือ ของเสียจากการทดลองและยังมีของเสียจากสารละลายที่เหลือใช้ ซึ่งของเสียสารเคมีนั้นเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดของเสียเหล่านั้นๆ เพื่อลดความเป็นพิษลงให้ได้มากที่สุด ตัวอย่างของเสียเช่น สารละลายแอนโทรน (anthrone) ที่ใช้ในการทดสอบสารชนิดคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) และของเสียจากการใช้สารละลายไดฟีนิลเอมีน (diphenylamine) ที่ใช้ในการทดสอบหมู่ฟอสเฟต (phosphate group) ของสายดีเอ็นเอ เป็นต้น เนื่องจากสารแอนโทรนเป็นสารที่มีความเป็นพิษ หากเข้าสู่ร่างกายทางระบบทางเดินอาหาร สารดังกล่าวมีฤทธิ์ในการกระตุ้นการทำงานของลำไส้ตรง หากมีปริมาณมากและได้รับเป็นเวลานานก็จะทำให้ร่างกายสูญเสียน้ำและเกลือแร่ได้ ส่วนสารไดฟีนิลเอมีน หากได้รับเข้าสู่ร่างกายในปริมาณมากก็จะมีผลต่อการทำงานของตับและไต (EFSA, 2012) นอกจากนี้สารดังกล่าวยังมีความเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตเพราะเป็นสารเคมีที่ใช้เป็นตัวทดสอบโครงสร้างทางเคมีของสายดีเอ็นเอ โดยจะเข้าทำปฏิกิริยากับดีออกซีโรโบสในสายดีเอ็นเอส่งผลให้เกิดความผิดปกติต่อการแสดงออกของยีน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำหลักการออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยมีสารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามาประยุกต์ใช้ในการบำบัดของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนและแอนโทรนที่เหลือใช้จากห้องปฏิบัติการเพื่อลดความเป็นพิษให้ได้มากที่สุด

### วัตถุประสงค์การวิจัย

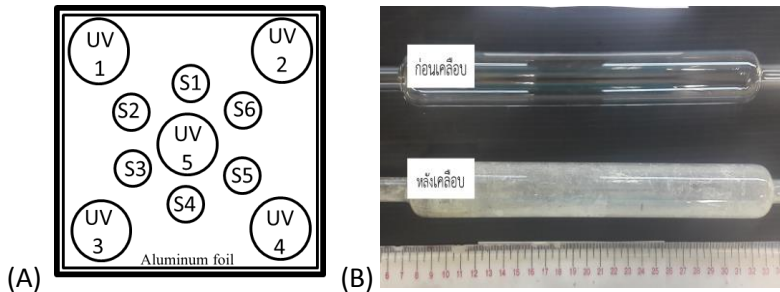
1. เพื่อสร้างต้นแบบของเตาปฏิกรณ์ออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแบบไหลต่อเนื่อง
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนและแอนโทรน

### ระเบียบวิธีวิจัย

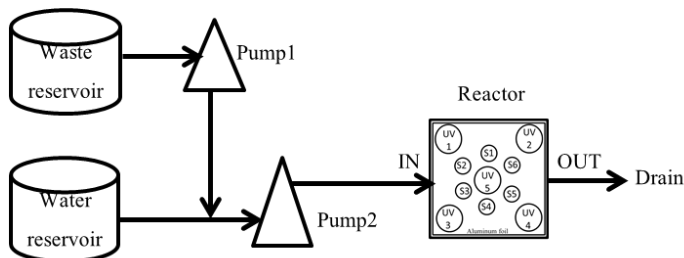
#### 1. การสร้างเตาปฏิกรณ์ออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแบบไหลต่อเนื่อง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบต้นแบบเตาปฏิกรณ์ออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) โดยจัดวางส่วนประกอบต่างๆ ดังภาพที่ 1(A) เพื่อให้สารละลายของเสียได้รับการสัมผัสแสงอัลตราไวโอเล็ตจากแหล่งกำเนิดแสงได้อย่างทั่วถึง จึงใช้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตขนาด 18 วัตต์ จำนวน 5 หลอด และใช้ท่อแก้วควอตซ์ (Quartz) 6 ท่อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. ยาว 41 ซม. ซึ่งแต่ละท่อเชื่อมต่อกันเป็นอนุกรมเพื่อให้สารละลายไหลได้ต่อเนื่อง ก่อนอื่นนำท่อแก้วควอตซ์มาเคลือบผิวด้านในด้วยสารไทเทเนียมไดออกไซด์โดยนำท่อแก้วมาล้างด้วยน้ำกลั่นและอบให้แห้ง จากนั้นปิดปลายท่อด้านหนึ่งด้วยแผ่นพาราฟิล์ม (parafilm)

