

การย่อยสลาย 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรนโดยการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงยูวีซีและยูวี  
ในช่วงสุญญากาศ



นางสาวพิมพ์ทิพย์ ชุณหิพิมพ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

DEGRADATION OF 17 $\alpha$ -METHYLTESTOSTERONE BY UV-C AND VACUUM UV (VUV)  
RADIATION

Miss Pimoltip Chunhapimol



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การย่อยสลาย 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรนโดยการ  
ใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงยูวีซีและยูวีในช่วงสุญญากาศ

โดย

นางสาวพิมพ์ทิพย์ ชุณหพิมล

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตศึกษานี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.เจนจิต เอี่ยมจตุรภัทร)

พิมพ์พิทย์ ชุณห์พิมพ์ล : การย่อยสลาย 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรนโดยการใช้อัลตราไวโอเล็ตในช่วงยูวีซีและยูวีในช่องสุญญากาศ. (DEGRADATION OF 17 $\alpha$ -METHYLTESTOSTERONE BY UV-C AND VACUUM UV (VUV) RADIATION) อ.ที่  
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ, 128 หน้า.

17 แอลฟา –เมทิลเทสโทสเตอโรน หรือ MT เป็นฮอร์โมนเพศชายสังเคราะห์ที่นิยมใช้ในการแปลงเพศปลานิล MT จัดเป็นสารรบกวนการทำงานของระบบต่อมไร้ท่อ หากมนุษย์และสัตว์ได้รับ MT ในปริมาณที่มากเกินไป จะส่งผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ของสัตว์ และอาจก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการสลาย MT ด้วย UV – C และ VUV ที่กำลัง 20 วัตต์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพลังงานแสงที่เกิดขึ้นจริงจากหลอด UV – C และ VUV มีค่าเท่ากับ 11 วัตต์ คิดเป็น 55% ของกำลังหลอดไฟ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MT ที่ใช้ในการศึกษาคือ 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการวัดความเข้มข้น MT ด้วยเครื่องเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) ร่วมกับเทคนิคการเพิ่มความเข้มด้วยวิธีสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็ง (SPE) จากการศึกษาพบว่า UV – C สามารถสลาย MT ได้ดีกว่า VUV โดยร้อยละการสลายด้วย UV – C นาน 15 นาที มีค่า 97.54 96.51 และ 94.84 ส่วนใน VUV มีค่าเพียง 61.24 56.48 และ 48.50 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ปฏิบัติการสลาย MT ด้วย UV – C เป็นปฏิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าคงที่ปฏิริยาอยู่ในช่วง 0.20 – 0.26 ต่อนาที ส่วนปฏิริยาการสลาย MT ด้วย VUV เป็นปฏิริยาอันดับสอง และมีค่าคงที่ปฏิริยาอยู่ในช่วง  $1.0 \times 10^{-4}$  –  $1.0 \times 10^{-3}$  ลิตรต่อไมโครกรัม นาที นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากลไกหลักที่ทำให้เกิดการสลาย MT ด้วยการเติม เทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (TBA) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการทำงานของอนุมูลไฮดรอกซิล พบว่า กลไกหลักที่ทำให้เกิดการสลาย MT ด้วย UV – C และ VUV เป็นกระบวนการโฟโตไลซิส เนื่องจากค่าคงที่ปฏิริยาการสลายไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นหากในน้ำเสียมีไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนซึ่งเป็นตัวขัดขวางการออกซิเดชัน ก็ไม่ส่งผลต่อการสลาย MT ด้วย UV – C และ VUV เช่นเดียวกับเติม เทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

# # 5470307021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: 17  $\alpha$  – METHYLTESTOSTERONE / ULTRAVIOLET RADIATION / VACUUM UV / PHOTOLYSIS / ADVANCED OXIDATION PROCESSES

PIMOLTIP CHUNHAPIMOL: DEGRADATION OF 17 $\alpha$ -METHYLTESTOSTERONE BY UV-C AND VACUUM UV (VUV) RADIATION. ADVISOR: ON-ANONG LARPPARISUDTHI, Ph.D., 128 pp.

17  $\alpha$  – Methyltestosterone of MT is a synthetic androgenic steroid hormones that is commonly used in Nile tilapia farming in order to induced the gender of all tilapia fry to be male. MT is an endocrine disruptor (EDCs) that can disturb the function of the reproductive system of human and animals. It is also a human carcinogen. In this research, degradation of MT by UV – C and VUV at the power of 20 Watt was studied. Actual light power from UV – C and VUV lamps were 11 Watt that equal 55 % of power of UV lamps. The initial concentrations were 100 500 and 1000 micrograms per liter. MT concentration was measured by using HPLC technique with solid phase extraction (SPE). It was found that UV- C was more effective than VUV. Percentage of MT reduction by UV – C were 97.54 96.51 and 94.84 while percentage of MT degradation by VUV were 61.24 56.48 and 48.50 at initial concentration 100 500 and 1000 micrograms per liter respectively. The degradation rate constant of UV – C and VUV were first order and second order reaction respectively. Range of the degradation rate constants were 0.20 – 0.26 per minutes for UV – C and  $1.0 \times 10^{-4}$  –  $1.0 \times 10^{-3}$  liter per micrograms minutes for VUV. The degradation rate constant decreased with the increase of the initial concentration. Main mechanism of MT degradation by UV – C and VUV were direct photolysis that they were studied by adding Tert – butyl alcohol (TBA). So, bicarbonate ion and carbonate ion in wastewater did not affect on MT degradation by UV – C and VUV because they were hydroxyl radical scavengers.

Department: Environmental  
Engineering

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Field of Study: Environmental  
Engineering

Academic Year: 2013

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้ ถ้าขาดความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่านๆ ผู้วิจัยจึงกราบขอบพระคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

อาจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิจัยซึ่งมีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงรองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตะวัน ลิ้มปิยากร และ อาจารย์ ดร. เจนจิต เอี่ยมจตุรภัทร ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบ และให้คำแนะนำ ดีชม เพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์เป็นไปในทางที่ดีขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้ความรู้และอบรมสั่งสอนตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาอยู่

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา ที่สนับสนุนงบประมาณภายใต้โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (FW1017A) รวมทั้งบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณรามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำเทคนิคในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจในระหว่างดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ต้องกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยมาโดยตลอด

CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ฮอริโมน.....	4
2.1.1 การจัดกลุ่มฮอริโมน.....	4
2.2 ชนิดของสเตียรอยด์ฮอริโมนที่ใช้ในการแปลงเพศปลานิล.....	7
2.3 ฮอริโมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (17 $\alpha$ – Methyltestosterone, MT).....	8
2.4 ความเป็นพิษของ MT ตามเอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS).....	10
2.5 การแพร่กระจายของ MT สู่สิ่งแวดล้อม.....	10
2.6 ผลกระทบของ MT ต่อระบบนิเวศ.....	11
2.6.1 ผลกระทบของ MT ต่อมนุษย์.....	11
2.6.2 ผลกระทบของ MT ต่อสิ่งมีชีวิต.....	11
2.7 รังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	13
2.7.1 ชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	13
2.7.2 แหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	14
2.7.3 ผลกระทบจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	15
2.8 กระบวนการโฟโตไลซิส (Photolysis).....	16
2.9 แอคติโนเมทรีทางเคมี (Chemical Actinometry).....	17

2.10 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation).....	18
2.11 ตัวขัดขวางอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical Scavenger).....	21
2.12 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ .....	22
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.13.1 การสลายฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน.....	23
2.13.2 การใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงโดยแสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงสุญญากาศ .....	24
2.13.3 การทดสอบการทำงานของอนุมูลไฮดรอกซิล.....	26
2.13.4 ผลกระทบจากไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตไอออน .....	26
2.13.5 การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในการสลายสเตียรอยด์ฮอร์โมน .....	27
2.14 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	35
3.1 แผนการทดลอง.....	35
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	35
3.3 สารเคมีและอื่นๆ .....	36
3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา .....	37
3.5 การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน.....	37
3.6 การศึกษาความเข้มแสงจริงของหลอด UV – C และ VUV.....	38
3.7 การดำเนินงานวิจัยในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท่โดยใช้ UV–C และ VUV.....	39
3.8 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับ.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	47
4.1 การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน และการควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ .....	47
4.2 ผลการวัดความเข้มแสงจริงของหลอด UV – C และ VUV.....	48
4.2.1 ผลการวัดความเข้มแสงของหลอด UV – C.....	48
4.2.2 ผลการวัดความเข้มแสงของหลอด VUV .....	48
4.3 ผลการทดลองในชุดควบคุม (ไม่มีการฉายแสง).....	49
4.4 ประสิทธิภาพและค่าทางจลนพลศาสตร์ของการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน..	49



4.4.1 ผลการทดลองด้วยหลอด UV - C .....	49
4.4.2 ผลการทดลองด้วยหลอด VUV .....	53
4.4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าทางจลพลศาสตร์ในการการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV – C และ VUV .....	57
4.5 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับ.....	59
4.6 กลไกหลักของการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV – C และ VUV.....	60
4.6.1 กลไกหลักที่เกิดใน UV – C.....	60
4.6.2 กลไกหลักที่เกิดใน VUV.....	62
4.7 ผลการศึกษาผลกระทบของไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนที่มีต่อการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV – C และ VUV.....	64
4.7.1 ผลการศึกษาผลกระทบของไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนที่มีต่อการ สลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV – C.....	65
4.7.2 ผลการศึกษาผลกระทบของไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนที่มีต่อการ สลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย VUV.....	66
4.8 วิจารณ์ผลการทดลอง .....	67
4.9 การนำไปประยุกต์ใช้.....	70
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	74
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง .....	77
ภาคผนวก ก.....	84
ภาคผนวก ข.....	86
ภาคผนวก ค.....	89
ภาคผนวก ง .....	101
ภาคผนวก จ.....	108
ภาคผนวก ฉ.....	113
ภาคผนวก ช.....	122
ภาคผนวก ซ.....	124

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 128



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2 - 1 ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างของฮอร์โมนแต่ละกลุ่มโดยใช้คุณสมบัติทางเคมี.....	5
ตารางที่ 2 - 2 ตารางเปรียบเทียบฮอร์โมนตามตำแหน่งการออกฤทธิ์ .....	7
ตารางที่ 2 - 3 สมบัติฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน.....	9
ตารางที่ 2 - 4 ชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ตตามมาตรฐาน ISO 21348.....	13
ตารางที่ 2 - 5 ก๊าซที่เติมในหลอดเอ็กซ์ไซเมอร์และความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมา (Parsons, 2004)15	15
ตารางที่ 2 - 6 ตารางสรุปการใช้กระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในการสลายฮอร์โมนสเตียรอยด์.....	31
ตารางที่ 3 - 1 พารามิเตอร์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา.....	37
ตารางที่ 3 - 2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาโดยใช้ UV – C และ VUV .....	39
ตารางที่ 3 - 3 ตารางสรุปจำนวนการทดลองและจำนวนการวิเคราะห์ในชุดควบคุม .....	44
ตารางที่ 3 - 4 ตารางสรุปจำนวนการทดลองและจำนวนการวิเคราะห์โดยใช้ UV-C.....	45
ตารางที่ 3 - 5 ตารางสรุปจำนวนการทดลองและจำนวนการวิเคราะห์โดยใช้ VUV.....	45
ตารางที่ 4 - 1 การเปรียบเทียบค่าคงที่เฉลี่ยของการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน.....	58
ตารางที่ 4 - 2 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ.....	58

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2 - 1 กลไกการสลายสารอินทรีย์ด้วย UV – C.....	17
ภาพที่ 2 - 2 กลไกการสลายสารอินทรีย์ด้วย VUV .....	20
ภาพที่ 2 - 3 ระบบไอออนไบคาร์บอเนตและไอออนคาร์บอเนตในน้ำ .....	21
ภาพที่ 3 - 1 ขั้นตอนการศึกษาในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท .....	35
ภาพที่ 3 - 2 ลักษณะถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท.....	40
ภาพที่ 4 - 1 กราฟมาตรฐานของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน.....	46
ภาพที่ 4 - 2 ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเมื่อเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ในการทดลองชุดควบคุม.....	48
ภาพที่ 4 - 3 ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเมื่อเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆในการทดลองด้วย UV – C .....	49
ภาพที่ 4 - 4 ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆในการทดลองด้วย UV – C .....	49
ภาพที่ 4 - 5 กราฟ ln R เทียบกับ ln C เพื่อหาอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรในชุดการทดลองด้วย ...	50
ภาพที่ 4 - 6 กราฟ - ln (C / C <sub>0</sub> ) เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV – C ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร 51	
ภาพที่ 4 - 7 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (k) เทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ในการทดลองด้วย UV - C .....	51
ภาพที่ 4 - 8 ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเมื่อเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆในการทดลองด้วย VUV .....	53
ภาพที่ 4 - 9 ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆในการทดลองด้วย UV – C.....	53
ภาพที่ 4 - 10 กราฟ ln R เทียบกับ ln C เพื่อหาอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรในชุดการทดลองด้วย ...	54
ภาพที่ 4 - 11 กราฟ 1/C เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร .....	55
ภาพที่ 4 - 12 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ในการทดลองด้วย VUV .....	55



ภาพที่ 4 - 27 กราฟ 1 / C เทียบกับเวลา ในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย VUV ในเวลา 30 นาที.....	67
ภาพที่ 4 - 28 การออกแบบระบบบำบัดถึงปฏิกรณ์ที่ติดตั้งหลอด UV – C.....	71
ภาพที่ 4 - 29 ตัวอย่างแบบถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งหลอด VUV.....	72



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในธุรกิจการเลี้ยงปลานิล ต้องการสร้างกำไรให้แก่ธุรกิจ จึงมีการเริ่มศึกษาค้นคว้าการใช้ฮอร์โมนในการแปลงเพศปลานิล เริ่มตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 1960 โดยใช้ฮอร์โมนเพศสังเคราะห์ทั้งฮอร์โมนเพศชายและฮอร์โมนเพศหญิงเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปลงเพศ จากการศึกษาของ Smith และคณะ (1997) และ Hossain และคณะ (2005) อ้างอิงใน Macintosh (2008) พบว่าการใช้ฮอร์โมนเพศชายสังเคราะห์แปลงเพศปลานิลจะทำให้ปลานิลมีขนาดตัวที่ใหญ่กว่าการใช้ฮอร์โมนเพศหญิง และขนาดตัวปลาที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ฟาร์มเลี้ยงปลานิลจึงนิยมใช้ฮอร์โมนเพศชายสังเคราะห์ในการแปลงเพศปลานิล ซึ่งฮอร์โมนที่นิยมใช้คือ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (17 $\alpha$  - Methyltestosterone, MT) โดยผสม MT ลงในอาหารที่ใช้เลี้ยงลูกปลา ในอัตราส่วน 60 มิลลิกรัมต่ออาหารปลา 1 กิโลกรัม ให้อาหารปลาที่มีการผสม MT เป็นเวลา 21 วัน หลังจากลูกปลานิลเกิดได้ 2 สัปดาห์ ซึ่งการให้อาหารจะให้ในปริมาณที่มากเกินไป เพื่อให้ปลา มีอาหารเพียงพอและเติบโตใกล้เคียงกัน ทำให้อาหารส่วนที่ปลากินไม่หมดตกค้างอยู่ในบ่อเพาะเลี้ยง ปลานิลถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อมีการทำความสะอาดบ่อ ซึ่ง MT ได้ถูกสงสัยว่าเป็นสารก่อมะเร็ง ชนิดที่ไม่มีการแบ่งตัวทำลายเซลล์ใกล้เคียง (nonmalignant tumors) ในตับ (Soe และคณะ, 1992) และได้ถูกจัดเป็นสารรบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อ (Endocrine Disrupting Compound) โดยรบกวนโปรตีนไวเทลโลจีนิน (Vitellogenin) ซึ่งเป็นโปรตีนตั้งต้นในไข่แดงของปลาตุ๊ก (eelpout, Zoareesviviparous) ทำให้ลักษณะความเป็นเพศเมียลดลง เมื่อปลาตุ๊กได้รับ MT ในปริมาณ 10 – 500 นาโนกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 10 วัน (Korsgaard, 2006 ) และจากงานวิจัยของ Kang และคณะ (2008) พบว่า MT ส่งผลให้การปฏิสนธิและการวางไข่ของปลาชิว (medaka fish) ลดลง เมื่อปลาชิวได้รับ MT ในปริมาณ 46 นาโนกรัมต่อลิตร และจากงานวิจัยของ Selzsam และคณะ (2005) พบว่า MT มีผลต่อการวางไข่ของนกกระทาสายพันธุ์ญี่ปุ่น (Japanese quails) เมื่อนกกระทาได้รับ MT ในปริมาณ 50 – 110 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 3 สัปดาห์

จากงานวิจัยของ Fitzpatrick และ Sánchez (2000) ได้รายงานปริมาณ MT ที่หลงเหลือในน้ำในบ่ออนุบาลปลานิลหลังจากการแปลงเพศปลานิล โดย MT มีความเข้มข้น 36 ไมโครกรัมต่อลิตร และจะลดลงเรื่อยๆจนไม่สามารถวัดได้ (ความเข้มข้นน้อยกว่า 0.02 ไมโครกรัมต่อลิตร) ในเวลา 1 สัปดาห์ มีงานวิจัยหลายงานที่ได้ทำการศึกษารลด MT ด้วยวิธีต่างๆ เช่น การใช้วิธีทางชีววิทยา โดยการใช้แบคทีเรียในการช่วยย่อย MT (Homklin และคณะ, 2010) การใช้ตัวดูดซับร่วมกับเทคนิคเพนต์ัน (Hu และคณะ, 2011) และการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Budavari และคณะ, 1989) โดยใช้รังสี UV-A UV-B และ UV-C ในการสลาย MT ซึ่งจากการศึกษาพบว่า UV-C มีประสิทธิภาพในการสลาย MT มากที่สุด แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาถึงรายละเอียดของกลไกในการสลายตัว

กระบวนการการแตกตัวด้วยแสง (Photolysis) เป็นกระบวนการสลายสารปนเปื้อน เมื่อสารปนเปื้อนมีการดูดซับพลังงานจากแสงอัลตราไวโอเล็ต สารปนเปื้อนถูกเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น

ซึ่งถ้าสารปนเปื้อนได้รับพลังงานที่เพียงพอก็จะเกิดการสลายตัว สารปนเปื้อนบางชนิดเป็นตัวที่สามารถดูดซับแสงได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งแสดงว่ากระบวนการหลักในการสลายที่เกิดขึ้นคือกระบวนการแตกตัวด้วยแสง แต่สารบางชนิดต้องอาศัยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Process; AOP) ร่วมด้วย (Parsons, 2004) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเป็นกระบวนการสลายสารปนเปื้อนโดยต้องอาศัยการสร้างอนุมูลอิสระซึ่งมีความสามารถในการออกซิเดชันได้ดี โดยเฉพาะอนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งมีอำนาจในการออกซิไดซ์สารปนเปื้อนได้สูงโดยค่าความเป็นด่างในน้ำจะส่งผลต่อกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงโดยไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนจะเป็นตัวขัดขวางการออกซิไดซ์ของอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการสลายสารปนเปื้อนลดลง (Klavarioti และคณะ, 2009)

ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการสลาย MT ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น UV-C และ VUV โดยในปัจจุบันได้มีหลายงานวิจัยสนใจนำ VUV มาใช้ในการสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติมากขึ้น เนื่องจากการศึกษาพบว่า VUV ทำให้การสลายตัวของสารอินทรีย์ธรรมชาติลดลงได้มากกว่าการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่นอื่นๆ (Imoberdorf, 2011) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจใช้ VUV ในการสลาย MT และมีการศึกษาถึงค่าทางจลนพลศาสตร์ของการสลาย MT เพื่อดูอัตราการสลายตัวของสาร MT โดยได้ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทเพื่อศึกษาผลของการลดลงของ MT นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลกระทบของไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนที่มีผลต่อการสลาย MT เนื่องจากในน้ำธรรมชาติจะมีไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนอยู่ซึ่งเป็นไอออนที่มีผลต่อสารสลายตัวของสารดังที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยจากงานวิจัย Wu และ Linden (2010) พบว่าไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตไอออนส่งผลให้การสลายตัวของยาปราบศัตรูพืชลดลง เนื่องจากมีการเกิดอนุมูลคาร์บอเนตเกิดขึ้นซึ่งจะไปขัดขวางการทำงานของอนุมูลไฮดรอกซิลทำให้การออกซิเดชันของสารลดลง โดยในน้ำธรรมชาติจะเกิดอนุมูลคาร์บอเนตอยู่ในช่วง  $10^{-13}$  –  $10^{-15}$  โมลาร์ซึ่งมีมากกว่าอนุมูลไฮดรอกซิล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงยูวีซีและยูวีในช่วงสุญญากาศ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาถึงกลไกที่เกิดขึ้นในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของคาร์บอเนตที่มีผลการการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต



### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขต ดังนี้

- 1.3.1 น้ำที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียสังเคราะห์โดยเตรียมจาก 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน โดยเตรียมที่ความเข้มข้น 100 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร และทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท ทรงสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร
- 1.3.2 ศึกษากำลังของหลอดยูวีซีและหลอดยูวีดีด้วยวิธีแอกทิโนมิเตอร์ทางเคมี
- 1.3.3 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาได้แก่ ค่าความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ลดลง และผลกระทบของคาร์บอนที่มีต่อการลดลงของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ความเข้มข้น 0.5 5.0 และ 50.0 มิลลิโมลาร์
- 1.3.4 ศึกษาอัตราการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเทียบกับความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ลดลง
- 1.3.5 ศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน โดยการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์
- 1.3.6 ศึกษาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับการเกิดปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบกำลังของแสงที่เกิดขึ้นจริงในถังปฏิกรณ์
- 1.4.2 ทราบถึงกลไกหลักที่เกิดขึ้นจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน
- 1.4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เวลาที่เหมาะสมในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในช่วง UV – C และ VUV
- 1.4.4 ทราบถึงผลกระทบของอนุมูลคาร์บอนที่เกิดขึ้นในระหว่างการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV – C และ VUV
- 1.4.5 ทราบถึงอัตราการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนซึ่งสามารถนำไปใช้ทำนายการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนต่อไปได้
- 1.4.6 ทราบพลังงานที่ใช้ต่ออันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนซึ่งสามารถนำไปคำนวณค่าไฟที่จะใช้ในการบำบัดได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ฮอร์โมน

คำว่าฮอร์โมน มาจากภาษากรีก คือ hormao สามารถแปลเป็นภาษาอังกฤษได้ว่า to stir up, awake, หรือ excite ซึ่งในภาษาไทยแปลว่า ก่อวณ ตื่น หรือกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลง คำนี้ได้ถูกใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1905 จากการบรรยายพิเศษของศาสตราจารย์สตาร์ลิงที่ Royal College ในเรื่อง The Chemical Correlation of the Function of the Body มีทฤษฎีที่ให้ ความหมายคำว่า ฮอร์โมนไว้ว่า เป็นสารเคมีที่สร้าง และหลังจากส่วนหนึ่งของร่างกายที่เป็นต่อมไร้ท่อ เข้าสู่กระแสเลือดในปริมาณเพียงเล็กน้อย กระแสเลือดจะนำพาข่าวสารจากสารเคมีนี้ไปออกฤทธิ์ที่ อวัยวะเป้าหมาย (target organs) ที่อาจตั้งอยู่ในบริเวณนั้นหรืออาจอยู่ห่างไกลออกไป สารเคมี ดังกล่าวนี้อาจควบคุมการทำงานของร่างกาย ผ่านกระบวนการสร้างและสลาย (metabolism) ด้วย ปฏิกิริยาชีวเคมี ทำให้เกิดการเจริญ การสืบพันธุ์ และการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะเครียด

##### 2.1.1 การจัดกลุ่มฮอร์โมน (สุนนา, 2543 และ เพ็ญพรรณ, 2553)

นิยมจัดกลุ่มตามลักษณะโครงสร้าง ตำแหน่งการออกฤทธิ์ และคุณสมบัติในการ ละลายของฮอร์โมน

2.1.1.1 การจัดกลุ่มตามลักษณะโครงสร้าง สามารถจัดกลุ่มตามสูตรโครงสร้างทาง ชีวเคมีโดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ เปปไทด์ฮอร์โมนหรือโปรตีนฮอร์โมน (peptide hormones) สเตียรอยด์ฮอร์โมน (steroid hormones) และเอมีนฮอร์โมน (amine hormones) โดยแต่ละกลุ่มจะมีโครงสร้างและหน้าที่ที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2 - 1

2.1.1.2 การจัดกลุ่มตามตำแหน่งการออกฤทธิ์ สามารถแบ่งได้ตามตารางที่ 2 - 2

ตารางที่ 2 - 1 ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างของฮอร์โมนแต่ละกลุ่มโดยใช้คุณสมบัติทางเคมี

