

# การหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารฮอร์โมนเพศเอสโตรอลและ เปอร์แมงกาเนต

ชนัดดี โชคเจริญรัตน์<sup>1</sup> เบญจรัตน์ พงศ์พันธ์ฤทธิ์<sup>1</sup> สมัคร สุจริต<sup>2</sup> ชนกานต์ สกุลแก้ว<sup>3</sup> ธริสรา จิรเสถียรพร<sup>4</sup>  
ฐาปนี พุ่มพวง<sup>2</sup> และ ชัยณรงค์ สกุลแก้ว<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>2</sup>ภาควิชาเทคนิคการสัตวแพทย์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>3</sup>ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

<sup>4</sup>ภาควิชาพลศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

\*E-mail: cvtcns@ku.ac.th

รับบทความ 16 มกราคม 2562 ยอมรับการตีพิมพ์ 22 กุมภาพันธ์ 2562

## บทคัดย่อ

เอสโตรอล (Estradiol; E2) เป็นสารฮอร์โมนเพศที่พบได้ทั้งในเพศหญิงและในเพศชาย แต่จะมีปริมาณมากกว่ามากในเพศหญิง ถ้าสิ่งมีชีวิตได้รับสารดังกล่าวในปริมาณน้อยแต่ได้รับเป็นระยะเวลาอันยาวนาน อาจส่งผลกระทบทำให้พัฒนาการทางเพศผิดปกติได้ เนื่องจากสาร E2 สามารถบำบัดได้โดยด้วยเปอร์แมงกาเนต ( $MnO_4^-$ ) ซึ่งเป็นสารออกซิแดนต์ที่นิยมใช้ในการบำบัดสารมลพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม การศึกษาจลนพลศาสตร์ระหว่าง E2 และเปอร์แมงกาเนตจึงมีความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดสารฮอร์โมนเพศ ซึ่งปัจจุบันการศึกษาดังกล่าวยังไม่ปรากฏในงานวิจัยใด ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยจึงทำการทดลองเพื่อศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง E2 และเปอร์แมงกาเนต ในช่วงความเข้มข้น 2.5 – 250  $\mu M$  เพื่อนำผลที่ได้มาคำนวณอัตราการสลายตัวของสาร ( $K_{obs}$ ) และ อัตราการลดลงของความเข้มข้นเริ่มต้น ( $r_0$ ) โดยใช้เครื่องมือ High-performance liquid chromatography (HPLC) ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นสารฮอร์โมนเพศที่ลดลงเมื่อเทียบกับเวลา ผลการทดลองสรุปได้ว่าปฏิกิริยาระหว่าง E2 และเปอร์แมงกาเนต เป็นปฏิกิริยาอันดับ 2 มีค่าอัตราการปฏิกิริยา  $216.61 \pm 13.12 M^{-1}s^{-1}$  จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าเปอร์แมงกาเนตมีประสิทธิภาพการบำบัดสารฮอร์โมนเพศ E2 ได้

**คำสำคัญ:** เอสโตรอล ฮอร์โมนเพศ ออกซิแดนต์ เปอร์แมงกาเนต

## Determination of reaction order rate of estriol and permanganate

Chanat Chokejaroenrat<sup>1</sup> Benjarat Pongpunpurt<sup>1</sup> Samak Sutjarit<sup>2</sup> Chanakarn Sakulthaew<sup>3</sup>  
Tharisara Chirasatienpon<sup>4</sup> Thapanee Poompoung<sup>2</sup> and Chainarong Sakulthaew<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University

<sup>2</sup>Department of Veterinary Technology, Faculty of Veterinary Technology, Kasetsart University

<sup>3</sup>Department of Applied Science, Faculty of Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University

<sup>4</sup>Department of Physical Education, Faculty of Education, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

\*E-mail: [cvtcns@ku.ac.th](mailto:cvtcns@ku.ac.th)

Received 16 January 2019; Accepted 22 February 2019

### Abstract

Estriol or E3 is one of the sex hormones which is naturally produced in a female body and may cause reproductive dysfunction to surrounding organisms. Permanganate ( $\text{MnO}_4^-$ ) is a strong oxidizing agent which can be used to removed E3 and several pollutants in environment. Objective of this study was to determine the reaction kinetics between E3 and  $\text{MnO}_4^-$ . Kinetic experiments were performed under batch conditions by varying the  $\text{MnO}_4^-$  concentrations (12.5-250  $\mu\text{M}$ ). We determined the reaction rates of E3 and  $\text{MnO}_4^-$  by using the initial rate method. Kinetic experiments verified that E3-  $\text{MnO}_4^-$  reaction was second-order rate with the rate constant of  $216.61 \pm 13.12 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . We concluded that  $\text{MnO}_4^-$  was an effective oxidizing agent to be applied for treating E3.