ให้แน่นแล้วเทสารแขวนลอยของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.1%(w/v) ในสารละลายของ 1% (v/v) กรดแอสติก (acetic acid) และ 5% (v/v) เมทานอล (Methanol) จนเกือบเต็ม ทำการปิดปลายอีกด้านด้วยแผ่นพาราฟิล์มให้สนิท แล้วนำไปแช่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเทสารแขวนลอยออกแล้วทำการล้างท่อแก้วควอตซ์ด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งไม่มีผงไทเทเนียมไดออกไซด์หลุดออกมา นำไปอบให้แห้งอย่างน้อย 12 ชั่วโมง เพื่อให้สารเคลือบติดแน่นยิ่งขึ้นก่อนนำไปใช้งาน ลักษณะท่อแก้วควอตซ์หลังจากเคลือบผิวด้านในด้วยสารไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วเป็นดังภาพที่ 1 (B) นำท่อแก้วควอตซ์ที่เคลือบแล้วนี้ไปติดตั้งในเตาปฏิกรณ์ตามภาพที่ 1(A) จากนั้นจึงติดตั้งสวิตช์ควบคุมการปิด-เปิดหลอดไฟแหล่งกำเนิดแสงยูวีและทำการจัดวางอุปกรณ์การทดลองอื่นๆ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 1 มุมมองด้านบนของการจัดตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงยูวี (UV1-UV5) และท่อแก้วควอตซ์ที่เคลือบผิวด้านในด้วยสารไทเทเนียมไดออกไซด์แล้ว (S1-S6) ซึ่งภายในเตาปฏิกรณ์ทำการบุผนังภายในด้วยแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อเป็นแผ่นป้องกันรังสียูวี (A), ท่อแก้วควอตซ์ทั้งก่อนและหลังเคลือบผิวด้านในท่อด้วยผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (B)



ภาพที่ 2 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทดลองการบำบัดของเสียจากห้องปฏิบัติการแบบไหลต่อเนื่อง

## 2. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนและแอนโทรนแบบไหลต่อเนื่อง

2.1 การหาอัตราการไหลของระบบที่เหมาะสมของของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนและแอนโทรนที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นของเสียที่เหลือจากการทดลองในห้องปฏิบัติการทางชีวเคมีและมีความเข้มข้นสูงมาก ซึ่งการเก็บรักษาเพื่อรอการกำจัดจึงมีความเสี่ยงและอันตรายเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้หาวิธีการลดความเป็นพิษของของเสียดังกล่าว โดยการเริ่มจากการหาอัตราการไหลของระบบที่เหมาะสม โดยเติมน้ำกลั่นและสารละลายของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนลงในภาชนะตามภาพที่ 2 จากนั้นทำการเปิดปั๊มตัวที่ 2 ซึ่งเป็นส่วนที่ควบคุมอัตราการไหลของระบบ โดยปรับอัตราการไหลเริ่มต้นเป็น 5.0 มิลลิลิตร/นาที รองจนกว่าสารละลายจะไหลผ่านระบบออกมาจากปลายสายยางอีกด้านหนึ่ง จากนั้นปรับอัตราการไหลของปั๊มตัวที่ 1 ซึ่งเป็นปั๊มควบคุมอัตราการไหลของเสียที่เติมเข้าระบบเป็น 3.0 มิลลิลิตร/นาที รองจนกว่าสารละลายจะไหลผ่านระบบและออกมาที่ปลายสายยางอีกด้านหนึ่งของเตาปฏิกรณ์ จึงเก็บตัวอย่างก่อนเปิดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นปล่อยให้สารไหลผ่านระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจึงเริ่มเก็บตัวอย่างเพื่อไปวัดค่าการดูดกลืนแสงและหาค่าร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสง (% of photooxidation) ต่อไป จากนั้นทดลองซ้ำอีกโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของปั๊มตัวที่ 2 เป็น 7.5 และ 10.0 มิลลิลิตร/นาที ตามลำดับ