หน้าที่	เปปไทด์ ฮอร์โมน	เอมีน		สเตียรอยด์ ฮอร์โมน
		แคเทอโคลามีน	ไทรอยด์ ฮอร์โมน	
1. โครงสร้าง	ห่วงโซ่ของกรดแอมิโนจำเพาะเรียงต่อกัน เช่น วาโซเพรสซิน	มีสารตั้งต้นกำเนิดคือ ไทโรซิน เช่น เอพิเนพรีน	มีสารตั้งต้นกำเนิดคือ ไอโดติเนต ไทโรซิน เช่น ไทรอกซิน	มีสารตั้งต้นกำเนิดคือคอเลสเทอรอล เช่น คอร์ทีซอล
2. ความสามารถในการละลายน้ำ	ละลายในน้ำ (hydrophilic)	ละลายในน้ำ (hydrophilic)	ละลายในไขมัน (lipophilic)	ละลายในไขมัน (lipophilic)
3. การสังเคราะห์	สังเคราะห์ในเอนโดพลาสมิกเรติคูลัมและบรรจุในกอลจิคอมเพลก	สังเคราะห์ในไซโทซอล (cytosol) ร่วมกับเอนไซม์หลายชนิด	สังเคราะห์ในสารแขวนลอยภายนอกเซลล์ร่วมกับเอนไซม์	สังเคราะห์ภายในเซลล์ใช้คอเลสเทอรอลเป็นโมเลกุลตั้งต้นกำเนิดประยุกต์โครงสร้างด้วยเอนไซม์ชนิดต่างๆ
4. การเก็บรักษา	ปริมาณมากในปุ่มคัดหลัง (granules)	ในปุ่มคัดหลังโครมาฟิน (chromaffin granules)	ในสารแขวนลอย (colloid)	ไม่มีการเก็บ แต่คอเลสเทอรอลที่ใช้เริ่มต้นจะเก็บในรูปเม็ดไขมัน (lipid droplet)
5. การหลั่ง	Exocytosis of granules	Exocytosis granules	Endocytosis ของสารแขวนลอย	แพร่กระจาย (diffusion)
6. การขนส่งในกระแสเลือด	ฮอร์โมนอิสระ	ครึ่งหนึ่งร่วมกับโปรตีนในน้ำเลือด	ส่วนมากเกาะกับโปรตีนในน้ำเลือด	ส่วนมากเกาะกับโปรตีนในน้ำเลือด

ตารางที่ 2 - 1 ตารางเปรียบเทียบความแตกต่างของฮอร์โมนแต่ละกลุ่มโดยใช้คุณสมบัติทางเคมี (ต่อ)

หน้าที่	เปปไทด์ ฮอร์โมน	เอมีน		สเตียรอยด์ ฮอร์โมน
		แคเทอโคลามีน	ไทรอยด์ ฮอร์โมน	
7. ที่อยู่ของ ตัวรับฮอร์โมน	พื้นผิวของเซลล์ เป้าหมาย	พื้นผิวของเซลล์ เป้าหมาย	ภายในเซลล์ เป้าหมายหรือ นิวเคลียส	ภายในเซลล์ เป้าหมายหรือ นิวเคลียส
8. กลไกการ ออกฤทธิ์	ผ่าน cAMP	ผ่าน cAMP	ผ่าน mRNA เฉพาะ	ผ่าน mRNA เฉพาะ
9. ต่อม/อวัยวะ ที่หลั่งฮอร์โมน	ไฮโปธาลามัส ต่อมใต้สมอง ตับอ่อน ต่อมไทรอยด์ ต่อพาราไทรอยด์ กระเพาะอาหาร ตับ ไต หัวใจ	เฉพาะที่ต่อม หมวกไตส่วนเมดู ลา	เฉพาะที่ต่อม ไทรอยด์	ต่อมหมวกไตส่วน คอร์เทกซ์ อวัยวะเพศ ไต รก
10. ระยะเวลา ชีวิต	สั้น(นาที) เช่น อินซูลิน 7 นาที LH 15 – 45 นาที FSH 180 นาที	สั้นมาก (วินาที นาที) เช่น epinephrine 10 วินาที	นานมาก (ชั่วโมง วัน) เช่น $T_3 = 18$ ชั่วโมง $T_4 = 6.7$ วัน	นาน (ชั่วโมง) เช่น aldosterone 0.5 ชั่วโมง cortisol 1.5 – 1.7 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 - 2 ตารางเปรียบเทียบฮอร์โมนตามตำแหน่งการออกฤทธิ์

กลุ่มฮอร์โมน	ตำแหน่งการออกฤทธิ์	หน้าที่	ตัวอย่างฮอร์โมน
รีลีสซิงแอนด์อินฮิบิติงฮอร์โมน (releasing and inhibiting hormones)	สมองส่วนไฮโป-ธาลามัส	ควบคุมการทำงานของต่อมใต้สมองส่วนหน้า ให้สร้างหรือยับยั้งการสร้างของฮอร์โมนจำเพาะของต่อมหรืออวัยวะเป้าหมาย	- ไทโรโทรปินรีลีสซิงฮอร์โมน (TRH) - ฮอร์โมนโซมาโทสตติน
โทรฟิกฮอร์โมน (trophic hormones)	ต่อมใต้สมองส่วนหน้า	ควบคุมการทำงานของต่อมไร้ท่อต่างๆ	ฮอร์โมนอดิโนคอร์ทิโคโทรฟิก (ACTH)
ฮอร์โมนที่ออกฤทธิ์โดยตรงต่ออวัยวะหรือเซลล์เป้าหมาย	เซลล์เป้าหมาย	ควบคุมการทำงานโดยตรงต่อเซลล์เป้าหมาย	- โกรทฮอร์โมน (growth hormones)

2.1.1.3 การจัดกลุ่มฮอร์โมนตามคุณสมบัติการละลาย สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มดังนี้

2.1.1.3.1 ฮอร์โมนที่ละลายน้ำได้ดี (hydrophilic hormones) เป็นกลุ่มฮอร์โมนที่ละลายน้ำได้ดีแต่ไม่ละลายในไขมัน จึงไม่สามารถแพร่ผ่านเซลล์ที่ประกอบด้วยไขมันเป็นจำนวนมาก ในการออกฤทธิ์ของฮอร์โมนในกลุ่มนี้ จะจับกับตัวรับสัญญาณที่ผิวเยื่อหุ้มเซลล์ ก่อนที่จะส่งสัญญาณเข้าไปในเซลล์ ฮอร์โมนในกลุ่มนี้ ส่วนมากเป็นฮอร์โมนในกลุ่มเปปไทด์ฮอร์โมน (peptide hormones) แคเทอโคลามีน (catecholamine) และเอพิเนฟริน (epinephrine) เป็นต้น

2.1.1.3.2 ฮอร์โมนที่ละลายในไขมัน (lipophilic hormones) เป็นฮอร์โมนที่ไม่ละลายในน้ำ แต่จะละลายในไขมันได้ดี ทำให้สามารถซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปจับกับตัวรับส่งสัญญาณที่อยู่ภายในเซลล์ได้ ฮอร์โมนในกลุ่มนี้ส่วนมากเป็นฮอร์โมนในกลุ่มสเตียรอยด์ เช่น เอสโตรเจน (estrogen) โพรเจสเตอโรน (progesterone) และเทสโทสเตอโรน (testosterone) เป็นต้น

## 2.2 ชนิดของสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่ใช้ในการแปลงเพศปลาณิส

ฮอร์โมนเพศ (sex steroids) มีแหล่งผลิตที่สำคัญ คือ อวัยวะเพศ และต่อมหมวกไต โดยมีการแบ่งฮอร์โมนเพศออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่

2.2.1 ฮอร์โมนเพศหญิง (estrogen) ธรรมชาติจะสร้างจากรังไข่ ได้แก่ เอสโตรไดอล (estradiol; E<sub>2</sub>) เอสโตรน (estrone; E<sub>1</sub>) และเอสไทรออล (estriol; E<sub>3</sub>) เอสโตรเจนธรรมชาติอยู่ในร่างกายได้ไม่นาน เพราะจะถูกย่อยสลายที่ตับ จึงต้องมีการผลิตเอสโตรเจนสังเคราะห์ (synthetic estrogens) ขึ้น โดยสามารถแบ่งเอสโตรเจนสังเคราะห์เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

2.2.1.1 เอสโตรเจนสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างสเตียรอยด์ (steroid oestrogens) เช่น เอทินิล – เอสโตรไดออล (ethinyl estradiol) เมสทรานอล (mestranol) เป็นต้น

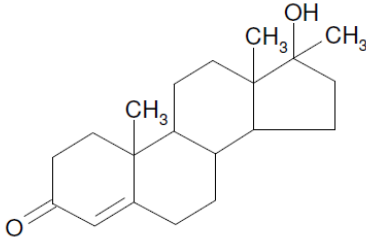
2.2.1.2 เอสโตรเจนสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างไม่เป็นสเตียรอยด์ (nonsteroidal compound) ซึ่งสารเหล่านี้มีฤทธิ์ของเอสโตรเจน เช่น ไดเอทิลstilbestrol หรือ ดีอีเอส (diethylstilbestrol; DES) ไดแอนเอสทรอล (dienestrol) เมทาลีนเอสทริล (methalenestril) และคลอโรไตรแอนิซีน (chlorotrianisene) เป็นต้น

2.2.2 ฮอริโมนเพศชาย (androgen) ฮอริโมนธรรมชาติ ได้แก่ เทสโทสเตอโรน (testosterone) ซึ่งมีแหล่งผลิตจากอวัยวะเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังสามารถผลิตได้จากต่อมหมวกไตและรังไข่ ฮอริโมนเหล่านี้ถูกย่อยสลายง่ายที่ตับ จึงต้องมีการสังเคราะห์เทสโทสเตอโรนขึ้นเพื่อลดอัตราการถูกทำลายที่ตับลง ทำให้ฮอริโมนคงตัวอยู่ได้นาน ตัวอย่างฮอริโมนสังเคราะห์ที่ใช้ในการแปลงเพศปลา ได้แก่ เมทิลเทสโทสเตอโรน (methyltestosterone) แอนโดรสเทอโรน (androsterone) เอทินิลเทสโทสเตอโรน (ethinyltestosterone) เป็นต้น

### 2.3 ฮอริโมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (17 $\alpha$ – Methyltestosterone, MT)

เป็นฮอริโมนเพศชายสังเคราะห์ ซึ่งนิยมนำมาใช้ในการแปลงเพศปลาชนิดนี้ จะมีลักษณะเป็นผลึกสีขาวหรือสีครีม มีการขายในรูปผงหรือเม็ด ซึ่งเป็นที่รู้จักในชื่อ 17 เบต้า – ไฮดรอกซี - 17 แอลฟา – เมทิล - 4 – แอนโดรสเทน - 3 - วน (17 beta 3 – Hydroxy – 17 alpha – methyl – 4 – androsten – 3 – one) และมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2 – 3

ตารางที่ 2 - 3 สมบัติฮอร์โมน 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน

คุณสมบัติ	17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน
โครงสร้าง	
สูตรโมเลกุล	C <sub>20</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>
น้ำหนักโมเลกุล	302.45
เลขทะเบียน ซีไอเอส	58 - 18 - 4
สี/รูปร่าง	มีลักษณะเป็นผงผลึกสีขาวหรือสีครีม
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
จุดหลอมเหลว	162-168 องศาเซลเซียส
การละลาย	ละลายในเมทานอล เอทานอล อีเทอร์และตัวทำละลายอินทรีย์อื่น ๆ
การละลายน้ำ	3.39 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส
ค่าคงที่ของเฮนรี	$4.7 \times 10^{-9}$ (บรรยากาศ-ลูกบาศก์เมตร)/โมล ที่ 25 องศาเซลเซียส
ค่าความดันไอ	$1.85 \times 10^{-8}$ มิลลิเมตรปรอท ที่ 25 องศาเซลเซียส
ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารในชั้นออกทานอลต่อชั้นน้ำ (log K <sub>ow</sub> )	3.36
อัตราค่าคงที่ปฏิกิริยาไฮดรอกซี	$1.0 \times 10^{-10}$ ลูกบาศก์เซนติเมตร/(โมล-วินาที) ที่ 25 องศาเซลเซียส
อัตราค่าคงที่ปฏิกิริยาโอโซน	$1.1 \times 10^{-17}$ ลูกบาศก์เซนติเมตร/(โมล-วินาที) ที่ 25 องศาเซลเซียส

ที่มา: Lewis และคณะ (1997) อ้างอิงใน ปวีตรา โชติสุกานต์ (2551), SRC PhysProp Database  
อ้างอิงใน Hüffer (2009)

## 2.4 ความเป็นพิษของ MT ตามเอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS) (Hawkins Chemical, 2007)

### ผลกระทบเฉียบพลัน

เป็นอันตรายถ้ากลืน หายใจ หรือดูดซับทางผิวหนัง อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการระคายเคือง

### ผลกระทบเรื้อรัง

เมื่อได้รับในเวลาที่ยาวนานเกินไป อาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติในระบบสืบพันธุ์ โดยผลการทดลองในสัตว์ทดลอง อวัยวะเป้าหมาย คือ ตับ ซึ่งผลเป็นดังนี้

LD<sub>50</sub> (oral – rat) : 2,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

LD<sub>50</sub> (ipr – rat) : 1,050 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

LD<sub>50</sub> (scu – rat) : 5 กรัมต่อกิโลกรัม

LD<sub>50</sub> (oral – mouse) : 1,860 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

LD<sub>50</sub> (ipr – mouse) : 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

LD<sub>50</sub> (scu – mouse) : มากกว่า 5 กรัมต่อกิโลกรัม

## 2.5 การแพร่กระจายของ MT สู่สิ่งแวดล้อม

MT เป็นฮอร์โมนเพศชายสังเคราะห์ที่มีความใกล้เคียงกับฮอร์โมนธรรมชาติ ใช้กันอย่างแพร่หลายในทางการแพทย์ เช่น เป็นอาหารเสริมสำหรับรักษาเพศชายที่มีฮอร์โมนเพศบกพร่อง ใช้รักษามะเร็งเต้านมหรือรักษาอาการของวัยหมดประจำเดือนในเพศหญิง (Bhasin และคณะ, 1998 อ้างอิงใน ธงชัย, 2555) นอกจากนี้ยังใช้ในการเกษตรโดยใช้ผสมในอาหารให้แก่ศัตรู เพื่อเร่งการเจริญเติบโต ซึ่งมีการตรวจพบฮอร์โมนในเนื้อและผลิตภัณฑ์จากนม (Velle, 1992 อ้างอิงใน ธงชัย, 2555) และนิยมใช้ในการแปลงเพศปลาโดยผสม MT ลงในอาหารปลา ซึ่งในงานวิจัยของ Fitzpatric และ Sánchez (2000) ได้ตรวจพบปริมาณ MT ที่หลงเหลือในบ่ออนุบาลปลานิลมีความเข้มข้นที่ 36 ไมโครกรัมต่อลิตรและลดลงจนไม่สามารถวัดตรวจวัดได้เมื่อเวลาผ่านไป 1 สัปดาห์หลังจากวันสุดท้ายที่มีการให้อาหารที่มีการผสม MT แก่ลูกปลานิล และจากสมบัติของ MT ที่มีความสามารถละลายในน้ำได้น้อย จึงมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับในดินได้สูงกว่า โดยบ่ออนุบาลปลานิลในบางประเทศจะเป็นบ่อดิน เมื่อมีการแปลงเพศปลาเสร็จแล้วก็ต้องมีการทำความสะอาดบ่อ โดยมีการขุดลอกดินตะกอนในบ่อออกมาใช้ในการเกษตร ซึ่งมีความเสี่ยงที่จะเกิดการกระจายของ MT ในเนื้อเยื่อของสัตว์ที่อาศัยบนบกได้

ในงานวิจัยของธงชัย และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาระดับ MT ที่ตกค้างในการผลิตลูกปลานิลแปลงเพศระบบน้ำหมุนเวียน 3 รอบการผลิต และมีชุดทดลอง 3 ชุด ได้แก่ 1. ไม่มีการใช้ MT และไม่มีการใช้ระบบน้ำหมุนเวียน 2. ไม่มีการใช้ MT แต่ใช้ระบบน้ำหมุนเวียน และ 3. มีการใช้ MT ในปริมาณ 40 มิลลิกรัม MT ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม และใช้ระบบน้ำหมุนเวียน แล้วทำการวัดปริมาณ MT ที่ตกค้างในน้ำ ตั้งแต่เริ่มแปลงเพศจนถึงหลังการแปลงเพศ 48 ชั่วโมงด้วยวิธี ECLIA (Electrochemiluminescence)



พบว่าปริมาณ MT มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในรอบที่ 3 และทั้ง 3 ชุดการทดลองจะพบปริมาณ MT ใกล้เคียงกัน โดยเมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมงหลังการแปลงเพศในวันที่ 21 ได้ตรวจพบปริมาณ MT ประมาณ 0.07 0.09 และ 0.02 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับวันแรกที่เริ่มให้อาหาร

ในงานวิจัยของพุทธรัตน์ และคณะ (2556) ได้ทำการตรวจวัดปริมาณ MT ในปลานิลรวมถึง ตรวจวัด MT ที่ตกค้างในน้ำ ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) โดยใช้ตัวตรวจวัดเป็น UV และมีการใช้เทคนิคสกัดเพื่อเพิ่มความเข้มข้นด้วยวิธีสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็ง (Solid Phase Extraction: SPE) และ สกัดของเหลว - ของเหลว (Liquid - Liquid Extraction: LLE) ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ในวันที่ 2 หลังจากการแปลงเพศปลาจะตรวจพบ MT ในปริมาณ 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่สามารถตรวจวัดปริมาณ MT ได้ ในวันที่ 3 หลังจากการแปลงเพศปลา

## 2.6 ผลกระทบของ MT ต่อระบบนิเวศ

### 2.6.1 ผลกระทบของ MT ต่อมนุษย์

Roberts และ Essenhigh (1986) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแอนาบอลิกแอนโดรเจน สเตียรอยด์ ที่มีต่อมนุษย์ ซึ่ง MT เป็นสารแอนาบอลิกแอนโดรเจนสเตียรอยด์ (AAS) ชนิดหนึ่ง พบว่า AAS จะไปกระตุ้นการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อ ส่วนใหญ่จะเกิดที่ต่อมลูกหมากในเพศชาย ซึ่งส่งผลทำให้เกิดมะเร็งต่อมลูกหมากได้หากได้รับ AAS เป็นระยะเวลา นาน

Soe และคณะ (1992) ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดจาก AAS เช่นเดียวกัน ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่อได้รับ AAS ผ่านระบบทางเดินอาหารจะส่งผลทำให้เกิดความผิดปกติของตับ โดยจะเกิดการผลิตฮอร์โมนในตับสูงผิดปกติ เกิดความผิดปกติในเนื้อเยื่อทำให้เกิดตับอักเสบได้

### 2.6.2 ผลกระทบของ MT ต่อสิ่งมีชีวิต

#### 2.6.2.1 ปลา

Davie และ Thorarensen (1997) ได้ศึกษาผลกระทบของ MT ที่มีต่อปลาเทราห์ โดยมีการให้ MT ผ่านตัวกลางเนยโกโก้หรือเม็ดยางซิลิโคนเพื่อรักษาระดับพลาสมาสเตียรอยด์แก่ ปลาเทราห์ทั้งตัวที่ยังอายุน้อยแล้วตัวเต็มวัย ซึ่งจากทดลองพบว่า หัวใจห้องล่างของปลาเทราห์มีขนาดใหญ่ขึ้นประมาณ 2 เท่าเมื่อเทียบกับปลาเทราห์ที่ไม่ได้รับ MT ในช่วงระยะเวลา 42 วัน

Andersen และคณะ (2006) ได้ศึกษาผลกระทบของ MT ที่ความเข้มข้นต่างๆโดยมีการใช้ร่วมกับฮอร์โมนเอthinilเอสตราไดออล (EE<sub>2</sub>) ที่ความเข้มข้น 26.4 นาโนกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 7 วัน พบว่า เมื่อใช้ MT ที่ความเข้มข้นต่ำสุด (4.5 นาโนกรัมต่อลิตร) ร่วมกับเอthinilเอสตราไดออล ระดับไวเทลโลจินินในปลาม้าลายเพศผู้ที่เป็นตัวเต็มวัยจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น MT ระดับไวเทลโลจินินจะไม่เพิ่มขึ้น แต่ระดับ 11- คีโตเทสโทสเตอโรน (KT) และระดับเทสโทสเตอโรนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า MT เป็นสารรบกวนการทำงานของระบบต่อมไร้ท่อแม้จะมี MT ในปริมาณต่ำ

Kang และคณะ 2008 ได้ศึกษาผลกระทบของ MT ที่มีต่อปลาชิวข้าวสาร (Medaka) พบว่าที่ความเข้มข้น MT มากกว่า 46.8 นาโนกรัมต่อลิตร จะส่งผลให้เซลล์ไข่ในรังไข่ของปลาเสื่อมลง และระดับไวเทลโลจินีลดลง ซึ่งส่งผลให้การวางไข่และอัตราการรอดของลูกปลาลดลง

#### 2.6.2.2 หอยทาก

Czech และคณะ (2001) ได้ศึกษาการใช้ MT เป็นสารประกอบแอนโดรเจนโดยทดลองในหอยทากชนิด hermaphroditic snail เป็นเวลามากกว่า 8 สัปดาห์ โดยดูถึงการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักและความสูงของเปลือกหอย อัตราการตายของตัวเต็มวัย การสร้างไข่ อัตราการวางไข่ และจุลพยาธิวิทยาของหอยทากตัวเต็มวัย พบว่า MT มีผลทำให้ความสูงและน้ำหนักของหอย อัตราการตายของตัวเต็มวัย ปริมาณการสร้างไข่ อัตราการวางไข่ โดย MT เป็นสาเหตุทำให้เกิดการทำลายไข่ขาวและต่อมลูกหมากในหอย เมื่อหอยได้รับ MT ที่ความเข้มข้น 100 นาโนกรัมต่อลิตร

Oehlman และคณะ (2004) ได้ศึกษาผลกระทบของการใช้ MT ร่วมกับฮอร์โมนเอthinylเอสตราไดออล (EE<sub>2</sub>) ในหอยทากน้ำจืด (ramshorn snail) โดยได้ทดลองในหอยทากที่ตัวเต็มวัยและตัวที่ยังไม่เป็นตัวเต็มวัย เป็นระยะเวลามากกว่า 6 เดือน พบว่า เกิดการพัฒนาลักษณะเพศผู้ในเพศเมีย (imposex) โดยเกิดการพัฒนาของอวัยวะเพศชายในเพศเมีย ซึ่ง MT เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าฮอร์โมนเอthinylเอสตราไดออล นอกจากนี้ยังพบว่าฮอร์โมนทั้งสองชนิดนี้ยังส่งผลต่อการสร้างเซลล์ก่อกำเนิด (germ cell) ในต่อมเพศผู้และเพศเมีย เป็นผลให้การสร้างอสุจิบกพร่องซึ่งพบในหอยทดลองเพศผู้

#### 2.6.2.3 หนู

Blasberg และคณะ (1996) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแอนาบอลิกแอนโดรเจน สเตียรอยด์ ที่มีต่อวงจรการเป็นสัด (estrous cycle) ในหนูโตเต็มวัย โดยสังเกตจากการตอบรับทางเพศนั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของเยื่อช่องคลอด (vaginal cytology) และน้ำหนักตัวของหนูเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ โดยในการทดลองได้ใช้ฮอร์โมน MT เมแทนโดรสเตอโรน และแอนโดรโลนดีคาโนนอล พบว่า MT ที่มีความเข้มข้นสูงสุด (7.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และแอนโดรโลนดีคาโนนอล (5.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จะไปรบกวนระบบพฤติกรรมและเกิดการเปลี่ยนแปลงของเยื่อช่องคลอดแต่มีผลต่อน้ำหนักตัวน้อยมาก

Wason และคณะ (2003) ได้ศึกษาถึงความเป็นพิษของ MT โดยทดลองให้หนูกินฮอร์โมนเข้าไปเป็นเวลา 28 วัน ซึ่งเป็นไปตามข้อตกลงขององค์การร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (OECD) โดยทดลองกับหนูเพศผู้และเพศเมียโดยให้ฮอร์โมนในช่วงความเข้มข้นที่ต่างกัน แล้วตรวจวัดผลกระทบที่มีต่อระบบต่อมไร้ท่อ พบว่า ในหนูเพศผู้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอวัยวะเพศชาย โดยน้ำหนักของชั้นหนังกำพวด (epidermis) และอวัยวะเพศมีขนาดเล็กลง มีการลดของจำนวนเลติคส์เซลล์และเยื่อผิวอวัยวะและเซลล์ก่อกำเนิดเสื่อมลงเมื่อหนูเพศผู้ได้รับ MT ที่ความเข้มข้น 200 และ 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน ส่วนในหนูเพศเมียพบว่า MT มีผลต่ออวัยวะเพศเช่น น้ำหนักของรังไข่ลดลงที่ความเข้มข้น 600 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ MT กับ

การเปลี่ยนแปลงทางจุลกายวิภาคศาสตร์ของเซลล์และเนื้อเยื่อสามารถสรุปได้ว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ 2 ระดับ โดย MT จะมีผลที่ความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นปานกลาง

#### 2.6.2.4 อื่นๆ

Selzsam และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ MT ที่มีต่อการวางไข่ของนกกระทาสายพันธุ์ญี่ปุ่น (Japanese quails) พบว่า การวางไข่ของนกกระทาจะลดลงเมื่อนกกระทาได้รับ MT ในปริมาณ 50 – 110 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 3 สัปดาห์

## 2.7 รังสีอัลตราไวโอเล็ต

รังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือรังสีเหนือม่วง เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นช่วงแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ ปกติรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมีอยู่ในแสงอาทิตย์ โดยดวงอาทิตย์สามารถปล่อยรังสีต่างๆออกมา แต่รังสีเหล่านี้จะถูกดูดกลืน หักเห หรือสะท้อนออกไปจากชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกอยู่ ทำให้รังสีที่ผ่านมายังผิวโลกได้มีเพียง 49 % ของรังสีทั้งหมด โดยเป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ต 9% ของรังสีที่ผ่านมายังผิวโลก (ปรักณี เจริญสิน, 2549)

### 2.7.1 ชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

สามารถจำแนกช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต ตามมาตรฐาน ISO 21348 ได้ดังแสดงในตารางที่

2 – 4

ตารางที่ 2 - 4 ชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ตตามมาตรฐาน ISO 21348

