



รายงานการวิจัย

การกำจัดสารฮอร์โมนเพศที่ตกค้างในน้ำโดยใช้การบำบัดด้วย
กระบวนการออกซิเดชันจากเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสง
อัลตราไวโอเล็ต

(Removing a potent natural hormone (17 beta-Estradiol) from
water by ultraviolet (UV) light-activated persulfate oxidation)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การกำจัดสารฮอร์โมนเพศที่ตกค้างในน้ำโดยใช้การบำบัดด้วย
กระบวนการออกซิเดชันจากเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสง
อัลตราไวโอเลต

(Removing a potent natural hormone (17 beta-Estradiol) from
water by ultraviolet (UV) light-activated persulfate oxidation)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ชนัตต์ โชคเจริญรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชัชณรงค์ สกุลแถว

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม/2560

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “การกำจัดสารฮอโมนเพศที่ตกค้างในน้ำโดยใช้การบำบัดด้วยกระบวนการออกซิเดชันจากเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ต” ฉบับนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีซึ่งเป็นทุนงบประมาณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 และได้รับความอนุเคราะห์ด้านสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือรวมถึงครุภัณฑ์วิทยาศาสตร์จากภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม และภาควิชาเทคนิคการสัตวแพทย์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

อ.ดร.ชนัดถ์ โชคเจริญรัตน์

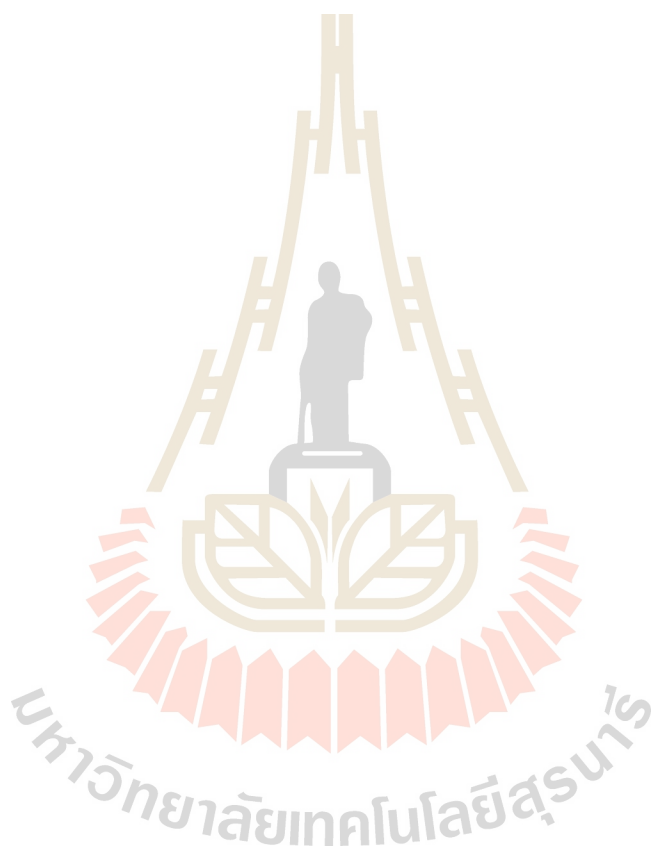
หัวหน้าโครงการวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อภาษาไทย

สารฮอร์โมนเพศที่ถูกขับถ่ายออกมาจากปัสสาวะของมนุษย์และจากสัตว์สามารถเข้าสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติและก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบนิเวศนี้ได้ หากสิ่งมีชีวิตได้รับสารฮอร์โมนเพศเป็นระยะเวลา นานอาจก่อให้เกิดความไม่สมดุลในระบบการทำงานของต่อมไร้ท่อ ผู้วิจัยได้เลือกตัวแทนสารฮอร์โมนเพศคือสาร 17เบต้า-เอสตราไดออล (E2) โดยพบได้จากน้ำทิ้งในบริเวณที่มีการเลี้ยงสัตว์ จุดประสงค์ของงานวิจัยคือการพัฒนาการบำบัดสาร E2 ในสารละลายโดยใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่เกิดจากการกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแสงยูวีในถังปฏิกรณ์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ E2 คือ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะการบำบัดได้ถูกแบ่งเป็น 3 ด้าน (1) เปอร์ซัลเฟตแอนไอออน (2) แสงยูวี (3) อนุโมลิสระของซัลเฟต ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตในช่วง 10 ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการวิเคราะห์สาร E2 ด้วย HPLC จากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราการสลายตัวของสาร E2 นอกจากนี้ผลกระทบปัจจัยจากสภาวะแวดล้อมอื่น เช่น พีเอช และอุณหภูมิได้ถูกนำมาวิจารณ์ด้วย ผู้วิจัยพบว่าการใช้ปริมาณเปอร์ซัลเฟตแอนไอออนที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถที่จะบำบัดสาร E2 ได้ร้อยละ 30 ภายใน 60 ชั่วโมง ในขณะที่แสงยูวีบำบัดสาร E2 ได้ถึงร้อยละ 80 ในเวลาที่เท่ากัน อย่างไรก็ตามอนุโมลิสระของซัลเฟตสามารถบำบัดสาร E2 ได้ถึงร้อยละ 90 ภายใน 30 นาที จากผลการทดลองเหล่านี้สามารถพิสูจน์ได้ว่าอนุโมลิสระของซัลเฟตเป็นตัวออกซิไดส์ที่มีความแรงมากกว่าและอาจจะเหมาะสมในการบำบัดสารเคมีอื่นที่อยู่ในน้ำทิ้งได้ ในการศึกษาการสลายตัวของ E2 ด้วยวิธีการบำบัดแบบ UV/Persulfate ในการบำบัดสาร E2 ในตัวอย่างน้ำตามธรรมชาติพบว่าที่ 30 นาทีสาร E2 จากตัวอย่างน้ำทิ้งจากฟาร์มปศุสัตว์ สามารถถูกบำบัดได้ถึง 80% ภายในระยะเวลา 30 นาทีซึ่งบ่งบอกให้ทราบได้ว่าการใช้การควบคุมการปล่อยของการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตนั้นให้

ผลลัพธ์ที่ดีเหมาะสมแก่การนำเทียนนี้ไปใช้งานในการบำบัดสารจริงในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนด้วยสารเคมี
อินทรีย์ได้



บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

Steroid hormones are excreted in urine of human and feedlot animals which can eventually enter the receiving water and later pose serious threat to ecosystem. Exposing to these steroid hormones for a long period of time, it may cause misbalance of the endocrine system. We selected 17β -estradiol or E2 as a sex steroid representative throughout this study as it is the most abundant estrogen found nearby large animal feedlots. The objective was to develop treatment technology for E2 from aqueous solution by means of advanced oxidation processes using sulfate radical producing from activating persulfate with UV-light. A rectangular UV light reactor was specifically built to serve a quartz beaker using as a sole container. E2 was used as an initial substrate at 3 mgL^{-1} . Treatment conditions were of three aspects: (1) persulfate anion, (2) UV light, and (3) sulfate radical from persulfate activated by UV light. We varied concentration of persulfate ranging between 10 to 200 mgL^{-1} . Changes in concentration of E2 was analyzed by using HPLC. E2 degradation rates from all treatments were compared. Environmental factors such as pH and temperature were also discussed. We found that using persulfate anion at 40 mgL^{-1} as a sole oxidant can degraded E2 for only 30% at 60 h while UV can decompose E2 for 80% at the same period. However, sulfate radical can remove upto 90% at only 30 mins. The initial pH also has an effect on the E2-UV/PS degradation. When we used discharge water from the feedlot, results showed that the degradation rate was 10 to 20% slower than when DI water is used. This is because the presence of natural

organic matter that reduce the persulfate radical activity and block the light passage to the E2 molecules. These results provide proof that sulfate radical is much stronger oxidizing agents and may be suitable to use as a practical approach to remove any potent compounds that presents in the feedlot effluents.



สารบัญ

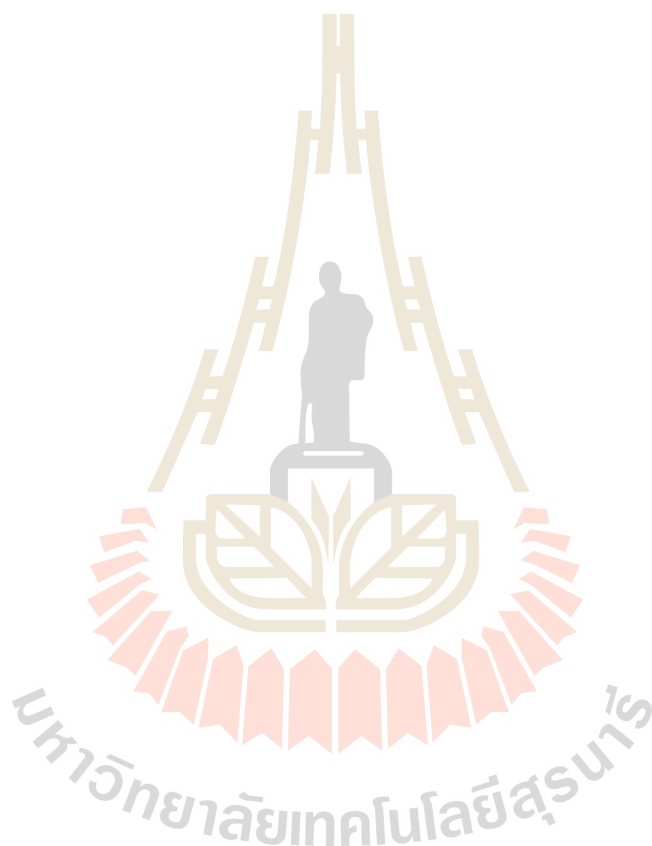
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1. ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย	1
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
3. ขอบเขตของการวิจัย	4
4. ข้อตกลงเบื้องต้น	4
5. วิธีดำเนินการวิจัย	6
6. ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	8
บทที่ 2 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	26
1. การทดลองขั้นเตรียมการ.....	26
▪ ออกแบบและตั้งประดิษฐ์ถังปฏิกิริยา UV	
▪ การเตรียมสารเคมี	
▪ การตรวจวัด ติดตามความเข้มข้นของสารเคมี	
2. การเตรียมเทียบควบคุมการปล่อยสารเปอร์ซัลเฟต.....	34
3. การทดลองแบบ Batch experiment.....	36
▪ การทดลองหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดย Persulfate anion ที่มีความเข้มข้นที่ แตกต่างกัน	
▪ การทดลองหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดย AOP จากปฏิกิริยาร่วมกันระหว่าง พลังงานแสงยูวีและ Persulfate anion	

- การหาคุณสมบัติที่เหมาะสมของ Slow release persulfate candle
- การทดลองหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดยนำ Slow release persulfate candle มาใช้ร่วมกับกับ UV
- การทดลองหาผลกระทบจากค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาร E2 โดย UV/Persulfate
- การทดสอบการสลายตัวของ E2 จากน้ำตัวอย่างตามธรรมชาติด้วยวิธีการบำบัดแบบ UV/Persulfate

บทที่ 4 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล	40
1. การเข้าพื้นที่เพื่อทำการเก็บน้ำเสียตัวอย่างจากฟาร์มเลี้ยงโคนม และการตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำ.....	40
2. การหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดย Persulfate ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน...	45
3. การหาอัตราการสลายตัวของ E2 จากปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างพลังงานแสงยูวีและ Persulfate.....	47
4. การหาคุณสมบัติที่เหมาะสมของ Slow release persulfate candle.....	51
5. การหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดยนำ Slow release persulfate candle มาใช้ร่วมกับกับ UV	54
6. การหาผลกระทบจากค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาร E2 โดย UV/Persulfate.....	56
7. การสลายตัวของ E2 ในน้ำตัวอย่างตามธรรมชาติด้วยวิธีการบำบัดแบบ UV/Persulfate ..	58
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	61
1. สรุปผลการศึกษา.....	61
2. ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม	64
ภาคผนวก	78
ภาคผนวก ก ภาพประกอบโครงการ	
ภาคผนวก ข รายละเอียดและรูปภาพแสดงการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ	
ประวัติผู้วิจัย	89

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	คุณสมบัติทางกายภาพเคมีที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม.....11
ตารางที่ 2	การตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำที่มาจากฟาร์มวัวแห่งหนึ่งในจังหวัดนครราชสีมา41



สารบัญภาพ

ภาพที่ 1	ชุดทดลองการเตรียม Controlled-release persulfate7
ภาพที่ 2	ผลโครมาโทแกรมตัวอย่าง CCQM-P117.a 17 β -Estradiol จากเครื่อง HPLC-PDA17
ภาพที่ 3	ชุดถังปฏิกิริยา UV28
ภาพที่ 4	มุมมองโดยรวมของชุดถังปฏิกิริยา UV.....29
ภาพที่ 5	มุมมองด้านบนของชุดถังปฏิกิริยา UV.....30
ภาพที่ 6	แสดงวิธีหาค่าความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ด้วยวิธี Colorimetric Method32
ภาพที่ 7	แสดงการทำ Standard Curve ของเปอร์ซัลเฟต.....33
ภาพที่ 8	ชุดทดลองการเตรียม Controlled-release persulfate34
ภาพที่ 9	แสดงการหล่อเทียนเปอร์ซัลเฟต และตัวอย่างเทียนเปอร์ซัลเฟตที่ทำเสร็จแล้วในแต่ละอัตราส่วน.....35
ภาพที่ 10	แสดงการผลิต slow release persulfate candle37
ภาพที่ 11	แสดงการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้น ณ จุดเก็บ (ร่างระบายน้ำ).....42
ภาพที่ 12	แสดงการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้น ณ จุดเก็บ (ร่างระบายน้ำ).....42
ภาพที่ 13	แสดงการสอบถามรายละเอียดเกี่ยวกับฟาร์มโคนม.....43
ภาพที่ 14	แสดงการสำรวจจุดเก็บตัวอย่างที่ล่าคลง.....43
ภาพที่ 15	แสดงพื้นที่โดยรอบของฟาร์มโคนม.....44
ภาพที่ 16	แสดงแผนผังของฟาร์มโคนม.....44
ภาพที่ 17	การบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียว.....46
ภาพที่ 18	การบำบัดด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเพียงอย่างเดียว.....48
ภาพที่ 19	การบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....49
ภาพที่ 20	การเปรียบเทียบค่าคงที่ k_{obs} ระหว่างการบำบัดแบบถูกกระตุ้นและไม่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....51
ภาพที่ 21	แสดงความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่ถูกปล่อยออกมาจากเทียนเปอร์ซัลเฟตที่เวลา 1 ชั่วโมงและ 120 ชั่วโมง.....53
ภาพที่ 22	แสดงความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่ถูกปล่อยออกมาจากเทียนเปอร์ซัลเฟต.....54

- ภาพที่ 23 แสดงการกำจัดสาร E2 ในช่วง 60 นาที เมื่อทำการเปรียบเทียบการบำบัดสาร E2 ด้วย
เทียนเปอร์ซัลเฟตและสารละลายเปอร์ซัลเฟต.....56
- ภาพที่ 24 แสดงผลกระทบจาก pH ต่อการบำบัด E2 ด้วยสารเปอร์ซัลเฟต.....58
- ภาพที่ 25 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ E2 ในการบำบัดด้วย UV/Persulfate ใน
ตัวอย่างน้ำที่แตกต่างกัน.....60



บทที่ 1

บทนำ

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันปัญหาสารเคมีตกค้างในสิ่งแวดล้อมยังคงเป็นปัญหาที่สำคัญของประเทศไทยที่ยังขาดการป้องกันที่สมบูรณ์แบบและเหมาะสมต่อสภาพแวดล้อม สารเคมีหลายชนิดเป็นสารเคมีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเป็นสารที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาใหม่ซึ่งยังไม่มีการระบุความเป็นพิษหรือจัดประเภทไว้ในข้อบังคับหรือกฎระเบียบใด ๆ รวมถึงกำหนดปริมาณที่ยอมรับให้มีได้ แต่ในความเป็นจริงแล้วนั้นสารเคมีเหล่านี้มีความเป็นพิษและส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม สารเคมีที่ตรวจพบในสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ United States Environmental Protection Agency (US EPA) เรียกว่า Emerging contaminants

หนึ่งในกลุ่มสารเคมีของ Emerging contaminants ที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม และมีผลกระทบต่อมนุษย์และสัตว์น้ำเป็นอย่างมาก คือ สารที่ทำการรบกวนการทำงานของระบบต่อมไร้ท่อ (Endocrine Disrupting Chemicals, EDCs) โดยที่สารกลุ่มนี้เป็นแหล่งผลิตฮอร์โมนด้านการเจริญเติบโต และการสืบพันธุ์ที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด ตัวอย่าง EDCs ที่สำคัญคือเอสโตรเจนซึ่งเป็นชื่อเรียกกลุ่มฮอร์โมนเพศหญิงประกอบไปด้วยสารหลายชนิด แต่ในข้อเสนอโครงการวิจัยนี้จะพิจารณาและให้ความสำคัญถึงชนิดของเอสโตรเจนเพียงชนิดเดียวคือ สิบเจ็ดเบตาเอสตราไดออล (17β -Estradiol หรือ E2) ซึ่งเป็นชนิดของเอสโตรเจนที่มีบทบาทในสิ่งแวดล้อมมากที่สุด (Montagnani et al., 1996) เนื่องจากถูกพบในปริมาณที่สูงในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ และมีผลกระทบต่อมนุษย์ในระบบสืบพันธุ์เป็นอย่างมาก

รวมถึงสัตว์น้ำแม่ได้รับในความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดความผิดปกติได้ (ประมาณ 10^{-9} โมลต่อลิตร; Gaido et al., 1996)

ด้วยกระแสข่าวผลกระทบของการตกค้างของฮอร์โมนเพศในสิ่งแวดล้อม เช่นพฤติกรรมการวางไข่ของสัตว์ลดลง การเปลี่ยนเพศของปลาตามลุ่มน้ำใกล้เคียงบริเวณชุมชน ปริมาณตัวอ่อนในมนุษย์ลดลง การเพิ่มโอกาสการเกิดมะเร็งในมนุษย์ และภาวะเยื่อปอดลูกเจริญผิดปกติ ฯลฯ (Esplugas et al., 2007) ประกอบกับในปัจจุบันเครื่องมือการตรวจวิเคราะห์มีความทันสมัย สามารถวิเคราะห์สารปริมาณน้อยได้อย่างถูกต้องและมีความแม่นยำสูงทำให้เราทราบได้ว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ใช้กันมาตั้งแต่อดีตนั้นไม่สามารถกำจัดสารเคมีอินทรีย์ได้ทั้งหมด และถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ E2 เป็นหนึ่งในสารเคมีที่ระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปไม่สามารถกำจัดได้หมด (Coleman et al., 2000; Desbrow et al., 1998) นอกจากนี้ E2 ยังถูกตรวจพบในน้ำทิ้งจากบ้านเรือนและชุมชนซึ่งไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัด รวมถึงน้ำทิ้งที่มาจาก การขับถ่ายของเสียจากสัตว์ตามบริเวณที่มีการทำฟาร์มปศุสัตว์ ทั้งหมดนี้จึงเป็นแหล่งที่มาที่สำคัญของ E2 ที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมเช่น ในดิน น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินในที่สุด

ดังนั้นการบำบัดสารเคมีเหล่านี้ก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะช่วยลดความเสี่ยงของมนุษย์และสัตว์น้ำในการได้รับสารเคมีเหล่านี้โดยไม่จำเป็น ระบบการบำบัดสารเคมีในน้ำมีหลายวิธีด้วยกัน เช่นการบำบัดด้วยวิธีทางเคมี ด้วยวิธีการฉายแสง ด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งการบำบัดทางเคมีโดยใช้สารออกซิแดนท์เป็นวิธีที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เมื่อสารเคมีสัมผัสกับสารอินทรีย์ วิศวกรคาดหวังให้การบำบัดเป็นไปอย่างสมบูรณ์กล่าวคือเกิด Mineralization ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม (เกิดผลผลิตเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ) ทั้งนี้สารอินทรีย์บางชนิดที่มีโครงสร้างสูตรโมเลกุลซับซ้อน ทำให้สารออกซิแดนท์ไม่สามารถก่อให้เกิดการบำบัดที่สมบูรณ์ได้ แต่สารออกซิแดนท์สามารถเปลี่ยนโครงสร้าง

สารอินทรีย์ดังกล่าวให้มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการบำบัดโดยวิธีทางธรรมชาติโดยจุลชีพได้ (วิธีทางชีวภาพ) การบำบัดทางเคมีแต่ละวิธีมีข้อดีและเสียแตกต่างกันไปดังนี้เช่น การปรับปรุงคุณภาพของโรงบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยน้ำทิ้งโดยใช้ระบบก๊าซโอโซนซึ่งเป็นออกซิแดนซ์ที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานที่สูง (Standard reduction potential, $E^0 = +2.10$ V) แต่วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูงมากโดยเฉพาะการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตก๊าซโอโซน การบำบัดด้วยด่างทับทิม หรือ Permanganate (MnO_4^- , $E^0 = +1.70$ V) ซึ่งก่อให้เกิดสีตกค้าง (สีม่วง) ในสิ่งแวดล้อมรวมถึงก่อให้เกิดปริมาณแอมกานีสและแอมกานีสไดออกไซด์ตกค้างในดินสูง ดังนั้นการบำบัดสารเคมีด้วยแสง UV (Photolysis) จึงได้รับความนิยมอย่างมากเพราะง่ายและสะดวกแต่ทว่าการบำบัดด้วยแสงโดยตรงมีประสิทธิภาพไม่สูงพอในการบำบัดสารที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Sanchez-Polo et al., 2013) ดังนั้นกลุ่มผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการบำบัดออกซิเดชันขั้นสูงซึ่งเป็นการใช้ออกซิแดนซ์ร่วมกันมากกว่า 2 ชนิด (Advanced Oxidation Processes, AOP) โดยที่ผู้วิจัยเลือกใช้ UV กับ Persulfate (UV/Persulfate) ร่วมกันเพื่อให้เกิด Persulfate radicals ($SO_4^{\bullet-}$) ($E^0 = +2.60$ V) (Berlin, 1986) ข้อดีของการใช้ Persulfate ดีกว่าการใช้ออกซิแดนซ์ชนิดอื่นเช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เนื่องจาก Persulfate มีราคาที่ถูกกว่า และมีความสะดวกในการขนย้ายไปใช้ในงานภาคสนามมากกว่า (Anipsitakis and Dionysiou, 2003)

Hori et al. (2005) กล่าวว่า UV/Persulfate ถือเป็นเทคโนโลยีรุ่นใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงและสามารถเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีการบำบัดแบบเดิมๆ ได้ การวิจัยโดยใช้ UV/Persulfate มาใช้ในการบำบัดสาร Emerging contaminants เริ่มมีจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ แต่การนำหลักการของ UV/Persulfate มาบำบัดสารที่คนให้ความสนใจเช่น E2 นั้น ยังไม่เคยมีนักวิจัยได้ทำการวิจัยออกมา รวมถึงการประยุกต์ใช้ Slow Release Persulfate candle (SRPC) กับ UV/Persulfate นั้น ณ ปัจจุบัน

มีนักวิจัยที่ทำ SRPC ออกมาเพียงแค่กลุ่มเดียวคือ Kambhu et al. (2012) ซึ่งเป็นงานวิจัยในการบำบัดสาร BTEX และกลุ่มผู้วิจัยมีประสบการณ์ได้มีส่วนร่วมกับโครงการดังกล่าว รวมถึงได้มีการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในระดับนานาชาติ (Kambhu et al., 2012) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้ SRPC ในการบำบัดสารเคมีอินทรีย์ที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม จึงได้แนวความคิดนำมาประยุกต์ใช้ในโครงการนี้ในการออกแบบระบบบำบัดสำเร็จรูป ที่มีการใช้ SRPC ร่วมกับ UV เพื่อหวังว่าจะได้นำองค์ความรู้ใหม่มาใช้ในโครงการการบำบัดสารเคมีอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ต่อไปได้ ฉะนั้นความท้าทายของโครงการวิจัยนี้คือความใหม่ของโครงการ ความเป็นนวัตกรรมด้านการบำบัดสารมลพิษทางด้านเทคโนโลยีสะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการศึกษาหาสภาพแวดล้อมและปริมาณที่เหมาะสมของ UV และ Persulfate รวมถึงการศึกษาถึงผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ UV/Persulfate จากปัจจัยภายนอกเพื่อให้เกิดการกำจัดและเปลี่ยนโครงสร้างของ E2 ได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับโรงบำบัดน้ำเสียได้จริงมากที่สุด

ฉะนั้นกลุ่มผู้วิจัยจึงเห็นถึงความสำคัญในการนำเสนอโครงการนี้ เพื่อพัฒนารอบความคิดการบำบัดสารเคมีที่มีอยู่เดิม เพื่อที่จะได้นำมาใช้เป็นองค์ความรู้ใหม่ต่อไปได้ และเพื่อเป็นประโยชน์กับผู้สนใจและนักวิจัยท่านอื่นสามารถนำผลหรือวิธีการทำวิจัยไปใช้ต่อยอดงานด้านการบำบัดน้ำเสียในอนาคตได้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาวิธีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOP) โดยใช้ UV/Persulfate ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นโดยใช้วิธีการประดิษฐ์ Slow release candles
- 2.2 เพื่อศึกษาการบำบัด 17 β -Estradiol (E2) ด้วย UV/Persulfate โดยใช้ Slow release persulfate candle ที่ได้พัฒนาขึ้นให้ระบบบำบัด

3. ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาวิธีการ สภาพแวดล้อม และปริมาณที่เหมาะสมในการบำบัด ฮอร์โมนเพศที่ตกค้างในระบบบำบัดน้ำเสียหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยใช้สารต้นแบบคือ สิบเจ็ดเบตาเอสตราไดออล (17 β -Estradiol หรือ E2) เพียงชนิดเดียว สารออกซิแดนท์ที่ใช้บำบัดคือ Hydroxyl Radical (OH \bullet) ร่วมกับ Persulfate radicals (SO $_4^{\bullet-}$) ซึ่งถือว่าเป็นสารออกซิแดนท์สองตัวที่มีประสิทธิภาพการออกซิไดซ์สูงสุดซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาร่วมกันระหว่าง UV และ Persulfate โดย Persulfate ที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้จะเป็นการใช้นวัตกรรมแบบใหม่คือ Slow release persulfate candle โดยกลุ่มผู้วิจัยจะทำการศึกษาในระดับ lab scale เท่านั้น

4. ข้อตกลงเบื้องต้น

นำเสนอผลงานนี้ในการประชุมวิชาการระดับชาติ เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้ให้แก่นักวิชาการทางด้านสิ่งแวดล้อม เคมี และชีววิทยาเพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารเคมีต่อไป งานเสนอผลงานทางวิชาการนี้จะนำเสนอภายหลังได้ข้อมูลการวิจัยและประมวผลแล้วเสร็จ

5. วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็นส่วนย่อยๆ จำนวนทั้งสิ้น 2 ส่วน เพื่อให้การทดลองแต่ละลำดับขั้นเป็นไปตามความเหมาะสมของแต่ละวัตถุประสงค์ กล่าวคือ การทดลองขั้นเตรียมการและการทดลองแบบ Batch ซึ่งในส่วนนี้จะสรุปเพียงคร่าวๆ เท่านั้น โดยจะมีการกล่าวถึงแต่ละการทดลองโดยละเอียดใน บทที่ 3 ต่อไป

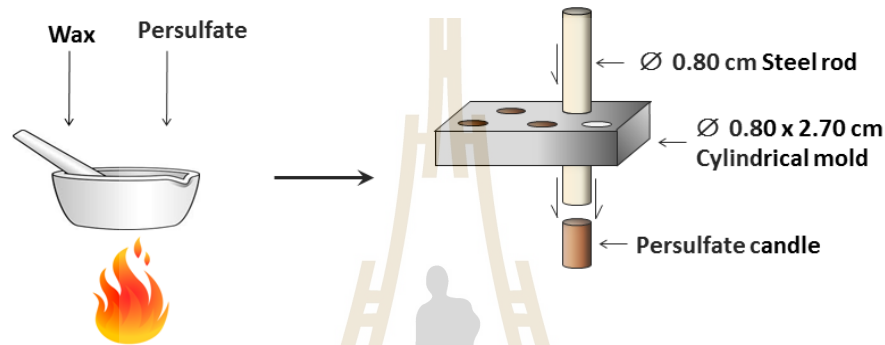
5.1 การทดลองขั้นเตรียมการ

เป็นการทดลองเริ่มต้นก่อนเริ่มการทดลองจริง เพื่อเตรียมความพร้อมต่างๆ เช่น การออกแบบและสังเคราะห์วัสดุถึงปฏิกิริยา UV การเตรียมสารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาในโครงการนี้ เช่น สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต สารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในการเปลี่ยนสีของสารเปอร์ซัลเฟตเพื่อนำไปวัดความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต รวมไปถึงสารเคมีและอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ร่วมกับการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High pressure liquid chromatography (HPLC) การสำรวจพื้นที่เพื่อไปเก็บน้ำตัวอย่างที่มาจากฟาร์มปศุสัตว์จริง

5.2 การเตรียม Controlled-release persulfate

แท่งเทียนเปอร์ซัลเฟต (Controlled-release persulfate candle) ที่จะนำมาใช้เป็นตัวปล่อยสารเปอร์ซัลเฟตอย่างช้าๆ เมื่อแท่งเทียนนี้สัมผัสกับน้ำ แท่งเทียนนั้นประกอบด้วยสารเคมีเพียงสองชนิดคือ สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตและขี้ผึ้งหรือ Paraffin ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการทำแท่งเทียนดังกล่าว รวมถึงแบบหล่อที่ใช้ ส่วนผสมต่างๆ ที่เลือกใช้ เพื่อหาอัตราส่วนผสมของเทียนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปบำบัดสารฮอร์โมนเพศแล้วจึงนำอัตราส่วนของเทียนชนิดนี้ไปศึกษาในการทดลองขั้นต่อไป

หลักการผลิต Controlled-release persulfate candle นั้นใช้หลักการทำเทียนซึ่งประยุกต์ candle มาจากงานของ Kambhu et al. (2012) ฉะนั้นต่อไปนี้จะกล่าวถึง Controlled-release persulfate ว่าเทียน Persulfate ส่วนประกอบหลักที่สำคัญในการทำเทียนคือ Paraffin wax และ Sodium Persulfate ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$) ในอัตราส่วนที่เท่ากันทุกการทดลอง ซึ่งวิธีการผลิตเทียน Persulfate ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ชุดทดลองการเตรียม Controlled-release persulfate

5.3 การทดลองแบบ Batch Study

ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองภายในห้องปฏิบัติการ ในภาชนะปิดอยู่กับที่ เช่น Erlenmeyer flask เพื่อศึกษาการปลดปล่อยสารของเทียนที่ได้เลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้ว การทดลองหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดย Persulfate anion ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน การทดลองหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดย AOP จากปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างพลังงานแสงยูวีและ Persulfate anion การหาคุณสมบัติที่เหมาะสมของ Slow release persulfate candle การทดลองหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดยนำ Slow release persulfate candle มาใช้ร่วมกันกับ UV การทดลองหาผลกระทบจากค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาร E2 โดย UV/Persulfate การทดสอบการสลายตัวของ E2 จากน้ำตัวอย่างตามธรรมชาติด้วยวิธีการบำบัดแบบ UV/Persulfate

6. ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

6.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

6.2 เพื่อพัฒนากรอบความคิดการบำบัดสารเคมีที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารเคมีที่ตกค้างจนได้ผลผลิตที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

6.3 ทำให้ได้วิธีการพัฒนาระบบการบำบัดสาร 17 β -Estradiol ที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้เทคโนโลยีสะอาดจากการใช้ slow release persulfate candle ร่วมกับ UV ในกระบวนการ AOP ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มาจากอุตสาหกรรมปศุสัตว์ขนาดใหญ่ได้ เป็นต้น

6.4 ระบบบำบัดที่พัฒนาขึ้นนี้ช่วยลดปริมาณ 17 β -Estradiol ที่ปนเปื้อนในน้ำก่อนถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงของสัตว์น้ำในการได้รับสาร 17 β -Estradiol โดยไม่จำเป็น อันจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อเศรษฐกิจการเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อการขายในประเทศ และส่งออกไปยังประเทศคู่ค้าในต่างประเทศ อันจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยโดยรวม

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อการจัดการมลพิษสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเป็นการนำเอาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ร่วมกับการใช้ความหลากหลายทางชีวภาพมาป้องกันรักษาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นการป้องกันรักษามิให้เกิดการตกค้างของสารพิษในดิน น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินอันส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต โดยคำนึงถึงเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้สามารถนำเอาองค์ความรู้พัฒนาต่อยอดขยายผลสู่การประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งผู้วิจัยเล็งเห็นว่าการบำบัดสาร Emerging contaminants ในประเทศไทยยังมีการทำวิจัยที่น้อย โดยเฉพาะสารกลุ่มสเตอรอยด์ฮอร์โมน (Hormone steroid) ดังเช่น เอสโตรเจนซึ่งเป็นสารฮอร์โมนเพศ

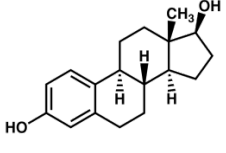
ฮอร์โมนที่ตรวจพบในธรรมชาตินั้นโดยส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่มฮอร์โมนเพศหญิง หรือเอสโตรเจน จัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เอสโตรเจนเป็นสารจำพวกสเตอรอยด์ (steroid) ที่สร้างขึ้นมาจากไขมันที่ชื่อว่าโคเลสเตอรอล (cholesterol) (Louis and Mary, 1959) โดยในร่างกายของผู้หญิงจะถูกสังเคราะห์ขึ้นที่รังไข่และต่อมหมวกไต (เนทีทิพย์, 2538) ในขณะที่เอสโตรเจนถูกผลิตขึ้นในร่างกายของผู้ชายที่อัณฑะและต่อมหมวกไต ชนิดของเอสโตรเจนที่มีบทบาทในงานสิ่งแวดล้อมมีอยู่สามชนิดคือ เอสโตรน (estrone, E1) 17-เบต้าเอสตราไดออล (17- β estradiol, E2) และเอสโตรออล (estriol, E3) ซึ่งสารฮอร์โมนเอสโตรเจนเหล่านี้สามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้จากน้ำทิ้งจากบ้านเรือนและชุมชน โดยเกิดจากการขับถ่ายออกจากร่างกายมนุษย์ อีกทั้งของเสียเหล่านี้ถูกปล่อยออกสู่ที่ระบายน้ำโสโครกและสุดท้ายก็เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย ของเสียสามารถปนเปื้อนได้จากสัตว์เลี้ยงหลายชนิดได้แก่ แกะ วัว ควาย หมู และ สัตว์ปีก รวมทั้งสัตว์ชนิดอื่นๆ ด้วย เนื่องจากมีการใช้ยาจำพวกสเตอรอยด์ในสัตว์โดยใช้เพื่อการ

คุมกำเนิด การป้องกันความผิดปกติในการสืบพันธุ์ จึงทำให้สารเหล่านี้ปนเปื้อนได้อย่างกว้างขวางและสามารถตรวจพบได้ในน้ำใต้ดินและน้ำผิวดินอีกด้วย

เอสโตรเจนเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์ทางธรรมชาติของสิ่งมีชีวิต ถึงแม้เอสโตรเจนจะเป็นกลุ่มของฮอร์โมนเพศหญิง แต่เพศชายก็สามารถสังเคราะห์เอสโตรเจนได้ด้วยตนเองเช่นกันแต่มีปริมาณน้อยมาก ฉะนั้นปริมาณการขับสารเอสโตรเจนออกจากร่างกายจึงมีมากที่สุดและผู้หญิงตั้งครรภ์ ผู้หญิงและผู้ชายตามลำดับ (Johnson et al., 2000) เอสโตรเจนมีหลายชนิดเช่น กลุ่มเอสโตรเจนที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติเช่น estrone (E1) 17 β -estradiol (E2) และ estriol (E3) กลุ่มเอสโตรเจนสังเคราะห์เช่น 17 α -ethynylestradiol (EE2) mestranol (MeEE2) ในข้อเสนอโครงการวิจัยนี้จะให้ความสำคัญกับ E2 มากเป็นพิเศษเนื่องจาก E2 มีบทบาทในงานสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อมนุษย์มากที่สุด (Gaido et al., 1996; Montagnani et al., 1996)

E2 มีสูตรโมเลกุลและคุณสมบัติทางกายภาพเคมีที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมดังตารางที่ 1 จากค่าดังกล่าวบ่งชี้ให้ทราบได้ว่า จากค่าความดันไอที่ต่ำของ E2 นั้นทำให้ E2 มีความสามารถในการระเหยที่น้อยมาก และเมื่อ E2 ถูกปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม E2 มีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับในดินได้ง่ายในขณะเดียวกัน E2 ยังมีความสามารถละลายได้เพียงเล็กน้อย จากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าหาก E2 ที่ยังไม่ได้รับการบำบัดถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ E2 จะถูกดูดซับอยู่ภายในดินเป็นเวลานานในขณะเดียวกันดินดังกล่าวยังสามารถปลดปล่อยสาร E2 ที่ถูกดูดซับสู่แหล่งน้ำได้ตลอดเวลาจนกระทั่งการแลกเปลี่ยนสารในแต่ละสถานะเข้าสู่สภาวะสมดุล ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดสาร E2 ก่อนปล่อยออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย การบำบัดควรเป็นการบำบัดแบบติดตั้งได้ง่าย และระยะเวลาในการบำบัดรวดเร็ว ไม่มีสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 1: คุณสมบัติทางกายภาพเคมีที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม

สูตรโครงสร้าง (17 β -estradiol, E2)	
สูตรโมเลกุล	C ₁₈ H ₂₄ O ₂
น้ำหนักโมเลกุล (g mol ⁻¹)	272.4
ความสามารถในการละลายน้ำ (mg l ⁻¹ , 20°C)	3.6 ^a
ความดันไอ (mm Hg)	2.3 × 10 ⁻¹⁰ b
ค่าคงที่การกระจายตัวกับออกทานอล (K _{ow})	8700 ^a
ค่าคงที่การแบ่งแยกสารอินทรีย์คาร์บอน (K _{oc})	3300 ^a
เวลาครึ่งชีวิตในแหล่งน้ำธรรมชาติ (วัน)	2 - 3 ^a ; 0.2 - 9 ^d
ค่าคงที่สมดุลการแตกตัวของกรด (pK _a)	10.23 ^c

ที่มา: ^a Lai et al., 2000; ^b Ling et al., 2006; ^c Hiroshi et al., 2003; ^d Jurgens et al., 2002

ปัจจุบันการบำบัดสารเคมีโดยการนำสารเคมีที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้สูง (สารออกซิแดนซ์) โดยนำไปบำบัดในที่ที่มีการปนเปื้อน หรือเรียกนิยมเรียกกันว่า วิธีการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่จุดกำเนิด (In situ chemical oxidation, ISCO) วิธีนี้เหมาะสำหรับสถานที่ที่มีการปนเปื้อนที่สามารถระบุตำแหน่งได้ สารเคมีบางชนิดนั้นมีวิธีการบำบัดที่ราคาไม่แพงมากนักเมื่อสารเคมีสัมผัสกับสารอินทรีย์ วิศวกรคาดหวังให้การบำบัดเป็นไปอย่างสมบูรณ์กล่าวคือเกิด Mineralization ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม (เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลผลิตสุดท้าย) ทั้งนี้สารอินทรีย์บางชนิดที่มีโครงสร้างสูตรโมเลกุลซับซ้อน ไม่สามารถถูกออกซิไดซ์โดยสารออกซิแดนซ์ให้เกิดการบำบัดที่สมบูรณ์ได้ แต่สารออกซิแดนซ์สามารถเปลี่ยนโครงสร้างสารอินทรีย์ดังกล่าวจากโครงสร้างที่ซับซ้อนให้กลายเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการบำบัดโดยวิธีทางธรรมชาติโดยจุลชีพ (วิธีทางชีวภาพ) ได้

การบำบัดทางเคมีแต่ละวิธีมีข้อดีและเสียแตกต่างกันไปดังนี้เช่น การปรับปรุงคุณภาพของโรงบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยน้ำทิ้งโดยใช้ระบบก๊าซโอโซนซึ่งเป็นออกซิแดนซ์ที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานที่สูง (Standard reduction potential, $E^0 = +2.10 \text{ V}$) แต่วิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูงมากโดยเฉพาะการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตก๊าซโอโซน การบำบัดด้วยต่างทับทิมหรือ Permanganate (MnO_4^- , $E^0 = +1.70 \text{ V}$) ซึ่งก่อให้เกิดสีตกค้าง (สีม่วง) ในสิ่งแวดล้อมรวมถึงก่อให้เกิดปริมาณแอมงานีสและแอมงานีสไดออกไซด์ตกค้างในดินสูง การบำบัดโดยใช้ Fenton Oxidation ซึ่งผลผลิตที่ได้เป็นสารที่มีค่าศักย์รีดักชันที่สูงคือมีความเป็นสารออกซิแดนซ์ที่มีความแรงในการชิงอิเล็กตรอนจากสารอินทรีย์คือ Hydroxyl radical (OH^\bullet ; $E^0 = +2.80 \text{ V}$) แต่เนื่องจากความเสถียรของอนุมูลอิสระชนิดนี้ไม่นานเพียงพอ จึงทำให้ OH^\bullet สามารถแตกตัวและสลายตัวเองไปอย่างรวดเร็ว ตัวออกซิแดนซ์ที่มีค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานที่สูงเป็นรองจาก OH^\bullet คือ Persulfate radicals ($\text{SO}_4^{\bullet-}$) ($E^0 = +2.60 \text{ V}$) ที่เกิดจากการกระตุ้น Persulfate anion ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) ด้วยปัจจัยภายนอก (Activator) โดยตัว $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ เดิมนั้นมีความสามารถในการบำบัดสูงอยู่แล้ว ($E^0 = +2.10 \text{ V}$)

กระบวนการยูวีโฟโตไลซิส (UV/Photolysis)

กระบวนการยูวีโฟโตไลซิสเป็นกระบวนการที่สารเคมีดูดกลืนพลังงานแสง (Photon) ที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดซึ่งในที่นี้คือพลังงานแสงยูวี แสงที่ส่งมาหากมีพลังงานพอดีกับพลังงานพันธะของสารเคมีนั้นๆ พันธะของสารตั้งต้นจะแตกออกหรือถูกย่อยสลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงนั่นเอง ความยาวคลื่นแสงยูวีอยู่ในช่วงประมาณ 200-400 nm สามารถแบ่งออกได้ตามความยาวของคลื่นคือ ช่วงคลื่นยาว (UVA, 400-315 nm) ช่วงคลื่นปานกลาง (UVB, 315-280 nm) และช่วงคลื่นสั้น (UVC, 280-100 nm) ความยาวคลื่นแสงที่มากที่สุดที่ก่อให้เกิดพลังงานพอเหมาะพอดีกับพลังงานพันธะของสาร

นั่นเป็นค่าจำเพาะของสารนั้นๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 ซึ่งต้องคำนึงถึงค่าศักย์รีดักชันมาตรฐาน (Standard reduction potential, E^0) ของสารที่ต้องการให้พันธะแตกตัวออก

$$\lambda = C / \nu \quad [7]$$

โดยที่ λ	=	ความยาวคลื่นแสง (m)
C	=	ความเร็วของคลื่นแสง (3×10^8 m/s)
ν	=	ความถี่ของคลื่นแสง (s^{-1}) = E / h
E	=	พลังงานควอนตัมหรือพลังงานที่ต้องการให้เกิดการสลายตัว (J)
h	=	ค่าคงที่ของ Planck (6.62×10^{-34} J-s)

ถึงแม้ว่ากระบวนการยูวีโฟโตไลซิสนั้นจะมีประสิทธิภาพที่สูงและใช้ในการฆ่าเชื้อโรคก่อนปล่อยน้ำเสียที่ถูกบำบัดลงแหล่งน้ำอย่างแพร่หลายในระบบบำบัดน้ำเสีย การใช้ยูวีโฟโตไลซิสอาจไม่เพียงพอต่อการสลายพันธะของสารเคมีที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ดั่งนี้

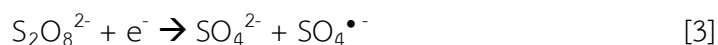
การออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes, AOPs)

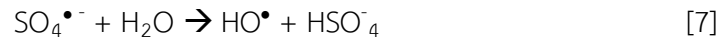
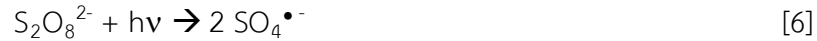
การออกซิเดชันขั้นสูงเป็นการบำบัดอย่างหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมได้ทั้งมลพิษทางน้ำและมลพิษทางอากาศ AOPs มีหลายประเภท เช่น UV/H_2O_2 O_3/H_2O_2 O_3/UV Fenton's reagent (และตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น Fe^0 หรือ Fe^{2+}) UV/TiO_2 $UV/Persulfate$ เป็นต้น ทั้งนี้การทำงานร่วมกันของทั้งสองส่วนจะก่อให้เกิด Hydroxyl Radical (OH^\bullet) ซึ่งถือว่าเป็นสารออกซิแดนท์ที่มีค่า E^0 สูงสุดหรือประสิทธิภาพการออกซิไดซ์สูงสุด (+2.80 V) ที่สามารถทำปฏิกิริยาย่อยสลายกับสารเคมีที่ต้องการบำบัดได้ หากมีระยะเวลาสัมผัสและปริมาณสารออกซิแดนท์ที่มากเพียงพอ สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้โดยสมบูรณ์ (Mineralization)

หากเป็นสารอนินทรีย์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะกลายเป็นเกลือ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นด้วย (Heeks et al., 1991) การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ในการกระตุ้น UV นั้นถูกใช้มากที่สุดในการบำบัดสารเคมี (Shestakova et al., 2013) รองลงมาคือการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ซึ่ง AOPs ที่ใช้ในโครงการนี้จะใช้กระบวนการ UV/Persulfate เป็นหลัก กล่าวคือเป็นการร่วมกันทำงานสองส่วนคือ ส่วนของ UV และส่วนของ Persulfate

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงโดย UV/Persulfate

ตัวออกซิแดนซ์ที่มีค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานที่สูงเป็นรองเพียงแค่ออกซิเจน OH• คือ Persulfate radicals (SO₄•⁻) (+2.60 V) ที่เกิดจากการกระตุ้น Persulfate anion (S₂O₈²⁻) ด้วยปัจจัยภายนอก (Activator) โดยตัว S₂O₈²⁻ เดิมนั้นมีความสามารถในการบำบัดสูงอยู่แล้ว (+2.10 V) ดังสมการที่ 2 แต่หากมีการกระตุ้น Persulfate โดยใช้ Activator ให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเพียงหนึ่งตัว Persulfate จะเปลี่ยนเป็น Persulfate radical (SO₄•⁻) ดังสมการที่ 3 ตัวอย่างการใช้ Activator ได้แก่ การใช้ความร้อน การใช้โลหะทรานซิชัน (Huang et al., 2002; Anipsitakis and Dionysiou, 2004; Hou et al., 2012; Wu et al., 2012) หรือการใช้ Zero valent iron (Fe⁰) หรือ Fe²⁺ หรือควบคู่กัน ดังสมการที่ 4-5 การใช้ H₂O₂ การเพิ่มความเข้มข้นอัลคาไลน์โดยการเพิ่มค่าพีเอช และการกระตุ้นด้วยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) (Lau et al., 2007; Chan et al., 2010; Shih et al., 2012; Gao et al., 2012) ข้อดีของกระบวนการ UV/Persulfate นี้คือปฏิกิริยานั้นเกิดขึ้นจากสารออกซิแดนซ์คุณภาพสูงถึงสองตัว คือ OH• และ SO₄•⁻ ซึ่งถูกฟอร์มตัวภายใต้แสงยูวี (Berlin, 1986) ดังสมการที่ 6-7





กระบวนการ UV/Persulfate หรือ UV/S₂O₈²⁻ เป็นกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสแบบสถานะเดียว (Homogeneous photocatalysis) หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกันกับสารที่ต้องการบำบัด วิธีการนี้ใช้การอย่างแพร่หลายในเครื่องมือวัดปริมาณของคาร์บอนในน้ำ (TOC analyzer) โดยใช้พลังงานความร้อนสูง (100°C) ในการกระตุ้น Persulfate เพื่อให้ได้ SO₄^{•-} จำนวนสองโมล (Visco et al., 2005) ทั้งนี้การฟอร์มตัวเป็น SO₄^{•-} นั้นมีค่าลดลงเมื่อความยาวคลื่นแสงนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่ง Hermann (2007) ได้สรุปไว้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึม (extinction coefficient) มีค่าลดลง จาก 27.5 ± 1.1 mol⁻¹ cm⁻¹ เป็น 0.25 ± 1.01 mol⁻¹ cm⁻¹ เมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นจาก 248 nm เป็น 351 nm ตามลำดับ

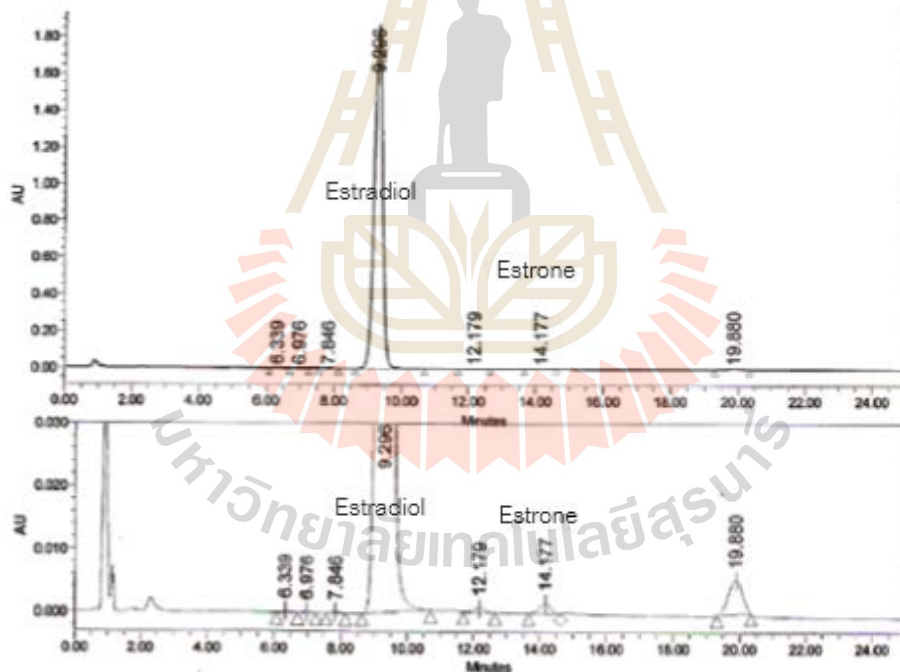
17β-Estradiol (E2) กับสิ่งแวดล้อม

จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการพบสารตกค้างจำพวก Emerging contaminants พบว่า สาธารณชนให้ความสนใจกับปัญหาสิ่งแวดล้อมชนิดนี้มาก ในช่วงระหว่างปี 1999 ถึง 2000 ประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการศึกษาชนิดและปริมาณสารเคมีที่ค้นพบในแหล่งน้ำธรรมชาติจำนวน 139 แห่งจากพื้นที่ 30 มลรัฐ โดย Toxic Substances Hydrology Program of the U.S. Geological Survey (USGS) พบว่าแหล่งน้ำจำนวน 55 แห่งมีสารตกค้างจำพวก Reproductive Hormones ซึ่งประกอบไปด้วยฮอร์โมนจำนวนทั้งสิ้นถึง 11 ชนิด (Kolpin et al., 2002) โดยเอสโตรเจนชนิด 17β-Estradiol (E2) มีปริมาณตกค้างสูงสุดที่ 0.2 µg L⁻¹ ในขณะที่ปริมาณ E2 เพียงแค่ 0.001 µg L⁻¹ สามารถส่งผลกระทบต่อ

ระดับไวเทลโลจีนิในปลาเทราท์ (Vitellogenin) ซึ่งเป็นระดับแสดงความสมบูรณ์ของเพศได้ (Hansen et al., 1998; Purdom et al., 1994) ยิ่งไปกว่านั้นปริมาณที่ตกค้างของ E2 ไม่เพียงแต่สามารถส่งผลกระทบต่อถึงสัตว์และมนุษย์เท่านั้น แต่ยังคงส่งผลกระทบต่อตรงถึงพืชได้หลายชนิดด้วย (Shore et al., 1995)