2.2 การหาอัตราการไหลของสารตัวอย่างที่เหมาะสม เติมน้ำกลั่นและสารละลายของเสียชนิดโดฟีนิลเอมีนลงในภาชนะ (ภาพที่ 2) เปิดปั๊มตัวที่ 2 และปรับอัตราการไหลเป็น 10.0 มิลลิลิตร/นาที่ รอจนกว่าสารละลายจะไหลผ่านระบบออกมาจากปลายสายยางอีกด้านหนึ่งของเตาปฏิกรณ์ จากนั้นปรับอัตราการไหลของปั๊มตัวที่ 1 เป็น 1.5 มิลลิลิตร/นาที่ โดยที่ยังคงอัตราการไหลของปั๊มตัวที่ 2 ไว้ที่ 10 มิลลิลิตร/นาที่ ตลอดการทดลอง ปล่อยให้สารละลายผ่านเข้าไปในระบบและออกมาจากปลายสายยางอีกด้านหนึ่งของเตาปฏิกรณ์จึงเก็บตัวอย่างก่อนเปิดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นปล่อยให้สารไหลผ่านระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจึงเริ่มเก็บตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงและหาค่าร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงต่อไป ทดลองซ้ำอีกโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของปั๊มตัวที่ 1 เป็น 3.0 มิลลิลิตร/นาที่

จากนั้นเปลี่ยนสารละลายของเสียเป็นชนิดแอนโทรน โดยในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาเพียงสภาวะที่เหมาะสมของอัตราการไหลของของเสีย ดังนั้นจึงคงอัตราการไหลของระบบไว้ที่ 10.0 มิลลิลิตร/นาที่ ตลอดการทดลอง จากนั้นทำการเติมสารละลายของเสียชนิดแอนโทรนลงในภาชนะ (ภาพที่ 2) และปรับอัตราการไหลของปั๊มตัวที่ 1 เป็น 1.5 มิลลิลิตร/นาที่ ปล่อยให้สารละลายผ่านเข้าไปในระบบและออกมาปลายสายยางอีกด้านหนึ่งของเตาปฏิกรณ์จึงเก็บตัวอย่างก่อนเปิดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นปล่อยให้สารไหลผ่านระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงเริ่มเก็บตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงและหาค่าร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงต่อไป ทดลองซ้ำอีกโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของปั๊มตัวที่ 1 เป็น 3.0 มิลลิลิตร/นาที่

### ผลการวิจัย

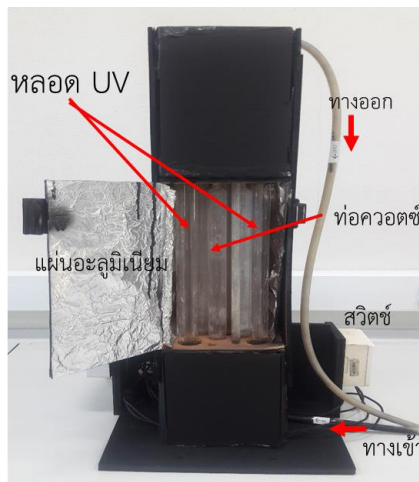
#### 1. การสร้างเตาปฏิกรณ์ออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแบบไหลต่อเนื่อง

ผลการสร้างเตาปฏิกรณ์ปฏิกรณ์ออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต เมื่อทำการประกอบส่วนต่างๆของเตาปฏิกรณ์เรียบร้อยแล้วจะได้เตาปฏิกรณ์ดังภาพที่ 3 จากรูปมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. ส่วนของเตาปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่จะเกิดออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ภายในส่วนนี้ประกอบด้วยท่อควอตซ์ที่เคลือบผิวด้านในด้วยสารไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วซึ่งแต่ละท่อจะเชื่อมต่อกันเป็นอนุกรมด้วยสายยางซิลิโคนเพื่อให้สารละลายไหลได้อย่างต่อเนื่องและปลอดภัยและหลอดกำเนิดแสงยูวีถูกติดตั้งตามตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 1(A)