Spectral Category	Spectral Sub-category	Wavelength Nm	Notes
Ultraviolet	UV	$100 \leq \lambda < 400$	Ultraviolet
	VUV	$10 \leq \lambda < 200$	Vacuum Ultraviolet
	EUV	$10 \leq \lambda < 121$	Extreme Ultraviolet
	H Lyman- $\alpha$	$121 \leq \lambda < 122$	Hydrogen Lyman-alpha
	FUV	$122 \leq \lambda < 200$	Far Ultraviolet
	UVC	$100 \leq \lambda < 280$	Ultraviolet C
	MUV	$200 \leq \lambda < 300$	Middle Ultraviolet

ตารางที่ 2 - 4 ชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ตตามมาตรฐาน ISO 21348 (ต่อ)

Spectral Category	Spectral Sub-category	Wavelength Nm	Notes
Ultraviolet	UVB	$280 \leq \lambda < 315$	Ultraviolet B
	NUV	$300 \leq \lambda < 400$	Near Ultraviolet
	UVA	$315 \leq \lambda < 400$	Ultraviolet A

ที่มา: Space Environment Technology, 2556: ออนไลน์)

ซึ่งสามารถแบ่งรังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถได้ 4 ช่วงใหญ่ๆ (EPA 2009, ปรศณี เจริญสิน 2549) ดังนี้

2.7.1.1 VUV อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 100 – 200 นาโนเมตรรังสีช่วงนี้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ไม่พบในแสงอาทิตย์เพราะก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศสามารถดูดซับไว้ทั้งหมด รังสีในช่วงนี้มีแนวโน้มที่จะสามารถสลายพวกมลพิษขนาดเล็ก (Micropollutant) ได้ดีกว่ารังสีในช่วงความยาวคลื่นอื่นๆ

2.7.1.2 UV-C อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 280 นาโนเมตร รังสีช่วงนี้จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตอย่างยิ่ง โดยรังสีในช่วงนี้จะไม่พบในแสงอาทิตย์เพราะก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศสามารถดูดซับไว้ทั้งหมด และพบว่ารังสีในช่วงนี้นำมาใช้ฆ่าเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.7.1.3 UV-B อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 280 – 315 นาโนเมตรรังสีช่วงนี้จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต พบในแสงแดดเล็กน้อย เพราะก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศดูดซับไว้ได้บางส่วน

2.7.1.4 UV-A อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 315 – 400 นาโนเมตร รังสีช่วงนี้ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต พบได้ในแสงแดดที่ส่องมายังผิวโลก โดยก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศดูดซับได้น้อยมาก

## 2.7.2 แหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

2.7.2.1 แหล่งกำเนิดธรรมชาติ (Natural sources) ในที่นี้คือดวงอาทิตย์ โดยเราจะพบรังสีอัลตราไวโอเล็ตในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาบนพื้นโลกในช่วงความยาวคลื่น UV-A และ UV-B เท่านั้น

### 2.7.2.2 แหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น (Artificial sources)

2.7.2.2.1 หลอดไอปรอทความดันต่ำ (Low - Pressure Mercury Lamp) ภายในหลอดจะบรรจุไอปรอท มีความดัน 100 – 1,000 ปาสคาล ความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำงานประมาณ 40 องศาเซลเซียส ความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาอยู่ในช่วง 253.7 นาโนเมตร ซึ่งมีประโยชน์ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนด้วยมลพิษที่องค์ประกอบของเคมี

2.7.2.2.2 หลอดไอปรอทความดันปานกลาง (Medium - Pressure Mercury Lamp) ภายในหลอดบรรจุไอปรอทความดันก๊าซภายในหลอดอยู่ในช่วง 1 - 3 บาร์

2.7.2.2.3 หลอดชนิดความดันสูง (High - Pressure Lamp) ภายในหลอดบรรจุก๊าซอาร์กอนหรือไอปรอท ความดันก๊าซภายในหลอดสูงกว่า 10 เอทีเอ็ม เมื่อทำงานจะมีความร้อนเกิดขึ้นสูงถึง 300 องศาเซลเซียส หลอดชนิดนี้เป็นแหล่งกำเนิดแสงขาว (Visible Light) รังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation) และรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation) ในช่วงความยาวคลื่น 365 - 366.3 นาโนเมตร

2.7.2.2.4 หลอดเอ็กซ์ไซเมอร์ (Excimer Lamp) การทำงานของหลอดและความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับก๊าซที่เติมในหลอด การทำงานคล้ายหลอดไอปรอทความดันต่ำ ก๊าซที่เติมเข้าไปอาจเป็นก๊าซเฉื่อย ก๊าซฮาโลเจน หรือก๊าซผสมจากก๊าซทั้ง 2 ชนิด หลอดที่หุ้มส่วนใหญ่ทำด้วยควอร์ซคุณภาพสูง การส่งผ่านในช่วงความยาวคลื่นสั้นสูง (ประมาณ 70-80% ที่ความยาวคลื่น 172 นาโนเมตร, 92% ที่ความยาวคลื่น 222 นาโนเมตร) ตัวอย่างก๊าซที่เติมและความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมา แสดงดังตารางที่ 2 - 5

ตารางที่ 2 - 5 ก๊าซที่เติมในหลอดเอ็กซ์ไซเมอร์และความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมา (Parsons, 2004)

Excimer	$\lambda$ (nm)
Xe <sub>2</sub>	172
ArF	193
KrBr	207
KrCl	222
Cl <sub>2</sub>	259
Br <sub>2</sub>	289
XeCl	308
I <sub>2</sub>	382

หลอดชนิดนี้ส่วนใหญ่นิยมใช้ในช่วงความยาวคลื่นสั้น (ในช่วงสุญญากาศ) การสลายของสารปนเปื้อนอินทรีย์จะเกิดทั้งโฟโตไลซิสโดยตรง และการเกิดอนุมูลอิสระที่เป็นผลมาจากการเกิดโฟโตไลซิสของน้ำ

2.7.3 ผลกระทบจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต (กรมอุตุฯ, 2555 :ออนไลน์)

2.7.3.1 ผลกระทบต่อมนุษย์

ประโยชน์ คือช่วยสังเคราะห์วิตามินดีที่ผิวหนังมนุษย์และสัตว์และมีส่วนสำคัญในการสร้างเสริมเนื้อเยื่อกระดูก

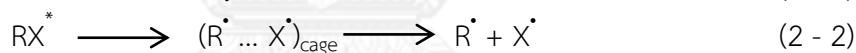
โทษ คือ ทำให้ผิวหนังเกรียม กระจกตาอักเสบ ต้อกระจก ผิวหนังเหี่ยวย่น และ มะเร็งผิวหนัง

2.7.3.2 ผลกระทบต่อพืชเช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ตไปยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง ทำลายดีเอ็นเอและเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบในพืช ทำให้ลักษณะทางกายภาพ และกระบวนการเจริญเติบโตของพืชเปลี่ยนแปลงไป นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางมวลชีวภาพและผลิตผลลดลง

2.7.3.3 ผลกระทบต่อวัสดุและสิ่งก่อสร้าง รังสีอัลตราไวโอเล็ตทำให้วัสดุต่างๆมีสีซีดลง เนื่องจากปฏิกิริยาแสงทำให้วัสดุเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีไป ไม้และกระดาษจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองซีดเมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต

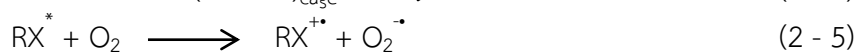
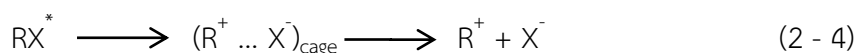
## 2.8 กระบวนการโฟโตไลซิส (Photolysis)

คือกระบวนการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตในน้ำเพื่อสลายสิ่งปนเปื้อน โดยสารปนเปื้อนจะมีการดูดซับแสงยูวีแล้วเกิดการสลายตัว กลไกหลักในการเกิดโฟโตไลซิส (Parsons, 2004) เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุล RX ได้รับแสงยูวีแล้วโมเลกุลนี้จะดูดซับแสง ทำให้โมเลกุลเหล่านี้ไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น ( $RX^*$ ) ซึ่งจะมีพลังงานสูงเพียงพอที่จะทำให้สารเกิดการสลายตัว และสามารถกลับมาสู่สภาวะพื้นได้ โดยกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี โดยมีกลไกดังสมการที่ (2 - 1)



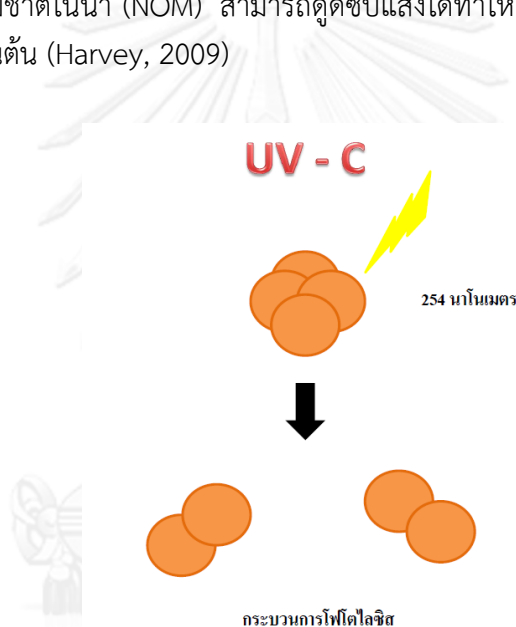
จากสมการที่ (2 - 2) เป็นสมการแสดงการแตกตัวของพันธะโฮโมไลติก ซึ่งโมเลกุลที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะเกิดการกรงตัวทำละลาย (Solvent Cage) ซึ่งจะมีอนุมูล (Radicals) อยู่ภายใน เมื่ออนุมูลเหล่านี้หลุดออกมา จะไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารต่างๆที่อยู่ในน้ำ ซึ่งจะขึ้นกับโครงสร้างของสารแต่ละชนิด ส่วนสมการที่ (2 - 3) เป็นสมการที่แสดงถึงความไม่เสถียรของกรงตัวทำละลายซึ่งสามารถกลับไปเป็นโมเลกุลตั้งต้นได้ ในกรณีที่มีค่าควอนตัมต่ำ และสารอยู่ในตัวกลางควบแน่นซึ่งเปรียบเทียบกับสถานะแก๊ส

ส่วนในสารละลายมีขั้ว เช่น น้ำ จะเกิดการแตกตัวของพันธะเฮเทอโรไลติก ดังแสดงในสมการที่ (2 - 4) เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลซึ่งสามารถแตกตัวออกเป็นประจุ



และจากสมการที่ (2 - 5) และ (2 - 6) สามารถเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนและพลังงานได้ แต่ต้องอยู่ในสภาวะกระตุ้นที่นานขึ้น โดยออกซิเจนจะเกี่ยวข้องกับสภาวะกระตุ้นของสารอินทรีย์ โดยเฉพาะในกรณีที่ในน้ำมีองค์ประกอบอื่นน้อยๆ ออกซิเจนจะทำให้เกิดอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นอนุมูลที่ช่วยให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์หรืออาจเกิดออกซิเจนอะตอมเดี่ยว (Singlet Oxygen) อาจทำให้โมเลกุลกลับมาอยู่ในรูปโมเลกุลเริ่มต้น หรือกลับมาอยู่ในสภาวะพื้นอีกครั้ง

ในกระบวนการโฟโตไลซิสจะต้องคำนึงถึง 2 สิ่งคือ สารปนเปื้อนต้องสามารถดูดซับแสงได้ และแสงต้องสามารถทำให้สารปนเปื้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตไลซิสได้แก่ ความยาวคลื่น โดยความยาวคลื่นที่ใช้ขึ้นกับโครงสร้างของสารที่ต้องการสลาย โดยสารนั้นต้องดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 2 - 1 พีเอชไม่มีผลโดยตรงแต่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีแสงของสารนั้นๆ และองค์ประกอบอื่นๆ ในน้ำ เช่น สารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ (NOM) สามารถดูดซับแสงได้ทำให้เกิดการแข่งขันในการดูดซับแสงของสารปนเปื้อน เป็นต้น (Harvey, 2009)



ภาพที่ 2 - 1 กลไกการสลายสารอินทรีย์ด้วย UV - C

## 2.9 แอคติโนเมทรีทางเคมี (Chemical Actinometry) (Montalti, 2006)

ในกระบวนการโฟโตเคมี ได้มีความสนใจปฏิกิริยาของสารภายใต้สภาวะกระตุ้นด้วยแสง อัตราของปฏิกิริยาโฟโตเคมีสามารถแสดงได้ด้วยค่าควอนตัมยิวต์ หรือที่เรียกว่าประสิทธิภาพควอนตัม ซึ่งค่าควอนตัมยิวต์สามารถบอกประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตเคมี เนื่องจากกระบวนการโฟโตเคมีมีความซับซ้อนและอาจเกิดการสูญเสียพลังงานจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการให้เกิด โดยค่าควอนตัมยิวต์ได้นิยามไว้ว่า

$$\Phi = \frac{\text{จำนวนโมเลกุลสารที่ทำปฏิกิริยาต่อหนึ่งหน่วยเวลา}}{\text{จำนวนโฟตอนของแสงที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยเวลา}}$$

แอกทิโนเมทรีเป็นการหาโปรตอนฟลักซ์ในแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic light) โดยปกติแอกทิโนมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้ในช่วงแสงยูวีและแสงที่สามารถเห็นได้ด้วยตา แอกทิโนมิเตอร์มีทั้งทางกายภาพและทางเคมี ในทางกายภาพได้แก่ photomultiplier, photodiode, bolometer เป็นต้น ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานหรือจำนวนโฟตอนที่เกิดขึ้นจากสัญญาณไฟฟ้า ส่วนทางเคมีได้แก่ เฟอร์ริกออกซาลेट แอกทิโนมิเตอร์ (Ferrioxalate Actinometer) ไอโอไดด์ – ไอโอเดต แอกทิโนมิเตอร์ (Iodide – Iodate Actinometer) ยูรานิล ออกซาลेट แอกทิโนมิเตอร์ (Uranyl oxalate Actinometer) เป็นต้น แอกทิโนมิเตอร์ที่นิยมใช้ใน UV – C และ VUV คือเฟอร์ริกออกซาลेट (Goldstein, 2008 และ Rahn, 2003) ซึ่งวิธีเฟอร์ริกออกซาลेटมีข้อดีดังนี้ (Murov, 1993)

1. ใช้ได้ง่ายและรวดเร็ว
2. ค่าควอนยิวต์ที่ได้ค่อนข้างแม่นยำ
3. สามารถใช้ในช่วงแสงสีน้ำเงินของสเปกตรัมที่มองเห็นได้
4. ไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ
5. ออกซิเจนไม่มีผลต่อการทดลอง

ประโยชน์ของแอกทิโนมิเตอร์ทางเคมี คือ สามารถนำไปประยุกต์หากำลังของแสงที่เกิดขึ้นจริงเมื่อทราบพื้นที่ผิวที่ได้รับการฉายแสง

## 2.10 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการสลายสารอินทรีย์ โดยใช้อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical) เป็นตัวออกซิเดชันหลัก ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลเป็นตัวทำปฏิกิริยาที่ดีและทำปฏิกิริยาได้เกือบทุกสาร อนุมูลไฮดรอกซิลสามารถเกิดได้จากหลายกระบวนการ เช่น ปฏิกิริยาโอโซน การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมออกไซด์ การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ และการใช้ลำรังสีอิเล็กตรอน เป็นต้น (Zhou และคณะ, 2001)

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (National Water Research Institute, 2555 : ออนไลน์) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ

1. การเกิดตัวออกซิเดชันที่มีอำนาจในการออกซิเดชันสูง
2. การเกิดปฏิกิริยาของตัวออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ

ซึ่งได้กล่าวไปข้างต้นแล้วว่าสารออกซิเดชันหลักที่เกิดในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงคืออนุมูลไฮดรอกซิล แม้ในแต่ละกระบวนการจะมีการเกิดไฮดรอกซิลเหมือนกันแต่ประสิทธิภาพของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงจะขึ้นกับความสามารถในการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล



### 2.10.1 ข้อดีของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

2.10.1.1 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเป็นกระบวนการที่ใช้ทำลายหรือสลายสารต่างๆ

2.10.1.2 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงหลายกระบวนการมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรค

2.10.1.3 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงหลายกระบวนการถูกนำมาใช้ในการชุมชนและอุตสาหกรรม

### 2.10.2 ข้อด้อยของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

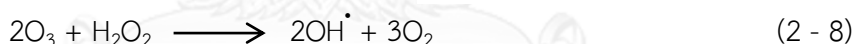
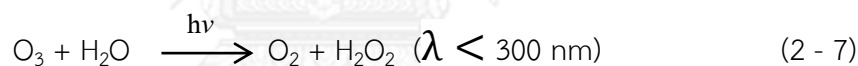
2.10.2.1 ศักยภาพในการรวมตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นวิเคราะห์ได้ยาก

2.10.2.2 หากในน้ำมีสารประกอบตัวอื่นอยู่อาจเป็นตัวขัดขวางการทำงานของอนุมูลไฮดรอกซิล (Radical Scavenging) ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงลดลง

### 2.10.3 ตัวอย่างกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่เกี่ยวข้องกับแสงยูวี (National Water Research Institute, 2556: ออนไลน์) ได้แก่

#### 2.10.3.1 การใช้โอโซนร่วมกับรังสียูวี ( $O_3/UV$ )

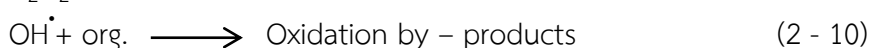
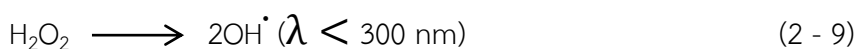
ในกระบวนการนี้จะใช้โอโซนร่วมกับการฉายรังสียูวี โดยอาจใช้หลอดความดันต่ำหรือความดันปานกลาง เพื่อทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการที่ (2 - 7) – (2 - 8)



จากสมการที่ (2 - 7) โอโซนจะเกิดการสลายตัวโดยใช้แสงทำให้เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วไฮโดรเจนจะไปทำปฏิกิริยากับโอโซนทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งสามารถไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่อไป ทำให้สารอินทรีย์ถูกสลายหรือทำลายไป

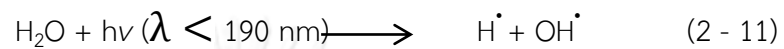
#### 2.10.3.2 การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับรังสียูวี ( $H_2O_2/UV$ )

ในกระบวนการนี้จะมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อช่วยทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดได้เพิ่มขึ้น โดยในกระบวนการนี้จะเกิดทั้งกระบวนการโฟโตไลซิสโดยตรงของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปฏิกิริยาของอนุมูลไฮดรอกซิล โดยอนุมูลไฮดรอกซิลจะเกิดจากการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2 - 9) – (2 - 10)

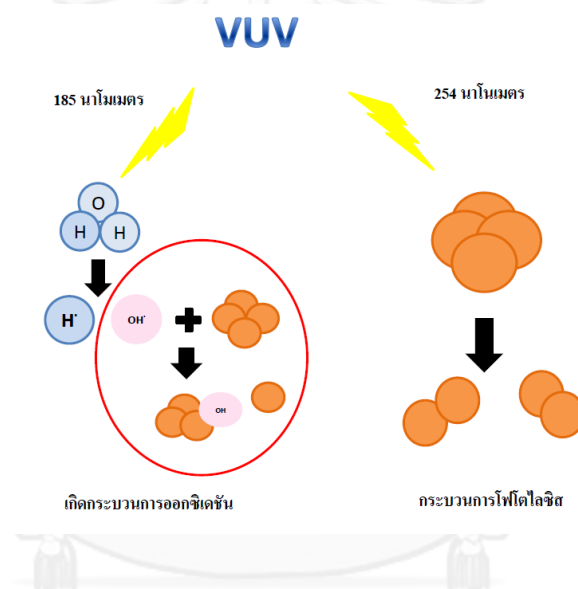


### 2.10.3.3 การใช้รังสียูวีในช่วงสุญญากาศ (Vacuum UV, VUV)

รังสียูวีที่ใช้จะมาจากหลอด VUV ซึ่งที่นิยมใช้กันคือหลอด VUV ที่มีความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร แต่หลอดชนิดนี้จะมีแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรออกมาด้วย โดยจากงานวิจัยของ Gonzalez และคณะ (2004) ได้อธิบายถึงกระบวนการ VUV ว่าเป็นกระบวนการที่มีการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลโดยเกิดจากการแตกตัวของน้ำ (Homolysis) ซึ่งเป็นไปตามที่ (2 - 11)



และสามารถแสดงกลไกได้ดังภาพที่ 2 - 2



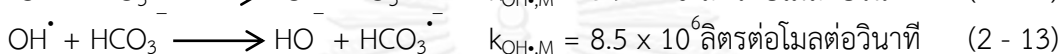
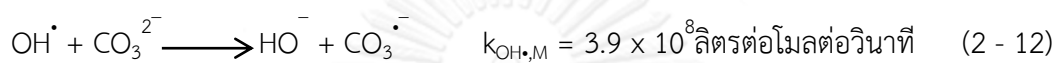
ภาพที่ 2 - 2 กลไกการสลายสารอินทรีย์ด้วย VUV

นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาหลอด VUV ซึ่งเรียกว่าหลอดเอ็กซ์ไซเมอร์ (Excimer lamp) หลอดชนิดนี้จะให้แสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic) โดยจะให้ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันขึ้นกับแก๊สที่อยู่ภายในหลอดแต่ที่นิยมใช้กันจะเป็นหลอดที่ให้ความยาวคลื่น 172 นาโนเมตร ซึ่งภายในบรรจุแก๊สซีนอน ( $\text{Xe}_2$ )

ได้มีการนำหลอด VUV มาประยุกต์ใช้ในการสลายต่างๆ เช่น 4 - คลอโรฟีนอล 4 - คลอโรเบนโซอิก แอทธาซีน แอลกอฮอล์ และสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ เป็นต้น (Yoon, 2008)

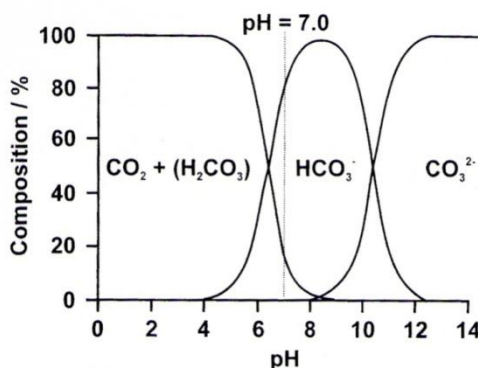
## 2.11 ตัวขัดขวางอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical Scavenger)

ปกติในน้ำธรรมชาติจะมีค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ซึ่งจะมีไอออนของไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) และคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ในปริมาณ 0.41 และ 0.40 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ (Immoberdorf และ Mohsini, 2011) อนุมูลคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{\cdot-}$ ) มีพื้นฐานมาจากอนุมูลไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) ขึ้นกับระบบกรด - เบส โดยค่า pKa อยู่ในช่วง 7 - 9.6 (Hoigné, 1992 อ้างใน Oppenländer, 2002) โดยสมการการเกิดอนุมูลคาร์บอเนตและอนุมูลไบคาร์บอเนตเป็นไปตามสมการที่ (2 - 12) - (2 - 13)



จากสมการจะพบว่าค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของสมการที่ (2 - 12) มีค่ามากกว่าสมการที่ (2 - 13) ส่งผลให้อนุมูลคาร์บอเนตเกิดขึ้นได้มากกว่าอนุมูลไบคาร์บอเนต อนุมูลทั้ง 2 ตัวนี้จัดเป็นสารออกซิแดนท์ซึ่งสามารถเลือกทำปฏิกิริยากับสารส่งผลให้อัตราการสลายสารลดลง

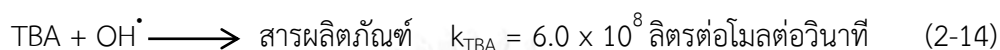
องค์ประกอบ  $\text{CO}_2$  ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) /  $\text{HCO}_3^-$  /  $\text{CO}_3^{2-}$  ในระบบน้ำจะขึ้นกับพีเอชของสิ่งแวดล้อมดังแสดงในภาพที่ 2 - 3



ภาพที่ 2 - 3 ระบบไอออนไบคาร์บอเนตและไอออนคาร์บอเนตในน้ำ

เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำ ( $\text{CO}_2$ ) เกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) ซึ่งเกิดที่พีเอชน้อยกว่า 4.3 เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นประมาณ 8.2 จะเกิดไอออนไบคาร์บอเนต และเกิดไอออนคาร์บอเนตที่พีเอชมากกว่า 12 ซึ่งไอออนทั้งสองชนิดนี้จะไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิล ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ในน้ำได้น้อยลง โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอออนทั้งสองชนิดแสดงในสมการ (2-12) และ (2-13) ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

ตัวขัดขวางอนุมูลไฮดรอกซิลอีกตัวหนึ่งที่นิยมเติมเพื่อศึกษากลไกหลักที่เกิดในการสลายสารอินทรีย์ด้วยแสงยูวี คือ เทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (TBA) โดยสารชนิดนี้จะไปแย่งทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิล ส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารอินทรีย์กับอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดได้น้อยลง ซึ่งค่าคงที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ กับอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงในสมการที่ (2-14) (Fuguson และคณะ, 2005)



## 2.12 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้

เนื่องจากมีความแตกต่างในแง่พลังงานที่ใช้ จึงเลือกใช้ค่า EE / O เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจ ซึ่ง EE/O มีประโยชน์ในเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นค่าที่บอกพลังงานที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง โดยนิยามจะหมายถึงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในหน่วยกิโลวัตต์ชั่วโมง เพื่อสลายสารปนเปื้อนต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