**Keywords:** estriol, sex hormone, kinetics, oxidant, permanganate

## บทนำ

ในปัจจุบันสารประเภทสารมลพิษอุบัติใหม่เป็นสารที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นสารอันตรายที่สามารถส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำทั้งทางตรงและทางอ้อม สารเหล่านี้เป็นสารประกอบที่ไม่ได้ถูกกำหนดไว้ในข้อบังคับหรือกฎระเบียบใด เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาถึงผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอย่างละเอียด อีกทั้งในอดีตสารบางชนิดมีข้อจำกัดทางเทคนิคการวิเคราะห์จึงไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีทางวิทยาศาสตร์ (Deblonde et al., 2011) สารเหล่านี้ส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่ม Endocrine Disrupted Compounds (EDCs) หรือสารเคมีที่มีความสามารถคล้ายกับฮอร์โมนและสามารถรบกวนการสังเคราะห์ การขนส่ง การทำงาน และการสลายตัวของฮอร์โมนตามธรรมชาติในระบบต่อมไร้ท่อ เนื่องจากร่างกายของมนุษย์และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจะใช้ฮอร์โมนช่วยในเรื่องพัฒนาการด้านต่างๆ ของร่างกาย ฮอร์โมนมีส่วนสำคัญในด้านการเจริญเติบโต การสืบพันธุ์ และพฤติกรรมที่แสดงออก อีกทั้งยังมีความสำคัญในการควบคุมการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกาย จึงสามารถก่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงและผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้อย่างมีนัยสำคัญ องค์การอนามัยโลก (WHO) และ United States Environmental Protection Agency (USEPA) ได้ทำการจัดสารกลุ่มนี้เป็นสารที่คุกคามสุขภาพ ต่อมนุษย์เมื่อได้รับสารกลุ่มนี้ในปริมาณน้อยและเป็นระยะเวลาสั้น เนื่องจากพบการปนเปื้อนของสารเหล่านี้ในสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง

สารฮอร์โมนเพศ เช่น เอสโตรเจน (estrone, E1) เอสตราไดโอดอล (estradiol, E2) และเอสโตรโอดอล (estriol, E3) เป็นสารในกลุ่ม EDCs เป็นฮอร์โมนเพศที่พบได้ทั้งในเพศหญิงและในเพศชาย แต่จะมีปริมาณมากในเพศหญิง สารเหล่านี้มีหน้าที่ทำให้ร่างกายพัฒนาเจริญเติบโตพร้อมแสดงลักษณะเด่นของเพศหญิง ผลของการรบกวนการทำงานของระบบต่อมไร้ท่อจากฮอร์โมนเพศ อาจก่อให้เกิดภาวะไม่เจริญพันธุ์ ด้อยพัฒนาการทางเพศ การแสดงออกทางเพศลดลง เปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อสิ่งเร้า เปลี่ยนแปลงการทำงานของต่อมไทรอยด์ ต่อมหมวกไต อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดมะเร็งที่อวัยวะต่างๆ และการพิการแต่กำเนิด (Caliman and Gavrilescu, 2009)