ค่าความเข้มข้นของ E2 ที่ตรวจพบในน้ำเสียก่อนเข้าการบำบัดนั้นมีความแตกต่างกันไปตามประเทศที่ค้นพบ เช่น มีการตรวจพบ E2 ในประเทศบราซิลที่ความเข้มข้นเฉลี่ย 15 ng L^{-1} (Ternes et al., 1999) ในขณะที่พบความเข้มข้นของ E2 ที่ประเทศญี่ปุ่นซึ่งแปรผันตามฤดูกาลอยู่ในช่วง $30-90 \text{ ng L}^{-1}$ ในฤดูร้อนและ $20-94 \text{ ng L}^{-1}$ ในฤดูหนาว (Nasu et al., 2000) จากการรวบรวมข้อมูลโดย Ying et al. (2002) พบว่าในกลุ่มประเทศที่พัฒนาแล้วเช่น อิตาลี เยอรมัน แคนาดา สหรัฐอเมริกา สหราชอาณาจักร และ ญี่ปุ่น พบว่า E2 ซึ่งเป็นสารในกลุ่มเอสโตรเจนเป็นสารที่ถูกตรวจพบมากที่สุดในน้ำเสียที่ผ่านเข้าระบบบำบัด ก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยสามารถตรวจพบได้มากที่สุดถึง 64 ng L^{-1} Desbrow et al. (1998) ได้ตรวจวิเคราะห์น้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสีย 7 แห่งในสหราชอาณาจักรพบปริมาณ E2 ความเข้มข้นตั้งแต่ $3-50 \text{ ng L}^{-1}$ นอกจากนี้ E2 ยังถูกตรวจพบอีกเป็นปริมาณมากตามฟาร์มปศุสัตว์ ไม่ว่าจะเป็นปริมาณฮอร์โมนซึ่งสัตว์ผลิตเองตามธรรมชาติและขับถ่ายออกมา หรือปริมาณฮอร์โมนที่เกษตรกรฉีดให้กับสัตว์เพื่อเพิ่มผลผลิตรวมถึงคุณภาพและปริมาณ Shemesh and Shore (1994) และ Shore et al. (1988) พบว่าปริมาณ E2 ในของเสียจากฟาร์มไก่อมีค่าตั้งแต่ $14 - 533 \text{ ng/g-dry weight}$ (ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $44 \text{ ng/g-dry weight}$) ด้วยเหตุนี้เองจึงมีการตรวจพบ E2 ตามแหล่งน้ำตามธรรมชาติในน้ำผิวดิน หรือน้ำใต้ดินอันเนื่องมาจากการซึมผ่านของ E2 จากน้ำผิวดินและการถูกชะจากปริมาณที่ถูกดูดซับในดินเป็นจำนวนมาก (Peterson et al., 2001)

E2 นั้นสามารถทำการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น High Performance Liquid Chromatography-with Photodiode Array Detector (HPLC-PDA), Gas Chromatography - Mass Spectrometer (GC-MS) และ Thermal Gravimetric Analysis (TGA) แต่ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่อง HPLC-PDA ในการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของ E2 ที่เหลืออยู่ในตัวอย่างที่ทำการทดลอง ซึ่งหลักการทำงานของเครื่อง HPLC คือ การวิเคราะห์ผลแบบ Normalized percent peak areas กล่าวคือ สารที่ทำการวิเคราะห์นั้นจะต้องมีค่า Response factor คล้ายกัน และสารต่างๆ ที่ผสมกันอยู่ในตัวอย่างต้องถูกชะ (Elute) ออกมาได้ร้อยละหนึ่ง (กาญจนา เวียงนนท์.2553) และการศึกษาการใช้เครื่องมือนี้สามารถเข้าใจได้ง่ายอีกด้วย



ภาพที่ 2 ผลโครมาโทแกรมตัวอย่าง CCQM-P117.a 17 β -Estradiol จากเครื่อง HPLC-PDA

กระบวนการออกซิเดชันด้วยสารเปอร์แมงกาเนต

MnO_4^- เป็นสารออกซิแดนท์ที่มีราคาถูก หาได้ง่าย และสามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารเคมีได้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีศักย์ออกซิเดชันที่สูงถึง +1.7 V สามารถประยุกต์ใช้งานได้ใน pH ช่วงกว้าง (Waldemer and Tratnyek, 2006; Munter, 2001) MnO_4^- มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ดี โดยมักจะทำปฏิกิริยา ณ บริเวณ พันธะคู่ของโมเลกุลสารอินทรีย์ (C=C) หมู่แอลดีไฮด์ (-COH) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) สารจำพวก chlorinated solvents เช่น tetrachloroethylene (PCE) trichloroethylene (TCE) dichloroethylene และ vinyl chloride (VC) นั้นสามารถถูกบำบัดด้วย MnO_4^- ได้อย่างดี (Oberle and Schroder, 2000) นอกจากนี้ MnO_4^- ยังสามารถบำบัดสารพิษที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้หลายชนิด เช่น phenolic and non-phenolic EDCs (dichlorvos, 4-t-butylphenol, estrone, triclosan and bisphenol-A) รวมถึงเภสัชภัณฑ์ต่างๆ (Rodriguez et al., 2007, Shao et al., 2010, Guan et al., 2010, Jiang et al., 2012, Hu et al., 2008, Hu et al., 2010) เปอร์แมงกาเนตสามารถที่จะออกซิไดซ์สารเหล่านี้ได้หลายทาง คือ การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน การกำจัดไฮโดรเจนอะตอม หรือการให้ออกซิเจนอะตอมไปแทนที่ไฮโดรเจนอะตอม (Dash et al., 2009)

Shao et al. (2010) ได้มีการประยุกต์ใช้เปอร์แมงกาเนตในการบำบัดสาร estrone (E1) และพบว่าอัตราการสลายตัวของสารนี้เป็นแบบ second order ที่อัตราความเร็ว $44.45 \text{ L mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ที่ pH 5.8 ในปัจจุบันนี้ผู้วิจัยยังไม่พบว่ามียานวิจัยที่มีการบำบัดสาร E2 โดยใช้ slow release potassium permanganate candle (SRPC) เนื่องด้วย SRPC เป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับการบำบัดสารพิษต่างๆในน้ำทั้งน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดินเช่น BTEX, TCE และ PAHs (Kambhu et al., 2012, Christenson et al., 2012, Rauscher et al., 2012) แต่การประยุกต์ใช้ในระดับภาคสนามนั้นยังมีการประยุกต์ใช้จำกัด ซึ่ง Christenson et al., 2012 เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่ได้นำ SRPC ไปประยุกต์ใช้จริงในงานภาคสนามเพื่อ

บำบัดสาร TCE ในน้ำใต้ดิน ซึ่งข้อดีของการใช้ SRPC คือไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความจำเพาะในการนำสารออกซิแดนซ์ลงไปบำบัดสารเคมี โดยการฉีดสารลงดินแบบดั้งเดิม เช่น mixing trailer, pumps, และ hoses เป็นต้น อีกทั้งยังมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานในด้านการนำสารออกซิแดนซ์ซึ่งเป็นของเหลวใส่ลงไปในแหล่งที่มีการปนเปื้อน โดยทางทฤษฎี SRPC นี้สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ได้ในระบบบำบัดน้ำเสีย หรือใส่ลงไปในบ่อที่มีการกักเก็บน้ำที่มีสาร E2 ปนเปื้อนได้

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation processes, AOP)

จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการบำบัดสารตกค้างนั้นการใช้ UV ได้รับความสนใจมาจากนักวิจัยหลายกลุ่มเนื่องมาจากวิธีนี้มีความรวดเร็ว มีประสิทธิภาพสูง และไม่ก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (by-products) UV/H₂O₂ และ UV/TiO₂ ถูกเลือกใช้เป็นอย่างมากในการบำบัดสาร E2 (เช่น Coleman et al., 2000; Nakashima et al., 2002; Ohko et al. 2002; Nakashima et al., 2003; Yu et al. 2003; Coleman et al., 2004; Rosenfeldt and Linden, 2004; Coleman et al., 2005; Hansen and Anderson, 2012 เป็นต้น) ดังตัวอย่างต่อไปนี้ Ohko et al. (2002) ได้ใช้ TiO₂ ในกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสเพื่อบำบัด E2 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10⁻⁶ M และพบว่า E2 ถูก Mineralize ได้อย่างสมบูรณ์แบบเป็น CO₂ ในเวลาเพียง 3 ชั่วโมง ซึ่งผง TiO₂ ที่ใช้นั้นมีปริมาณค่อนข้างสูง 1 g L⁻¹ ในลักษณะของสารแขวนลอย ในขณะที่เดียวกัน Ohko et al. (2002) ได้เสนอ Mechanisms ของปฏิกิริยาไวโนบทความนี้อีกด้วย แต่ทว่า ปัจจุบันรูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยาได้หลีกเลี่ยงการใช้สารกึ่งตัวนำในรูปแบบของแข็งเนื่องจากการบดบังการเข้าถึงของพลังงานแสงที่จะทำปฏิกิริยาให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาและเพิ่มความยุ่งยากในการกำจัดผงออกภายหลัง (Yu et al. 2003) ภายหลังจึงมีการประยุกต์ใช้วิธีการตรึง TiO₂ กับวัสดุที่อยู่กับที่ (Immobilized) (Nakashima et al.,

2003; Coleman et al., 2005) Coleman et al. (2000) ใช้ UV/TiO₂ ซึ่ง TiO₂ ที่ใช้เป็นลักษณะผงฝังบนแผ่นไทแทนเนียม (Ti-6A1-4V) พบว่า 50% ของ E2 ถูกกำจัดไปในเวลา 40 นาที ในขณะที่ใช้เวลาถึง 195 นาทีในการกำจัด E2 ให้ได้ถึง 98% Coleman et al. (2000) ยังพบว่าค่าพีเอชมีผลกระทบต่ออัตราเริ่มต้นของปฏิกิริยาโดย pH ที่น้อยกว่า 7 ทำให้ค่าของอัตราเริ่มต้นเพิ่มขึ้น และหากค่าพีเอชมากกว่า 10 อัตราเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมถึง 3 เท่าซึ่งเป็นผลมาจากการฟอร์มตัวของ OH[•] ที่มีจำนวนมากขึ้นตามค่าของ pH นั้นเอง ในขณะเดียวกัน การที่ E2 มีค่า pKa เท่ากับ 10.23 (Hiroshi et al., 2003) จะส่งผลให้เกิดการแตกตัวจาก diol เป็น phenoxide ทำให้เกิดการดูดซับบนไอออนของ OH[•] มากขึ้นไปอีก ในขณะที่การฉายแสงยูวีเพียงอย่างเดียว (Direct Photolysis) โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ค่าพีเอชสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราเริ่มต้นด้วยเช่นกัน Liu and Liu (2004) พิสูจน์ว่าช่วงแปรผันของ pH นั้นคล้ายกัน กล่าวคือค่าอัตราเริ่มต้นลดลงมากช่วงค่าพีเอชเท่ากับ 2 – 5 แต่มากขึ้นในช่วง 6 – 8 ซึ่งถือว่าเป็นช่วงพีเอชที่ Direct photolysis จะให้ผลที่ดีที่สุด ทั้งนี้การทดลองนี้ใช้ UV disinfection lamp (30 W) ที่ความยาวคลื่น 254 nm ความเข้มข้นเริ่มต้นของ E2 คือ 20 mg L⁻¹ อัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นเป็นไปตาม pseudo-first-order law Coleman et al. (2004) ยังเปรียบเทียบอีกว่าหากเป็นการฉายแสงยูวีลงบนสารละลายเพื่อกำจัด E2 เพียงอย่างเดียวนั้นจะใช้เวลากว่า 485 นาทีในการกำจัด E2 ได้ 100% แต่ใช้เวลาน้อยลง หากใช้กระบวนการโฟโตแคตาไลซิสด้วยการตรึง TiO₂ ทั้งนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ E2 นั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนของพื้นที่ผิวของแผ่นตะแกรงที่ใช้ตรึง TiO₂ และในขณะเดียวกันอัตราดังกล่าวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสารละลายด้วย (Nakashima et al., 2002; Nakashima et al., 2003)

จากการทบทวนวรรณกรรมจะเห็นได้ว่าการศึกษาการบำบัดสาร E2 นั้นถูกวิจัยด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสแบบ UV/TiO₂ และ UV/H₂O₂ เป็นส่วนมาก แต่การวิจัยโดยเฉพาะเจาะจง

ที่สาร E2 ด้วย UV/Persulfate ที่ระบุถึงปริมาณสารตั้งต้น และ สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัด E2 นั้นยังไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควรโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตามกลุ่มผู้วิจัยพบว่าสารเคมีหลายชนิดสามารถบำบัดด้วย UV/Persulfate และแนวโน้มการวิจัยด้านนี้จะค่อยๆ ได้รับความนิยมนมากขึ้น เพียงระยะเวลา 2 ปีที่ผ่านมา มีบทความที่ตีพิมพ์ในระดับนานาชาติเกี่ยวกับการใช้ UV/Persulfate จำนวนทั้งสิ้น 10 บทความ กลุ่มผู้วิจัยได้เรียบเรียงข้อมูลที่เป็นประโยชน์กับโครงการวิจัยนี้ ดังต่อไปนี้

ภาชนะที่ใช้ทำ (reactor) ควรเป็นวัสดุประเภท Quartz จะทำให้แสงยูวีไม่ถูกดูดซับ แหล่งพลังงานแสง UV ที่ใช้นั้นมีได้หลายแบบเช่น LP (Monochromatic Low pressure; narrow spectrum) และ MP (Polychromatic medium pressure; broad spectrum) ทั้งนี้ Rosenfeldt and Linden (2004) และ Liang et al. (2011) ได้เปรียบเทียบการใช้หลอด UV ทั้งสองชนิดเพื่อให้สามารถทำงานแล้วเสร็จได้เร็วขึ้น แต่ Li et al. (2008) กล่าวว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตแสงยูวีนั้น จะสิ้นเปลืองมากถึงห้าเท่าหากใช้ MP ในจำนวนที่น้อยเทียบกับการใช้ LP ในจำนวนที่มาก เพราะการใช้ MP นั้นสิ้นเปลืองในส่วนในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างเกินไปและอาจไม่ได้ใช้ ความยาวคลื่นของแสงยูวีที่ใช้นั้น ขึ้นอยู่กับตัวกระตุ้นที่นำมาใช้ สำหรับ Persulfate ความยาวคลื่นที่ใช้จะอยู่ที่ 254 nm Chu et al. (2011) ทดสอบการใช้ UV ใน UV/Persulfate ในหลายๆ ความยาวคลื่น (254, 300, 350 nm) พบว่าที่ 254 nm นั้น มีพลังงานโฟตอนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิต $SO_4^{\bullet-}$ ซึ่งใกล้เคียงกับ UV/H₂O₂ ซึ่ง H₂O₂ มีการดูดซับสูงที่สุดในช่วง 210-230 nm (Elmolla and Chaudhuri, 2009; Liang et al., 2011)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ AOP สามารถพิจารณาได้ดังนี้ (1) จากการลดลงของปริมาณสารที่ต้องการบำบัดได้โดยตรง (2) จากการกำจัด TOC (3) จากการเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อมวลสารที่บำบัด (Electrical Energy per mass, EE/M, kWh/kg) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของพลังงานที่ใช้

(kw) กับเวลา (min) ทหารด้วยมวลสารตั้งต้น (ความเข้มข้นคูณปริมาตร) (4) จากการใช้ Electrical energy per order, EE/O (Electrical energy per order, kWh/m³/order of degradation) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ UV-based AOPs ชนิดอื่น (Bolton et al., 2002; Anipsitakis and Dionysiou, 2004; He et al., 2013) หรือ (5) จากอัตราเริ่มต้น (Initial rates) หรืออัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนไปกับเวลาซึ่งเป็นการพิจารณาในช่วงเริ่มต้นของปฏิกิริยา (ช่วง 10% ของเวลาทั้งหมด) ก็สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทดลองได้นั้นเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้ (Coleman et al., 2000; Hiroshi et al., 2003; Liu and Liu, 2004; Liang et al., 2011)

กระบวนการบำบัด E2 ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

เนื่องจากการบำบัดสารเคมีที่มีโครงสร้างซับซ้อนโดยวิธีทางเคมีเพื่อให้ถึงระดับ mineralization นั้นมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นการใช้ระบบบำบัดทางชีวภาพร่วมกับการบำบัดทางเคมีจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดต้นทุนการบำบัดและการดำเนินการ จากการศึกษาการวิจัยในอดีตพบว่าได้มีการบำบัดสารฮอโรโมนโดยใช้การบำบัดทางชีวภาพเป็นอย่างมากโดยเฉพาะสารกลุ่มเอสโตรเจน เช่นในดินที่ทำการเกษตร (Das et al., 2004) ในดินที่ถูกหมักด้วยมูลสัตว์ (Jacobsen et al., 2005) ในน้ำแม่ น้ำ และดินตะกอน (Bradley et al., 2009; Jurgens et al., 2002) และการบำบัดโดยใช้สารแบคทีเรียชนิดเดี่ยว (Yoshimoto et al., 2004) โดยทั่วไปแล้วในการศึกษาการย่อยสลายสารนี้ด้วยเทคนิคทางชีวภาพ จะเกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าในระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Fan et al., 2007) ภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 30 °C ขึ้นไป (Jacobsen et al., 2005; Hemmings and Hartel, 2006) และความชื้นสัมพัทธ์ในดินที่เหมาะสม (Colucci and Topp, 2001) ดังเช่นการทดลองของ Fan et al. (2007) ได้รายงานว่าการสลายตัวของ E2 โดยใช้การบำบัดทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจนเร็วกว่าแบบไม่ใช้ออกซิเจนถึง 6 เท่า

นอกจากนั้น Colucci et al. (2001) รายงานว่า E2 สามารถเกิดการย่อยสลายได้ (Mineralization) ในดินที่ทำการเกษตร 4-15% หลังจากดำเนินการทดลองไป 61 วัน และ Fan et al. (2007) ยังพบว่า E2 สามารถเกิด mineralization ในดินได้ภายใต้การบำบัดแบบใช้ออกซิเจนมากกว่าการไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นการบำบัดสาร E2 ด้วยจุลชีพในดินแบบใช้ออกซิเจนจึงเป็นเทคนิคการบำบัดที่น่าสนใจและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการบำบัดทางเคมีเพื่อการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำก่อนที่จะปล่อยน้ำลงสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อความปลอดภัยต่อมนุษย์และสัตว์โดยรวม

โดยทั่วไปปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์นั้นผันแปรตามสารที่ต้องการบำบัด เป็นที่น่าสนใจว่า ถึงแม้ $\text{SO}_4^{\bullet-}$ จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการ activate peroxymonosulfate (HSO_5^-) ด้วย anions หลายชนิดได้แต่ anions ดังกล่าวนั้นไม่สามารถ activate $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ได้เลย Yang et al. (2010) ศึกษาความสัมพันธ์ของการบำบัด atenolol ด้วย UV/Persulfate นั้นพบว่าความสำคัญของปัจจัยภายนอกเป็นดังนี้ ความเข้มข้นของ Persulfate > ค่าพีเอช > ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก > ความเข้มข้นของไนเตรต > ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต > ความเข้มข้นของคลอไรด์ (Liu et al., 2013) ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจัยภายนอกจาก anion มีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับปัจจัยหลักสองค่าแรก ทั้งนี้สามารถสรุปปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการใช้ UV/Persulfate ตามสภาพแวดล้อมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ด้วย ดังต่อไปนี้

1) ค่า pH ของสารละลาย

ค่า pH ในการบำบัดสารอินทรีย์โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 4-7 ยกตัวอย่างเช่นที่เหมาะสมกับการบำบัด สาร Iodinated X-ray contrast medium (ICM) ด้วยปฏิกิริยา AOP จาก UV/ H_2O_2 /Persulfate คือ 4.34 (Chu et al., 2011) ซึ่งใกล้เคียงกับ Khan et al. (2013) ซึ่งใช้ UV/Persulfate/ Fe^{2+} ในการ

บำบัด Atrazine ได้ผลดีที่สุดที่ค่า pH 5.8 ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำก่อนออกจากโรงบำบัดน้ำเสียกล่าวคือ ประมาณ 6-7 แต่หากใช้ UV/H₂O₂ ในการบำบัด E2 โดยเฉพาะนั้น Coleman et al. (2000) กล่าวว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นจะเร็วขึ้นอีกถึง 3 เท่าเมื่อ pH มีค่ามากกว่า 10 เพราะการฟอร์มตัวของ OH[•] จะมีมากขึ้นในค่า pH ที่สูงขึ้น เช่นเดียวกับ Lin et al. (2011) ทำการศึกษา mineralization ของ Phenol โดย UV/Persulfate พบว่าค่า pH ที่เปลี่ยนไปไม่มีผลกระทบต่ออัตราการลดลงของ Phenol แต่ในขณะเดียวกันเมื่อวิเคราะห์ค่า TOC ของสารละลายพบว่า การทำปฏิกิริยาจะมีความรุนแรงมากขึ้นที่ pH มีค่าเท่ากับ 11 ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการบำบัดสารผลิตภัณฑ์ยา Sulfamethazine (Gao et al., 2012) ฉะนั้น Lin et al. (2011) แนะนำค่า pH สูงในการทำปฏิกิริยาของ UV/Persulfate เนื่องจากการฟอร์มตัวที่เพิ่มขึ้นของ OH[•] นั้นเอง (Buxton et al., 1988)

2) ปริมาณของสารตั้งต้น เช่น ความเข้มข้นของ Persulfate ค่า Fluence rate ของแสงยูวี

He et al. (2013) แนะนำว่า ความเข้มข้นของ persulfate ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัด Yang et al. (2010) พบว่า ภายหลังจากทำการบำบัดสีย้อมผ้า Acid Orange 7 (AO7) ด้วย Persulfate นั้น จากการเปรียบเทียบการ Activate ด้วยปัจจัยหลายอย่างเช่น ความร้อนที่ 25-80°C UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm การ activate ด้วยความร้อนมากกว่า 50°C ทั้งนี้ Yang et al. (2010) ใช้หลอด Hg UV Lamp ขนาด 6W ($\lambda = 254 \text{ nm}$) ซึ่งมี Fluence rate ที่ $9 \mu\text{W cm}^{-2}$ ในการบำบัด AO7 ด้วยแสงยูวีเองก็สามารถเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนได้ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ AO7 ถึงถูกกำจัดได้ไว แต่ทั้งนี้ การ activate ด้วยความร้อนอย่างเดียวมีอัตราการสลายตัวมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่ He et al. (2013); Khan et al. (2013) ใช้ หลอด Hg UV Lamp ขนาด 15 W ที่ความยาวคลื่น 254 nm ซึ่ง

สามารถวัด Fluence rate ที่ผ่านสารละลายในถังปฏิกิริยาได้ที่ 0.1 mW cm^{-2} Liu and Liu, (2004) ใช้หลอด UV แบบ Disinfection lamp ขนาด 30 W ที่ความยาวคลื่น 253.7 nm ในการฉายแสงโดยตรงต่อสารละลายที่มี E2 ละลายอยู่ $3-10 \text{ mg L}^{-1}$ พบว่าภายใน 1 ชั่วโมงสาร E2 สลายตัวไป 55% จะเห็นได้ว่าปริมาณสารที่เข้าไปบำบัดนั้นผันแปรตามความยากง่ายของโครงสร้างโมเลกุลของสารที่ต้องการบำบัดทั้งสิ้น

3) ปริมาณสารอินทรีย์จากปัจจัยภายนอกเช่น Natural organic matter (NOM)

Chu et al. (2011) แนะนำว่าควรระวังสารอินทรีย์ชนิดอื่นด้วยเพราะอาจทำให้เกิดภาวะแข่งขันกันเพื่อ radicals ที่มีอยู่และอาจทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ที่มีอยู่ลดลง Khan et al. (2013) ใช้ Suwannee River humic acid (SRHA) และ fulvic acid (SRFA) เป็นตัวแทนของ Natural organic matter (NOM) ในการทดลองหาผลกระทบจาก NOM ต่อการบำบัดโดย UV/Persulfate/ Fe^{2+} Hansen and Anderson (2012) นั้นระบุว่าการศึกษากการบำบัด E2 ในสารละลายนั้นบทความจำนวนมากจะพิจารณา Water matrix ที่เป็นน้ำบริสุทธิ์ น้ำที่ปราศจากประจุ หรือน้ำดื่ม ซึ่งไม่มีการปนเปื้อนใดๆ นอกจากสาร E2 แต่ในความเป็นจริงการนำวิธีการบำบัดไปประยุกต์ใช้ควรให้มีการพิจารณาถึงลักษณะน้ำที่ปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ชนิดอื่นถึงแม้ว่าด้วยวิธีการบวกรวมการขึ้นสูงในการกำจัดสารกลุ่มเอสโตรเจน จะสามารถกำจัดปริมาณสารปนเปื้อนดังกล่าวส่วนใหญ่ได้ แต่ขั้นตอนปริมาณและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมยังคงต้องการการศึกษาเพิ่มเติม เพราะสารตกค้างยังคงหลงเหลืออยู่ภายหลังการบำบัดเสมอ (Esplugas et al., 2007)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การทดลองขั้นเตรียมการ

ในขั้นตอนการเตรียมการของโครงการประกอบไปด้วยส่วนย่อยสองส่วนคือ

1.1 จัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีทั้งหมด

1.1.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. หลอดกาแฟ (ทำแบบหล่อเทียน)
2. เทปกาวใส
3. ถ้วยกระเบื้องสำหรับหลอม Paraffin
4. แท่งคนสาร
5. กรรไกร
6. Erlenmeyer flask
7. HPLC vial
8. ขวด EPA vial ขนาด 40 mL
9. Volumetric flask คละขนาด
10. เครื่อง UV/Vis Spectrophotometer
11. Balance
12. นาฬิกาจับเวลา

13. Quartz beaker

14. Micro-pipet ขนาด 100-1000 uL และ 10-100

15. ชุดปฏิบัติการสำหรับปฏิกิริยาที่ใช้แสงยูวี

15. เครื่องวิเคราะห์สาร (High-performance liquid chromatography (HPLC)) ยี่ห้อ Waters รุ่น e2695 ต่อด้วยเครื่องตรวจวัดชนิด Photodiode Array Detector ยี่ห้อ Waters รุ่น 2998

1.1.2 สารเคมี

1. Sodium persulfate ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$)

2. Paraffin

3. Sodium bicarbonate (NaHCO_3)

4. Potassium iodide (KI)

5. Methanol (CH_4O)

6. Acetonitrile

7. 17β -Estradiol (E2)

8. sodium thiosulfate ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)