ในกรณีที่สารปนเปื้อนมีความเข้มข้นต่ำๆ และมีปฏิกิริยาการสลายเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง สามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าต่ออันดับที่เกิดในถังปฏิกรณ์แบบที่ละลายได้ (Daneshvar, 2005 และ Kasiri, 2012) จากสมการ

$$\text{EE} / \text{O} = \frac{P \times t \times 1000}{V \times 60 \times \log \frac{C_i}{C_f}}$$

เมื่อ	EE / O	คือ	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับ (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร)
	P	คือ	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)
	t	คือ	เวลาที่ใช้ในการสลาย (นาที่)
	V	คือ	ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์ (ลิตร)
	C <sub>i</sub>	คือ	ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (ไมโครกรัมต่อลิตร)
	C <sub>f</sub>	คือ	ความเข้มข้นสุดท้ายของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (ไมโครกรัมต่อลิตร)

## 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.13.1 การสลายฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

Schreck และคณะ (1999) ศึกษาการสลาย MT ในป้อนูบาลปลานิลโดยใช้แสงอาทิตย์ และแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และมีการเก็บตัวอย่างเพื่อหาปริมาณ MT ที่ 2, 4, 8 24 และ 48 ชั่วโมง โดยใช้วิธีเรดิโออิมมิวโนแอสเส (radioimmunoassay, RIA) ในการทดลองใช้ความเข้มข้น MT เริ่มต้นที่ความเข้มข้น 5, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่า แสงอาทิตย์สามารถสลาย MT ได้ประมาณ 48 – 62 % แต่เมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร MT สลายได้มากกว่า 50 % เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะไม่สามารถตรวจพบความเข้มข้นของ MT ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าในระหว่างการบำบัดด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตนี้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงเพศปลานิลโดยมีปลานิลเพศผู้เพิ่มขึ้นประมาณ 8 % ซึ่งอาจมีผลมาจากแสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของ MT ซึ่งออกฤทธิ์ช่วยในการแปลงเพศได้ดีกว่าตัว MT เอง

Hu และคณะ (2011) ได้ศึกษาการสลาย MT โดยใช้เทคนิคเฟนต์บนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิริฟพันธ์ ( $Fe_3O_4$ /MWNTs) และการดูดซับร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยในการศึกษาการดูดซับของ MT บน  $Fe_3O_4$  เปรียบเทียบกับ  $Fe_3O_4$ /MWNTs ใช้ความเข้มข้น MT เริ่มต้นในช่วง 0.08 – 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ที่จุดสมดุล 0.5 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง MT ถูกดูดซับบน  $Fe_3O_4$  ได้ 10% และถูกดูดซับบน  $Fe_3O_4$ /MWNTs ได้ 90 % ตามลำดับ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ ส่วนการศึกษาในส่วนการสลายด้วยเทคนิคเฟนต์ พบว่า MT ลดลงเมื่อมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย โดย MT ลดลง 85.9 % หลังจากผ่านไป 8 ชั่วโมง และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe_3O_4$ /MWNTs มีประสิทธิภาพในการสลาย MT มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe_3O_4$  นอกจากนี้ได้มีการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสลาย MT ได้แก่ ค่าพีเอช เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการสลายของ MT ลดลง โดยพีเอชที่ทำให้การสลาย MT สูงสุดอยู่ที่ 3 สำหรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.2 กรัมต่อลิตร เป็น 2 กรัมต่อลิตร อัตราการสลาย MT เพิ่มขึ้นจาก 62.8 % เป็น 85.9 % สำหรับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 1.1 มิลลิโมลาร์จนถึง 5.3 มิลลิโมลาร์ส่งผลให้การสลาย MT เพิ่มขึ้นจาก 70.5 % เป็น 85.9 %

Hu และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนรูปและการลดลงของความเป็นฮอร์โมน (androgenic activity) ของ MT ที่ถูกสลายด้วยวิธีเฟนต์บนตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe_3O_4$ /MWNTs ร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากการทดลองหาความเป็นฮอร์โมนในน้ำที่ปราศจากไอออน (deionized water) ที่พีเอช 4.5 ค่าความเป็นฮอร์โมนของ MT จะลดลงจาก 93,014 IU/L เหลือ 24,377 IU/L ค่าความเข้มข้นของ MT ลดลงจาก 212 ไมโครกรัมต่อลิตร เหลือ 3.1 ไมโครกรัมต่อลิตร และเมื่อค่าพีเอชต่ำลงจนถึง 3.5 ค่าความเป็นฮอร์โมนจะลดลงได้มากกว่าโดยค่าความเป็นฮอร์โมนลดลงจาก 94,604 IU/L เหลือ

18,831 IU/L ความเข้มข้น MT ลดลงจาก 212 ไมโครกรัมต่อลิตร เป็น 1.1 ไมโครกรัมต่อลิตรเมื่อเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมง แต่เมื่อมีการทดสอบในน้ำดื่มพบว่า อัตราการลดลงของความเข้มข้นฮอร์โมนจะลดลงต่ำกว่า โดยค่าความเป็นฮอร์โมนลดลงจาก 93,014 IU/L เหลือ 40,089 IU/L ความเข้มข้นของ MT ลดลงจาก 212 ไมโครกรัมต่อลิตร เป็น 41.29 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งจะเห็นว่าค่าความเป็นฮอร์โมนไม่สามารถกำจัดได้หมดภายใน 8 ชั่วโมง

Homklin และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาศัตรูการสลาย MT ด้วยวิธีทางชีวภาพโดยมีการคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียที่อยู่ในตะกอนดินและน้ำจากบ่อแปลงพืชปาล์มที่มีความสามารถในการสลาย MT จากการทดลองสามารถคัดเลือกเชื้อได้ 3 ชนิด คือ *Rhodococcusequi*, *Nacardioidesaromaticivorams* และ *Nacardioidesnitrophenolicus* ซึ่งมีรหัสที่ใช้เรียกแทนแบคทีเรีย 3 กลุ่มนี้ คือ SB010-03, SB100-05 และ WB100-05 ตามลำดับ และเมื่อศึกษาถึงการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพบว่าเมื่อความเข้มข้น MT เพิ่มขึ้นแบคทีเรียทั้ง 3 สายพันธุ์จะเจริญเติบโตมากขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้น MT สูงกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร การเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะถูกยับยั้งโดยเฉพาะแบคทีเรียกลุ่ม SB010-03 โดยมีการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจากโมเดลของ Haldane โดยมีค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์อยู่ในช่วง 0.13 – 0.19 ต่อชั่วโมง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการหลงเหลือความเป็นฮอร์โมนในน้ำโดยการใช้ยีสต์  $\beta$  – galactosidase ซึ่งพบว่าไม่หลงเหลือความเป็นฮอร์โมนอยู่ในน้ำ โดยกลุ่มแบคทีเรียที่สามารถสลาย MT ได้มากที่สุดคือแบคทีเรียกลุ่ม SB010-05 และเป็นแบคทีเรียที่ทนต่อสภาวะที่ความเข้มข้น MT สูงๆ ได้

2.13.2 การใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงโดยแสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงสุญญากาศ

(Vacuum UV, VUV)

Jing และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาศัตรูการสลายกรดเพอร์ฟลูออโรออกตาโนอิก (perfluorooctanoic, PFOA) ที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้ VUV ที่ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร โดยมีแหล่งกำเนิดจากหลอดไอปรอทความดันต่ำ โดยจากศึกษาพบว่าอัตราการสลาย PFOA มีค่าทางจลนพลศาสตร์เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo – first – order) และพบว่าอัตราการสลายเกิดได้เร็วกว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร โดยการใช้ VUV สามารถสลาย PFOA ได้ 61.7 % ภายในเวลา 2 ชั่วโมง และมีค่าคงที่ปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0075 ต่อนาที แต่การใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตสลาย PFOA ต้องใช้เวลาถึง 72 ชั่วโมง จึงจะสามารถสลายได้ 89.5 % เมื่อศึกษาถึงกลไกการสลายพบว่า PFOA สามารถดูดซับแสงในช่วง VUV ทำให้สารอยู่ในสถานะกระตุ้นเกิดเป็นอนุมูลทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสามารถถูกสลายให้หมดไปโดยใช้ VUV ได้เช่นกัน

Yoon และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาศัตรูการสลายสารหนูโดยใช้ VUV ที่มีความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร กำลัง 10 วัตต์เปรียบเทียบกระบวนการออกซิเดชันแบบต่างๆ ได้แก่ การใช้ UV – C ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), กระบวนการโฟโตเพนตัน (UV-A / Fe (III) / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) และการใช้ UV-A ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไทเทเนียมออกไซด์ (UV-A / TiO<sub>2</sub>) พบว่าการใช้ VUV ให้ประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการออกซิเดชันอื่นๆ โดยสาร

หนูวาเลนซี 3 (As (III)) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรจะเกิดการออกซิเดชันได้เกือบสมบูรณ์ภายในเวลา 10 นาที เนื่องจากการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (OH $\cdot$ ) จากกระบวนการโฟโตไลซิสของน้ำ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารหนูที่พีเอชเป็นเบสจะเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระหว่างกระบวนการออกซิเดชันด้วย VUV ซึ่งจะมีหน้าที่เป็นตัวออกซิแดนซ์ย่อย และการใช้ VUV ในการสลายสารหนูในน้ำธรรมชาติก็ให้ประสิทธิภาพดีเช่นกัน นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาประสิทธิภาพในการสลายโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท (batch reactor) เปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลผ่าน (flow – through reactor) ซึ่งพบว่าการศึกษาในถังปฏิกรณ์แบบไหลผ่านจะให้ประสิทธิภาพดีกว่า

Imoberdorf และ Mohseni (2011) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองถังปฏิกรณ์ VUV ที่ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร โดยใช้กรดฟอร์มิก (formic acid, FA) ในการศึกษาอัตราการสลาย โดยได้ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบไหลผ่าน (flow – through reactor) ซึ่งทำงานแบบที่ละเท จากการทดลองพบว่า FA ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.58 มิลลิโมลาร์สามารถสลายได้สมบูรณ์ภายในเวลา 40 นาที ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบอันดับศูนย์ อัตราการสลาย FA ขึ้นกับอนุมูลไฮดรอกซิล (OH $\cdot$ ) ซึ่งเกิดจากกระบวนการโฟโตไลซิสของน้ำ และในระหว่างการสลายกรด FA สามารถเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ (HO $_2\cdot$  / O $_2\cdot$ ) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์ได้เช่นเดียวกับอนุมูลไฮดรอกซิล

Huang และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาความแตกต่างของการสลาย 4 – เทอร์เทียร์ – ออกทิลฟีนอล (4 – tert – octylphenol) โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (UV – C) และใช้ VUV ที่ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร และทำการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการสลาย 4 – เทอร์เทียร์ – ออกทิลฟีนอล ได้แก่ pH ความเข้มข้น 4 – เทอร์เทียร์ – ออกทิลฟีนอล เริ่มต้น และองค์ประกอบในน้ำ ผลการศึกษาพบว่าการใช้ VUV มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ UV – C โดยการใช้ VUV สามารถสลาย 4 – เทอร์เทียร์ – ออกทิลฟีนอล ได้ 93.5 % ภายในเวลา 20 นาที แต่การใช้ UV – C สามารถสลาย 4 – เทอร์เทียร์ – ออกทิลฟีนอล ได้เพียง 49.5 % อัตราการสลายเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเทียม (pseudo – first – order) โดยค่าคงที่การสลายเท่ากับ 0.1176 และ 0.0176 ต่อ นาทีในกรณีสลายด้วย VUV และ UV – C ตามลำดับ และจากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การสลาย 4 – เทอร์เทียร์ – ออกทิลฟีนอลพบว่า pH มีผลต่ออัตราการสลาย โดยในกรณีการใช้ UV – C ที่ pH เท่ากับ 10 จะให้อัตราการสลายสูงที่สุด แต่ในกรณี VUV ที่ pH เท่ากับ 3 จะให้อัตราการสลายสูงที่สุด ความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลต่อการสลาย สลาย 4 – เทอร์เทียร์ – ออกทิลฟีนอล ด้วย VUV โดยประสิทธิภาพการสลายจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น แต่ในกรณี UV – C การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเพียงเล็กน้อย ส่วนองค์ประกอบในน้ำ พบว่า ในกรณีในน้ำมีไนเตรต (NO $_3^-$ ) จะส่งผลให้อัตราการสลายสูงขึ้น ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO $_3^-$ ) จะส่งผลให้อัตราการสลายลดลง และซัลเฟตไม่มีผลต่ออัตราการสลาย สลาย 4 – เทอร์เทียร์ – ออกทิลฟีนอล

### 2.13.3 การทดสอบการทำงานของอนุมูลไฮดรอกซิล

Gryglik และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาค่าทางจลนพลศาสตร์ของการสลายสเตียรอยด์ฮอร์โมนชนิดแอนโดรเจน 2 ชนิด ได้แก่ โบอลดีโนน (Boldenone) และเทรนโบโลน (Trenbolone) โดยส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการทำงานของอนุมูลไฮดรอกซิล โดยการเติมตัวขัดขวางการทำงานของอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical scavenger) ซึ่งในที่นี้คือเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (tert-butyl alcohol) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ลงในฮอร์โมนทั้ง 2 ชนิด แล้วทำการสลายฮอร์โมนทั้ง 2 ชนิดด้วย UV - C จากการศึกษาพบว่า การเติม เทอร์เชียรี บิวทิล - แอลกอฮอล์ ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่แตกต่างจากกรณีที่ไม่เติม เทอร์เชียรี บิวทิล - แอลกอฮอล์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสลายฮอร์โมนด้วย UV - C ไม่เกี่ยวข้องกับอนุมูลไฮดรอกซิลแต่เกี่ยวข้องกับความเข้มข้นเริ่มต้นของฮอร์โมนทั้ง 2 ชนิด และนอกจากนี้ยังได้ศึกษาการผลการเติม เทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ที่มีต่อการสลายเทรนโบโลนด้วยกระบวนการ  $H_2O_2 / UV$  พบว่า การเติม เทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ส่งผลให้อัตราการสลายเทรนโบโลนลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม เทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์

Maniero และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการกำจัดความเป็นฮอร์โมน 17 เบต้า - เอสโตรไดออล ( $17 \beta$  - estradiol, E2) และ 17 แอลฟา - เอทินิลเอสโตรไดออล ( $17 \alpha$  - ethinyl estradiol, EE2) ด้วยกระบวนการโอโซน และ โอโซนร่วมกับยูวี ( $O_3 / H_2O_2$ ) โดยส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทำงานของอนุมูลไฮดรอกซิลที่พีเอช 3, 7 และ 11 ตามลำดับ โดยมีการเติมเทอร์เชียรี บิวทานอล (Tert-butanol) ที่ความเข้มข้น 4 มิลลิโมลาร์ จากการศึกษาพบว่าที่พีเอช 3 การลดลงของฮอร์โมนเอสโตรเจนจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ที่พีเอช 7 และ 11 พบว่า การเติมเทอร์เชียรี บิวทานอล จะส่งผลให้อัตราการสลายตัวของฮอร์โมนทั้ง 2 ชนิดต่ำลง และหลงเหลือฮอร์โมนทั้ง 2 ชนิดสูงกว่าในกรณีที่ไม่เติมเทอร์เชียรี บิวทานอล โดยที่พีเอช 7 จะเหลือ E2 และ EE2 90 นาโนกรัมต่อลิตร และ 230 นาโนกรัมต่อลิตร ในทางตรงกันข้ามในกรณีที่ไม่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทานอล จะเหลือ E2 และ EE2 25 นาโนกรัมต่อลิตร และ 40 นาโนกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่พีเอช 11 ในกรณีที่ไม่เติมเทอร์เชียรี บิวทานอล จะเหลือ E2 และ EE2 90 นาโนกรัมต่อลิตร และ 300 นาโนกรัมต่อลิตร ส่วนกรณีที่ไม่เติมจะเหลือ E2 และ EE2 70 นาโนกรัมต่อลิตร และ 165 นาโนกรัมต่อลิตร

### 2.13.4 ผลกระทบจากไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตไอออน

Wu และ Linden (2010) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอนุมูลไฮดรอกซิลและอนุมูลคาร์บอเนตที่มีผลต่อการสลายยาปราบศัตรูพืชชนิดออกาโนฟอสฟอรัส (organophosphorus pesticides) 2 ชนิด ได้แก่ พาราไรออน (parathion) และคลอร์ไพริฟอส (chlorpyrifos) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (UV - C) และศึกษาผลกระทบการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ออัตราการสลายยาปราบศัตรูพืชทั้ง 2 ชนิด จากการศึกษาพบว่า การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับการสลายด้วย UV - C ทำให้อัตราการสลายยาปราบศัตรูพืชเพิ่มขึ้น โดยอัตราการสลายเป็นปฏิกิริยาอันดับที่สอง ซึ่งค่าคงที่ปฏิกิริยาของพาราไร



ออนกับอนุมูลไฮดรอกซิล เท่ากับ  $9.7 \pm 0.5 \times 10^9$  ต่อโมลวินาที ส่วนค่าคงที่ปฏิกิริยาคลอรีนไฟรฟอส เท่ากับ  $4.9 \pm 0.1 \times 10^9$  ต่อโมลวินาทีแต่เมื่อในน้ำมีไอออนคาร์บอเนตและไอออนคาร์บอเนตซึ่งสามารถเกิดเป็นอนุมูลคาร์บอเนต จะส่งผลให้อัตราการสลายยาปราบศัตรูพืชทั้ง 2 ชนิดลดลง โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาของพาราไรออนกับอนุมูลคาร์บอเนต เท่ากับ  $2.8 \pm 0.2 \times 10^6$  ต่อโมลวินาที ส่วนค่าคงที่ปฏิกิริยาคลอรีนไฟรฟอส เท่ากับ  $8.8 \pm 0.4 \times 10^6$  ต่อโมลวินาที

Imoberdorf และ Mohseni (2011) ได้ทำการศึกษาการสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ (NOM) ด้วย VUV โดยส่วนหนึ่งของงานวิจัยได้ศึกษาถึงผลกระทบของค่าความเป็นด่างในน้ำ (ไอออนไบคาร์บอเนตและไอออนคาร์บอเนต) ซึ่งทำการทดลองโดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในน้ำดิบในปริมาณต่างๆ แล้วทำการวัดค่าคาร์บอนทั้งหมดในน้ำ (TOC) ซึ่งพบว่าอัตราการลดลงของ TOC ลดลง เนื่องจากไอออนทั้งสองชนิดเป็นตัวขัดขวางการทำงานของอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งจะปลดความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ NOM สลายได้น้อยลง และไอออนทั้งสองชนิดนี้จะดูดซับแสงที่ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร ซึ่งถือเป็นการลดจำนวนโฟตอนที่ไปโฟโตไลซิสน้ำ

#### 2.13.5 การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในการสลายสเตียรอยด์ฮอร์โมน

Liu และ Liu (2004) ได้ทำการศึกษาการสลายฮอร์โมนเอสโตรเจน 2 ชนิด คือ 17 เบต้า- เอสตระไดออล (17  $\beta$  - estradiol, E2) และ estrone (E1) โดยใช้กระบวนการโฟโตไลซิสโดยตรง คือการใช้หลอดฆ่าเชื้อที่ให้แสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงคลื่น 254 นาโนเมตร (UV-C) กำลัง 30 วัตต์ และหลอดไอปรอทความดันสูงที่ให้ความยาวคลื่นมากกว่า 365 นาโนเมตร (UV-A) กำลัง 125 วัตต์ ซึ่งจากการทดลองพบว่า E2 ถูกสลายได้ด้วย UV-C และ E1 สามารถสลายได้ด้วย UV-A และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo - first - order) และพบว่า การสลายตัวของฮอร์โมนทั้งสองชนิดนี้เกิดจากการแตกตัวของวงแหวนเบนซีนในโครงสร้าง และตรวจพบสารที่มีองค์ประกอบของกลุ่มคาร์บอนิลหลังจากที่ฮอร์โมนเกิดการสลายตัว นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลของพีเอชพบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นในช่วง 2 - 8 อัตราการเกิดโฟโตไลซิสเพิ่มขึ้นแต่เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเกิดโฟโตไลซิสลดลง

Rosenfeldt และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นฮอร์โมนเอสโตรเจนและการออกซิเดชันของฮอร์โมน 17 เบต้า- เอสตระไดออล (17  $\beta$  - estradiol, E2) และ 17 แอลฟา - เอทินิล เอสตระไดออล (17  $\alpha$  - ethinyl estradiol, EE2) โดยใช้กระบวนการโฟโตไลซิสโดยตรงและการไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งมีการใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดไอปรอทความดันปานกลาง และไอปรอทความดันต่ำ จำนวน 4 หลอด มีกำลังหลอดละ 15 วัตต์ และทดลองโดยที่ความเข้มข้นต่างๆ และมีการตรวจสอบความเป็นฮอร์โมนเอสโตรเจนโดยวิธีการใช้ยีสต์ (YES) ผลการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตไลซิส กับค่าทางจลนพลศาสตร์ของความเป็นฮอร์โมนเอสโตรเจนค่าทางจลนพลศาสตร์ของความเป็นฮอร์โมนจะสูงกว่าค่าทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตไลซิสซึ่งมีสาเหตุจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการได้รับแสงโดยผลิตภัณฑ์นี้จะมีความเป็นฮอร์โมนมากกว่าโมเลกุลเริ่มต้น และใน

กรณีกระบวนการออกซิเดชัน พบว่าจะไม่มีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเกิดขึ้น ซึ่งค่าทางจลพลศาสตร์ของความเป็นฮอร์โมนไม่ต่างจากค่าทางจลพลศาสตร์ของกระบวนการออกซิเดชันมากนัก โดยกระบวนการออกซิเดชันมีประสิทธิภาพในการกำจัด ความเป็นฮอร์โมนของ E2 และ EE2 ได้ 90%

Leech และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการสลายฮอร์โมนเอสโตรเจน ชนิด 17 เบต้า – เอสโตรไดออล (17  $\beta$  – estradiol, E2) ในน้ำที่มีคาร์บอนละลายน้ำ (DOC) เปรียบเทียบกับน้ำที่ไม่มี DOC โดยใช้แสงอาทิตย์ที่มีแหล่งกำเนิดจากเครื่องกำเนิดแสงอาทิตย์ (UV-A และ UV-B) และในกรณีที่ใช้เฉพาะ UV-B โดยมีความเข้มแสงคงที่ที่ 650 วัตต์ต่อตารางเมตรผลการทดลองพบว่า การใช้แสงอาทิตย์จะให้ประสิทธิภาพในการสลาย E2 ประมาณ 26 % แต่ประสิทธิภาพในการสลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำมีปริมาณ DOC อยู่ในช่วง 2.0 – 15.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยประสิทธิภาพในการสลายจะเพิ่มขึ้นประมาณ 40 – 50 % และค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นอันดับที่หนึ่งเทียม โดยค่าคงที่ของปฏิกิริยาของโฟโตไลซิสเท่ากับ 0.5 ต่อชั่วโมง

Grylik และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาการสลายฮอร์โมนแอนโดรเจน 2 ชนิด ได้แก่ โบอลดีโนน (boldenone, BD) และ เทรนโบโลน (trenbolone, TB) โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร โดยความเข้มแสงอยู่ในช่วง 11.8 – 29.1 วัตต์ต่อตารางเมตร เมื่อทำการทดสอบการดูดกลืนสเปกตรัมพบว่า BD ดูดกลืนแสงในช่วง 252 นาโนเมตรซึ่งใกล้เคียงกับ UV-C ในขณะที่ TB ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นได้สูงสุดที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร และในการทดสอบการสลายฮอร์โมน 2 ชนิดนี้ด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสพบว่า BD สลายตัวได้เร็วกว่า TB โดย BD สามารถสลายไป 50 % เมื่อเวลาผ่านไปเพียง 11 วินาที แต่ TB ใช้เวลาในการสลาย 30 นาที และได้มีการสลาย TB โดยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยทำให้การสลาย TB เร็วขึ้นและอัตราการสลายสูงสุดเมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นกรด

Bledzka และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาการสลายสารที่รบกวนต่อการทำงานของต่อมไร้ท่อ (endocrine disruptors) 4 ชนิด ได้แก่ เอ็น – บิวทิลพาราเบน (n – butylparaben, BP), 4 – ที – ออกทิลฟีนอล (4 – t – octylphenol, OP), เทรนโบโลน (trenbolone, TB) และโบลดีโนน (boldenone, BD) ซึ่งสองชนิดหลังนี้เป็นฮอร์โมนแอนโดรเจนสังเคราะห์ โดยทำการศึกษาการสลายด้วย 3 กระบวนการ คือกระบวนการโฟโตไลซิสโดยตรง ซึ่งใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กระบวนการออกซิเดชัน และกระบวนการออกซิเดชันสารที่ไวต่อแสง (photosensitized oxidation) ผลการศึกษาด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสพบว่า สารที่ลดลงเร็วที่สุดคือ BD รองลงมา BP, TB และ OP ตามลำดับ โดย BD ลดลง 50% โดยใช้เวลาเพียง 2 วินาที ส่วน TB ต้องใช้เวลา 26 นาที ผลการสลายด้วยกระบวนการออกซิเดชัน (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ซึ่งพบว่าการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยให้อัตราการสลายเร็วขึ้น ส่วนการสลายด้วยกระบวนการออกซิเดชันสารที่ไวต่อแสงมีข้อดีที่ราคาถูกเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้แสงอาทิตย์ได้ แล้วใช้อากาศเป็นแหล่งออกซิเจน แต่มีข้อจำกัดคือ หลังจากการบำบัดแล้วต้องมีวิธีการแยกตัวที่ไวต่อแสงออกมา