การศึกษาผลกระทบจากฮอร์โมนเพศในมนุษย์ยังมีข้อมูลไม่ชัดเจน แต่ในสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นมีรายงานผลกระทบในสิ่งมีชีวิตอื่นๆ โดยเฉพาะในสัตว์น้ำประเภทปลา ซึ่งพบว่าปลาที่ได้รับสารในกลุ่มฮอร์โมนเพศในปริมาณน้อยเป็นระยะเวลาสั้น สามารถทำให้ปลาเพศผู้กลายเป็นเพศเมียและไม่สามารถสืบพันธุ์ ส่งผลให้ปลาสูญพันธุ์ได้ เนื่องจากสารฮอร์โมนนี้ถูกใช้ในเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและการปศุสัตว์ เช่น การเพาะพันธุ์ปลา การแปลงเพศปลาโดยวิธีการใช้ฮอร์โมนผสมอาหาร หรือฉีดเข้าตัวปลาเพื่อการขยายพันธุ์เร่งการเจริญเติบโต และป้องกันโรค การฉีดฮอร์โมนเข้าไปในวงเพื่อกระตุ้นการเป็นสัดในการผสมเทียม (สรรเพชญ, 2554) ร่างกายของสัตว์จะรับสารดังกล่าวได้เพียงบางส่วนแล้วขับถ่ายออกจากร่างกายทำให้ส่วนที่สัตว์ขับถ่ายออกมามีสารดังกล่าวปนเปื้อน จากการล้างทำความสะอาดแหล่งที่อาศัยของสัตว์ หรือการเปลี่ยนถ่ายน้ำที่ใช้ในการเลี้ยงสัตว์น้ำ ทำให้สารฮอร์โมนมีโอกาสปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้ โดยที่สาร E1 E2 และ E3 มีคุณสมบัติคงทนสูงในดิน เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับกับสารอินทรีย์ (organic carbon partition coefficient,  $K_{oc}$ ) เท่ากับ 2.97 3.14 และ 3.47 ตามลำดับ (Ying et al., 2002) และมีค่าการละลายน้ำ (water solubility) เท่ากับ 13 3.9 และ 13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Combalbert and Hernandez, 2010) และเมื่อสารเหล่านี้ที่ปนเปื้อนในน้ำถูกปล่อยเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งระบบบำบัดในปัจจุบันไม่ได้ถูกออกแบบไว้สำหรับการกำจัด E1 E2 และ E3 ส่งผลให้สารเหล่านี้จึงถูกปล่อยสู่ธรรมชาติทั้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติโดยตรง หรือถูกดูดซับโดยดินหรือกากตะกอนจากระบบ

บำบัดน้ำเสีย ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในภายหลัง ในปัจจุบันมีการศึกษาวิธีการบำบัดสาร  
ฮอร์โมนเพศ E1 E2 และ E3 หลายหลายวิธีเช่นการใช้ถ่านกัมมันต์ร่วมกับโอโซนในการบำบัดสารฮอร์โมน  
เพศในแหล่งน้ำโดยถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่ดูดซับสารฮอร์โมนเพศไว้ทำให้การบำบัดสารด้วยโอโซนมี  
ประสิทธิภาพดีขึ้น (Ogata et al., 2011) หรือการนำสารออกซิแดนซ์หรือสารที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนใน  
กระบวนการออกซิเดชันเพื่อใช้ในการบำบัด ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำสารออกซิแดนซ์คือสารเปอร์แมงกา-  
เนตมาทำการบำบัดสารฮอร์โมนเพศ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิแดนซ์ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมี  
ลักษณะเป็นผลึกหรือเกล็ดสีม่วง มีความสามารถในการละลายน้ำสูง โดยทางเคมีมีฤทธิ์เป็นต่างอ่อนๆ เป็น  
สารที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดสารตกค้างในสิ่งแวดล้อมอย่างกว้างขวาง (Lanhua et al., 2010)

การศึกษากลุณพลศาสตร์ระหว่าง E3 และเปอร์แมงกาเนตยังไม่ปรากฏในงานวิจัยใด ซึ่งผล  
ดังกล่าวมีความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดสารฮอร์โมนเพศในสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้  
ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษากลุณพลศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่างสารฮอร์โมนเพศเอสโตรเจน (E3) กับ  
สารออกซิแดนซ์เปอร์แมงกาเนต เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดสารฮอร์โมนเพศใน  
แหล่งน้ำเสียต่อไป

