

ประสิทธิภาพการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งปศุสัตว์ด้วย
กระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนสชัน



นภาพ สุทัศน์วิริยะ

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

มีนาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

ประสิทธิภาพการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งปศุสัตว์ด้วยกระบวนการโฟโต
แคตตาไลติกไอโซเนนซัน



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

มีนาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

EFFICIENCY OF STEROID HORMONES TREATMENT FROM LIVESTOCK SOURCE BY
PHOTOCATALYTIC OZONATION



NAWAPHOP SUTASWIRIYA

A Thesis Submitted to University of Phayao
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Engineering Degree in Environmental Engineering
March 2022

Copyright 2022 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ประสิทธิภาพการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งปศุสัตว์ด้วยกระบวนการโฟโต
แคตาไลติกไอโซเนนซัน

ของ นวภพ สุทัศน์วิริยะ

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร. พิลานี ไวถนอมสัจด์ย์)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

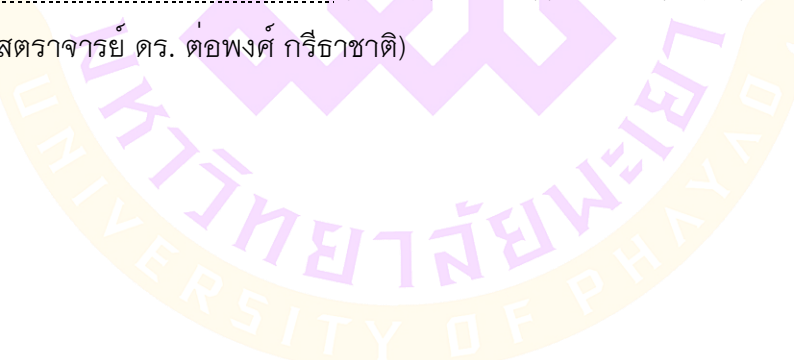
(รองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กวีธาดา)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เนติยา กวีธาดา)

..... คณบดีคณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม

(รองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กวีธาดา)



เรื่อง:	ประสิทธิภาพการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งปศุสัตว์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่น
ผู้วิจัย:	นภาพ สุทัศน์วิริยะ, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2564
อาจารย์ที่ปรึกษา:	รองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กวีธาดา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เนติยา กวีธาดา
คำสำคัญ:	ฟาร์มปศุสัตว์, สเตียรอยด์ฮอร์โมน, เอสโตรเจน, แอนโดรเจน, กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างจากแหล่งปศุสัตว์รอบบริเวณกว๊านพะเยาด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่นในสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ pH 5.0 ปริมาณโอโซน 400 mg/L และรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) ที่ความยาวคลื่น 254 nm เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียของฟาร์มปศุสัตว์ จากการศึกษาการตกค้างส่วนใหญ่พบฮอร์โมน estrone (E1) ความเข้มข้น 0.56–97.10 ng/g 17 β -estradiol (β E2) ความเข้มข้น 10.08–1,366 ng/g 17 α -ethynylestradiol (EE2) ความเข้มข้น 0.19–44.2 ng/g testosterone (T) ความเข้มข้น 0.004 – 0.46 ng/g และ 17 α -methyltestosterone (MT) ความเข้มข้น 0.08–1.72 ng/g ในมูลสัตว์และดิน ส่วนในน้ำเสียพบ β E2 ความเข้มข้น 472.93 ng/L EE2 ความเข้มข้น 103.02 ng/L และ MT ความเข้มข้น 4.24 – 50.47 ng/L เมื่อทำการประเมินความเสี่ยงจากสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำเสียพบว่ามีเพียง β E2 EE2 และ MT ที่มีความเสี่ยง อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์การตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในกว๊านพะเยา แสดงให้เห็นว่าสารตกค้างไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ (RQ 0.002–144.5) และไม่พบการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในโรงผลิตน้ำประปาและน้ำประปา จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการทดลองด้วยการทำน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1 L และทำการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่นในสภาวะที่เหมาะสม โดยทำการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการเติมฮอร์โมนความเข้มข้น 1,000 เท่าของความเข้มข้นที่พบในน้ำเสียจริงจากฟาร์มปศุสัตว์ และน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการเติมฮอร์โมนความเข้มข้นที่ค่าความสามารถในการละลายน้ำสูงสุด คือ β E2 13 mg/L EE2 4.8 mg/L และ MT 3 mg/L พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 2 ตัวอย่างมีประสิทธิภาพเท่ากันคือ สามารถบำบัดฮอร์โมน β E2 EE2 และ MT ได้ 100% เมื่อบำบัดที่เวลา 25 นาที เป็นต้นไป และเมื่อทำการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่น พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) สามารถลดค่า TOC ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 1,000 เท่าของที่พบในปศุสัตว์ได้ 99.99% และในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นที่ค่าความสามารถในการละลายน้ำสูงสุดได้ 99.97% หลังจากบำบัดที่เวลา 30 นาที เป็นต้นไป ซึ่งมีความสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการบำบัดฮอร์โมน อีกทั้งยังไม่มีการออกฤทธิ์ทางเพศหญิงและการออกฤทธิ์ทางเพศชายภายหลังการบำบัดที่เวลา 15 นาที เป็นต้นไป จึงสรุปได้ว่ากระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่นสามารถบำบัดฮอร์โมน β E2 EE2 และ MT ที่ตกค้างในน้ำเสียของฟาร์มปศุสัตว์ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้สมบูรณ์

Title: EFFICIENCY OF STEROID HORMONES TREATMENT FROM LIVESTOCK SOURCE BY PHOTOCATALYTIC OZONATION

Author: Nawaphop Sutaswiriyā, Thesis: M.Eng. (Environmental Engineering), University of Phayao, 2021

Advisor: Associate Professor Dr. TORPONG KREETACHAT Co–advisor Assistant Professor Dr.Nathiya Kreetachat

Keywords: Steroid hormones, Estrogen, Androgen, Photocatalytic ozonation process, Livestock farms

ABSTRACT

This research was to study the efficiency of residual steroid hormones treatment from livestock farms around Phayao lake by photocatalytic ozonation process with suitable conditions, i.e. pH at 5.0, ozone content of 400 mg/L, and ultraviolet (UV–C) radiation at a wavelength of 254 nm for being a guideline for application in livestock farms wastewater treatment systems. Studies showed that most of the hormone residues are estrone (E1) at concentration 0.56–97.10 ng/g, 17 β –estradiol (β E2) at 10.08–1,366 ng/g, 17 α –ethynylestradiol (EE2) at 0.19–44.2 ng/g, testosterone (T) at 0.004–0.46 ng/g, and 17 α –methyltestosterone (MT) at 0.08–1.72 ng/g in animal feces and soil. While in the wastewater, only β E2, EE2, and MT were detected at 472.93, 103.02, and 4.24–50.47 ng/L, respectively. The assessment of the risk of steroid hormone residues in wastewater, showed that β E2, EE2, and MT were at risk. However, the analysis of steroid hormone residues in Phayao Lake demonstrated that the residues did not severely affect aquatic organisms (RQs 0.002–144.5), and no steroid hormones residues were observed in the water treatment plant or tap water. Thereafter, the obtained values were tested using the 1 L. synthetic wastewater and treated by photocatalytic ozonation process under suitable conditions. The synthetic wastewater was created by adding hormones at 1,000 times the concentration found in wastewater from the livestock farms, and the synthetic wastewater was created by adding hormones concentrations at the highest solubility values were β E2 13 mg/L, EE2 4.8 mg/L, and MT 3 mg/L. It was found that the efficiency of the synthetic wastewater treatment of both samples was the same, which was 100% removal of β E2, EE2, and MT after 25 minutes of treatment. When testing products formed after photocatalytic ozonation process treatment, it was found that the treatment efficiency of total organic compound (TOC) was able to reduce TOC after 30 minutes of treatment by 99.99% of the synthetic wastewater was created by adding hormones at 1,000 times the concentration found in wastewater from the livestock farms and 99.97% of the synthetic wastewater was created by adding hormones at a concentration at the highest solubility values, which was consistent with the treatment efficiency of steroid hormone residues. There was no estrogenic activity and androgenic activity after 15 minutes of treatment. It could be concluded that the photocatalytic ozonation process was able to treat β E2, EE2, and MT residues in livestock farms wastewater to carbon dioxide and water completely.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ในหัวข้อ “ประสิทธิภาพการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งปศุสัตว์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซเนนชัน” จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างอยู่ในน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ ซึ่งเป็นการบูรณาการความรู้ทั้งหมดที่ผู้วิจัยได้ศึกษามา สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ต่อพงศ์ กรีธาชาติ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เนทียา กรีธาชาติ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่มอบโอกาสในการทำวิจัยนี้และให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมทั้งแนวคิดคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยและผู้วิจัย ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ ขอขอบพระคุณ ดร.พิลาณี ไวถนอมสัจย์ ผู้อำนวยการ สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งมาเป็นประธานสอบเล่มวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ต่อพงศ์ กรีธาชาติ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เนทียา กรีธาชาติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์และทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2560 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ วช. ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยจนเกิดเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณคณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยาที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำวิจัย รวมถึงคณาจารย์และเจ้าหน้าที่วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณเพื่อน ๆ ระดับปริญญาโทสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคน ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุนและให้กำลังใจกันเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณครอบครัวทุกคนผู้เป็นที่รักที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนในทุก ๆ ด้านของการศึกษาครั้งนี้ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์อยู่มิใช่น้อย

นภาพ สุทัศน์วิริยะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
สารรบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อ (Endocrine disrupting compounds: EDCs)	5
สารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน (Steroid Hormones)	6
กลไกการทำงานของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนในสิ่งมีชีวิต	11
ผลกระทบของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน	13
แหล่งที่มาและการปลดปล่อยสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนของสิ่งมีชีวิต	13
การตกค้างของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนในสิ่งแวดล้อม	15
กระบวนการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน.....	16
กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Processes).....	19
กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่น (Photocatalytic ozonation)	26

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....27

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย29

 การศึกษาสถานการณ์การตกค้างของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งกำเนิดปศุสัตว์รอบ
 กว๊านพะเยา..... 31

 การศึกษาการตกค้างของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนในกว๊านพะเยา ระบบผลิตน้ำประปา
 ของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา และน้ำประปาในจังหวัดพะเยา39

 การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยเทคนิค LC-MS/MS 42

 การควบคุมคุณภาพวิธีการสกัดตัวอย่างด้วยค่า %Recovery43

 การประเมินความเสี่ยงจากการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมน 43

 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแค
 ตาไลติกโอโซนเนชั่น46

บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย50

 ผลการสำรวจข้อมูลฟาร์มปศุสัตว์รอบกว๊านพะเยา50

 ผลการศึกษาการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในกว๊านพะเยา60

 ผลการศึกษาการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วน
 ภูมิภาคจังหวัดพะเยา และน้ำประปาในจังหวัดพะเยา 64

 การประเมินความเสี่ยงจากสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำเสียของฟาร์มปศุสัตว์66

 การประเมินความเสี่ยงจากสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำของกว๊านพะเยา ระบบผลิต
 น้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา และน้ำประปาในจังหวัดพะเยา ...68

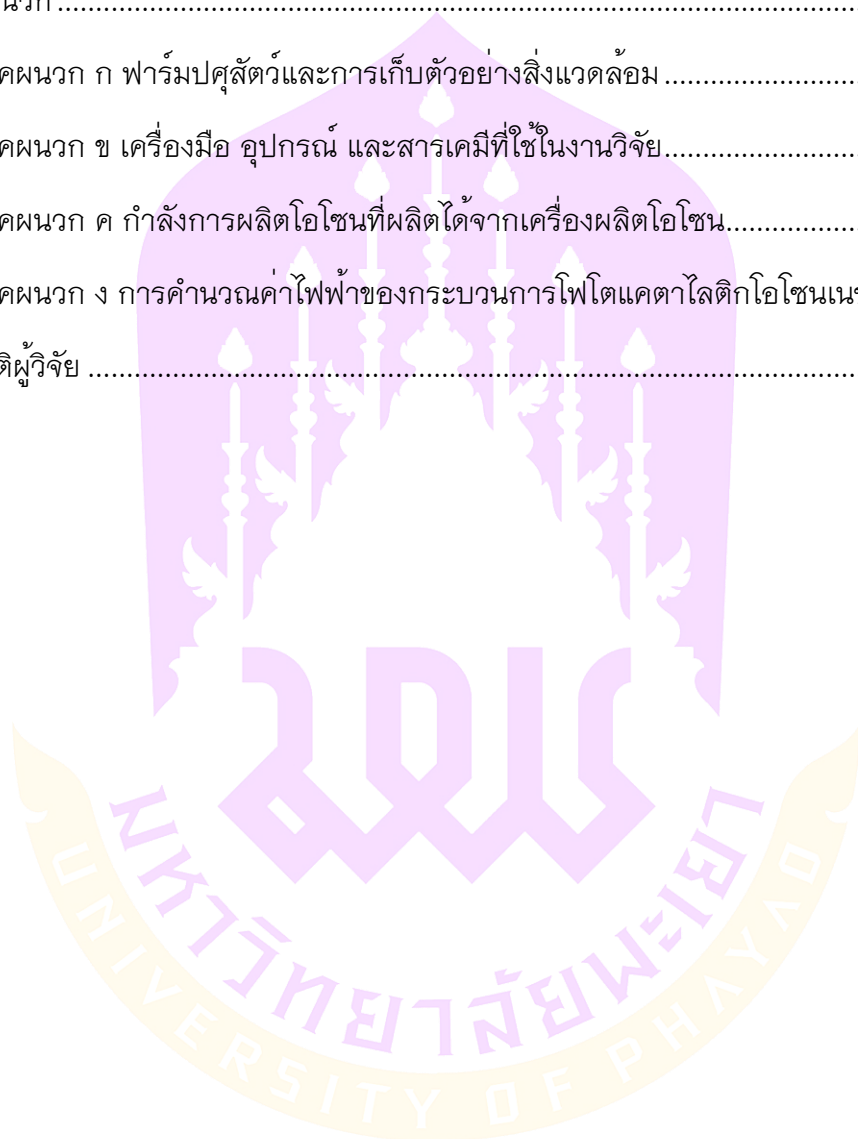
 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไล
 ติกโอโซนเนชั่น..... 70

 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการบำบัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแค
 ตาไลติกโอโซนเนชั่น 73

 การประมาณการค่าใช้จ่ายของกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโอโซนเนชั่น..... 77

บทที่ 5 บทสรุป.....80

สรุปผลการวิจัย	80
ข้อเสนอแนะ.....	80
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	91
ภาคผนวก ก ฟาร์มปศุสัตว์และการเก็บตัวอย่างสิ่งแวดล้่อม	92
ภาคผนวก ข เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	96
ภาคผนวก ค กำล้งการผลิตไอเซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตไอเซน.....	101
ภาคผนวก ง การคำนวณค่าไฟฟ้าของกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอเซนเนชัน	102
ประวัติผู้วิจัย	104



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 โครงสร้างฮอร์โมนกลุ่มเอสโตรเจน	8
ตาราง 2 โครงสร้างฮอร์โมนกลุ่มแอนโดรเจน.....	9
ตาราง 3 การปลดปล่อยสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนของมนุษย์	15
ตาราง 4 การตกค้างของฮอร์โมนกลุ่มเอสโตรเจน.....	16
ตาราง 5 การสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลของ UV/O ₃ และ UV/ H ₂ O ₂	27
ตาราง 6 สัดส่วนของเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน	42
ตาราง 7 ค่า EEF และ TEF สำหรับการคำนวณ EEQ และ TEQ	44
ตาราง 8 ค่า HC5 และ PNEC ของสเตียรอยด์ฮอร์โมน	45
ตาราง 9 เกณฑ์การแปลผลค่า RQ	46
ตาราง 10 ลักษณะการเลี้ยงของฟาร์มปลุสตีว	53
ตาราง 11 การให้อาหารและยาที่ใช้ในฟาร์มปลุสตีว.....	53
ตาราง 12 พิกัดฟาร์มปลุสตีวในงานวิจัยและการจัดการของเสียของแต่ละฟาร์ม.....	54
ตาราง 13 การตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในแหล่งน้ำผิวดินอื่นเปรียบเทียบกับ	64
ตาราง 14 ความเสี่ยงจากสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำเสียของฟาร์มปลุสตีว	67
ตาราง 15 ความเสี่ยงจากสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำตัวอย่างจากกว้านพะเยา ระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา และน้ำประปาในจังหวัดพะเยา.....	69
ตาราง 16 ค่าใช้จ่ายของกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซเนนซัน.....	78
ตาราง 17 สารเคมีสำหรับการเตรียมอาหารและ Stock ยีสต์ (Agar).....	98
ตาราง 18 สารเคมีสำหรับการเตรียมอาหารสำหรับตรวจสอบฮอร์โมนเอสโตรเจน	99
ตาราง 19 สารเคมีสำหรับการเตรียมอาหารสำหรับตรวจสอบฮอร์โมนแอนโดรเจน	100

ตาราง 20 ปริมาณไอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตไอโซน101



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 ชนิดของสาร Endocrine disrupting compounds.....	6
ภาพ 2 โครงสร้างฮอร์โมน 17 แอลฟา-เอทีนิลเอสทราไดออล	9
ภาพ 3 โครงสร้างฮอร์โมน 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรน	10
ภาพ 4 ภาพรวมการผลิตฮอร์โมนเพศ.....	10
ภาพ 5 การทำปฏิกิริยาแทนที่ฮอร์โมนของ EDCs	11
ภาพ 6 กระบวนการเมตาบอลิซึมของฮอร์โมนเอสโตรเจน ในมนุษย์	12
ภาพ 7 แหล่งที่มาต่าง ๆ ของฮอร์โมน	14
ภาพ 8 การสลายตัวของฮอร์โมนเอสโตรเจน	17
ภาพ 9 การแปรสภาพของฮอร์โมนเอสโตรเจน ในระหว่างกระบวนการแอนแอโรบิค.....	18
ภาพ 10 ช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV).....	20
ภาพ 11 กลไกการฆ่าเชื้อโรคของ UV	21
ภาพ 12 โครงสร้างโมเลกุลของโอโซน.....	22
ภาพ 13 กระบวนการผลิตโอโซนด้วยวิธี Corona discharge	23
ภาพ 14 แผนการดำเนินการวิจัย.....	30
ภาพ 15 ขอบเขตพื้นที่ดำเนินการสำรวจรอบกวนพะเยาฝั่งตะวันตกรัศมี 10 กิโลเมตร	31
ภาพ 16 ตัวอย่างมูลสัตว์และดิน	33
ภาพ 17 การแยกชั้นตกตะกอนของตัวอย่างมูลสัตว์และดิน.....	33
ภาพ 18 การปรับสภาพ HLB cartridge ก่อนการสกัดน้ำตัวอย่าง.....	34
ภาพ 19 การสกัดน้ำตัวอย่าง	35
ภาพ 20 การล้าง HLB cartridge ด้วย Methanol 5%	35
ภาพ 21 การชะสารตัวอย่างออกจาก HLB cartridge	36

ภาพ 22 การระเหยสารสกัดด้วยก๊าซไนโตรเจน	37
ภาพ 23 การละลายสารตัวอย่างด้วย Methanol.....	37
ภาพ 24 การกรองสารละลายเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS.....	38
ภาพ 25 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียจากปศุสัตว์.....	38
ภาพ 26 ตำแหน่งจุดเก็บน้ำตัวอย่างในกวนพะเยา การประปาส่วนภูมิภาค	40
ภาพ 27 ผังแสดงกระบวนการผลิตน้ำประปาและจุดเก็บน้ำตัวอย่าง.....	41
ภาพ 28 ถังปฏิกริยาโฟโตแคตาไลติกไอโซเนนชั่น	47
ภาพ 29 ตำแหน่งฟาร์มปศุสัตว์ในงานวิจัย (Pig = ฟาร์มสุกร, BC = ฟาร์มไก่เนื้อ,	51
ภาพ 30 การตกค้างของฮอร์โมนเอสโตรเจนในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมจากฟาร์มปศุสัตว์	57
ภาพ 31 การตกค้างของฮอร์โมนแอนโดรเจนในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมจากฟาร์มปศุสัตว์.....	59
ภาพ 32 ตำแหน่งจุดเก็บน้ำตัวอย่างในกวนพะเยา (หมายเลข 1-5; (1) จุดสูบน้ำการ	62
ภาพ 33 การตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในตัวอย่างน้ำกวนพะเยา	63
ภาพ 34 การตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในน้ำดิบจากกวนพะเยา ระบบผลิต.....	66
ภาพ 35 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมฮอร์โมนเอสโตรเจนและฮอร์โมนแอน	72
ภาพ 36 ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon: TOC) ของ (ก) น้ำเสีย	75
ภาพ 37 สีตัวอย่างของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Bioassay ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 25.....	76
ภาพ 38 การทดสอบการออกฤทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่เหมือนกับฮอร์โมนเอสโตรเจน.....	77
ภาพ 39 ฟาร์มสุกร	92
ภาพ 40 การเก็บตัวอย่างสิ่งแวดล้อมฟาร์มสุกร.....	92
ภาพ 41 ฟาร์มไก่เนื้อ	93
ภาพ 42 ฟาร์มไก่ไข่.....	93
ภาพ 43 ฟาร์มไก่ไข่.....	94
ภาพ 44 ฟาร์มโคนม.....	94
ภาพ 45 ตัวอย่างสิ่งแวดล้อมฟาร์มโคนม	95

ภาพ 46 การเก็บตัวอย่างน้ำประปาโรงพยาบาลพะเยา95



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารรบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อ (Endocrine disrupting compounds: EDCs) เป็นมลสารที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากการส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและมนุษย์ สาร EDCs จากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์สามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมทั้งในน้ำ อากาศ ดิน และอาหาร สารเคมีที่อยู่ในกลุ่ม EDCs ส่วนใหญ่มีคุณสมบัติละลายได้ดีในไขมัน และย่อยสลายยาก ทำให้ตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้นาน สาร EDCs กลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน เป็นหนึ่งในสาร EDCs ที่ได้รับความสนใจ โดยไปขัดขวางการทำงานของฮอร์โมน (Hormone) ที่ผลิตโดยต่อมไร้ท่อ (Endocrine gland) ส่งผลให้ระบบอวัยวะต่าง ๆ ภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิตที่ทำงานภายใต้การควบคุมของฮอร์โมนเกิดความผิดปกติ ก่อให้เกิดอันตรายด้านต่าง ๆ ทั้งในมนุษย์และสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น จากงานวิจัยพบว่าฮอร์โมนเอสโตรเจน (Estrogen) ที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมหากได้รับในปริมาณที่มากพอจะส่งผลให้เกิดมะเร็งเต้านมในผู้หญิง และมะเร็งต่อมลูกหมากในผู้ชาย รวมถึงส่งผลต่อสรีรวิทยาของปลาและการเจริญพันธุ์ของสัตว์ (Adeel et al., 2017) อีกทั้งฮอร์โมนเอสโตรเจน ยังส่งผลทำให้จำนวนสเปิร์มลดลงและเกิดการผิดปกติของระบบสืบพันธุ์เพศชาย (Epstein, 1997) ทั้งนี้มีการกำหนดค่าระดับที่ยอมรับได้ต่อวัน (Acceptable Daily Intake : ADI) ของฮอร์โมน 17β -estradiol (βE_2) อยู่ที่ 0-0.05 ไมโครกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว/วัน และของฮอร์โมน Testosterone (T) อยู่ที่ 0-2 ไมโครกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักตัว/วัน ตามข้อมูลการระบาดวิทยาของมนุษย์ (Jeong et al., 2010)

ในการทำฟาร์มปลาสัตว์นั้นได้มีการนำ 17α -Ethinylestradiol (EE2) มาใช้เพื่อเพิ่มน้ำหนักตัวของสัตว์ และยังมีการใช้เพื่อรักษาความผิดปกติของระบบสืบพันธุ์ (Xu et al., 2018). นอกจากนี้ยังพบการนำ Methyltestosterone (MT) มาใช้ในการประมงเพื่อเปลี่ยนเพศลูกปลาเป็นตัวผู้ (Wang et al., 2017) เพื่อเพิ่มน้ำหนักของผลผลิตปลาเพศผู้ ดังนั้นจากการใช้ฮอร์โมนในฟาร์มปลาสัตว์ดังกล่าวข้างต้น จึงอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนของฮอร์โมนสังเคราะห์สู่สิ่งแวดล้อมได้ผ่านทางสารคัดหลั่งและสิ่งปฏิกูลของสัตว์

การบำบัดด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation process : AOPs) เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก โดยเปลี่ยนโครงสร้างและทำให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ความเป็นพิษลดลงไม่

เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชัน (Photocatalytic Ozonation) เป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ที่ใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับโอโซนในการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำโดยไม่มีการเติมสารเคมีอื่นลงไป ทำให้ไม่มีตะกอนเกิดขึ้นและไม่มีสารตกค้างของสารเคมีในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการนี้

กว๊านพะเยาเป็นแหล่งน้ำสำคัญในจังหวัดพะเยา มีกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์เกิดขึ้นโดยรอบบริเวณกว๊านพะเยา ตัวอย่างเช่น พื้นที่เกษตรกรรม (ประมง ปศุสัตว์ และการเพาะปลูก) พื้นที่อุตสาหกรรมชุมชนแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และพื้นที่เมืองที่อยู่อาศัย ซึ่งกิจกรรมทางการเกษตรโดยเฉพาะอย่างยิ่งฟาร์มปศุสัตว์ เป็นอีกแหล่งกำเนิดสำคัญที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของสาร EDCs กลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนสู่สิ่งแวดล้อมผ่านสิ่งปฏิกูลและน้ำเสียจากกิจกรรมภายในฟาร์มปศุสัตว์ หากมีการจัดการหรือบำบัดที่ไม่ถูกต้องก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม อันจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในบริเวณโดยรอบได้ นอกจากนี้ยังอาจปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำและแพร่กระจายลงสู่กว๊านพะเยาได้ ซึ่งกว๊านพะเยาถูกใช้เป็นแหล่งน้ำดิบหลักสำหรับผลิตน้ำประปาให้กับชุมชนในพื้นที่เมืองพะเยาอีกด้วย ดังนั้นหากมีการปนเปื้อนของสาร EDCs กลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนดังกล่าว อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำประปาที่ผลิต รวมถึงอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชากรผู้บริโภคน้ำได้

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการตกค้างและประสิทธิภาพการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากฟาร์มปศุสัตว์บริเวณรอบกว๊านพะเยา กว๊านพะเยา และน้ำประปาจากการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา เพื่อให้ทราบถึงชนิดและปริมาณการตกค้างของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งดังกล่าว รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ได้แก่ กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชัน เพื่อเป็นแนวทางในการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนในฟาร์มปศุสัตว์ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสำคัญแหล่งหนึ่งของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อให้ทราบชนิดและปริมาณสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งปศุสัตว์บริเวณรอบกว๊านพะเยา
2. เพื่อให้ทราบชนิดและปริมาณสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในกว๊านพะเยา ระบบผลิตน้ำประปาและน้ำประปาจากการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา
3. เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชัน

ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตในการศึกษาวิจัยจะแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย ได้แก่

1. การศึกษาสถานการณ์การปนเปื้อนของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งปศุสัตว์ กว๊านพะเยา และระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา เป็นการศึกษาสำรวจในพื้นที่จริง โดยกำหนดขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.1 สารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ศึกษาในแหล่งปศุสัตว์ จำนวน 7 ชนิด ได้แก่ Estrone (E1), 17α -Estradiol (α E2), 17β -Estradiol (β E2), Estriol (E3), 17α -Ethinylestradiol (EE2), Testosterone (T) และ Methyltestosterone (MT) โดยประกอบด้วยฮอร์โมนเพศหญิง (Estrogen) 5 ชนิด และฮอร์โมนเพศชาย (Androgen) 2 ชนิด

1.2 ฟาร์มปศุสัตว์จำนวน 4 ประเภทที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นฟาร์มที่ขึ้นทะเบียนกับสำนักงานปศุสัตว์จังหวัดพะเยา ได้แก่ ฟาร์มสุกร ฟาร์มไก่เนื้อ ฟาร์มไก่ไข่ และฟาร์มโคนม โดยมีตำแหน่งที่ตั้งภายในรัศมี 10 กิโลเมตรรอบกว๊านพะเยา

1.3 ตัวอย่างสิ่งแวดล้อมที่เก็บจากฟาร์มปศุสัตว์ ได้แก่ มูลสัตว์ ดิน และน้ำเสียที่เกิดขึ้นภายในฟาร์มสำหรับวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน โดยทำการเก็บตัวอย่างแบบสุ่ม (Grab sampling) และการเก็บตัวอย่างแบบผสม (Composite sampling) ในช่วงที่สัตว์อยู่ในระยะเจริญพันธุ์

1.4 จัดเก็บตัวอย่างน้ำจากกว๊านพะเยา อ้างอิงตามจุดสำรวจและเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อติดตามสถานการณ์คุณภาพน้ำของกว๊านพะเยา โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาการประมงน้ำจืดพะเยา จำนวน 5 จุด ได้แก่ (1) จุดสูบน้ำการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา (2) กลางกว๊านพะเยา (3) สะพานขุนเดช (4) บ้านสันช้างหิน และ (5) บริเวณปากท่อสูบน้ำรวมเทศบาลเมืองพะเยา (ปากคลองแม่ใส)

1.5 ระบบผลิตน้ำประปาที่ศึกษาปริมาณการตกค้างของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน ได้แก่ ระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากระบบผลิตน้ำประปาจำนวน 4 จุด ได้แก่ (1) ขั้นตอนการเติมคลอรีนก่อนการบำบัด (2) กระบวนการฟลัทเทชัน (3) ระบบเติมอากาศ และ (4) ขั้นตอนการเติมคลอรีนหลังการบำบัด รวมถึงเก็บตัวอย่างน้ำประปาที่แจกจ่ายให้ประชากรในพื้นที่เขตเทศบาลเมืองพะเยา 1 จุด ได้แก่ โรงพยาบาลพะเยา สำหรับวิเคราะห์ชนิดและปริมาณการตกค้างของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน

1.6 เทคนิคที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งปศุสัตว์ ได้แก่ Liquid Chromatography–Mass Spectrometry (LC–MS/MS)

2. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่น เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยกำหนดขอบเขตการศึกษาดังนี้

2.1 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน โดยเลือกชนิดฮอร์โมนเพศหญิง 2 ชนิด ได้แก่ 17β -Estradiol (β E2) และ 17α -Ethinylestradiol (EE2) และฮอร์โมนเพศชาย 1 ชนิด ได้แก่ Methyltestosterone (MT) ซึ่งเป็นสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่พบมากกว่าชนิดอื่น และย่อยสลายตามธรรมชาติได้น้อย

2.2 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่นที่ศึกษา ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาในการบำบัด โดยกำหนดปริมาณโอโซน 400 mg/hr และแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นหลอด UV–C ที่ความยาวคลื่น 254 nm ขนาด 10 วัตต์

2.3 ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาเป็นถึงแบบ Batch ขนาด 1.0 ลิตร

2.4 เทคนิคที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ปริมาณของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1. ทราบชนิดและปริมาณของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจาก (1) แหล่งกำเนิดประเภทปศุสัตว์บริเวณรอบกว๊านพะเยา (2) ที่ตกค้างในกว๊านพะเยา และ (3) ที่อาจตกค้างในระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา

2. สามารถนำข้อมูลของชนิดและปริมาณสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่พบในแหล่งกำเนิดประเภทปศุสัตว์และกว๊านพะเยา ไปเป็นแนวทางในการออกนโยบายของภาครัฐส่วนท้องถิ่นในการควบคุมปริมาณสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งกำเนิดฟาร์มปศุสัตว์ที่อาจปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาให้มีการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากฟาร์มปศุสัตว์ก่อนที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

3. จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่น สามารถใช้เป็นแนวทางเลือกของกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่จะประยุกต์ใช้ในฟาร์มปศุสัตว์ นอกเหนือจากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ทั้งแบบใช้อากาศ (Aerobic digestion) และแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic digestion)

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สารรบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อ (Endocrine disrupting compounds: EDCs)

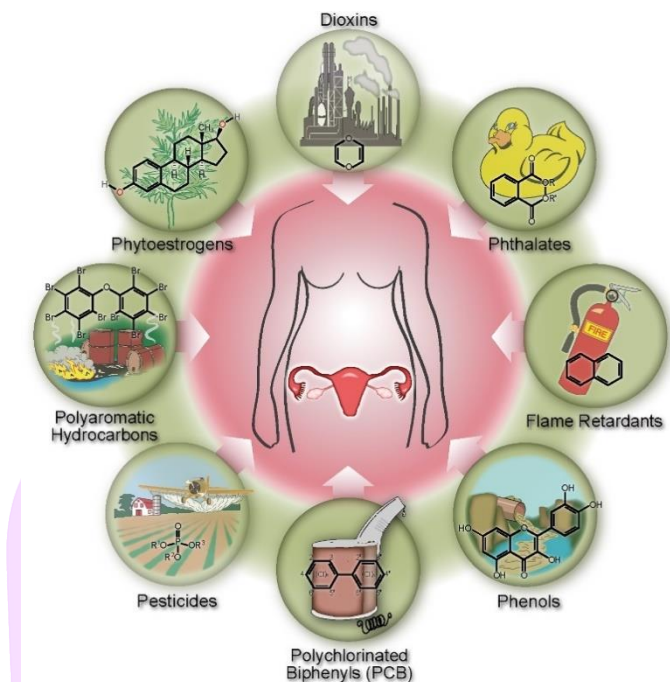
สารรบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อ เป็นสารกลุ่มที่สามารถขัดขวางการทำงานของฮอร์โมนจากต่อมไร้ท่อ (Endocrine gland) ส่งผลให้การทำงานของระบบอวัยวะภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิตเกิดความผิดปกติ

ลักษณะสมบัติของสารกลุ่ม EDCs ได้แก่

1. เป็นสารเคมีที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) หรือสารเมตาบอไลต์ (Metabolites)
2. กลุ่มที่ละลายได้ดีในไขมัน (Lipophilic) ทำให้เกิดการสะสมในเนื้อเยื่อส่วนที่เป็นไขมันของสิ่งมีชีวิต
3. กลุ่มที่สามารถจับกับโปรตีนและตัวรับต่าง ๆ ในร่างกาย เป็นสารที่ทำปฏิกิริยารุนแรงและสลายตัวยาก

สาร EDCs แบ่งออกเป็น 7 กลุ่มหลัก ได้แก่

1. สารกลุ่มอัลคิลฟีนอล (Nonylphenol, Ethoxylate, etc.)
2. สารกลุ่มโพลีคลอโรไบเฟนิล (Polychlorinated biphenyls (PCBs))
3. สารกลุ่มโพลีอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs)
4. สารกลุ่มอินทรีย์ออกซิเจน (Phthalates, Biphenol A)
5. สารกลุ่มยาปราบศัตรูพืช (Atrazine, Lindane, DDT, etc)
6. สารกลุ่มอื่น ๆ (Dioxin and Furans)
7. สารกลุ่มสเตียรอยด์ (Estrone, Estradiol, Testosterone, etc.)