Vulliet และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาการสลายฮอร์โมนเทสโทสเตอโรนในน้ำ ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 และ 313 นาโนเมตร ในสารละลายบัฟเฟอร์ ฟอสเฟตและในน้ำธรรมชาติ ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพีเอช และผลิตภัณฑ์ที่เกิดหลังจากการสลายด้วยแสง พบว่า ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรสามารถสลายฮอร์โมนเทสโทสเตอโรนได้เร็วกว่าความยาวคลื่น 313 นาโนเมตรโดย ฮอร์โมนเทสโทสเตอโรนสลายไป 90 % เมื่อเวลาผ่านไป 9 นาที แต่ที่ความยาวคลื่น 313 นาโนเมตร ต้องใช้เวลา 11 ชั่วโมง จึงจะสามารถสลายฮอร์โมนเทสโทสเตอโรนได้ 90 % และพบว่าพีเอชไม่มีผลต่อการสลายฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นอนุพันธ์ของควิโนน (quinone) ซึ่งสลายด้วยแสงได้ช้ากว่าฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน

Chowdhury และคณะ (2011) ได้ศึกษาการสลายฮอร์โมน 17 เบต้า- เอสตราไดออล (17  $\beta$  - estradiol, E2) ธรรมชาติ โดยใช้แสงอาทิตย์ซึ่งกำเนิดจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ และได้ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสลาย E2 ได้แก่ องค์ประกอบอื่นๆ ในน้ำ เช่น  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  และความขุ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของความเข้มของแสงอาทิตย์ E2 โดยจากการศึกษาพบว่าสลายของ E2 มีค่าทางจลนพลศาสตร์เป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 โดยมีค่าคงที่ปฏิกิริยาเท่ากับ  $0.0652 \pm 0.0033$  ต่อชั่วโมง การเติมอากาศเข้าไประหว่างการสลาย E2 ช่วยทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นประมาณ 32 % การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นส่งผลให้การสลาย E2 ลดลงเล็กน้อย การเพิ่มความเข้มแสงส่งผลให้การสลายเพิ่มขึ้น พีเอชที่เป็นกลางประมาณ 7 ส่งผลให้การสลาย E2 สูงที่สุด ในน้ำที่มี  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  อัตราการสลาย E2 เพิ่มขึ้น แต่ในน้ำที่มี  $\text{HCO}_3^-$  จะส่งผลให้อัตราการสลาย E2 ลดลง เนื่องจากเป็นตัวขัดขวางการทำงานของอนุมูลไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^\cdot$ ) และความขุ่นก็ส่งผลให้อัตราการสลาย E2 ลดลง เนื่องจากความขุ่นเป็นตัวขัดขวางการส่องผ่านของแสง

Caupos และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC) ที่มีต่อการสลายฮอร์โมนเอสโตรน (estrone, E1) โดยใช้แสงอาทิตย์จากเครื่องกำเนิดแสงอาทิตย์ที่มีกำลังแสง 250 วัตต์ต่อตารางเมตร จากการทดลองพบว่าในกรณีในน้ำมี DOC จะส่งผลให้การสลาย E1 ดีกว่าในกรณีในน้ำไม่มี DOC โดยในกรณีที่ไม่มี DOC E1 ลดลง 50 % ในเวลา 8 ชั่วโมง ในขณะที่ในน้ำมี DOC E1 จะลดลงได้มากกว่า 50 % โดยลดได้สูงสุดประมาณ 76 % ในเวลา 8 ชั่วโมง ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์เป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 โดยค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาในกรณีไม่มี DOC เท่ากับ 0.09 ต่อชั่วโมงและในกรณีที่มี DOC จะมากกว่า 0.1 ต่อชั่วโมง และเมื่อมีการเติม 2 - โพรพานอล (2 - propanol) และ เอไซด์ไอออน ( $\text{N}_3^-$ ) ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการทำงานของอนุมูลไฮดรอกซิล และออกซิเจนอะตอมเดี่ยว ตามลำดับ การเติมตัวขัดขวางนี้จะส่งผลให้ค่าทางจลนพลศาสตร์ลดลงเป็น 0.07 ต่อชั่วโมง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสลายด้วยแสงจะพบผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 5 ตัวโดย 1 ตัวเกิดจากกระบวนการโฟโตไลซิสโดยตรงส่วนอีก 4 ตัวพบในกรณีน้ำที่มี DOC ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นไอโซเมอร์ของ E1 หรืออาจเป็นอนุพันธ์ของอินอล (enol)

Tang และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาการสลายฮอร์โมนควิเนสทรอล (quinestrol) ที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้แสงอาทิตย์ในฤดูร้อนและใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีแหล่งกำเนิดจากหลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร มีกำลัง 250 วัตต์ และมีการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการสลายควิเนสทรอล ได้แก่ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ชนิดของน้ำ และความเข้มข้นเริ่มต้นของควิเนสทรอล จากการสลายด้วยแสงทั้ง 2 ชนิดพบว่าอัตราการสลายควิเนสทรอลเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเทียม (pseudo – first – order) โดยอัตราการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ( $k = 0.018$  ต่อวินาที) จะเร็วกว่าการสลายด้วยแสงอาทิตย์ ( $k = 0.004$  ต่อวินาที) การเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะส่งผลให้อัตราการสลายควิเนสทรอลเร็วขึ้น ผลการศึกษาชนิดของน้ำพบว่าอัตราการสลายควิเนสทรอลในน้ำประปาโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร จะให้อัตราการสลายสูงที่สุด ส่วนการใช้แสงอาทิตย์พบว่าในแม่น้ำจะให้ค่าอัตราการสลายสูงที่สุด ความเข้มข้นเริ่มต้นของควิเนสทรอลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการสลายควิเนสทรอลลดลง นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการสลาย โดยพบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอย่างน้อย 10 ชนิด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ควิเนสทรอลสามารถสลายเกิดเป็นอนุพันธ์ของเอสโตรน (estrone)

Whidbey และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาการสลายฮอร์โมนเอสโตรเจน 5 ชนิดที่พบในน้ำ ซึ่งได้แก่ 17 เบต้า – เอสโตรไดออล ( $17 \beta$  – estradiol, E2), 17 แอลฟา – เอทีนิลเอสโตรไดออล ( $17 \alpha$  – ethinyl estradiol, EE2), เอสโตรน (estrone, E1), อีควิลิน (equilin, EQ) และ อีควิลินิน (equilenin, EQN) โดยใช้แสงอาทิตย์ที่มีต้นกำเนิดจากเครื่องกำเนิดแสงอาทิตย์จำลอง มีการศึกษาการหลงเหลือความเป็นฮอร์โมนโดยใช้ยีสต์เป็นตัวทดสอบ (YES) และมีการศึกษาถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสลายด้วยแสง พบว่า อัตราการสลายฮอร์โมนทั้ง 5 ชนิด เป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (pseudo – first – order) จากการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตไลซิสโดยตรงของ E2 เท่ากับ  $(2.5 \pm 0.4) \times 10^{-5}$  ต่อวินาที E1 เท่ากับ  $(2.9 \pm 2) \times 10^{-4}$  ต่อวินาที แต่เมื่อในน้ำมีตัวที่ไวต่อแสง (sensitizers) จะส่งผลให้อัตราการสลาย E2, EE2 และ EQ เพิ่มขึ้น แต่อัตราการสลาย E1 และ EQN จะช้าลง และจากผลการทดสอบการหลงเหลือความเป็นฮอร์โมนจะพบความเป็นฮอร์โมนในระดับกลาง ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของ E1 โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ ลูมิเอสโตรน (Lumiestrone)

ตารางที่ 2 - 6 ตารางสรุปการใช้กระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในการสลายฮอร์โมนสเตียรอยด์

ผู้ศึกษา	ชนิดฮอร์โมน	ชนิด UV / กระบวนการ	พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา	ผลการศึกษา
Liu และ Liu, 2004	เอสโตรเจน (E2 และ E1)	UV - C (30 W) UV - A (125 W)	- ค่าทางจลนพลศาสตร์ - pH - ความเข้มข้นเริ่มต้น	- เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม - อัตราการสลายเพิ่มขึ้นเมื่อ pH อยู่ในช่วง 3 - 8 - อัตราการสลายลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น
Rosenfeldt และคณะ, 2007	เอสโตรเจน (E2 และ EE2)	UV - C H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV	- ค่าทางจลนพลศาสตร์ของความเป็นฮอร์โมนเอสโตรเจน	ในกรณีการใช้ UV - C ค่าทางจลนพลศาสตร์ของความเป็นฮอร์โมนสูงกว่าค่าทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตไลซิส แต่ในกรณี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV ค่าทางจลนพลศาสตร์ไม่แตกต่างกัน
Leech และคณะ, 2009	เอสโตรเจน (E2)	UV - A และ UV - B	- ผลกระทบจาก DOC ในน้ำ โดยดูจากค่าทางจลนพลศาสตร์	ในน้ำที่มี DOC ทำให้ประสิทธิภาพการสลายสูงขึ้นประมาณ 40 - 50 %
Gryglik และคณะ, 2010	แอนโดรเจน (BD และ TB)	UV - C H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV	- ประสิทธิภาพการสลาย	BD สลายได้เร็วกว่า TB เมื่อใช้ UV - C โดย BD สลายได้ 50 % เมื่อเวลาผ่านไป 11 วินาที แต่ TB ต้องใช้เวลาถึง 30 นาที ส่วนการใช้ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / UV สลาย BD พบว่าช่วยทำให้การสลายเกิดได้เร็วขึ้น

ตารางที่ 2 - 6 ตารางสรุปการใช้กระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในการสลายฮอร์โมนสเตียรอยด์ (ต่อ)

ผู้ศึกษา	ชนิดฮอร์โมน	ชนิด UV / กระบวนการ	พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา	ผลการศึกษา
Vulliet และคณะ, 2010	เทสโทสเตอโรน	UV - C UV - B	- ประสิทธิภาพการสลาย	UV - C สลาย testosterone ได้ 90 % โดยใช้เวลา 9 นาที แต่ UV - B ต้องใช้เวลา 11 ชั่วโมง
Chowdhury และคณะ, 2011	เอสโตรเจน (E2)	UV - A และ UV - B	- ค่าทางจลนพลศาสตร์ - องค์ประกอบในน้ำ ( $\text{NO}_3^-$ , $\text{Fe}^{3+}$ , $\text{HCO}_3^-$ ) - ความขุ่น - ความเข้มข้นเริ่มต้นของ E2	- เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม - $\text{NO}_3^-$ , $\text{Fe}^{3+}$ ส่งผลให้อัตราการสลายเพิ่มขึ้น แต่ $\text{HCO}_3^-$ ส่งผลให้อัตราการสลายลดลง - ความขุ่นส่งผลให้อัตราการสลายลดลง - ความเข้มข้นเริ่มต้นส่งผลให้อัตราการสลายลดลงเล็กน้อย
Caupos และคณะ, 2011	เอสโตรเจน (E1)	UV - A และ UV - B	- ค่าทางจลนพลศาสตร์ - ผลกระทบจาก DOC - ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น	- เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม - ในน้ำที่มี DOC ส่งผลให้อัตราการสลายสูงขึ้น - ผลิตภัณฑ์เป็นอนุพันธ์ของอินอล

ตารางที่ 2 - 6 ตารางสรุปการใช้กระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในการสลายฮอร์โมนสเตียรอยด์ (ต่อ)

ผู้ศึกษา	ชนิดฮอร์โมน	ชนิด UV / กระบวนการ	พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา	ผลการศึกษา
Tang และคณะ, 2012	เอสโตรเจน (quiestrol)	- UV - C (250 W) - UV - A และ UV - B	- ค่าทางจลนพลศาสตร์ - ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติม - ชนิดของน้ำ - ความเข้มข้นเริ่มต้นของฮอร์โมน	- เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม - เพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัตราปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น - การสลายฮอร์โมนในน้ำประปาด้วย UV - C .จะให้อัตราการสลายสูงที่สุด แต่ในแม่น้ำมีอัตราการสลายสูงที่สุดเมื่อใช้ UV - A และ UV - B - อัตราการสลายลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น
Whidbey และคณะ, 2012	Estrogen (E2, EE2, E1, EQ และ EQN)	UV - A และ UV - B	- ค่าทางจลนพลศาสตร์ - ความเป็นฮอร์โมนเอสโตรเจน - ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น	- เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม - พบว่าเป็นฮอร์โมนจากการสลาย E1 - ลูมิเอสโทรน

หมายเหตุ :

- E2 คือ 17 เบต้า- เอสตระไดออล
- EE2 คือ 17 แอลฟา -เอทินิล เอสตระไดออล
- BD คือ โบลดีโนน
- TB คือ เทรนโบโลน
- E1 คือ เอสโทรน
- EQ คือ อีควิลิน
- EQN คือ อีควิลีนิน

## 2.14 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษามา พบว่า 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน หรือ MT เป็นฮอร์โมนที่นิยมใช้ในการแปลงเพศปลาชนิดนี้ เป็นสเตียรอยด์ฮอร์โมนเพศชายสังเคราะห์ ซึ่งมีฤทธิ์เป็นสารรบกวนการทำงานของระบบต่อมไร้ท่อในมนุษย์และสัตว์หากได้รับในปริมาณที่มากเกินไป ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดฮอร์โมนที่ปนเปื้อนในน้ำก่อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งจากงานวิจัยหลายๆงาน พบว่า UV – C สามารถสลายสเตียรอยด์ฮอร์โมนเพศหญิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีงานส่วนน้อยที่จะศึกษาการสลายสเตียรอยด์ฮอร์โมนเพศชายด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจทำการศึกษาการสลาย MT ซึ่งเป็นสเตียรอยด์ฮอร์โมนเพศชายด้วย UV – C และจากงานวิจัยที่ได้ศึกษาการสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำพบว่าการใช้ VUV จะให้ประสิทธิภาพการสลายดีกว่าการใช้ UV – C ดังนั้นในงานวิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำ VUV มาใช้สลาย MT เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายของ UV – C โดยกำลังหลอดไฟทั้งสองชนิดอยู่ที่ 20 วัตต์ แต่กำลังของหลอดจริงจะไม่ถึง 20 วัตต์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการวัดพลังงานแสงที่เกิดขึ้นจริงในถังปฏิกรณ์ ซึ่งสามารถคำนวณกลับเพื่อหากำลังที่ใช้จริง กลไกหลักที่ทำให้เกิดการสลาย MT อาจเกิด 2 กลไก คือ กระบวนการโฟโตไลซิส หรือ กระบวนการออกซิเดชัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากลไกหลักที่เกิดขึ้นด้วยการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบจากไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนที่อยู่ในน้ำ เนื่องจากไอออนทั้งสองชนิดนี้อาจเป็นตัวขัดขวางการออกซิเดชันของของอนุมูลไฮดรอกซิล หากกลไกหลักของการสลาย MT เป็นกระบวนการออกซิเดชัน

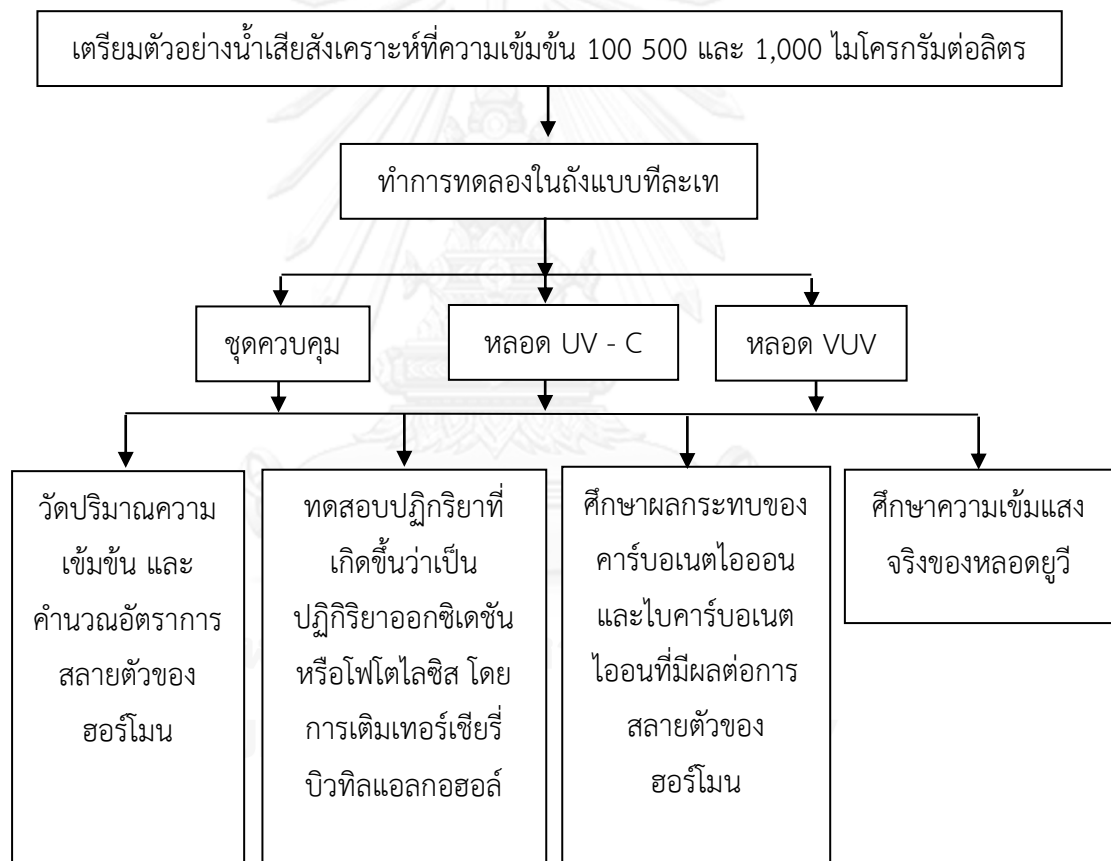


### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV – C และ VUV โดยทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้วางแผนการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3 - 1



ภาพที่ 3 - 1 ขั้นตอนการศึกษาในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 หลอด UV-C รุ่น TL – K ยี่ห้อ Philips และหลอด VUV รุ่น TW18D15L356 กำลัง 20 วัตต์

- 3.2.2 ถังปฏิกรณ์ปริมาตรน้ำ 10 ลิตร
- 3.2.3 เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) รุ่น 1100 Series ยี่ห้อ Agilent
- 3.2.4 ชุดกรองแบบสุญญากาศ
- 3.2.5 ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป ยี่ห้อ pyrex และ ยี่ห้อ Duran
- 3.2.6 เครื่องชั่ง ยี่ห้อ AND
- 3.2.7 นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ casio
- 3.2.8 เข็มฉีดยาขนาด 3 มิลลิลิตร ยี่ห้อ Nipro
- 3.2.9 คอลัมน์ C 8 ยี่ห้อ Waters®
- 3.2.10 เครื่องสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็ง (Solid Phase Extraction: SPE)
- 3.2.11 กระจาดกรอง Membrane Filter ยี่ห้อ Filtrex
- 3.2.12 Cartridges ชนิด PEP ยี่ห้อ Cleanert
- 3.2.13 Syringe Filter ยี่ห้อ Filtrex
- 3.2.14 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV – Vis Spectrophotometer) รุ่น Heios Alpha Cat.no. 9423 UVA 1002E ยี่ห้อ Thermo Electron Corporation

### 3.3 สารเคมีและอื่นๆ

- 3.3.1 สาร 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (17 $\alpha$ -Methyltestosterone) HPLC grade ความบริสุทธิ์มากกว่า 97 % ยี่ห้อ Sigma - Aldrich
- 3.3.2 เอทิลอะซิเตท (Ethyl Acetate) HPLC grade ยี่ห้อ Labscan
- 3.3.3 อะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile) HPLC grade ยี่ห้อ Labscan
- 3.3.4 เมทานอล (Methanol) HPLC grade ยี่ห้อ Labscan
- 3.3.5 น้ำดีไอ
- 3.3.6 เทอร์เชียรีบิวทิลแอลกอฮอล์ (Tert – butyl alcohol) HPLC grade ยี่ห้อ Panreac
- 3.3.7 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide) AR grade ยี่ห้อ Ajax
- 3.3.8 โพแทสเซียมไอโอเดต (Potassium iodate) AR grade ยี่ห้อ Ajax
- 3.3.9 บอแรกซ์ (Borax) AR grade ยี่ห้อ Ajax
- 3.3.10 แอมโมเนียมเฟอริกซัลเฟตโดเดคาไฮเดรต (Ammonium Ferric Sulfate Dodecahydrate) AR grade ยี่ห้อ Loba

- 3.3.11 โพแทสเซียมออกซาลเลต – วัน –ไฮเดรต (Potassium – 1 – hydrate) AR grade ยี่ห้อ Loba
- 3.3.12 กรดซัลฟิวริก(Sulfuric acid) AR grade ยี่ห้อ Labscan
- 3.3.13 1 – 10 – ฟีนแอนโทรลีนโมโนไฮเดรต(1 – 10- phenanthroline) AR grade ยี่ห้อ Ajax
- 3.3.14 โซเดียมอะซิเตดแอนไฮไดรส์ (Sodium Acetate Anhydrous) AR grade ยี่ห้อ QRëC

### 3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 3 - 1 พารามิเตอร์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์	เครื่องมือและอุปกรณ์
ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน	เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC)
แหล่งกำเนิดแสง	หลอด UV-Cและหลอด VUV
ตรวจสอบกระบวนการโฟโตไลซิส โดยตรง(เติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์)	เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC)
ความเข้มแสงจริงของหลอดยูวี	เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV – Vis Spectrophotometer)

### 3.5 การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

3.5.1 เตรียมสารละลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ความเข้มข้นต่างๆดังนี้ 10 20 50 100 300 600 1,000 และ 1,200 ไมโครกรัมต่อลิตรเป็นสารละลายมาตรฐาน

3.5.2 กรองสารละลายมาตรฐาน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย Syringe Filter ชนิดไนลอน ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร

3.5.3 กรองเฟสเคลื่อนที่ คือ อะซิโตไนไตรล์(Acetonitrile) และน้ำด้วยชุดกรองแบบสุญญากาศโดยใช้กระดาษกรอง Membrane Filter ชนิดไนลอนขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร

3.5.4 วัดความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) โดยมีเฟสคงที่ (Reverse Phase) เป็นคอลัมน์ C 8 (150 มิลลิเมตร x 4.6 มิลลิเมตร x 5 ไมครอน) ที่อุณหภูมิ 40 ±

0.5 องศาเซลเซียส ความยาวคลื่น 245 นาโนเมตรและเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) คืออะซิโตน ไตรล์ (Acetonitrile) และน้ำที่อัตราไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยที่ 0 นาทีจะใช้อัตราส่วนอะซิโตน ไตรล์ : น้ำ ที่ 20 : 80 ที่ 19 นาที ที่อัตราส่วน 96 : 4 ที่ 20 นาทีอัตราส่วน 20 : 80 และเดินระบบ ด้วยอัตราส่วนนี้ต่อไปอีก 10 นาที

3.5.5 สร้างกราฟมาตรฐาน ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเทอโรนกับพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง

### 3.6 การศึกษาความเข้มแสงจริงของหลอด UV - C และ VUV

3.6.1 วิธีเพอริคอกซาเลตแอกทิโนมิเตอร์ (Goldstein, 2008 และ Rahn, 2003)

3.6.1.1 เตรียมสารละลายแอมโมเนียม เพอริค ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 0.002 โมลต่อลิตร (0.2411 กรัม) ในกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 นอ้มล ปริมาตร 250 มิลลิลิตร

3.6.1.2 เตรียมสารละลายโพแทสเซียม ออกซาเลต วัน ไฮเดรต ที่ความเข้มข้น 0.006 โมลต่อลิตร (0.2763 กรัม) ในกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 นอ้มล ปริมาตร 250 มิลลิลิตร

3.6.1.3 เตรียมสารละลาย 1 - 10 พีแนนโรลีนที่ความเข้มข้น 0.1 % ในแอนไฮดรัส โซเดียม อะซิเตท 1.8 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.6.1.4 ตวงสารละลายที่เตรียมในข้อ 3.6.8.2.1 และ 3.6.8.2 อย่างละ 40 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ 100 มิลลิลิตร โดยปริมาตรสารทั้งหมดเป็น 80 มิลลิลิตร นำบีกเกอร์ไปวางในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทโดยวาง 2 ตำแหน่ง คือกึ่งกลางถังปฏิกรณ์และด้านข้างถังปฏิกรณ์

3.6.1.5 ทำการฉายแสงด้วยหลอด UV - C เป็นเวลา 30 นาที

3.6.1.6 ปิเปตสารที่ผ่านการฉายแสงปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลาย 1 - 10 พีแนนโรลีนที่เตรียมในข้อ 3.6.8.2.3 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร แล้ววางสารทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์

3.6.1.7 นำสารละลายไปวัดค่าการดูดซับแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

3.6.1.8 นำค่าการดูดซับแสงมาคำนวณความเข้มแสง จากจุดกำเนิดที่แน่นอน (point source) โดยคำนวณได้จาก

$$\text{โมลของเพอริคอกซาเลต} = \frac{\Delta A \times V_1 \times V_3}{(\text{ไอส์ไตน์ต่อวินาที}) \Phi_{\lambda} \times \epsilon_{510} \times V_2 \times l \times t \times 1000}$$

เมื่อ  $\Delta A$  คือ ความต่างของค่าการดูดซับแสงระหว่างสารที่ผ่านการฉายแสงกับสารที่อยู่ในสถานะที่ไม่ผ่านการฉายแสง

$V_1$  คือ ปริมาตรสารที่ได้รับการฉายแสง (มิลลิลิตร)

$V_2$  คือ ปริมาตรสารที่แบ่งออกจาก  $V_1$  ซึ่งเท่ากับ 3 มิลลิลิตร

$V_3$  คือ ปริมาตรสุดท้ายที่ผ่านการเติมสารละลาย 1 – 10 พีแชนโรสสัน (มิลลิลิตร)