2. สวิตช์ควบคุมการปิดและเปิดหลอดยูวี ถูกติดตั้งเอาไว้ด้านข้างเตาปฏิกรณ์เพื่อความสะดวกในการควบคุมการทำงาน

3. ส่วนนำสารละลายเข้าและออกระบบ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับนำสารละลายเข้าสู่ระบบจะต่อมาจากปั๊มตัวที่ 2 สำหรับควบคุมอัตราการไหลของระบบ ส่วนปลายสายยางด้านขาออกใช้สำหรับเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



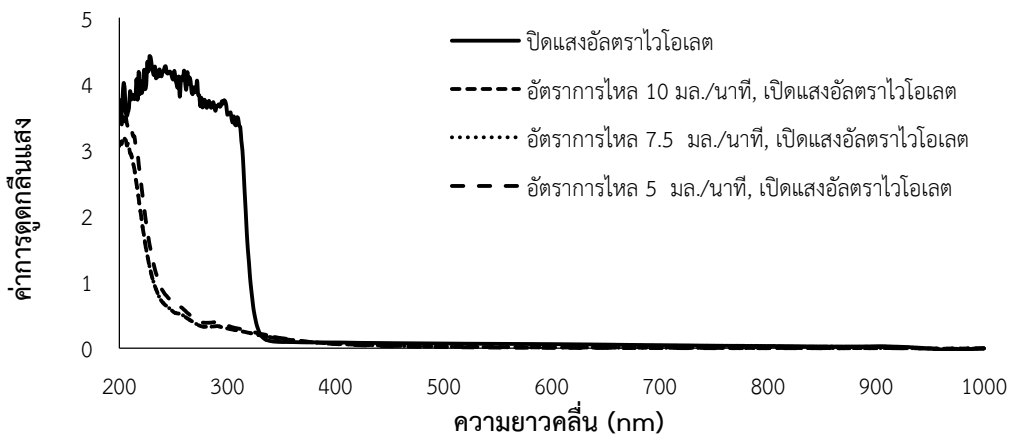
ภาพที่ 3 เตาปฏิกรณ์ต้นแบบสำหรับทดลองการบำบัดของเสียชนิดโดฟีนิลเอมีนและแอนโทรน

## 2. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนและแอนโทรนแบบไหลต่อเนื่อง

ผลการหาอัตราการไหลของระบบที่เหมาะสม โดยดูจากการเกิดร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร พบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของระบบมีผลต่อร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงไม่มากนัก ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 1 จะเห็นว่า เมื่อปรับอัตราการไหลของระบบต่างๆ กัน ได้แก่ ที่ 5.0 7.5 และ 10.0 มิลลิลิตร/นาที่ ผลของร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงของสารละลายของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนก็ไม่แตกต่างกันมาก คือ 86.62 86.62 และ 83.71 ตามลำดับ ซึ่งในภาพที่ 4 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนที่อัตราการไหลของระบบต่างๆ กัน ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 200–350 นาโนเมตร (nm) จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลและจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากเมื่อเทียบกับก่อนเปิดแหล่งกำเนิดแสงยูวี แต่เมื่อเปรียบเทียบกันในแต่ละอัตราการไหลจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก

ตารางที่ 1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงและร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนที่อัตราการไหลของระบบ เท่ากับ 5.0 7.5 และ 10.0 มิลลิลิตร/นาที่ ตามลำดับ

อัตราการไหลของระบบ (มิลลิลิตร/นาที่)	ค่าการดูดกลืนแสงยูวีที่ 254 nm (A <sub>254</sub> )		% of photo-oxidation
	ก่อนเปิดแหล่งกำเนิดแสงยูวี	หลังเปิดแหล่งกำเนิดแสง	
5.0	3.95	0.53	86.62
7.5	3.95	0.53	86.62
10.0	3.95	0.64	83.71