## วิธีดำเนินการวิจัย

1. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา
  - 1.1 อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High-performance liquid chromatography
    - 1.1.1 เครื่อง HPLC ยี่ห้อ Waters รุ่น e2695
    - 1.1.2 เครื่องตรวจวัดชนิด Photodiode Array Detector ยี่ห้อ Waters รุ่น 2998
    - 1.1.3 คอลัมน์ Phenomenex ชนิด kinetex 5 $\mu$ m C18 100 °A (250 $\times$ 4.6 มิลลิเมตร บรรจุ  
อนุภาคขนาด 5 ไมครอน)
2. สารเคมี
  - 2.1 Potassium Permanganate (Ajax Finechem, New South Wales, Australia)
  - 2.2 Estriol, E3 (Sigma-Aldrich, MO, USA)
  - 2.3 Ascorbic acid (Ajax Finechem, New South Wales, Australia)
  - 2.4 Acetonitrile (Mallinckrodt, St. Louis, NJ, USA)
3. วิธีการศึกษา
  - 3.1 การศึกษาค่าคงที่จลนพลศาสตร์ระหว่าง E3 กับเปอร์แมงกาเนต  
ทำการทดลองในภาชนะขนาด 250 มิลลิลิตร สารละลายเริ่มต้นเป็นสารละลาย E3 ความ  
เข้มข้น 25 ไมโครโมลาร์ ซึ่งเท่ากับความเข้มข้น 7.21 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดสอบประสิทธิภาพการ  
บำบัดนั้นเริ่มขึ้น ( $t_0$ ) เมื่อมีการใส่สารละลายโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีความเข้มข้น 20,000  
มิลลิกรัมต่อลิตร ตามความเข้มข้นที่ออกแบบไว้ คือ 250, 200, 150, 100, 50, 25 และ 2.5 ไมโครโม  
ลาร์ ซึ่งเท่ากับค่า 29.75, 23.80, 17.85, 11.90, 5.96, 2.97 และ 1.49 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ  
ปริมาตรสารละลายรวมของสารละลายเท่ากับ 100 มิลลิลิตร โดยทำการทดลองจะทำทั้งหมดสามซ้ำ  
เมื่อถึงเวลาที่กำหนดที่ 1, 2.5, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที จะเก็บตัวอย่างปริมาตร 1

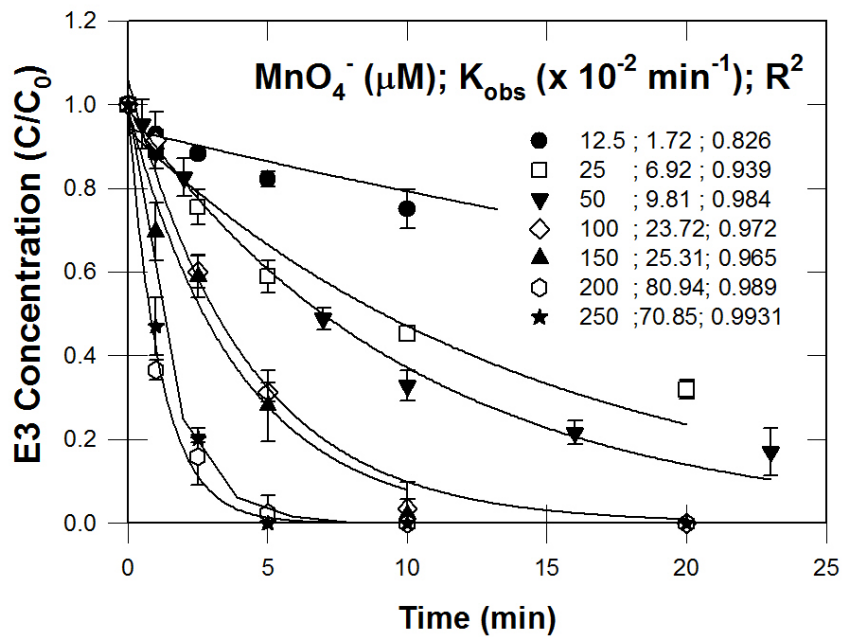
มิลลิลิตร ไปใส่ไว้ใน centrifuge tube ขนาด 1.5 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลาย ascorbic acid เข้มข้น 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร เพื่อใช้หยุดปฏิกิริยา หลังจากนั้นจึงนำหลอดไปปั่นเหวี่ยงที่ 14,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดตะกอนที่อาจเกิดขึ้น จากนั้นดูดสารละลายใส่ในขวดเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ E3 ที่เหลืออยู่ต่อไป สำหรับรายละเอียดการวิเคราะห์นั้นผู้วิจัยจะประยุกต์ตามวิธีของ Sakulthaew และ Chokeyaroenrat (2016)

### 3.2 สภาพการวิเคราะห์ปริมาณ E3 โดย HPLC

สำหรับการวิเคราะห์ E3 โดย HPLC นั้นผู้วิจัยใช้วิธีของ Sakulthaew and Chokeyaroenrat (2016) โดยมีสภาพที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ดังนี้ mobile phase สำหรับชะสาร E3 คือ acetonitrile และน้ำ ในอัตราส่วน 45:55 ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ที่หลอดการวิเคราะห์สาร (Isocratic elution) คอลัมน์ที่ใช้ในการแยกสาร E3 เป็นคอลัมน์ Phenomenex ชนิด kinetex 5 $\mu$ m C18 100 °A (250 $\times$ 4.6 มิลลิเมตร บรรจุอนุภาคขนาด 5 ไมครอน) ตัวตรวจวัดที่ใช้คือ UV Detector ชนิด diode array โดยตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 200 นาโนเมตร โดยฉีดสารตัวอย่างปริมาตร 20 ไมโครลิตร