$\Phi_{\lambda}$  คือ ค่าควอนตัมยิวต์ของเฟอร์ส ไอออนที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.25

$\epsilon_{510}$  คือ Molar absorption coefficient = 11,100 ลิตรต่อโมลวินาที

$l$  คือ optical pathlength = 1 เซนติเมตร

$t$  คือ เวลาที่ผ่านการฉายแสง (วินาที)

ค่าความเข้มแสง =  $\frac{\text{โมลของเฟอร์สไอออน} \times 4.716 \times 10^8}{\text{พื้นที่ผิวของบีกเกอร์}}$   
(มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

เมื่อ  $4.716 \times 10^8$  คือ จำนวนมิลลิจูลต่อไอสไตน์ของโฟตอนที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

พื้นที่ผิวบีกเกอร์ เท่ากับ 16.62 ตารางเซนติเมตร

โดยค่าความเข้มแสงที่คำนวณได้สามารถนำไปหาค่ากำลังของแสงในถังปฏิกรณ์ได้

จาก

กำลังของแสง = ค่าความเข้มแสง  $\times$  พื้นที่ผิวของถังปฏิกรณ์

เมื่อ พื้นที่ผิวถังปฏิกรณ์ เท่ากับ 2,100 ตารางเซนติเมตร

### 3.7 การดำเนินงานวิจัยในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทโดยใช้ UV-C และ VUV

ตารางที่ 3 - 2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาโดยใช้ UV - C และ VUV

ตัวแปรต้น	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ชนิดของหลอดยูวี</li> <li>- ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเทอโรนที่ 100 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร</li> <li>- ผลกระทบจากการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์</li> <li>- ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตไอออนที่ 0.5 5.0 และ 50.0 มิลลิโมลาร์</li> </ul>
ตัวแปรตาม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเทอโรนที่ลดลง</li> <li>- ค่าทางจลนพลศาสตร์ (K)</li> <li>- กลไกที่เกิดขึ้น (ออกซิเดชันหรือโฟโตไลซิส)</li> </ul>
ตัวแปรควบคุม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 10 ลิตร</li> <li>- กำลังหลอดไฟ 20 วัตต์</li> </ul>

### 3.7.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำเสียเคราะห์

เตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน 100, 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตรโดยมีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

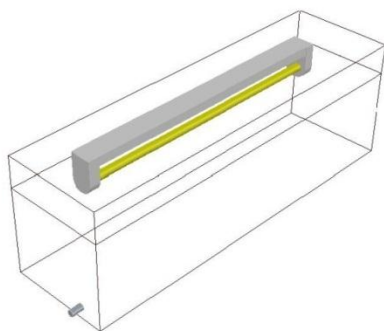
3.7.1.1 เตรียมสารละลายเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยชั่งน้ำหนัก 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนประมาณ 0.025 กรัม ละลายในเมทานอล 250 มิลลิลิตร

3.7.1.2 บีบสารละลายเข้มข้น ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ผสมลงในน้ำดีไอให้มีปริมาตรน้ำสุดท้าย 10 ลิตร

3.7.1.3 กวนผสมให้เข้ากัน แล้วเทลงในถังปฏิกรณ์

### 3.7.2 ทำการทดลองชุดควบคุม โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.7.2.1 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร ลงในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทที่มีความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3 - 2



ภาพที่ 3 - 2 ลักษณะถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท

3.7.2.2 ทำการทดลองโดยไม่มีการฉายแสง และเก็บน้ำที่เวลา 0 3 6 9 12 และ 15 นาทีทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

3.7.2.3 นำน้ำเสียที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างมากรองด้วยชุดด้วย Syringe Filter ชนิดไนลอน ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร

3.7.2.4 นำน้ำเสียที่ผ่านการกรองแล้วไปฉีดเข้าเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) แล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน โดยนำค่าพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านได้มาเทียบกับกราฟมาตรฐาน

3.7.2.5 ในกรณีที่วัดค่าความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ต่ำกว่า 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ให้นำน้ำเสียที่เก็บมาเตรียมตัวอย่างด้วยกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นด้วยเทคนิคสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็ง (SPE) โดยมีวิธีการทดลองดังนี้ (กัตตินาฎ, 2555)

3.7.2.5.1 ปรับสภาพ cartridge ชนิด PEP โดยเติมเอทิลอะซิเตท 5

มิลลิลิตร อะซิโตรไนไตรล์ 5 มิลลิลิตร และน้ำ 5 มิลลิลิตร

3.7.2.5.2 เติมตัวอย่างน้ำลงใน Cartridge 20 มิลลิลิตร

3.7.2.5.3 ล้าง Cartridge ด้วย Milipore water 5 มิลลิลิตร

3.7.2.5.4 ชะด้วยตัวทำละลายเมทานอล 5 มิลลิลิตร

3.7.2.5.5 นำตัวอย่างที่ผ่านการชะแล้วไประเหยด้วยก๊าซไนโตรเจนจน ปริมาตรลดลงเหลือ 1 มิลลิลิตร

3.7.2.5.6 แล้วย้นำตัวอย่างที่เตรียมฉีดเข้าเครื่องเครื่องแยกวิเคราะห์สาร ประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) แล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน โดยนำค่าพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านได้มาเทียบกับกราฟมาตรฐาน

3.7.2.5.7 คำนวณค่า % recovery โดย

$$\% \text{ recovery} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่วัดได้} \times 100}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}}$$

โดยค่าที่ยอมรับได้อยู่ในช่วง 70-120 %

3.7.3 ทำการทดลองสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV-C และ VUV โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.7.3.1 เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตรลงในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท

3.7.3.2 ทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C แล้วเก็บน้ำตัวอย่างที่เวลา 0 3 6 9 12 และ 15 นาที ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

3.7.3.3 นำน้ำเสียที่เก็บมารองผ่านชุด Syringe Filter ชนิดไนลอน ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร แล้ววัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) โดยนำค่าพื้นที่ใต้กราฟที่อ่านได้มาเทียบกับกราฟ มาตรฐาน ในกรณีที่วัดความเข้มข้นได้ต่ำกว่า 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ให้นำน้ำเสียไปเพิ่มความเข้มข้นด้วยเทคนิคสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็ง (SPE) แล้ววัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) อีกครั้งหนึ่ง

3.7.3.4 นำค่าความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณร้อยละการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน และคำนวณค่าทางจลนศาสตร์

หมายเหตุ ก่อนการวิเคราะห์ทุกวันมีการควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์โดยการฉีดสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 300 ไมโครกรัมต่อลิตร เพื่อตรวจสอบความพร้อมของเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูงก่อนทำการวิเคราะห์

3.7.3.5 ทำการทดลองซ้ำข้อ 3.6.3.1 - 3.6.3.4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเปลี่ยนทำการฉายแสงโดยใช้หลอด VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 100 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.7.4 การคำนวณร้อยละการสลายตัว

สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ร้อยละการสลายตัว} = \frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นสุดท้าย}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100$$

3.7.5 การคำนวณค่าทางจลพลศาสตร์

3.7.5.1 การคำนวณอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

3.6.5.1.1 สร้างกราฟระหว่างอัตราการการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน เทียบกับเวลา

3.6.5.1.2 หาความชันจากกราฟ โดยความชันที่ได้ คือ อันดับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

3.7.5.2 การคำนวณหาค่าคงที่ทางจลพลศาสตร์

3.6.5.2.1 สร้างกราฟระหว่าง  $\ln(C / C_0)$  เทียบกับเวลา

3.6.5.2.2 หาความชันจากกราฟ โดยความชันที่ได้ คือ ค่าคงที่ทางจลพลศาสตร์

3.7.6 ศึกษากลไกที่เกิดขึ้นจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV-C และ VUV

โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.7.6.1 เตรียมสารละลายเข้มข้น เทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (Tert - butyl alcohol) 1 โมลต่อลิตร (74.12 กรัมต่อลิตร) ในขวดปรับปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยปิเปตเทอร์เชียรีบิวทิลแอลกอฮอล์ประมาณ 47.5 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรครบ 500 มิลลิลิตร

3.7.6.2 เติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (Tert-butyl alcohol) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร โดยปิเปตจากสารละลายเข้มข้นที่เตรียมไว้ในข้อ 3.6.6.1 ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน 100, 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์สุดท้าย 10 ลิตร



3.7.6.3 ทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยในช่วง UV-C และ VUV ในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท แล้วทำการเก็บน้ำตัวอย่างน้ำที่เวลา 0 3 6 9 12 และ 15 นาทีทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

3.7.6.4 ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 3.7.3.3

3.7.6.5 นำค่าความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณร้อยละการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน และคำนวณค่าทางจลนศาสตร์

3.7.7 ศึกษาผลกระทบของไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนที่มีต่อการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV – C และ VUV โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.7.7.1 เตรียมสารละลายเข้มข้นโซเดียมไบคาร์บอเนต 500 มิลลิโมลต่อลิตร (42.005 กรัมต่อลิตร) ในขวดปรับปริมาตร 500 มิลลิลิตร ซึ่งโซเดียมไบคาร์บอเนตประมาณ 21.0025 กรัม ละลายในด้วยน้ำดีไอและปรับปริมาตรจนครบ 500 มิลลิลิตร

3.7.7.2 เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.5 5.0 และ 10.0 มิลลิโมลาร์ โดยเปิดจากสารละลายเข้มข้นที่เตรียมในข้อ 3.6.7.1 ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน 100 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์สุดท้าย 10 ลิตร

3.7.7.3 ทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยในช่วง UV-C และ VUV ในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท แล้วทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านการฉายแสงที่เวลา 0 3 6 9 12 และ 15 นาทีทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

3.7.7.4 ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 3.7.3.3

3.7.7.5 นำค่าความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณร้อยละการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน และคำนวณค่าทางจลนศาสตร์

### 3.8 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับ (EE / O)

โดยคำนวณที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$EE / O = \frac{P \times t \times 1000}{V \times 60 \times \log \frac{C_i}{C_f}}$$

เมื่อ	EE / O คือ	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับปฏิกิริยา (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร)
	P คือ	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)
	t คือ	เวลาที่ใช้ในการสลาย (นาที)

- V คือ ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์ (ลิตร)
- $C_i$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (ไมโครกรัมต่อลิตร)
- $C_f$  คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 3 - 3 ตารางสรุปจำนวนการทดลองและจำนวนการวิเคราะห์ในชุดควบคุม (ไม่มีการฉายแสง)

ความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอ โรน	ความเข้มข้น ไบคาร์บอเนต (มิลลิโมลาร์)	ความเข้มข้น เทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (มิลลิโมลาร์)	จำนวน การทดลองในถัง ปฏิกรณ์	จำนวน การวิเคราะห์
100 ไมโครกรัม ต่อลิตร	-	-	3	15
	-	5	3	15
	0.5	-	3	15
	5	-	3	15
	50	-	3	15
500 ไมโครกรัม ต่อลิตร	-	-	3	15
	-	5	3	15
1,000 ไมโครกรัม ต่อลิตร	-	-	3	15
	-	5	3	15
รวม			27	135

ตารางที่ 3 - 4 ตารางสรุปจำนวนการทดลองและจำนวนการวิเคราะห์โดยใช้ UV-C

ความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอ โรน	ความเข้มข้น ไบคาร์บอเนต (มิลลิโมลาร์)	ความเข้มข้น เทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (มิลลิโมลาร์)	จำนวน การทดลองในถัง ปฏิกรณ์	จำนวน การวิเคราะห์
100 ไมโครกรัม ต่อลิตร	-	-	3	15
	-	5	3	15
	0.5	-	3	15
	5	-	3	15
	50	-	3	15
500 ไมโครกรัม ต่อลิตร	-	-	3	15
	-	5	3	15
1,000 ไมโครกรัม ต่อลิตร	-	-	3	15
	-	5	3	15
รวม			27	135

ตารางที่ 3 - 5 ตารางสรุปจำนวนการทดลองและจำนวนการวิเคราะห์โดยใช้ VUV

ความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอ โรน	ความเข้มข้น ไบคาร์บอเนต (มิลลิโมลาร์)	ความเข้มข้น เทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (มิลลิโมลาร์)	จำนวน การทดลองในถัง ปฏิกรณ์	จำนวน การวิเคราะห์
100 ไมโครกรัม ต่อลิตร	-	-	3	15
	-	5	3	15
	0.5	-	3	15
	5	-	3	15
	50	-	3	15
500 ไมโครกรัม ต่อลิตร	-	-	3	15
	-	5	3	15
1,000 ไมโครกรัม ต่อลิตร	-	-	3	15
	-	5	3	15
รวม			27	135

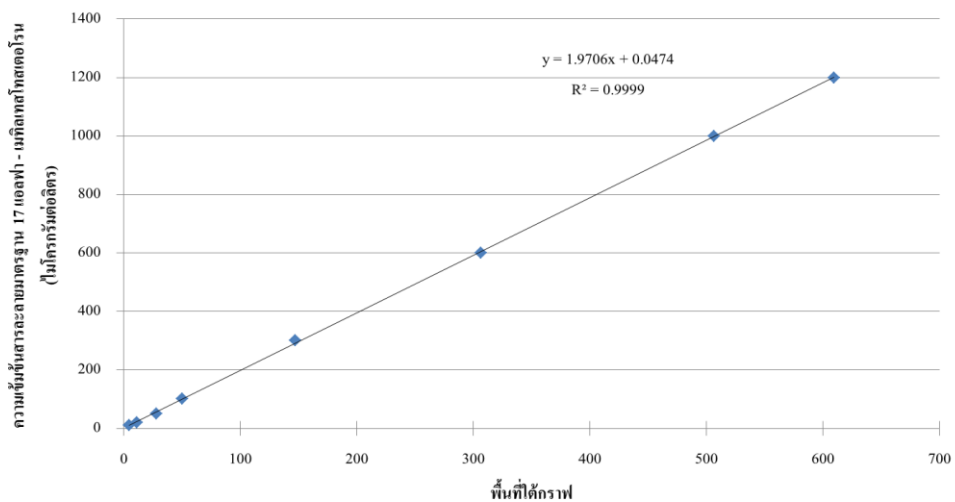
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพและค่าทางจลนพลศาสตร์ของการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ชนิด UV - C และ VUV ที่กำลัง 20 วัตต์ และได้ศึกษาถึงกลไกหลักที่เกิดขึ้นในระหว่างการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน โดยการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการออกซิเดชัน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลกระทบจากการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตที่มีต่อการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน และในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องศึกษาความเข้มแสงที่ออกมาจากหลอดไฟ ซึ่งจะมีประโยชน์ทำให้เราสามารถคำนวณกำลังที่แท้จริงของหลอดไฟได้

#### 4.1 การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน และการควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน จำเป็นต้องสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณค่าความเข้มข้น จากผลการวิเคราะห์สารด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง จากการทดลองโดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 10 20 50 100 300 1000 และ 1200 ไมโครกรัมต่อลิตร ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูงทำให้ได้ค่าพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ได้มาสร้างกราฟเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (ภาคผนวก ก) ดังแสดงในภาพที่ 4 - 1



ภาพที่ 4 - 1 กราฟมาตรฐานของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน

จากภาพที่ 4 – 1 พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ที่ 0.9999 ซึ่งจากกราฟสามารถคำนวณหาความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน โดย

$$y = 1.9706 + 0.0474x$$

เมื่อ  $y$  คือ ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (ไมโครกรัมต่อลิตร)

$x$  คือ พื้นที่ใต้กราฟ

ในกรณีที่ต้องมีการเตรียมตัวอย่างด้วยกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นด้วยเทคนิคสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็ง (SPE) จำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพของกระบวนการโดยดูได้จากค่า % Recovery จากการทดลองนี้จะมีค่า % Recovery อยู่ที่ 88.51 % ซึ่งอยู่ในช่วง 70 – 120 % จึงถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ (ภาคผนวก ก) แต่จะมีค่าต่ำกว่างานวิจัยของกัตตินาฏ (2555) ซึ่งอยู่ที่ 99.72 %

นอกจากนี้ก่อนการวิเคราะห์หาความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วยเครื่องเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความพร้อมของเครื่องก่อนใช้งาน โดยการฉีดสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 300 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยค่าที่อ่านได้จากเครื่องต้องมีค่าใกล้เคียงกับสารละลายมาตรฐานที่ฉีดไป โดยวิธีนี้ถือเป็นการควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์วิธีหนึ่ง

## 4.2 ผลการวัดความเข้มแสงจริงของหลอด UV – C และ VUV

### 4.2.1 ผลการวัดความเข้มแสงของหลอด UV – C (ภาคผนวก ข)

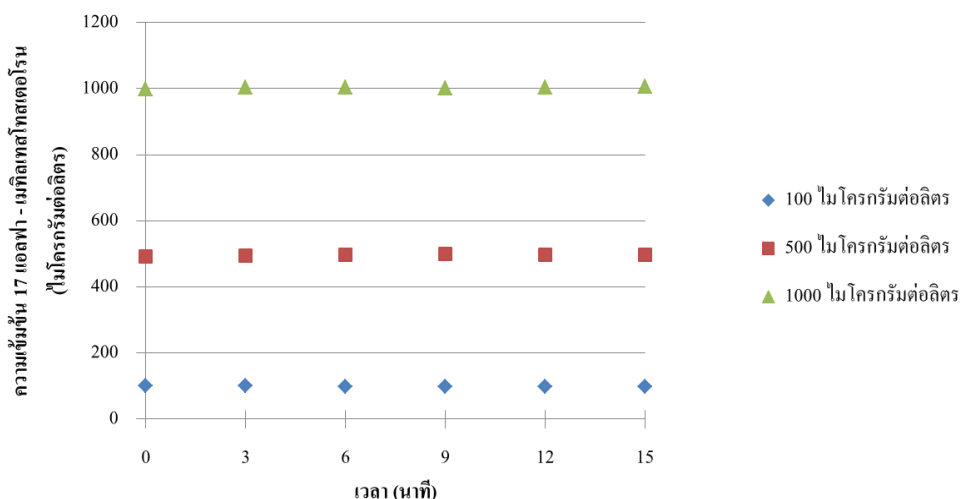
จากการทดลองด้วยวิธีเฟอริคออกซาลेटแอกทิโนมิเตอร์ ทั้งหมด 6 ตัวอย่าง สามารถวัดความเข้มแสงของหลอด UV – C เฉลี่ยได้เท่ากับ  $5.09 \pm 0.009$  มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งค่านี้สามารถนำไปคำนวณกำลังของแสงภายในถึงปฏิกรณ์ได้โดยนำพื้นที่ผิวของถึงปฏิกรณ์คูณกับค่าความเข้มแสงจะได้กำลังของแสงประมาณ 11 วัตต์

### 4.2.2 ผลการวัดความเข้มแสงของหลอด VUV

จากการทดลองด้วยวิธีเฟอริคจากการทดลองด้วยวิธีเฟอริคออกซาลेटแอกทิโนมิเตอร์ 6 ตัวอย่าง สามารถวัดความเข้มแสงของหลอด VUV เฉลี่ยได้เท่ากับ  $5.18 \pm 0.029$  มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งค่านี้สามารถนำไปคำนวณกำลังของแสงภายในถึงปฏิกรณ์ได้ โดยนำพื้นที่ผิวของถึงปฏิกรณ์คูณกับค่าความเข้มแสง จะได้กำลังของแสงประมาณ 11 วัตต์ จากผลการทดลองข้างต้นจะพบว่ากำลังของแสงที่เกิดขึ้นจากหลอด UV – C และ หลอด VUV มีค่าเท่ากัน คือประมาณ 11 วัตต์ เนื่องจากหลอด UV – C ให้ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร และหลอด VUV ให้ความยาวคลื่นในช่วง 185 – 254 นาโนเมตร โดยปกติหลอดชนิดนี้จะใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 40 เอร์เซ็นต์ เพื่อเปลี่ยนเป็นแสงยูวี (Light - sources, 2557: ออนไลน์) แต่จากการทดลองพบว่าหลอดทั้งสองชนิดใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 55 เอร์เซ็นต์

### 4.3 ผลการทดลองในชุดควบคุม (ไม่มีการฉายแสง)

จากการทดลองโดยเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน 100, 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ลงในถังปฏิกรณ์และไม่มีการฉายแสง (ภาคผนวก ค) ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4 – 2



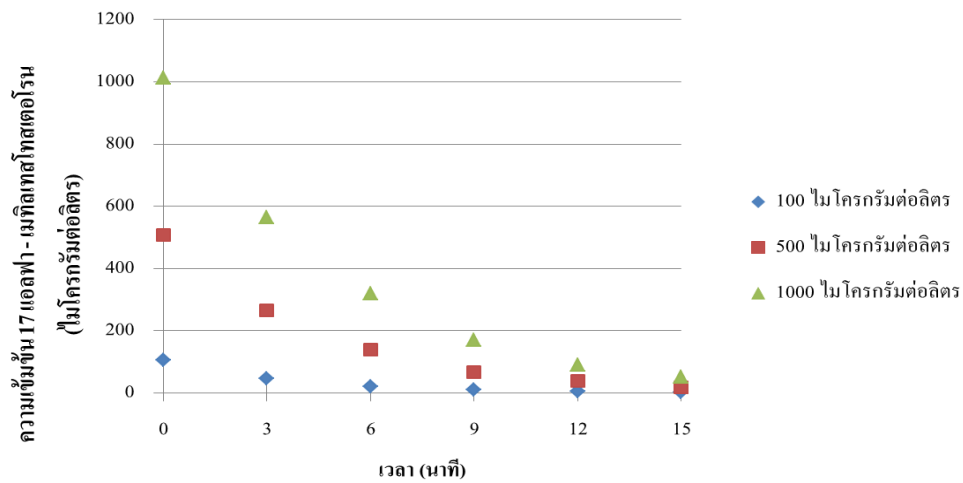
ภาพที่ 4 - 2 ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเมื่อเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ในการทดลองชุดควบคุม

จากภาพที่ 4 – 2 พบว่า ลักษณะกราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งก็คือในการทดลองชุดควบคุมที่ไม่มีการฉายแสง และใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรไม่มีการเปลี่ยนแปลง

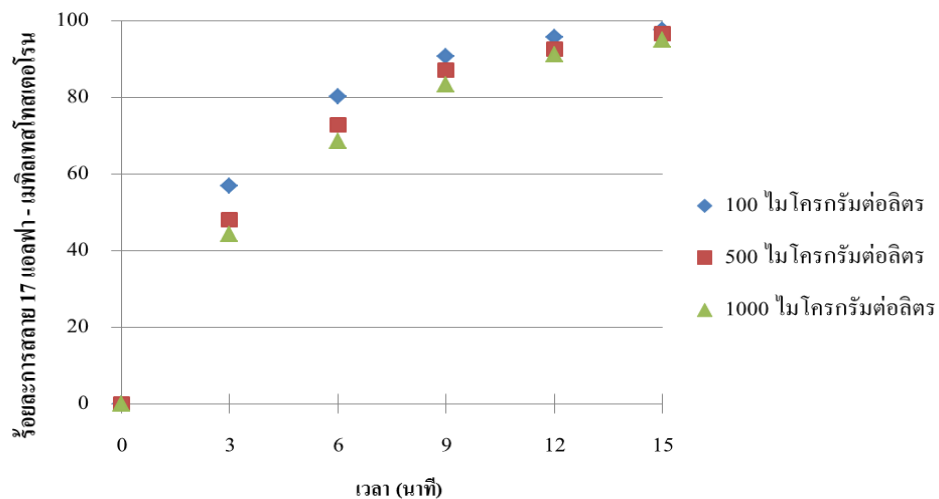
### 4.4 ประสิทธิภาพและค่าทางจลนพลศาสตร์ของการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

#### 4.4.1 ผลการทดลองด้วยหลอด UV - C

เมื่อทำการทดลองสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วย UV - C แล้ววัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่เวลาต่างๆ (ภาคผนวก ค) ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4 – 3 และสามารถคำนวณร้อยละการสลาย (ภาคผนวก ง) ซึ่งได้แสดงในภาพที่ 4 - 4



ภาพที่ 4 - 3 ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเมื่อเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆในการทดลองด้วย UV – C

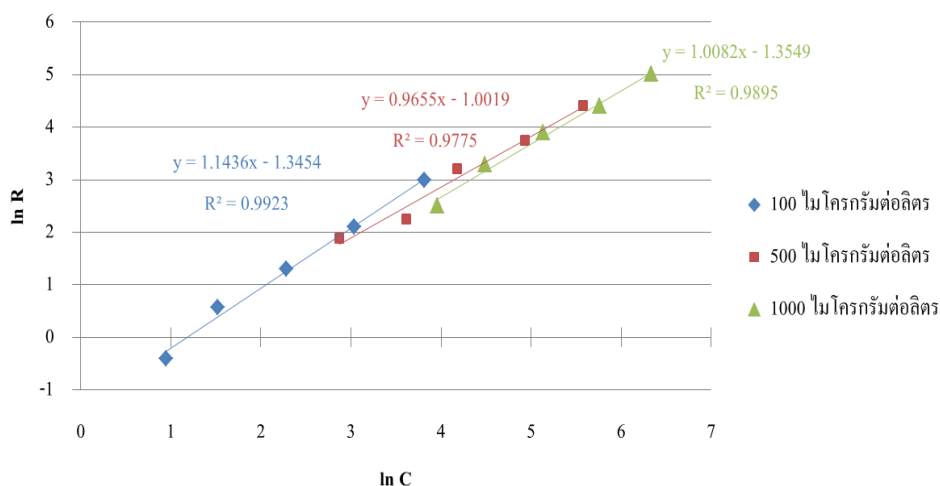


ภาพที่ 4 - 4 ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆในการทดลองด้วย UV – C