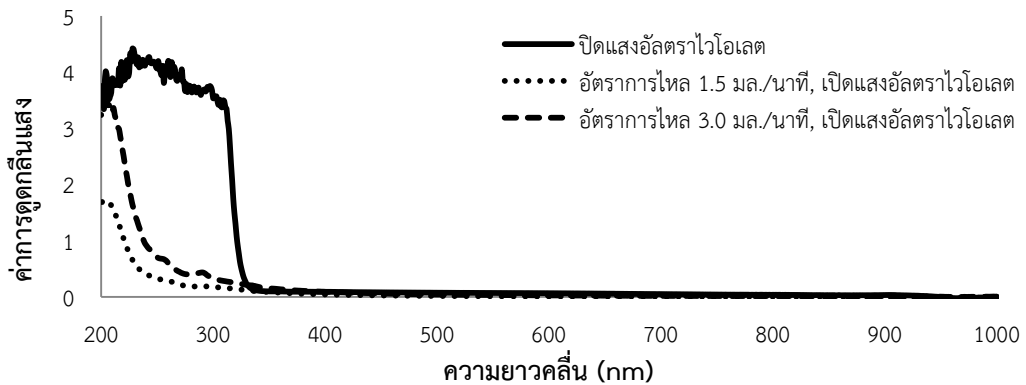
ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 1,000 นาโนเมตร ที่อัตราการไหลของระบบต่างๆ กัน

ผลการหาอัตราการไหลของของเสียที่เติมเข้าสู่ระบบ พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนที่เติมเข้าระบบ มีผลต่อร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยพบว่า อัตราการไหลของของเสียที่เติมเข้าในระบบเท่ากับ 1.5 และ 3.0 มิลลิลิตร/นาที่ มีร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเท่ากับ 92.12 และ 82.83 ตามลำดับ (แสดงในตารางที่ 2) โดยการทดลองนี้ได้คงอัตราการไหลของระบบให้คงที่เท่ากับ 10 มิลลิลิตร/นาที่ เนื่องจากพบว่าอัตราการไหลของระบบที่แตกต่างกันมีผลต่อร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่มากนัก ซึ่งถ้าหากใช้อัตราการไหลน้อยไปก็จะทำให้ใช้เวลาในการบำบัดนาน ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราการไหลของระบบสูงสุดเท่ากับ 10 มิลลิลิตร/นาที่ เพื่อให้การบำบัดเร็วยิ่งขึ้น

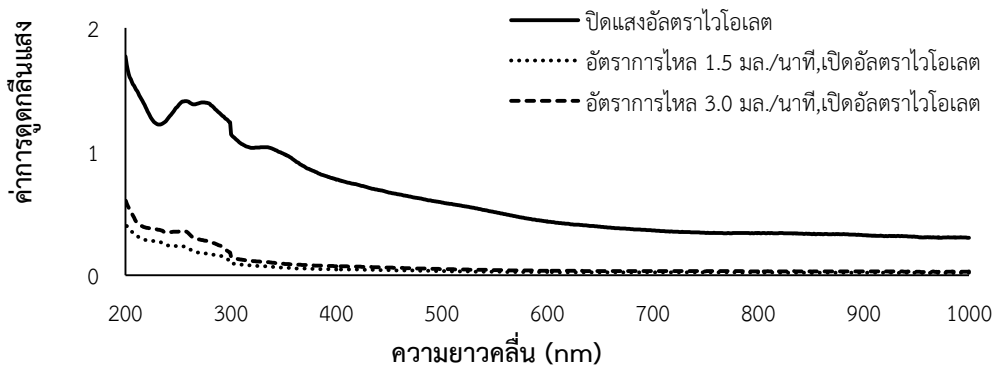
ส่วนผลการหาอัตราการไหลของของเสียชนิดแอนโทรเจนที่เติมเข้าระบบ พบว่า การเกิดร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงก็มีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกับของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีน โดยพบว่าที่อัตราการไหลของของเสียชนิดแอนโทรเจนที่เติมเข้าในระบบเท่ากับ 1.5 และ 3 มิลลิลิตร/นาที มีร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอนโทรเจนเท่ากับ 83.39 และ 74.41 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 ส่วนในภาพที่ 5 และ 6 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนและแอนโทรเจนตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายของเสียทั้ง 2 ชนิดในช่วง 200 – 350 นาโนเมตร มีเปลี่ยนแปลงมากเมื่อเทียบกับก่อนเปิดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของสารทั้ง 2 ชนิด