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาค่าคงที่จลนพลศาสตร์ระหว่างสารฮอร์โมนเพศ Estriol (E3) กับสารเปอร์แมงกาเนต การศึกษาการลดลงของสารฮอร์โมนเพศ E3 เมื่อใช้สารเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน เป็นสารออกซิแดนซ์



รูปที่ 1 แสดงการลดลงของสาร E3 เมื่อบำบัดด้วยเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้นต่างกัน

ในการทดลองเมื่อเริ่มปฏิกิริยาระหว่างสาร E3 และเปอร์แมงกาเนตผู้ทำการทดลองได้เก็บตัวอย่างในเวลา 1, 2.5, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90 และ 120 นาที แต่เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างสาร E3 กับสารเปอร์แมงกาเนตเกิดอย่างรวดเร็วเมื่อใช้ความเข้มข้นของเปอร์แมงกาเนตที่สูง จึงนำเสนอผลการทดลอง (รูปที่ 1) เพียงแค่ 25 นาทีเท่านั้นเพื่อให้เห็นลักษณะการลดลงของ E3 ได้อย่างชัดเจน จากภาพที่ 1 แสดงการศึกษาจลนพลศาสตร์โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของ E3 คงที่และเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้น

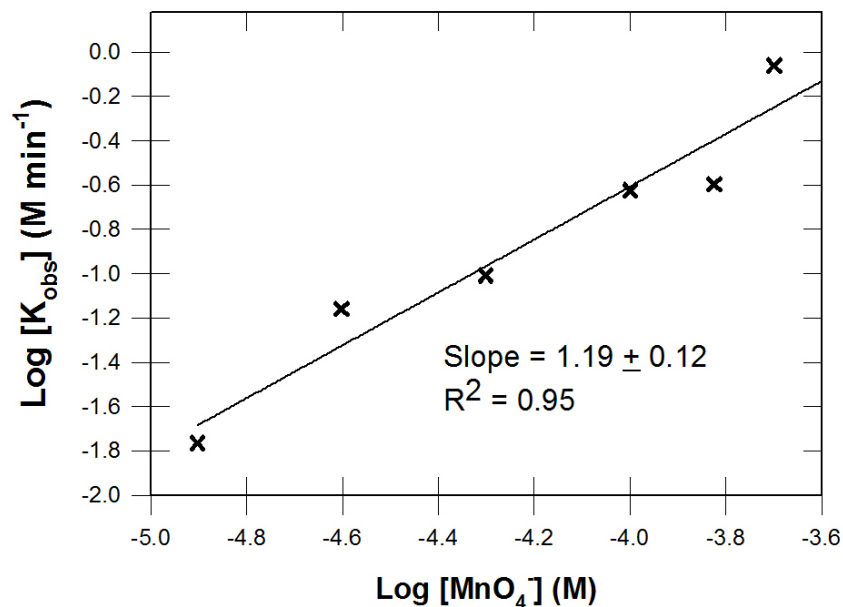
แตกต่างกันที่ 12.5 - 250 ไมโครโมลาร์เป็นสารออกซิแดนซ์ พบว่าลักษณะการลดลงของสาร E3 เมื่อเทียบกับเวลาการลดลงเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SigmaPlot ในการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความเข้มข้นและคำนวณสมการ pseudo first-order ของปฏิกิริยาในแต่ละความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์แมงกาเนต 12.5, 25, 50, 100, 150 และ 250 ไมโครโมลาร์ พบว่าอัตราการสลายตัวของสาร E3 ( $K_{obs}$ ) แตกต่างกันได้แก่ 0.0172, 0.0692, 0.0981, 0.237, 0.253, 0.809 และ 0.708  $\text{min}^{-1}$  ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์แมงกาเนต 12.5 ไมโครโมลาร์ มีอัตราการสลายตัวของสารต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0172  $\text{min}^{-1}$  เมื่อเทียบกับค่าอัตราการสลายตัวของสารที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์แมงกาเนต 250 ไมโครโมลาร์ มีอัตราการสลายตัวเท่ากับ 0.708  $\text{min}^{-1}$  จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์แมงกาเนตมากขึ้น อัตราการสลายตัวของสารก็จะสูงขึ้นเช่นกัน