จากภาพที่ 4 - 3 พบว่าความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ค่อยๆ ลดลง โดยเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ลดลง เหลือ 2.57 17.74 และ 52.24 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน เริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ และจากภาพที่ 4 - 4 เป็นผลการคำนวณร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัม พบว่าร้อยละการสลายมีค่า 97.54 96.51

และ 94.84 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายลดลงเล็กน้อย

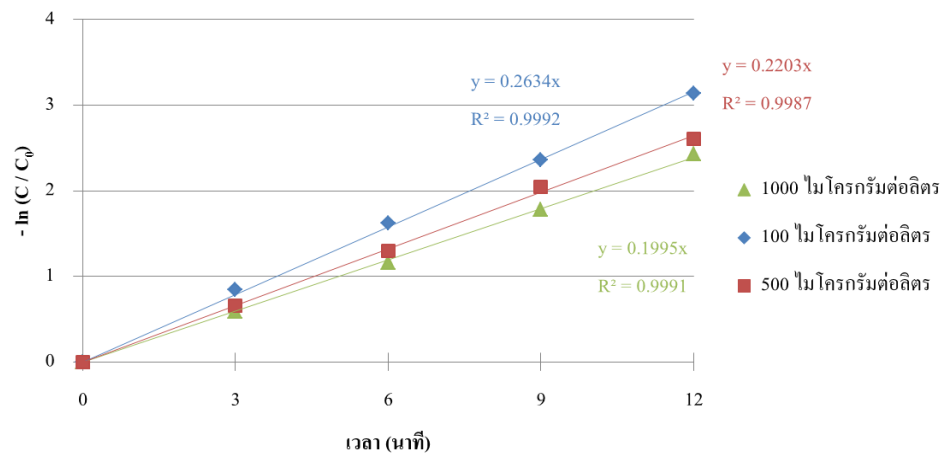
และเมื่อทำการศึกษาระดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก จ) โดยการสร้างกราฟระหว่าง  $\ln R$  เทียบกับ  $\ln C$  จะได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4 – 5



ภาพที่ 4 - 5 กราฟ  $\ln R$  เทียบกับ  $\ln C$  เพื่อหาอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรในชุดการทดลองด้วย UV - C

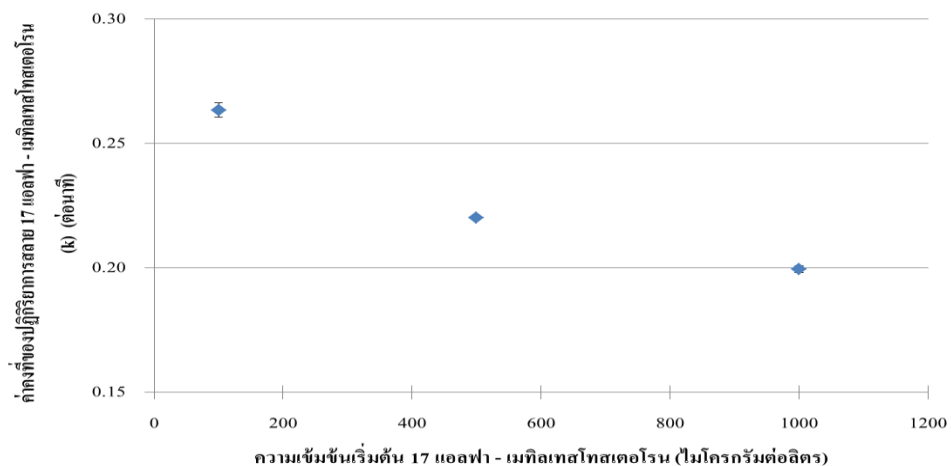
จากภาพที่ 4 – 5 ทุกความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน จะมีปฏิกิริยาการสลายเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งดูได้จากค่าความชันของกราฟ ซึ่งมีค่า 1.1436 0.9655 และ 1.0080 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และ Liu (2004) และ Tang และคณะ (2012) ที่ได้ทำการศึกษาระดับปฏิกิริยาการสลายสเตียรอยด์ฮอร์โมนเพศหญิง เมื่อทราบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง จึงสามารถคำนวณค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายได้ (ภาคผนวก ฉ) โดยการสร้างกราฟระหว่าง  $-\ln(C/C_0)$  เทียบกับ เวลา ดังแสดงในภาพที่ 4 – 6





ภาพที่ 4 - 6 กราฟ - ln (C / C<sub>0</sub>) เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV - C ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

จากภาพที่ 4 - 6 พบว่าค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน มีค่าเท่ากับ 0.2634 0.2203 และ 0.1995 ต่อเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน จะส่งผลให้ค่าคงที่ในการสลายลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ดังแสดงในภาพที่ 4 - 7



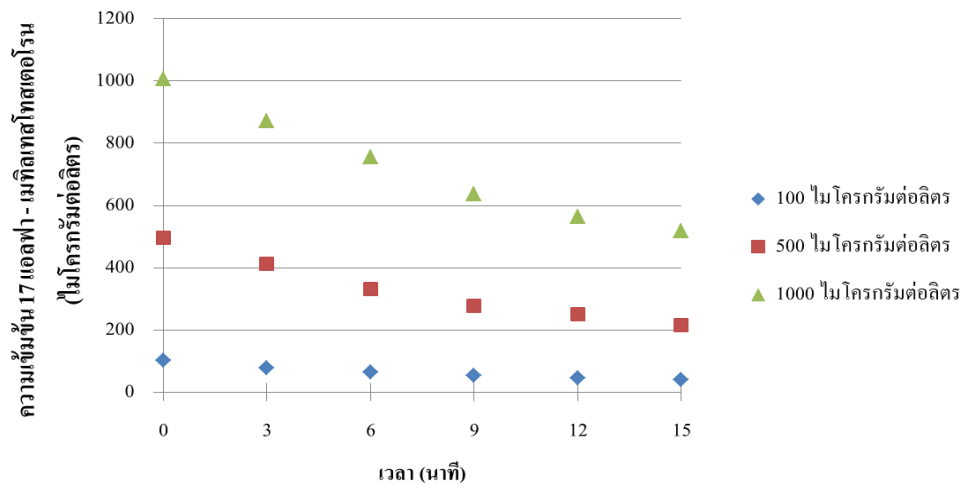
ภาพที่ 4 - 7 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (k) เทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ในการทดลองด้วย UV - C

จากภาพที่ 4 - 7 พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน มีผลต่อค่าคงที่ของปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ (ระดับความเชื่อมั่น 0.05) ซึ่งสามารถตามหาคำนวนทางสถิติในภาคผนวก ข โดยจะส่งผลให้ค่าคงที่ปฏิกิริยามีค่าน้อยลง ทำให้การสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน เกิดได้ช้าลง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนต่ำลง

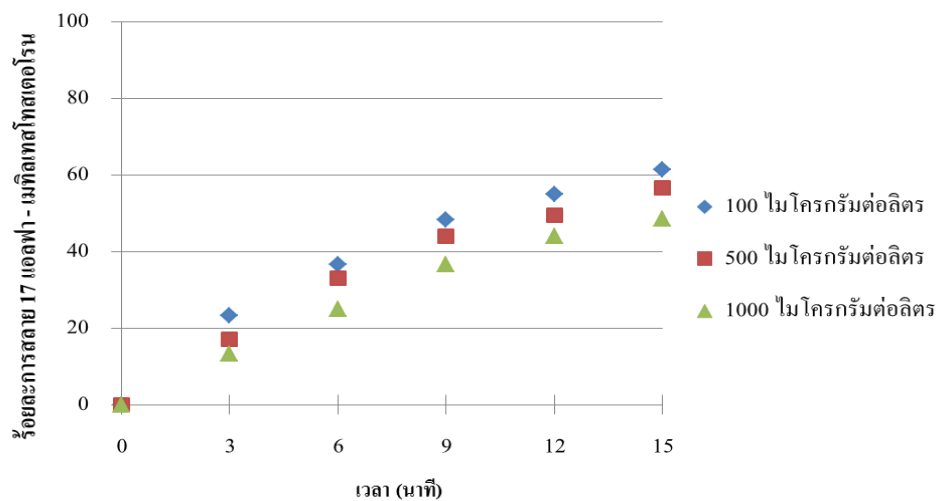
การสลายของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV - C เกิดจาก UV - C ให้แสงที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน สามารถดูดกลืนพลังงานได้ โดยเมื่อพิจารณาโครงสร้างของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน จะสามารถดูดกลืนพลังงานได้ในช่วงความยาวคลื่น 100 - 280 นาโนเมตร และ จัดเป็นสารประกอบประเภทอีโนนซึ่งเป็นสารที่มีหมู่คาร์บอนิลคอนจูเกตกับหมู่เอทิลีนหรือสารประกอบคาร์บอนิลไม่อิ่มตัวที่ตำแหน่ง  $\alpha$  และ  $\beta$  อิเล็กตรอนของอีโนนมีการเปลี่ยนระดับพลังงาน 2 แบบ คือ แถบ R จะดูดกลืนพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 300 - 330 นาโนเมตร โดยมีค่าแอมซอร์ปติวิตี ( $\epsilon$ ) 20 - 100 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำ และอีกแบบหนึ่งเป็นแบบ แถบ K จะดูดกลืนพลังงานช่วงความยาวคลื่น 220 - 280 นาโนเมตร มีค่า แอมซอร์ปติวิตี ( $\epsilon$ ) 10,000 - 15,000 ซึ่งสามารถดูดกลืนพลังงานได้สูงกว่า (เย็นทัย, 2549) ซึ่งสอดคล้องกับช่วงความยาว คลื่น UV - C ที่ให้พลังงานในช่วง 254 นาโนเมตร ดังนั้นเมื่อ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนได้รับพลังงานเหมาะสม จึงสามารถสลายได้ด้วย UV - C

#### 4.4.2 ผลการทดลองด้วยหลอด VUV

เมื่อทำการทดลองสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วย VUV แล้ววัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่เวลาต่างๆ (ภาคผนวก ค) ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4 - 8 และสามารถคำนวณร้อยละการสลาย (ภาคผนวก ง) ซึ่งได้แสดงในภาพที่ 4 - 9



ภาพที่ 4 - 8 ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเมื่อเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆในการทดลองด้วย VUV

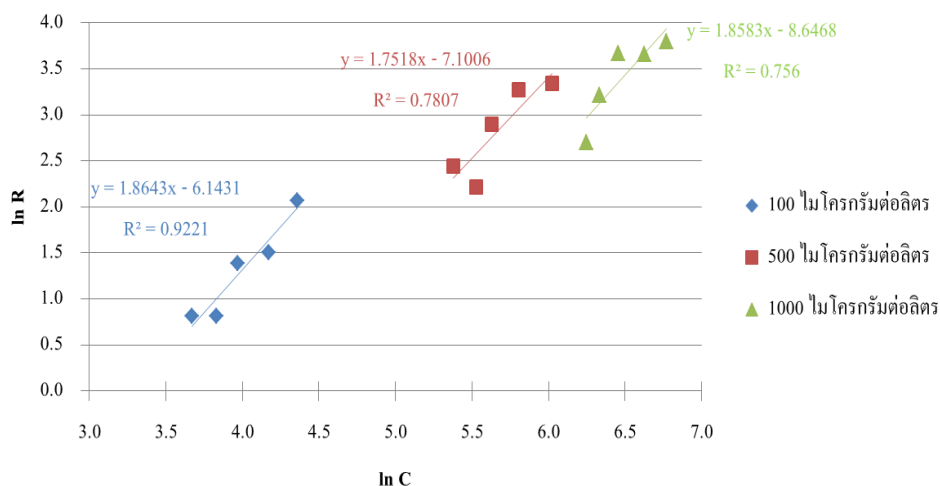


ภาพที่ 4 - 9 ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆในการทดลองด้วย UV - C

จากภาพที่ 4 - 8 พบว่าความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ค่อยๆลดลง โดยเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ลดลงเหลือ 39.34 216.32 และ 518.14 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน เริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ และจากภาพที่ 4 - 9 เป็นผลการคำนวณร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัม พบว่าร้อยละการสลายมีค่า 61.42 56.48

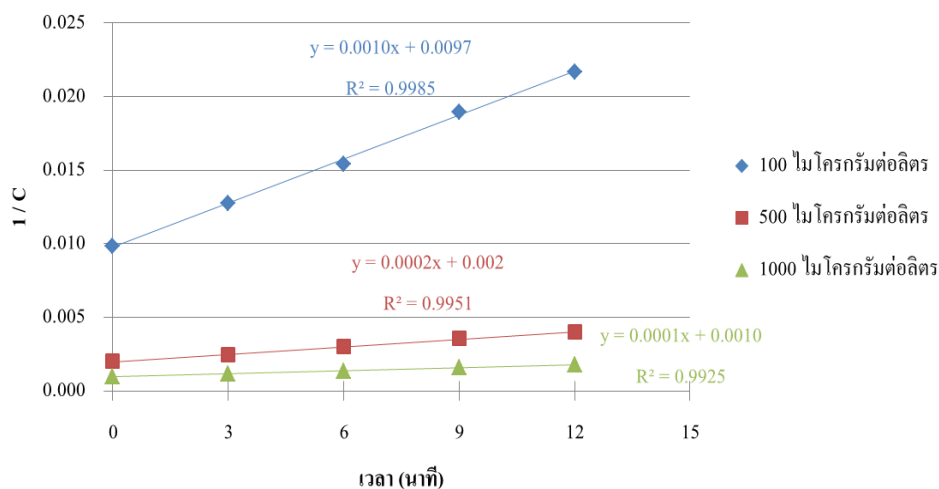
และ 48.50 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ส่งผลประสิทธิภาพการสลายลดลงเล็กน้อย

และเมื่อทำการศึกษาอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก จ) โดยการสร้างกราฟระหว่าง  $\ln R$  เทียบกับ  $\ln C$  จะได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4 – 10



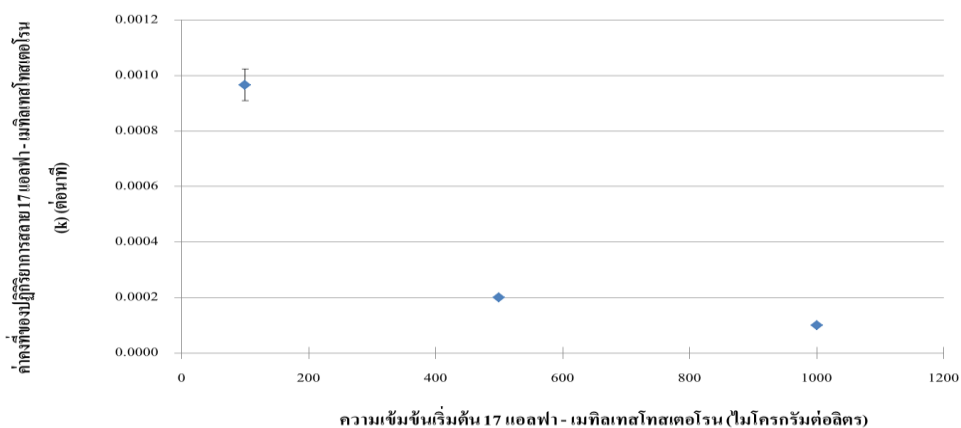
ภาพที่ 4 - 10 กราฟ  $\ln R$  เทียบกับ  $\ln C$  เพื่อหาอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรในชุดการทดลองด้วย VUV

จากภาพที่ 4 – 10 พบว่าที่ทุกความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน จะมีปฏิกิริยาการสลายอาจเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง ซึ่งดูได้จากค่าความชันของกราฟที่มีค่าใกล้เคียง 2 เมื่อทราบว่อันดับปฏิกิริยา จึงสามารถคำนวณค่าคงที่การสลายได้ (ภาคผนวก ฉ) โดยการสร้างกราฟระหว่าง  $1/C$  เทียบกับ เวลา ดังแสดงในภาพที่ 4 – 11



ภาพที่ 4 - 11 กราฟ  $1/C$  เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

จากภาพที่ 4 - 11 พบว่าค่าคงที่ในการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน มีค่าเท่ากับ  $1.0 \times 10^{-3}$   $2.0 \times 10^{-4}$  และ  $1.0 \times 10^{-4}$  ลิตรต่อไมโครกรัม นาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าคงที่ในการสลายลดลง ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้น เริ่มต้นต่อการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ดังแสดงในภาพที่ 4 - 12



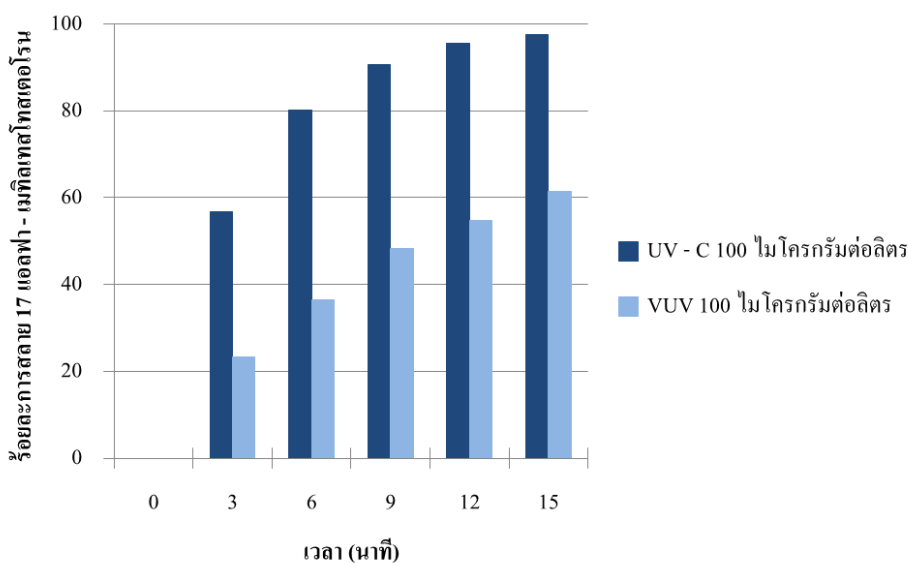
ภาพที่ 4 - 12 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ในการทดลองด้วย VUV

จากภาพที่ 4 - 12 พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน มีผลต่อค่าคงที่ของปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ (ระดับความเชื่อมั่น 0.05) ตามที่คำนวณได้ทางสถิติในภาคผนวก ข โดยจะส่งผลให้ค่าคงที่ปฏิกิริยามีค่าน้อยลง ทำให้การสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน เกิดได้ช้าลง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนต่ำลง

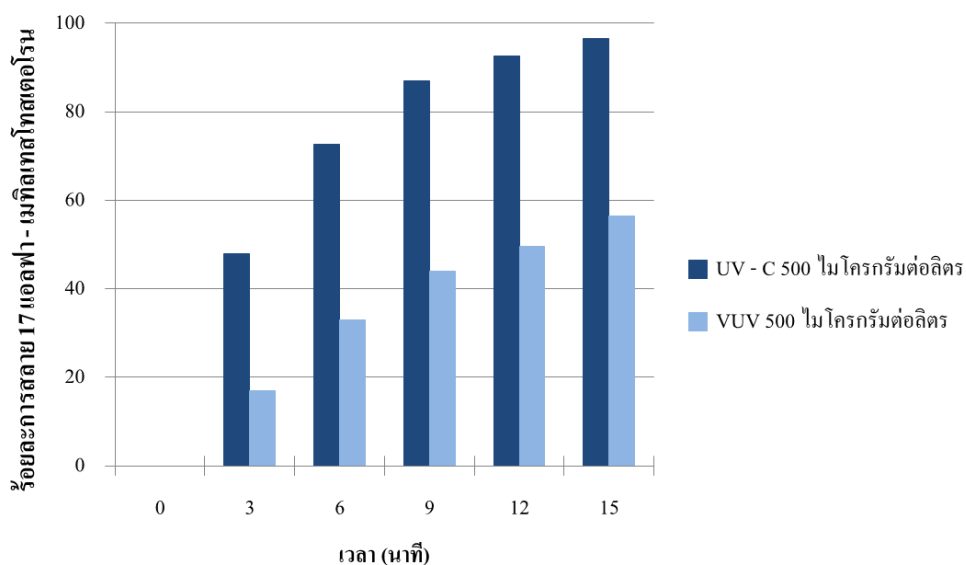
การสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย VUV เกิดจากแสงส่วนหนึ่งของ VUV ให้ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่เหมาะสมที่ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนดูดกลืนพลังงานได้ดี ส่งผลให้ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน เกิดการสลายตัว นอกจากนี้หลอด VUV ให้แสงที่ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตรร่วมด้วย ซึ่งแสงที่ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร จะส่งผลให้น้ำเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่จะไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ส่งผลให้ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน เกิดการสลายไป แต่เพื่อให้แน่ใจว่าการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนจะเกิดกระบวนการออกซิเดชัน จึงต้องมีการศึกษากลไกหลักที่เกิดขึ้น ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.6

#### 4.4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าทางจลพลศาสตร์ในการการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV - C และ VUV

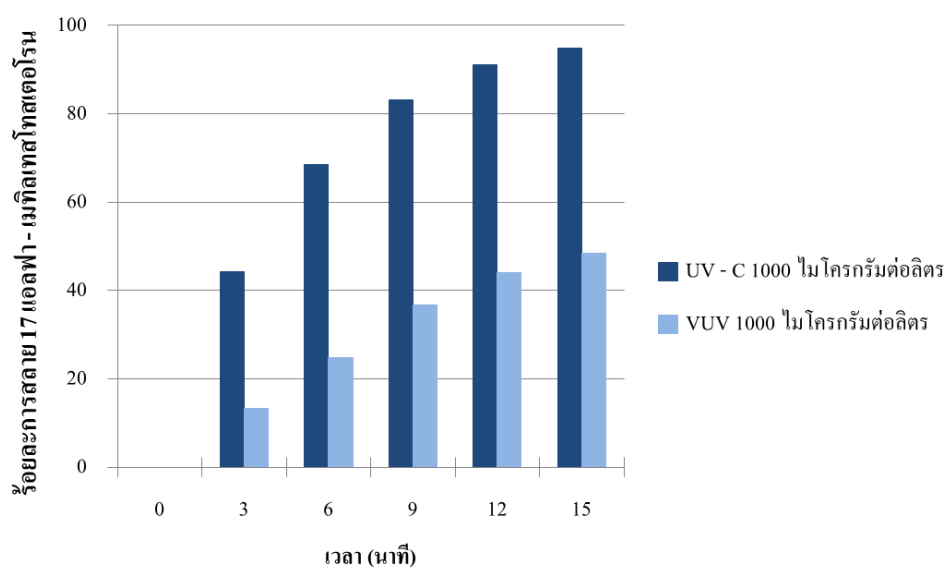
เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการสลายด้วย UV - C และ VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ได้แสดงในภาพที่ 4 - 13 ถึง และภาพที่ 4 - 15 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 - 13 ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV - C และ VUV เทียบกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4 - 14 ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV – C และ VUV เทียบกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4 - 15 ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV – C และ VUV เทียบกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

จากภาพที่ 4 – 13 ถึง 4 – 15 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นที่ 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่าที่เวลาและกำลังหลอดไฟ

เท่ากับ UV - C สามารถสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ได้ ดีกว่า VUV และสามารถสรุปค่าคงที่การสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ดังแสดงในตารางที่ 4 - 1

ตารางที่ 4 - 1 การเปรียบเทียบค่าคงที่เฉลี่ยของการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน

ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ค่าคงที่การสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน	
	(ต่อนาที)	ลิตรต่อไมโครกรัมนาที
	UV - C	VUV
100	0.2634	$1.0 \times 10^{-3}$
500	0.2203	$2.0 \times 10^{-4}$
1000	0.1995	$1.0 \times 10^{-4}$

ทั้งหมด UV - C และ VUV จะให้ความยาวคลื่นที่ 254 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงคลื่นที่ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ดูดกลืนพลังงานได้ดี ทำให้ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน เกิดการสลายตัวได้ แต่ VUV จะให้ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตรร่วมด้วย ซึ่งจะไปทำให้น้ำเกิดการแตกตัวเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลนี้จะไปทำปฏิกิริยากับ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ทำให้ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน สลายได้เพิ่มขึ้น แต่ในการทดลองกลับพบว่าการใช้ VUV จะให้ประสิทธิภาพการสลายต่ำกว่าการใช้ UV - C จึงอาจจะสันนิษฐานได้ว่า ในระหว่าง การสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย VUV อาจจะไม่ได้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษากลไกหลักที่เกิดขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.6

#### 4.5 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับ (EE / O)

เมื่อทราบกำลังไฟฟ้าที่ใช้และอันดับการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ทำให้สามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนได้ โดยได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4 - 2 รายละเอียดการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4 - 2 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (ไมโครกรัมต่อลิตร)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับ (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร)	
	UV - C	VUV
100	0.31	1.21
500	0.34	1.38
1000	0.39	1.73