ภาพ 1 ชนิดของสาร Endocrine disrupting compounds

ที่มา: Grindler et al., 2015

ทั้งนี้สาร EDCs จะมีกลไกสำคัญในการขัดขวางการทำงานของฮอร์โมนของสิ่งมีชีวิต ทำให้การทำงานของฮอร์โมนซึ่งผลิตจากต่อมไร้ท่อมีความผิดปกติ ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายอย่างเฉียบพลันต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิต โดยฮอร์โมนจัดเป็นสารเคมีชนิดหนึ่งในร่างกายของสิ่งมีชีวิตที่ผลิตขึ้นโดยระบบต่อมไร้ท่อ ซึ่งเป็นกลุ่มของอวัยวะหรือเนื้อเยื่อที่ทำหน้าที่ผลิต เก็บ และหลั่งฮอร์โมน โดยฮอร์โมนจะถูกส่งไหลเวียนตามกระแสเลือดไปยังอวัยวะเป้าหมายเพื่อควบคุมการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่ง

สารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน (Steroid Hormones)

สารกลุ่มสเตียรอยด์ที่เป็นฮอร์โมนเพศแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1. ฮอร์โมนเพศหญิง (Female sex hormone) หรือ ฮอร์โมนเอสโตรเจน (Estrogen) เป็นฮอร์โมนประเภทสเตียรอยด์ หน้าที่ทำงานเกี่ยวกับการพัฒนาเกี่ยวกับสภาพแห่งเพศ และการสืบพันธุ์ เป็นฮอร์โมนที่มีอยู่ทั้งในเพศชายและเพศหญิง แต่จะพบมากในเพศหญิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงเจริญพันธุ์ จะมีปริมาณสูงกว่าเพศชายมาก

2. ฮอโมนเพศชาย (Male sex hormone) หรือ แอนโดรเจน (Androgen) เป็นฮอโมนที่ทำหน้าที่ส่งผลการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อและอวัยวะที่มีความสัมพันธ์ และให้ลักษณะเพศชาย เช่น ขนาดของอวัยวะขนาดรูปร่างของอวัยวะเพศชาย ผม ขน ขนอวัยวะเพศ อสุจิ น้ำอสุจิ ต่อมลูกหมาก กล้องเสียง/เสียง หนวด เครา ลักษณะกล้ามเนื้อ และ กระดูก เป็นต้น ฮอโมนเพศชายที่สร้างจากต่อมหมวกไตส่วนนอกชั้นในสุดจะส่งผลกระทบต่อร่างกายน้อยกว่าที่ผลิตจากอวัยวะ มีปริมาณทั้งหมดประมาณร้อยละ 15 ของฮอโมนเพศชายทั้งหมด โดยจะถูกเปลี่ยนเป็นเทสโทสเตอโรนที่เป็นรูปที่ออกฤทธิ์

รูปแบบฮอโมนเอสโตรเจนที่มีในเพศหญิง มี 3 แบบ คือ

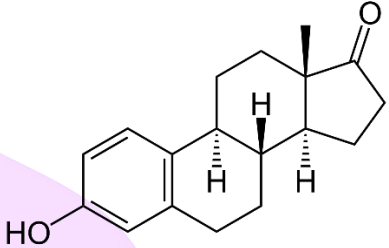
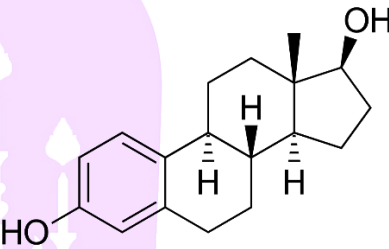
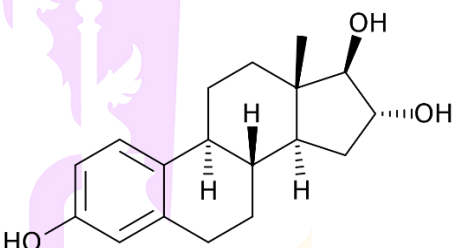
1. เอสโตรน (estrone: E1) เป็นฮอโมนที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นในหญิงที่อยู่ในช่วงหมดระดู มีบทบาทสำคัญมากต่อหญิงที่พ้นวัยมีระดูแล้ว โดยรังไข่จะหยุดหน้าที่สร้างฮอโมนเอสโตรดิออล แล้วต่อมหมวกไต ตับและเซลล์ไขมัน จะทำหน้าที่ผลิตฮอโมนเอสโตรเจนแทน โดยผลิตชนิด เอสโตรน หรือ E1 แต่หากผลิตขึ้นมามากเกินไป จะก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็ง เช่น มะเร็งทรวงอก เป็นต้น

2. เอสตราดิออล (estradiol: E2) เป็นฮอโมนเอสโตรเจนที่มีอำนาจการทำงานมากที่สุด มีอยู่ในหญิงช่วงวัยเจริญพันธุ์ ในเพศชายก็มีฮอโมนเอสโตรเจนชนิดนี้ อันเป็นผลจากการแปรรูปของฮอโมนเทสโทสเตอโรน

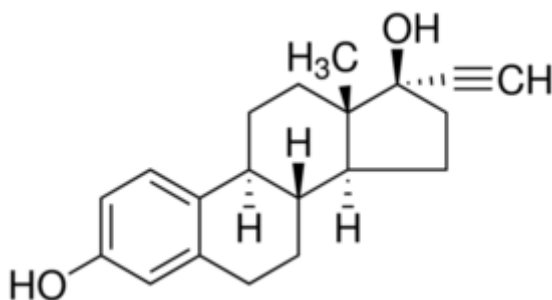
3. เอสทริออล (estriol: E3) เป็นฮอโมนเอสโตรเจนที่มีอำนาจการทำงานต่ำที่สุด พบในหญิงตั้งครรภ์

สังเกตได้ว่า ฮอโมนเอสโตรน หรือ E1 นี้ ถูกสร้างได้ในเซลล์ไขมัน และสร้างได้มากกว่าอวัยวะอื่น ๆ ดังนั้น ผู้ที่มีน้ำหนักเกิน จึงมักพบว่ามีฮอโมนชนิดนี้สูงตามมา โครงสร้างของฮอโมนในกลุ่มเอสโตรเจนแสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 โครงสร้างฮอร์โมนกลุ่มเอสโตรเจน

ฮอร์โมน	สูตร	น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	โครงสร้าง
Estrone	$C_{18}H_{22}O_2$	270.37	
Estradiol	$C_{18}H_{24}O_2$	272.38	
Estriol	$C_{18}H_{24}O_3$	288.38	

ฮอร์โมน 17 แอลฟา-เอทีนิลเอสทราไดออล (17α -ethynylestradiol : EE2) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{20}H_{24}O_2$ และมีน้ำหนักโมเลกุลคือ 296.40 g/mol เป็นฮอร์โมนเพศหญิงสังเคราะห์ที่นิยมใช้ในยาคุมกำเนิดร่วมกับโปรเจสติน (progestins) นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบของยารักษาในผู้หญิงวัยหมดประจำเดือน



ภาพ 2 โครงสร้างฮอร์โมน 17 แอลฟา-เอทินิลเอสตราไดออล

ที่มา: Gómez et al., 2013

ฮอร์โมนเพศชาย หรือ แอนโดรเจน (Androgen) ประกอบด้วย ฮอร์โมนหลายชนิด แต่เกือบทั้งหมดเป็นฮอร์โมนชนิดที่เรียกว่า เทสโทสเตอโรน (Testosterone : T) เป็นฮอร์โมนเสริมสร้าง (Anabolic hormone) ที่ทำให้มีการไหลเวียนของกระแสโลหิตดี ทำให้เนื้อเยื่อได้รับออกซิเจนและอาหารได้ดี กระตุ้นการสร้างโปรตีนช่วยในการเสริมสร้างกล้ามเนื้อทำให้กล้ามเนื้อใหญ่และแข็งแรง โครงสร้างของฮอร์โมนในกลุ่มแอนโดรเจนแสดงดังตาราง 2

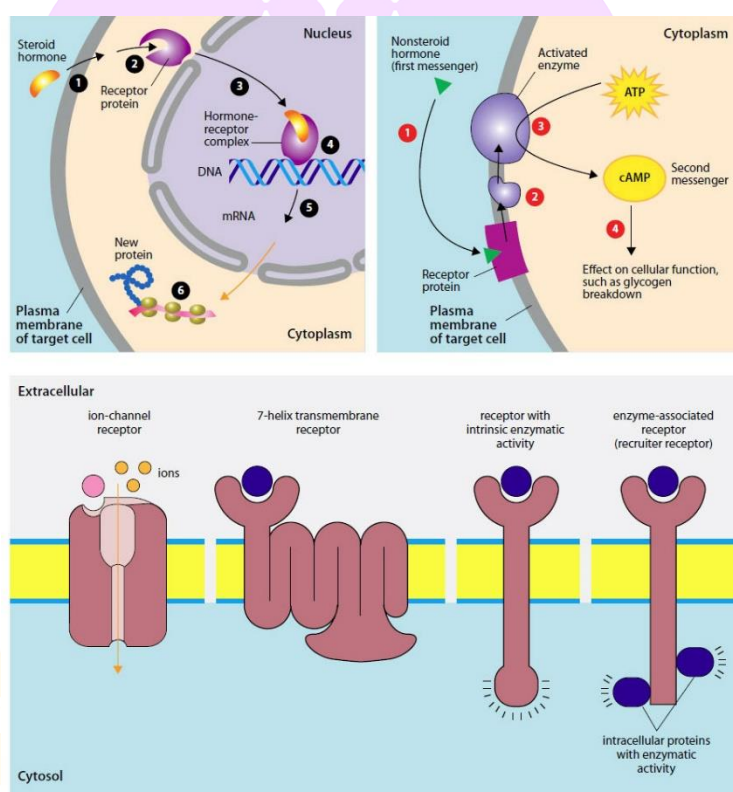
ตาราง 2 โครงสร้างฮอร์โมนกลุ่มแอนโดรเจน

ฮอร์โมน	สูตร	น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	โครงสร้าง
Testosterone	$C_{19}H_{28}O_2$	288.42	

ฮอร์โมน 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรน (17 α -methyltestosterone : MT) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{20}H_{30}O_2$ และมีน้ำหนักโมเลกุลคือ 302.45 g/mol เป็นฮอร์โมนเพศชายสังเคราะห์ที่นิยมในการนำมาใช้เพื่อแปลงเพศของปลาโดยเฉพาะปลานิล การแปลงเพศปลาจะทำได้โดยการผสม MT กับอาหารปลาให้กับลูกปลากินในช่วง 21 วันแรก

กลไกการทำงานของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนในสิ่งมีชีวิต

1. การทำปฏิกิริยาต่อตัวรับฮอร์โมน (Interaction with hormone receptors): ในภาวะปกติฮอร์โมนบางชนิดจะต้องจับกับตัวรับ (Hormone receptor) ก่อนเข้าสู่เซลล์และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา แต่สาร EDCs จะมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับฮอร์โมนทำให้สามารถจับกับตัวรับได้เช่นเดียวกับฮอร์โมน (แสดงได้ดังภาพ 5) จึงส่งผลให้ความสมดุลของฮอร์โมนในร่างกายมีความผิดปกติไปจากธรรมชาติ ส่งผลต่อระบบสรีรวิทยาของร่างกายที่ถูกควบคุมด้วยฮอร์โมนชนิดนั้น ๆ



ภาพ 5 การทำปฏิกิริยาแทนที่ฮอร์โมนของ EDCs

ที่มา: Bergman et al., 2013

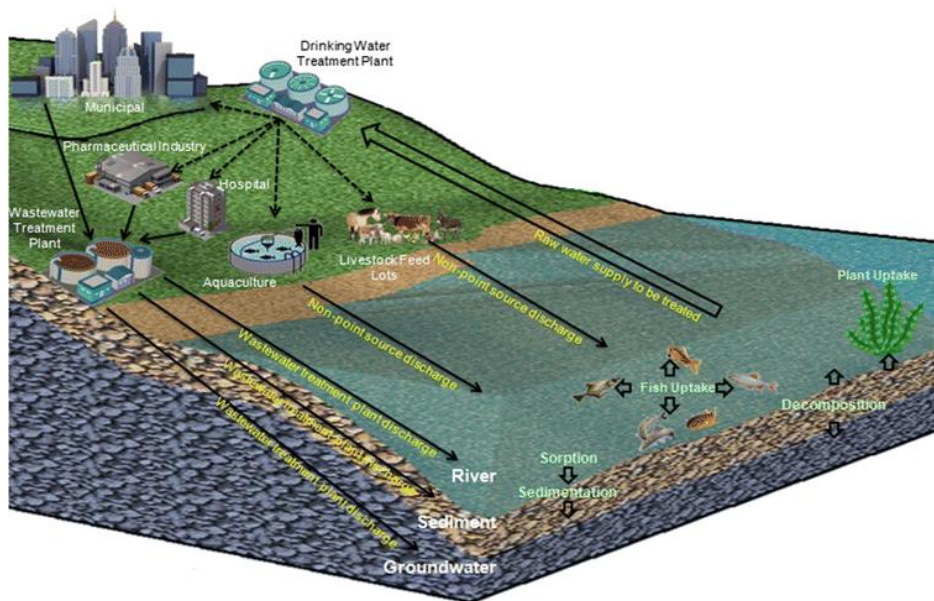
ผลกระทบของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน

ผลกระทบของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนเป็นปัญหาสำคัญที่มีการศึกษากันมาอย่างยาวนาน โดยจากการศึกษาผลกระทบจากฮอร์โมนเอสโตรเจนของ Adeel et al., 2017 พบว่าหากได้รับฮอร์โมนเอสโตรเจนในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดมะเร็งเต้านมในผู้หญิง และมะเร็งต่อมลูกหมากในผู้ชาย อีกทั้งส่งผลต่อสรีรวิทยาของปลาและการเจริญพันธุ์ของสัตว์ นอกจากนี้ฮอร์โมนเอสโตรเจนยังส่งผลทำให้จำนวนสเปิร์มลดลงและเกิดการผิดปกติของระบบสืบพันธุ์เพศชาย (Epstein, 1997) โดยได้มีการกำหนดค่าระดับที่ยอมรับได้ต่อวัน (Acceptable Daily Intake : ADI) ของฮอร์โมน 17β -estradiol ($\beta E2$) อยู่ที่ 0-0.05 ไมโครกรัม/กิโลกรัม น้ำหนักตัว/วัน และของฮอร์โมน Testosterone (T) อยู่ที่ 0-2 ไมโครกรัม/กิโลกรัม น้ำหนักตัว/วัน ตามข้อมูลการระบาดวิทยาของมนุษย์ (Jeong, 2010) อีกทั้ง Tyler and Routledge., (1998) พบว่า estradiol ความเข้มข้นระหว่าง 10 – 100 ng/L ก่อให้เกิดความผิดปกติในปลาเทราท์ Hansen et al., (1998) พบว่า 17β -estradiol ($\beta E2$) 1 ng/L จะทำการสร้าง vitellogenin ซึ่งเป็นโปรตีนในกระบวนการสร้างไข่ในปลาเทราท์ตัวผู้ จากการศึกษาของ Metcalfe et al., (2001) พบว่า 17β -estradiol ($\beta E2$) ความเข้มข้น 4 ng/L และ 17α -ethynylestradiol (EE2) 0.1 ng/L ส่งผลให้เกิดรังไข่ในปลาซิวขาวสารญี่ปุ่นเพศผู้ จากงานวิจัยพบว่า 17α -methyltestosterone (MT) มีผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ของสัตว์ เมื่อได้สัมผัสฮอร์โมน MT ในปริมาณระดับต่ำในหน่วย ng/L ซึ่งจะสังเกตได้ว่า เมื่อมีการสัมผัสกับฮอร์โมน MT ในปริมาณแม้เพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ ในด้านผลกระทบต่อมนุษย์นั้นเป็นไปได้ว่าฮอร์โมน จะเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ เนื่องจากฮอร์โมน MT สามารถก่อให้เกิดเนื้องอกที่ไม่ใช่มะเร็งในตับได้ (See and Gluud, 1992)

แหล่งที่มาและการปลดปล่อยสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนของสิ่งมีชีวิต

1. ฮอร์โมนตามธรรมชาติ เป็นฮอร์โมนที่พบได้ในสารคัดหลั่งและสิ่งปฏิภูลของสิ่งมีชีวิตจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าฮอร์โมนส่วนใหญ่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ฟาร์มปศุสัตว์ และพื้นที่การเกษตร

2. ฮอร์โมนจากการสังเคราะห์ เป็นฮอร์โมนที่ถูกสร้างขึ้นมาเลียนแบบฮอร์โมนตามธรรมชาติ จากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่พบในอุตสาหกรรมปศุสัตว์และประมงที่มีการให้ฮอร์โมนและฮอร์โมนสังเคราะห์แก่สัตว์เพื่อแปลงเพศ เร่งการเจริญเติบโต เพิ่มมวลกล้ามเนื้อ น้ำหนัก เป็นต้น และพบในยาคุมกำเนิด



ภาพ 7 แหล่งที่มาต่าง ๆ ของฮอร์โมน

ที่มา: Ting and Praveena, 2017

โดยสิ่งมีชีวิตสามารถผลิตสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนได้ในร่างกายและสามารถรับเข้าสู่ร่างกายได้ผ่านการกินอาหาร ซึ่งเมื่อสิ่งมีชีวิตทำการขับถ่ายของเสียหรือสิ่งปฏิกูลออกจากร่างกายแล้ว สารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนก็จะออกจากร่างกายมาพร้อมกับสารคัดหลั่งที่เคลือบอยู่กับของเสียหรือสิ่งปฏิกูลนั้น แสดงดังตาราง 3

ตาราง 3 การปลดปล่อยสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนของมนุษย์

กลุ่มตัวอย่าง	E1	βE2	E3	EE2	อ้างอิง
Pregnant women	787	277	9850	0	
Menopausal, with HRT	31.50	59.20	90.70	0	Kostich et al., 2013
Menstruating woman	9.32	6.14	17.40	0	
Women	7.00	2.40	4.40	NDA	Andaluri et al., 2012
Menstruating females	3.50	8.00	4.80	NDA	Hamid and Eskicioglu, 2012
Adult male	3.50	1.83	3.21	NDA	Kostich et al., 2013
Menopausal, no HRT	2.93	1.49	3.90	0	
Menopausal females	2.30	4.00	1.00	NDA	Hamid and
Males	1.60	3.90	1.50	NDA	Eskicioglu, 2012
Female child	0.60	2.50	0.918	0	Kostich et al., 2013
Male child	0.63	0.54		0	
Average excretion per person	19.00	7.70	81.00	0.41	Laurenson et al., 2014

หมายเหตุ: หน่วยที่ใช้ ไมโครกรัม/ลิตร

NDA คือ No data available

ที่มา: Adeel et al., (2017)

การตกค้างของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนในสิ่งแวดล้อม

การตกค้างของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนในสิ่งแวดล้อมเกิดจากการที่ดินหรือน้ำมีการปนเปื้อนของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากสิ่งปฏิกูลของสิ่งมีชีวิตแล้วแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการสะสมสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน โดยได้มีการศึกษาการตกค้างของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ โดยที่ M. Adeel, Song, Wang, Francis, and Yang (2017) ได้ใช้ข้อมูลจาก MEDLINE และฐานข้อมูลอื่น ๆ เกี่ยวกับฮอร์โมนเอสโตรเจนในสิ่งแวดล้อมตั้งแต่ปี 2005 ถึง 2017 พบว่าฮอร์โมนเอสโตรเจน ที่ระดับมลพิษได้รับการตรวจพบในสถานที่ใกล้กับระบบบำบัดน้ำเสีย และบ่อน้ำบาดาลต่าง ๆ ทั่วโลก อีกทั้งยังพบว่ามี การตกค้างของฮอร์โมนกลุ่มเอสโตรเจนจากแหล่งปศุสัตว์และแม่น้ำใกล้พื้นที่

การเกษตรที่ใช้มูลสัตว์เป็นปุ๋ย (Chen et al., 2010; Gadd et al., 2010; Lafrance and Caron, 2013) แสดงในตาราง 4

ตาราง 4 การตกค้างของฮอร์โมนกลุ่มเอสโตรเจน

สถานที่	E1 (ng/L)	α E2 (ng/L)	β E2 (ng/L)	E3 (ng/L)	EE2 (ng/L)	อ้างอิง
แม่น้ำใกล้ฟาร์ม ปศุสัตว์แบบขุน	313.6	ND	ND	210	ND	Chen et al. (2010)
โคนม	100	730	24	NDA	NDA	Gadd et al. (2010)
แม่น้ำใกล้พื้นที่ การเกษตรที่ใช้ มูลสัตว์เป็นปุ๋ย	ND	ND	ND	2.6–58	ND	Lafrance and Caron (2013)

กระบวนการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน

กระบวนการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ ได้แก่

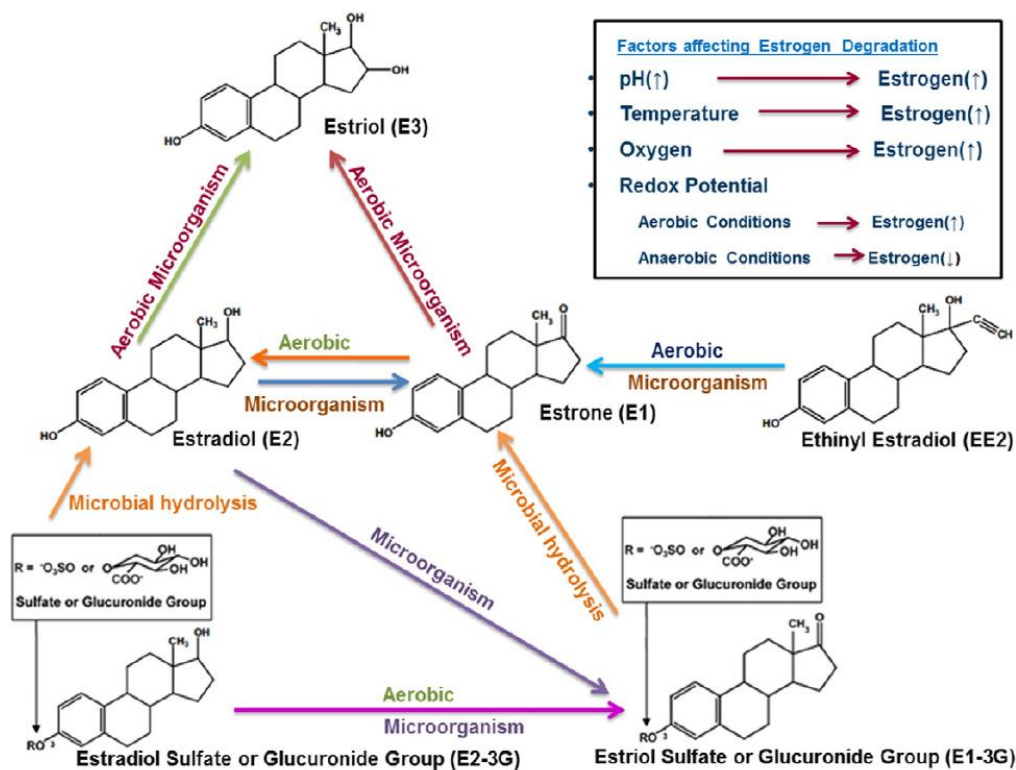
1. กระบวนการบำบัดทางกายภาพ

เมื่อมีการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจะถูกดูดซับในดิน ตะกอนหรือถ่านกัมมันต์ เนื่องจากสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนส่วนใหญ่มีคุณสมบัติในการถูกดูดซับได้ดี

2. กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

สารอินทรีย์บางชนิดที่มีโครงสร้างสเตอรอยด์ไม่สามารถูกออกซิไดซ์โดยสารออกซิแดนท์เพื่อให้เกิดการบำบัดที่สมบูรณ์ได้ แต่สารออกซิแดนท์สามารถเปลี่ยนโครงสร้างสารอินทรีย์ดังกล่าวจากโครงสร้างที่ซับซ้อนให้กลายเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการบำบัดโดยวิธีทางธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ จากงานวิจัยของ P. B. Delaune and Moore (2013) พบว่า 17 β -estradiol สามารถย่อยสลายตัวเองตามธรรมชาติและโดยปกติฮอร์โมน 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรน จะสลายตัวเมื่อเจอแสงแดดและความร้อน (AHFS 97 Drug Information, 1997) โดยมีจุลินทรีย์ทำหน้าที่ย่อยสลายการสะสมของ MT สามารถเกิดขึ้นได้ในบริเวณที่ไม่ได้รับแสงและความร้อน เช่น ในดินก้นบ่อ โดยงานวิจัยของ M. Adeel et al. (2017)

พบว่า estradiol (E2) มีการสลายตัวเปลี่ยนรูปเป็น estrone (E1) โดยจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ และ estrone (E1) จะถูกสลายตัวเปลี่ยนรูปเป็น estriol (E3) โดยจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศดังแสดงในภาพ 8

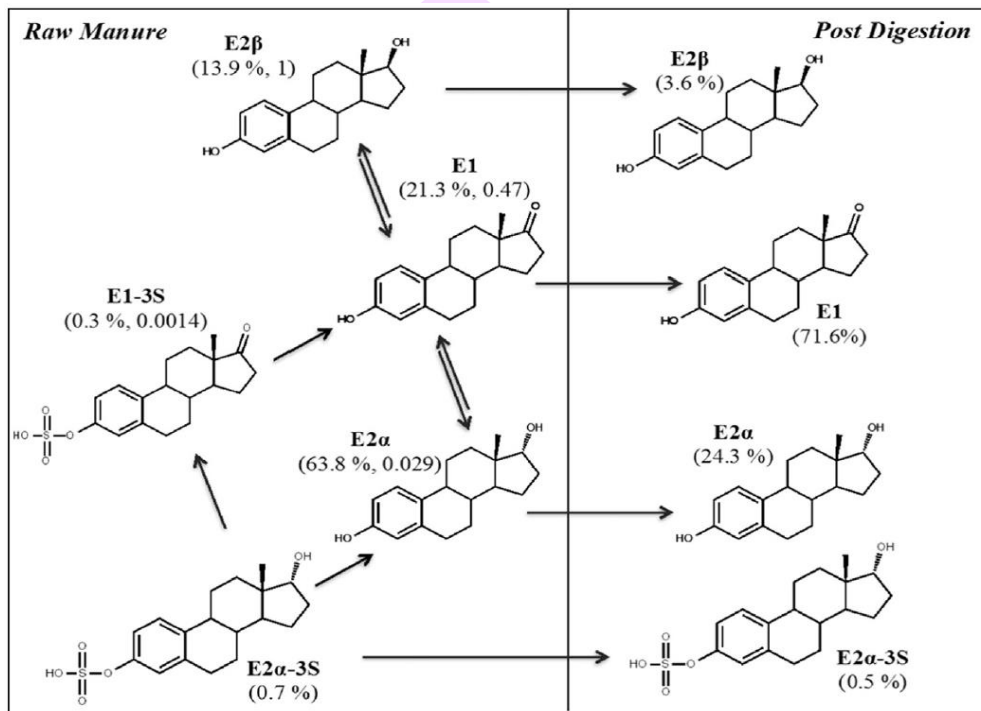


ภาพ 8 การสลายตัวของฮอร์โมนเอสโตรเจน

ที่มา: Adeel et al., 2017

นอกจากนี้ Bevacqua et al. (2011) พบว่าระบบบึงประดิษฐ์ที่รวบรวมน้ำเสียจากฟาร์มไก่สามารถกำจัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนออกจากน้ำเสียโดยพืชเป็นตัวดูดซับฮอร์โมน D. L. Cheng et al. (2018) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ Membrane bioreactor (MBR) และบึงประดิษฐ์ พบว่าถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ และบึงประดิษฐ์ มีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ อีกทั้งมีงานวิจัยของ J. Vymazal, Brezinova, and Kozeluh (2015) เรื่องการเกิดและการกำจัดฮอร์โมนเอสโตรเจน และฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน ในระบบบึงประดิษฐ์ 3 แห่งที่ใช้บำบัดน้ำเสียจากเทศบาลในสาธารณรัฐเช็ก ทำการวิเคราะห์หัตถวิธี Solid Phase Extraction (SPE) พบว่า

ประสิทธิภาพในการกำจัดฮอร์โมนเอสโตรเจน และฮอร์โมนเทสโทสเตอโรนมีค่าสูง และพบเฉพาะฮอร์โมนเอสโตรเจนที่ไหลออกจากระบบบึงประดิษฐ์เพียงแห่งเดียวที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 1 ng/L และระดับที่ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตสำหรับฮอร์โมนกลุ่มเอสโตรเจน ชนิดอื่น ได้แก่ estriol 10 ng/L, 17 β -estradiol 1 ng/L และ 17 α -ethinylestradiol 2 ng/L พบว่าไม่เกินในทุกการตรวจสอบ



ภาพ 9 การแปรสภาพของฮอร์โมนเอสโตรเจน ในระหว่างกระบวนการแอนแอโรบิค

ที่มา: Noguera-Oviedo and Aga, 2016

3. กระบวนการบำบัดทางเคมี

ปัจจุบันการบำบัดสารเคมีโดยการนำสารเคมีที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้สูง (สารออกซิแดนท์) โดยนำไปบำบัดในที่ที่มีการปนเปื้อน ซึ่งสารเคมีบางชนิดมีวิธีการบำบัดที่ราคาไม่แพงมากนัก โดยคาดหวังว่าเมื่อสารเคมีสัมผัสกับสารอินทรีย์จะทำให้การบำบัดเป็นไปอย่างสมบูรณ์กล่าวคือเกิด Mineralization ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม (เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลผลิตสุดท้าย) จากงานวิจัยของ Huang et al., (2013) ศึกษาการเกิด การกำจัด และการสะสมของฮอร์โมนเอสโตรเจน ที่อ่างเก็บน้ำของทะเลสาบเตียนฉือประเทศจีน โดยทำการเก็บตัวอย่าง

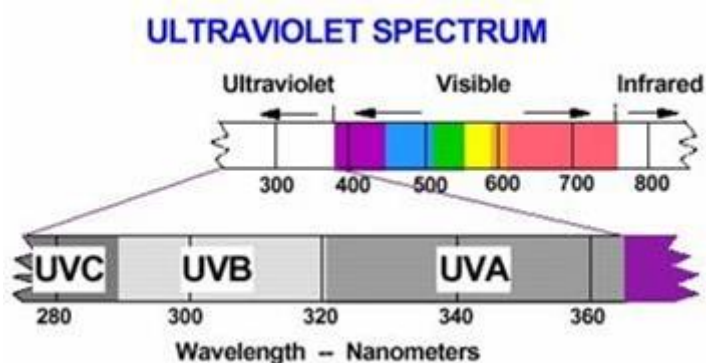
จากระบบบำบัดน้ำเสีย 8 แห่ง ที่อยู่รอบทะเลสาบเตียนฉือเพื่อหาฮอร์โมน estrone (E1), 17β -estradiol (β E2), estriol (E3) และ 17α -ethynylestradiol (EE2) ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี solid phase extraction (SPE) พบว่าระบบบำบัดแบบทุติยภูมิที่มีอยู่เดิมในระบบบำบัดน้ำเสียทั้ง 8 แห่ง มีประสิทธิภาพในการกำจัดฮอร์โมนเอสโตรเจน ได้ไม่เพียงพอ แต่การเพิ่มกระบวนการบำบัดด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) เข้าไปในกระบวนการบำบัดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฮอร์โมนเอสโตรเจน

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Processes)

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง หรือกระบวนการ Advance Oxidation Processes (AOPs) เป็นกระบวนการที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้หรือย่อยสลายได้ยาก (Recalcitrant) ด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ หลักการของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงนี้ คือใช้กระบวนการออกซิเดชันด้วยอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical, OH^\bullet) โดยทำหน้าที่ย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ ทำให้เกิดเป็นอนุมูลของสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์โมเลกุลอื่น ๆ ได้ต่อไป ทำให้สารอินทรีย์เปลี่ยนโครงสร้างและมีขนาดเล็กลง ทำให้มีความเป็นพิษลดลง และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

1. กระบวนการโฟโตไลซิส (Photolysis)

กระบวนการยูวีโฟโตไลซิสเป็นกระบวนการที่สารเคมีดูดกลืนพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet: UV) ที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิด หากแสงมีพลังงานพอดีกับพลังงานพันธะของสารเคมี พันธะของสารตั้งต้นจะแตกออกหรือถูกย่อยสลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง สามารถแบ่งออกได้ตามความยาวของคลื่นคือ ช่วงคลื่นยาว (UVA, 320–400 nm) ช่วงคลื่นปานกลาง (UVB, 280–320 nm) และช่วงคลื่นสั้น (UVC 100–280 nm) แสดงดังภาพ 10



ภาพ 10 ช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV)

ที่มา: Gibson, 2008

ความยาวคลื่นแสงที่มากที่สุดที่ก่อให้เกิดพลังงานพอดีกับพลังงานพันธะของสารนั้น เป็นค่าจำเพาะของสารนั้น ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ 1

$$\lambda = c / \nu \quad (1)$$

โดยที่ λ = ความยาวคลื่นแสง (เมตร)

c = ความเร็วของคลื่นแสง (3×10^8 เมตร/วินาที)

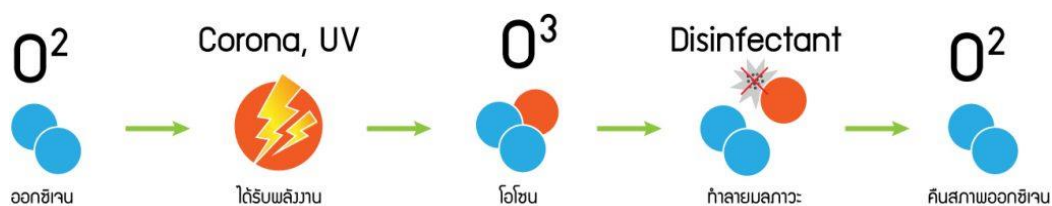
ν = ความถี่ของคลื่นแสง (ต่อวินาที) = E / h