ตารางที่ 2 ค่าการดูดกลืนแสงและร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนและแอนโทรเจนที่อัตราการไหลของของเสียที่เติมเข้าในระบบต่างๆ กัน

ชนิดของเสีย	อัตราการไหลของเสียที่เติมเข้าระบบ (มิลลิลิตร/นาที)	ค่าการดูดกลืนแสงยูวีที่ 254 nm ( $A_{254}$ )		% of photo-oxidation
		ก่อนเปิดแหล่งกำเนิดแสง	หลังเปิดแหล่งกำเนิดแสง	
ไดฟีนิลเอมีน	1.5	3.95	0.31	92.12
	3.0	3.95	0.68	82.83
แอนโทรเจน	1.5	1.41	0.23	83.39
	3.0	1.41	0.36	74.41



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายของเสียชนิด ไดฟีนิลเอมีนในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 1,000 นาโนเมตร ที่อัตราการไหลของสารตัวอย่างต่างๆ กัน



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายของเสียชนิดแอนโทรเจนในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 1,000 นาโนเมตร ที่อัตราการไหลของสารตัวอย่างต่างๆ กัน

### อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยนี้ได้ทำการสร้างเตาปฏิกรณ์ต้นแบบที่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีข้อดีก็คือสามารถทำการบำบัดของเสียหลายๆ ชนิดต่อเนื่องกันได้นั้นคือ เมื่อทำการบำบัดของเสียชนิดแรกเสร็จแล้วก็สามารถทำการบำบัดของเสียชนิดอื่นๆ ต่อเนื่องกันไปได้เลย ทำให้การใช้งานสะดวก ซึ่งในงานวิจัยอื่นมักจะทำ การบำบัดทีละชุด (สัญวิชัย และคณะ, 2559; อุบลมภ์, 2559) ส่วนของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วก็นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารปนเปื้อนด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 1,000 นาโนเมตร เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของโมเลกุลสารและวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (Dziedzic *et al.*, 2010) เพื่อติดตามการสลายโมเลกุลของสารอะโรมาติก ซึ่งหากพบว่ามีปริมาณสารปนเปื้อน น้อยมากหรือมีความเป็นพิษน้อยมากแล้ว ก็สามารถทำการกำจัดได้ ในส่วนของการบำบัดของเสียด้วยหลักการเร่ง ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงที่มีสารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้ นอกจากการนำสารไทเทเนียมไดออกไซด์ มาเติมลงในปฏิกิริยาแล้ว การนำมาเคลือบหรือตรึงสารไว้ที่ผิววัสดุที่ต้องการก็เป็นวิธีที่ดีเช่นกัน (จันทร์จิรา, 2558; Verdier *et al.*, 2014) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเคลือบสารไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับ เนื่องจากสามารถลดปริมาณการใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ลงได้ โดยแตกต่างจากวิธีการเติมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ หากมีของเสียปริมาณมากก็ต้องใช้สารในปริมาณมากขึ้นตาม จากงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการสังเกตท่อนแก้วควอตซ์ ที่เคลือบสารไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อผ่านการใช้งานมานานๆ พบว่า สารไทเทเนียมไดออกไซด์ก็ยังคง ตรึงแน่นไม่หลุดออกมาให้เห็น แสดงให้เห็นว่า วิธีการเคลือบสารไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพที่ดี ข้อดีอีก ประการหนึ่งของการบำบัดของเสียด้วยวิธีดังกล่าวคือ เป็นวิธีการที่สะอาดและปราศจากของเสียเพิ่มให้เป็นภาระ ในการทำงาน ในขณะที่การบำบัดของเสียด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การตกตะกอนหรือการใช้ตัวดูดซับจะต้องเพิ่มขั้นตอน และวิธีการกำจัดกากตะกอนหรือดูดซับที่ปนเปื้อนสารนั้นอีกขั้นตอนหนึ่ง