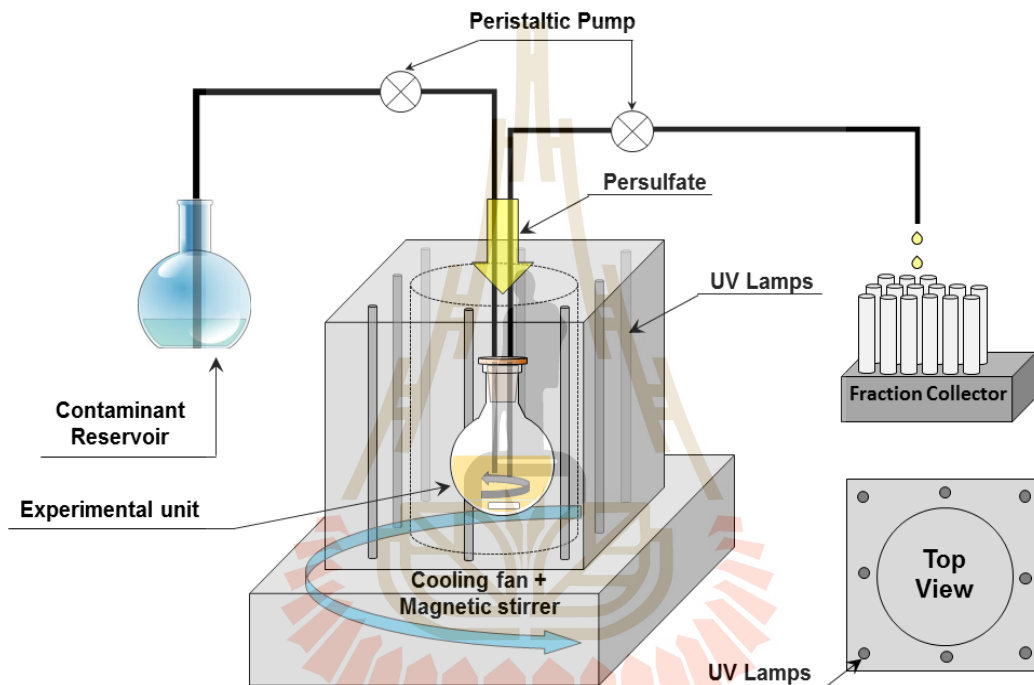
9. น้ำกลั่น

1.2 ออกแบบและสังเคราะห์ปฏิกิริยา UV

การศึกษาการย่อยสลายสาร E2 ด้วย UV นั้นจำเป็นต้องสังเคราะห์ปฏิกิริยานี้ขึ้นมา

โดยขั้นตอนนี้จะเป็นถึงที่ปกคลุมด้วยวัสดุที่แสงป้องกันแสงรบกวนจากภายนอกและแสง UV ส่องผ่านออกไป

ดังนั้นจะมีการติดตั้งหลอด UV ไว้ภายใน โดยจะมีช่องว่างสำหรับบรรจุ Quartz cell ไว้บริเวณตรงกลางของถัง และมีพัดลมระบายความร้อนด้านล่าง รวมถึงมีระบบกวนสารด้วยแม่เหล็ก ซึ่งเมื่อทำการศึกษาทดลองสารตัวอย่างจะถูกปั๊มเข้ามาในระบบ และผ่านการบำบัดด้วยแสง UV ก่อนถูกส่งผ่านออกไปที่ fraction collector เพื่อเก็บตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 3



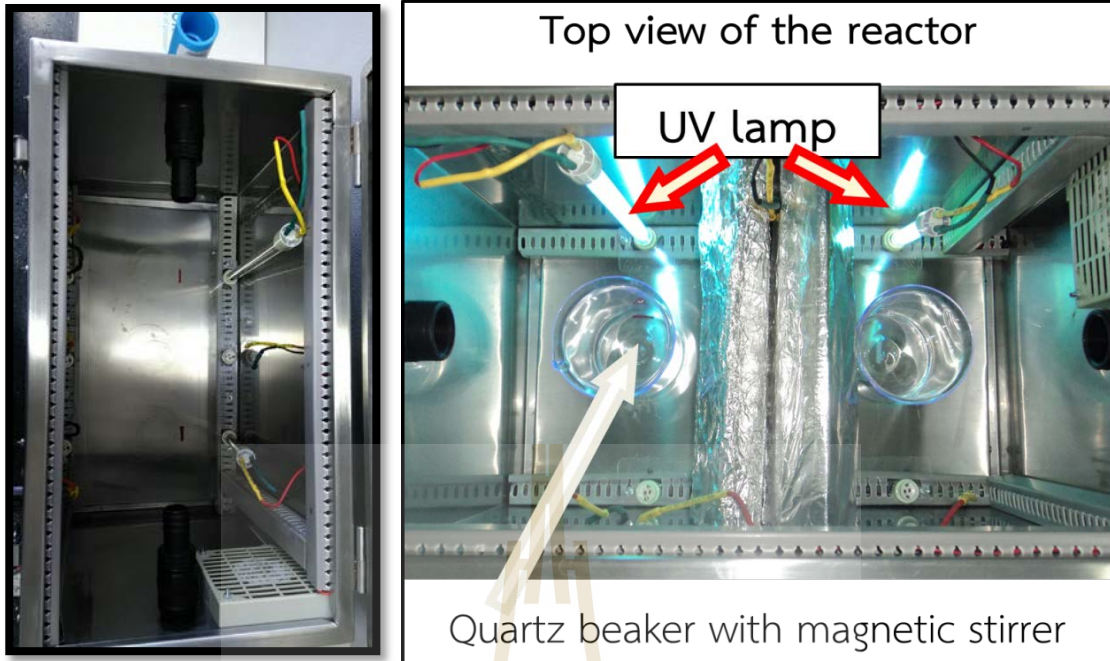
ภาพที่ 3 ชุดถังปฏิบัติการ UV

ชุดปฏิบัติการที่จัดทำนั้นทำมาจากเหล็กสแตนเลส ขนาด 30 ซม. x 50 ซม. x 40 ซม. (กว้าง x ยาว x สูง) ชุดปฏิบัติมีฝาปิดด้านบนและสามารถติดตั้งฉากกันภายในเพื่อทำการทดลองได้ 3 ครั้ง ในเวลาเดียวกัน ด้านล่างของชุดปฏิบัติการมีการติดตั้ง magnetic stirrer สำหรับกวนสารละลาย ภายในชุดปฏิบัติการสามารถเลือกติดตั้งหลอดอัลตราไวโอเล็ตได้ 6 ตำแหน่ง ดังภาพที่ 1 เนื่องจากขณะการทำงาน

ทดลองอาจเกิดความร้อนเกิดขึ้น ภายในจึงติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิและพัดลมระบายความร้อน ในขณะที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 23-25 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิภายในชุดปฏิบัติการทดลองนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าเล็กน้อยหรือประมาณ 27-29 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับจำนวนและขนาดของหลอดยูวีที่ใช้ อุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยแผงวงจรไฟฟ้าซึ่งติดตั้งแยกออกจากชุดปฏิบัติการ



ภาพที่ 4 มุมมองโดยรวมของชุดถังปฏิกริยา UV



ภาพที่ 5 มุมมองด้านบนของชุดถังปฏิกิริยา UV

1.3 การเตรียมสารเคมี

สารเคมีหลักซึ่งถือเป็นสารตั้งต้นที่เลือกใช้ในโครงการนี้มีดังต่อไปนี้

1.3.1 สารเคมีหลักที่ใช้ในโครงการนี้คือ สารฮอร์โมนเพศ สิบเจ็ดเบตาเอสตราไดออล (17 β -Estradiol หรือ E2) ซึ่งถือว่าเป็นตัวแทนของสารฮอร์โมนเพศทั้งหมดที่มี เช่น เอสโตรน (Estrone หรือ E1) และ เอสโตรออล (Estriol หรือ E3) เนื่องจากถูกตรวจพบในสิ่งแวดล้อมในปริมาณมากกว่าสารฮอร์โมนเพศชนิดอื่นๆ โดยจะเตรียมที่ความเข้มข้น Stock เท่ากับ 1,000 mg L⁻¹ ทำการละลายสาร E2 ใน acetonitrile โดยใช้ magnetic stirrer ทำการกวนสารละลายให้เข้ากันเป็นเวลา 15 นาที เพื่อใช้สำหรับเตรียมสารละลาย E2 เริ่มต้นในแต่ละการทดลอง

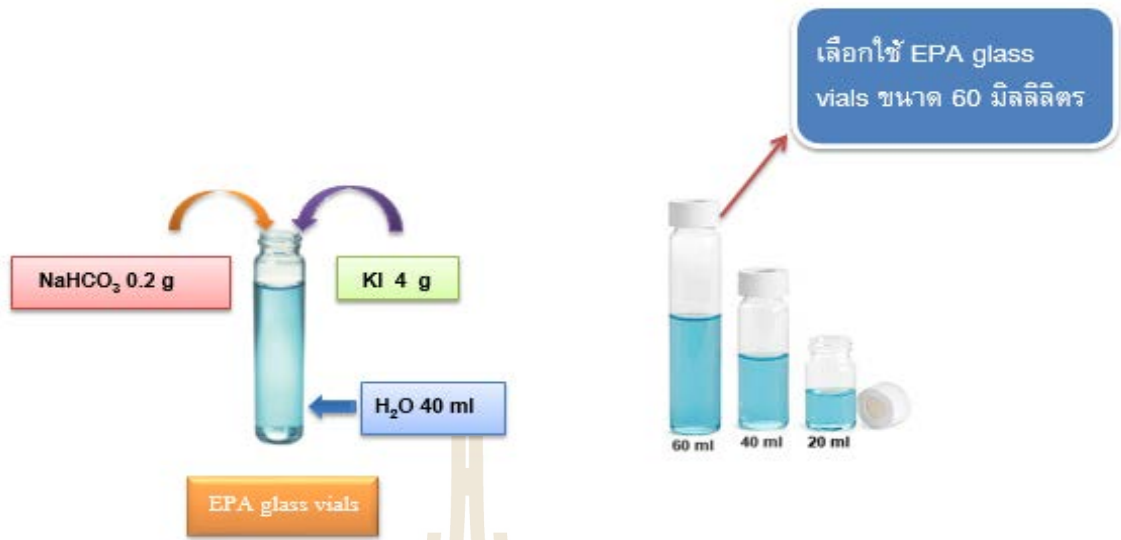
1.3.2 สารออกซิแดนท์ที่เลือกใช้คือ Sodium Persulfate ซึ่งสามารถแตกตัวได้เป็น Persulfate anion ($S_2O_8^{2-}$) และเมื่อทำปฏิกิริยาร่วมกับตัวกระตุ้น จะได้สารออกซิแดนท์ที่มีอำนาจสูงกว่าเดิมคือ Persulfate radical ($SO_4^{\cdot-}$) โดยจะเตรียมสารละลาย stock ที่ความเข้มข้นเท่ากับ $30,000 \text{ mg L}^{-1}$ โดยทำการละลาย sodium persulfate ใน DI water โดยกวนสารละลายโดยใช้ magnetic stirrer เป็นเวลา 15 นาที เพื่อใช้สำหรับเป็นสารออกซิแดนท์ในการทำการทดลอง

1.3.3 สารหยุดปฏิกิริยานั้นเลือกใช้ Sodium thiosulfate โดยจะเตรียมความเข้มข้นของสารละลาย stock เท่ากับ $30,000 \text{ mg L}^{-1}$ ทำการละลาย sodium thiosulfate ใน DI water โดยใช้ magnetic stirrer ทำการกวนสารละลายเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการเจือจางด้วยน้ำ DI ให้มีความเข้มข้น $2,000 \text{ mg L}^{-1}$ เพื่อใช้สำหรับเป็นหยุดปฏิกิริยาในการทำการทดลอง

1.3.4 สารเคมี และชิ้นประกอบในการผลิต Controlled-release activated persulfate (เทียนPersulfate) นั้นจะเป็นสารชนิดเดียวกันกับการทำเทียนไข ซึ่งผู้วิจัยจะประยุกต์อัตราส่วน Controlled-release persulfate candle มาจากงานของ Kambhu et al. (2012) ซึ่งเป็นงานที่ผู้วิจัยเป็นผู้ร่วมศึกษาในโครงการนั้นด้วย

1.4 การตรวจวัด ติดตามความเข้มข้นของสารเคมี

1.4.1 การวัดสีของเปอร์ซัลเฟตนั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนสีของสารละลายก่อนเนื่องจากโซเดียมเปอร์ซัลเฟตนั้นมีสีใส ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวิธี Colorimetric method ทำได้โดยการเตรียมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ประมาณ 0.2 กรัมและโพแทสเซียมไอโอดไรด์ (KI) 4 กรัม ละลายในน้ำตัวอย่าง 40 มิลลิลิตร ในขวด EPA ขนาด 60 มิลลิลิตรและตั้งทิ้งไว้ 15 นาที นำไปวัดสีโดยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรตั้งสรุปในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงวิธีหาค่าความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ด้วยวิธี Colorimetric Method

1.4.2 การทำกราฟมาตรฐาน สามารถดำเนินการได้ตามชนิดของสารเคมีที่ต้องการติดตาม และจะต้องเตรียมสารใหม่ทุกครั้ง และทุกๆ วันเมื่อต้องการตรวจวัดตัวอย่างการวัดสารมาตรฐานนั้นจะใช้หลักการของ External calibration curve ซึ่งจะแสดงการทำกราฟมาตรฐานสำหรับสารเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียว ดังภาพที่ 7 การเตรียมสารละลายเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานของ Persulfate จะทำการเตรียมสารละลาย Persulfate ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม ต่อลิตร จากนั้นทำการเจือจางสารละลาย Persulfate ที่ความเข้มข้น 0 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัม ต่อลิตร ตามลำดับ ทำการวัดค่าความเข้มข้นของ Persulfate ด้วยวิธี Colorimetric method โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร และจัดทำกราฟมาตรฐานโดยให้ค่าการดูดกลืนแสงแทนแกน X และความเข้มข้นเป็นแกน Y และคำนวณหาค่าสมการเส้นตรง $Y = mc + c$ กับค่า R^2

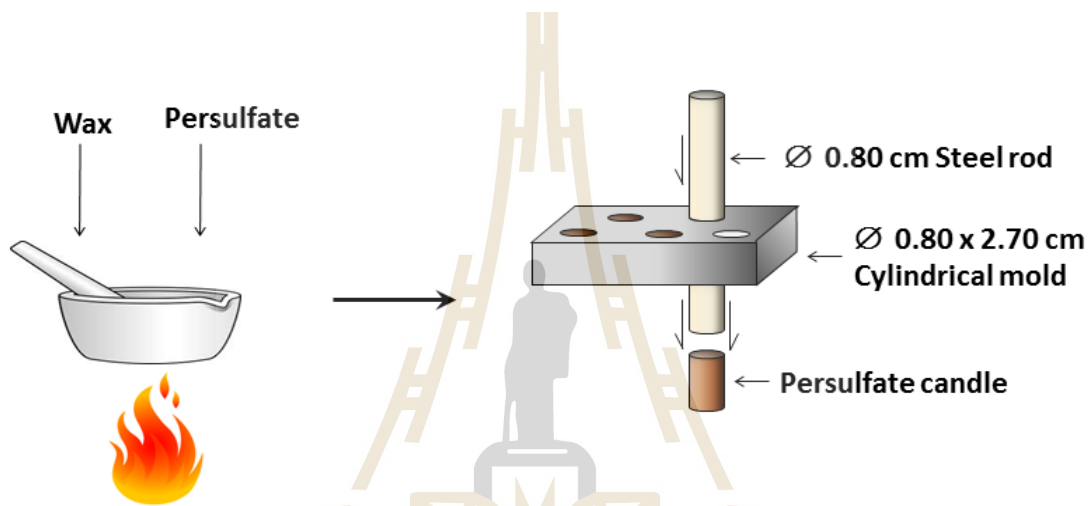


ภาพที่ 7 แสดงการทำ Standard Curve ของเปอร์ซิลเฟต

1.4.3 การตรวจวิเคราะห์สารฮอร์โมนเพศ E2 ทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ HPLC ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์สารที่อยู่ในรูปของเหลวและเหมาะสมสำหรับสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ระเหย หรือกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ปานกลาง สำหรับรายละเอียดการตั้งค่าการวิเคราะห์ HPLC นั้นผู้วิจัยจะปฏิบัติตามวิธีของ Sakulthaew and Chokejaroenrat (2016) โดยมีรายละเอียดที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ดังนี้ ตัวตรวจวัดที่ใช้คือ UV Detector โดยวัดที่ความยาวคลื่น 200 นาโนเมตร คอลัมน์ที่ใช้ในการแยกสารเป็นคอลัมน์ Phenomenex ชนิด kinetex 5 μ m C₁₈ 100A° (250×4.6 มิลลิเมตร บรรจุอนุภาคขนาด 5 ไมครอน) โดยใช้สารละลาย acetonitrile และน้ำ ในอัตราส่วน 45:55 ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาทีตลอดการวิเคราะห์สาร (Isocratic elution) และใช้สารตัวอย่าง 20 ไมโครลิตร ในการฉีดสารตัวอย่างแต่ละครั้ง ภายหลังจากทดลองเบื้องต้นพบว่า สาร E2 มี Retention time ที่ 7.4 นาที และในการวิเคราะห์สารตัวอย่างหนึ่งตัวอย่างใช้เวลา 8 นาที

2. การเตรียมเทียนควบคุมการปล่อยสารเปอร์ซัลเฟต

หลักการผลิต Controlled-release persulfate นั้นใช้หลักการทำเทียนซึ่งประยุกต์มาจากการงานของ Kambhu et al. (2012) อัตราส่วนของ Persulfate candle ที่ใช้นั้นจะมีค่าตั้งแต่ 1: 1.75 ถึง 1: 3.50 (Paraffin: Sodium persulfate) โดยทั้งสองอัตราส่วนนั้นมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kambhu et al. (2012) โดยจะชั่งน้ำหนักสุดท้ายของ Persulfate candle เป็นแท่งละ 5 g ดังแสดงในภาพที่ 8

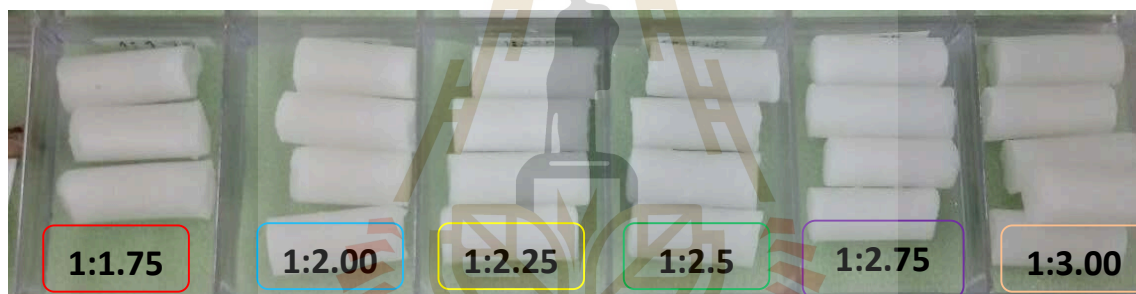


ภาพที่ 8 ชุดทดลองการเตรียม Controlled-release activated persulfate (Persulfate candle)

โดยมีวิธีการทำเทียนโดยละเอียดดังนี้

ขั้นตอนของการจัดทำ Persulfate candle ใช้หลอดพลาสติกโดยการจัดให้มีความยาวแท่งละ 3 เซนติเมตร และหุ้มด้านหนึ่งด้วยอะลูมิเนียมฟรอยด์ อัตราส่วนของการจัดทำเทียนจะใช้ขี้ผึ้งและโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ตามอัตราส่วนต่าง ๆ ดังนี้ คือ 1:1.75 1:2.00 1:2.25 1:2.50 1.2.75 และ 1:3.00 (ขี้ผึ้งต่อโซเดียมเปอร์ซัลเฟต) วิธีการคือ ทำการหลอมขี้ผึ้งในถ้วยกระเบื้องโดยใช้อุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส จนละลายเป็นน้ำเหลวมีลักษณะใส และเติม Persulfate ลงไป แล้วคนให้เป็นเนื้อเดียวกัน

จากนั้นเทลงไปในแบบหล่อ และรอให้เทียนแข็งตัวโดยทิ้งไว้ 15 – 30 นาที การควบคุม Persulfate Candle จะทำการควบคุมที่ 5 กรัม เท่า ๆ กัน โดยการชั่ง ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงการหล่อเทียนเปอร์ซัลเฟต และตัวอย่างเทียนเปอร์ซัลเฟตที่ทำเสร็จแล้วในแต่ละ

อัตราส่วน

3. การทดลองแบบ Batch Experiment

3.1 การทดลองหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดย Persulfate anion ที่มีความเข้มข้นที่ต่าง
กัน

สารละลายของ E2 ในน้ำจะถูกบรรจุลงในขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยที่สาร E2 นี้จะถูกบำบัดด้วยโดย Persulfate anion ที่มีความเข้มข้นที่ต่างกันในช่วงความเข้มข้น 0, 0.05, 0.1, 0.2 , และ 0.5 mM โดยจะทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, และ 30 นาที โดยจะทำ 3 ซ้ำ (90 ตัวอย่าง) ตัวอย่างที่ได้จะถูกเติมสาร quenching agent ก่อนเพื่อหยุดปฏิกิริยาและกำจัด persulfate ที่เหลือตกค้างในสารละลาย และจากนั้นสารละลายจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC เพื่อหาปริมาณสาร E2 ที่เหลืออยู่ในสารละลาย และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณอัตราการสลายตัวของสาร เทียบกับเวลา (จลนศาสตร์) และนำมาวาดกราฟด้วยโปรแกรม Sigma plot

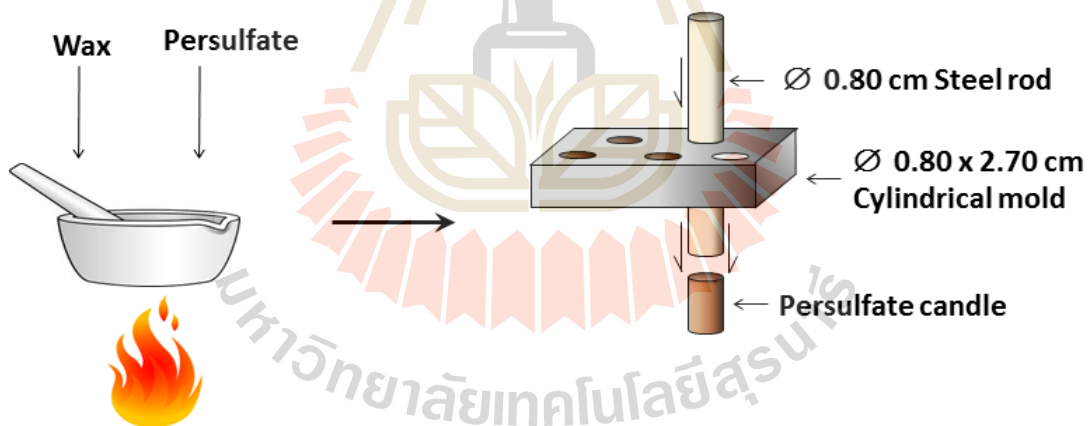
3.2 การทดลองหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดย AOP จากปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างพลังงานแสงยู
วีและ Persulfate anion

สารละลายของ E2 ในน้ำจะถูกบรรจุลงใน quartz cell ซึ่งวางอยู่ในถังปฏิกิริยา UV โดยที่สาร E2 นี้จะถูกบำบัดด้วยลำแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm และมีการเติม Persulfate anion ที่มีความเข้มข้นที่ต่างกันในช่วงความเข้มข้น 0, 0.05, 0.1, 0.2 , และ 0.5 mM โดยจะทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 10, 20, 30, 60, และ 90 นาที โดยจะทำ 3 ซ้ำ (90 ตัวอย่าง) ซึ่งตัวอย่างที่ได้จะถูกเติมสาร quenching agent ก่อนเพื่อหยุดปฏิกิริยาและกำจัด persulfate ที่เหลือตกค้างในสารละลาย และจากนั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC เพื่อหาปริมาณสาร E2 ที่เหลืออยู่ในสารละลาย และ

นำข้อมูลที่ได้มาทั้งหมดคำนวณอัตราการสลายตัวของสารเทียบกับเวลา (จลนศาสตร์) และนำมาวาดกราฟด้วยโปรแกรม Sigma plot

3.3 การหาคุณสมบัติที่เหมาะสมของ Slow release persulfate candle

ทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิต slow release persulfate candle โดยปรับอัตราส่วนผสมระหว่าง ไช (wax) และ persulfate จากนั้นนำ slow release persulfate candle ใส่ลงในน้ำที่มีปริมาตร 250 มิลลิลิตร และทำการเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อวัดปริมาณ persulfate anion ที่ถูกปลดปล่อยออกมาในน้ำโดยใช้เทคนิค Colorimetry เป็นเวลา 0, 30, 60, 90, และ 120 นาที โดยทำ 3 ซ้ำ (90 ตัวอย่าง) การผลิต slow release persulfate candle แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แสดงการผลิต slow release persulfate candle

3.4 การทดลองหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดยนำ Slow release persulfate candle มาใช้ รวมกันกับ UV

สารละลายของ E2 ในน้ำจะถูกบรรจุลงใน quartz cell ซึ่งวางอยู่ในถังปฏิกิริยา UV โดยที่สาร E2 นี้จะถูกบำบัดด้วยลำแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm และมีการใส่ slow release persulfate candle ที่มีอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 2.3 ลงไปใน quartz cell ด้วย โดยจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 0, 10, 20, 30, 60, และ 90 นาที โดยจะทำ 4 ซ้ำ (24 ตัวอย่าง) ตัวอย่างที่ได้จะถูกเติมสาร quenching agent ก่อนเพื่อหยุดปฏิกิริยาและกำจัด persulfate ที่เหลือตกค้างในสารละลาย และจากนั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC เพื่อหาปริมาณสาร E2 ที่เหลืออยู่ในสารละลายและนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณอัตราการสลายตัวของสารเทียบกับเวลา (จลนศาสตร์) และนำมาวาดกราฟด้วยโปรแกรม Sigma plot

3.5 การทดลองหาผลกระทบจากค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาร E2 โดย UV/Persulfate

สารละลายของ E2 ในน้ำจะถูกบรรจุลงใน quartz cell ซึ่งวางอยู่ในถังปฏิกิริยา UV โดยที่สาร E2 นี้จะถูกบำบัดด้วยลำแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm และมีการเติม Persulfate anion ที่มีความเข้มข้น persulfate anion ที่เหมาะสมตามการทดลองที่ 2.2 จากนั้นจึงทำการศึกษาการสลายตัวของ E2 ในน้ำจากผลกระทบของ pH ที่แตกต่างกัน โดย pH ที่จะทำการศึกษาจะเป็นช่วง 3, 5, 7, 9, และ 11 โดยทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 10, 20, 30, 60, และ 90 นาที โดยจะทำ 3 ซ้ำ (90 ตัวอย่าง) ตัวอย่างที่ได้จะถูกเติมสาร quenching agent ก่อนเพื่อหยุดปฏิกิริยาและกำจัด persulfate ที่เหลือตกค้างในสารละลาย และจากนั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC เพื่อหาปริมาณสาร E2 ที่

เหลืออยู่ในสารละลาย และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณอัตราการสลายตัวของสารเทียบกับเวลา (จลนศาสตร์) และนำมาวาดกราฟด้วยโปรแกรม Sigma plot