E = พลังงานควอนตัมหรือพลังงานที่ต้องการให้เกิดการสลายตัว (จูล)

h = ค่าคงที่ของ Planck (6.62×10^{-34} จูล-วินาที)

1.1 แหล่งของแสงอัลตราไวโอเล็ต

แสงอัลตราไวโอเล็ตมาจากหลอดอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ Low-pressure mercury arc เป็นหลัก ซึ่งจะมีแสงออกมาประมาณร้อยละ 85 ซึ่งเป็นแบบ Monochromatic ที่มี ความยาวคลื่น 253.7 nm (ความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับการฆ่าเชื้อโรคจะอยู่ในช่วง 250–270 nm) หลอดอัลตราไวโอเล็ตอาจมีขนาดยาวประมาณ 0.75–1.5 m และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของหลอดอัลตราไวโอเล็ตประมาณ 15–20 mm โดยการให้แสงอัลตราไวโอเล็ตจะมาจากการ ปะทะกันระหว่างไอปรอทกับไฟฟ้า ทำให้เกิดแสงอัลตราไวโอเล็ตขึ้นในหลอด เมื่อนำหลอด อัลตราไวโอเล็ตจุ่มอยู่ในน้ำเสียจะทำให้มีการฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียได้ (เกรียงศักดิ์ อุทุมสินโรจน์, 2547) แสดงดังภาพ 11



ภาพ 11 กลไกการฆ่าเชื้อโรคของ UV

ที่มา: เกரியงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547

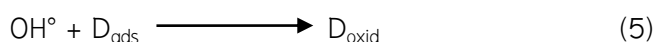
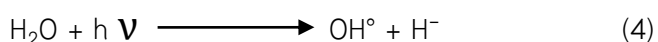
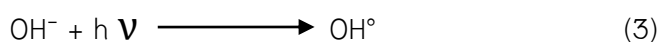
1.2 การทำปฏิกิริยาของแสงอัลตราไวโอเล็ต

สารเมื่อได้รับช่วงความยาวคลื่นที่มีความยาวคลื่นเหมาะสมแล้วจะเข้าสู่สถานะใหม่ซึ่งจะมีพลังงานสูงขึ้นเป็นสถานะที่สารถูกกระตุ้นเรียกว่าสถานะเร้า (Excited state) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน จนทำให้เกิดโพรงอิเล็กตรอน (hole: h⁺) (กัตตินานู สกุลสวัสดิพันธ์, 2555) อาจทำให้เกิดกลไกทางเคมี 2 กลไก ได้แก่

1.2.1 การออกซิเดชันโดยตรงกับโพรงอิเล็กตรอน แสงจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโพรงอิเล็กตรอนของโมเลกุลสารอินทรีย์ และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ออกมา เมื่อมีการดูดกลืนคลื่นแสงช่วงหนึ่งของพลังงานแสงจะทำให้โมเลกุลอยู่ในสถานะที่ไม่สมดุลกับสิ่งแวดล้อมและจะสูญเสียพลังงานรูปหนึ่งออกมา แสดงดังสมการ 2



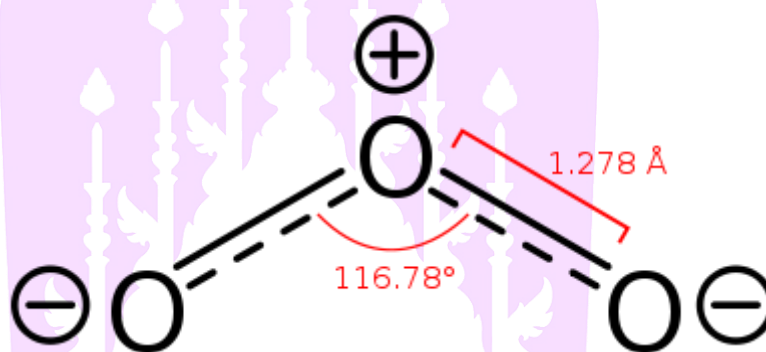
1.2.2 การออกซิเดชันกับโมเลกุลของน้ำ เมื่อแสงทำปฏิกิริยากับโมเลกุลน้ำได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งอนุมูลอิสระจะมีศักยภาพในการออกซิไดซ์สูง สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและไม่มีความเฉพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ โดยจะเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ (De Lasa and Dore, 1994) สมการที่เกี่ยวข้องกับการออกซิไดซ์ด้วยอนุมูลอิสระแสดงดังสมการ 3



2. กระบวนการโอโซนเนชั่น (Ozonation)

2.1 คุณสมบัติของโอโซน

โอโซน (Ozone) มีสูตรโมเลกุลคือ O_3 มีน้ำหนักโมเลกุลคือ 48 อยู่ในรูปสถานะก๊าซที่ความดันและอุณหภูมิปกติ จุดเดือดอยู่ที่ -119.9 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ โอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ที่รุนแรงมาก มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายกลิ่น สี และรสในน้ำ โอโซนมีความสามารถในการละลายในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของการละลายน้ำของออกซิเจน โอโซนมีความเสถียรในอากาศมากกว่าในน้ำ โดยเฉพาะอากาศที่แห้งและเย็น (สุมาลี เต็มทวี, 2551) โครงสร้างของโมเลกุลโอโซนแสดงดังภาพ 12



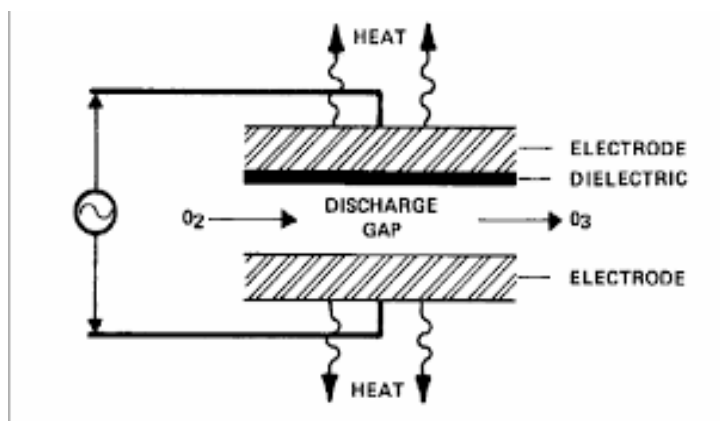
ภาพ 12 โครงสร้างโมเลกุลของโอโซน

ที่มา: Greenwood and Earnshaw, 1984

2.2 การผลิตโอโซน

วิธีในการผลิตโอโซนนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ดังนี้

2.2.1 Corona discharge เป็นวิธีจำลองการเกิดโอโซนตามปรากฏการณ์ฟ้าผ่าในธรรมชาติ โดยผ่านออกซิเจนเข้าไปในช่องว่างแคบ ๆ ที่มีค่าความต่างศักย์สูงประมาณ 6–20 กิโลโวลต์ การผลิตโอโซนสามารถผลิตได้ทั้งจากออกซิเจนบริสุทธิ์และจากอากาศแห้ง โดยการให้ออกซิเจนบริสุทธิ์หรืออากาศแห้งผ่านช่องระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วที่มีความต่างศักย์สูงประมาณ 15–20 กิโลโวลต์ ทำให้บางส่วนของโมเลกุลของออกซิเจนแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน โดยการชนกันของอิเล็กตรอน จากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะรวมกับโมเลกุลของออกซิเจนกลายเป็นโอโซน แสดงดังภาพ 13 วิธีนี้นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากต้นทุนต่ำ สร้างโอโซนได้มาก และมีความปลอดภัย (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2539)



ภาพ 13 กระบวนการผลิตโอโซนด้วยวิธี Corona discharge

ที่มา: Cheremisinoff and Cheremisinoff, 1993

สมการอธิบายปฏิกิริยาการผลิตโอโซน แสดงดังต่อไปนี้



ในสมการ 6 โมเลกุลของออกซิเจน (O_2) จะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน (O) และให้พลังงานความร้อน จากนั้นอะตอมของออกซิเจน (O) จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) เกิดเป็นโอโซน (O_3) ในสมการ 7

2.2.2 Electrolysis reaction เป็นวิธีการผลิตโอโซนโดยการใช้กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เป็นของเหลว (Electrolyte) ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน จากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะไปรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอโซน ข้อดีคือ สามารถผลิตโอโซนที่มีความเข้มข้นสูง ข้อเสียคือเกิดการกัดกร่อน และจับตัวกันเป็นตะกอน

2.2.3 Photochemical reaction เป็นวิธีการผลิตโอโซนโดยการนำออกซิเจนมาผ่านแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้หลอดปรอทเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสงและใช้ความยาวคลื่น 254 nm ในการผลิตโอโซน

2.2.4 Radiochemical reaction ใช้สารกัมมันตรังสี (Radioactive) เป็นแหล่งพลังงานเพื่อแยกโมเลกุลออกซิเจนเป็นวิธีที่ผลิตโอโซนได้ปริมาณมาก ต้นทุนต่ำ แต่ไม่เป็นที่นิยมเพราะต้องมีการควบคุมความปลอดภัยที่ดีพอ

2.3 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรสามารถสลายตัวกลายเป็นอนุมูลต่าง ๆ ได้แก่ Hydroxyl radical (OH^\bullet), HO_3 , HO_4 และ Superoxide (O_2^-) ซึ่งอนุมูลที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ โดยความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้ คือ อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ ปริมาณการละลายน้ำของโอโซนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น

เมื่อโอโซนสลายตัวในน้ำได้ก๊าซออกซิเจนและอะตอมออกซิเจน ดังสมการ 8 ถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต จะได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์ ดังสมการ 9 หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะแตกตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล 2 โมเลกุล โดยที่แสงอัลตราไวโอเล็ตมีอิทธิพลต่อการสลายตัวของโอโซนเมื่อสารละลายอยู่ในสภาวะกรด (Ku, Su and Shen, 1996)



2.4 ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน

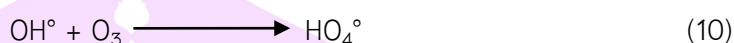
การเกิดปฏิกิริยาโอโซนกับสารอินทรีย์สามารถทำได้ 2 ทาง คือ ทางตรงและทางอ้อม ซึ่งผลลัพธ์ในแต่ละเส้นทางของปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิเดชันที่แตกต่างกัน และปฏิกิริยาจะมีชนิดของจลศาสตร์ที่ไม่เหมือนกัน กลไกในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโอโซนเช่นทั้ง 2 ทางมีดังนี้

2.4.1 การทำปฏิกิริยาทางตรง (Direct attack) โมเลกุลของโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์โดยตรง (ปฏิกิริยา Electrophilic หรือ Dipolar cycloaddition) โดยโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์บริเวณพันธะคู่ ($\text{C}=\text{C}$, $\text{C}=\text{C}-\text{O}-\text{R}$, $\text{C}=\text{C}-\text{X}$) หรืออะตอมที่มีประจุลบ (N, P, O, S และ Nucleophilic C) โอโซนจะทำปฏิกิริยาได้ดี (High reactivity) กับพันธะอะโรมาติกที่มีหมู่ OH , CH_3 หรือ OCH_3 อยู่ตรงตำแหน่ง Ortho แต่จะเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากับพันธะที่มีหมู่ NO_2 , COOH หรือ CHO

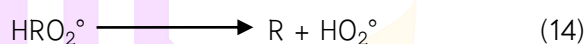
2.4.2 การทำปฏิกิริยาทางอ้อม (Indirect attack) ขั้นแรกจะเกิดการสลายตัวของโอโซน ซึ่งถูกเร่งโดยตัวริเริ่ม (Initiator) เช่น ไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide Ion, OH^-) เพื่อทำให้เกิดตัวออกซิแดนท์ลำดับที่สอง (Secondary Oxidant) เช่น อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical, OH^\bullet) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทันที กลไกของปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1) ขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation Step) ปฏิกริยาระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนและโอโซนทำให้เกิดอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์แอนเนียน (Superoxide Anion Radical) และอนุมูลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroxide Radical, HO_2°)

2) ขั้นตอนลูกโซ่ (Radical Chain Step) ปฏิกริยาระหว่างโอโซนและอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์แอนเนียน ทำให้เกิดอนุมูลโอโซนแอนเนียน (Ozonide Anion Radical) ซึ่งจะสลายตัวทันทีเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับโอโซน ดังสมการต่อไปนี้



การสลายตัวของอนุมูลไฮโดรเตตระออกไซด์ (Hydrotetraoxide Radical, HO_4°) ไปเป็นออกซิเจนและอนุมูลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ดังสมการ 11 จะทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่เริ่มต้นใหม่อีกครั้ง ซึ่งสารใดก็ตามที่สามารถเปลี่ยนอนุมูลไฮดรอกซิล ไปเป็นอนุมูลซูเปอร์แอนเนียน หรืออนุมูลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ โดยทำหน้าที่เป็นตัวนำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ใหม่อีกครั้ง จะถูกเรียกว่า ตัวกระตุ้น (Promoter) โมเลกุลของสารอินทรีย์ (R) สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นได้และบางตัวของสารอินทรีย์จะมีกลุ่มฟังก์ชันซึ่งจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิล และทำให้เกิดอนุมูลของสารอินทรีย์ (R°) ดังสมการ 12 ถึง 15



การสลายตัวของโอโซนถูกเริ่มต้นโดยไฮดรอกไซด์ไอออน นำไปสู่ปฏิกิริยาลูกโซ่และผลิตอนุมูลไฮดรอกซิล ที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วแสดงถึงอนุมูลไฮดรอกซิลมีครึ่งชีวิต (Half-Life) ที่สั้นมาก เช่น น้อยกว่า $10 \mu\text{s}$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10^{-4} โมลาร์

2.4.3 ขั้นตอนสุดท้าย (Terminal Step) สารอินทรีย์และสารอินทรีย์บางตัวสามารถทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิล เกิดเรดิคอลลำดับที่สอง (Secondary Radical) ซึ่งไม่สร้างอนุมูลซูเปอร์แอนเนียน หรืออนุมูลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ จะเรียกสารเหล่านี้ว่าตัวยับยั้ง (inhibitor/Scavenger) ซึ่งสามารถหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่และยับยั้งการสลายตัวของโอโซนได้

2.5 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโอโซนเนชั่น

2.5.1 pH เมื่อความเป็นด่าง (Alkalinity) เพิ่มขึ้น จะเกิดการสลายตัวของโอโซนเพิ่มขึ้น ทำให้โอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ และ Hydroxide ion (OH^-) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Hydroxyl radical (OH°) ซึ่งกระบวนการนี้ จะมี Hydroxide ion (OH^-) เป็นตัว Promoter ของ

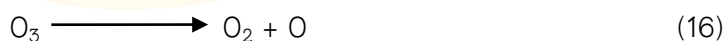
ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน (Landglais, Reckhow and Brink, 1991; Ku, Su and Shen, 1996) ส่วนแสงอัลตราไวโอเล็ตจะมีอิทธิพลต่อการสลายตัวของโอโซนมากขึ้น เมื่อสารละลายเป็นกรด (pH ต่ำสุด เท่ากับ 2) แต่จะมีอิทธิพลต่อการสลายตัวของโอโซนลดลงเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น (Landglais, Reckhow and Brink, 1991)

2.5.2 ตัวกระตุ้น การใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับโอโซนสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพวกสารอินทรีย์พวก Polychlorinated biphenyls และ Trihalomethanes (Glaze and Kang, 1980) และการใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโอโซนร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต สามารถกำจัดสาร คลอโรอัสซีนและไตรคลอโรเอทิลีน (TCE) ได้สูงกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว (Hoigne and Bode, 1983)

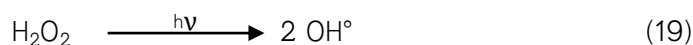
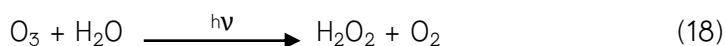
2.5.3 ความเข้มข้นของโอโซน การทดลองบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า ด้วยระบบต่าง ๆ เช่น โอโซนอย่างเดียว (O_3) โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (O_3/H_2O_2) และโอโซนร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต (O_3/UV) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ระบบโอโซนอย่างเดียว (O_3) ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด ส่วนระบบ โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (O_3/H_2O_2) และโอโซนร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต (O_3/UV) ให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ลดต่ำลง เนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดซ์สีย้อมผ้าได้โดยตรง การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือแสงอัลตราไวโอเล็ต จะทำให้โอโซนแตกตัวเป็นอนุมูลต่างๆที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์อื่น ๆ ทำให้โอโซนสูญเสียไปส่วนหนึ่ง ส่งผลให้โอโซนในการออกซิไดซ์สีย้อมผ้า ลดน้อยลง (Adams, Fusco and Kanzelmeyer, 1995)

กระบวนการโฟโตแคตาไลติกโอโซนเนชัน (Photocatalytic ozonation)

เป็นการสลายตัวของโอโซนในสภาวะก๊าซภายใต้อิทธิพลของแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยโอโซนจะดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 254 nm จะได้โมเลกุลของออกซิเจนและอะตอมของซิเจน จากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ได้อนุมูลไฮดรอกซิลเป็นผลิตภัณฑ์ (Munter, 2001)



ส่วนการสลายตัวของโอโซนในสารละลายที่เป็นน้ำ เมื่อกระตุ้นโอโซนด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตจะได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และก๊าซออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาต่อเนืองไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะแยกเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^\bullet) 2 โมเลกุล ดังแสดงในสมการ 18 และ 19



เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโอโซนเนชั่น (UV/O₃) กับกระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/ H₂O₂) พบว่า UV/O₃ สร้างอนุมูลไฮดรอกซิล ได้มากกว่า UV/ H₂O₂ แสดงในตาราง 5 แต่ถ้าในน้ำมีสารอินทรีย์ที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี จะทำให้แสงอัลตราไวโอเล็ตทำปฏิกิริยากับโอโซนได้น้อย (Munter, 2001)

ตาราง 5 การสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลของ UV/O₃ และ UV/ H₂O₂

Oxidant	$\epsilon_{254 \text{ nm}}, \text{M}^{-1} \text{cm}^{-1}$	Stoichiometry	OH formed per incident photon
H ₂ O ₂	20	H ₂ O ₂ → 2OH [°]	0.09
O ₃	3300	3O ₃ → 2OH [°]	2.00

ที่มา: Munter (2001)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Liu et al., (2018) ศึกษาการตกค้างของฮอร์โมนเอสโตรเจนในแม่น้ำที่รับน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ในไต้หวัน โดยทำการเก็บตัวอย่าง 12 จุด ที่รับน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ บริเวณรอบแม่น้ำหูลัววในไต้หวัน แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Liquid chromatography–tandem mass spectrometry (LC–MS/MS) พบว่า ฮอร์โมนเอสโตรเจน (E1) และฮอร์โมนเอสทราไดออล (E2) มีระดับสูงกว่าค่าความเข้มข้นที่ไม่ส่งกระทบ (PNEC) ของสัตว์น้ำอยู่ที่ 6 และ 2 ng/L ตามลำดับ

Bledzka et al., (2010) ศึกษากระบวนการสลายตัวของฮอร์โมนต่อมไร้ท่อด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง โดยทำการทดลองบำบัดฮอร์โมน 4 ชนิด คือ บิวทิลพาราเบน (butylparaben), 4-เทอร์-ออกทิลฟีนอล (4-tert-cotylphenol), เทรโนโบลอน (trenbolone) และโบลดีโนน (boldenone) โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกระบวนการโฟโตไลซิส (Photolysis) กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/ H₂O₂) และกระบวนการออกซิเดชันสารไวต่อแสง (Photosensitized oxidation) พบว่ากระบวนการโฟโตไลซิสสามารถสลายโบลดีโนนได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด รองลงมาคือ บิวทิลพาราเบน เทรโนโบลอน และ 4-เทอร์-ออกทิลฟีนอล ตามลำดับ ส่วนกระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจน

เปอร์ออกไซด์ พบว่าสามารถย่อยสลายสารได้ทั้ง 4 ชนิด และเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว สำหรับกระบวนการออกซิเดชันสารไวต่อแสง พบว่ามีอัตราการสลายตัวช้าและสลายฮอร์โมนได้น้อย สรุปได้ว่ากระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/H₂O₂) เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด

Li and Zhang (2014) ศึกษาการกำจัดฮอร์โมนเอสโตรเจนในของเสียจากระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งด้วยกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชัน โดยทำการทดลองบำบัดฮอร์โมนเอสโตรน (E1) เบต้า-เอสทราไดออล (E2) เอสทริออล (E3) และ 17 แอลฟา-เอthinilเอสทราไดออล (EE2) ที่ตกค้างในตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งของเมืองเซียงไฮ้ ประเทศจีน การวิเคราะห์ด้วย HPLC พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฮอร์โมน E1, E2, E3, EE2 ด้วยกระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชันเท่ากับ 70%, 90%, 98%, 84% ตามลำดับ

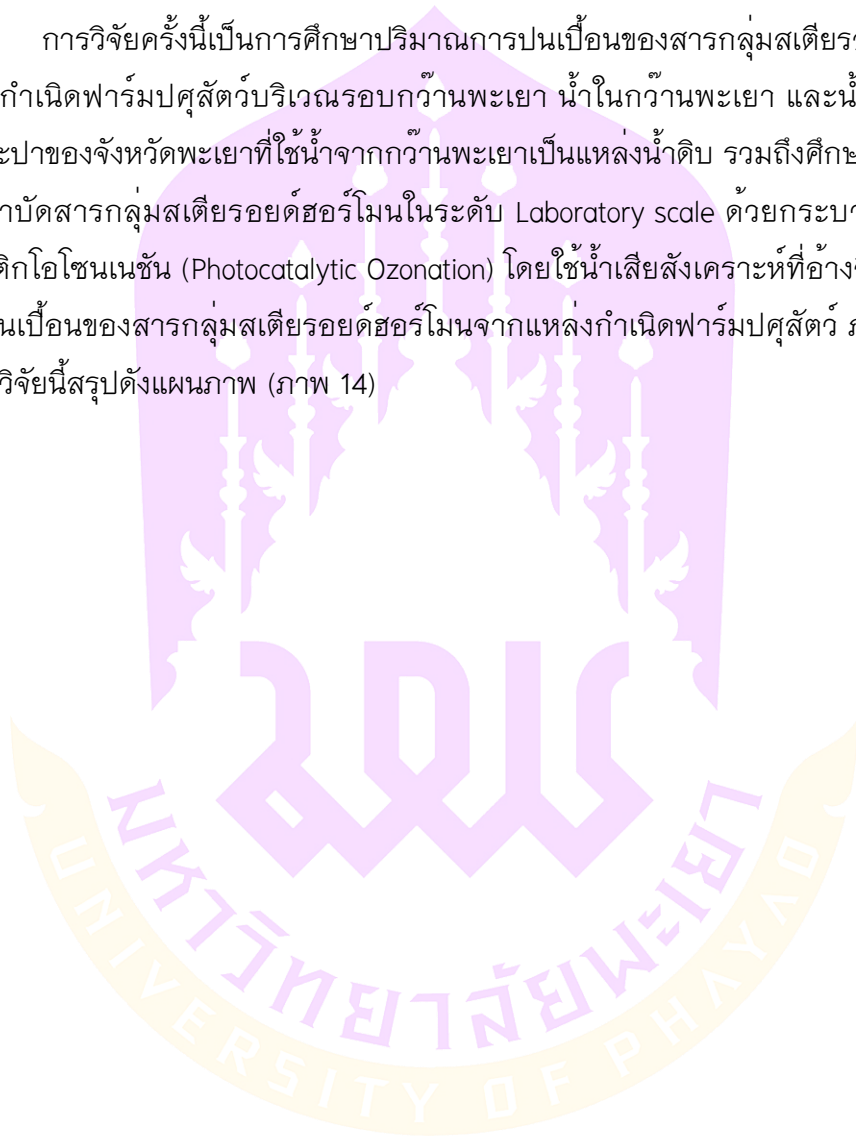
Cedat et al., (2016) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฮอร์โมนเอสโตรเจนด้วยกระบวนการยูวีโฟโตไลซิสและการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) โดยทำการทดลองบำบัดฮอร์โมนเอสโตรน (E1), เบต้า-เอสทราไดออล (β E2) และ 17 แอลฟา-เอthinilเอสทราไดออล(EE2) จากน้ำเสียในระดับนำร่อง ใช้แสง UV ช่วงความยาวคลื่น 254 nm และ H₂O₂ ความเข้มข้น 10, 40 และ 90 mg/Lนำมาทำการวิเคราะห์ด้วย HPLC พบว่ามีเพียง E1 ที่ถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการยูวีโฟโตไลซิส แต่ฮอร์โมนทั้งหมดถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂)

สันติพันธ์ เนียบแหลม, ตอพงค์ กรีธาชาติ และเนทียา กรีธาชาติ (2561) ศึกษาโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฮอร์โมน 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรน (MT) ด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส กระบวนการโอโซนเนชั่น และกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโอโซนเนชั่น โดยทำการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีฮอร์โมน MT ในระดับห้องปฏิบัติการแล้วทำการวิเคราะห์ด้วย HPLC พบว่ากระบวนการโฟโตแคตาไลติกโอโซนเนชั่น ณ สภาวะที่ pH 5.0 ปริมาณโอโซน 400 mg/hr UV-C254 nm (70 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร) และเวลาในการบำบัด 15 นาที เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดฮอร์โมน MT ดีที่สุด เมื่อเทียบกับกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสและโอโซนเนชั่น

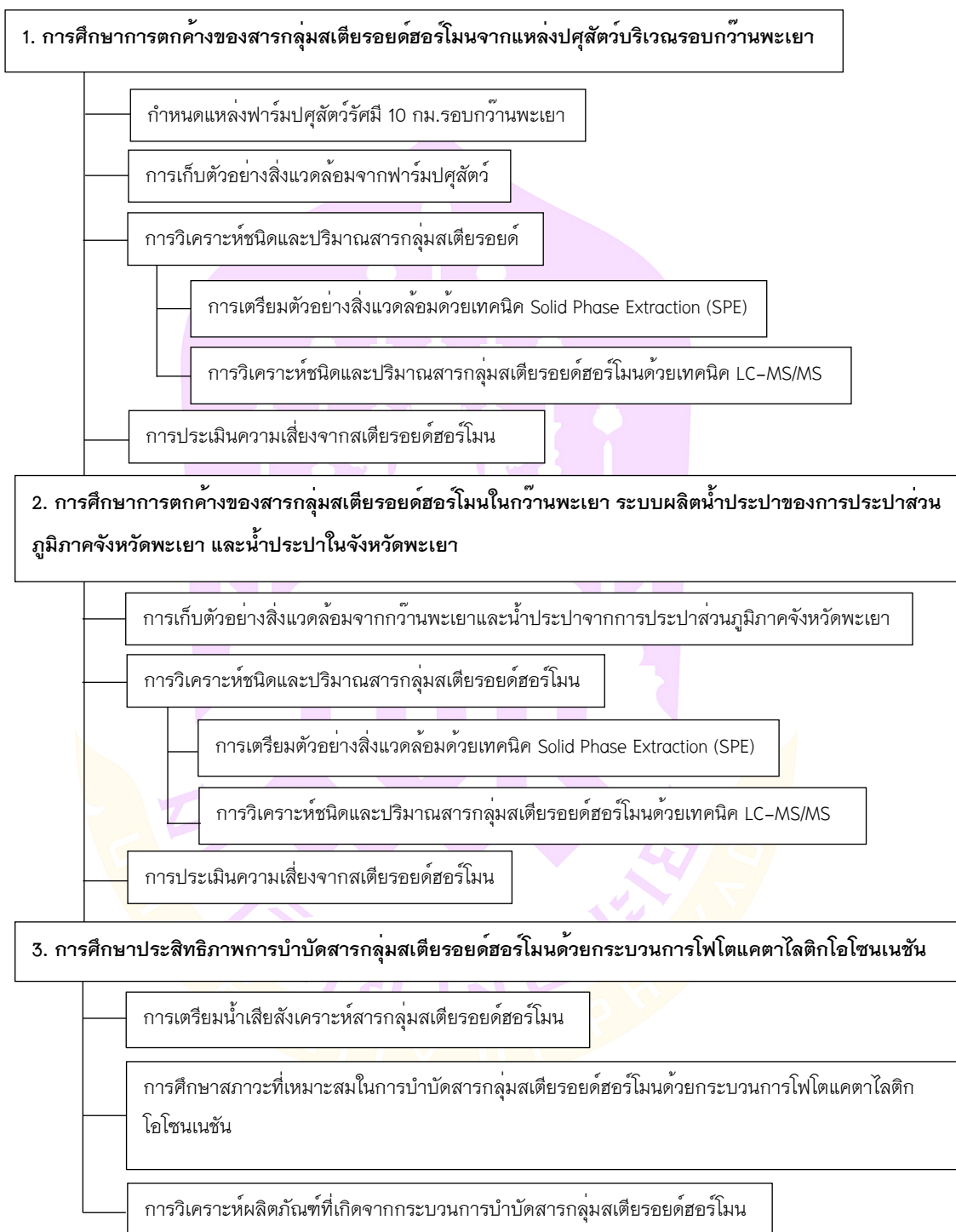
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาปริมาณการปนเปื้อนของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนในแหล่งกำเนิดฟาร์มปศุสัตว์บริเวณรอบกว๊านพะเยา น้ำในกว๊านพะเยา และน้ำในระบบผลิตน้ำประปาของจังหวัดพะเยาที่ใช้น้ำจากกว๊านพะเยาเป็นแหล่งน้ำดิบ รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนในระดับ Laboratory scale ด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโอโซนเนชั่น (Photocatalytic Ozonation) โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่อ้างอิงจากปริมาณการปนเปื้อนของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งกำเนิดฟาร์มปศุสัตว์ ภาพรวมในการศึกษาวิจัยนี้สรุปดังแผนภาพ (ภาพ 14)



แผนการดำเนินงานวิจัย

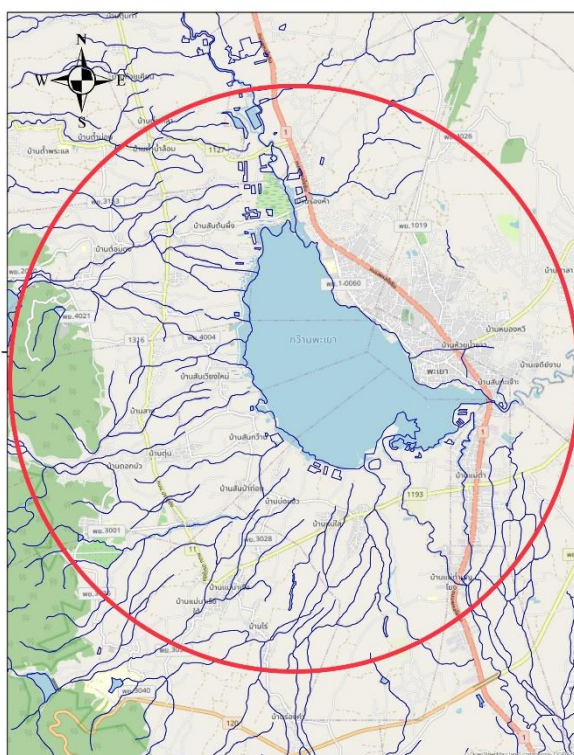


ภาพ 14 แผนการดำเนินการวิจัย

การศึกษาสถานการณ์การตกค้างของสารกลุ่มสไตรอยด์ฮอร์โมนจากแหล่งกำเนิดปศุสัตว์
รอบกว๊านพะเยา

ฟาร์มปศุสัตว์บริเวณรอบกว๊านพะเยา

รวบรวมข้อมูลฟาร์มปศุสัตว์เบื้องต้นจากสำนักงานปศุสัตว์จังหวัดพะเยาในรัศมี
10 กิโลเมตรรอบกว๊านพะเยา (ภาพ 15) เพื่อคัดเลือกฟาร์มที่จะทำการศึกษา โดยพบว่ามีฟาร์ม
ปศุสัตว์ 4 ประเภท ได้แก่ ฟาร์มสุกร ฟาร์มไก่เนื้อ ฟาร์มไก่ไข่ และฟาร์มโคนม จากนั้นดำเนินการ
ลงสำรวจพิกัดทางสารสนเทศของฟาร์มปศุสัตว์ เพื่อวางแผนเก็บตัวอย่างสิ่งแวดล้อมและ
สอบถามข้อมูลรายละเอียดการดำเนินการของแต่ละฟาร์มปศุสัตว์



ภาพ 15 ขอบเขตพื้นที่ดำเนินการสำรวจรอบกว๊านพะเยาฝั่งตะวันตกรัศมี 10 กิโลเมตร

การเก็บข้อมูลและตัวอย่างสิ่งแวดล้อมจากฟาร์มปศุสัตว์

ตัวอย่างสิ่งแวดล้อมที่เก็บจากฟาร์มปศุสัตว์ ได้แก่ มูลสัตว์ ดิน และน้ำเสีย ที่เกิดขึ้น
ภายในฟาร์ม โดยจะเก็บ 1 ครั้ง ในช่วงที่สัตว์มีการเจริญพันธุ์ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาชนิดและ
ปริมาณของสารกลุ่มสไตรอยด์ฮอร์โมน โดยทำการเก็บตัวอย่างแบบสุ่ม (Grab sampling) และ

การเก็บตัวอย่างแบบผสม (Composite sampling) ในช่วงที่สัตว์อยู่ในระยะเจริญพันธุ์ ซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณฮอร์โมนเพศถูกคัดหลั่งมากับมูลสัตว์มากที่สุด รายละเอียดการเก็บตัวอย่างสิ่งแวดล้อมมีดังนี้

1. ตัวอย่างมูลสัตว์หรือมูลสัตว์ จะทำการเก็บมูลสัตว์สดจากคอกเลี้ยงสัตว์ โดยเก็บตัวอย่างแบบผสม (Composite sampling) จากมูลสัตว์หลาย ๆ จุดในคอกแล้วนำมารวมกันเป็นตัวแทนตัวอย่างมูลสัตว์ในช่วงที่สัตว์อยู่ในระยะเจริญพันธุ์

2. ตัวอย่างดิน จะทำการเก็บตัวอย่างดินแบบผสม (Composite sampling) โดยเก็บดินในบริเวณฟาร์มใกล้กับคอกเลี้ยงสัตว์หลาย ๆ จุดแล้วนำมารวมกันเป็นตัวแทนตัวอย่างดินในช่วงที่สัตว์อยู่ในระยะเจริญพันธุ์