ผลจากการนำต้นแบบเตาปฏิกรณ์ที่ได้ไปศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีน และแอนโทรน โดยทำการศึกษาระบบอัตราการไหลของระบบและอัตราการไหลของของเสียที่เติมเข้าสู่ระบบซึ่ง ทั้ง 2 ปัจจัยนี้จะมีผลต่อระยะเวลาที่ของเสียจะสัมผัสแสงอัลตราไวโอเลตภายในเตาปฏิกรณ์ต้นแบบและมีผลต่อ ความเข้มข้นของของเสียที่จะผ่านเข้าไปในระบบด้วย จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ที่อัตราการไหลของระบบ เท่ากับ 5.0 และ 7.5 มิลลิลิตร/นาที ให้ผลต่อร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงของสารไดฟีนิลเอมีน เท่ากัน คือ 86.62 แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 10 มิลลิลิตร/นาที ก็พบว่าร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ด้วยแสงลดลงเล็กน้อยเท่ากับ 83.71 ซึ่งก็แสดงให้เห็นว่า หากเพิ่มอัตราการไหลของระบบมากขึ้นก็จะส่งผลให้ ร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงลดลง เนื่องจากเมื่อสารละลายไหลผ่านระบบเร็วขึ้นก็จะมีเวลาน้อยลง ที่จะสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเลตซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงในครั้งนี้ ดังนั้นใน งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดให้อัตราการไหลของระบบเป็น 10 มิลลิลิตร/นาที เนื่องจากเป็นอัตราการไหลสูงสุดที่ยังให้ ผลการเกิดร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ไม่แตกต่างกัน

จากผลการศึกษาอัตราการไหลของของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนและแอนโทรนที่เติมเข้าสู่ระบบ พบว่า เมื่อ เพิ่มอัตราการไหลก็ส่งผลให้ร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงลดลง เนื่องจากเมื่อสารถูกเติมเข้าในระบบ เร็วขึ้น ความเข้มข้นของสารก็เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงลดลง และจากผล การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดของเสียทั้ง 2 ชนิด ในครั้งนี้ได้ร้อยละของการเกิดออกซิเดชันสูงเป็นที่น่า พอใจ แต่ก็ยังไม่สามารถบำบัดของเสียทั้ง 2 ชนิด ได้ร้อยละหนึ่งร้อย เนื่องจากจากการทดลองครั้งนี้ได้ทำการทดลอง กับเตาปฏิกรณ์ต้นแบบเพียงชุดเดียว ดังนั้นจึงมีข้อเสนอแนะสำหรับการนำต้นแบบเตาปฏิกรณ์จากงานวิจัยนี้ไป ประยุกต์ใช้ในการบำบัดของเสียคือ ควรเพิ่มระยะเวลาให้ของเสียได้สัมผัสกับแสงยูวีในระบบให้นานขึ้นโดย การเพิ่มเตาปฏิกรณ์ให้มากกว่า 1 ชุด หรือเพิ่มความยาวของท่อนแก้วควอตซ์ให้มากขึ้นเพื่อสารให้อยู่ในระบบได้นานขึ้น

### สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยนี้ได้ทำการสร้างเตาปฏิกรณ์ต้นแบบสำหรับการบำบัดของเสียแบบไหลต่อเนื่องซึ่งผล การทดลองก็แสดงให้เห็นว่า เตาปฏิกรณ์ต้นแบบสามารถทำงานได้อย่างดีและมีประสิทธิภาพ ซึ่งข้อดีของ

การบำบัดของเสียแบบไหลต่อเนื่องก็คือ สามารถทำงานได้สะดวกและสามารถทำการบำบัดของเสียหลายชนิดได้ต่อเนื่องกัน ในการวิจัยนี้ได้ทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสารโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างในช่วง 200 ถึง 1,000 นาโนเมตร และวัดผลร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่สารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) สามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) โดยทั้งสารไดฟีนิลเอมีนและแอนโทรอนก็เป็นสารที่มีสารประกอบอะโรมาติกเป็นส่วนประกอบในโครงสร้างด้วยเช่นกัน และวิธีนี้ก็เป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้เป็นตัวบ่งชี้การสลายตัวของสารประกอบอะโรมาติก จากผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการบำบัดของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีนและแอนโทรอนโดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่องด้วยการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีสารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอัตราการไหลของระบบมีผลต่อร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงน้อย ดังจะเห็นได้จากผลการปรับอัตราการไหลของระบบในการบำบัดของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีน ซึ่งพบว่าร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงที่อัตราการไหลของระบบต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกใช้อัตราการไหลของระบบเป็น 10.0 มิลลิลิตร/นาที่ เพื่อให้การกำจัดของเสียเป็นไปอย่างรวดเร็ว