3.6 การทดสอบการสลายตัวของ E2 จากน้ำตัวอย่างตามธรรมชาติด้วยวิธีการบำบัดแบบ UV/Persulfate

การศึกษาการทดลองนี้จำเป็นต้องทดสอบค่าทางเคมีของน้ำตัวอย่างที่นำมาศึกษา โดยจะต้องทำการวิเคราะห์ค่าต่างๆ เช่น ปริมาณแอมโมเนีย, ปริมาณไนโตรเจนรวม, ค่าการนำไฟฟ้า, ค่า pH, ค่าความขุ่น, และค่า total organic carbon เป็นต้น ก่อนการใช้งานนั้นเนื่องจากต้องนำน้ำตัวอย่างมาตรวจก่อนว่ามี E2 จริงในธรรมชาติเท่าไรจึงต้องนำน้ำตัวอย่างไปตรวจด้วยเครื่อง HPLC และอาจจำเป็นต้องใช้ Solid phase extraction ใช้ร่วมกับเครื่อง Vacuum manifold จากนั้นนำน้ำตัวอย่างที่มีการเติมสาร E2 มาบำบัดโดยใช้ระบบ UV ร่วมกับ slow release persulfate candle โดยใช้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 2.5 จากนั้นน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดจะถูกนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วย HPLC เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยระบบ UV/Persulfate

สถานที่ทำการทดลอง

- 1) อาคารเครื่องมือ 5 (F5) และอาคารเครื่องมือ 10 (F10) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 2) อาคารคณะเทคนิคการสัตวแพทย์ ภาควิชาเทคนิคการสัตวแพทย์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 3) อาคารคณะสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

1. การเข้าพื้นที่เพื่อทำการเก็บน้ำเสียตัวอย่างจากฟาร์มเลี้ยงโคนม และการตรวจวิเคราะห์

คุณลักษณะของน้ำ

เนื่องจากการบำบัดสารฮอโรโมนเพศจริงนั้น ในน้ำเสียที่มาจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ไม่ได้มีแต่เพียงสารฮอโรโมนเพศเพียงอย่างเดียวที่สามารถถูกออกซิไดซ์โดยสารเปอร์ซัลเฟตได้ หากแต่ผู้วิจัยสนใจในการทดสอบประสิทธิภาพของเทียนเปอร์ซัลเฟตในการบำบัดสาร E2 ในตัวอย่างน้ำที่มาจากธรรมชาตินั้นว่ามีประสิทธิภาพสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงหรือไม่ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากฟาร์มวัวแห่งหนึ่งในจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นน้ำจาก Landfill จากฟาร์มวัวซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าต่างๆ ในตัวอย่างน้ำแสดงในตารางที่ 2

โดยที่ฟาร์มวัวแห่งนี้มีวัวนมถึงประมาณ 70 ตัว โดยมีการใช้น้ำใต้ดินในการดำเนินการเลี้ยงวัวนม ซึ่งในแต่ละวันน้ำที่ใช้ทำการล้างคอกวัวซึ่งมีปัสสาวะและมูลวัวปะปนในน้ำที่ไม่ได้รับการบำบัดใดๆเลยนั้นจะถูกปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในภาคเกษตรกรรมบริเวณใกล้เคียงต่อไป ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากฟาร์มแห่งนี้จากแหล่งน้ำตัวอย่างดังกล่าวข้างต้น อีกทั้งยังได้มีการวัดค่า pH ค่าอุณหภูมิและค่าลักษณะทางกายภาพต่างๆของน้ำโดยใช้เครื่องตรวจวัดคุณภาพน้ำตัวอย่างชนิดหลายพารามิเตอร์ (YSI 556) ดังแสดงในตารางที่ 2 และผู้วิจัยจะทำการทดลองการบำบัดสาร E2 ในตัวอย่างน้ำในการทดลองการหาประสิทธิภาพการบำบัดสาร E2 ด้วย UV/Persulfate ต่อไป

ตารางที่ 2 การตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำที่มาจากฟาร์มวัวแห่งหนึ่งในจังหวัดนครราชสีมา

Items	Unit	Value*
		Landfill
Chemical parameters		
pH*	-	6.85
Temperature*	°C	31.4
Conductivity	µS/cm	1,140
Ammonia	mg-NH ₃ -N/L	0.02
Nitrite nitrogen	mg/L	0.04
Nitrate nitrogen	mg/L	0.15
Total Kjeldahl nitrogen	mg/L	7.5
Total phosphorous	mg-P/L	5.8
Total nitrogen	mg-N/L	7.69
Total organic carbon	g/100g	10.06
Total suspended solids	mg/L	10,340
Biological oxidant demand	mg-BOD/L	850
Chemical oxidant demand	mg-COD/L	1,425



ภาพที่ 11 แสดงการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้น ณ จุดเก็บ (วางระบายน้ำ)



ภาพที่ 12 แสดงการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้น ณ จุดเก็บ (วางระบายน้ำ)



ภาพที่ 13 แสดงการสอบถามรายละเอียดเกี่ยวกับฟาร์มโคนม



ภาพที่ 14 แสดงการสำรวจจุดเก็บตัวอย่างที่ลำคลอง



ภาพที่ 15 แสดงพื้นที่โดยรอบของฟาร์มโคนม



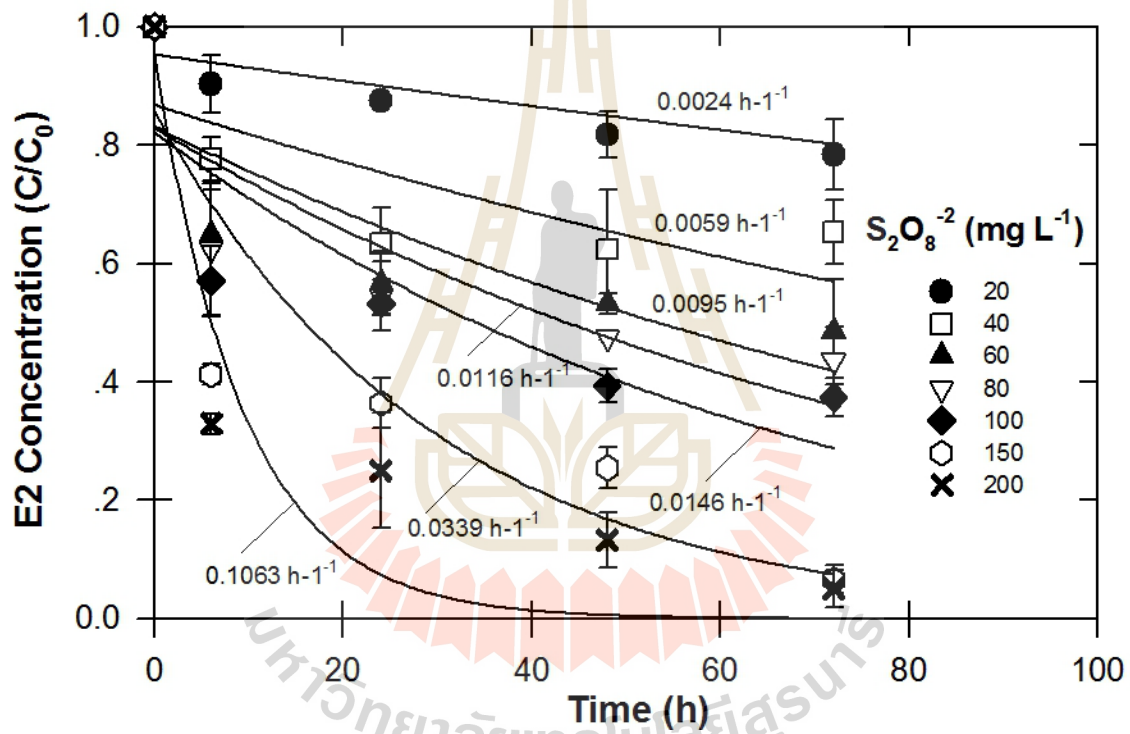
ภาพที่ 16 แสดงแผนผังของฟาร์มโคนม

2. การหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดย Persulfate ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการสลายตัวของ E2 โดย Persulfate ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน โดยได้ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาตรรวมของสารละลายในการทดลองเท่ากับ 100 มิลลิลิตร โดยมีสารละลายเริ่มต้นเป็นสารละลายที่เตรียมจาก stock ของสารละลาย E2 ทำการเก็บตัวอย่างของความเข้มข้นของ E2 เริ่มต้น (C_0) จากนั้นเริ่มต้นการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัด (t_0) โดยใช้สารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟต จาก stock ของสารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟตให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 20, 40, 60, 80, 100, 150 และ 200 mg L^{-1} ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย E2 เท่ากับ 3 mg L^{-1} ทำการทดลองภายใต้การเขย่าสารละลายให้เข้ากันโดยเครื่อง Orbital shaker (130 รอบต่อนาที) เก็บตัวอย่างปริมาณ 1 มิลลิลิตร ตามเวลาที่กำหนด (เก็บตัวอย่างหลังจากเริ่มทดสอบประสิทธิภาพการบำบัด 0.5, 1, 2, 4, 6, 10, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำของแต่ละความเข้มข้นที่ให้รายละเอียดไว้ข้างต้น) ทำการปิเปตสารละลายใส่ใน centrifuge tube ขนาด 1.5 มิลลิลิตร ที่มีการเตรียมสารเพื่อหยุดปฏิกิริยา (โซเดียมไทโอซัลเฟต) ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่ไว้ในหลอด หลังจากนั้นจึงนำหลอดไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อกำจัดตะกอนที่อาจเกิดขึ้น จากนั้นจึงถ่ายเทสารละลายลงในขวด HPLC เพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

การบำบัดสาร E2 ด้วยการใส่สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียวที่ความเข้มข้นเท่ากับ 20 40 60 80 100 150 และ 200 mg L^{-1} ในเวลา 72 ชั่วโมง สามารถบำบัดสาร E2 ได้ 17% 34% 52% 56% 62% 89% และ 95% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 17 โดยอัตราการลดลงของสาร E2 เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ดังนั้นความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์

ซัลเฟตมีผลต่อการลดลงอย่างมาก สังเกตได้จากการใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 20 และ 200 mg L⁻¹ เมื่อเวลาผ่านไป 72 ชั่วโมง การใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 200 mg L⁻¹ มีประสิทธิภาพการบำบัดสาร E2 มากกว่าถึง 78% เมื่อเปรียบเทียบกับใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 20 mg L⁻¹

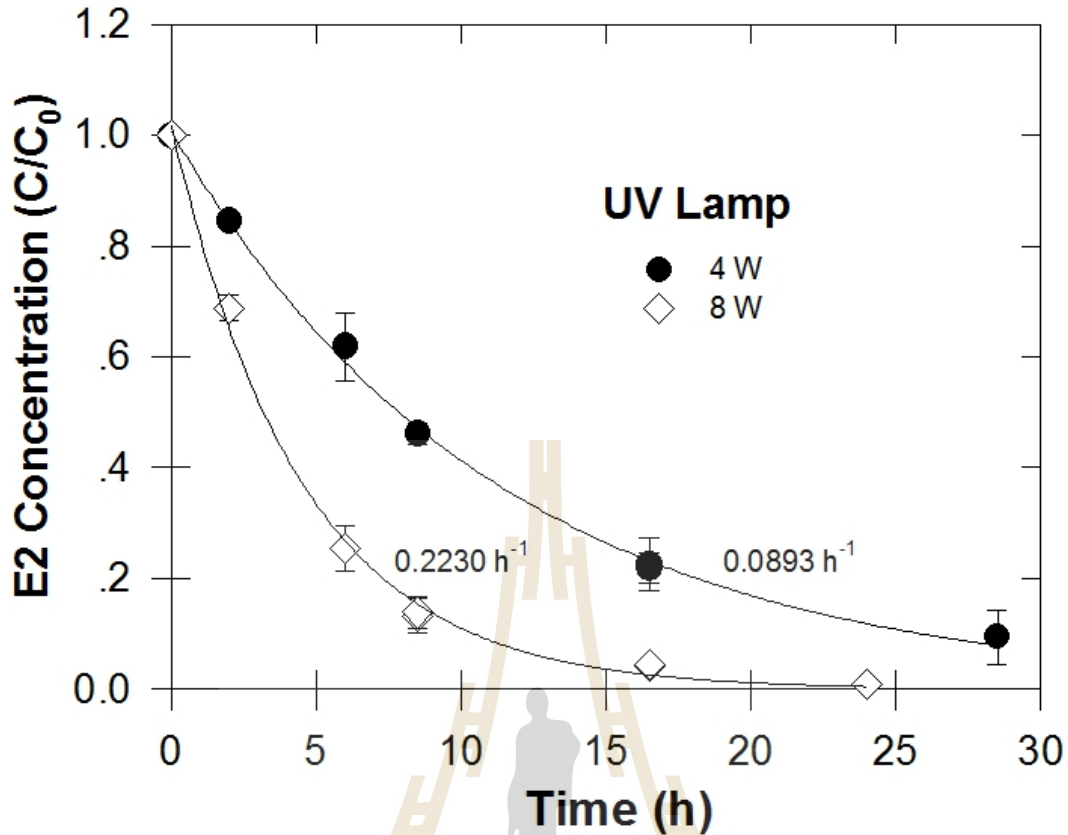


ภาพที่ 17 การบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียว

3. การหาอัตราการสลายตัวของ E2 จากปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างพลังงานแสงยูวีและ Persulfate

ในส่วนของการทดลองนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงศึกษาปฏิกิริยาการลดลงของ สารฮอร์โมนเพศ E2 จากพลังงานแสงยูวีเพียงอย่างเดียวและช่วงศึกษาปฏิกิริยาการลดลงของสารฮอร์โมนเพศ E2 จากพลังงานแสงยูวีที่นำไปกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟต ทั้งสองการทดลองได้ทำการทดลอง ในภาชนะขนาด 1,000 มิลลิลิตร เป็นวัสดุทำมาจากควอทซ์ ปริมาตรรวมของสารละลายในการทดลอง เท่ากับ 100 มิลลิลิตร โดยมีสารละลายเริ่มต้นเป็นสารละลายที่เตรียมจาก stock ของสารละลาย E2 ทำ การเก็บตัวอย่างของความเข้มข้นของ E2 เริ่มต้น (C_0) จากนั้นเริ่มต้นการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัด (t_0) โดยการใส่สารละลายโซเดียมเปอร์ซัลเฟตหรือการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ขนาดของหลอดกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตมี 2 ขนาด ได้แก่ 4W และ 8W กำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย E2 เท่ากับ 3 mg L^{-1} เก็บตัวอย่างหลังจากเริ่มฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 0, 2, 6, 8.5, 16.5 และ 24 ชั่วโมง และมี การเก็บตัวอย่างก่อนและหลังการทำการพักการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ในภาชนะจะมี magnetic stirrer เพื่อกวนสารละลายให้เข้ากันตลอดการทดลอง และเปิดพัดลมเพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดขึ้น เก็บ ตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ตามเวลาที่กำหนด ใส่ใน centrifuge tube ขนาด 1.5 มิลลิลิตร ที่มีการเตรียมสารเพื่อหยุดปฏิกิริยา (โซเดียมไทโอซัลเฟตที่ความเข้มข้น $2,000 \text{ mg L}^{-1}$) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่รอไว้ในหลอด (สำหรับการบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต) หลังจากนั้น จึงนำหลอดไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 14,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อกำจัดตะกอนที่อาจ เกิดขึ้น จากนั้นจึงถ่ายเทสารละลายใส่ลงในขวด HPLC เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป ผลการทดลองดังภาพ

ที่ 18



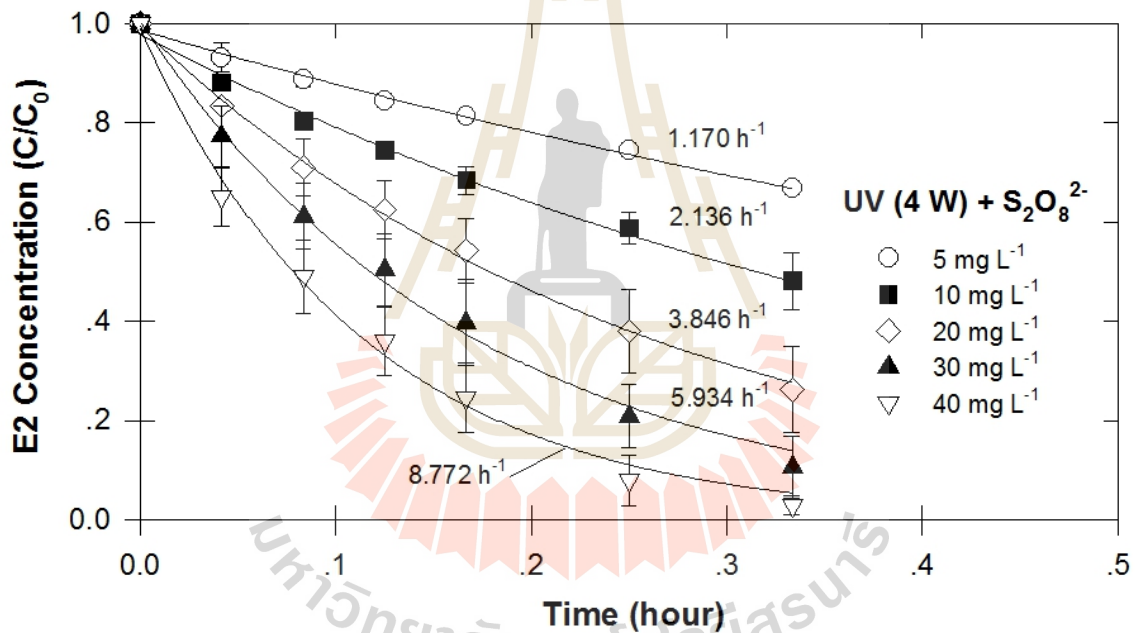
ภาพที่ 18 การบำบัดด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเพียงอย่างเดียว

ภาพที่ 18 แสดงการบำบัดสาร E2 ด้วยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพียงอย่างเดียว การฉายแสงโดยใช้หลอดอัลตราไวโอเล็ตขนาด 8W สามารถบำบัดสาร E2 ได้หมดภายในเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งการใช้หลอดอัลตราไวโอเล็ตขนาด 4W เป็นเวลา 28.5 ชั่วโมง สามารถบำบัดสาร E2 ได้ 90% โดยการลดลงของสาร E2 จะขึ้นกับขนาดวัตต์ของหลอดอัลตราไวโอเล็ตที่สูงขึ้น สังเกตได้จากที่เวลา 6 ชั่วโมง ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 40% ไปเป็น 80% ของหลอดขนาด 4W และ 8W ตามลำดับ

ในการศึกษาของ Liu and Liu. (2004) ใช้หลอดอัลตราไวโอเล็ตขนาด 30W (disinfection lamp, Shanghai Lamp Co. Ltd, China, ความยาวคลื่น 253.7 nm) สามารถบำบัดสาร E2 ได้ 60% ภายใน 1 ชั่วโมง ซึ่งมีประสิทธิภาพเร็วกว่าผลที่ได้รายงานไว้เนื่องจากในการศึกษาทดลองครั้งนี้ใช้จำนวนวัตต์ที่มากขึ้น ในขณะที่ Coleman et al. (2000) ใช้หลอดไฟขนาด 150W (Xenon lamp ความยาว

คลื่นประมาณ 300 nm) บำบัดสาร E2 ได้ 11% ภายในเวลา 40 นาทีและ 44% ใน 3.5 ชั่วโมง ซึ่งมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองของหลอดขนาด 8W

สำหรับการทดลองที่มีการกระตุ้นจะใช้วิธีเดียวกัน โดยได้เลือกใช้หลอดอัลตราไวโอเลตขนาด 4W ร่วมกับใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต 5, 10, 20, 30 และ 40 mg L⁻¹ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย E2 เท่ากับ 3 mg L⁻¹ และเก็บตัวอย่างหลังจากเริ่มทดสอบประสิทธิภาพการบำบัด 2.5, 5, 7.5, 10, 15 และ 20 นาที โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำของแต่ละความเข้มข้นที่ออกแบบ ผลการทดลองดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 การบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต

จากภาพที่ 19 แสดงการบำบัดสาร E2 โดยการกระตุ้นสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตด้วยแสงอัลตราไวโอเลต จากการทดลองพบว่าในเวลา 20 นาทีเมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้นเท่ากับ 5 10 20 30 และ 40 mg L⁻¹ พบว่าสามารถบำบัดสาร E2 ได้ 33%

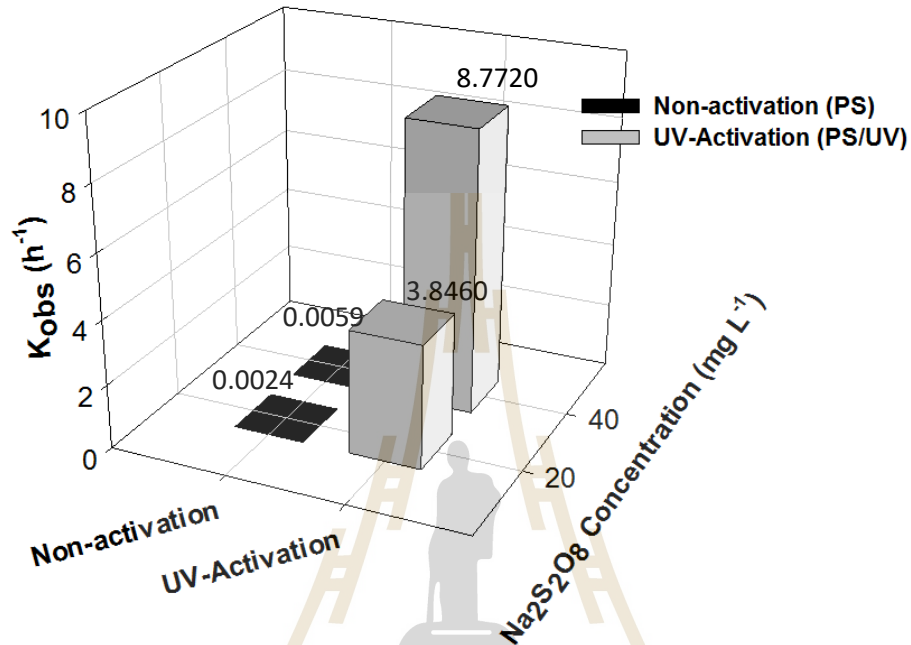
51% 73% 90% และ 97% ตามลำดับ ประสิทธิภาพของการบำบัดสาร E2 ด้วยวิธีการกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าอย่างเห็นได้ชัด สังเกตได้จากการฉายแสงร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 40 mg L^{-1} สามารถลดปริมาณสาร E2 ได้ถึง 70% ภายในเวลาเพียงแค่ 7.5 นาที โดยจะแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดกับการบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียวซึ่งต้องใช้ความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตมากถึง 200 mg L^{-1} และใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง อีกทั้งการฉายแสงเพียงอย่างเดียวของหลอดขนาด 4W ยังต้องใช้เวลามากกว่า 10 ชั่วโมง ถึงจะสามารถลดปริมาณสาร E2 ได้ 70% การบำบัดด้วยการกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตและเวลาที่ใช้ในการบำบัดสาร E2 น้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับการทดลองการบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตอย่างเดียว และการบำบัดด้วยแสงเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลเพราะสารเปอร์ซัลเฟต ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดอนุมูลอิสระของซัลเฟต ซึ่งมีค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานที่สูง (Standard reduction potential, $E^0 = +2.60\text{V}$)

จากผลการทดลองการบำบัดสาร E2 มีความสอดคล้องกันกับการบำบัด Sulfamathazine (SMZ) Oxytetracycline (OTC) และ Bisphenol-A (BPA) (Guo et al.,2012; Olmez-Hanci et al., 2015; Liu et al., 2016) ซึ่งใช้วิธีการบำบัดเหมือนกันคือการบำบัดโดยกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยผลของการทดลองชี้ให้เห็นเหมือนกันว่าการบำบัดด้วยการกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าการบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียวและดีกว่าการบำบัดด้วยแสงเพียงอย่างเดียวอย่างเห็นได้ชัด

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่า k_{obs} จากการบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียวและการบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต พบว่า การบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต มีค่าคงที่ k_{obs} เพิ่มขึ้นจาก 0.0024 เป็น 3.8460 h^{-1} โดยคิดเป็น

1,600 เท่า สำหรับการใส่สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต 20 mg L^{-1} และ เพิ่มขึ้นจาก 0.0059 เป็น 8.7720 h^{-1}

โดยคิดเป็น 1,480 เท่า สำหรับการใส่สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต 40 mg L^{-1}



ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบค่าคงที่ k_{obs} ระหว่างการบำบัดแบบถูกกระตุ้นและไม่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

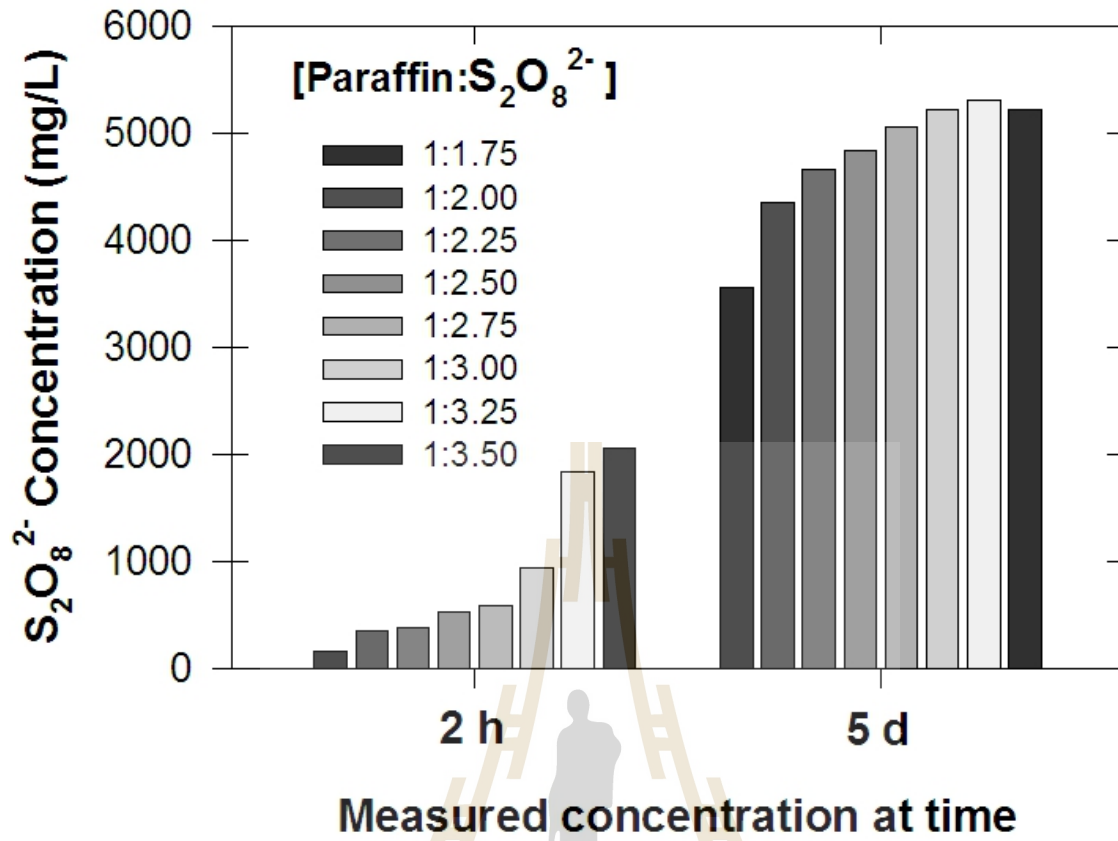
4. การหาคุณสมบัติที่เหมาะสมของ Slow release persulfate candle