3. ตัวอย่างน้ำเสีย ได้แก่ น้ำเสียจากการล้างทำความสะอาดคอก โดยกรณีฟาร์มที่มีระบบบำบัดน้ำเสียจะเก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากระบบบำบัด ส่วนกรณีฟาร์มที่ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียจะเก็บน้ำเสียที่เป็นน้ำล้างขณะทำความสะอาดคอกหรือเก็บจากบ่อน้ำในบริเวณฟาร์มที่เป็นบ่อรองรับน้ำล้างดังกล่าว ทั้งนี้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียแบบสุ่ม (Grab sampling)

ในการเก็บข้อมูลรายละเอียดของฟาร์มปศุสัตว์ ประกอบด้วย ตำแหน่งพิกัดที่ตั้ง ชนิดปศุสัตว์ ขนาดของการเลี้ยง ข้อมูลวิธีการเลี้ยง ข้อมูลชนิดและปริมาณอาหารสัตว์ ยารักษาโรคสัตว์ ปริมาณสารเคมีและฮอร์โมนที่ใช้ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการเลี้ยง ลักษณะการระบายน้ำ และวิธีการจัดการน้ำเสีย

การเตรียมตัวอย่างสิ่งแวดล้อมจากฟาร์มปศุสัตว์ด้วยเทคนิค Solid Phase Extraction (SPE)

ตัวอย่างสิ่งแวดล้อมที่เก็บจากฟาร์มปศุสัตว์ อันได้แก่ มูลสัตว์ ดิน และน้ำเสีย จำเป็นต้องนำมาสกัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนออกจากตัวอย่างก่อน แล้วจึงนำสารที่สกัดได้ไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยเทคนิค Liquid Chromatography–Mass Spectrometry (LC–MS/MS) ต่อไป ทั้งนี้ในการสกัดตัวอย่างสิ่งแวดล้อมแบ่งเป็นตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ได้แก่ มูลสัตว์ และดิน และตัวอย่างที่เป็นของเหลว โดยมีรายละเอียดวิธีการสกัดตัวอย่างด้วยเทคนิค SPE ดังนี้

1. การสกัดตัวอย่างสิ่งแวดล้อมที่เป็นของแข็ง (มูลสัตว์ และดิน) ด้วยเทคนิค SPE มีขั้นตอนดังนี้

1.1 นำตัวอย่างมูลสัตว์หรือดินมาทำให้แห้ง แล้วบดให้ละเอียด (ภาพ 16) จากนั้นชั่งตัวอย่างดังกล่าวมา 10 กรัม ทำการ Spike สาร E1–C13 (Internal standard) ความเข้มข้น 1 mg/L ปริมาณ 100 µL แล้วเติม Methanol (HPLC grade) ปริมาณ 20 mL นำไปเขย่าให้เข้ากัน

ด้วยเครื่อง Vortex เป็นเวลา 10 นาที และทิ้งไว้ให้ตกตะกอน (ภาพ 17) บีบเอสารละลาย ตัวอย่างส่วนที่ใสมา 10 mL

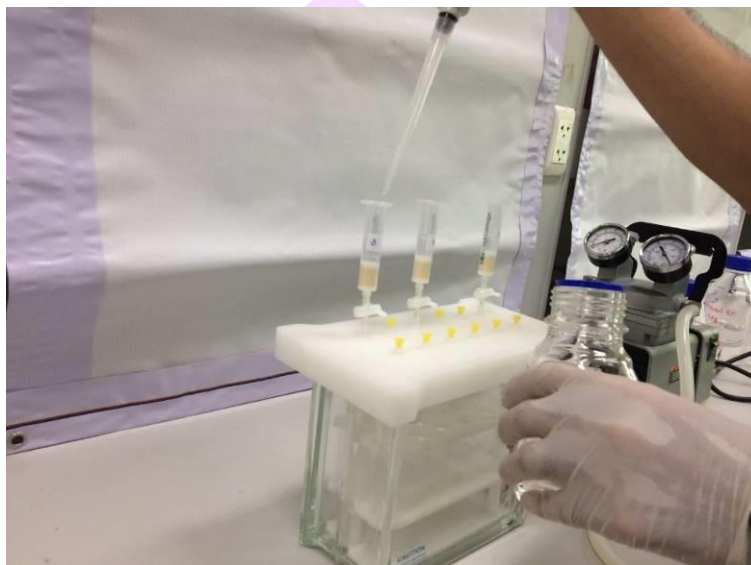


ภาพ 16 ตัวอย่างมูลสัตว์และดิน



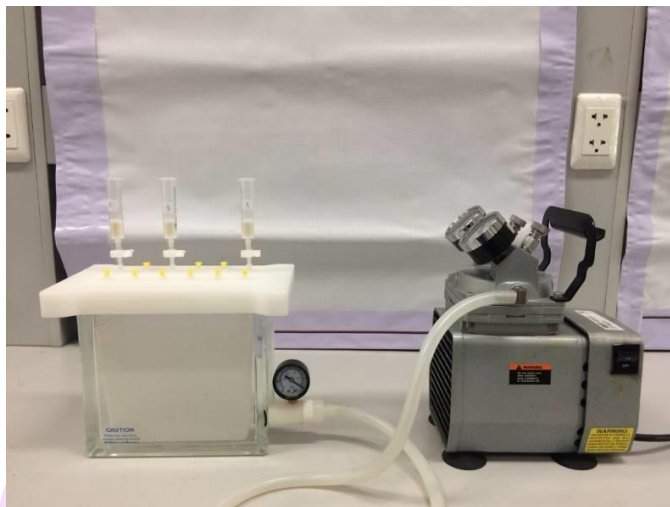
ภาพ 17 การแยกชั้นตกตะกอนของตัวอย่างมูลสัตว์และดิน

1.2 นำน้ำตัวอย่างส่วนใสไปสกัดและทำให้เข้มข้นขึ้นด้วยเทคนิค SPE โดยใช้ HLB cartridge (ขนาด 500 มิลลิกรัม ปริมาตร 6 mL) โดยทำการปรับสภาพ HLB cartridge (Conditioning) ด้วยการเติมสารละลาย Methanol (HPLC grade) ปริมาตร 1 mL และตามด้วยน้ำ DI ปริมาตร 1 mL ตามลำดับ (ภาพ 18) ในขั้นตอนนี้ต้องระวังไม่ให้ Cartridge แห้งก่อนที่จะนำตัวอย่างมาสกัด



ภาพ 18 การปรับสภาพ HLB cartridge ก่อนการสกัดน้ำตัวอย่าง

1.3 นำน้ำตัวอย่างใสลงไปใส่ใน HLB cartridge (Load sample) พร้อมทั้งเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดตัวอย่าง ด้วยอัตราการไหล 3 mL/min จนหมด (ภาพ 19) หลังจากนั้นปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที



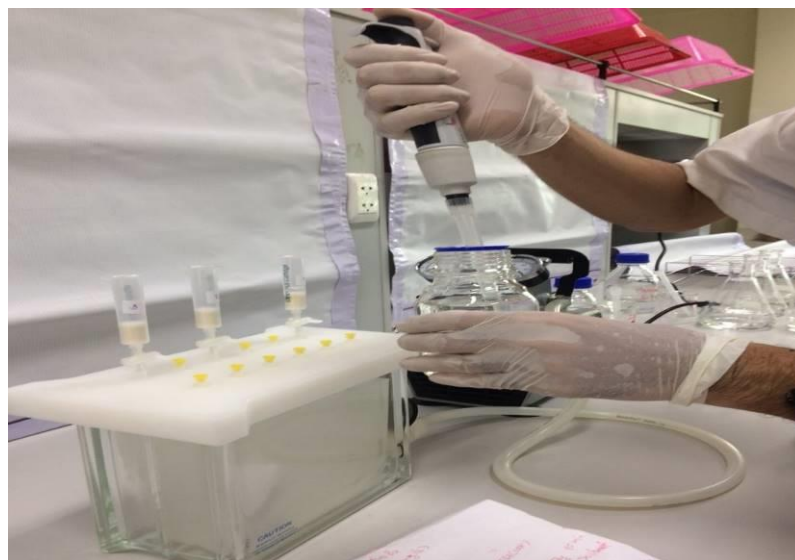
ภาพ 19 การสกัดน้ำตัวอย่าง

1.4 ทำการล้าง HLB cartridge ด้วย Methanol ความเข้มข้น 5% (v/v) ปริมาตร 2 mL จำนวน 3 ครั้ง (ภาพ 20) จากนั้นปล่อยให้ Cartridge แห้งสนิท



ภาพ 20 การล้าง HLB cartridge ด้วย Methanol 5%

1.5 ทำการชะสารตัวอย่างที่อยู่ในชั้นดูดซับของ HLB cartridge (Elution) โดยการเติม Methanol (HPLC grade) ปริมาตร 6 mL (โดยแบ่งเติมครั้งละ 2 mL จำนวน 3 ครั้ง) เปิดปั๊ม สูญญากาศให้ตัวอย่างถูกชะด้วยอัตราการไหล 3 mL/min (ภาพ 21)

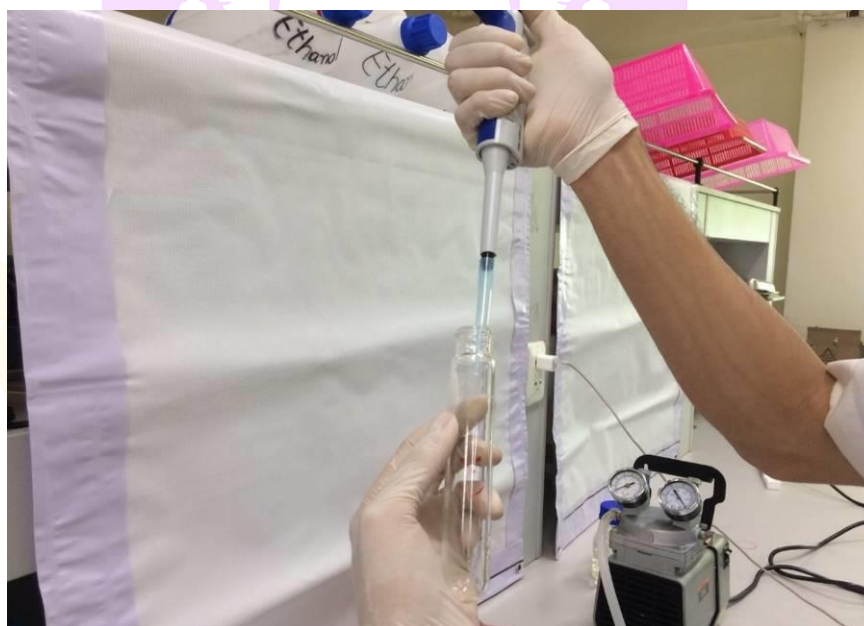


ภาพ 21 การชะสารตัวอย่างออกจาก HLB cartridge

1.6 นำสารละลายที่สกัดได้มาทำให้เข้มข้นขึ้น (Concentrate) โดยนำไประเหยให้แห้ง (Dryness) ด้วยก๊าซไนโตรเจน (ภาพ 22) และทำการเติม Methanol (HPLC grade) ปริมาตร 0.25 mL เพื่อละลายตัวอย่างออกมา (ภาพ 23)

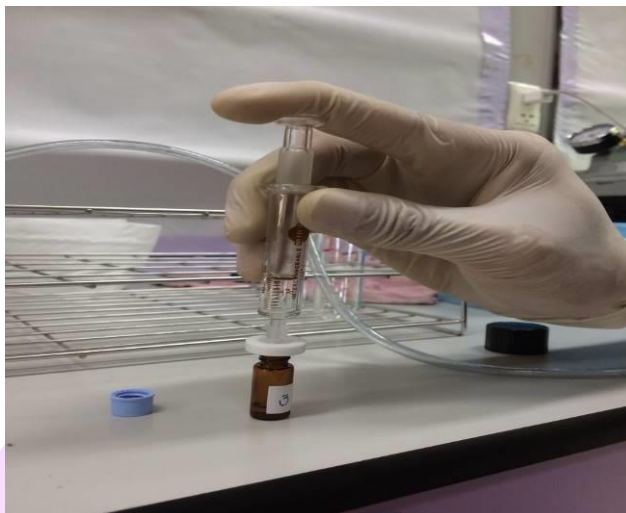


ภาพ 22 การระเหยสารสกัดด้วยก๊าซไนโตรเจน



ภาพ 23 การละลายสารตัวอย่างด้วย Methanol

1.7 นำตัวอย่างสารละลายที่ได้กรองผ่าน Syringe filter ที่บรรจุกระดาษกรองชนิด Nylon รูพรุนขนาด $0.45 \mu\text{m}$ ก่อนบรรจุใส่ขวด Vial ขนาด 2.0 mL และนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS (ภาพ 24)



ภาพ 24 การกรองสารละลายเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS

2. การสกัดตัวอย่างสิ่งแวดล้อมที่เป็นของเหลว (น้ำเสีย) ด้วยเทคนิค SPE มีขั้นตอนดังนี้
 2.1 นำน้ำตัวอย่าง (น้ำเสียจากปศุสัตว์) ปริมาตร 100 mL (เขย่าขวดก่อนนำมาใช้) ทำการ Spike สาร Estrone-C13 (E1-C13) ซึ่งเป็นสาร Internal standard ความเข้มข้น 1 mg/L ปริมาตร 25 ไมโครลิตร มากรองผ่านกระดาษกรอง GF/C (ความพรุน 1.2 μm , Whatman) จากนั้นล้างตะกอนบนกระดาษกรองด้วย Methanol (HPLC เกรด) ปริมาตร 2 mL เพื่อให้ฮอร์โมนที่ติดค้างอยู่บนกระดาษกรองถูกชะลงไปด้วย (ภาพ 25)

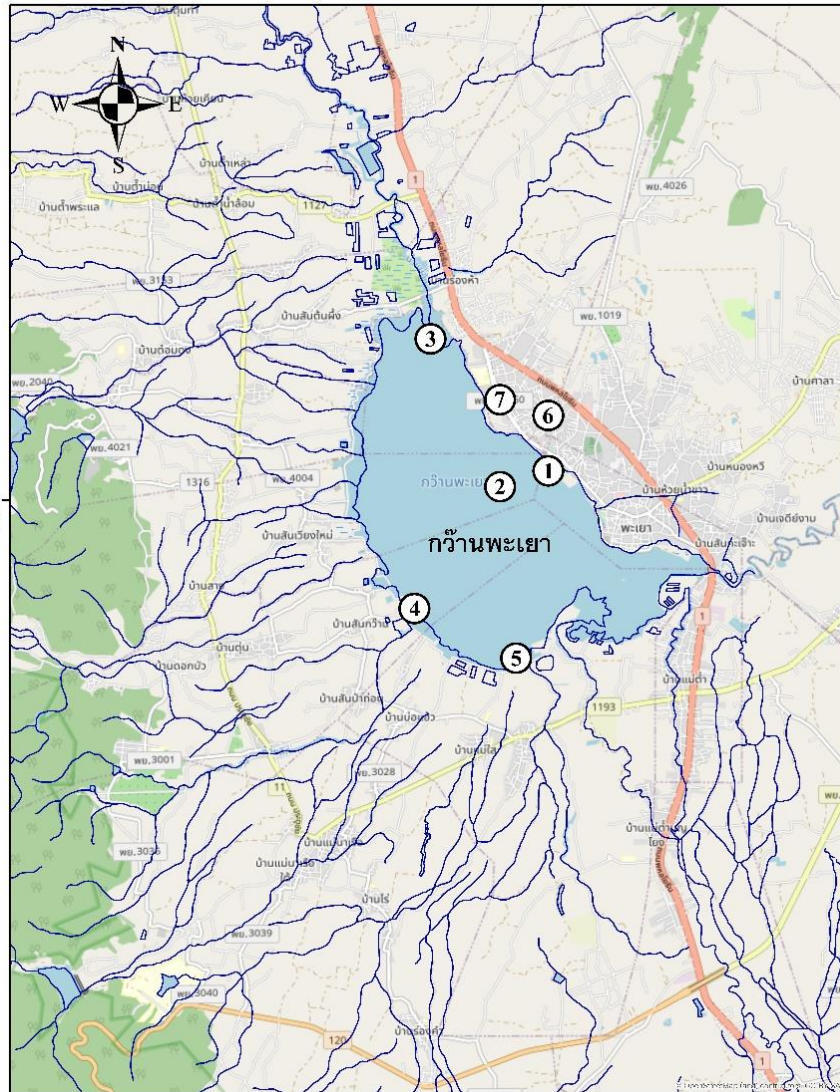


ภาพ 25 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียจากปศุสัตว์

2.2 นำน้ำตัวอย่างไปสกัดและทำให้เข้มข้นขึ้นด้วยเทคนิค SPE เหมือนกับการสกัดตัวอย่างที่เป็นของแข็ง (มูลสัตว์และดิน) ในข้อ 1.2) ถึงข้อ 1.7) ข้างต้น จนได้น้ำตัวอย่างที่พร้อมนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS

การศึกษาการตกค้างของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนในกัวนพะเยา ระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา และน้ำประปาในจังหวัดพะเยา

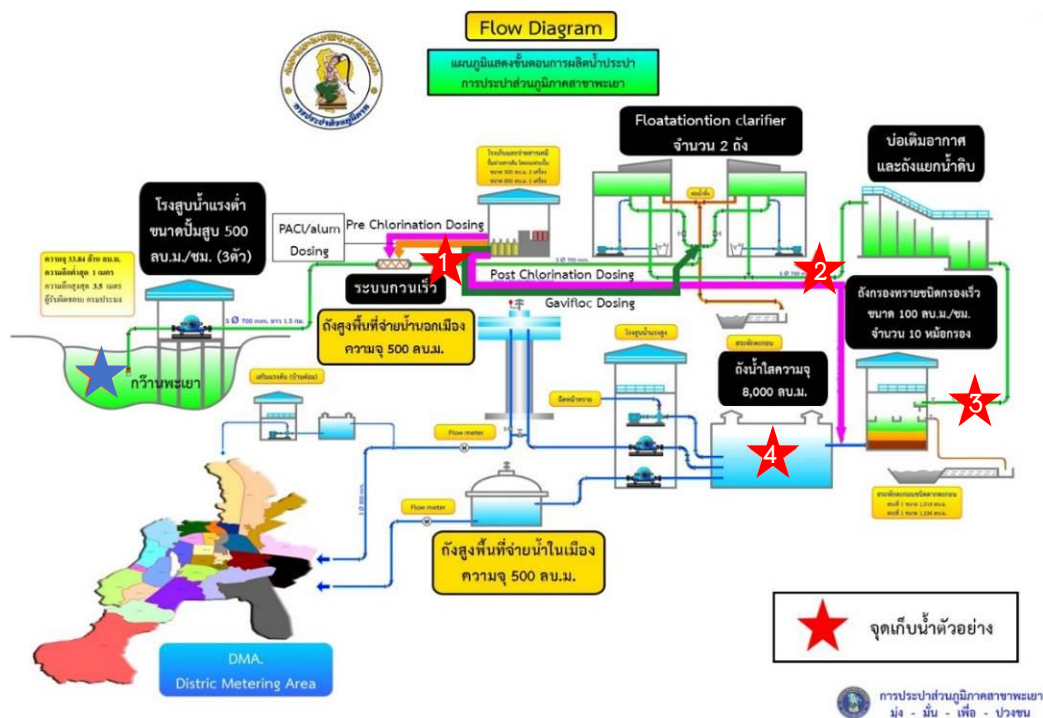
กัวนพะเยาเป็นแหล่งน้ำสำคัญของจังหวัดพะเยา ซึ่งมีการรับน้ำจากหลายแห่งมารวมกัน ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเก็บน้ำตัวอย่างจากกัวนพะเยา จำนวน 5 จุด ได้แก่ (1) จุดสูบน้ำการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา (2) กลางกัวนพะเยา (3) สะพานขุนเดช (4) บ้านสันข้างหิน และ (5) บริเวณปากท่อสูบน้ำรวมเทศบาลเมืองพะเยา (ปากคลองแม่ใส) แสดงดังภาพ 26 นอกจากนี้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยาที่ใช้น้ำจากกัวนพะเยาเป็นน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา โดยตำแหน่งของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา ตั้งอยู่ใกล้กับกัวนพะเยา (ภาพ 26 หมายเลข (6)) ส่วนน้ำประปาที่นำจ่ายในจังหวัดพะเยาทำการเก็บตัวอย่างน้ำประปาจากก๊อกน้ำของโรงพยาบาลจังหวัดพะเยา (ภาพ 26 หมายเลข (7))



ภาพ 26 ตำแหน่งจุดเก็บน้ำตัวอย่างในกว้านพะเยา การประปาส่วนภูมิภาค
จังหวัดพะเยา และโรงพยาบาลพะเยา

จุดเก็บตัวอย่างระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา ระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา แสดงดังภาพ 27 โดยงานวิจัยนี้จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากขั้นตอนของระบบผลิตน้ำประปาจำนวน 4 จุด ได้แก่ (1) ขั้นตอนการเติมคลอรีนก่อนการบำบัด (2) กระบวนการโพลท์เทชัน (3) ระบบเติมอากาศ และ (4) ขั้นตอนการเติมคลอรีนหลังการบำบัด เปรียบเทียบกับจุดสูบน้ำดิบจากกว้านพะเยา รวมถึง

เก็บตัวอย่างน้ำประปาที่แจกจ่ายให้ประชากรในพื้นที่เขตเทศบาลเมืองพะเยา 1 จุด ได้แก่ โรงพยาบาลพะเยา



ภาพ 27 ผังแสดงกระบวนการผลิตน้ำประปาและจุดเก็บน้ำตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างน้ำในระบบผลิตประปาและน้ำประปาด้วยเทคนิค Solid Phase Extraction (SPE)

ตัวอย่างน้ำจากก๊วนพะเยา จำนวน 5 จุด ระบบการผลิตน้ำประปา จำนวน 4 จุด และตัวอย่างน้ำประปา จำนวน 1 จุด จะถูกนำมาสกัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนออกจากตัวอย่างก่อน แล้วจึงนำสารที่สกัดได้ไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยเทคนิค Liquid Chromatography–Mass Spectrometry (LC–MS/MS) ต่อไป โดยมีขั้นตอนการสกัดด้วยเทคนิค SPE ดังนี้

1. นำน้ำตัวอย่างของก๊วนพะเยาปริมาตร 100 mL หรือน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาและน้ำประปา ปริมาตร 500 mL (เขย่าขวดก่อนนำมาใช้) ทำการ Spike สาร Estrone–C13 (E1–C13) ซึ่งเป็นสาร Internal standard ความเข้มข้น 1 mg/L ปริมาตร 25 μ L มากรองผ่านกระดาษกรอง GF/C (ความพรุน 1.2 μ m, Whatman) จากนั้นล้างตะกอนบนกระดาษกรองด้วย

Methanol (HPLC เกรด) ปริมาตร 2 mL เพื่อให้ฮอร์โมนที่ติดค้างอยู่บนกระดาษกรองถูกชะลงไปด้วย

2. นำน้ำตัวอย่างไปสกัดและทำให้เข้มข้นขึ้นด้วยเทคนิค SPE เหมือนกับการเตรียมตัวอย่างสิ่งแฉดล้อมจากฟาร์มปศุสัตว์ด้วยเทคนิค Solid Phase Extraction (SPE) หัวข้อที่ผ่านมาจนได้น้ำตัวอย่างที่พร้อมนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยเทคนิค LC-MS/MS

เทคนิคทางเคมีจะช่วยในการระบุชนิดสารและบ่งบอกปริมาณของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนได้ ซึ่งสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนนี้แม้จะมีปริมาณน้อยในตัวอย่าง แต่ส่งผลกระทบต่อผู้รับสัมผัสได้ในระดับนาโนกรัม เทคนิควิเคราะห์ชนิดและปริมาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เทคนิค Liquid Chromatography–Mass Spectrometry (LC-MS/MS) โดยใช้เครื่อง LC-MS/MS ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น TSQ Endure วิเคราะห์ด้วยคอลัมน์ชนิด Prodigy ODS (3) ขนาดความหนาของฟิล์ม 5 μm ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 150 และ 2.0 mm ตามลำดับ ควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ 35°C เฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ 0.1% Formic acid ในน้ำ (A) และ 0.1% Formic acid ในเมทานอล (B) สัดส่วนของเฟสเคลื่อนที่ในการวิเคราะห์เป็นไปตามตาราง 6 ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ 10 μL ในส่วนของแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Mass spectrometer) ใช้แหล่งกำเนิดไอออน แบบ ESI+ ส่วน Spray ใช้กำลังไฟ 3,500 โวลต์ อุณหภูมิในส่วน Ion transfer tube และ Vaporizer อยู่ที่ 338°C และ 340°C ตามลำดับ สารมาตรฐานกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ใช้ในการงานวิจัยครั้งนี้มีทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่ Estrone (E1), α -Estradiol (α E2), β -Estradiol (β E2), Estriol (E3), 17α -Ethinylestradiol (EE2), Testosterone (T) และ 17α -Methyltestosterone (MT)

ตาราง 6 สัดส่วนของเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน

Time (min)	%A	%B	Flow rate (mL/min)
0.00	90	20	0.3
1.00	90	20	0.3
14.00	0	100	0.3
18.00	0	100	0.3

ตาราง 6 (ต่อ)

Time (min)	%A	%B	Flow rate (mL/min)
20.00	90	20	0.3
23.00	90	20	0.3

หมายเหตุ: A = 0.1% formic acid in H₂O

B = 0.1% formic acid in Methanol

การควบคุมคุณภาพวิธีการสกัดตัวอย่างด้วยค่า %Recovery

การควบคุมคุณภาพวิธีการเตรียมตัวอย่างสิ่งแวดล้อมโดยการสกัดด้วยเทคนิค SPE เพื่อให้เกิดความถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือของวิธีการสกัด การหาค่า % Recovery ของวิธีการสกัดเป็นหนึ่งในวิธีการควบคุมคุณภาพวิธีการสกัด โดยใช้สาร Estrone-2,3,4-13C₃ (E1-C13) เป็นสาร Internal standard ซึ่งเป็นสารไอโซโทปที่มีโครงสร้างคล้ายกับฮอร์โมนทั้ง 7 ชนิดในการศึกษานี้ และเป็นสารที่ไม่พบโดยทั่วไปตามธรรมชาติ

การหา %Recovery ของวิธีการสกัด โดยการใส่สาร Internal Standard (สาร Estrone-2,3,4-13C₃ (E1-C13)) เพื่อตรวจสอบหา % Recovery ของวิธีที่ใช้ในการสกัดตัวอย่างสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ตัวอย่างของแข็ง (มูลสัตว์ และดินจากปศุสัตว์) และตัวอย่างน้ำ (น้ำเสียจากปศุสัตว์ น้ำจากระบบผลิตน้ำประปา และน้ำประปา) โดยเมื่อทำการสกัดตัวอย่างสิ่งแวดล้อมตามวิธีการข้างต้นเสร็จเรียบร้อยแล้วต้องนำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยเครื่อง LC-MS/MS ตามวิธีการข้างต้นก่อนจะนำวิธีการสกัดดังกล่าวไปใช้ในการสกัดตัวอย่างจริงจำเป็นต้องหา %Recovery ของวิธีการสกัดตามสมการ 20 ให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ คือ 80-120%

$$\% \text{Recovery} = \frac{\text{ความเข้มข้นของสาร E1-C13 ที่ตรวจวัดได้}}{\text{ความเข้มข้นของสาร E1-C13 ที่เติมลงไป}} \times 100 \quad (20)$$

การประเมินความเสี่ยงจากการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมน

ศักยภาพในการออกฤทธิ์ของฮอร์โมน

การประเมินความเสี่ยงจากการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่อยู่ในน้ำ ดิน และมูลสัตว์ สามารถประเมินได้ตามการอ้างอิงของ Nie et al., (2015) โดยการประเมินความเสี่ยงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำนั้นจะนำมาเปรียบเทียบกับการออกฤทธิ์ของฮอร์โมนกลุ่มเอสโตรเจน (Estrogen) และกลุ่มแอนโดรเจน (Androgen) โดยสเตียรอยด์ฮอร์โมนกลุ่มเอสโตรเจนจะเปรียบเทียบกับ

การออกฤทธิ์กับฮอร์โมน Estradiol (E2) ในหน่วย Estradiol Equivalents (EEQs) โดยใช้สูตรดังสมการ 21 เช่นเดียวกันกับสเตียรอยด์ฮอร์โมนกลุ่มแอนโดรเจน (ฮอร์โมนเพศชาย) จะทำการเทียบการออกฤทธิ์กับฮอร์โมน Testosterone ให้อยู่ในหน่วย Testosterone Equivalents (TEQs) โดยใช้สมการ 22

$$EEQ_{cdl} = \sum EEQ_i = \sum (C_i \times EEF_i) \quad (21)$$

เมื่อ EEQ_i เป็นค่า EEQ ของสเตียรอยด์ฮอร์โมนกลุ่มเอสโตรเจนแต่ละสาร i , C_i เป็นค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ ส่วน EEF_i เป็นค่า Estrogenic Equivalent Factor แต่ละสาร i เทียบกับฮอร์โมน E2 ซึ่งค่า EEF_i ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 7 โดยค่าดังกล่าวได้มาจากการทดสอบด้วยวิธี Yeast Estrogen Screen (YES) (Beck et al., 2006)

$$TEQ_{cdl} = \sum TEQ_i = \sum (C_i \times AEF_i) \quad (22)$$

เมื่อ TEQ_i เป็นค่า TEQ ของสเตียรอยด์ฮอร์โมนกลุ่มแอนโดรเจนแต่ละสาร i , C_i เป็นค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ ส่วน AEF_i เป็นค่า Androgenic Equivalent Factor แต่ละสาร i เทียบกับฮอร์โมน T ซึ่งค่า AEF_i ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตาราง 7

ตาราง 7 ค่า EEF และ TEF สำหรับการคำนวณ EEQ และ TEQ

Estrogenic Equivalent Factor (EEF)		
สเตียรอยด์ฮอร์โมน	EEF	อ้างอิง
E1 (Estrone)	0.25	Nie et al. (2015)
E2 (Estradiol)	1	Nie et al. (2015)
E3 (Estriol)	5.9×10^{-3}	Nie et al. (2015)
EE2 (17 α -Ethinylestradiol)	1.25	Nie et al. (2015)
Androgenic Equivalent Factor (AEF)		
สเตียรอยด์ฮอร์โมน	AEF	อ้างอิง
T (Testosterone)	1	Homklin et al. (2009)
MT (17 α -Methyltestosterone)	0.93	Homklin et al. (2009)

การประเมินระดับความเสี่ยงของฮอร์โมนที่ตกค้าง

การจัดอันดับและประเมินความเสี่ยงจากการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม จะใช้ค่า Risk Quotient (RQ) ในการประเมิน โดยค่า RQ เป็นสัดส่วนระหว่างค่าที่ตรวจวัดได้ (Measured Environmental Concentration; MEC) ต่อค่าคาดการณ์ความเข้มข้นต่ำสุดที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบ (Predicted no Effect Concentration; PNEC) ดังสมการ 23

$$RQ = MEC/PNEC \quad (23)$$

ค่า PNEC เป็นค่าที่ได้จากการศึกษาการได้รับสารพิษแบบเรื้อรัง เช่น ค่า NOEL (No Observed Effect Level: ความเข้มข้นต่ำสุดที่ไม่ส่งผลกระทบ) หรือการได้รับพิษเฉียบพลัน ค่า EC50 โดยข้อมูลนี้ได้จากการศึกษาในสัตว์ทดลองแล้วนำมาพล็อตกราฟ Species Sensitivity Distribution (SSD) แล้วใช้ค่า HC5 หรือ Hazardous Concentration ที่ 5% เป็นค่า PNEC ซึ่งหมายความว่า มีสัตว์ทดลอง 5% แสดงอาการผิดปกติอย่างใดอย่างหนึ่งเมื่อได้รับสารเข้าไป โดยค่า HC5 และ/หรือ PNEC ของ E1, E2, E3, EE2, T และ MT ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตาราง 8 โดยสมการการคำนวณของ PNEC แสดงดังสมการ 24

$$PNEC = HC5/AF \quad (24)$$

โดยค่า AF หรือ Assessment Factor เป็นค่าสำหรับการประเมินผลเพื่อความปลอดภัยในการรับสารที่เป็นพิษหรืออันตรายเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิตโดยมีช่วงค่าอยู่ที่ 1-5 หรือมากกว่าขึ้นอยู่กับลักษณะความเป็นอันตรายของสารพิษนั้น ๆ (Yuan et al., 2014)

ตาราง 8 ค่า HC5 และ PNEC ของสเตียรอยด์ฮอร์โมน

Steroid hormone	HC5 (ng/L)	PNEC (ng/L)	Reference
E1 (Estrone)	-	6	Yuan et al. (2014)
E2 (Estradiol)	6.82	2.27 (AF=3) 1.36 (AF=5)	Yuan et al. (2014)
E3 (Estriol)	-	60,000	Yuan et al. (2014)
EE2 (17 α -Ethinylestradiol)	-	0.35	Caldwell et al. (2008)
T (Testosterone)	-	100	Andersen et al. (2001)
MT (17 α -Methyltestosterone)	100	20 (AF=5)	Boudreau et al. (2005)

เกณฑ์ในการแปลผลค่า RQ ที่บ่งชี้ถึงความเสี่ยงของการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในสิ่งแวดล้อมต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ อ้างอิงตาม Hernando et al., (2006) ดังตาราง 9

ตาราง 9 เกณฑ์การแปลผลค่า RQ

ช่วงค่า RQ	การแปลผลความเสี่ยง
0.01–0.1	ความเสี่ยงอยู่ในระดับต่ำ
0.1–1	ความเสี่ยงอยู่ในระดับปานกลาง
มากกว่า 1	ความเสี่ยงอยู่ในระดับสูง

การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกไฮดรอกซิเนชัน

การวิจัยส่วนนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกไฮดรอกซิเนชัน โดยทำการศึกษาในระดับ Laboratory scale โดยในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของฟาร์มปศุสัตว์ (พิจารณาเลือกจากฟาร์มปศุสัตว์ที่มีระบบบำบัดน้ำเสีย)