ส่วนผลของอัตราการไหลของของเสียที่เติมเข้าสู่ระบบนั้นพบว่า การเพิ่มอัตราการไหลมีผลต่อการเกิดร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงลดลงเช่นกัน โดยพบว่าที่อัตราการไหลของของเสียเท่ากับ 1.5 มิลลิลิตร/นาที่ และคงที่อัตราการไหลของระบบไว้เท่ากับ 10 มิลลิลิตร/นาที่ ให้ผลการเกิดร้อยละการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสงของของเสียได้ดีที่สุด คือ 92.12 สำหรับของเสียชนิดไดฟีนิลเอมีน และ 83.39 สำหรับของเสียชนิดแอนโทรอน จากผลการทดลองดังกล่าวจึงมีความน่าสนใจมากเพราะสามารถนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดของเสียจากห้องปฏิบัติการเพื่อลดความเป็นพิษของเสียก่อนการกำจัดต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะผู้บริหาร ภาควิชาเคมีที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัย Departmental research งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

- จันทร์จิรา ศิวะประทานกุล. 2558. การประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์และเติมฟลูออรีนบนพื้นผิวสำหรับการบำบัดน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.
- สกุณวิษณุ สระพานิช นิตา ชัยมูล และ เพชร เฟิงชัย. 2559. การบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยสารไทเทเนียมไดออกไซด์. วารสารวิจัย มช. (ฉบับบัณฑิตศึกษา). 16(2): 36-48.
- อภิชน วัชเรนวงค์ และ อภิญญา ทองอ่อน. 2555. ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสำหรับการบำบัดก๊าซมลพิษโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส. รายงานการวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา.
- อุปลัทธ์ นาคกรักษ์. 2559. การกำจัดสารปนเปื้อนอินทรีย์ในน้ำโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส. เอกสารรายงานโครงการวิจัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. พิษณุโลก.
- Cesaro, A., Naddeo, V. and V. Belgiomo. 2013. Wastewater treatment by combination of advanced oxidation processes and conventional biological systems. J. Bioremed. Biodeg. 4(8): 1-8.
- Crook, M.J., Jefferson, B., Autin, O., MacAdam, J. and A. Nocker. 2015. Comparison of ultraviolet light emitting diodes with traditional UV for greywater disinfection. Journal of Water Reuse and Desalination. 5 (1): 17-27.
- Dziedzic, J., Wodka, D., Nowak, P., Warszynski, P., Simon, C. and I. Kumakiri. 2010. Photocatalytic degradation of the humic species as a method of their removal from water-comparison of UV and artificial sunlight irradiation. Physicochem. Probl. Miner. Process. 45: 15-28.
- EFSA (European Food Safety Authority). 2012. Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance diphenylamine. EFSA journal. 10(1): 2486-2527.
- Sarathy, S.R. and M. Mohseni. 2009. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> treatment of drinking water: Impact on NOM characteristics. IUVA News. 11(1): 24-29.
- Shiller, A.M., Duan, S., Van Erp, P. and T.S. Bianchi. 2006. Photo-oxidation of dissolved organic matter in river water and its effect on trace element speciation. Limnol. Oceanogr. 51(4): 1716-1728.



- Shrivastava, V.S. 2012. Photocatalytic degradation of methylene blue dye and chromium metal from wastewater using nanocrystalline  $\text{TiO}_2$  semiconductor. Arch. Appl. Sci. Res. 4(3): 1244-1254.
- Verdier, T., Coutand, M., Bertron, A. and C. Roques. 2014. Antibacterial activity of  $\text{TiO}_2$  photocatalyst alone or in coatings on *E. coli*: The influence of methodological aspects. Coatings. 4: 670-686.
- Yang, H., Zhu, S. and N. Pan. 2003. Studying the mechanisms of titanium dioxide as ultraviolet-blocking additive for films and fabrics by an improved scheme. J. Appl. Polym. Sci. 92: 3201-3210.