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาการเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเทียนเปอร์ซัลเฟตโดยการปรับอัตราส่วนผสมระหว่าง ซีฟี่ง และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ เพื่อหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดโดยทำการศึกษาจากการตรวจติดตามการกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตในการทดลองแบบ Batch ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบอัตราการกระจายตัวเป็นระยะเวลา 120 ชั่วโมง และได้รายงานผลการทดลองแบ่งเป็นในช่วงสั้น (เช่น 0-1 ชั่วโมง) และในช่วงยาว (เช่น 24-120 ชั่วโมง) (ข้อมูลแสดงในภาพที่ 21; ภาพที่ 22) การทดลองในช่วงแรกมี

เพียงอัตราส่วนผสมสามแบบ (ซีฟี่ง :เปอร์ซัลเฟต; 1:3.00 1:3.25 และ 1:3.50) ซึ่งจากผลการทดลอง แสดงความแตกต่างในอัตราการกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟต ในการทดลองถัดมาผู้วิจัยได้ทำการปรับ อัตราส่วนของเทียนโดยเพิ่มปริมาณของเปอร์ซัลเฟตเป็นสองเท่า (ซีฟี่ง :เปอร์ซัลเฟต; 1:3.50 และ 1:1.75) พบว่าปริมาณของเปอร์ซัลเฟตที่กระจายตัวออกมา

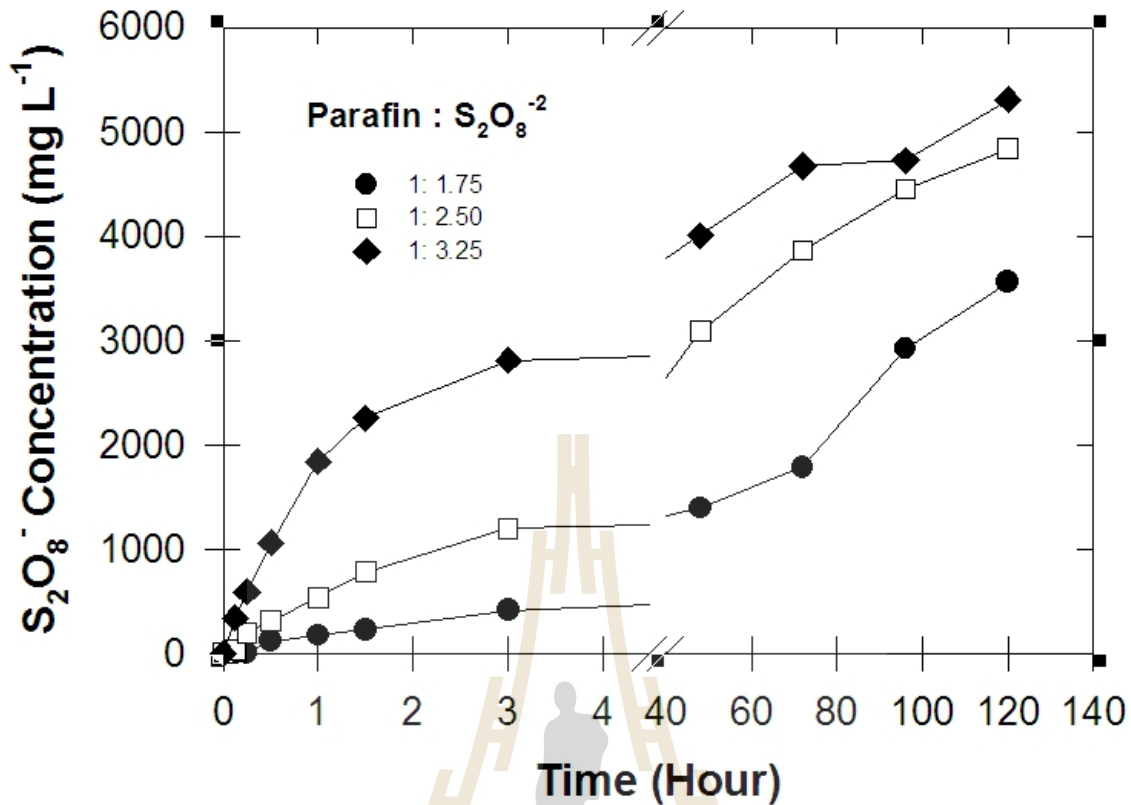
นั้นสูงกว่าถึง 10 เท่า ในการศึกษาพบว่าอัตราการกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตออกจากเทียนนั้นผลการ ทดลองคล้ายกับที่มีในรายงานอื่น (Dhananjeyan et al, 2000; Kang et al., 2004; Lee and Schwartz, 2007a, 2007b) หลังจากการกระจายตัวในช่วงแรกพบว่าเปอร์ซัลเฟตมีความเข้มข้นที่คงที่ที่ เวลาประมาณ 48 ชั่วโมง ซึ่งคล้ายกับ Liang et al. (2011a) ได้รายงานไว้ว่าการกระจายตัวของเปอร์ ซัลเฟตนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 6 วันแรก หรือประมาณ 144 ชั่วโมง ในขณะที่การกระจายตัวของ เปอร์ซัลเฟตในช่วงแรกจะแปรผันตามอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ โดยที่ทุกอัตราส่วนจะพบว่าความเข้มข้น ของเปอร์ซัลเฟตนั้นจะอยู่ในช่วง 4,000-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่เวลา 120 ชั่วโมง (ภาพที่ 21) ยกเว้นที่ อัตราส่วนที่ต่ำที่สุด (1:1.75) เท่านั้นที่การกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตไม่สูงเท่าอัตราส่วนอื่น นอกจากนี้ ได้มีรายงานอื่นๆ แสดงว่าที่ความเข้มข้นนี้เพียงพอในการกำจัดสารปนเปื้อนอินทรีย์ในสารละลายเอเค วีสได้ (Huang et al., 2005; Tsitonaki et al., 2010; Petri et al., 2011; Xu et al., 2012)

เพื่อให้การสร้างแนวบำบัดของเทียนมีความสมบูรณ์ในการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำ เทียนเปอร์ ซัลเฟตควรจะสามารถปลดปล่อยเปอร์ซัลเฟตได้อย่างต่อเนื่องและควรคงสภาพรูปร่างเดิมเมื่ออยู่ในน้ำ ถึงแม้ว่าอัตราส่วนที่สูงที่สุดของเปอร์ซัลเฟตที่ 1:3.50 สามารถที่จะปลดปล่อยเปอร์ซัลเฟตได้สูงเพียงพอ แต่ที่อัตราส่วนนี้เทียนไม่สามารถคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ดังนั้นจากภาพที่ 21 ผู้วิจัยเลือกอัตราส่วนที่ **1:3.25** เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้เทียนยังสามารถคงรูปเดิมได้และมีการปลดปล่อยปริมาณเปอร์ซัลเฟตที่สูงเพียงพอ ($2,000 \text{ mg L}^{-1}$) ดังแสดงการทดลองในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 แสดงความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่ถูกปล่อยออกมาจากเทียนเปอร์ซัลเฟตที่เวลา 2 ชั่วโมง และ 5 วัน





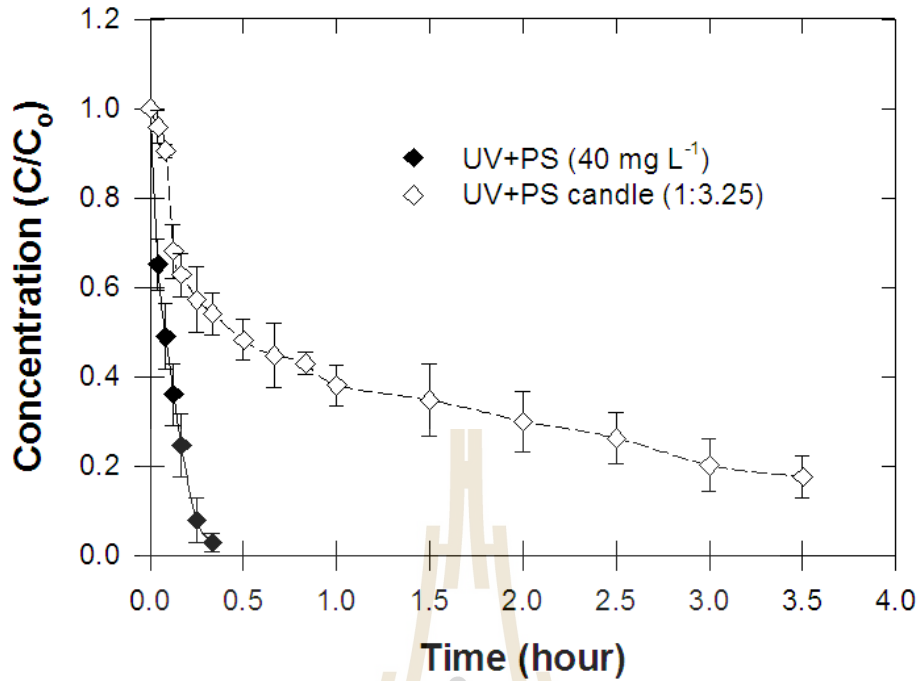
ภาพที่ 22 แสดงความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่ถูกปล่อยออกมาจากเทียนเปอร์ซัลเฟต

5. การหาอัตราการสลายตัวของ E2 โดยนำ Slow release persulfate candle มาใช้

ร่วมกับกับ UV

สารละลายของ E2 ในน้ำที่ปริมาณความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกบรรจุลงในแก้วควอตซ์ ซึ่งวางอยู่ในถังปฏิกิริยา UV โดยที่สาร E2 นี้จะถูกบำบัดด้วยลำแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm และมีการใส่ slow release persulfate candle ซึ่งทำจากเทียนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 เซนติเมตรและความยาว 0.64 เซนติเมตร โดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมจากการทดลองก่อนหน้า คือที่อัตราส่วน 1 : 3.25 ซึ่งที่อัตราส่วนนี้เทียนสามารถคงรูปเดิมได้และมีการปลดปล่อยปริมาณเปอร์ซัลเฟตที่สูงเพียงพอ (ประมาณ $2,000 mg L^{-1}$)

เมื่อเริ่มดำเนินการทดลองจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 0 10 20 30 60 และ 90 นาที ตัวอย่างที่เก็บได้จะถูกเติมสาร quenching agent โดยใช้ Sodium thiosulfate ที่ความเข้มข้น $2,000 \text{ mg L}^{-1}$ ก่อนเพื่อหยุดปฏิกิริยาและกำจัด persulfate ที่เหลือตกค้างในสารละลาย และจากนั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC เพื่อหาปริมาณสาร E2 ที่เหลืออยู่ในสารละลาย จากผลการทดลองพบว่าเปอร์ซัลเฟตถูกปลดปล่อยออกมาถึง $2,000 \text{ mg L}^{-1}$ ที่ 60 นาที (ดังแสดงในภาพที่ 21) ซึ่งเพียงพอในการบำบัดสาร E2 ในการศึกษาพบว่าการกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตออกจากเทียนนั้นผลการทดลองคล้ายกับที่มีในรายงานอื่น (Dhananjeyan et al, 2000; Kang et al., 2004; Lee and Schwartz, 2007a, 2007b) จากการทดลองนี้พบว่าในเวลา 60 นาที เปอร์ซัลเฟตถูกปลดปล่อยออกมาที่ $2,000 \text{ mg L}^{-1}$ (ภาพที่ 21) ซึ่งจากผลการทดลองแสดงถึงการปลดปล่อยความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตในปริมาณมากสามารถกำจัดสารอินทรีย์อื่นในน้ำเสียได้ จากภาพที่ 23 แสดงให้เห็นว่าผู้วิจัยทำการแสดงการกำจัดสาร E2 ในช่วง 60 นาที เมื่อทำการเปรียบเทียบการบำบัดสาร E2 ด้วยเทียนเปอร์ซัลเฟตและสารละลายเปอร์ซัลเฟตพบว่า มีอัตราการบำบัด E2 ที่ช้ากว่าเนื่องจากการปลดปล่อยเปอร์ซัลเฟตจากเทียน ดังแสดงในภาพที่ 23



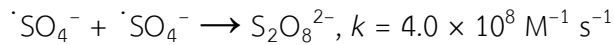
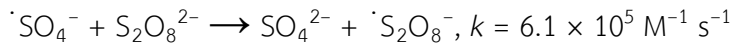
ภาพที่ 23 แสดงการกำจัดสาร E2 ในช่วง 60 นาที เมื่อทำการเปรียบเทียบการบำบัดสาร E2 ด้วยเทียน
เปอร์ซัลเฟตและสารละลายเปอร์ซัลเฟต

6. การหาผลกระทบจากจากค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาร E2 โดย UV/Persulfate

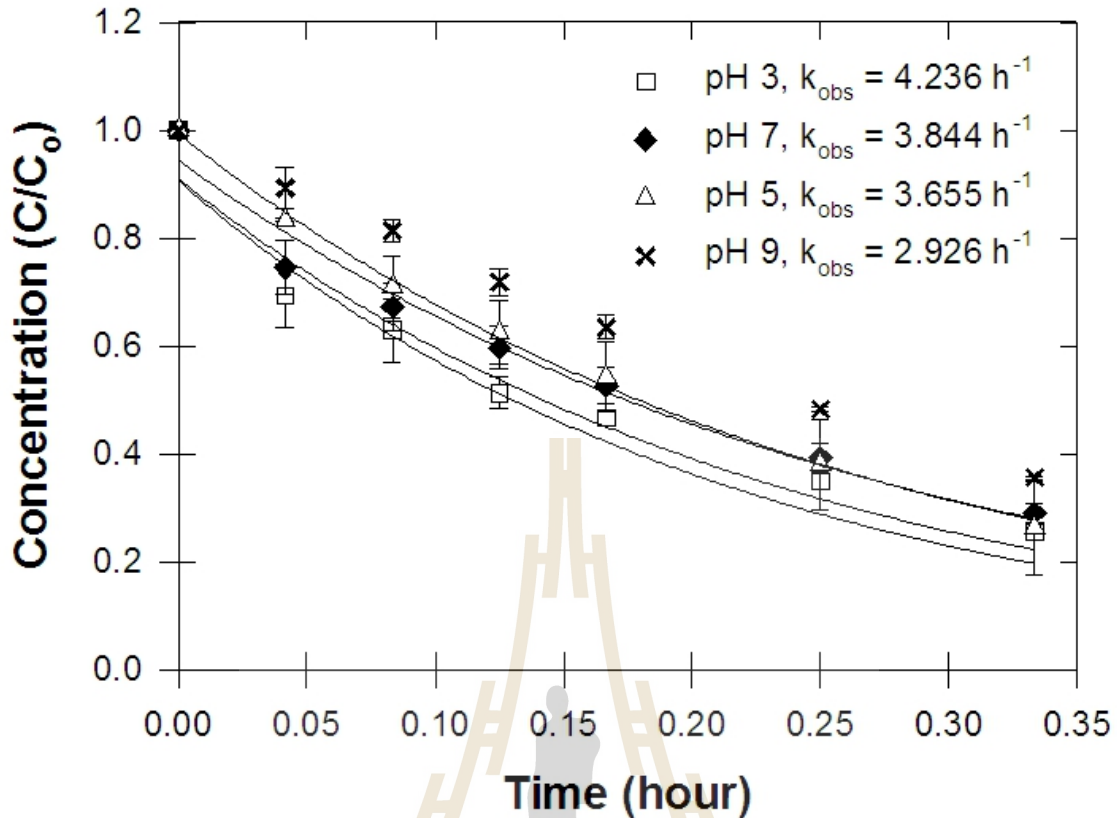
การศึกษาผลกระทบจากจากค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาร E2 โดย UV/Persulfate โดย pH ที่จะทำการศึกษาจะเป็นช่วง 3, 5, 7, 9, และ 11 นั้นพบว่าเมื่อมีการเติม Persulfate anion ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันลงไปมีผลต่อการเพิ่มการสลายตัวด้วยแสงของ E2 (photo-degradation) โดยอัตราส่วนของ E2 และ PS มีอัตราส่วนตามผลการทดลองที่ได้มาก่อนหน้า

จากภาพที่ 24 แสดงให้เห็นว่าการสลายตัวของ E2 ด้วย UV/Persulfate เมื่อทำการคำนวณแล้ว เหมาะสมกับ pseudo-first-order kinetic การเพิ่มความเข้มข้นของ persulfate anion สามารถช่วย

เพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสาร E2 ถึงแม้จะมีรายงานว่าปริมาณของ persulfate ที่มากเกินไป
ทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของซัลเฟต ($\cdot\text{SO}_4^-$) และไปยับยั้งการสลายตัวของสารที่ต้องการบำบัด แต่
อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ไม่พบการยับยั้งดังกล่าว



จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเติม persulfate anion ลงไปในระบบพบว่าสามารถช่วยเพิ่ม
ประสิทธิภาพการบำบัดสาร E2 ได้ดีกว่าการใช้แสง UV อย่างเดียว และปริมาณที่ให้ปฏิกิริยาสูงสุดคือ
อัตราส่วนของ E2 และ persulfate (1:50) ดังแสดงในผลการทดลองในภาพที่ 24 เมื่อเวลาผ่านไป 60
นาที พบว่าปริมาณสาร E2 ลดลงมากกว่า 90% และเมื่อนำมาทดสอบด้วยผลกระทบบจาก pH ที่เวลา 60
นาทีพบว่าอัตราการสลายตัวของสาร E2 ที่ pH มีความแตกต่างกันเรียงตามลำดับความเร็วของปฏิกิริยา
ดังนี้ 11>3>5>7>9 จากผลการทดลองพบว่า pH มีผลกระทบต่ออัตราการสลายตัวของ E2 เมื่อถูกบำบัดด้วย
UV/Persulfate ดังแสดงในภาพที่ 24 แสดงให้เห็นว่าที่ pH เป็นต่าง (pH = 11) นั้นจะมีการสลายตัว
ของ E2 อย่างรวดเร็วกว่าที่ pH อื่นๆ ซึ่ง Liang and Lei 2015 ได้รายงานว่าในสภาวะที่เป็นต่างนั้น
สามารถที่จะกระตุ้นเปอร์ซัลเฟตแอนไอออนให้เป็นอนุมูลอิสระของ $\cdot\text{SO}_4^-$, $\cdot\text{OH}$ and $\cdot\text{O}_2$ ซึ่งจะมีผลใน
การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสาร E2 ดังนั้นปฏิกิริยาการสลายตัวแบบ 100% ของสาร E2 จะเกิดเร็ว
มากภายใน 2 นาที (ข้อมูลไม่ได้นำมาแสดง) ดังนั้นค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้ในการบำบัด
สาร E2 ด้วย UV/Persulfate คือ pH=3



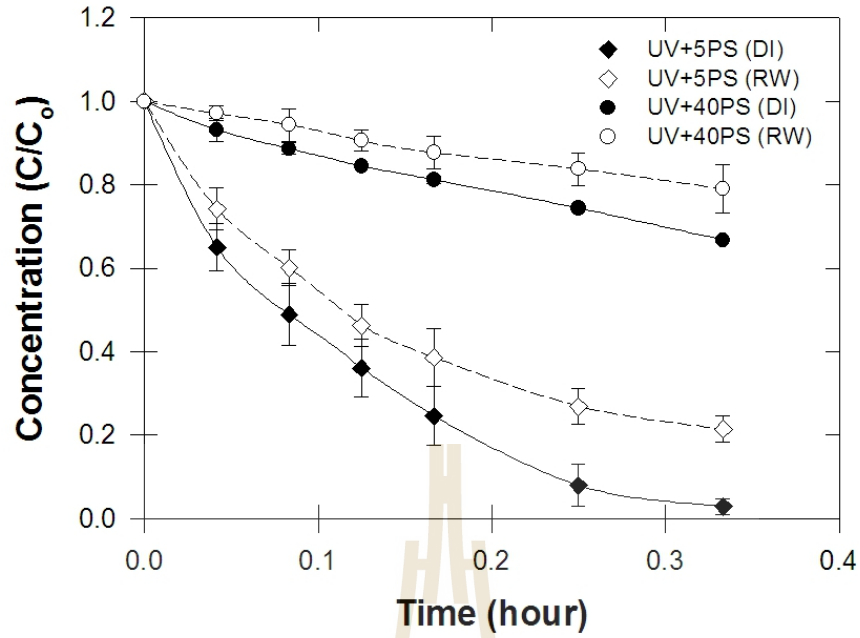
ภาพที่ 24 แสดงผลกระทบจาก pH ต่อการบำบัด E2 ด้วยสารเปอร์ซัลเฟต

7. การสลายตัวของ E2 จากน้ำตัวอย่างตามธรรมชาติด้วยวิธีการบำบัดแบบ

UV/Persulfate

เพื่อให้ได้ข้อมูลการศึกษาการสลายตัวของ E2 ด้วยวิธีการบำบัดแบบ UV/Persulfate ในการบำบัดสาร E2 ในตัวอย่างน้ำตามธรรมชาติว่ามีประสิทธิภาพสามารถนำไปใช้ได้จริงในภาคสนามหรือไม่ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากฟาร์มวัวซึ่งมีลักษณะดังนี้คือน้ำจากน้ำทิ้งฟาร์มปศุสัตว์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าต่างๆ ในตัวอย่างน้ำพบความเข้มข้นของ E2 ที่ 8.4 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นนี้มีความเข้มข้นที่ต่ำกว่าที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทดลอง (0.0084 มิลลิกรัมต่อลิตร เทียบกับ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสาร E2 ในสารละลายตัวกลาง

(matrices) ที่แตกต่างกันคือ น้ำ DI และ น้ำจากแหล่งน้ำทิ้งข้างฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตสองความเข้มข้นคือ ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยได้เปรียบเทียบผลการบำบัดดังแสดงในภาพที่ 25 พบว่า E2 ถูกบำบัดได้ 97% เมื่อมีปริมาณเปอร์ซัลเฟต 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่เมื่อเปลี่ยนน้ำ matrices เป็นน้ำเสียจริง พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณ 20% จากนั้นเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเป็นที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเท่ากับ 68% ในขณะที่เมื่อเปลี่ยนเป็นน้ำทิ้งจากฟาร์มปศุสัตว์ ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงไปเพียง 10% สาเหตุที่การบำบัดลดลงเมื่อเปลี่ยนน้ำทิ้งนั้นมาได้จาก น้ำจากน้ำทิ้งฟาร์มปศุสัตว์ มีปริมาณสารอินทรีย์ที่สูงและปริมาณสารอนินทรีย์ซึ่งสามารถที่จะแข่งขันกับ E2 ในการถูกบำบัดด้วย UV/Persulfate ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสาร E2 ในตัวอย่างน้ำตามธรรมชาติต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่นานกว่าน้ำ DI ยิ่งไปกว่านั้นความขุ่นของน้ำที่เพิ่มมากขึ้นของน้ำจากน้ำทิ้งทำให้ suspended solids สามารถไปบดบังการส่องผ่านของ UV ลงมาที่น้ำเสีย ทำให้ปริมาณของ Persulfate anion ไม่ได้ถูกกระตุ้น การบำบัดที่เกิดขึ้นจึงไม่เกิดเป็นซัลเฟตไตรคอลล ทำให้การบำบัดลดน้อยลงตามลำดับ



ภาพที่ 25 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ E2 ในการบำบัดด้วย UV/Persulfate ในตัวอย่างน้ำ

ที่แตกต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการศึกษา

โครงการศึกษาการใช้เปอร์ซัลเฟตที่ถูกเพิ่มประสิทธิภาพโดยการควบคุมการปล่อยในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันที่จุดกำเนิด (ISCO) เพื่อบำบัดสารเคมีตกค้างนี้เป็นการใช้สารออกซิแดนท์เปอร์ซัลเฟตที่ถูกนำมาหลอมรวมกันกับซีฟิ่งพาราฟินเป็นลักษณะทรงกลมตันขนาดเล็กมีลักษณะคล้ายเทียน โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้สารเปอร์ซัลเฟตสามารถสลายตัวออกมาอย่างช้าๆ เมื่อแท่งเทียนเปอร์ซัลเฟตนี้โดนน้ำ โดยเทียนเปอร์ซัลเฟตนี้จะถูกออกแบบมาให้ถูกกระตุ้นด้วยเหล็กศูนย์ที่ถูกออกแบบมาในลักษณะของเทียนเช่นเดียวกัน การศึกษานี้เป็นการทดลองแบบ Batch โดยสารเคมีอินทรีย์ต้นแบบที่นำมาใช้คือสาร E2

การทดลองขั้นต้นเป็นการเลือกสัดส่วนที่เหมาะสมของเปอร์ซัลเฟตกับซีฟิ่งพาราฟิน โดยได้มีการทดสอบในหลายๆ อัตราส่วนเพื่อดูความเหมาะสมจากการกระจายตัวของเปอร์ซัลเฟตจากนั้นจึงนำเทียนดังกล่าวมาทดสอบการบำบัดสาร E2 ใน Batch experiment และพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:3.25 ซึ่งจะสามารถปลดปล่อยความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตออกมาในสารละลายได้ $2,000 \text{ mg L}^{-1}$ ภายใน 60 นาที และเทียนยังคงสภาพอยู่ได้

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของการบำบัดสาร E2 ด้วยวิธีการกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าอย่างเห็นได้ชัด สังเกตได้จากการฉายแสงร่วมกับสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 40 mg L^{-1} สามารถลดปริมาณสาร E2 ได้ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ภายในเวลาเพียงแค่ 7.5 นาที โดยจะแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดกับการบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่าง

เดียวซึ่งต้องใช้ความเข้มข้นของสารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตมากถึง 200 mg L^{-1} และใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง อีกทั้งการฉายแสงเพียงอย่างเดียวของหลอดขนาด 4W ยังต้องใช้เวลามากกว่า 10 ชั่วโมง ถึงจะสามารถลดปริมาณสาร E2 ได้ 70 เปอร์เซ็นต์ การบำบัดด้วยการกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตและเวลาที่ใช้ในการบำบัดสาร E2 น้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับการทดลองการบำบัดด้วยสารเปอร์ซัลเฟตอย่างเดียว และการบำบัดด้วยแสงเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้จะเป็นผลเพราะสารเปอร์ซัลเฟต ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดอนุมูลอิสระของซัลเฟต

ในการศึกษาการสลายตัวของ E2 ด้วยวิธีการบำบัดแบบ UV/Persulfate ในการบำบัดสาร E2 ในตัวอย่างน้ำตามธรรมชาติพบว่าที่ 30 นาทีสาร E2 จากตัวอย่างน้ำทิ้งจากฟาร์มปศุสัตว์ สามารถถูกบำบัดได้ถึง 80% ภายในระยะเวลา 30 นาทีซึ่งบ่งบอกให้ทราบได้ว่าการใช้การควบคุมการปล่อยของการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับสารเปอร์ซัลเฟตนั้นให้ผลลัพธ์ที่ดี เหมาะสมแก่การนำเทียนนี้ไปใช้งานในการบำบัดสารจริงในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนด้วยสารเคมีอินทรีย์ได้

2. ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าการทดลองต่างๆ จะทำให้สามารถสรุปผลรวมได้ว่าเทียนเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตสามารถนำมาบำบัดสารE2 ที่ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี แต่ทั้งนี้ยังคงมีปัจจัยหลายอย่างที่ต้องนำมาพิจารณาหากต้องการนำเทียนไปใช้จริง ยกตัวอย่างเช่น ปัจจัยในเรื่องของสารอินทรีย์อื่นๆ ในดิน ที่อาจมาแย่งการถูกบำบัดโดยสารเปอร์ซัลเฟต จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อหาค่า Oxidant demand ของพื้นที่บริเวณนั้นก่อนที่จะนำไปทำงานจริงอีก นอกจากนี้ปัจจัยด้านนี้แล้ว ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นปัจจัยด้าน pH อุณหภูมิของน้ำผิวดิน ปริมาณของสารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์ ปัจจัยด้านการปนเปื้อนของสารชนิดอื่น ปัจจัยด้านกายภาพของแหล่งที่ต้องการบำบัด ฯลฯ ฉะนั้นการเลือกพื้นที่ต้นแบบที่มีการปนเปื้อนจริงจึงมีความสำคัญและต้องการผู้ศึกษาต่อด้านนี้อีก เพื่อให้การนำเทียนเปอร์ซัลเฟตไปใช้ในอนาคตนั้นมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

กาญจนา เวียงนนท์.2553 การจัดโปรแกรมเข้าร่วมเปรียบเทียบผลกำรวัด CCQM-P117 .a 17 β -Estradiol สำนักมาตรวิทยา <http://old1.nimt.or.th/nimt/upload/linkfile/sys-metrology-817-459.pdf> (เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม 2560)

นทีทิพย์ กฤษณามระ. 2538 ฮอร์โมนกลไกและการออกฤทธิ์ร่วม กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช

Anipsitakis G P, Dionysiou D D. Degradation of organic contaminants in water with sulfate radicals generated by the conjunction of peroxymonosulfate with cobalt. *Environmental Science and Technology* 2003, 37, 4790–4797.