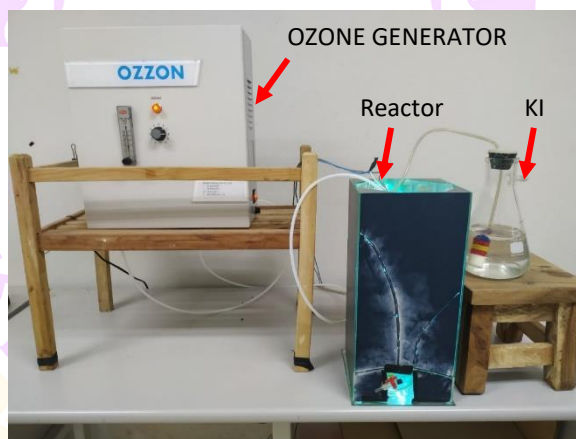
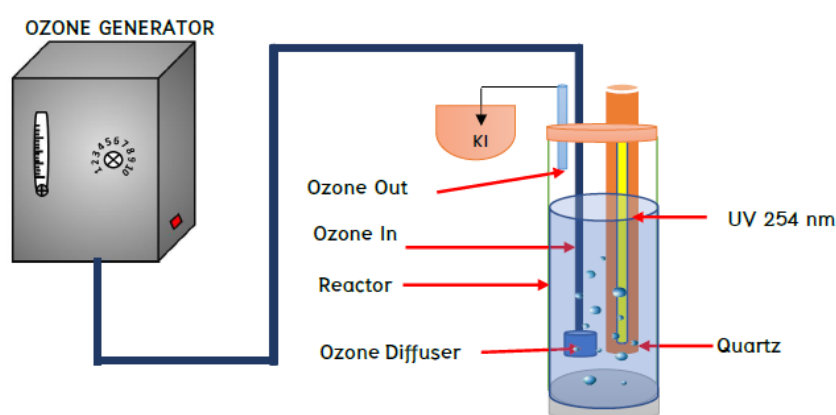
การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

งานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมน โดยเลือกชนิดฮอร์โมนเพศหญิง 2 ชนิด ได้แก่ 17β -Estradiol ($\beta E2$) และ 17α -Ethinylestradiol (EE2) และฮอร์โมนเพศชาย 1 ชนิด ได้แก่ Methyltestosterone (MT) ซึ่งเป็นสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่คาดว่าจะพบมากกว่าชนิดอื่น และย่อยสลายตามธรรมชาติได้น้อย โดยพิจารณาความเข้มข้นของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนเป็น 1,000 เท่าของปริมาณที่พบในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของฟาร์มปศุสัตว์ เพื่อให้มั่นใจว่าความเข้มข้นสูงกว่าที่ตรวจพบในฟาร์มปศุสัตว์ตัวอย่างจะสามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกไฮดรอกซิเนชันที่ศึกษา โดยกำหนดความเข้มข้นของฮอร์โมน $\beta E2$, EE2 และ MT เท่ากับ 0.5, 0.1 และ 0.1 mg/L ตามลำดับ เปรียบเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่มีความเข้มข้นที่ค่าความสามารถในการละลายน้ำสูงของฮอร์โมน $\beta E2$, EE2 และ MT เท่ากับ 13.0, 4.8 และ 3.0 mg/L

ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษากระบวนการโฟโตแคตตาไลติกไฮดรอกซิเนชัน

ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกไฮดรอกซิเนชัน แสดงดังภาพ 28 โดยถึงปฏิกิริยาทำจากแก้วทรงกระบอกขนาดความจุ 1.0 L มีฝาปิดและติดตั้งหลอดอัลตราไวโอเล็ต (UV-C lamp) ที่ความยาวคลื่น 254 nm ขนาด 10 W บรรจุภายในหลอดควอทซ์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 20 mm และเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก 23 mm (คิดเป็นค่าความเข้มของแสง UV เท่ากับ 70

มิลลิวัดต์/ตารางเซนติเมตร) และติดตั้งสายส่งโอโซนลงไปในถังปฏิกิริยาพร้อมตัวกระจายโอโซน ซึ่งภายในถังปฏิกิริยาจะมีช่องไว้สำหรับระบายโอโซนหรืออากาศที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา เพื่อควบคุมให้ไหลผ่านลงในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ สำหรับวิเคราะห์ปริมาณโอโซนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา ทั้งนี้ขณะทำการทดลองจะปิดครอบด้วยกล่องทึบแสงที่ภายในเป็นกระจกเงา (Glass box) เพื่อควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของฮอร์โมนในสภาวะที่มีแสงสว่างจากภายนอกและป้องกันอันตรายจากแสง UV



ภาพ 28 ถังปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกโอโซนเนชั่น

การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโอโซนเนชั่น

สภาวะการบำบัดสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโอโซนเนชั่นจะศึกษาที่สภาวะปริมาณโอโซน 400 mg/hr และ UV-C 254 nm (70 mW/cm²)

ค่า pH 5 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฮอร์โมน MT ในน้ำเสียสังเคราะห์จากการศึกษาของสันติพันธ์ ฉียบแหลม ตอพงศ์ กริธาชาติ และเนทียา กริธาชาติ (2561) แล้วทำการเก็บตัวอย่างน้ำในถังปฏิกิริยาที่ระยะเวลาในการบำบัด 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที ตามลำดับ นำไปวิเคราะห์หาปริมาณฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ที่เหลือหลังการบำบัดด้วยเทคนิค HPLC และทำการยืนยันปริมาณฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ที่แน่นอนด้วยเทคนิค LC-MS/MS เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยเทคนิค LC-MS/MS ที่กล่าวมาข้างต้น

การวิเคราะห์ปริมาณสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยเทคนิค HPLC

เตรียมน้ำตัวอย่างก่อนวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC โดยกรองด้วยกระดาษกรอง Nylon รูปวงขนาด $0.45 \mu\text{m}$ บรรจุใส่ขวด Vial ขนาด 2.0 mL จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ด้วยเครื่อง HPLC ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น LC-20A ที่สภาวะการวิเคราะห์ ได้แก่ คอลัมน์ C18 ($4.60 \text{ mL} \times 250.0 \text{ mm} \times 5.0 \mu\text{m}$) อุณหภูมิ 40°C ตัวทำละลายที่ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่คือ Acetonitrile และ Water ที่อัตราส่วน 70:30 ระยะเวลาในการวิเคราะห์ตัวอย่าง 15 นาที ดีเทคเตอร์ที่ใช้คือชนิด UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm และปริมาตรตัวอย่างที่วิเคราะห์ $40.0 \mu\text{L}$

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการบำบัดฮอร์โมน

การศึกษาในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซเนชัน เพื่อตรวจสอบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการบำบัดยังคงเป็นอนุพันธ์ของฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ที่ยังมีฤทธิ์เช่นเดียวกับฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT หรือไม่ โดยทำการศึกษาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon: TOC) ของผลิตภัณฑ์ จากนั้นตรวจสอบการออกฤทธิ์เหมือนฮอร์โมนเพศหญิง (Estrogenicity) และการออกฤทธิ์เหมือนฮอร์โมนเพศชาย (Androgenicity) ของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค Bioassay ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การศึกษาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon: TOC)

การศึกษาปริมาณ TOC ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซเนชันที่สภาวะที่เหมาะสมที่บำบัดได้ดีที่สุดของฮอร์โมนแต่ละชนิด เพื่อตรวจสอบว่าปริมาณ TOC ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นลดลงจากปริมาณ TOC ของฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT หรือไม่ โดยนำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยสภาวะที่เหมาะสมมาวิเคราะห์ TOC ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC Analyzer) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น TOC-L ระยะเวลาในการวิเคราะห์ 15 นาที ปริมาตรตัวอย่างที่วิเคราะห์ 30 mL

2. การตรวจสอบตรวจสอบการออกฤทธิ์เหมือนฮอร์โมนเพศหญิง (Estrogenicity) และการออกฤทธิ์เหมือนฮอร์โมนเพศชาย (Androgenicity) ของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค Bioassay

การตรวจสอบ Estrogenicity และ Androgenicity ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT เป็นการตรวจวัดความสามารถของผลิตภัณฑ์ในน้ำตัวอย่างในการจับกับตัวรับฮอร์โมนเพศหญิง (Human Estrogen Receptor) และตัวรับฮอร์โมนเพศชายของมนุษย์ (Human Androgen Receptor) ที่ใส่ไว้ในพลาสมิกของยีสต์ หากผลิตภัณฑ์ในน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดยังมีฤทธิ์เหมือนฮอร์โมนเพศหญิงและฮอร์โมนเพศชายของมนุษย์จะแสดงสีออกมาและสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้โดยเทียบกับสารมาตรฐานฮอร์โมน 17β -Estradiol (β E2), 17α -Ethinylestradiol (EE2) และ Testosterone (T) ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

ขั้นตอนการตรวจสอบ Estrogenicity และ Androgenicity ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT เริ่มจากปิเปตอาหารยีสต์สำหรับทดสอบปฏิกิริยา (SGC Broth) 900 ไมโครลิตร ยีสต์ที่ผ่านการวัด Optical Density (OD) 100 μ L และน้ำตัวอย่าง 10 μ L ใส่ใน Microtube จากนั้นปิดฝาเขย่า แล้วนำไปบ่มที่ 30 °C เป็นเวลา 18 hr จากนั้นนำน้ำตัวอย่างมาข่มสีโดยปิเปตตัวอย่างที่บ่มมา 100 μ L เติมสีข่ม (Working Solution) 900 μ L แล้วเขย่า (ระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ) บ่มที่ 37 °C เป็นเวลา 1-2 hr แล้ววัดสีที่ความยาวคลื่น 405 nm และวัดความขุ่นของเซลล์ยีสต์ที่ความยาวคลื่น 595 nm ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer เทียบกับสารมาตรฐาน (Himeno, Nishimua and Tsuji 1976) คำนวณความเข้มข้นโดยใช้สูตร

$$\frac{OD_{405}(S_2) - OD_{405}(S_1)}{OD_{595}(S_2) - OD_{595}(S_1)}$$

หมายเหตุ: $OD_{405}(S_1)$ คือ ค่า OD ของ Standard ที่วัดได้ที่ความยาวคลื่น 405 nm
 $OD_{595}(S_1)$ คือ ค่า OD ของ Standard ที่วัดได้ที่ความยาวคลื่น 595 nm
 $OD_{405}(S_2)$ คือ ค่า OD ของ Sample ที่วัดได้ที่ความยาวคลื่น 405 nm
 $OD_{595}(S_2)$ คือ ค่า OD ของ Sample ที่วัดได้ที่ความยาวคลื่น 595 nm

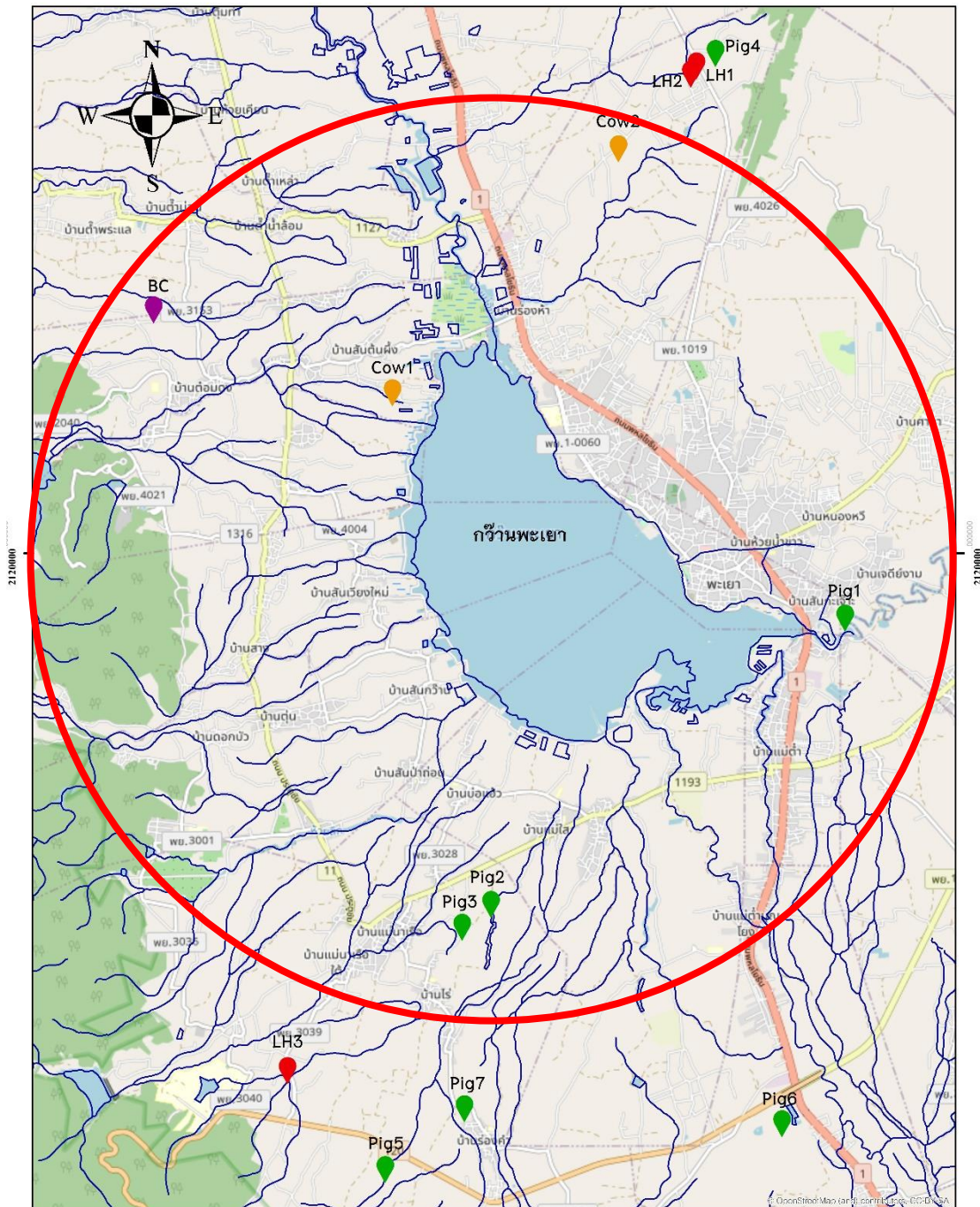
บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในฟาร์มปศุสัตว์บริเวณรอบกว๊านพะเยา น้ำในกว๊านพะเยา และน้ำประปาที่ผลิตโดยใช้น้ำจากกว๊านพะเยาเพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของฮอร์โมนจากต้นทางถึงปลายทางเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ร่วมกับการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสเตียรอยด์ฮอร์โมนความเข้มข้น 1,000 เท่าของที่พบการตกค้างในน้ำเสียของฟาร์มปศุสัตว์ และน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสเตียรอยด์ฮอร์โมนความเข้มข้นที่ค่าการละลายน้ำสูงสุดด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่นในถังปฏิกรณ์แบบ Batch โดยเป็นการนำสถานะในการบำบัดฮอร์โมนที่ดีที่สุดของการศึกษาการบำบัดฮอร์โมน 17α -Methyltestosterone (MT) ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่นของ สันติพันธ์ ฉะยมแหยม, ต่อพงศ์ กริธาชาติ และเนติยา กริธาชาติ (2561) มาทำการประยุกต์ใช้ในการบำบัดฮอร์โมนเพศหญิงและเพศชายเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในระบบบำบัดน้ำเสียของฟาร์มปศุสัตว์ นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบการออกฤทธิ์ทางเพศหญิง (Estrogenicity) และการออกฤทธิ์ทางเพศชาย (Androgenicity) ของน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยเทคนิค Bioassay โดยมีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ผลการสำรวจข้อมูลฟาร์มปศุสัตว์รอบกว๊านพะเยา

จากการลงพื้นที่ศึกษาฟาร์มปศุสัตว์ที่ตั้งอยู่ในบริเวณรอบกว๊านพะเยารัศมีไม่เกิน 10 km โดยคัดเลือกจากฟาร์มที่ขึ้นทะเบียนกับสำนักงานปศุสัตว์พะเยาแบ่งชนิดของสัตว์ได้ 4 ชนิด ได้แก่ สุกร (Pig) จำนวน 7 แห่ง ไก่เนื้อ (Broiler chicken: BC) จำนวน 1 แห่ง ไก่ไข่ (Laying hen: LH) จำนวน 3 แห่ง และโคนม (Cow) จำนวน 2 แห่ง แสดงดังภาพ 29



ภาพ 29 ตำแหน่งฟาร์มปศุสัตว์ในงานวิจัย (Pig = ฟาร์มสุกร, BC = ฟาร์มไก่เนื้อ, LH = ฟาร์มไก่ไข่, Cow = ฟาร์มโคนม)

จากการลงพื้นที่สอบถามข้อมูลเกี่ยวกับการเลี้ยงสัตว์ของฟาร์มต่าง ๆ เพื่อประเมินปัจจัยที่อาจส่งผลต่อปริมาณการตกค้างของสารสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากฟาร์มปศุสัตว์ สรุปได้ดังนี้ (ตาราง 10 และตาราง 11)

1. ฟาร์มสุกร มีทั้งหมด 7 แห่ง เป็นฟาร์มขนาดเล็ก 5 แห่ง ฟาร์มขนาดกลาง 2 แห่ง โดยพิจารณาขนาดฟาร์มจากจำนวนสุกร ได้แก่ ฟาร์มขนาดเล็ก (จำนวนสุกร 50-500 ตัว) ฟาร์มขนาดกลาง (จำนวนสุกร 500-5,000 ตัว) และฟาร์มขนาดใหญ่ (จำนวนสุกรมากกว่า 5,000 ตัวขึ้นไป) อีกทั้งในการศึกษานี้ยังได้ระบุประเภทของสุกรที่เลี้ยง โดยแบ่งเป็นฟาร์มสุกรประเภทหมูขุน 5 แห่ง และประเภทพ่อ-แม่พันธุ์ 2 แห่ง โดยฟาร์มขนาดกลางจะมีลักษณะการเลี้ยงแบบระบบปิด ในขณะที่ฟาร์มขนาดเล็กจะเลี้ยงในคอก ทั้งนี้อาหารที่ใช้เลี้ยงส่วนใหญ่เป็นอาหารที่ผสมเอง มีเพียงบางแห่งที่เป็นลักษณะ Contract farming จะใช้อาหารที่ทางบริษัทจัดมาให้เท่านั้น ในส่วนของการให้อาหารจะให้ตามอาการของสุกร และมีการผสมวิตามินหรืออาหารเสริมในอาหารให้กับสุกร แหล่งน้ำที่ใช้ในการเลี้ยงสุกรจะมีทั้งน้ำผิวดินและน้ำบาดาล ขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำในพื้นที่นั้น

2. ฟาร์มไก่เนื้อ มีทั้งหมด 1 แห่ง เป็นฟาร์มขนาดกลาง (จำนวนไก่เนื้อ 5,000-10,000 ตัว) มีลักษณะการเลี้ยงเป็นแบบระบบปิด ให้อาหารที่ทางบริษัทจัดมาให้

3. ฟาร์มไก่ไข่ มีทั้งหมด 3 แห่ง เป็นฟาร์มขนาดกลางทั้งหมด (จำนวนไก่ไข่ 5,000-10,000 ตัว) มีลักษณะการเลี้ยงเป็นแบบระบบปิด อาหารที่ให้กับสัตว์เป็นอาหารที่ทางบริษัทจัดมาให้ 2 แห่ง และซื้ออาหารมาผสมเอง 1 แห่ง

4. ฟาร์มโคนม มีทั้งหมด 2 แห่ง เป็นฟาร์มขนาดเล็กทั้งหมด (จำนวนโคนม 0-20 ตัว) มีลักษณะการเลี้ยงเป็นแบบเลี้ยงในคอก ให้อาหารตามธรรมชาติที่ผสมขึ้นเอง เช่น หญ้า เปลือกข้าวโพด และซังข้าวโพด เป็นต้น และอาหารเม็ด

เมื่อได้ทำการสำรวจวิธีการจัดการสิ่งปฏิกูลและน้ำเสียของฟาร์มแต่ละแห่ง ดังแสดงในตาราง 12 พบว่ามีฟาร์ม 8 แห่ง ได้แก่ Pig1, Pig3, Pig4, Pig6, BC, LH1, LH2 และ LH3 ที่ทำการล้างมูลสัตว์พร้อมกับการล้างพื้นของคอกสัตว์ โดยมี 4 แห่ง คือ Pig3 Pig4 BC และ LH3 ที่ปล่อยน้ำล้างพื้นลงสู่พื้นดินบริเวณรอบคอกสัตว์โดยตรง ส่วนฟาร์มอีก 4 แห่ง ได้แก่ Pig1 Pig6 LH1 และ LH2 จะทำการรวบรวมน้ำที่เกิดจากการล้างคอกสัตว์เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบย่อยสลายโดยไม่ใช้อากาศ (Anaerobic digestion : AD) ในขณะที่ฟาร์มอื่นอีก 5 แห่ง ได้แก่ Pig2, Pig5, Pig7, Cow1 และ Cow2 มีการกำจัดมูลสัตว์โดยการเก็บรวบรวมใช้บรรจุก่อนทำการกำจัดทำให้ไม่เกิดน้ำเสียจากการทำความสะอาดมูลสัตว์ในบริเวณฟาร์ม

ตาราง 10 ลักษณะการเลี้ยงของฟาร์มปศุสัตว์

ประเภทฟาร์ม	ลำดับที่	ประเภทสัตว์	จำนวนที่เลี้ยง (ตัว)	ขนาดฟาร์ม	ลักษณะการเลี้ยง	รูปแบบการเลี้ยง
สุกร	Pig1	หมูขุน	550	กลาง	ระบบปิด	ชนิดเดียว
	Pig2	หมูขุน	50	เล็ก	คอก	ผสมผสาน
	Pig3	พ่อ-แม่พันธุ์	50	เล็ก	คอก	ผสมผสาน
	Pig4	หมูขุน	50	เล็ก	ระบบปิด	ชนิดเดียว
	Pig5	หมูขุน	50	เล็ก	คอก	ชนิดเดียว
	Pig6	พ่อ-แม่พันธุ์	500	กลาง	ระบบปิด	ชนิดเดียว
	Pig7	หมูขุน	50	เล็ก	คอก	ชนิดเดียว
ไก่เนื้อ	BC1	ไก่เนื้อ	10,000	กลาง	ระบบปิด	ชนิดเดียว
ไก่ไข่	LH1	ไก่ไข่	5,500	กลาง	ระบบปิด	ชนิดเดียว
	LH2	ไก่ไข่	6,800	กลาง	ระบบปิด	ชนิดเดียว
	KH3	ไก่ไข่	5,800	กลาง	ระบบปิด	ชนิดเดียว
โคนม	Cow1	โคนม	6	เล็ก	คอก	ชนิดเดียว
	CW2	โคนม	10	เล็ก	คอก	ชนิดเดียว

ตาราง 11 การให้อาหารและยาที่ใช้ในฟาร์มปศุสัตว์

ประเภทฟาร์ม	ลำดับที่	ประเภทสัตว์	อาหารที่ให้กับสัตว์		การให้ยา/วิตามิน	
			ชนิด	ความถี่	ยา	วิตามิน
สุกร	Pig1	หมูขุน	บริษัทนำมาให้	ให้ตามขนาด	ให้ตามอาการ	ผสมในอาหาร
	Pig2	หมูขุน	ผสมเอง	เช้า-เย็น	ให้ตามอาการ	ผสมในอาหาร
	Pig3	พ่อ-แม่พันธุ์	ผสมเอง	เช้า-เย็น	ให้ตามอาการ	ผสมในอาหาร
	Pig4	หมูขุน	บริษัทนำมาให้	ทั้งวัน	ให้ตามอาการ	ผสมในอาหาร
	Pig5	หมูขุน	บริษัทนำมาให้	ทั้งวัน	ให้ตามอาการ	ผสมในอาหาร
	Pig6	พ่อ-แม่พันธุ์	ผสมเอง	ให้ตามขนาด	ให้ตามอาการ	ผสมในอาหาร
	Pig7	หมูขุน	ผสมเอง	วันละ 10 kg	ใช้สมุนไพร (ฟ้าทลายโจร)	-
ไก่เนื้อ	BC1	ไก่เนื้อ	บริษัทนำมาให้	ทั้งวัน	ให้ตามอาการ	ละลายน้ำให้กิน

ตาราง 11 (ต่อ)

ประเภท ฟาร์ม	ลำดับที่	ประเภทสัตว์	อาหารที่ให้กับสัตว์		การให้ยา/วิตามิน	
			ชนิด	ความถี่	ยา	วิตามิน
ไก่ไข่	LH1	ไก่ไข่	บริษัทนำมาให้	เช้า	ให้ตามอาการ	ละลายน้ำให้กิน
	LH2	ไก่ไข่	บริษัทนำมาให้	ทั้งวัน	ให้ตามอาการ	ละลายน้ำให้กิน (อาทิตย์ละครั้ง)
	LH3	ไก่ไข่	ผสมเอง	ทั้งวัน	ให้ตามอาการ	ละลายน้ำให้กิน (อาทิตย์ละครั้ง)
โคนม	Cow1	โคนม	ผสมเอง	เช้า-เย็น	ให้ตามอาการ	วิตามิน/เกลือแร่ (เดือนละครั้ง)
	Cow2	โคนม	ผสมเอง	เช้า-เย็น	ให้ตามอาการ	วิตามิน/เกลือแร่ (เดือนละครั้ง)

ตาราง 12 พิกัดฟาร์มปศุสัตว์ในงานวิจัยและการจัดการของเสียของแต่ละฟาร์ม

ฟาร์ม	ละติจูด	ลองจิจูด	การจัดการมูล	การจัดการน้ำเสีย	
				ไม่มีระบบบำบัด	มีระบบบำบัด
Pig1	19°09'45"N	99°55'12"E	ล้างพื้น	-	AD
Pig2	19°07'20"N	99°52'01"E	เก็บรวบรวม	x	x
Pig3	19°07'08"N	99°51'45"E	ล้างพื้น	ปล่อยลงดิน	-
Pig4	19°14'33"N	99°54'04"E	ล้างพื้น	ปล่อยลงดิน	-
Pig5	19°05'35"N	99°51'46"E	เก็บรวบรวม	x	x
Pig6	19°05'27"N	99°54'37"E	ล้างพื้น	-	AD
Pig7	19°05'05"N	99°51'04"E	เก็บรวบรวม	x	x
BC	19°12'24"N	99°49'01"E	ล้างพื้น	ปล่อยลงดิน	-
LH1	19°14'23"N	99°53'51"E	ล้างพื้น	-	AD
LH2	19°14'27"N	99°53'54"E	ล้างพื้น	-	AD
LH3	19°05'55"N	99°50'11"E	ล้างพื้น	ปล่อยลงดิน	-
Cow1	19°11'41"N	99°51'09"E	เก็บรวบรวม	x	x
Cow2	19°13'45"N	19°13'45"N	เก็บรวบรวม	x	x

หมายเหตุ: Pig = ฟาร์มสุกร BC = ฟาร์มไก่เนื้อ LH = ฟาร์มไก่ไข่ Cow = ฟาร์มโคนม

AD = ระบบบำบัดแบบย่อยสลายโดยไม่ใช้อากาศ x = ไม่มีน้ำเสีย

ผลการศึกษาการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในฟาร์มปศุสัตว์รอบกว๊านพะเยา

จากการศึกษาการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในฟาร์มปศุสัตว์ 13 แห่ง รอบกว๊านพะเยารัศมีไม่เกิน 10 km โดยมุ่งเน้นไปที่กลุ่มฮอร์โมนเพศหญิงและฮอร์โมนเพศชาย ได้ทำการสกัดฮอร์โมนที่ตกค้างในมูลของสัตว์ ดินรอบบริเวณคอกสัตว์ และน้ำเสียจากการทำความสะอาดคอกสัตว์ได้ผลการศึกษาดังนี้

1. การตกค้างของฮอร์โมนเอสโตรเจน

ผลการวิจัยพบว่าสเตียรอยด์ฮอร์โมนตกค้างที่พบในฟาร์ม 13 แห่งรอบกว๊านพะเยาเป็นฮอร์โมนตามธรรมชาติ คือ E1 และ β E2 ที่พบได้ในสารคัดหลั่งจากสัตว์ กับฮอร์โมนสังเคราะห์ คือ EE2 ได้มาจากการกินอาหารหรือยา ซึ่งผลการวิเคราะห์การตกค้างของฮอร์โมนในตัวอย่างมูลสัตว์แสดงดังภาพ 30 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับฟาร์มสุกร (Pig) และโคนม (Cow) ที่สัตว์ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงเจริญพันธุ์หรือช่วงให้นม จึงพบฮอร์โมน E1 และ β E2 ที่ความเข้มข้น 1.38–97.10 ng/g และ 10.08–1,366 ng/g ตามลำดับ นอกจากนี้ยังตรวจพบ EE2 ในฟาร์มสุกรและโคนมทุกแห่งมีความเข้มข้น 1.50–99.92 ng/g ซึ่งอาจเกิดจากการนำ EE2 มาใช้เพื่อกระตุ้นอัตราการเติบโตของสัตว์ (Zuo et al., 2013) นอกจากนี้ EE2 ยังถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มน้ำหนักตัวของสัตว์ และยังใช้รักษาความผิดปกติของระบบสืบพันธุ์ (Xu et al., 2018). โดยชนิดและความเข้มข้นของเอสโตรเจนที่พบในการศึกษานี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในมูลสัตว์ของ Finlay–Moore et al., (2000) และ Jenkins et al., (2006)

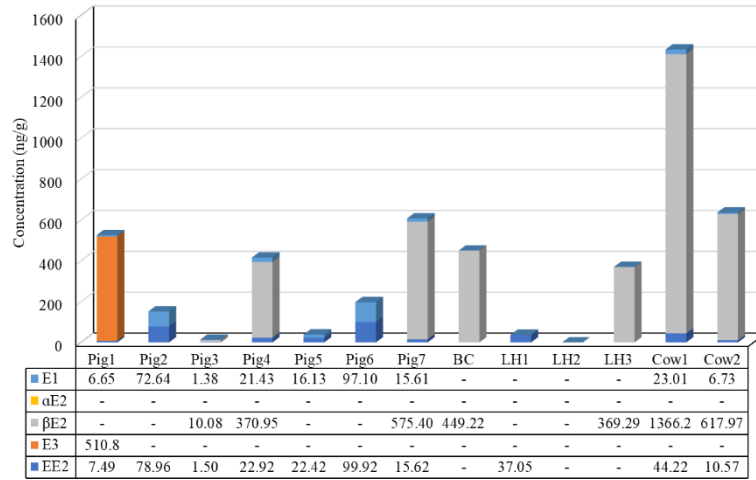
การปนเปื้อนของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในดินเกิดจากกระบวนการทำความสะอาดมูลพื้นหรือบริเวณคอกสัตว์ที่มีการตกค้างของมูลสัตว์ทำให้น้ำที่เกิดจากการชะล้างมีการปนเปื้อนของสเตียรอยด์ฮอร์โมน ซึ่งฟาร์มบางแห่งจะทำการปล่อยน้ำเสียจากการทำความสะอาดลงสู่ดินโดยตรง แล้วน้ำเสียเหล่านั้นจะถูกดูดซับเข้าไปในอนุภาคในดิน ซึ่งผลการวิเคราะห์การตกค้างของฮอร์โมนในตัวอย่างดินแสดงดังภาพ 30 พบว่าฮอร์โมนส่วนใหญ่ที่พบคือ E3 (18.77–188.5 ng/g) ในขณะที่เอสโตรเจนอื่นๆ (E1, β E2 และ EE2) ตรวจพบที่ความเข้มข้นต่ำจนถึงไม่ถูกตรวจพบ ตามที่รายงานในการศึกษาจำนวนมากบ่งชี้ว่าสาเหตุที่พบ E3 เป็นส่วนใหญ่เกิดจากการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะการใช้อากาศในดินของฮอร์โมนเอสโตรเจน (Ying et al., 2002; Xuan et al., 2008; Adeel et al., 2017) ส่งผลให้ E2 และ EE2 ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดินกลายเป็น E1 และ E3 ตามลำดับ ซึ่งแบคทีเรียในดินที่ทำให้เกิดกระบวนการเหล่านี้ ได้แก่ *Novosphingobium* sp. ย่อยสลาย E2 ไปเป็น E1 (Ma et al., 2016) *Sphingobacterium* sp. ย่อยสลาย EE2 ไปเป็น E1 (Haiyan et al., 2007) และแบคทีเรียกลุ่ม

ไนตริไฟอิงย่อยสลาย E1 ไปเป็น E3 (Colucci et al., 2001) นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาการสลายตัวของ β E2 และ EE2 สูงสุดอยู่ที่ 15 วัน โดยมีครึ่งชีวิตเท่ากับ 3–4.5 วัน (Adeel et al., 2017) อย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะที่มีแสงแดด จะทำให้ครึ่งชีวิตของ β E2 และ EE2 ลดลงเหลือ 23 ชั่วโมง (Ren et al., 2019; Zuo et al., 2013; Chen et al., 2013)

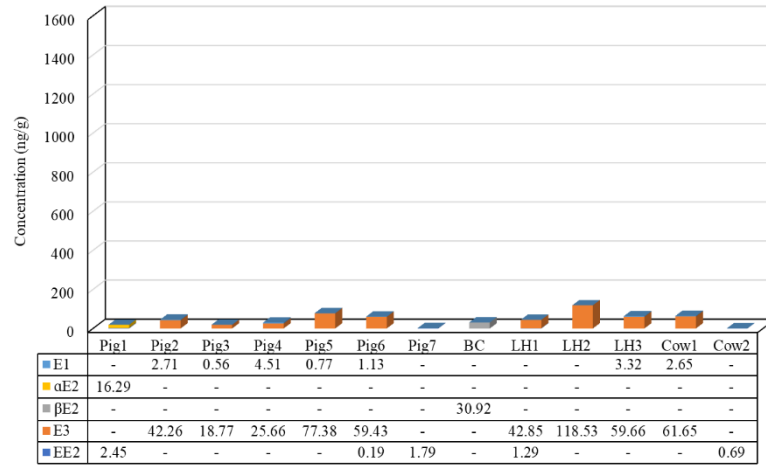
นอกจากนี้ฟาร์มบางแห่งได้มีการรวบรวมน้ำเสียที่เกิดจากการล้างทำความสะอาดบริเวณคอกสัตว์เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียที่พบส่วนใหญ่เป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic) ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากท่อน้ำออกของระบบบำบัดและน้ำเสียที่เกิดจากการล้างทำความสะอาดบริเวณคอกสัตว์แต่ปล่อยลงดินบริเวณรอบคอกสัตว์เพื่อนำมาวิเคราะห์หาฮอร์โมนที่ตกค้างหลังจากผ่านการบำบัด ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่ามีการตกค้างของฮอร์โมน β E2 (472.93 ng/L) เฉพาะฟาร์มไก่เนื้อ (BC) และพบฮอร์โมน EE2 (103.02 ng/L) เฉพาะฟาร์มไก่ไข่ (LH) แสดงดังภาพ 30