ปฏิกิริยาระหว่างสาร E3 และความเข้มข้นของเปอร์แมงกาเนตสามารถเขียนสมการทั่วไปของอัตราดังสมการที่ 1-3

$$r = -\frac{1}{\alpha} \frac{d[E3]}{dt} = k [E3]^\alpha [MnO_4^-]^\beta \quad (1) \quad \text{โดยที่ } \alpha \text{ คืออันดับปฏิกิริยาของ E3}$$

$$r = k_{obs} [E3]^\alpha \quad (2) \quad \text{โดยที่ } \beta \text{ คืออันดับปฏิกิริยาของ } MnO_4^-$$

$$k_{obs} = k [MnO_4^-]^\beta \quad (3)$$



รูปที่ 2 กราฟแสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Log [MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>] และ Log [K<sub>obs</sub>]

นำผลการทดลองค่าอัตราการสลายตัวของสาร ( $K_{obs}$ ) และความเข้มข้นของเปอร์แมงกาเนตจากการทดลองก่อนหน้า (รูปที่ 1) มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Log [MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>] และ Log [K<sub>obs</sub>] ในรูปของลอการิทึมดังที่แสดงผลในภาพที่ 2 สมการทั่วไปของอัตราค่า  $\beta$  คือปฏิกิริยาที่พิจารณาที่สารเปอร์แมงกาเนต จึงสามารถหาค่า  $\beta$  โดยใช้สมการในรูปของลอการิทึมดังสมการที่ 4

$$\log k_{obs} = \log k + \beta \text{Log } [MnO_4^-]_0 \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 นำมาคำนวณความชัน ( $\beta$ ) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SigmaPlot มีค่าเท่ากับ  $1.19 \pm 0.12$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 จึงสามารถบ่งบอกได้ว่าปฏิกิริยาของสารเปอร์แมงกาเนต (pseudo first-order) เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และมีค่าสัมประสิทธิ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.95

### สรุปผลการศึกษา

ผลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์ระหว่าง E3 และเปอร์แมงกาเนต จากค่า  $\beta$  มีค่าเท่ากับ  $1.19 \pm 0.12$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาระหว่างฮอร์โมนเพศ E3 และ  $\text{MnO}_4^-$  เป็นปฏิกิริยาลำดับ 1 นอกจากนี้เนื่องจากในน้ำเสียอาจมีการปนเปื้อนสารฮอร์โมนเพศชนิดอื่นหรือสารอินทรีย์ต่างๆ ฉะนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้อาจต้องคำนึงถึงปริมาณการใช้สารออกซิแดนต์ (oxidant demand) ก่อนเพื่อที่จะสามารถเลือกปริมาณและความเข้มข้นของเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสมในการใช้งานจริงได้

### เอกสารอ้างอิง

- สรรพเชษฐ โสภณ. 2554. โปรแกรมการกระตุ้นการเป็นสัด เพื่อการผสมเทียม. ในเอกสารงานประชุมวิชาการของสมาคมส่งเสริมการเลี้ยงโคพันธุ์บราห์มัน, กรุงเทพฯ. น.58-69.
- Caliman, F.A., Gavrilesu, M. 2009. Pharmaceuticals, Personal Care Products and Endocrine Disrupting Agents in the Environment – A Review. Clean-Soil Air Water. 37 (2): 277–303.
- Combalbert, S., Hernandez-Raquet, G. 2010. Occurrence, fate, and biodegradation of estrogens in sewage and manure. Appl. Microbiol. Biotechnol. 86(6): 1671-1692.
- Deblonde. T., Cossu-Leguille, C., Hartemann, P. 2011. Emerging pollutants in wastewater: a review of the literature. Int. J. Hyg. Environ. Health. 214(2): 442–448.
- Lanhua, H., Heather, M., Timothy, J. 2010. Kinetics of contaminant degradation by permanganate. Environ. Sci. Technol. 44(2): 6416–6422.
- Ogata. F., Tominaga, H., Yabutain, H., Kawasaki, N. 2011. Removal of estrogens from water using activated carbon and ozone. J. Oleo. Sci. 60(1): 609-611.
- Ying, G.G., Kookana, R. S., Ru, Y.J. 2002. Occurrence and fate of hormone steroids in the environment. Environ. Int. 28(1): 545-551.