Anipsitakis, G.P., Dionysiou, D.D. Radical generation by the interaction of transition metals with common oxidants, *Environ. Sci. Technol.* 2004, 38, 3705-3712.

Anipsitakis, G.P., Dionysiou, D.D. Transition metal/UV-based advanced oxidation technologies for water decontamination, *Applied Catalysis B: Environmental.* 2004, 54, 155–163.

Berlin, A.A. Kinetics of radical-chain decomposition of persulfate in aqueous solutions of organic compounds. *Kinet. Catal.* 1986, 27, 34–39.

Bolton, J.R., Stefan, M.I. Fundamental photochemical approach to the concepts of fluence (UV dose) and electrical energy efficiency in photochemical degradation reactions. *Research on Chemical Intermediates* 2002, 28, 857–870.

- Bradley, P. M., Barber, L. B., Chapelle, F. H., Gray, J. L., Kolpin, D. W., McMahon, P. B. Biodegradation of 17 beta-estradiol, estrone and testosterone in stream sediments. Environ. Sci. Technol. 2009, 43, 1902-1910.
- Buxton, G.V., Greenstock, C.L., Helman, W.P., Ross, A.B. Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals (OH/O) in aqueous solution. J. Phys. Chem. Ref. Data 1988, 17, 513-531.
- Bradley, P. M., Barber, L. B., Chapelle, F. H., Gray, J. L., Kolpin, D. W., McMahon, P. B. Biodegradation of 17 beta-estradiol, estrone and testosterone in stream sediments. Environ. Sci. Technol. 2009, 43, 1902-1910.
- Chan, T.W., Graham, N.J.D., Chu, W. Degradation of iopromide by combined UV irradiation and peroxydisulfate, J. Hazard. Mater. 2010, 181, 508-513.
- Christenson, M.D., Kambhu, A., and Comfort, S.D. (2012). Using slow-release permanganate candles to remove TCE from a low permeable aquifer at a former landfill. Chemosphere 89(6), 680-687.
- Chu, W., Wang, Y.R., Leung, H.F. Synergy of sulfate and hydroxyl radicals in UV/S2O8/H2O2 oxidation of iodinated X-ray contrast medium iopromide. Chemical Engineering Journal 2011, 178, 154- 160.
- Coleman, H.M., Abdullah, M.I., Eggins, E.R., Palmer, F.L. Photocatalytic degradation of 17_ oestradiol, oestriol and 17_-ethinyloestradiol in water monitored using fluorescence spectroscopy, Appl. Catal. B 2005, 55, 23-30.

Coleman, H.M., Eiggins, B.R., Byrne, J.A., Palmer, F.L., King, E. Photocatalytic degradation of 17- β -oestradiol on immobilised TiO₂. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2000, 24, L1-L5

Coleman, H.M., Routledge, E.J., Sumpter, J.P., Eiggins, B.R., Byrne, J.A. Rapid loss of estrogenicity of steroid estrogens by UVA photolysis and photocatalysis over an immobilized titanium dioxide catalyst, *Water Res.* 2004, 38, 3233-3240.

Colucci, M. S., Bork, H., Topp, E. Persistence of estrogenic hormones in agricultural soils: I. 17 beta-estradiol and estrone. *J. Environ. Qual.* 2001, 30, 2070-2076.

Colucci, M. S., Topp, E. Persistence of estrogenic hormones in agricultural soils: II. 17 alpha-ethynylestradiol. *J. Environ. Qual.* 2001, 30, 2077-2080.

Das, B. S., Lee, L. S., Rao, P. S. C., Hultgren, R. P. Sorption and degradation of steroid hormones in soils during transport: Column studies and model evaluation. *Environ. Sci. Technol.* 2004, 38, 1460-1470.

Dash, S., Patel, S., Mishra, B.K. Oxidation by permanganate: synthetic and mechanistic aspects. *Tetrahedron* 2009, 65:707-739.

Desbrow, C., E. J. Routledge, G. C. Brighty, J. P. Sumpter, and M. Waldock. Identification of estrogenic chemicals in STW effluent. I. Chemical fractionation and in vitro biological screening. *Environmental Science and Technology*. 1998, 32, 1549-1558.

- Dhananjeyan, M.R., Fine, E., and Kiwi, J. (2000). Synthetic polymer delivery system: sustained release of persulfate during the photo-oxidation of an azo-dye. *J. Photoch. Photobio. A* 136(1-2), 125-131.
- Elmolla, E.S., Chaudhuri, M. Degradation of the antibiotics amoxicillin, ampicillin and cloxacillin in aqueous solution by the photo-Fenton process, *J. Hazard. Mater.* 2009, 172, 1476-1481.
- Esplugas, S., Bila, D.M., Krause, L.G.T., Dezotti, M. Ozonation and advanced oxidation technologies to remove endocrine disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water effluents. *J Hazard Mater* 2007, 149, 631-642.
- Fan, Z. S., Casey, F. X. M., Hakk, H., Larsen, G. L. Persistence and fate of 17 beta-estradiol and testosterone in agricultural soils. *Chemosphere* 2007, 67, 886-895.
- Gaido, K.W., Leonard, L.S., Lovell, S., Gould, J.C., Baba, D., Portier, C.J., McDonnell, D.P. Evaluation of Chemicals with Endocrine Modulating Activity in a Yeast-Based Steroid Hormone Receptor Gene Transcription Assay. Pages 205-212.
- Gao, Y.Q., Gao, N.Y., Deng, Y., Yang, Y.Q., Ma, Y. Ultraviolet (UV) light-activated persulfate oxidation of sulfamethazine in water. *Chemical Engineering Journal* 2012, 195, 248-253.
- Guan, X., He, D., Ma, J., Chen, G. Application of permanganate in the oxidation of micropollutants: a mini review. *Environ Sci Engin China* 2010, 4, 405-413.

Hansen, K.M., Anderson, H.R., Energy Effectiveness of Direct UV and UV/H₂O₂ Treatment of Estrogenic Chemicals in Biological Treated Sewage. *International Journal of Photoenergy*. 2012.

Hansen, P.D., Dizer, H., Hock, B., Marx, A., Sherry, J., McMaster, M., Vitellogenin—a biomarker for endocrine disruptors. *Trends Anal Chem*. 1998, 17, 448–51.

He, X., Cruz, A.A., Dionysiou, D.D. Destruction of cyanobacterial toxin cylindrospermopsin by hydroxyl radicals and sulfate radicals using UV-254 nm activation of hydrogen peroxide, persulfate and peroxymonosulfate. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 2013, 251, 160– 166.

Heeks, R.E., Smith, L.P., Perry, R.M. Oxidation technologies for groundwater treatment. In *ACS Symposia Series*. 1991, 468, 110-132.

Hemmings, S. N. J., Hartel, P. G. Mineralization of hormones in breeder and broiler litters at different water potentials and temperatures. *J. Environ. Qual*. 2006, 35, 701-706.

Herrmann, H., On the photolysis of simple anions and neutral molecules as sources of O⁻/OH, SO(x)- and Cl in aqueous solution. *Phys. Chem. Chem. Phys*. 2007, 9, 3935–3964.

Hori, H., Yamamoto, A., Koike, K., Kutsuna, S., Osaka, I., Arakawa, R. Persulfate-induced photochemical decomposition of a fluorotelomer unsaturated carboxylic acid in water, *Water Res*. 2007, 41, 2962-2968.

Hou, L.W., Zhang, H., Xue, X.F. Ultrasound enhanced heterogeneous activation of peroxydisulfate by magnetite catalyst for the degradation of tetracycline in water, Sep. Purif. Technol. 2012, 84, 147-152.

Hu, L., Martin, H.M., Arce-Bulted, O., Sugihara, M.N., Keating, K.A., Strathmann, T.J. Oxidation of Carbamazepine by Mn(VII) and Fe(VI): Reaction Kinetics and Mechanism. Environ Sci Technol 2008, 43:509-515.

Hu, L., Martin, H.M., Strathmann, T.J. Oxidation kinetics of antibiotics during water treatment with potassium permanganate. Environ Sci Technol 2010, 44, 6416-6422.

Huang, K.C., Couttenye, R.A., Hoag, G.E. Kinetics of heat-assisted persulfate oxidation of methyl tert-butyl ether (MTBE), Chemosphere 2002, 49, 413-420.

Jacobsen, A. M., Lorenzen, A., Chapman, R., Topp, E. Persistence of testosterone and 17 beta-estradiol in soils receiving swine manure or municipal biosolids. J. Environ. Qual. 2005, 34, 861-871.

Jiang, J., Pang, S., Ma, J., and Liu, H. (2012). Oxidation of phenolic endocrine disrupting chemicals by potassium permanganate in synthetic and real waters. Environ. Sci. Technol. 46, 1774-1781.

Johnson, A.C., Belfroid, A., Di Corcia, A. Estimating steroid oestrogen inputs into activated sludge treatment works and observations on their removal from the effluent. The Science of the Total Environment 2000. 256, 163-173.

- Jurgens, M. D., Holthaus, K. I. E., Johnson, A. C., Smith, J. J. L., Hetheridge, M., Williams, R. J. The potential for estradiol and ethinylestradiol degradation in English rivers. Environ. Toxicol. Chem. 2002, 21, 480-488.
- Kambhu, A., Comfort, S., Chokeyaroenrat, C., and Sakulthaew, C. (2012). Developing slow-release persulfate candles to treat BTEX contaminated groundwater. Chemosphere 89(6), 656-664.
- Kang, N., Hua, I., and Rao, P.S.C. (2004). Production and characterization of encapsulated potassium permanganate for sustained release as an in situ oxidant. Ind. Eng. Chem. Res. 43(17), 5187-5193.
- Khan, J.A., He, X., Khan, H.M., Shah, N.S., Dionysiou, D.D. Oxidative degradation of atrazine in aqueous solution by UV/H₂O₂/Fe²⁺, UV/S₂O₈/Fe²⁺ and UV/HSO₅/Fe²⁺ processes: A comparative study. Chemical Engineering Journal 2013, 218, 376–383.
- Kolpin, D.W., Furlong, E.T., Meyer, M.T., Thurman, E.M., Zaugg, S.D., Barber, L.B., Buxton, H.T. Pharmaceuticals, Hormones, and Other Organic Wastewater Contaminants in U.S. Streams, 1999-2000: A National Reconnaissance. Environ. Sci. Technol. 2002, 36, 1202-1211.
- Lai KM, Johnson KL, Scrimshaw MD, Lester JN. Binding of waterborne steroid estrogens to solid phases in river and estuarine systems. Environ Sci Technol 2000, 34, 3890-4.

- Lau, T.K., Chu, W., Graham, N.J.D. The aqueous degradation of butylated hydroxyanisole by UV/S_2O_8 : study of reaction mechanisms via dimerization and mineralization, *Environ. Sci. Technol.* 2007, 41, 613-619.
- Lee, E.S., and Schwartz, F.W. (2007a). Characteristics and applications of controlled-release $KMnO_4$ for groundwater remediation. *Chemosphere* 66(11), 2058-2066.
- Lee, E.S., and Schwartz, F.W. (2007b). Characterization and optimization of long-term controlled release system for groundwater remediation: A generalized modeling approach. *Chemosphere* 69(2), 247-253.
- Li, K., Hokanson, D.R., Crittenden, J.C., Trussell, R.R., Minakata, D. Evaluating UV/H_2O_2 processes for methyl tert-butyl ether and tertiary butyl alcohol removal: effect of pretreatment options and light sources, *Water Res.* 2008, 42, 5045–5053.
- Ling, W., Ya-Qi, C., Bin, H., Chun-Gang, Y., Da-Zhong, S., Jing, S., Gui-Bin, J. Determination of estrogens in water by HPLC–UV using cloud point extraction. *Talanta* 2006, 70, 47-51
- Liu, Y., X. He, Y. Fu and D.D. Dionysiou. 2016. Kinetics and mechanism investigation on the destruction of oxytetracycline by UV-254 nm activation of persulfate. *Journal of Hazardous Materials* 305: 229-239.
- Liang, W., Zhu, X., Butler, E.C. Comparison of four advanced oxidation processes for the removal of naphthenic acids from model oil sands process water. *J Hazard Mater.* 2011, 190, 168–176.

- Liang, C.J., and Lai, M.C. (2008). Trichloroethylene degradation by zero valent iron activated persulfate oxidation. *Environ. Eng. Sci.* 25, 1071–1077.
- Lin, Y.T., Liang, C., Chen, J.H. Feasibility study of ultraviolet activated persulfate oxidation of phenol. *Chemosphere* 2011, 82, 1168–1172
- Liu, B., Liu, X. Direct photolysis of estrogens in aqueous solutions, *Sci. Total Environ.* 2004, 320, 269–274.
- Liu, X., Fang, L., Zhou, Y., Zhang, T., Shao, Y. Comparison of UV/PDS and UV/H₂O₂ processes for the degradation of atenolol in water. *Journal of Environmental Sciences* 2013, 25, 1519–1528.
- Louis Fieser, and Mary Fieser, 1959, *Steroids*, Reinhold Publishing Corporation, New York.
- Montagnani DB, Puddefoot J, Davie TJA, Vinson GP. Environmentally persistent oestrogen like substances in UK river systems. *Water Environ J* 1996, 10, 399-406.
- Munter, R. Advanced oxidation processes-current status and prospects, *Proc. Estonian Acad. Sci. Chem.* 2001, 50, 59-80.
- Nakashima, T., Ohko, Y., Kubota, Y., Fujishima, A. Photocatalytic decomposition of estrogens in aquatic environment by reciprocating immersion of TiO₂-modified polytetrafluoroethylene mesh sheets. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2003, 160, 115–120.

Nakashima, T., Ohko, Y., Tryk, D.A., Fujishima, A. Decomposition of endocrine-disrupting chemicals in water by use of TiO₂ photocatalysts immobilized on polytetrafluoroethylene mesh sheets, *J. Photochem. Photobiol. A* 2002, 151, 207–212.

Nasu, M., Goto, M., Kato, H., Oshima, Y., Tanaka, H. Study on endocrine disrupting chemicals in wastewater treatment plants. *Water Sci Technol* 2000,43, 101–108.

Oberle, D.W., and Schroder, D.L. (2000). Design considerations for in-situ chemical oxidation. Wickramanayake, G.B., Gavaskar, A.R., and A.S.C. Chen., Eds. *Chemical oxidation and reactive barriers: Remediation of chlorinated and recalcitrant compounds*, Ohio: Battelle Press.

Ohko, Y., Iuchi, K.I., Niwa, C., Tatsuma, T., Nakashima, T., Iguchi, T., Kubota, Y., Fujishima, A. 17 β -Estradiol degradation by TiO₂ photocatalysis as a means of reducing estrogenic activity, *Environ. Sci. Technol.* 2002, 36, 4175–4181.

Olmez-Hanci, T., D. Dursun, E. Aydin, I. Arslan-Alaton, B. Girit, L. Mita, N. Diano, D. G. Mita and M. Guida. 2015. S₂O₈²⁻/UV-C and H₂O₂/UV-C treatment of Bisphenol A: Assessment of toxicity, estrogenic activity, degradation products and results in real water. *Chemosphere* 199: S115-S123.

Peterson, E.W., Davis, R.K., Orndorff, H.A. 17 β -Estradiol as an indicator of animal waste contamination in mantled karst aquifers. *J Environ Qual* 2001, 29, 826–834.

- Petri, B. G. , R. J. Watts, A. Tsitonaki, M. Crimi, N. Thompson, and A.L. Teel. 2011. Fundamentals of ISCO Using Persulfate in: In Situ Chemical Oxidation for Groundwater Remediation, R.L. Siegrist et.al.eds. Springer Press
- Purdum, C.E., Hardiman, P.A., Byre, V.J., Eno, N.C., Tyler, C.R., Sumpter, J.P. Estrogenic effects of effluents from sewage treatment works. *Chem Ecol.* 1994, 8, 275–285.
- Rauscher, L., Sakulthaew, C., and Comfort, S. (2012). Using slow-release permanganate candles to remediate PAH-contaminated water. *J. Hazard. Mater.* 241–242(0), 441-449.
- Rodriguez, E. Majado, M.E., Meriluoto, J., Acero, J.L. Oxidation of microcystins by permanganate: reaction kinetics and implications for water treatment. *Water Res.* 2007, 41, 102–110.
- Rosenfeldt, E.J., Linden, K.G. Degradation of endocrine disrupting chemicals bisphenol A, ethinyl estradiol, and estradiol during UV photolysis and advanced oxidation processes, *Environ. Sci. Technol.* 2004, 38, 5476–5483.
- Sakulthaew, C. and C. Choekjaroenrat. 2016. Oxidation of 17 β -Estradiol in Water by Slow-Release Permanganate Candles. *Environmental Engineering Science* 33: 224-234.
- Sanchez-Polo, M., Daiem, M.M., Ocampo-Perez, R., Rivera-Utrilla, J., Mota, A.J. Comparative study of the photodegradation of bisphenol A by HO \cdot , SO $_4^{\cdot-}$ and CO $_3^{\cdot-}$ /HCO $_3^{\cdot-}$ radicals in aqueous phase. *Science of the Total Environment* 2013, 463, 423–431

Shao, X., Ma, J., Wen, G., and Yang, J. (2010). Oxidation of estrone by permanganate:

Reaction kinetics and estrogenicity removal. *Chin. Sci. Bull.* 55(9), 802-808.

Shemesh, M., Shore, L.S. Effect of hormones in the environment on reproduction in cattle.

In: Fields MJ, Sand RS, editors. *Factors affecting calf crop*. Boca Raton, FL: CRC Press; 1994. p. 287–297.

Shestakova, M., Sillanp, M. Removal of dichloromethane from ground and wastewater: A

review. *Chemosphere* 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.022>

Shih, Y.J., Putra, W.N., Huang, Y.H., Tsai, J.C. Mineralization and defluorization of 2,2,3,3-

tetrafluoro-1-propanol (TFP) by UV/persulfate oxidation and sequential adsorption, *Chemosphere* 2012, 89, 1262-1266.

Shore, L.S., Kapulnik, Y., Gurevich, M., Wininger, S., Badamy, H., Shemesh, M. Induction of

phytoestrogen production in *Medicago sativa* leaves by irrigation with sewage water. *Environ Exp Bot* 1995, 35, 363–369.

Shore, L.S., Shemesh, M., Cohen, R. The role of oestradiol and oestrone in chicken manure

silage in hyperoestrogen in cattle. *Aust Vet J* 1988, 65- 67.

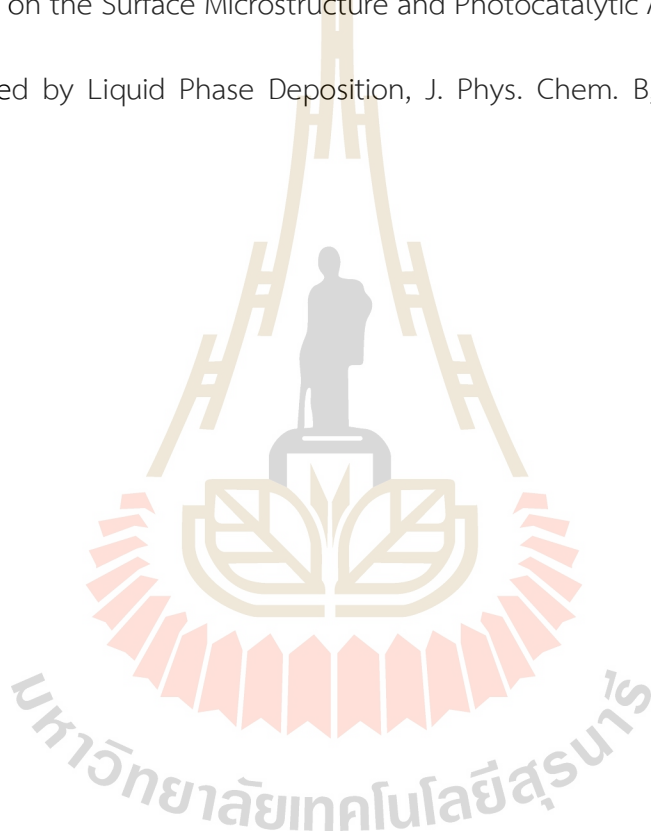
Ternes, T.A., Kreckel, P., Mueller, J. Behaviour and occurrence of estrogens in municipal

sewage treatment plants—II. Aerobic batch experiments with activated sludge. *Sci Total Environ* 1999, 225, 91– 9.

- Tsitonaki, A., Petri, B., Crimi, M., Mosbæk, H., Siegrist, R.L., and Bjerg, P.L. (2010). In situ chemical oxidation of contaminated soil and groundwater using persulfate: A review. *Critical Reviews in Environ. Sci. Technol.* 40(1), 55-91.
- Visco, G., Gampanella, L., Nobili, V., Organic carbons and TOC in waters: An overview of the international norm for its measurements. 2005, *Microchem. J.* 79, 185-191.
- Waldemer, R.H., Tratnyek, P.G. (2006). Kinetics of contaminant degradation by permanganate. *Environ. Sci. Technol.* 40(3), 1055-1061.
- Wu, J., Zhang, H., Qiu, J.J. Degradation of Acid Orange 7 in aqueous solution by a novel electro/Fe²⁺/peroxydisulfate process, *J. Hazard. Mater.* 2012, 215–216.
- Xu, L., Xu, C., Zhao, M., Qiu, Y., and Sheng, G. D. (2008). Oxidative removal of aqueous steroid estrogens by manganese oxides. *Water Res.* 42(20), 5038-5044.
- Yang, S., Wang, P., Yang, X., Shan, L., Zhang, W., Shao, X., Niu, R. Degradation efficiencies of azo dye Acid Orange 7 by the interaction of heat, UV and anions with common oxidants: Persulfate, peroxymonosulfate and hydrogen peroxide. *J Hazard Mater*, 2010, 179, 552–558.
- Ying, G.G., Kookana, R.S., Ru, Y.J. Occurrence and fate of hormone steroids in the environment. *Environment International* 2002, 28, 545–551

Yoshimoto, T., Nagai, F., Fujimoto, J., Watanabe, K., Mizukoshi, H., Makino, T., Kimura, K., Saino, H., Sawada, H., Omura, H. Degradation of estrogens by *Rhodococcus zopfii* and *Rhodococcus equi* isolates from activated sludge in 51 wastewater treatment plants. *Appl. Environ. Microbiol.* 2004, 70, 5283-5289.

Yu, J.G., Yu, H.G., Cheng, B., Zhao, X.J., Yu, J.C., and Ho, W.K. The Effect of Calcination Temperature on the Surface Microstructure and Photocatalytic Activity of TiO₂ Thin Films Prepared by Liquid Phase Deposition, *J. Phys. Chem. B*, 2003, 107, 13871-13879.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ภาพประกอบ (เพิ่มเติม) โครงการการกำจัดสารฮอร์โมนเพศที่
ตกค้างในน้ำโดยใช้การบำบัดด้วยกระบวนการออกซิเดชันจาก
เปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงอัลตราไวโอเลต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ตัดหลอดชาไข่มุกขนาด 3 ซม.