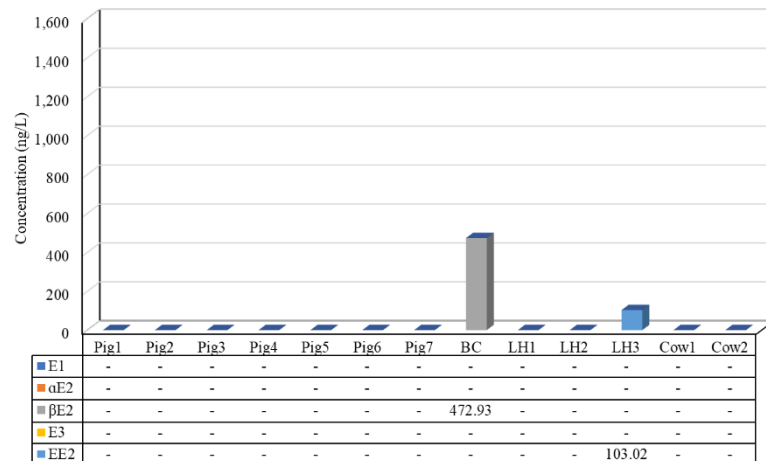
(ก) มูลสัตว์



(ข) ดิน



(ค) น้ำเสีย



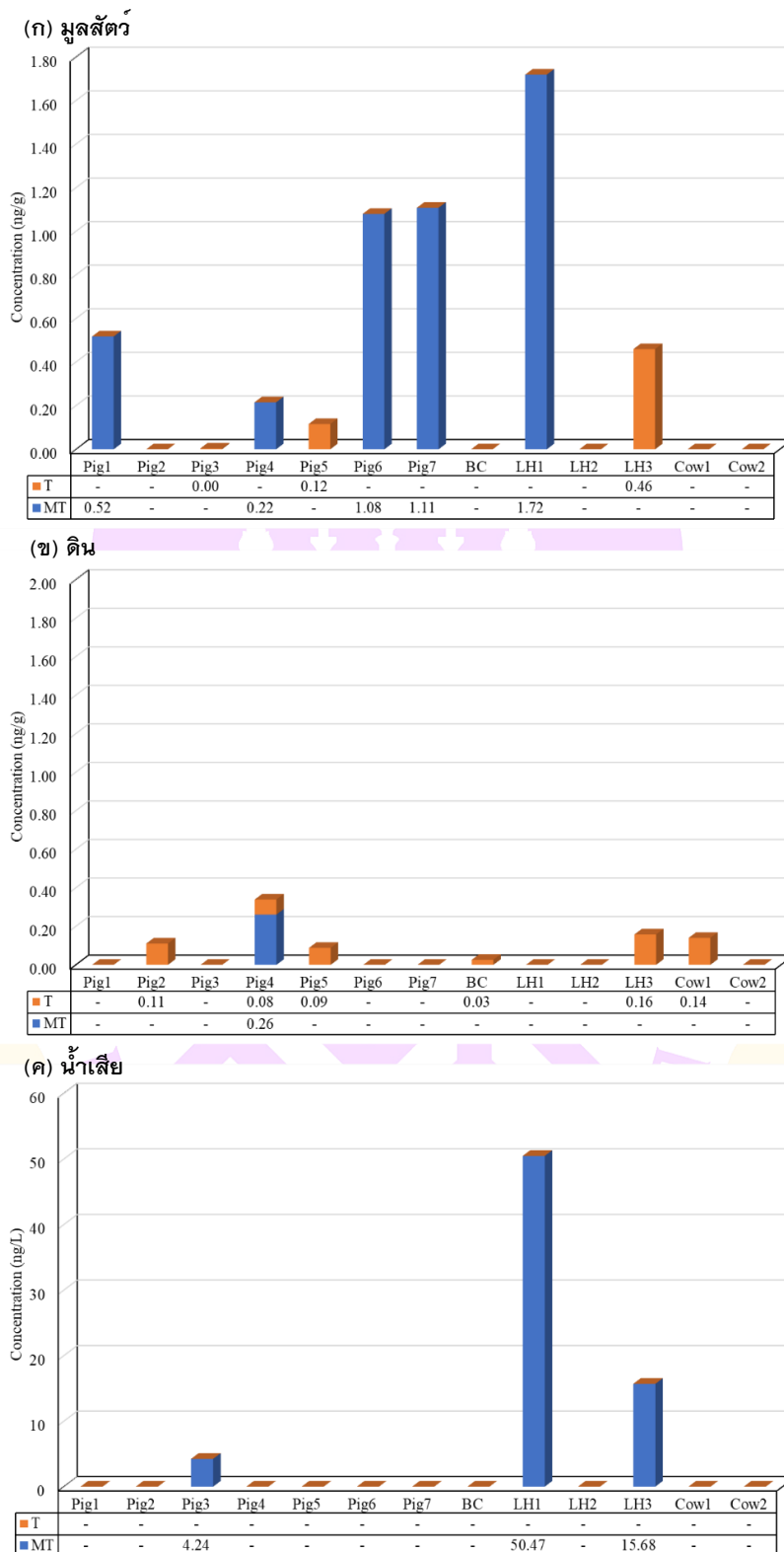
ภาพ 30 การตกค้างของฮอร์โมนเอสโตรเจนในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมจากฟาร์มปศุสัตว์
(ก) มูลสัตว์ (ข) ดิน และ (ค) น้ำเสีย

2. การตกค้างของฮอร์โมนแอนโดรเจน

ฮอร์โมนแอนโดรเจนที่เป็นเป้าหมายในการศึกษานี้คือ T และ MT ซึ่งเป็นฮอร์โมนธรรมชาติ และฮอร์โมนสังเคราะห์ ตามลำดับ ในตัวอย่างมูลสัตว์แสดงดังภาพ 31 ทั้ง T และ MT ตรวจพบในบางฟาร์มที่มีความเข้มข้นต่ำเท่านั้น (0.004–0.460 ng/g และ 0.22–1.72 ng/g ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาของ Chen et al. (2018) พบว่าการตกค้างของฮอร์โมน T และ MT สามารถพบได้ในมูลสัตว์เนื่องจากการใช้สารกระตุ้นการเจริญเติบโตอย่างกว้างขวางในการผลิตอาหาร

การปนเปื้อนของฮอร์โมนแอนโดรเจนในดินเกิดจากกระบวนการทำความสะอาดบริเวณคอกสัตว์เช่นเดียวกับการปนเปื้อนของฮอร์โมนเอสโตรเจน ซึ่งผลการวิเคราะห์การตกค้างของฮอร์โมนแอนโดรเจนพบว่าการตกค้างที่ฟาร์มสุกร 3 แห่งจากทั้งหมด 7 แห่ง ฟาร์มไก่ไข่ 1 แห่ง จากทั้งหมด 3 แห่ง และฟาร์มโคนม 1 แห่งจาก 2 แห่ง ซึ่งฟาร์มทั้งหมดที่กล่าวมามีการตกค้างของฮอร์โมน T ทุกแห่งมีความเข้มข้น 0.03–0.16 ng/g ส่วนฮอร์โมน MT พบที่ Pig 4 เพียงแห่งเดียว (0.26 ng/g) แสดงดังภาพ 31

ในส่วนของการปนเปื้อนในน้ำเสียวตรวจพบเพียงฮอร์โมน MT เท่านั้นใน 3 ฟาร์ม (1 ฟาร์มมีระบบบำบัดน้ำเสียและอีก 2 ฟาร์มไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย) ที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 15.68–50.47 ng/L แสดงดังภาพ 31 การย่อยของฮอร์โมนแอนโดรเจนเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ใช้อากาศ (Yang et al., 2010) ส่งผลให้ฮอร์โมน T และ MT สามารถเกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะที่ใช้อากาศ (Homklin et al., 2012) ทำให้พบฮอร์โมน T และ MT ตกค้างในระบบบำบัดน้ำเสียน้อย



ภาพ 31 การตกค้างของฮอร์โมนแอนโดรเจนในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมจากฟาร์มปศุสัตว์

(ก) มูลสัตว์ (ข) ดิน และ (ค) น้ำเสี้ยว

ผลการศึกษาค่าการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในกัวนพะเยา

เนื่องจากฟาร์มส่วนใหญ่อยู่ใกล้คลองหรือแหล่งน้ำที่เป็นสาขาของกัวนพะเยา ซึ่งไหลเข้าสู่กัวนพะเยาจึงได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในฤดูแล้ง ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำในกัวนพะเยามีปริมาณน้อยและมีความเข้มข้นมากกว่าในฤดูฝน จำนวน 5 จุดเก็บตัวอย่าง ได้แก่ (1) จุดสูบน้ำ การประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา (2) กลางกัวนพะเยา (3) สะพานขุนเดช (4) บ้านสันช้างหิน (5) บริเวณปากท่อสูบน้ำรวมเทศบาลเมืองพะเยา (ปากคลองแม่ใส) แสดงดังภาพ 32 เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำของกัวนพะเยาด้วยวิธี LC-MS/MS

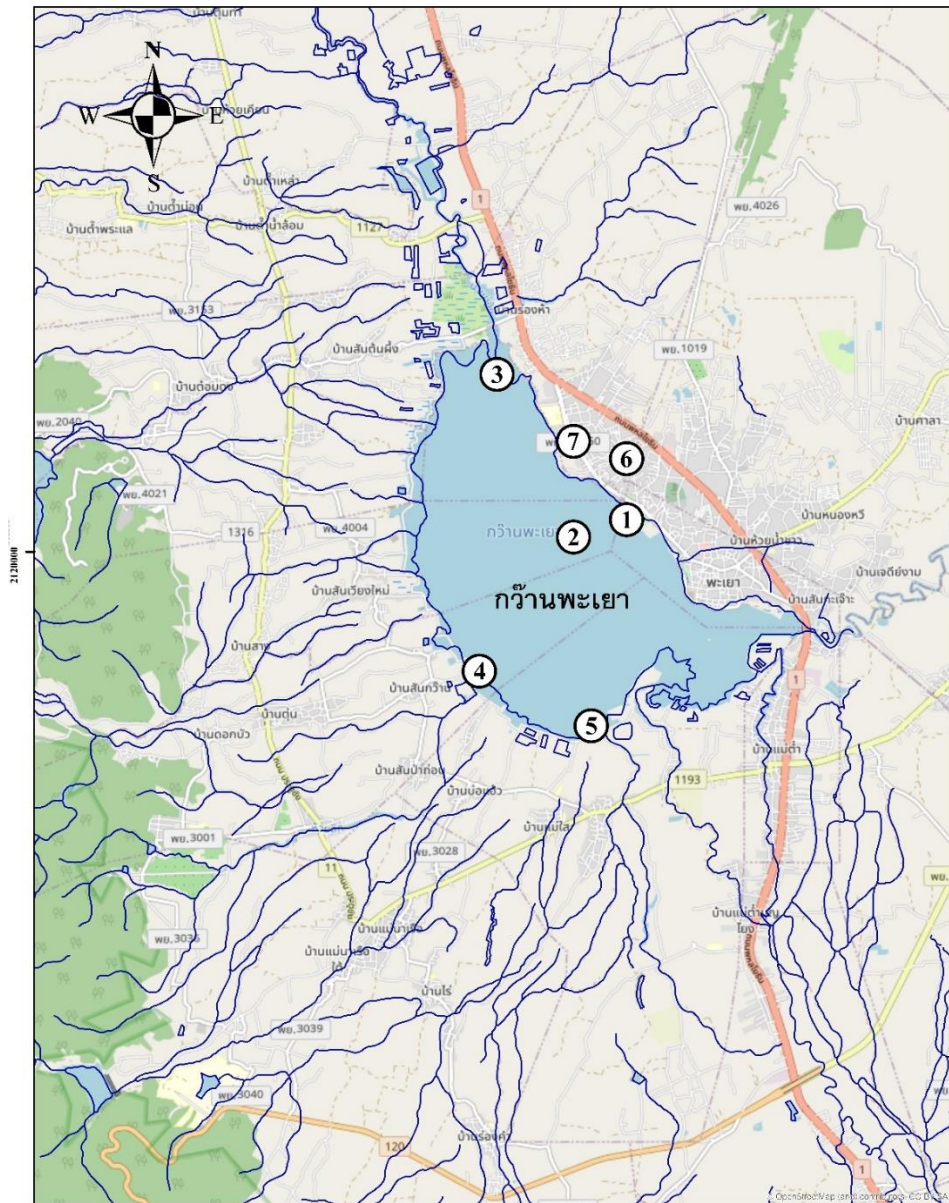
เมื่อทำการวิเคราะห์น้ำของกัวนพะเยา พบว่ามีการตกค้างของฮอร์โมนเอสโตรเจน ทั้ง 5 ชนิดในน้ำของกัวนพะเยา ยกเว้นจุดที่ 1 และจุด 5 ไม่พบ β E2 จุดที่ 2 ไม่พบ E1 และจุดที่ 3 ไม่พบ α E2 โดยปริมาณฮอร์โมนเอสโตรเจนที่พบมากที่สุดคือ E3 ซึ่งมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 119.96–1121.93 ng/L รองลงมาคือ α E2 มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง ND–328.12 ng/L ถัดมาคือ β E2 มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง ND–151.04 ng/L และ E1 มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง ND–13.25 ng/L นอกจากนี้ยังตรวจพบฮอร์โมนเอสโตรเจนสังเคราะห์ คือ ฮอร์โมน EE2 ที่เป็น ส่วนประกอบหลักในยาคุมกำเนิดสำหรับมนุษย์และสารผสมในอาหารหรือยาสำหรับปศุสัตว์ บางชนิด ซึ่งมีความเข้มข้นตั้งแต่ 6.84–16.09 ng/L แสดงดังภาพ 33 ส่วนการตกค้างของ ฮอร์โมนแอนโดรเจนพบว่าความเข้มข้นเมื่อรวมทั้ง T และ MT แล้วไม่เกิน 10 ng/L ในแต่ละจุด เก็บน้ำตัวอย่าง ความเข้มข้นของ MT อยู่ในช่วง 2.70–5.57 ng/L ซึ่งสูงกว่าความเข้มข้นของ T (ตรวจไม่พบ) แสดงดังภาพ 33 และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำผิวดินประเภทอื่น (ได้แก่ แม่น้ำและ อ่างเก็บน้ำ) พบว่าฮอร์โมนที่ตกค้างในกัวนพะเยามีความเข้มข้นสูงกว่าที่อื่น การตรวจพบการ ตกค้างของ EE2 นั้นสามารถบ่งชี้ถึงการปนเปื้อนจากสิ่งขับถ่ายของมนุษย์โดยใช้ยาคุมกำเนิด และ/หรือจากปศุสัตว์บางชนิด

การพบการตกค้างของฮอร์โมน E3 มีความเข้มข้นสูงเมื่อเทียบกับเอสโตรเจนชนิดอื่น แตกต่างจากการศึกษาอื่นในตารางที่ 13 เนื่องจากในฤดูแล้งน้ำในกัวนพะเยาจะมีปริมาตร ลดลงส่งผลให้ความเข้มข้นของฮอร์โมนสูงขึ้นและเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพของ E2 และ EE2 เป็น E1 และ E3 ตามลำดับ โดยอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในสภาวะแบบ ใช้อากาศ (Adeel et al., 2017) นอกจากนี้ E2 และ EE2 ในน้ำสามารถถูกย่อยสลายโดย กระบวนการโฟโตไลซิส การย่อยสลายทางชีวภาพ และการดูดซับ โดยมีครึ่งชีวิตประมาณ 2–6 days (Ying et al., 2002) ในกรณีที่การสะสมของฮอร์โมนเอสโตรเจนเกิดในตะกอน E2

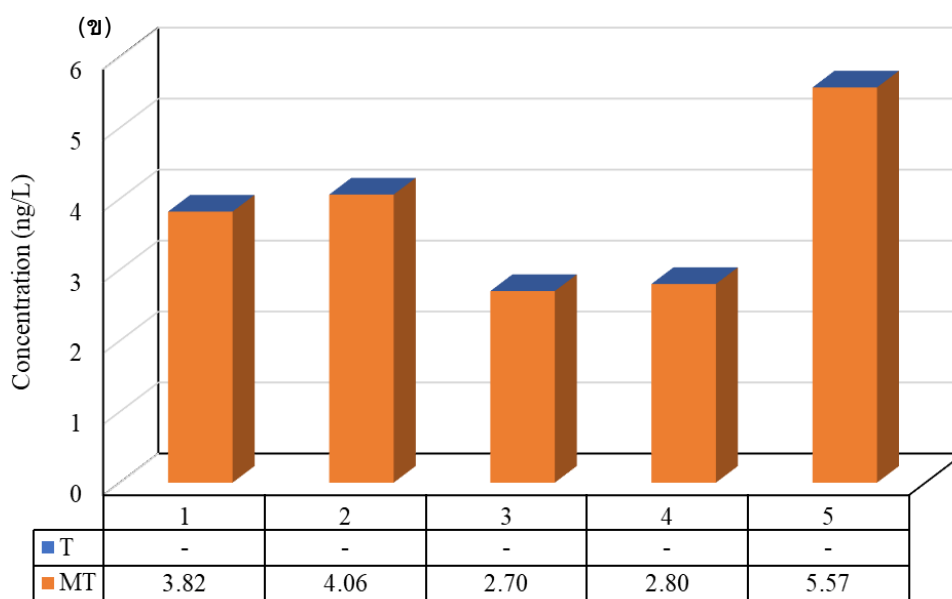
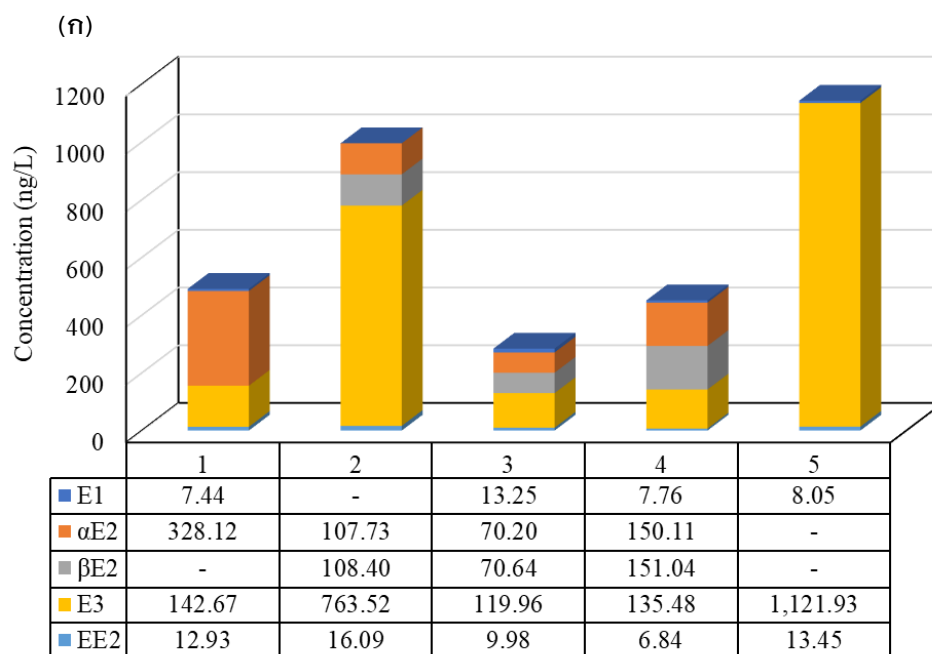
สามารถแปลงเป็น E1 ได้ภายใต้การสรั้งเมทาโนเจน ซัลเฟต เหล็ก และสภาวะการลดไนเตรต (Czajka and Londry, 2006)

อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสเตียรอยด์ฮอร์โมนทั้งเอสโตรเจนและแอนโดรเจนในการเก็บน้ำตัวอย่างแต่ละครั้งมีการแปรผันตามจุดเก็บตัวอย่างแต่ละจุด และการปนเปื้อนของฮอร์โมนในบริเวณรอบกว้านพะเยานั้นมาจากทั้งแหล่งกำเนิดแบบทรานสแหล่งกำเนิดที่แน่นอน (เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน และแหล่งปศุสัตว์) และแหล่งกำเนิดแบบไม่ทรานสแหล่งกำเนิดที่แน่นอน (เช่น พื้นที่เกษตรกรรม) ในส่วนของฮอร์โมนแอนโดรเจนที่ตรวจพบในกว้านพะเยานั้นมีแหล่งที่มาคล้ายกับฮอร์โมนเอสโตรเจน ยกเว้น MT ซึ่งเป็นฮอร์โมนแอนโดรเจนสังเคราะห์และน่าจะเป็นสารตกค้างจากฮอร์โมนที่ใช้ในการประมงเพื่อเปลี่ยนเพศลูกปลาเป็นตัวผู้ (Wang et al., 2017)





ภาพ 32 ตำแหน่งจุดเก็บน้ำตัวอย่างในกว๊านพะเยา (หมายเลข 1-5; (1) จุดสูบน้ำการ
 ประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา (2) กลางกว๊านพะเยา (3) สะพานขุนเดช
 (4) บ้านสันช้างหิน (5) บริเวณปากท่อสูบน้ำรวมเทศบาลเมืองพะเยา
 (ปากคลองแม่ใส) การประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา
 (หมายเลข 6) และโรงพยาบาลพะเยา (หมายเลข 7)



ภาพ 33 การตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในตัวอย่างไม่กัวนพะเยา

(ก) ฮอร์โมนเอสโตรเจน (ข) ฮอร์โมนแอนโดรเจน

ตาราง 13 การตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในแหล่งน้ำผิวดินอื่นเปรียบเทียบกับ
กว๊านพะเยา

แหล่งน้ำผิวดิน	ปริมาณสเตียรอยด์ฮอร์โมนตกค้าง (ng/L)						อ้างอิง
	E1	E2	E3	EE2	T	MT	
River, Vietnam (dry season)	ND	<3.5–34	<1.3–11	ND	ND	ND	Le Thi Minh et al. (2016)
River, Tianjin, China	0.6–50.7	ND–31.40	ND–37.2	ND–19.8	ND	ND	Rao et al. (2013)
River, Shandong, China	14–180	ND–134	4.0–94	7.0–24	ND	ND	Zhou et al. (2011)
Reservoir, China	0.45–2.89	< LOQ–1.78	<LOD	0.68–2.67	ND	ND	Jiang et al. (2012)
Lake, China	2.98	1.51	2.97	2.59	ND	ND	Jiang et al. (2012)
Lake, China	ND–9.62	ND–17.58	ND	ND–16.85	ND	ND	Wang and Zhu (2017)
กว๊านพะเยา ประเทศไทย (ฤดูแล้ง)	ND–13.25	ND–328	120–1122	6.84–16.09	ND	2.70–5.57	ในงานวิจัยนี้

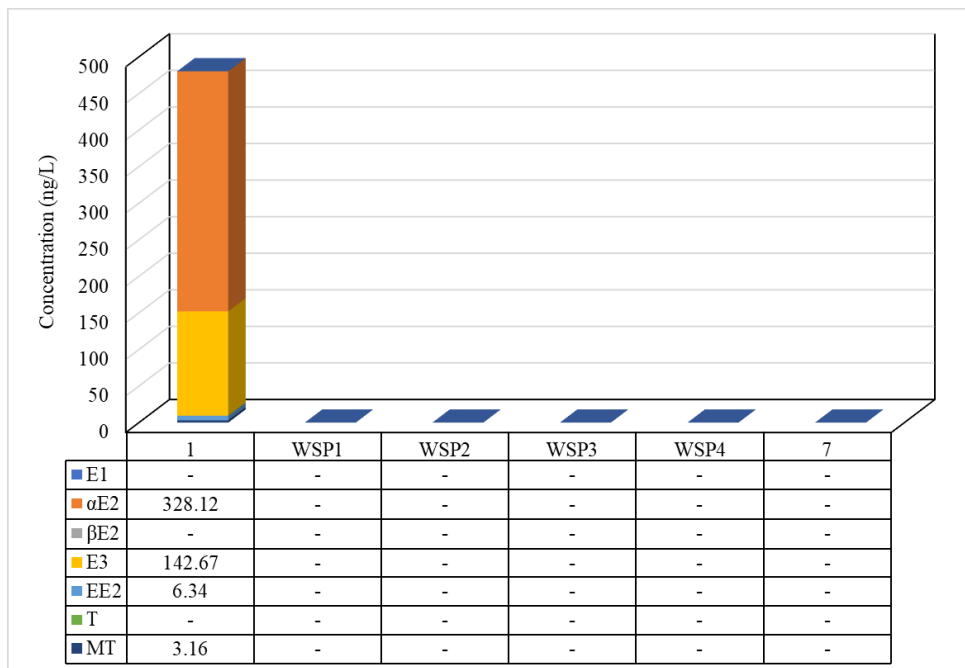
หมายเหตุ: E1 = Estrone, α E2 = 17α -estradiol, β E2 = 17β -estradiol, E3 = Estriol, EE2 = 17α -ethinyl estradiol, T = Testosterone, MT 17α -methyltestosterone, ND = Not detected, LOQ = Limit of quantification, LOD = Limit of detection

ผลการศึกษาการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา และน้ำประปาในจังหวัดพะเยา

การประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา ทำการผลิตน้ำประปาจากแหล่งน้ำดิบกว๊านพะเยา โดยผลการศึกษาการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในกว๊านพะเยา ณ จุดสูบน้ำดิบจากกว๊านพะเยา (ภาพ 32 หมายเลข 1) พบว่ามีการปนเปื้อนของฮอร์โมน E1, α E2, E3, EE2 และ MT จึงจำเป็นอย่างยิ่งในการตรวจสอบระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยาว่ามีการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในระบบหรือน้ำประปาที่ผลิตได้หรือไม่ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยาในแต่ละ

กระบวนการผลิตทั้ง 4 จุด (ภาพ 27) ได้แก่ (1) ขั้นตอนการเติมคลอรีนก่อนการบำบัด (WSP1) (2) กระบวนการฟล็อกเทชัน (WSP2) (3) ระบบเติมอากาศ (WSP3) และ (4) ขั้นตอนการเติมคลอรีนหลังการบำบัด (WSP4) นำมาเปรียบเทียบกับปริมาณสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำบริเวณจุดสูบน้ำดิบจากกว๊านพะเยา จากผลการวิเคราะห์พบว่าไม่มีฮอร์โมนสเตียรอยด์ตกค้างในตัวอย่างน้ำที่เก็บจากจุด 4 จุดตามระบบการผลิตน้ำประปา แสดงให้เห็นว่าโรงผลิตน้ำประปาสามารถกำจัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำได้ตั้งแต่การบำบัดขั้นแรก คือขั้นตอนการเติมคลอรีนก่อนการบำบัด (WSP1) ทั้งนี้ขั้นตอนการเติมคลอรีนทั้งก่อนและหลังบำบัด (WSP1 และ WSP4) ถือเป็นบำบัดทางเคมีด้วยกระบวนการออกซิเดชันสำหรับสเตียรอยด์ฮอร์โมน นอกจากนี้ระบบเติมอากาศ (WSP3) ซึ่งมีการใช้ถ่านกัมมันต์รวมด้วยเพื่อขจัดกลิ่นจากน้ำ ถือเป็นบำบัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนโดยวิธีการดูดซับด้วยคาร์บอน (Silva, Otero and Esteves 2012) ซึ่งกระบวนการดูดซับถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนร้อยละ 100 (Alum et al., 2004; Deborde et al., 2004; Hu et al., 2003)

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในน้ำประปาที่จ่ายจากการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยาในเขตเทศบาลเมืองพะเยา โดยเลือกเก็บตัวอย่างน้ำประปาจากโรงพยาบาลพะเยา (ภาพ 32 หมายเลข 7) ซึ่งเป็นสถานที่ที่มีประชาชนมาใช้บริการเป็นจำนวนมากในแต่ละวัน และอยู่ห่างจากการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา 1.5 km ผลปรากฏว่าไม่พบการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในน้ำประปาในจุดดังกล่าว ภาพ 34 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำจากจุดสูบน้ำดิบจากกว๊านพะเยา ระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา และตัวอย่างน้ำประปาจากโรงพยาบาลพะเยา



ภาพ 34 การตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในน้ำดิบจากฟาร์มเพาะปลา ระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา และน้ำประปาในจังหวัดพะเยา

การประเมินความเสี่ยงจากสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำเสียของฟาร์มปศุสัตว์

ความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากความเข้มข้นของฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจนที่พบในแต่ละฟาร์มได้รับการประเมินในแง่ของศักยภาพในการออกฤทธิ์ของฮอร์โมน โดยเทียบการออกฤทธิ์กับฮอร์โมน Estradiol (E2) ให้อยู่ในหน่วย Estradiol Equivalents (EEQs) และเทียบการออกฤทธิ์กับฮอร์โมน Testosterone (T) ให้อยู่ในหน่วย Testosterone Equivalents (TEQs) ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 14 ระบุว่า EEQs ในมูลสัตว์ ดิน และน้ำเสียจากแต่ละฟาร์มอยู่ในช่วง 12.29–1,427 ng/g, 0.25–30.92 ng/g และ 128.8–472.9 ng/L ตามลำดับ จากการศึกษาของ Xu et al. (2018) ค่า EEQs ที่พบในการศึกษานี้มากกว่าค่า LOEL (10 ng/L) ส่วนค่า TEQs ในมูลสัตว์ ดิน และน้ำเสียมีค่าตั้งแต่ 0.004–1.60 ng/g, 0.03–0.32 ng/g และ 3.94–46.93 ng/ ตามลำดับ การประเมินความเสี่ยงมุ่งเน้นไปที่ตัวอย่างน้ำเสียเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่กระจายฮอร์โมนสูง ซึ่งอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวงกว้าง

ผลการศึกษพบว่าค่า EEQs ในน้ำเสียสูงกว่า LOEL และ NOEL ของปลา (10 และ 1 ng/L ตามลำดับ) (Barel-Cohen et al., 2006) การปล่อยน้ำเสียเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำผิวดินจะ

เพิ่มความเสี่ยงต่อสัตว์น้ำ นอกจากนี้จากค่า TEQs ของน้ำเสีย พบว่ามีความเข้มข้นต่ำกว่า NOEL ของปลา (100 μ L หรือ 100,000 ng/L) หากค่า EEQs และ TEQs ที่คำนวณได้น้อยกว่าค่า LOEL และ NOEL ฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจนที่ตกค้างจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ แต่ถ้าหากค่าที่คำนวณออกมามีค่ามากกว่า LOEL และ NOEL แสดงว่าฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจนที่ตกค้างอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

ตาราง 14 ความเสี่ยงจากสเต็มรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำเสียของฟาร์มปศุสัตว์

ฟาร์ม	มูลสัตว์ (ng/g)	EEQs		RQ ของ เอสโตรเจน	มูลสัตว์ (ng/g)	TEQs		RQ ของ แอนโดรเจน
		ดิน (ng/g)	น้ำเสีย (ng/L)			ดิน (ng/g)	น้ำเสีย (ng/L)	
Pig1	14.04	19.35	-	-	0.48	-	-	-
Pig2	116.86	0.93	x	x	-	0.11	x	x
Pig3	12.29	0.25	-	-	0.004	-	3.94	0.04
Pig4	404.95	1.28	-	-	0.20	0.32	-	-
Pig5	32.05	0.65	x	x	0.12	0.09	x	x
Pig6	149.17	0.87	-	-	1.00	-	-	-
Pig7	598.83	2.24	x	x	1.03	-	x	x
BC	449.22	30.92	472.93	208.34	-	0.03	-	-
LH1	46.32	1.86	-	-	1.60	-	46.93	0.5
LH2	-	0.70	-	-	-	-	-	-
LH3	369.29	1.18	128.77	294.34	0.46	0.16	14.58	0.16
Cow1	1,427.26	1.03	x	x	-	0.14	x	x
Cow2	632.86	0.86	x	x	-	-	x	x

นอกจากนี้ค่า Risk Quotient (RQ) ของฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจนสามารถคำนวณได้จาก EEQs และ TEQs ของแต่ละฟาร์ม เพื่อระบุระดับความเสี่ยง โดยอ้างอิงตามเกณฑ์การศึกษาของ Hernando et. al. (2006) และ Ben et. al. (2017) สำหรับฮอร์โมนเอสโตรเจน ค่า RQ ของฟาร์ม BC และ LH3 เท่ากับ 208.3 และ 294.3 ng/L ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความเสี่ยงสูงต่อสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตามในกรณีของแอนโดรเจน สำหรับฟาร์ม Pig3, LH1 และ LH3 ค่า TEQs และค่า RQ มีระดับความเสี่ยงต่ำ

แต่จากผลการศึกษายังพบว่าฟาร์ม BC และ LH3 ซึ่งเป็นฟาร์มที่ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียและทำการปล่อยน้ำลงสู่พื้นดินบริเวณรอบคอกเลี้ยงสัตว์นั้นมีการตกค้างของฮอร์โมน β E2

โมนและ EE2 สูงกว่าฮอร์โมนชนิดอื่น โดยต่างกับผลการศึกษาของฟาร์มอื่นที่มีระบบบำบัดน้ำเสีย (ฟาร์ม LH1 และ LH2) ซึ่งไม่พบการตกค้างของฮอร์โมนเอสโตรเจนและฮอร์โมนแอนโดรเจน นอกจากนี้การตกค้างของฮอร์โมน MT ที่ตรวจพบในฟาร์ม LH1 อาจมาจากอาหารสัตว์และยาที่มีสเตียรอยด์ฮอร์โมนสังเคราะห์ผสม

การประเมินความเสี่ยงจากสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำของกัวนพะเยา ระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา และน้ำประปาในจังหวัดพะเยา

ความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากความเข้มข้นของฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจนที่ตกค้างในแต่ละจุดเก็บน้ำตัวอย่างของกัวนพะเยา ระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา และน้ำประปาในจังหวัดพะเยา เมื่อทำการประเมินในแง่ของศักยภาพในการออกฤทธิ์ของฮอร์โมน โดยเทียบการออกฤทธิ์กับฮอร์โมน E2 ให้อยู่ในหน่วย EEQs และเทียบการออกฤทธิ์กับฮอร์โมน T ให้อยู่ในหน่วย TEQs แสดงดังตารางที่ 14 พบว่าค่า EEQs ของเอสโตรเจนในน้ำตัวอย่างจากกัวนพะเยา อยู่ในช่วง 25–347 ng/L ซึ่งสูงกว่าค่า NOEL และ LOEL (1 และ 10 ng/L ตามลำดับ) (Barel-Cohen et al. , 2006) ดังนั้นการปนเปื้อนเอสโตรเจนอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำตัวอย่างจากกัวนพะเยา ในขณะที่ค่า TEQ ในน้ำตัวอย่างจากกัวนพะเยา อยู่ในช่วง 2.51–5.18 ng/L ซึ่งบ่งชี้ว่าแอนโดรเจนไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำของกัวนพะเยา (ค่า NOEL สำหรับปลา คือ 100 ng/L)

ความเสี่ยงของการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่เกี่ยวข้องกับเอสโตรเจนในน้ำตัวอย่างจากกัวนพะเยา ที่ประเมินด้วยค่า RQ พบว่าอยู่ในช่วง 0.002–144.5 ซึ่งถือว่าระดับความเสี่ยงอยู่ในช่วงตั้งแต่ไม่ส่งผลกระทบจนถึงมีผลกระทบระดับความเสี่ยงสูงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำของกัวนพะเยา แสดงให้เห็นว่าน้ำจากกัวนพะเยาบางจุดพบการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในระดับที่ถือว่าเสี่ยงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ในขณะที่น้ำตัวอย่างในระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยาและน้ำประปาในจังหวัดพะเยาไม่พบการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมน แสดงให้เห็นว่าระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยาสามารถกำจัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำดิบจากกัวนพะเยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะระบบผลิตน้ำประปาจังหวัดพะเยาจะสามารถกำจัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนได้ทั้งหมด แต่ควรพิจารณาการบำบัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่แหล่งกำเนิด เช่น ฟาร์มปศุสัตว์ ซึ่งจะเป็นการควบคุมการแพร่กระจายของสเตียรอยด์ฮอร์โมนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการบำบัดที่ปลายทาง (ระบบผลิตน้ำประปาจังหวัดพะเยา)

ปัจจุบันฟาร์มปศุสัตว์รอบกว๊านพะเยาบางแห่งมีการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมหรือนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งฟาร์มเหล่านี้ไม่พบการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด โดยระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่ที่ใช้ในฟาร์มเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศ ซึ่งมีข้อจำกัดคือต้องมีน้ำเสียเข้าระบบสม่ำเสมอ แต่ในกิจกรรมการเลี้ยงสัตว์ของฟาร์มส่วนใหญ่ที่เป็นฟาร์มขนาดเล็กถึงขนาดกลางจะมีการเลี้ยงเป็นรอบสลับกับการพักคอกจึงมีน้ำเสียเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นระบบบำบัดทางชีวภาพจึงอาจไม่เหมาะกับฟาร์มที่ดำเนินกิจกรรมลักษณะดังกล่าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการบำบัด สเตียรอยด์ฮอร์โมนตกค้างในน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ด้วยกระบวนการทางเคมี ได้แก่ กระบวนการฟิโตแคตาลีติกไอโซเนนชัน ดังแสดงผลในหัวข้อถัดไป

ตาราง 15 ความเสี่ยงจากสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำตัวอย่างจากกว๊านพะเยา ระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา และน้ำประปาในจังหวัดพะเยา

ตัวอย่าง	EEQs (ng/L)	RQ ของเอสโตรเจน	TEQs (ng/L)	RQ ของแอนโดรเจน
1	347.00	144.50	3.82	0.19
2	240.70	0.01	4.06	0.20
3	157.30	0.00	2.70	0.13
4	312.40	111.10	2.80	0.14
5	25.45	0.02	5.57	0.28
WSP1	ND	ND	ND	ND
WSP2	ND	ND	ND	ND
WSP3	ND	ND	ND	ND
WSP4	ND	ND	ND	ND
7	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ: 1 = จุดสูบน้ำดิบ, WSP1 = ขั้นตอนการเติมคลอรีนก่อนการบำบัด, WSP2 = กระบวนการฟิโตแคตาลีติกไอโซเนนชัน, WSP3 = ระบบเติมอากาศ, WSP4 = ขั้นตอนการเติมคลอรีนหลังการบำบัด, 7 = น้ำประปาจากโรงพยาบาลพะเยา, ND = Not detected

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสเตรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชัน

จากการศึกษาการตกค้างของสเตรอยด์ฮอร์โมนในฟาร์มปศุสัตว์รอบกว๊านพะเยา พบว่ามีการตกค้างทั้งฮอร์โมนเอสโตรเจนและฮอร์โมนแอนโดรเจน ได้แก่ β E2, EE2 และ MT ที่ความเข้มข้น 472.93, 103.02 และ 50.47 ng/L ตามลำดับ โดยเป็นการตกค้างในฟาร์มที่ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากฟาร์มปศุสัตว์ส่วนใหญ่มีการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) ซึ่งหากไม่มีน้ำเสียเข้าอย่างต่อเนื่องหรือสารอาหารในระบบบำบัดน้ำเสียหมดลงจะทำให้ระบบทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพหรือระบบล้มเหลว และเมื่อดูผลการตกค้างของฮอร์โมนในระบบผลิตน้ำประปาซึ่งมีการเติมสารคลอรีนเพื่อทำการฆ่าเชื้อ พบว่าสามารถกำจัดฮอร์โมนที่ตกค้างอยู่ในน้ำดิบของกว๊านพะเยาที่นำมาใช้ผลิต โดยที่กระบวนการกำจัดฮอร์โมนด้วยสารคลอรีนนั้นเป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง แต่เนื่องจากการใช้สารคลอรีนนั้นไม่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ เนื่องจากหากเติมสารคลอรีนมากเกินไปอาจทำให้เกิดสารตกค้างในน้ำที่ผ่านการบำบัด ดังนั้นในการศึกษานี้ได้คำนึงถึงปัญหาข้อนี้จึงได้ใช้การบำบัดด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง คือ กระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชันเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำเสียของฟาร์มปศุสัตว์ โดยศึกษาที่น้ำเสียสังเคราะห์ 2 ลักษณะ ได้แก่ (1) น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเข้มข้นของฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT 1,000 เท่าของความเข้มข้นที่พบในน้ำเสียจริง และ (2) น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความเข้มข้นของฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ที่ค่าการละลายน้ำสูงสุดของฮอร์โมนแต่ละชนิด และควบคุมสภาวะ pH ที่ 5.0 และปริมาณไอโซน 400 mg/hr รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) ที่ความยาวคลื่น 254 nm ได้ผลการศึกษาดังนี้

1. ผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจน 1,000 เท่าของความเข้มข้นที่ตกค้างในน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์

จากการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมฮอร์โมนเอสโตรเจนและฮอร์โมนแอนโดรเจนที่มีความเข้มข้น 1,000 เท่าของปริมาณที่ตกค้างในฟาร์มปศุสัตว์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชัน เริ่มแรกได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC แต่ค่าที่ได้ต่ำกว่าค่า Limit of Detection (LOD) ของเครื่อง จึงได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LC-MS/MS แทน ผลการทดลองแสดงดังภาพ 35 พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นในนาที่ที่ 0 ตรวจพบฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ปริมาณ 0.34, 0.02 และ 0.02 mg/L ตามลำดับ เมื่อทำการบำบัดเป็นระยะเวลา 5 นาทีพบว่าปริมาณของฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ลดลงเหลือ 0.19, 0.01 และ 0.02 mg/L

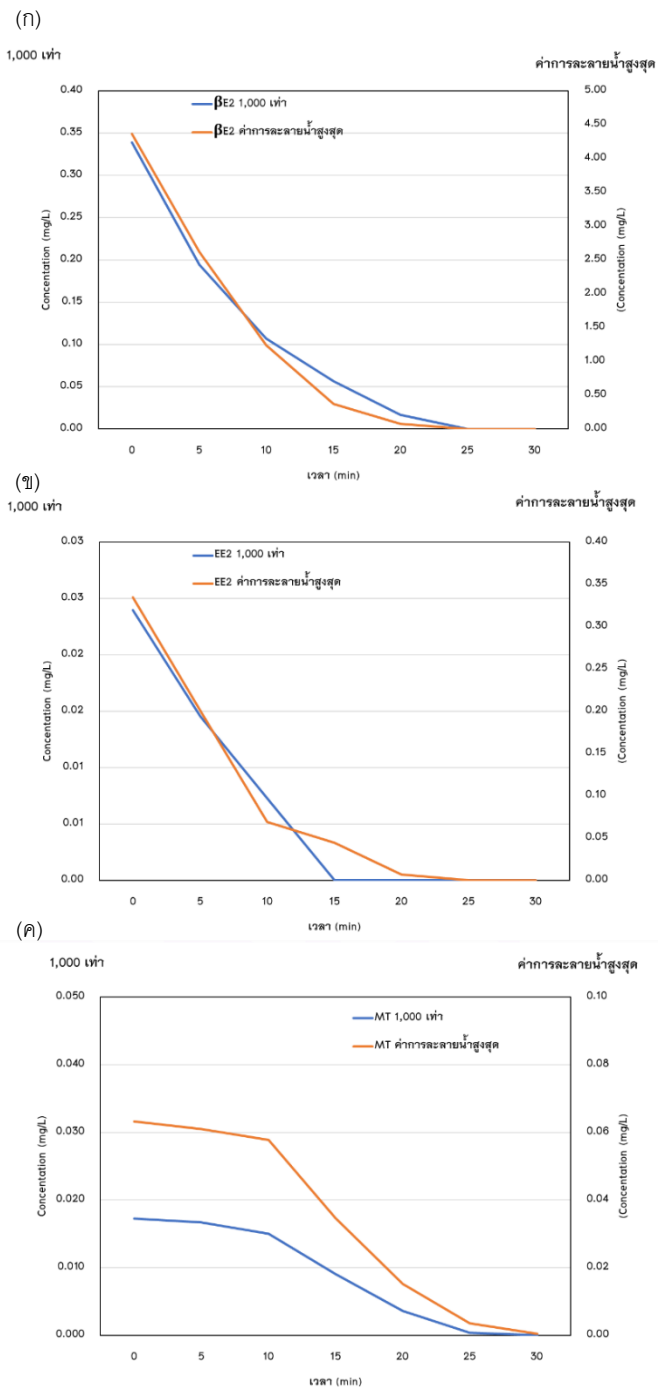
ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการได้บำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ได้ร้อยละ 57.3, 60.68, และ 3.31 ตามลำดับ และเมื่อทำการบำบัดจนถึงนาที่ที่ 25 และนาที่ที่ 30 ไม่พบปริมาณฮอร์โมนทั้งสามชนิด (β E2, EE2 และ MT) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของ สันติพันธ์ ฉะยมแหลม, ตอพงค์ กรีธาชาติ และเนติยา กรีธาชาติ (2561)

จากผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจน 1,000 เท่าของความเข้มข้นที่ตกค้างในน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์พบว่ากระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชันที่สภาวะ pH 5.0 ปริมาณไอโซน 400 mg/hr UV-C ความยาวคลื่น 254 nm ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ได้ร้อยละ 100

2. ผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจนที่ค่าการละลายน้ำสูงสุด

จากการทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมฮอร์โมนเอสโตรเจนและฮอร์โมนแอนโดรเจนที่ความเข้มข้นที่ค่าการละลายน้ำสูงสุดด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชัน แสดงดังภาพ 35 พบว่าในนาที่ที่ 0 ตรวจพบฮอร์โมน β E2, EE2, และ MT ปริมาณ 4.36, 0.33 และ 0.06 mg/L ตามลำดับ เมื่อทำการบำบัดเป็นระยะเวลา 5 นาทีพบว่าปริมาณฮอร์โมน β E2, EE2, T และ MT ลดลงเหลือ 2.62, 0.20 และ 0.06 mg/L ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการได้บำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ได้ร้อยละ 40, 40, และ 3.42 ตามลำดับ และเมื่อทำการบำบัดจนถึงนาที่ที่ 25 และนาที่ที่ 30 ไม่พบปริมาณฮอร์โมนทั้งสามชนิด (β E2, EE2 และ MT) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของ (สันติพันธ์ ฉะยมแหลม ตอพงค์ กรีธาชาติ และเนติยา กรีธาชาติ 2561)

นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจนที่ค่าการละลายน้ำสูงสุด (หัวข้อนี้) ยังมีความใกล้เคียงกับประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจน 1,000 เท่าของความเข้มข้นที่ตกค้างในน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ (หัวข้อก่อนหน้า) คือ ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ร้อยละ 100, 100 และ 99.33 ตามลำดับ



ภาพ 35 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมฮอร์โมนเอสโตรเจนและฮอร์โมนแอนโดรเจนที่ความเข้มข้น 1,000 เท่าของที่ตกค้างในฟาร์มปศุสัตว์และความเข้มข้นที่ค่าการละลายน้ำสูงสุด (ก) ฮอร์โมน β E2 (ข) ฮอร์โมน EE2 (ค) ฮอร์โมน MT

ผลการวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการบำบัดสเตรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกไอโซเนนซัน

การศึกษาส่วนนี้เป็นการยืนยันผลว่าผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกไอโซเนนซันที่สภาวะเหมาะสมนั้น ยังคงเป็นอนุพันธ์ และมีฤทธิ์เช่นเดียวกับฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT หรือไม่ โดยผลการศึกษาส่วนแรกจะพิจารณาปริมาณ TOC ของผลผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่าลดลงจากปริมาณ TOC ของฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT เริ่มต้นหรือไม่ และส่วนที่สองจะตรวจสอบการออกฤทธิ์ของสารผลผลิตภัณฑ์ที่เหมือนกับฮอร์โมนเอสโตรเจน (Estrogenicity) และฮอร์โมนแอนโดรเจน (Androgenicity) ด้วยเทคนิค Bioassay โดยเทียบการออกฤทธิ์กับฮอร์โมนเพศชาย Testosterone ซึ่งเป็นฮอร์โมนเพศชายที่ผลิตจากร่างกายของมนุษย์และสัตว์ ทั้งนี้หากกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกไอโซเนนซันที่สภาวะเหมาะสมนั้นสามารถบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ผลผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการบำบัดกลับยังคงมีฤทธิ์เช่นเดียวกับฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT จะว่ากระบวนการบำบัดไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ให้หมดฤทธิ์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1. ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon: TOC)

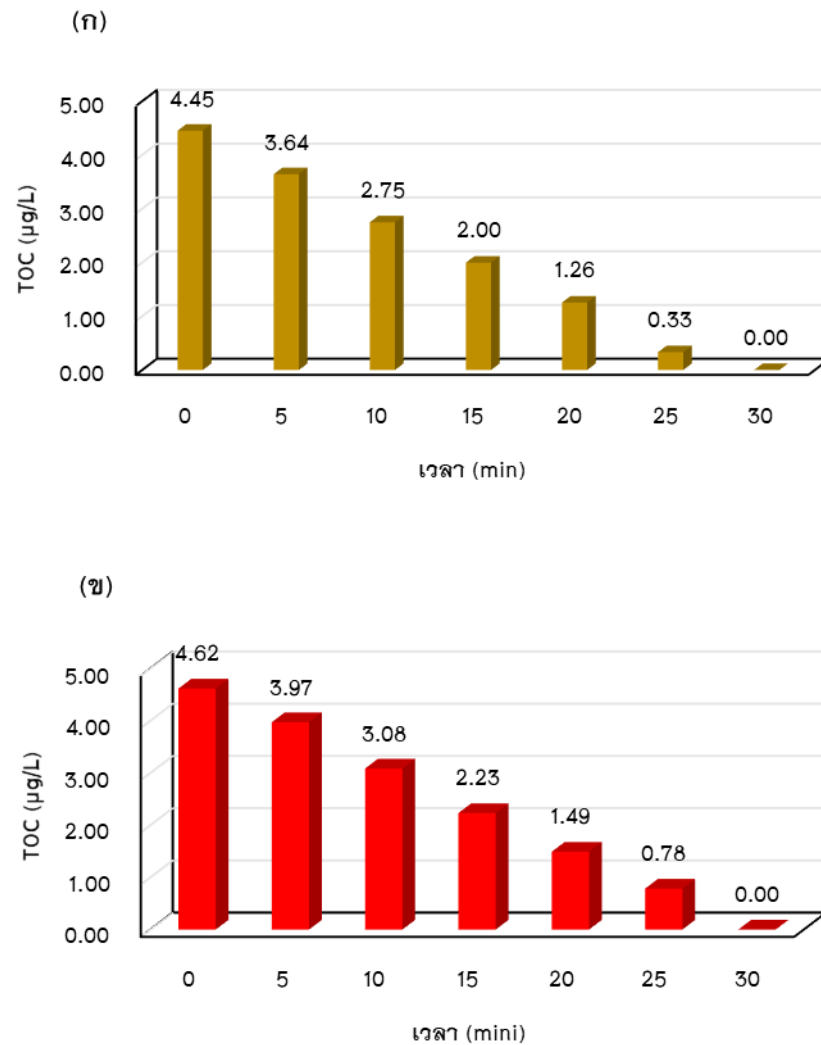
การวิเคราะห์ปริมาณ TOC ของผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกไอโซเนนซันที่สภาวะเหมาะสม เพื่อต้องการทราบถึงประสิทธิภาพการบำบัดว่าสามารถบำบัดได้สมบูรณ์จนกลายเป็น CO_2 และ H_2O หรือเพียงเปลี่ยนโครงสร้างกลายเป็นผลผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารอนุพันธ์เท่านั้น โดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณ TOC ของผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบำบัดเปรียบเทียบกับปริมาณ TOC ของฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ที่ความเข้มข้น 13.0, 4.8 และ 3.0 mg/L อาศัยหลักการที่ว่าถ้าหากปริมาณของสารอินทรีย์ถูกบำบัดจนหมดและไม่เกิดเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนุพันธ์อื่น ๆ ปริมาณ TOC จะต้องลดลง หรือมีน้อยมาก

ผลการศึกษาปริมาณ TOC ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของฮอร์โมนเพศหญิงและเพศชาย 1,000 เท่าของความเข้มข้นที่ตกค้างในน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ (ภาพ 36) พบว่าในเวลาที่ 25 ซึ่งสามารถบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT จนความเข้มข้นต่ำกว่า LOD ของเครื่อง HPLC และเทคนิค LC-MS/MS ยังคงเกิดผลผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารอินทรีย์เหลืออยู่หลังผ่านการบำบัด โดยปริมาณ TOC ลดลงร้อยละ 93 และเมื่อบำบัดจนถึง 30 นาที พบว่าสามารถลดค่า TOC ได้ร้อยละ 99.99 แสดงว่ากระบวนการโฟโตแคตตาไลติกไอโซเนนซัน

สามารถบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ได้สมบูรณ์จนกลายเป็น CO_2 และ H_2O เกือบหมด และเหลือปริมาณสารอินทรีย์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ก่อนการบำบัด

ผลการศึกษาปริมาณ TOC ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมฮอร์โมนเพศหญิง และเพศชายที่ความเข้มข้นที่ค่าการละลายน้ำสูงสุดที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชัน (ภาพ 36) พบว่าในนาที่ที่ 25 ซึ่งสามารถบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT จนความเข้มข้นต่ำกว่า LOD ของเครื่อง HPLC และเทคนิค LC-MS/MS ยังคงเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารอินทรีย์เหลืออยู่หลังผ่านการบำบัด โดยปริมาณ TOC ลดลงร้อยละ 83 และเมื่อบำบัดจนถึง 30 นาที พบว่าสามารถลดค่า TOC ได้ร้อยละ 99.97 แสดงว่ากระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชันสามารถบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ได้สมบูรณ์จนกลายเป็น CO_2 และ H_2O เกือบหมด และเหลือปริมาณสารอินทรีย์น้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon: TOC) ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมฮอร์โมนเพศหญิงและเพศชายที่ความเข้มข้น 1,000 เท่า ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชันของย่อน้ำที่ผ่านมา

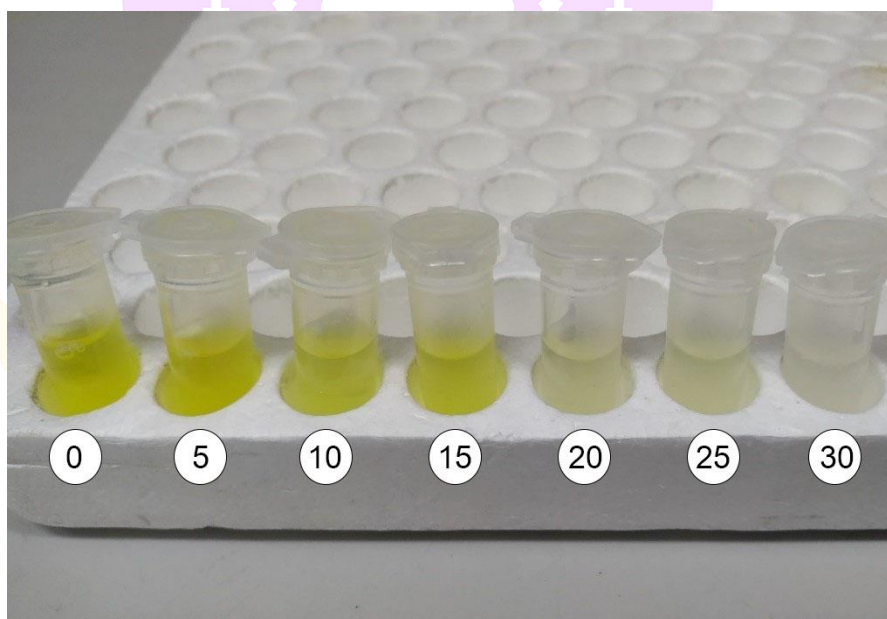
จากผลการวิเคราะห์ปริมาณ TOC ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดหลังจากบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งสองความเข้มข้นด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชันที่สภาวะที่สภาวะ pH 5.0 ปริมาณไอโซน 400 mg/hr UV-C ความยาวคลื่น 254 nm ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที มีประสิทธิภาพร้อยละ 99.99 และ 99.97 ในการบำบัดฮอร์โมน β E2, EE2 และ MT ได้สมบูรณ์จนกลายเป็น CO_2 และ H_2O



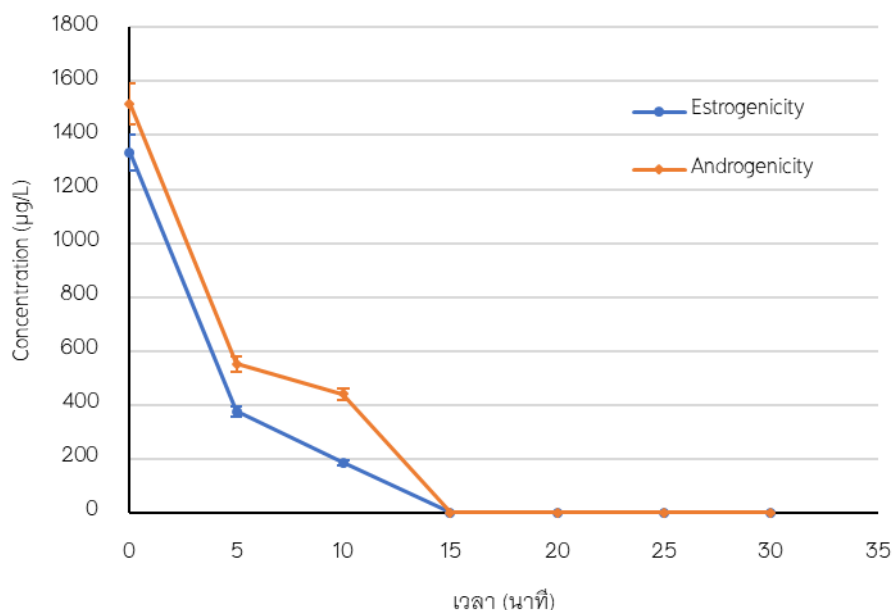
ภาพ 36 ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon: TOC) ของ (ก) น้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นของฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจน 1,000 เท่าของความเข้มข้นที่ตกค้างในน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ และ (ข) น้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจนที่ต่ำกว่าละลายน้ำสูงสุด

2. การออกฤทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่เหมือนกับฮอร์โมนเอสโตรเจน (Estrogenicity) และฮอร์โมนแอนโดรเจน (Androgenicity) ด้วยเทคนิค Bioassay

การศึกษาส่วนนี้เป็นการนำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซเนนชันที่เวลาบำบัด 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที มาทำการทดสอบการออกฤทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่เหมือนกับฮอร์โมนเอสโตรเจน (Estrogenicity) และฮอร์โมนแอนโดรเจน (Androgenicity) ด้วยเทคนิค Bioassay จากผลการทดลองพบว่าการออกฤทธิ์ของฮอร์โมนทั้ง 2 ชนิด มีการลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อใช้ระยะเวลาในการบำบัดนานขึ้น โดยตั้งแต่วันที่ 20 เป็นต้นไป สีของตัวอย่างจะเป็นสีเหลืองจางจนไปถึงไม่มีสี แสดงดังภาพ 37 และเมื่อนำตัวอย่างไปวัดความเข้มข้นเทียบกับสารละลายที่ไม่ได้ทำการเติมตัวอย่าง (blank) ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer พบว่าตั้งแต่วันที่ 15 เป็นต้นไป ไม่พบสารผลิตภัณฑ์ที่ออกฤทธิ์เหมือนกับฮอร์โมนเอสโตรเจน (Estrogenicity) และฮอร์โมนแอนโดรเจน (Androgenicity) แสดงดังภาพ 38



ภาพ 37 สีตัวอย่างของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Bioassay ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที ของการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซเนนชัน



ภาพ 38 การทดสอบการออกฤทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่เหมือนกับฮอร์โมนเอสโตรเจน (Estrogenicity) และฮอร์โมนแอนโดรเจน (Androgenicity)

เพื่อให้กระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชันสามารถบำบัดฮอร์โมนเอสโตรเจนและฮอร์โมนแอนโดรเจนจนไม่เหลือผลิตภัณฑ์ที่ออกฤทธิ์เหมือนกับฮอร์โมนเอสโตรเจน (Estrogenicity) และฮอร์โมนแอนโดรเจน (Androgenicity) รวมทั้งไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงควรบำบัดที่ระยะเวลาตั้งแต่ 15 นาทีเป็นต้นไป

การประมาณการค่าใช้จ่ายของกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชัน

เมื่อคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชันที่สภาวะ pH 5.0 ปริมาณไอโซน 400 mg/hr รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) ที่ความยาวคลื่น 254 nm พบว่า ระยะเวลาในการบำบัด 15 นาที มีค่าใช้จ่ายในการบำบัด 14.55 Baht/m³ ในขณะที่ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที มีค่าใช้จ่าย 29.04 Baht/m³ ดังตาราง 16 เนื่องจากระยะเวลาบำบัด 15 นาที และ 30 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่างกันไม่มากแต่ค่าใช้จ่ายมีต่างกันประมาณ 2 เท่า จึงสรุปได้ว่าระยะเวลาในการบำบัด 15 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซนเนชัน และหากเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการบำบัดน้ำเสียระหว่างระบบบำบัดทางชีวภาพที่

ฟาร์มบางแห่งได้มีการใช้งานกับกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่นแล้วนั้น จะเห็นได้ว่ากระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่นนั้นมีความคุ้มค่าใช้จ่ายที่มากกว่า เนื่องจากเป็นระบบบำบัดทางเคมี แต่หากคำนึงถึงประสิทธิภาพ ระยะเวลา และขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการดำเนินการของระบบบำบัดน้ำเสีย จะเห็นว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่นนั้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดสเตรย์รอยด์ฮอร์โมนได้ดีกว่าระบบบำบัดทางชีวภาพ รวมทั้งประหยัดเวลาและพื้นที่ในการดำเนินการบำบัดน้ำเสีย

ตาราง 16 ค่าใช้จ่ายของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่น

สภาวะของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชั่น	ค่าใช้จ่าย (Baht/m ³)	
pH 5.0, O ₃ 400 mg/hr, UV-C, 15 นาที	ค่าไฟฟ้า (เครื่องผลิตโอโซน)	7.74
	ค่าไฟฟ้า (หลอด UV-C)	6.81
รวม	14.55	
pH 5.0, O ₃ 400 mg/hr, UV-C, 30 นาที	ค่าไฟฟ้า (เครื่องผลิตโอโซน)	15.47
	ค่าไฟฟ้า (หลอด UV-C)	13.57
รวม	29.04	

จากผลการศึกษาที่ได้พบว่ามีกรดตกค้างของสเตรย์รอยด์ฮอร์โมนในฟาร์มปศุสัตว์ทั้งในมูลสัตว์ ดิน และน้ำเสีย ซึ่งส่วนใหญ่พบฮอร์โมน E1, β E2, EE2 และ MT และเมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าความเสี่ยงของเอสโตรเจนพบว่ามีค่าความเสี่ยงสูงที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ส่วนค่าความเสี่ยงของแอนโดรเจนมีความเสี่ยงต่ำในฟาร์มที่ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย เมื่อพิจารณาตำแหน่งที่ตั้งของฟาร์มแต่ละแห่งพบว่ามีที่ตั้งใกล้กับแหล่งน้ำสาขาของกว๊านพะเยาจึงได้ทำการตรวจสอบการตกค้างของสเตรย์รอยด์ฮอร์โมนในน้ำของกว๊านพะเยาและระบบผลิตน้ำประปาจังหวัดพะเยา พบว่าน้ำในกว๊านพะเยามีการตกค้างของฮอร์โมน E3 ซึ่งมีค่าความเข้มข้นสูงที่สุด ตามด้วย β E2, EE2 และ MT ตามลำดับ และเมื่อนำมาวิเคราะห์หา RQ ของเอสโตรเจนพบไม่มีผลกระทบต่อความเสี่ยงสูงที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ส่วน RQ ของแอนโดรเจนไม่พบความเสี่ยง รวมถึงน้ำในระบบผลิตน้ำประปาและน้ำประปาไม่พบความเสี่ยง ซึ่งบ่งชี้ว่าระบบผลิตน้ำประปาสามารถกำจัดสเตรย์รอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำดิบของกว๊านพะเยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากฟาร์มปศุสัตว์ น้ำในกว๊านพะเยา และระบบผลิตน้ำประปาจังหวัดพะเยาทำให้เห็นถึงความสำคัญของการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดก่อน

ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสเตรปโตคอคคัสด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกไอโซนเนชันเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดสเตรปโตคอคคัสที่เกิดจากฟาร์มปศุสัตว์ก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสเตรปโตคอคคัสคือ pH 5.0 ปริมาณไอโซน 400 mg/hr รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) ที่ความยาวคลื่น 254 nm ระยะเวลาในการบำบัด 15 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในช่วงร้อยละ 70-80



บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนจากฟาร์มปศุสัตว์ 13 แห่ง บริเวณรอบกว๊านพะเยา รัศมี 10 km น้ำในกว๊านพะเยา โรงผลิตน้ำประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา น้ำประปาส่วนภูมิภาคจังหวัดพะเยา และประสิทธิภาพการบำบัดสเตียรอยด์ฮอร์โมน ด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซเนนซัน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ฟาร์มปศุสัตว์พบการตกค้างของเอสโตรเจนและแอนโดรเจนทั้งในมูลสัตว์ ดิน และน้ำเสีย ซึ่งส่วนใหญ่พบฮอร์โมน E1, β E2, EE2 และ MT และเมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าความเสี่ยงของเอสโตรเจนพบว่ามีความเสี่ยงสูงที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ส่วนค่าความเสี่ยงของแอนโดรเจนมีความเสี่ยงต่ำในฟาร์มที่ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย

2. กว๊านพะเยาพบฮอร์โมน E3 มีความเข้มข้นสูงที่สุด ตามด้วย β E2, EE2 และ MT ตามลำดับ และเมื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าความเสี่ยงของเอสโตรเจนพบไม่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ส่วนค่าความเสี่ยงของแอนโดรเจนไม่พบความเสี่ยง รวมถึงน้ำในระบบผลิตน้ำประปาและน้ำประปาไม่พบความเสี่ยง

3. ไม่พบการตกค้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนในระบบผลิตน้ำประปาและน้ำประปาจังหวัดพะเยา ซึ่งบ่งชี้ว่าระบบผลิตน้ำประปาสามารถกำจัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ตกค้างในน้ำดิบของกว๊านพะเยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนในน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งสองความเข้มข้นด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลติกไอโซเนนซัน คือ pH 5.0 ปริมาณไอโซน 400 mg/hr รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) ที่ความยาวคลื่น 254 nm ระยะเวลาในการบำบัด 15 นาที โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสเตียรอยด์ฮอร์โมนร้อยละ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการบำบัดไม่ส่งผลต่อการออกฤทธิ์ทางฮอร์โมนเอสโตรเจนและแอนโดรเจน

ข้อเสนอแนะ

1. น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมของฟาร์มปศุสัตว์ควรได้รับการบำบัดก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้เสนอกระบวนการบำบัดทางเคมี คือ กระบวนการโฟโตแคตาไลติก

ไอโซนเนซัน เป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งใช้ระยะเวลาและพื้นที่ในการบำบัดน้อยกว่าระบบบำบัดแบบชีวภาพ สำหรับควบคุมการแพร่กระจายของสารกลุ่มสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่แหล่งกำเนิด

2. ควรวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียตามขนาดของฟาร์ม เพื่อให้สามารถติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียได้อย่างเหมาะสม



บรรณานุกรม

- กัตตินาฏ สกุสวัสตีพันธ์. (2555). การย่อยสลาย 17แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- เกรียงศักดิ์ อุดมลินโรจน์. (2547). วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย (พิมพ์ครั้งที่ 5). นนทบุรี: เอส.อาร์ พรินติ้ง แมสโปรดักส์ จำกัด.
- ชนัดถ์ โชคเจริญรัตน์ และ ชัยณรงค์ สกุสแถว. (2560). การกำจัดสารฮอร์โมนเพศที่ตกค้างในน้ำโดยใช้การบำบัดด้วยกระบวนการออกซิเดชันจากเปอร์ซัลเฟตที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ต. รายงานวิจัย นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สันติพันธ์ ฉะยมแหลม, ต่อพงศ์ กรีธาชาติ และเนทียา กรีธาชาติ. (2561). การศึกษาการบำบัดฮอร์โมน 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรนในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกโอโซนเนชัน. *Thai Environmental Engineering Journal*, 32(1), 51-60.
- สุมาลี เต็มทิวี. (2551). การศึกษาสัดส่วนฟีนอลต่อโอโซนที่เหมาะสม สำหรับการใช้กระบวนการโอโซนเนชันในการย่อยสลายฟีนอล. การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง วศ.ม., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร
- Adams, C. D., Fusco, W., and Kanzelmeyer, T. C. (1995). **Ozone, hydrogen peroxide/ozonetreatment of chromium and copper-complex dyes: decolorization and metal release.** Retrieved April 20, 2017, from <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01919519508547543>.
- Adeel, M., Song, X., Wang, Y., Francis, D. and Yang, Y. (2017). Environmental impact of estrogens on human, animal and plant life: A critical review. *Environ Int*, 99, 107-119.
- AHFS 97 Drug Information. (1997). **American hospital formulary service.** Retrieved February 5, 2017, from <https://bit.ly/2JDphf2>.
- Andaluri G., Suri R.P. and Kumar K. (2012). Occurrence of estrogen hormones in biosolid, animal manure and mushroom compost. **Environmental Monitoring and Assessment.** 184, 1197-1205.
- Andersen H.R., Wollenberger L., Halling-Sørensen B. and Kusk K.O. (2001). Development of