ใช้กระดาษหุ้มด้านใดด้านหนึ่งของหลอด



ใช้เทปใสติดให้แน่น



แบบหล่อเพื่อใช้ในการหล่อเทียน



Paraffin และ โซเดียมเปอร์ซัลเฟต

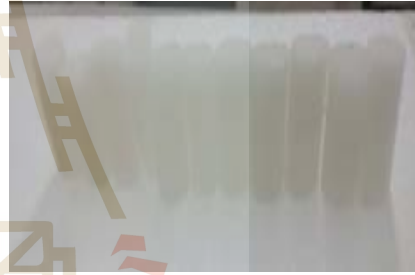




ละลาย Paraffin และ โซเดียมเปอร์ซัลเฟต



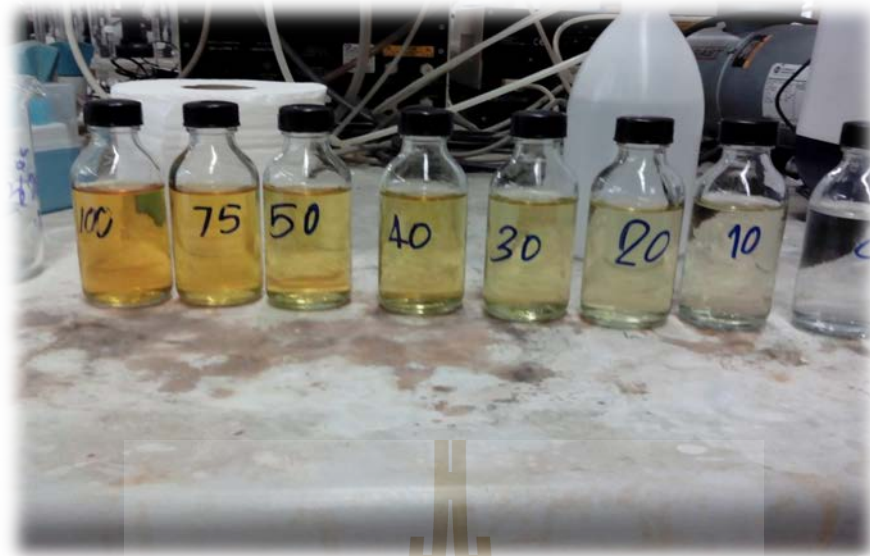
การหล่อเทียน



ปล่อยให้เทียนแข็งตัวแล้วดันเทียนออก ตามภาพคือ เทียนเปอร์ซัลเฟต



การทำ Colorimetric method เพื่อหาค่าของเปอร์ซัลเฟต



ภาพแสดงการทำกราฟมาตรฐานของเปอร์ซัลเฟต

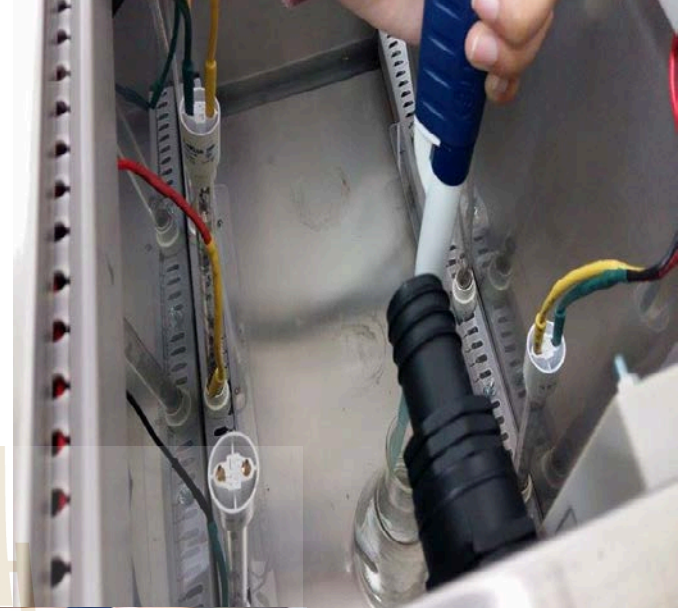
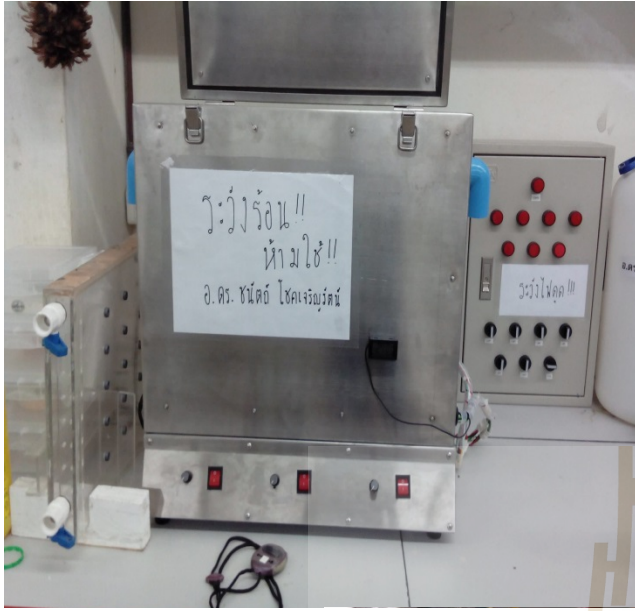


ภาพแสดงการทดลองการกระจายตัวของเทียมน persulfate



ภาพแสดงการทดลองการบำบัด E2 ด้วยเปอร์ซัลเฟตในน้ำกั้น และน้ำเสีย





ภาคผนวก ข

รายละเอียดและรูปภาพแสดงการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ
ในงานประชุมวิชาการระดับชาตินเรศวรวิจัยครั้งที่ 13

ณ มหาวิทยาลัยนเรศวร

วันที่ 20 – 21 กรกฎาคม 2560

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



NIRS 13

วิจัย และนวัตกรรม ขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคม

20-21 กรกฎาคม 2560 ณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

ประเภทผลงาน

- วิจัย
- วิทยานิพนธ์
- วิทยาสถาบัน

การส่งผลงาน

- บทความ (Abstract)
- บทความฉบับเต็ม (Full Paper)

ประเภทการนำเสนอ

- Oral Presentation
- Poster Presentation

กำหนดการสมัครและส่งผลงาน

- ลงทะเบียนและส่งผลงาน ภายใน 31 มีนาคม 2560
- ลงทะเบียนและเข้าร่วมงาน ตั้งแต่บัดนี้ จนถึงวันที่ 7 กรกฎาคม 2560

อัตราค่าลงทะเบียน

- ผลงานวิจัย/วิทยาสถาบัน 2,000 บาทต่อเรื่อง
- ผลงานวิทยานิพนธ์ 1,000 บาทต่อเรื่อง
- การลงทะเบียนเข้าร่วมงาน 500 บาท (ได้รับ package) หรือท่านสามารถลงทะเบียนแบบ Walk-in (ฟรี โดยไม่ได้รับ package)

ชำระค่าลงทะเบียน ภายในวันที่ 30 เมษายน 2560

กำหนดการส่งมอบรับนำเสนอสื่อและตีพิมพ์

เดือนมิถุนายนเป็นต้นไป




ติดต่อ
<http://conference.nu.ac.th/nrc13>
 Email : nrcenu.ac.th Tel : 055-968-641

ประเภทผลงาน	<ul style="list-style-type: none"> - วิจัย - วิทยานิพนธ์ - วิทยาสถาบัน
กลุ่มผลงาน	<ul style="list-style-type: none"> - วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี - วิทยาศาสตร์สุขภาพ - มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ - วิทยาสถาบัน
การส่งผลงาน	<ul style="list-style-type: none"> - บทความ (Abstract) - บทความฉบับเต็ม (Full Paper)
ประเภทการนำเสนอ	<ul style="list-style-type: none"> - Oral Presentaion - Poster Presentaion
กำหนดการสมัครและส่งผลงาน	<ul style="list-style-type: none"> - ลงทะเบียนและส่งผลงาน ภายใน 31 มีนาคม 2560 - ลงทะเบียนและเข้าร่วมงาน ตั้งแต่บัดนี้ จนถึงวันที่ 7 กรกฎาคม 2560
อัตราค่าลงทะเบียน	<ul style="list-style-type: none"> - ผลงานวิจัย/วิทยาสถาบัน 2,000 บาทต่อเรื่อง - ผลงานวิทยานิพนธ์ 1,000 บาทต่อเรื่อง - การลงทะเบียนเข้าร่วมงาน 500 บาท (ได้รับ package) หรือท่านสามารถลงทะเบียนแบบ Walk-in (ฟรี โดยไม่ได้รับ package) <p style="color: red; font-weight: bold;">ชำระค่าลงทะเบียน ภายในวันที่ 30 เมษายน 2560</p>
กำหนดการมอบรับนำเสนอสื่อและตีพิมพ์	เดือนมิถุนายนเป็นต้นไป

ลงทะเบียนส่งผลงาน



การบำบัดสารฮอร์โมนเพศด้วยอนุมูลอิสระของซัลเฟตจากการกระตุ้นด้วยแสงยูวี ชนิดที่ 1 โซลเจอร์เรชั่น^{1,2*}, ซัยณรงค์ สกุลแถว³ และ อรรถพล อ่างแก้ว¹

Using sulfate radical from activating UV-light to mitigate steroid hormones

Chanat Chokejaroenrat^{1,2*}, Chainarong Sakulthaew³ and Athaphon Angkaew¹

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 10900

² สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000

³ ภาควิชาเทคนิคการสัตวแพทย์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 10900

¹ Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok, 10900

² School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Mueng, Nakhon Ratchasima, 30000

³ Department of Veterinary Technology, Faculty of Veterinary Technology, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok, 10900

*Corresponding author. E-mail: eccnc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

สารฮอร์โมนเพศที่ถูกขับถ่ายออกมาจากปัสสาวะของมนุษย์และจากสัตว์สามารถเข้าสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติและก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบนิเวศได้ หากสิ่งมีชีวิตได้รับสารฮอร์โมนเพศเป็นระยะเวลาอันยาวนานอาจก่อให้เกิดความไม่สมดุลในระบบการทำงานของต่อมไร้ท่อ ผู้วิจัยได้เลือกตัวแทนสารฮอร์โมนเพศคือสาร 17β-เอสตราไดออล (E2) โดยพบได้จากน้ำทิ้งในบริเวณที่มีการเลี้ยงสัตว์ จุดประสงค์ของงานวิจัยคือการพัฒนาการบำบัดสาร E2 ในสารละลายโดยใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่เกิดจากการกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแสงยูวีในถังปฏิกรณ์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ E2 คือ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะการบำบัดได้ถูกแบ่งเป็น 3 ด้าน (1) เปอร์ซัลเฟตแอนไอออน (2) แสงยูวี (3) อนุมูลอิสระของซัลเฟต ผู้วิจัยได้ทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตในช่วง 10 ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการวิเคราะห์สาร E2 ด้วย HPLC จากนั้นทำการเปรียบเทียบอัตราการสลายตัว นอกจากนี้ผลกระทบปัจจัยจากสภาวะแวดล้อมอื่น เช่น พีเอช และอุณหภูมิได้ถูกนำมาวิจารณ์ด้วย ผู้วิจัยพบว่าการใช้ปริมาณเปอร์ซัลเฟตแอนไอออนที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถที่จะบำบัดสาร E2 ได้ร้อยละ 30 ภายใน 60 ชั่วโมง ในขณะที่แสงยูวีบำบัดสาร E2 ได้ถึงร้อยละ 80 ในเวลาที่เท่ากัน อย่างไรก็ตามอนุมูลอิสระของซัลเฟตสามารถบำบัดสาร E2 ได้ถึงร้อยละ 90 ภายใน 30 นาที จากผลการทดลองเหล่านี้สามารถพิสูจน์ได้ว่าอนุมูลอิสระของซัลเฟตเป็นตัวออกซิไดส์ที่มีความแรงมากกว่าและอาจจะเหมาะสมในการบำบัดสารเคมีอื่นที่อยู่ในน้ำทิ้งได้

คำสำคัญ: สารฮอร์โมนเพศ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง การกระตุ้นด้วยแสงยูวี ซัลเฟตไตรโคล การบำบัดด้วยแสง

Abstract

Steroid hormones are excreted in urine of human and feedlot animals which can eventually enter the receiving water and later pose serious threat to ecosystem. Exposing to these steroid hormones for a long period of time, it may cause misbalance of the endocrine system. We selected 17β-estradiol or E2 as a sex steroid representative throughout this study as it is the most abundant estrogen found nearby large animal feedlots. The objective was to develop treatment technology for E2 from aqueous solution by means of advanced oxidation processes using sulfate radical producing from activating persulfate with UV-light. A rectangular UV light reactor was specifically built to serve a quartz beaker using as a sole container. E2 was used as an initial substrate at 3 mgL⁻¹. Treatment conditions were of three aspects: (1) persulfate anion, (2) UV light, and (3) sulfate radical from persulfate activated by UV light. We varied concentration of persulfate ranging between 10 to 200 mgL⁻¹. Changes in concentration of E2 was analyzed by using HPLC. E2 degradation rates from all treatments were compared. Environmental factors such as pH and temperature were also discussed. We found that using persulfate anion at 40 mgL⁻¹ as a sole oxidant can degraded E2 for only 30% at 60 h while UV can decompose E2 for 80% at the same period. However, sulfate radical can remove upto 90% at only 30 mins. These results provide proof that sulfate radical is much stronger oxidizing agents and may be suitable to use as a practical approach to remove any potent compounds that presents in the feedlot effluents.

Keywords: Steroid hormone, Advanced oxidation processes, UV Activation, Sulfate radicals, photodecomposition

การกำจัดสารฮอร์โมนเพศที่ตกค้างในน้ำโดยใช้การบำบัดด้วยกระบวนการออกซิเดชันจากเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงอัลตราไวโอเลต
Removing a potent natural hormone (17β-Estradiol) from water by ultraviolet (UV) light-activated persulfate oxidation



ดร.ชนัดด์ โชคเจริญรัตน์^{1,2*}, ดร. ชัยณรงค์ สุกุลแก้ว³, อรรถพล อ่างแก้ว¹

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

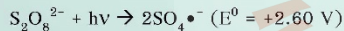
³ ภาควิชาเทคนิคการสัตวแพทย์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

17β-estradiol (E2) จัดอยู่ในกลุ่มสารเคมีที่สามารถขัดขวางการทำงานของต่อมไร้ท่อหากได้รับสาร E2 เป็นระยะเวลายาวนาน ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยศึกษาประสิทธิภาพและเปรียบเทียบการบำบัดสาร E2 ด้วยสารเปอร์ซัลเฟต แสงอัลตราไวโอเลต และสารเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต โดยใช้เครื่องมือ High performance liquid chromatography (HPLC) ในการวิเคราะห์สาร E2 ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 20 และ 40 mg L⁻¹ การกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแสงอัลตราไวโอเลตสามารถทำให้สาร E2 ลดลงได้อย่างรวดเร็ว โดยมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k_{obs}) เพิ่มขึ้นกว่าการใช้สารเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียว 1,600 เท่า และ 1,480 เท่า ตามลำดับ ฉะนั้นวิธีการบำบัดนี้สามารถเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดสาร E2 ในน้ำ และเป็นองค์ความรู้เพื่อพัฒนาการบำบัดสารชนิดอื่นๆต่อไปได้อีก

บทนำ

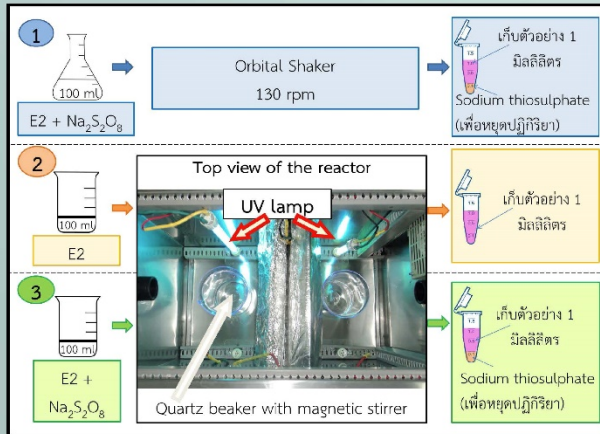
การได้รับสาร 17β-estradiol (E2) ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเป็นระยะเวลายาวนานสามารถส่งผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตได้ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation processes, AOPs) เหมาะสมกับการบำบัดสารฮอร์โมนเพศมากที่สุดเมื่อเปรียบกับการบำบัดโดยวิธีต่างๆ สารออกซิเดนต์ที่ผู้วิจัยเลือกใช้คือ Persulfate anion (S₂O₈²⁻) ซึ่งสามารถนำมาใช้บำบัดได้ทันทีที่อีกทั้งยังสามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลตเพื่อเปลี่ยนเป็น Persulfate radical (SO₄•⁻) ดังสมการ



ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานที่สูงกว่า S₂O₈²⁻ เพียงอย่างเดียว ประกอบกับในการบำบัดสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจริงที่ประกอบด้วยมลสารอินทรีย์อื่นๆ เป็นจำนวนมาก จึงมีความจำเป็นต้องกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตให้มีความรุนแรงมากพอ และควรเป็นวิธีการกระตุ้นที่เหมาะสมต่อการใช้งานในภาคสนามด้วย ผู้วิจัยจึงเลือกใช้แสงอัลตราไวโอเลต

วิธีการวิจัย

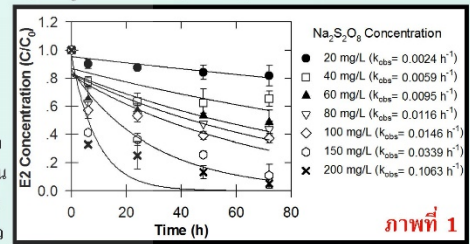
การทดลองแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ๆ คือ ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสาร E2 จากการบำบัดด้วย สารเปอร์ซัลเฟตเพียงอย่างเดียว (PS) แสงอัลตราไวโอเลตเพียงอย่างเดียว (UV) และสารเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (PS/UV) รวมถึงศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องต่อการเกิดปฏิกิริยาเช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของ E2 ฯลฯ



ผลและอภิปรายผล

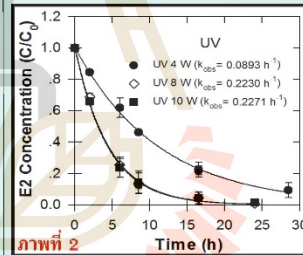
จากผลการทดลองแบบไม่มีตัวกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยเลือกใช้ตัวสารเปอร์ซัลเฟตที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 20 – 200 mg L⁻¹ พบว่าการลดลงของสาร E2 นั้นเพิ่มขึ้นตามปริมาณของความเข้มข้นสารเปอร์ซัลเฟตที่เลือกใช้ โดยค่า K_{obs} เพิ่มขึ้นประมาณ 6 เท่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของสารเปอร์ซัลเฟตเพียง 5 เท่า ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเปอร์ซัลเฟตถึง 10 เท่า การเพิ่มขึ้นจวนค่า K_{obs} นั้น เพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดด ซึ่งบอกให้ทราบว่าการใช้สารเปอร์ซัลเฟตที่มากขึ้น น่าจะส่งผลดีต่อการออกซิเดชันของมลสารอื่นๆ ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ (ภาพที่ 1)

ภายหลังผู้วิจัยลองทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีแสง UV เพียงอย่างเดียวพบว่าสาร E2 ก็สามารถย่อยสลายได้เช่นเดียวกัน แม้ไม่มีสารเปอร์ซัลเฟตซึ่งเป็นไปด้วยอัตราที่เร็ว

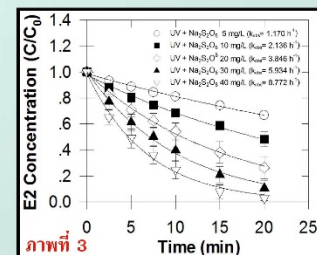


ภาพที่ 1

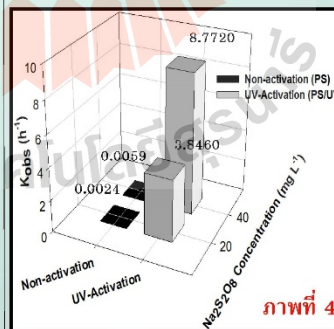
กว่าเดิม (ภาพที่ 2) แต่ทั้งนี้การใช้แสงอัลตราไวโอเลตเพียงอย่างเดียวอาจนำมาซึ่งการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ฉะนั้นผู้วิจัยจึงทดลองใช้การกระตุ้นสารเปอร์ซัลเฟตด้วยแสงยูวี (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่า K_{obs} จากการบำบัดแบบที่ไม่มีมีการกระตุ้น (PS) และแบบมีการกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (PS/UV) พบว่าจากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่า K_{obs} จากการบำบัดแบบที่ไม่มีมีการกระตุ้น (PS) และแบบมีการกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (PS/UV) พบว่า PS/UV มีค่าคงที่ K_{obs} เพิ่มขึ้นจาก 0.0024 h⁻¹ เป็น 3.8460 h⁻¹ (ภาพที่ 4) อันเนื่องมาจากเปอร์ซัลเฟตตราติคัลที่มีประสิทธิภาพการออกซิเดชันได้มากกว่า

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่า K_{obs} จากการบำบัดแบบที่ไม่มีมีการกระตุ้น (PS) และแบบมีการกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (PS/UV) พบว่า PS/UV มีค่าคงที่ K_{obs} เพิ่มขึ้นจาก 0.0024 เป็น 3.8460 h⁻¹ สำหรับการใช้สารโซเดียมเปอร์ซัลเฟต 20 mg L⁻¹ และ เพิ่มขึ้นจาก 0.0059 เป็น 8.7720 h⁻¹ ซึ่งสรุปได้ว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเลตนั้นช่วยให้การย่อยสลายสาร E2 หรือมลสารอินทรีย์อื่นๆ สามารถเกิดขึ้นได้ดีกว่าเดิม และวิธีการกระตุ้นดังกล่าวจึงเหมาะสมต่อการใช้งานจริงอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

กลุ่มผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยให้โครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อมและคณะสิ่งแวดล้อมสำหรับสถานที่ทำปฏิบัติการ และคณะเทคนิคการสัตวแพทย์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการและครุภัณฑ์ต่างๆ

ประวัติผู้วิจัย

ดร. ชนัตต์ โชคเจริญรัตน์

Chanat Chokejaroenrat, Ph.D.



Educational Background:

2008 – 2012	Ph.D. Major: Engineering University of Nebraska – Lincoln, Nebraska, USA
2005 – 2008	M.S. Major: Environmental Engineering University of Nebraska – Lincoln, Nebraska, USA
1996 – 2000	B.Eng. Civil Engineering (2nd Honor) King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

Research Grants:

- (5) 2016 Co-PI - Studies and utilization of an immature coal (Leonardite) to adsorb residual pesticides (**390,000 THB**)
- (4) 2015 Project Leader - Removing a potent natural hormone (17 β -Estradiol) from water by ultraviolet (UV) light-activated persulfate oxidation, Suranaree University of Technology (**394,000 THB**)
- (3) 2014 Co-PI - Using combined approach between slow-release permanganate candles and biodegradation to remediate 17 β -Estradiol (E2) in contaminated water, National Science and Technology Development Agency (**250,000 THB**)
- (2) 2014 Co-PI - Treatment of chromium (VI) from contaminated water by chemical and biological approaches, Department of Veterinary technology, Faculty of Veterinary Technology, Kasetsart University (**250,000 THB**)
- (1) 2013 Project Leader - Evaluation of enhanced persulfate-ISCO performance by using controlled-release activated persulfate to remove chemical residuals in the subsurface, Institute of Research and Development, Suranaree University of Technology (**100,000 THB**)

International Publications:

- (13) 2017 S. Puangkham, A. Poapolathep, U. Jermnak, K. Imsilp, P. Tanhan, **C. Chokejaroenrat**, and S. Poapolathep. Monitoring and health risk of mycotoxins in imported wines and beers consumed in Thailand. World Mycotoxin Journal (*Peer-reviewed*).

- (12) 2017 T. Satapanajaru, **C. Chokejaroenrat**, S. Chainarong, and M. Yoo-iam. Remediation and restoration of petroleum hydrocarbon containing alcohol-contaminated soil by persulfate oxidation activated with soil minerals. *Water, Air, & Soil Pollution* 228:345
- (11) 2017 C. Sakulthaew, **C. Chokejaroenrat**, A. Poapolathep, T. Satapanajaru, and S. Poapolathep. Hexavalent chromium adsorption from aqueous solution using carbon nano-ions (CNOs). *Chemosphere* 184, 1168-1174.
- (10) 2016 C. Sakulthaew, and **C. Chokejaroenrat**. Oxidation of 17 β -estradiol in water by slow-release permanganate candles. *Environmental Engineering Science* (Submitted)
- (9) 2015 C. Sakulthaew, S.D. Comfort, **C. Chokejaroenrat**, C. Harris, and X. Li Removing PAHs from urban runoff water by combining ozonation, adsorption and biodegradation. *Chemosphere* 141, 265–273.
- (8) 2015 **C. Chokejaroenrat**, C. Sakulthaew, T. Satapanajaru, T. Tikhamram, A. Pho-Ong, and T. Mulseesuk. Treating methyl orange in a two-dimensional flow tank by in situ chemical oxidation using slow-release persulfate activated with zero-valent iron. *Environmental Engineering Science* 32(12) 1007-1015.
- (7) 2015 N. Kananizadeh, **C. Chokejaroenrat**, S.D. Comfort, and Y. Li. Modeling Improved ISCO treatment of low permeable zones via viscosity modification: Assessment of system variables. *Journal of Contaminant Hydrology* 173: 25-37.
- (6) 2014 C. Sakulthaew, S.D. Comfort, **C. Chokejaroenrat**, C. Harris, and X. Li. A combined chemical and biological approach to transforming and mineralizing PAHs in runoff water. *Chemosphere* 117: 1 – 9.
- (5) 2014 **C. Chokejaroenrat**, S.D. Comfort, C. Sakulthaew, and B.I. Dvorak. Improving the treatment of non-aqueous phase TCE in low permeable zones with permanganate. *Journal of Hazardous Material* 268:177 – 184.
- (4) 2013 **C. Chokejaroenrat**, N. Kananizadeh, C. Sakulthaew, S.D. Comfort, and Y. Li. Improving the sweeping efficiency of permanganate into low permeable zones to treat TCE: Experimental results and model development. *Environmental Science and Technology* 47:13031-13038.
- (3) 2012 A. Kambhu, S.D. Comfort, **C. Chokejaroenrat**, and C. Sakulthaew. Developing slow-release persulfate candles to treat BTEX contaminated groundwater. *Chemosphere* 89:656–664.
- (2) 2011 **C. Chokejaroenrat**, S.D. Comfort, C. Harris, D. Snow, D. Cassada, C. Sakulthaew, and T. Satapanajaru. Transformation of Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) by permanganate. *Environmental Science and Technology* 45:3643-3649.
- (1) 2010 J.A. Albano, S.D. Comfort, V. Zlotnik, T. Halihan, M. Burbach, **C. Chokejaroenrat**, S. Onanong, and W. Clayton. In situ chemical oxidation of RDX-contaminated ground water with permanganate at the Nebraska Ordnance Plant. *Ground Water Monitoring & Remediation* 30:96-106.