- copepod nauplii to copepodites—a parameter for chronic toxicity including endocrine disruption. **Environmental Toxicology and Chemistry**, 20, 2821–2829.
- Alum, A., Yoon, Y., Westerhopff, P. and Abbaszadegan, M. (2004). Oxidation of bisphenol A, 17 β -estradiol, and 17 α -ethinylestradiol and byproduct estrogenicity. **Environmental Toxicology**, 19(3), 257–264.
- Aris, A. Z., Shamsuddin, A. S., and Praveena, S. M. (2014). Occurrence of 17-ethinylestradiol (EE2) in the environment and effect on exposed biota: A review. **Environment International**, 69, 104–119.
- Barel Cohen, K., Shore, L.S., Shemesh, M., Wenzel, A., Mueller, J. and Kronfeld-Schor, N. (2006). Monitoring of natural and synthetic hormones in a polluted river. **Journal of Environmental Management**, 78(1), 16–23.
- Beck L.C., Bruhn R. and Gandrass J. (2006). Analysis of estrogenic activity in coastal surface waters of the Baltic Sea using the yeast estrogen screen. **Chemosphere**. 63, 1870–1878.
- Ben, W., Zhu, B., Yuan, X., Zhang, Y., Yang, M., and Qiang, Z. (2017). Transformation and fate of natural estrogens and their conjugates in wastewater treatment plants: Influence of operational parameters and removal pathways. **Water Research**, 124, 244–250.
- Bergman, A., Heindel, J. J., Jobling, S., Kidd, K. A., and Zoeller, R. T., (2013). **State of the Science of Endocrine Disrupting Chemicals 2012**. Summary for Decision Makers. Switzerland: United National Environment Programme and World Health Organization.
- Bevacqua, C. E., Rice, C. P., Torrents, A. and Ramirez, M. (2011). Steroid hormones in biosolids and poultry litter: a comparison of potential environmental inputs. **Sci Total Environ**, 409(11), 2120–2126.
- Bledzaka, D., Gmurek, M., Olak, M., Miller, J. S., and Ledakowicz, S. (2010). **Photodegradation and advanced oxidation of endocrine disruptors in aqueous solutions**. Retrieved March 27, 2017, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586110002075>
- Boudreau M., Courtenay S.C., Maclatchy D.L., Bérubé C.H., Hewitt L.M. and Van Der Kraak

- G.J. (2005). Morphological abnormalities during early-life development of the estuarine mummichog, *Fundulus heteroclitus*, as an indicator of androgenic and anti-androgenic endocrine disruption. **Aquatic Toxicology**, 71, 357–369.
- Buchsbaum HJ. (1987). **The Menopause**. New York: Springer Verlag.
- Caldwell D.J., Mastrocco F., Hutchinson T.H., Lange R., Heijerick, D., Janssen C., et al., (2008). Derivation of an Aquatic Predicted No-Effect Concentration for the Synthetic Hormone, 17 α -Ethinyl Estradiol. **Environmental Science and Technology**. 42, 7046–7054.
- Cédat, B., de Brauer, C., Metivier, H., Dumont, N., and Tutundjan, R. (2016). Are UV photolysis and UV/H₂O₂ process efficient to treat estrogens in waters? Chemical and biological assessment at pilot scale. **Water Res**, 100, 357–366.
- Chen, J., Liu, M., Yuan, H., Huang, S., Zhao, J., Tao, J., et al., (2018). Surface-enhanced Raman spectroscopy for classification of testosterone propionate and nandrolone residues in chicken. **Vibrational Spectroscopy**, 99, 7–12.
- Chen, T.-S., Chen, T.-C., Yeh, K.-J. C., Chao, H.-R., Liaw, E.-T., Hsieh, C.-Y. et al., (2010). High estrogen concentrations in receiving river discharge from a concentrated livestock feedlot. **Science of The Total Environment**, 408(16), 3223–3230.
- Chen, Y., Zhang, K., and Zuo, Y. (2013). Direct and indirect photodegradation of estriol in the presence of humic acid, nitrate and iron complexes in water solutions. **Science of The Total Environment**, 463–464, 802–809.
- Cheng, D. L., Ngo, H. H., Guo, W. S., Liu, Y. W., Zhou, J. L., Chang, S. W. et al., (2018). Bioprocessing for elimination antibiotics and hormones from swine wastewater. **Sci Total Environ**, 621, 1664–1682.
- Cheremisinoff, N. P., and Cheremisinoff, P. N. (1993). **Water treatment and waste recovery advanced technology and applications**. Retrieved March 27, 2017, from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19931378947>.
- Colucci, M.S., Bork, H., and Topp, E. (2001). Persistence of estrogenic hormones in agricultural Soils: I. 17 β -estradiol and estrone. **Journal of Environment Quality**,

30, 2070–2076.

Czajka, C. P., and Londry, K. L. (2006). Anaerobic biotransformation of estrogens. **Science of the Total Environment**, 367(2–3), 932–941.

De Lasa, H. I., and Dogu, G., Ravella, A., (1992). **Chemical Reactor Technology for Environmentally Safe Reactors and Product**. Retrieved March 20, 2017, from https://www.researchgate.net/publication/321598779_Chemical_Reactor_Technology_for_Environmentally_Safe_Reactors_and_Products.

Deborde, M., Rabouan, S., Gallard, H., and Legube, B. (2004). Aqueous chlorination kinetics of some endocrine disruptors. **Environmental Science and Technology**, 38(21), 5577–5583.

Delaune, P. B., and Moore, P. A., Jr. (2013). 17 β -estradiol in runoff as affected by various poultry litter application strategies. **Sci Total Environ**, 444, 26–31.

Epstein S. (1997). Don't eat extra estrogen. **The Ecologist**, 27(3), 27–89.

Finlay–Moore, O., Hartel, P.G., and Cabrera, M.L. (2000). 17 β -estradiol and testosterone in soil and runoff from grasslands amended with broiler litter. **Journal of Environmental Quality**, 29, 1604–1611.

Gadd, J. B., Tremblay, L. A., and Northcott, G. L. (2010). Steroid estrogens, conjugated estrogens and estrogenic activity in farm dairy shed effluents. **Environmental Pollution**, 158, 730–736.

Glaze, W. H., and Kang, J. W. (1980). **Oxidation of water supply refractory species by ozone with ultraviolet radiation**. Retrieved March 27, 2018, from <https://bit.ly/2y5odzr>.

Greenwood, N. N., and Earnshaw, A. (1984). **Chemistry of the elements**. Pergamon: Oxford.

Gibson, J.H. (2008). **UVB Radiation: Definition and Characteristics**. USDA UVB Monitoring Program, Natural Resource Ecology Laboratory. Colorado State University. Retrieved October, 20, 2008. http://uvb.nrel.colostate.edu/UVB/publications/uvb_primer.pdf.

Gómez, C., Pozo, O. J., Marcos, J., Segura, J., and Ventura, R. (2013). Alternative long-term markers for the detection of methyltestosterone misuse. **Steroids**, 78(1), 44–52.

- Grindler, N. M., Allsworth, J. E., Macones, G. A., Kannan, K., Roehl, K. A., and Cooper, A. R. (2015). Persistent Organic Pollutants and Early Menopause in U.S. Women. **PLOS ONE**, 10(1), 1–12.
- Häggröm, M., and Richfield, D. (2014). Elevated estrogens are a risk factor for male breast cancer– finally a study looks at this important issue. **Wikiversity J. Med.**, 1(1), 1–16.
- Haiyan, R., Shulan, J., ud din Ahmad, N., Dao, W., and Chengwu, C. (2007). Degradation characteristics and metabolic pathway of 17 α -ethynylestradiol by *Sphingobacterium* sp. JCR5. **Chemosphere**, 66(2), 340–346.
- Hamid, H., and Eskicioglu, C. (2012). Fate of estrogenic hormones in wastewater and sludge treatment: A review of properties and analytical detection techniques in sludge matrix. **Water Research**, 46(18), 5813–5833.
- Hansen, P. D., Dizer, H., Hock, B., Marx, A., Sherry, J., McMaster, M., and Blaise, Ch. (1998). Vitellogenin a biomarker for endocrine disruptors. **Trends in Analytical Chemistry**, 17, 448–451.
- Hernando, M.D., Mezcuca, M., Fernandez-Alba, A.R., and Barcelo, D. (2006). Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments. **Talanta**, 69(2), 334–342.
- Himeno, M., Nishimura, Y., Tsuji, H., and Kato, K. (1976). Purification and Characterization of Microsoma and Lysosomal β -Glucuronidase from Rat Liver by Use of Immunoaffinity Chromatography. **Eur. J. Biochem**, 70, 349–359.
- Hoigné, J., and Bader, H. (1983). Rate Constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water II. *Water research*, 1, 185–194.
- Homklin, S., Ong, S.K. and Limpiyakorn, T. (2012). Degradation of 17 α -methyltestosterone by *Rhodococcus* sp. and *Nocardioideis* sp. isolated from a masculinizing pond of Nile tilapia fry. **Journal of Hazardous Materials**, 221–222, 35–44.
- Hu, J., Cheng, S., Aizawa, T., Terao, Y., and Kunikane, S. (2003). Products of aqueous chlorination of 17 β -estradiol and their estrogenic activities. **Environmental Science & Technology**, 37, 5665–5670.
- Huang, B., Wang, B., Ren, D., Jin, W., Liu, J., Peng, J., and Pan, X. (2013). Occurrence,

- removal and bioaccumulation of steroid estrogens in Dianchi Lake catchment, **China. Environ Int**, 59, 262–273.
- Jenkins, M.B., Endale, D.M., Schomberg, H.H., Hartel, P.G., and Cabrera, M.L. (2009). 17β -Estradiol and testosterone in drainage and runoff from poultry litter applications to tilled and no-till crop land under irrigation. **Journal of Environmental Management**, 90, 2659–2664.
- Jeong, S.-H., Kang, D.-J., Lim, M.-W., Kang, C.-S., and Sung, H.-J. (2010). Risk Assessment of Growth Hormones and Antimicrobial Residues in Meat. **Toxicological Research**, 26(4), 301–313.
- Jiang, W., Yan, Y., Ma, M., Wang, D., Luo, Q., Wang, Z. et al., (2012). Assessment of source water contamination by estrogenic disrupting compounds in China. **Journal of Environmental Sciences**, 24(2), 320–328.
- Kostich M., Flick R. and Martinson J. (2013). Comparing predicted estrogen concentrations with measurements in US waters. **Environmental pollution**. 178, 271–277.
- Ku, Y., Su, W. J. and Shen, Y. S. (1996). **Decomposition kinetics of ozone in aqueous solution**. Retrieved June 16, 2016, from <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie9503959>.
- Lafrance P. and Caron M. (2013). Impact of the recent manure applications on natural estrogen concentrations in streams near agricultural fields. **Environmental Research**. 126, 208–210.
- Langlais, B., Reckhow, D. A., and Brink, D. R. (1991). **Ozone in water treatment: application and engineering**. Retrieved April 14, 2016, from <https://www.lenntech.com/scientific-books/ozone-water-treatment/ozone-in-water-treatment.htm>
- Laurenson, J. P., Bloom, R. A., Page, S., and Sadrieh, N. (2014). Ethinyl Estradiol and Other Human Pharmaceutical Estrogens in the Aquatic Environment: A Review of Recent Risk Assessment Data. **The AAPS Journal**, 16(2), 299–310.
- Le Thi Minh, T., Nguyen Phuoc, D., Dinh Quoc, T., Ngo, H. H. and Lan, D. H., C. (2016). Presence of e-EDCs in surface water and effluents of pollution sources in Sai Gon

- and Dong Nai river basin. **Sustainable Environment Research**, 26(1), 20–27.
- Li, Y., and Zhang, A. (2014). Removal of steroid estrogens from waste activated sludge using Fenton oxidation: Influencing factors and degradation intermediates. **Chemosphere**, 105, 24–30.
- Liu, Y. Y., Lin, Y. S., Yen, C. H., Miaw, C. L., Chen, T. C., Wu, M. C., et al., (2018). Identification, contribution, and estrogenic activity of potential EDCs in a river receiving concentrated livestock effluent in Southern Taiwan. **Sci Total Environ**, 636, 464–476.
- Ma, C., Qin, D., Sun, Q., Zhang, F., Liu, H., and Yu, C.P. (2016). Removal of environmental estrogens by bacterial cell immobilization technique. **Chemosphere**, 144, 607–614.
- Metcalfe, C. D., Metcalfe, T. L., Kiparissis, Y., Koenig, B. G., Khan, C., Hughes, R. J., et al., (2001). Estrogenic potency of chemicals detected in sewage treatment plant effluents as determined by in vivo assays with Japanese medaka (*Oryzias latipes*). **Environmental Toxicology and Chemistry**, 20, 297–308.
- Minh T.L.T., Phuoc D.N., Quoc T.D., Ngo H.H. and Lan C.D.H. (2016). Presence of e-EDCs in surface water and effluents of pollution sources in Sai Gon and Dong Nai river basin. **Sustainable Environment Research**. 26, 20–27.
- Munter, R. (2001). Advanced oxidation processes – current status and prospects. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. **Chemistry**, 50(2), 59–80.
- Noguera-Oviedo, K., and Aga, D. S. (2016). Chemical and biological assessment of endocrine disrupting chemicals in a full scale dairy manure anaerobic digester with thermal pretreatment. **Science of The Total Environment**, 550, 827–834.
- O’Neil, M. (2001). An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals. **Journal of Chemical Education**, 90(9), 1115–1125.
- Petrie, B., Barden, R., and Kasprzyk-Hordern, B. (2015). A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. **Water Research**, 72, 3–27.
- Rao, K., Lei, B., Li, N., Ma, M., and Wang, Z. (2013). Determination of estrogens and

- estrogenic activities in water from three rivers in Tianjin, China. **Journal of Environmental Sciences**, 25(6), 1164–1171.
- Ren, D., Chen, F., Ren, Z., and Wang, Y. (2019). Different response of 17 β -ethinylestradiol photodegradation induced by aquatic humic and fulvic acids to typical water matrixes. **Process Safety and Environmental Protection**, 121, 367–373.
- See, K. L., See, M., and Glud, C. (2008). Liver pathology associated with the use of anabolic–androgenic steroids. **Liver**, 12(2), 73–79.
- Silva, C. P., Otero, M., and Esteves, V. (2012). Processes for the elimination of estrogenic steroid hormones from water: A review. **Environmental Pollution**, 165, 38–58.
- Snyder, S. A., Adhamb, S., Redding, A. M., Cannon, F. S., DeCarolis, J., Oppenheimer, J., et al., (2007). Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals. **Desalination**, 202, 156–181.
- Ting, Y. F., and Praveena, S. M. (2017). Sources, mechanisms, and fate of steroid estrogens in wastewater treatment plants: a mini review. **Environmental Monitoring and Assessment**, 189(4), 1–16.
- Tyler, C. R., and Routledge, E. J. (1998). Oestrogenic effects in fish in English rivers with evidence of their causation. **Pure and Applied Chemistry**, 70, 1795–1804.
- Vymazal, J., Brezinova, T., and Kozeluh, M. (2015). Occurrence and removal of estrogens, progesterone and testosterone in three constructed wetlands treating municipal sewage in the Czech Republic. **Sci Total Environ**, 536, 625–631.
- Wang, J., and Zhu, Y. (2017). Occurrence and risk assessment of estrogenic compounds in the East Lake, China. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, 52, 69–76.
- Wang, Q., Liu, Y., Peng, C., Wang, X., Xiao, L., Wang, D.D., et al., (2017). Molecular regulation of sex change induced by methyltestosterone–feeding and methyltestosterone–feeding withdrawal in the protogynous orange–spotted grouper. **Biology of Reproduction**, 97(2), 324–333.
- Xu, P., Zhou, X., Xu, D., Xiang, Y., Ling, W., and Chen, M. (2018). Contamination and risk assessment of estrogens in livestock manure: A case study in Jiangsu province,

- China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 15, 125–135
- Xuan, R., Blassengale, A.A., and Wang, Q. (2008). Degradation of estrogenic hormones in a silt loam soil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 56, 9152–9158.
- Ying, G.G., Kookana, R.S., and Ru, Y.J. (2002). Occurrence and fate of hormone steroids in the environment. **Environment International**, 28, 545–551.
- Yuan X., Li T., Zhou L. and Zhao X. (2014). Characteristics and Risk Assessment of Estrogenic Compounds in Rivers of Southern Jiangsu Province, China. **IERI Procedia**. 9, 176–184.
- Zhou, X., Lian, Z., Wang, J., Tan, L., and Zhao, Z. (2011). Distribution of estrogens along Licun River in Qingdao, China. **Procedia Environmental Sciences**, 10, 1876–1880.
- Zuo, Y., Zhang, K. and Zhou, S. (2013). Determination of estrogenic steroids and microbial and photochemical degradation of 17 α -ethinylestradiol (EE2) in lake surface water, a case study. **Environmental Sciences Proceedings, Impacts**. 15, 1529–1535.





ภาคผนวก

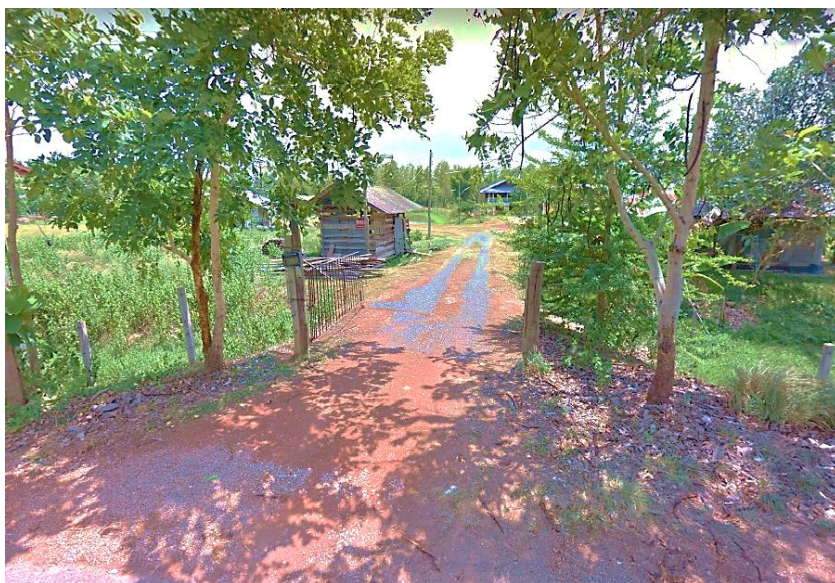
ภาคผนวก ก ฟาร์มปศุสัตว์และการเก็บตัวอย่างสิ่งแวดล้อม



ภาพ 39 ฟาร์มสุกร



ภาพ 40 การเก็บตัวอย่างสิ่งแวดล้อมฟาร์มสุกร



ภาพ 41 ฟาร์มไก่เนื้อ



ภาพ 42 ฟาร์มไก่ไข่



ภาพ 43 ฟาร์มไก่ไข่



ภาพ 44 ฟาร์มโคนม

ภาคผนวก ข เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง High Performance Liquid Chromatography; HPLC รุ่น LC-20A ยี่ห้อ Shimadzu
2. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH) รุ่น pH 700 ยี่ห้อ Eutech instruments
3. Peristaltic pump รุ่น BT100m/YZ1515x ยี่ห้อ Shenchen, China
4. เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifuge) รุ่น CENTRI-16000 ยี่ห้อ HIGH SPEED CENTRIFUGE
5. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer; UV-VIS) รุ่น T60 U ยี่ห้อ SPECTROPHOTOMETER
6. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ (Total Organic Carbon; TOC) รุ่น TOC-L CPH ยี่ห้อ Shimadzu
7. เครื่องผลิตโอโซน รุ่น OZ-A1 ยี่ห้อ Ozzon
8. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
9. Syringe Filter Nylon ขนาด 0.45 μm
10. เครื่องชั่งสาร ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น AB204-S ยี่ห้อ Mettler Toledo
11. ชุดกรองแบบสุญญากาศ
12. หลอด UV-C กำลัง 10 วัตต์ รุ่น GPH212T5L ยี่ห้อ TEpro

สารเคมีและอื่น ๆ

1. เอสโตรเจน 17β -Estradiol ความบริสุทธิ์ $\geq 98\%$ (Sigma-Aldrich)
2. เอสโตรเจน 17α -Ethinylestradiol ความบริสุทธิ์ $\geq 98\%$ (Sigma-Aldrich)
3. เอสโตรเจน 17α -Methyltestosterone ความบริสุทธิ์ $\geq 97\%$ (Sigma-Aldrich)
4. เอสโตรเจน Testosterone ความบริสุทธิ์ $\geq 98\%$ (Sigma-Aldrich)
5. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) Analytical Reagent Grade
6. สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 98% Analytical Reagent Grade
7. สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) Analytical Reagent Grade
8. สารละลายมาตรฐานโซเดียมซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) Analytical Reagent Grade
9. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 37% Analytical Reagent Grade

10. เมทานอล ชนิด HPLC Grade

11. Acetonitrile ชนิด HPLC Grade

การเตรียมสารเคมีสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์

การเตรียมสารละลายฮอร์โมน 17β -Estradiol ($\beta E2$)

1. สารละลายฮอร์โมน $\beta E2$ ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L โดยชั่งฮอร์โมน $\beta E2$ หนัก 0.5 g ละลายใน เมทานอล 500 mL

2. สารละลายฮอร์โมน $\beta E2$ ที่ความเข้มข้นเป็น 50.0 mg/L โดยปิเปตสารละลายฮอร์โมน $\beta E2$ ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L ปริมาตร 0.05 mL และ 1.3 mL แล้วปรับปริมาตรเป็น 100.0 mL ด้วยเมทานอล

การเตรียมสารละลายฮอร์โมน 17α -Ethinylestradiol (EE2)

1. สารละลายฮอร์โมน EE2 ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L โดยชั่งฮอร์โมน EE2 หนัก 0.5 g ละลายใน เมทานอล 500 mL

2. สารละลายฮอร์โมน EE2 ที่ความเข้มข้นเป็น 50.0 mg/L โดยปิเปตสารละลายฮอร์โมน EE2 ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L ปริมาตร 0.01 mL และ 0.48 mL แล้วปรับปริมาตรเป็น 100.0 mL ด้วยเมทานอล

การเตรียมสารละลายฮอร์โมน 17α -Methyltestosterone (MT)

1. ละลายฮอร์โมน MT ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L โดยชั่งฮอร์โมน MT หนัก 0.5 กรัม ละลายใน เมทานอล 500 mL

2. สารละลายฮอร์โมน MT ที่ความเข้มข้นเป็น 50.0 mg/L โดยปิเปตสารละลายฮอร์โมน MT ที่ความเข้มข้น 1,000 mg/L ปริมาตร 0.01 mL และ 0.3 mL แล้วปรับปริมาตรเป็น 100.0 mL ด้วยเมทานอล

การเตรียมสารเคมีสำหรับ วิเคราะห์ปริมาณไอโซนด้วยวิธี Wet Chemistry

Potassium Iodide Method

1. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2% ปริมาตร 800 mL ใส่ใน Suction Flask ขนาด 1.0 ลิตร จำนวน 2 ใบ ต่อกันแบบอนุกรม (Trap A, Trap B) จากนั้นทำการเติมไอโซนลงไปนในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่เตรียมไว้ เป็นเวลา 10 นาที โดยสีของสารละลายจะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีเหลืองเข้มตามระยะเวลา

2. หลังจากเติมไอโซนลงไปจนครบ 10 นาทีแล้ว นำสารละลายที่ได้มาเติม H_2SO_4 2.0 N ปริมาณ 10.0 mL

3. ทำการไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 N จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน

4. เติมน้ำแบ่ง 2-3 หยด จากนั้นทำการไตเตรทต่อ จนถึงจุดยุติคือ สารละลายใสไม่มีสี

การเตรียมสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Bioassay

การเตรียมอาหารและ Stock ยีสต์ (Agar)

สารเคมีสำหรับเตรียมอาหารมีรายการสารดังตาราง 17

ตาราง 17 สารเคมีสำหรับการเตรียมอาหารและ Stock ยีสต์ (Agar)

ลำดับ	รายการสาร จำนวนตัวอย่าง	หน่วย	ปริมาณสาร 100
1	Water	mL	10
2	Yeast Nitrogen based w/o	g	0.02
3	(NH ₄) ₂ SO ₄	g	0.05
4	5M NaOH	μL	5
5	Dropout powder 3-/5-	g	0.01
6	Glucose	g	0.2
7	Agar	g	0.15

- หมายเหตุ: 1. หลังจากเตรียมอาหารใส่ Flask แล้วนำไป Clave ใน Autoclave ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการ Clave 15 นาที
2. เมื่อ Clave เสร็จแล้วนำมาพักให้อุ่นจากนั้นนำเข้า Biohood
3. เทอาหารที่เตรียมไว้ลงใน Plate โดยใช้เทคนิคปลอดเชื้อ (Aseptic Technique)
4. รอยให้อาหารใน Plate เย็นตัวแล้วนำเชื้อจากการ Stock ยีสต์ไว้มา Cross Streak ลงบนอาหารที่เตรียมไว้
5. บ่มไว้ในตู้ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 วัน

การเตรียมอาหารสำหรับตรวจสอบฮอร์โมนเอสโตรเจน

สารเคมีสำหรับเตรียมอาหารเพื่อตรวจสอบฮอร์โมนเอสโตรเจนมีรายการดังตาราง 18

ตาราง 18 สารเคมีสำหรับการเตรียมอาหารสำหรับตรวจสอบฮอร์โมนเอสโตรเจน

ลำดับ	รายการสาร จำนวนตัวอย่าง	หน่วย	ปริมาณสาร 100
1	Water	mL	150
2	Yeast Nitrogen based w/o	g	0.255
3	(NH ₄) ₂ SO ₄	g	0.825
4	5M NaOH	μL	75
5	Dropout powder 3-/5-	g	0.12
6	Galactose	g	4

- หมายเหตุ:**
- หลังจากเตรียมสารสำหรับตรวจสอบฮอร์โมนเอสโตรเจนเรียบร้อยแล้ว นำไป Clave ใน Autoclave ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
 - เมื่อ Clave แล้วนำมาพักรอให้เย็น จากนั้นเอาเชื้อที่ Stock ไว้มาเติม และเขย่า 160 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
 - วัดค่า OD ของเชื้อที่ความยาวคลื่น 595 nm ให้ได้ประมาณ 1.0

การเตรียมอาหารสำหรับตรวจสอบฮอร์โมนแอนโดรเจน

สารเคมีสำหรับเตรียมอาหารเพื่อตรวจสอบฮอร์โมนแอนโดรเจนมีรายการดังตาราง 19

ตาราง 19 สารเคมีสำหรับการเตรียมอาหารสำหรับตรวจสอบฮอร์โมนแอนโดรเจน

ลำดับ	รายการสาร จำนวนตัวอย่าง	หน่วย	ปริมาณสาร
			100
1	Water	mL	100
2	Yeast Nitrogen based w/o	g	0.17
3	(NH ₄) ₂ SO ₄	g	0.55
4	5M NaOH	μL	50
5	Dropout powder 3-/5-	g	0.12
6	Galactose	g	2

- หมายเหตุ: 1. หลังจากเตรียมสารสำหรับตรวจสอบ MT เรียบร้อย นำไป Clave ใน Autoclave ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
2. เมื่อ Clave แล้วนำมาพักรอให้เย็น จากนั้นเอาเชื้อที่ Stock ไร่มาเติม และเขย่า 160 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
3. วัดค่า OD ของเชื้อที่ความยาวคลื่น 595 nm ให้ได้ประมาณ 1.0

ภาคผนวก ค กำล้างการผลิตโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณโอโซนโดยใช้สารละลาย KI ใส่ใน Trap A และ Trap B จำนวน Trap ละ 800 mL เต็มโอโซนที่ระดับต่าง ๆ ครั้งละ 10 นาที แล้วไตเตรทด้วย สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.05 N โดยใช้น้ำแบ่งเป็นสารอินดิเคเตอร์ ซึ่งจุดยุติของสารจะใสไม่มีสี ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังตาราง 20

ตาราง 20 ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซน

ระดับโอโซน	ปริมาณ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ไตเตรท (mL)		mg O_3 /min	mg O_3 /hr	mg O_3 /hrเฉลี่ย	
	ครั้งที่	Trap A				Trap B
1	1	24.80	1.20	3.12	187.20	205.20
	2	30.00	1.00	3.72	223.20	
2	1	31.60	1.30	3.95	236.80	246.24
	2	34.00	1.50	4.26	255.60	
3	1	37.60	2.50	4.81	288.72	273.96
	2	34.00	2.00	4.32	259.20	
4	1	45.20	1.30	5.58	334.80	312.12
	2	38.00	2.20	4.82	289.44	
5	1	45.60	1.80	5.69	341.28	323.64
	2	41.20	1.30	5.10	306.00	
6	1	49.60	1.10	6.08	365.04	341.64
	2	42.80	1.40	5.30	318.24	
7	1	58.00	1.50	7.14	428.40	412.64
	2	52.80	2.30	6.61	396.72	
8	1	67.60	2.80	8.44	506.72	487.08
	2	62.40	2.50	7.89	467.28	
9	1	66.80	2.90	8.36	501.84	508.32
	2	69.20	2.30	8.58	514.80	
10	1	71.60	4.00	9.07	544.32	523.44
	2	66.80	3.00	8.38	502.56	

ภาคผนวก ง การคำนวณค่าไฟฟ้าของกระบวนการโฟโตแคตาไลติกโอโซนเนชั่น

1. ระยะเวลาในการบำบัด 15 นาที (0.25 hr)

1.1 ค่าไฟฟ้า (เครื่องผลิตโอโซน)

$$\text{ขนาดเครื่องผลิตโอโซน} = 1 \text{ g/hr}$$

กำหนดให้เครื่องผลิตโอโซนใช้กำลังไฟฟ้า 7 kW ต่อโอโซนที่ผลิตได้ 1.0 kg

(Lenntech Water Treatment & Air Purification Holding B.V., 1998)

$$\text{ใน 1 hr ใช้กำลังไฟ} = 1,000 \text{ mg} \times \text{kg} \times 7 \text{ kW/kg} \div 10^6 \text{ mg}$$

$$= 7 \times 10^{-3} \text{ kW}$$

$$\text{ในการทดลองใช้กำลังไฟ} = 7 \times 10^{-3} \text{ kW} \times 0.25 \text{ hr} \div 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$= 1.75 \text{ kW}\cdot\text{hr/m}^3$$

$$\text{คิดเป็นค่าไฟฟ้า} = 1.75 \text{ kW}\cdot\text{hr/m}^3 \times 4.42 \text{ Baht/kW}\cdot\text{hr}$$

$$= 7.74 \text{ Baht/m}^3$$

1.2 ค่าไฟฟ้า (หลอด UV)

$$\text{หลอด UV ขนาด 10 W ใช้กำลังไฟ} = 70 \text{ mW/cm}^2 \times 1 \times 0.25 \text{ hr} \div 11.4 \text{ m}$$

$$= 1.54 \text{ kW}\cdot\text{hr/m}^3$$

$$\text{คิดเป็นค่าไฟฟ้า} = 1.75 \text{ kW}\cdot\text{hr/m}^3 \times 4.42 \text{ Baht/kW}\cdot\text{hr}$$

$$= 6.81 \text{ Baht/m}^3$$

2. ระยะเวลาในการบำบัด 30 นาที (0.5 hr)

2.1 ค่าไฟฟ้า (เครื่องผลิตโอโซน)

$$\text{ขนาดเครื่องผลิตโอโซน} = 1 \text{ g/hr}$$

กำหนดให้เครื่องผลิตโอโซนใช้กำลังไฟฟ้า 7 kW ต่อโอโซนที่ผลิตได้ 1.0 kg

(Lenntech Water Treatment & Air Purification Holding B.V., 1998)

$$\text{ใน 1 hr ใช้กำลังไฟ} = 1,000 \text{ mg} \times \text{kg} \times 7 \text{ kW/kg} \div 10^6 \text{ mg}$$

$$= 7 \times 10^{-3} \text{ kW}$$

$$\text{ในการทดลองใช้กำลังไฟ} = 7 \times 10^{-3} \text{ kW} \times 0.5 \text{ hr} \div 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$= 3.5 \text{ kW}\cdot\text{hr/m}^3$$

$$\text{คิดเป็นค่าไฟฟ้า} = 3.5 \text{ kW}\cdot\text{hr/m}^3 \times 4.42 \text{ Baht/kW}\cdot\text{hr}$$

$$= 15.47 \text{ Baht/m}^3$$

2.2 ค่าไฟฟ้า (หลอด UV)

$$\begin{aligned} \text{หลอด UV ขนาด 10 วัตต์ใช้กำลังไฟ} &= 70 \text{ mW/cm}^2 \times 1 \times 0.5 \text{ hr} \div 11.4 \text{ cm} \\ &= 3.07 \text{ kW}\cdot\text{hr/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{คิดเป็นค่าไฟฟ้า} &= 3.07 \text{ kW}\cdot\text{hr/m}^3 \times 4.42 \text{ Baht/kW}\cdot\text{hr} \\ &= 13.57 \text{ Baht/m}^3 \end{aligned}$$



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นภาพ สุทัศน์วิริยะ
วัน เดือน ปี เกิด	3 กันยายน 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดพิษณุโลก
วุฒิการศึกษา	2561 วศ.บ. (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 329/181 หมู่ที่ 4 ตำบลบ้านคลอง อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000
ผลงานตีพิมพ์	Nawaphop Sutaswiriya, Supreeda Homklin, Torpong Kreetachat, Pilanee Vaithanomsat, Nathiya Kreetachat, (2021). Monitoring estrogen and androgen residues from livestock farms in Phayao Lake, Thailand. Environ Monit Assess (2021) 193(3), 1–16.