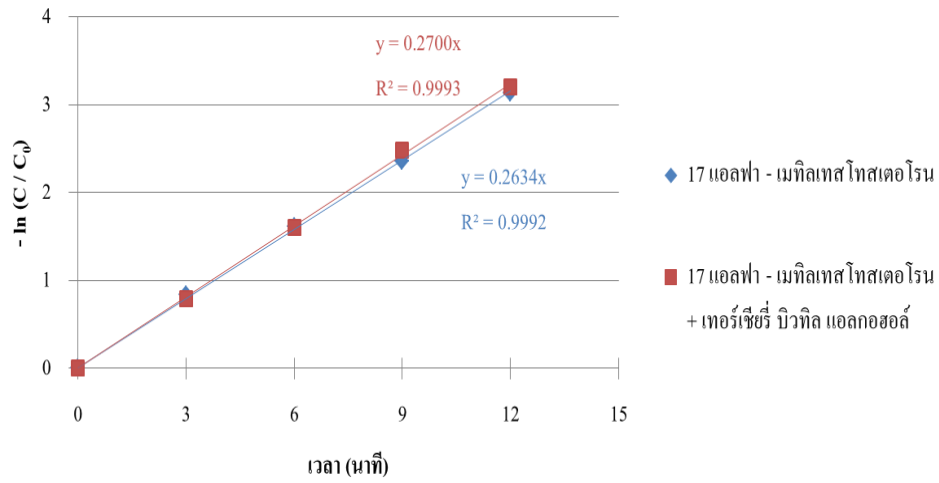
จากตาราง 4 – 2 พบว่า ทั้ง UV – C และ VUV เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน เพิ่มขึ้น พลังงานที่ใช้สลายก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่การใช้ UV – C จะใช้พลังงานน้อยกว่า VUV เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของกัตตินาญ (2555) พบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วย UV – C ที่กำลัง 20 วัตต์ ใช้พลังงาน 0.27 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรสลายด้วย UV – B พบว่าการสลายด้วย UV – B จะใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าการใช้หลอด UV – C ซึ่งจะใช้พลังงานไฟฟ้า 4.42 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร (ภาคผนวก ซ) และจากงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาการสลาย สเตียรอยด์ฮอร์โมนเพศหญิง ชนิด 17 เบต้า – เอสตราไดออล ด้วย UV – C ที่กำลัง 15 วัตต์ และใช้ฮอร์โมนในปริมาตร 700 มิลลิลิตร จากการศึกษาพบว่า ปฏิกิริยาการสลายของ 17 เบต้า – เอสตราไดออล เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งสามารถคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าต่ออันดับได้เท่ากับ 0.013 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร (ภาคผนวก ซ) ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ และมีค่าต่ำกว่าการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ประมาณ 23 เท่า โดยค่าพลังงานต่ออันดับของสารแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ขึ้นกับชนิดของสารนั้น ส่วนข้อมูลการใช้ VUV ในการสลายสเตียรอยด์ฮอร์โมนค่อนข้างน้อยจึงมีข้อมูลไม่เพียงพอที่จะนำมาเปรียบเทียบ โดยค่าพลังงานไฟฟ้าที่คำนวณได้นี้สามารถเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจในการเลือกใช้กำลังหลอดไฟและเวลาที่ใช้ในการบำบัด และนอกจากนี้ยังสามารถนำไปคำนวณค่าไฟที่ใช้ในการบำบัดได้

#### 4.6 กลไกหลักของการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV – C และ VUV

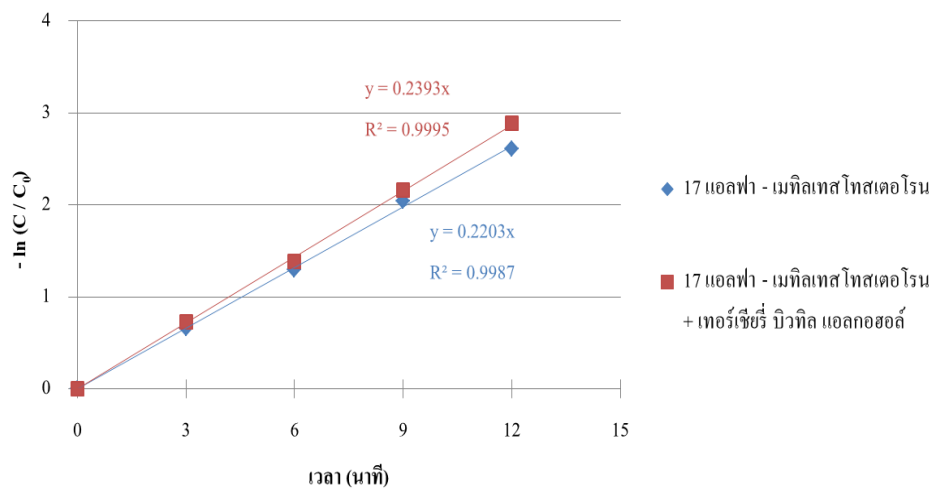
จากการทดลองโดยการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการออกซิเดชันของอนุมูลไฮดรอกซิล หากกลไกหลักที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการออกซิเดชัน การเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์จะมีผลต่อการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ทำให้การสลายเกิดขึ้นช้าลง ส่งผลให้ค่าคงที่ของการสลายลดลง

##### 4.6.1 กลไกหลักที่เกิดใน UV – C

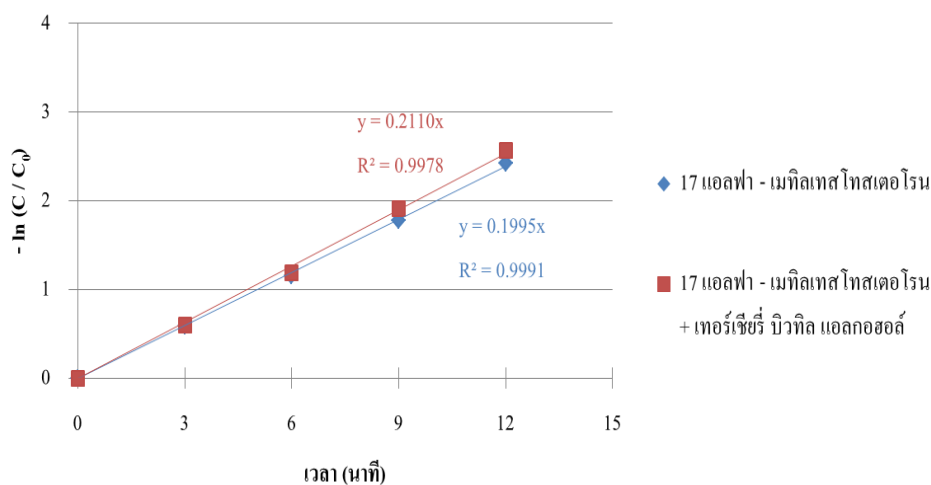
จากการทดลองโดยการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ลงใน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร แล้วทำการฉายแสง UV – C ที่กำลัง 20 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที แล้วทำการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (ภาคผนวก ค) และนำมาคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ (ภาคผนวก ฉ) เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมให้ผลดังแสดงในภาพที่ 4 – 16 ถึง 4 – 18



ภาพที่ 4 - 16 กราฟ  $-\ln(C/C_0)$  เทียบกับเวลา กรณีที่มีการเติมและไม่เติมเทอร์เซียร์ บิวทิล แอลกอฮอล์ ในการทดลองด้วย UV - C ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4 - 17 กราฟ  $-\ln(C/C_0)$  เทียบกับเวลา กรณีที่มีการเติมและไม่เติมเทอร์เซียร์ บิวทิล แอลกอฮอล์ ในการทดลองด้วย UV - C ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

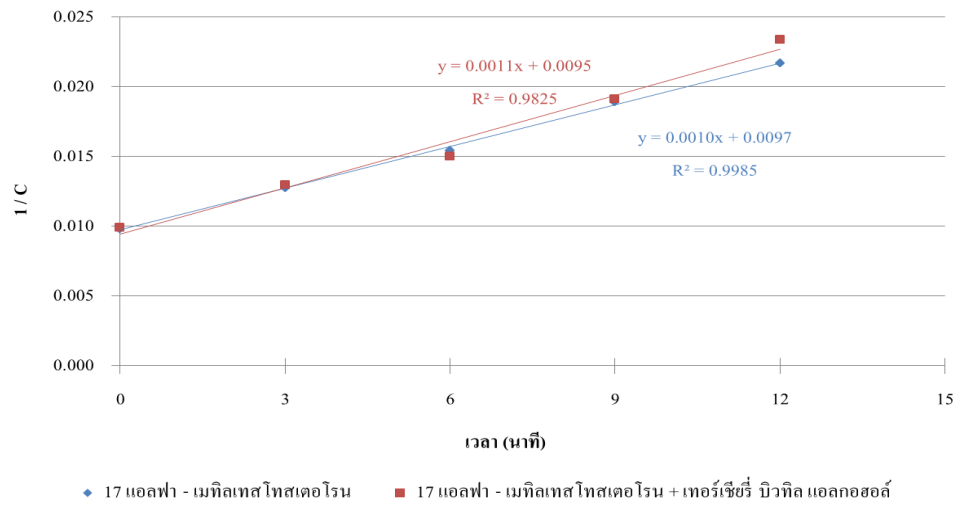


ภาพที่ 4 - 18 กราฟ  $-\ln(C/C_0)$  เทียบกับเวลา กรณีที่มีการเติมและไม่เติมเทอร์เซียร์ บิวทิล แอลกอฮอล์ ในการทดลองด้วย UV - C ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

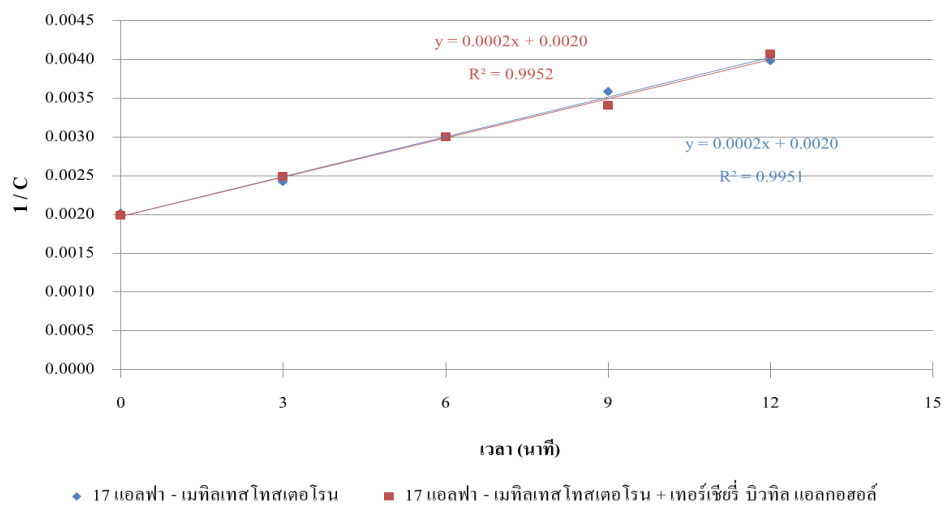
จากภาพที่ 4 - 16 ถึง 4 - 18 แสดงผลการศึกษากลไกหลักที่เกิดขึ้นใน UV - C ซึ่งพบว่าการเติมเทอร์เซียร์ บิวทิล แอลกอฮอล์ ไม่มีผลต่อการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมเทอร์เซียร์ บิวทิล แอลกอฮอล์ โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นกลไกหลักที่เกิดขึ้นจากการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV - C เป็นกระบวนการโฟโตไลซิส

#### 4.6.2 กลไกหลักที่เกิดใน VUV

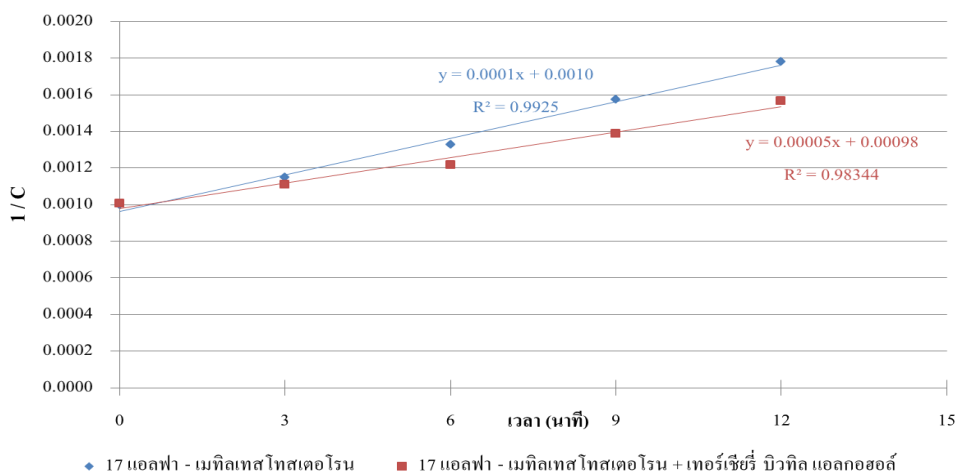
จากการทดลองโดยการเติมเทอร์เซียร์ บิวทิล แอลกอฮอล์ ลงใน 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร แล้วทำการฉายแสง VUV ที่กำลัง 20 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที แล้วทำการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (ภาคผนวก ค) และนำมาคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ (ภาคผนวก ฉ) เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมให้ผลดังแสดงในภาพที่ 4 - 19 ถึง 4 - 21



ภาพที่ 4 - 19 กราฟ  $1/C$  เทียบกับเวลา กรณีที่มีการเติมและไม่เติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4 - 20 กราฟ  $1/C$  เทียบกับเวลา กรณีที่มีการเติมและไม่เติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4 - 21 กราฟ  $1/C$  เทียบกับเวลา กรณีที่มีการเติมและไม่เติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

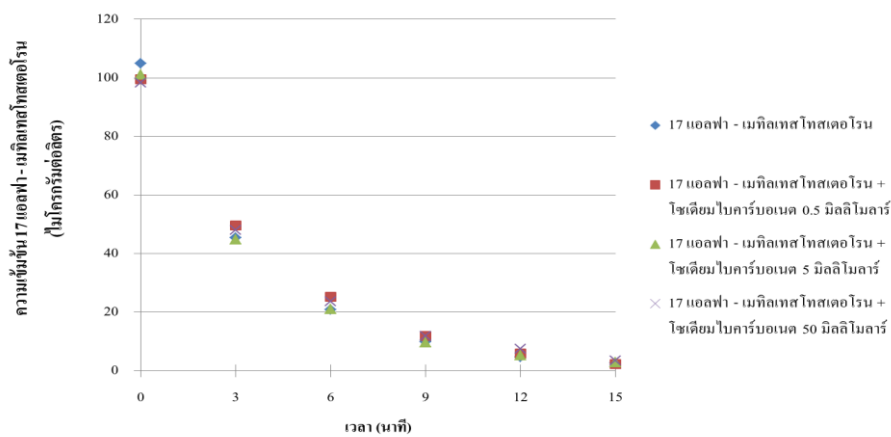
จากภาพที่ 4 - 19 ถึง 4 - 21 แสดงผลการศึกษากลไกหลักที่เกิดขึ้นใน VUV ซึ่งพบว่าการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน 100 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร ไม่มีผลต่อการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ โดยค่าคงที่การสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน จึงเป็นกระบวนการโฟโตไลซิส ส่วนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่าการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์มีผลต่อการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาในกรณีที่มีการเติม เทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์เป็นตัวขัดขวางการทำงานของอนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งมีหน้าที่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ในน้ำ ดังนั้นกลไกหลักของการสลายจึงมีแนวโน้มเป็นกระบวนการออกซิเดชัน

#### 4.7 ผลการศึกษาผลกระทบของไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนที่มีต่อการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV - C และ VUV

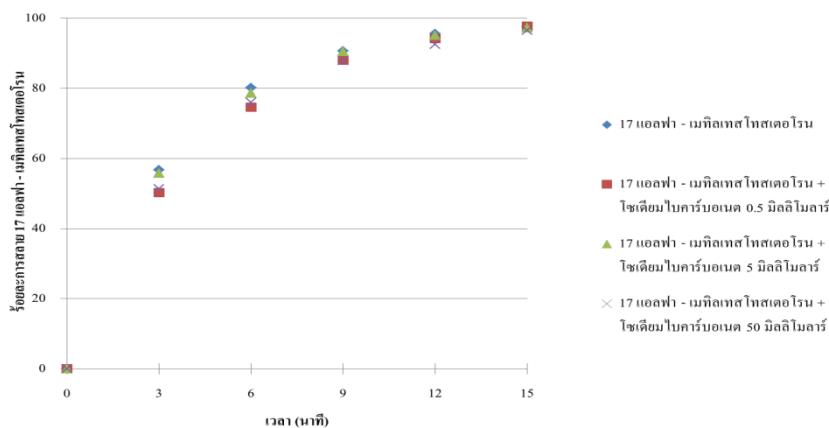
จากการศึกษาผลกระทบ ของไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนที่มีต่อการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนโดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 0.5 5 และ 50 มิลลิโมลาร์ ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน 100 ไมโครกรัม ให้ผลการศึกษาดังนี้

#### 4.7.1 ผลการศึกษาผลกระทบของไบคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV – C

เมื่อทำการฉายแสง UV – C ที่กำลัง 20 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาทีแล้ววัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (ภาคผนวก ค) และคำนวณร้อยละการสลาย (ภาคผนวก ง) เทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ให้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4 – 22 และภาพที่ 4 – 23 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 - 22 ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองด้วย UV – C

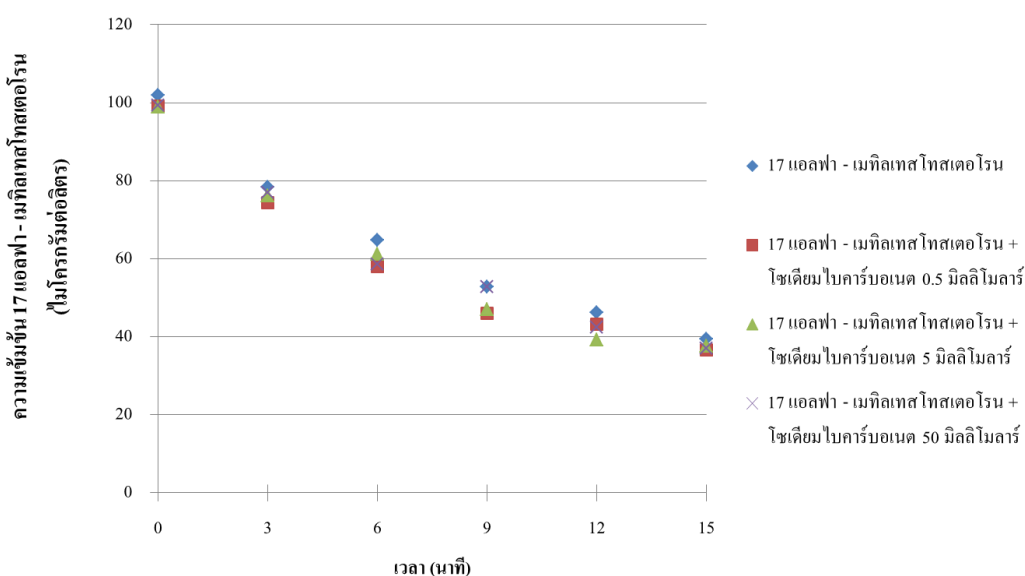


ภาพที่ 4 - 23 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองด้วย UV – C

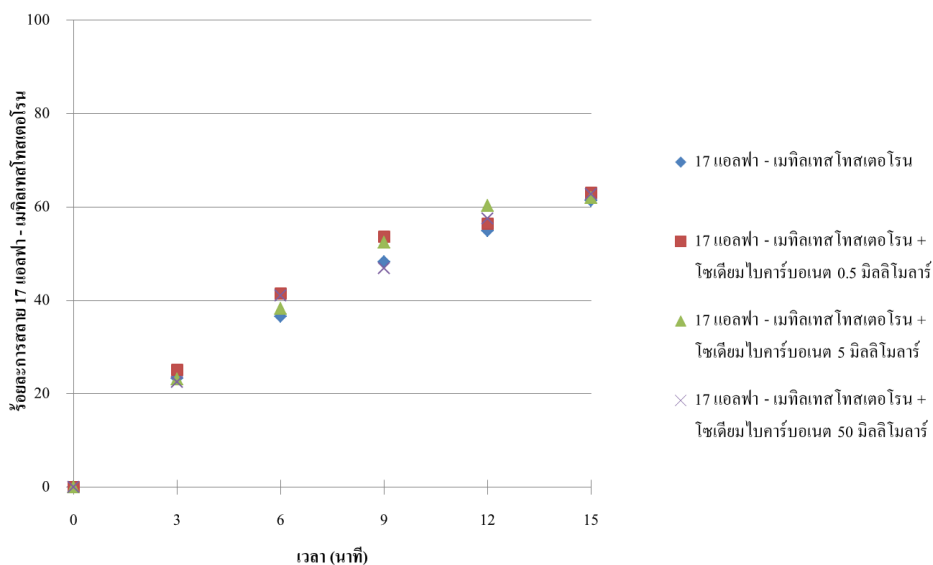
จากภาพที่ 4 – 22 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่สลายไปในกรณีที่มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตและไม่เติม พบว่าที่เวลาต่างๆ ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเทียบเป็นร้อยละการสลาย ดังภาพที่ 4 – 23 ก็พบว่า ร้อยละการสลายก็มีค่าใกล้เคียงกันเช่นกัน โดยมีค่าประมาณ 97 % ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่มีน้ำมีไบคาร์บอเนตหรือคาร์บอเนตไอออน จะไม่มีผลต่อการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV – C เนื่องจากจากไอออนทั้งสองชนิดนี้ถือเป็นตัวขัดขวางปฏิกิริยาออกซิเดชันของอนุมูลไฮดรอกซิล และจากการศึกษาพบว่ากลไกหลักของการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรด้วย UV – C ไม่ได้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน ดังนั้นการเติมไอออนทั้งสองชนิดนี้จึงไม่มีผลต่อการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (Imoberdorf และ Mohseni, 2011)

#### 4.7.2 ผลการศึกษาผลกระทบของไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนที่มีต่อการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย VUV

เมื่อทำการฉายแสง VUV ที่กำลัง 20 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาทีแล้ววัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (ภาคผนวก ค) และคำนวณร้อยละการสลาย (ภาคผนวก ง) เทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ให้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4 – 24 และภาพที่ 4 – 25 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 - 24 ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเทียบกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองด้วย VUV



ภาพที่ 4 - 25 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเทียบกับเวลา ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลองด้วย VUV

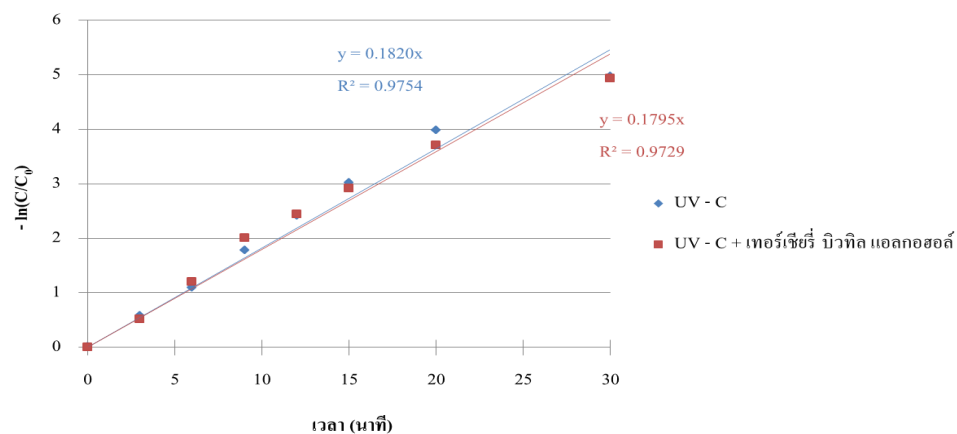
จากภาพที่ 4 - 24 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนที่สลายไปในกรณีที่มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตและไม่เติม พบว่าที่เวลาต่างๆ ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเทียบเป็นร้อยละการสลาย ดังภาพที่ 4 - 25 ก็พบว่า ร้อยละการสลายก็มีค่าใกล้เคียงกันเช่นกัน โดยมีค่าประมาณ 97 % ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่มีน้ำมีไบคาร์บอเนตหรือคาร์บอเนตไอออนจะไม่มีผลต่อการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วย VUV เนื่องจากจากการศึกษาหลักที่เกิดในการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ไม่เกิดกระบวนการออกซิเดชัน ดังนั้นการเติมไอออนทั้งสองชนิดนี้ไปขัดขวางปฏิกิริยาออกซิเดชันของอนุมูลไฮดรอกซิลจึงไม่เกิดขึ้น ไอออนทั้งสองชนิดนี้จึงไม่มีผลต่อการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน

#### 4.8 วิจารณ์ผลการทดลอง

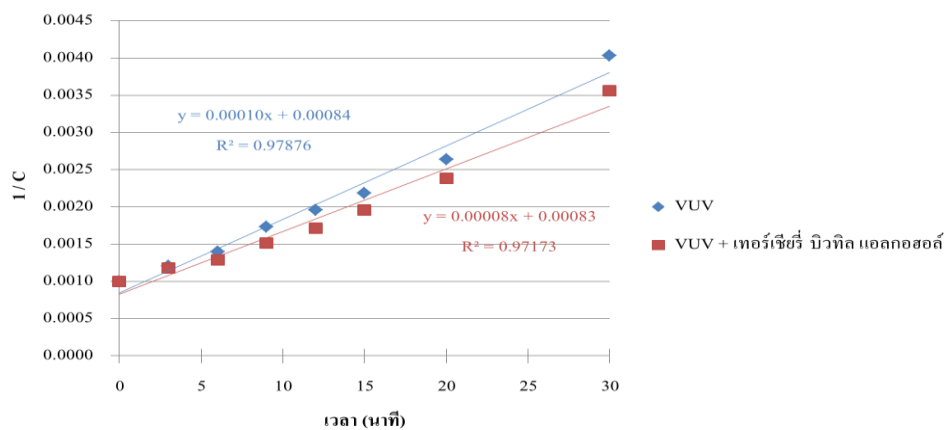
จากการศึกษาประสิทธิภาพการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน พบว่าการใช้ UV - C จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ VUV ซึ่งหลอดทั้งสองชนิดนี้จะให้กำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่นที่ 254 นาโนเมตรเช่นเดียวกัน แต่หลอด VUV จะให้กำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่น 185 นาโนเมตรรวมกับความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร โดยที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร จะเป็นช่วงที่ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ดูดกลืนพลังงานได้ดี จึงทำให้ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน เกิดการสลายตัวแต่ในงานวิจัยของ Jing และคณะ (2007) และ Huang และคณะ (2013) ได้รายงานว่า การใช้ VUV สามารถสลายสารอินทรีย์ได้ดีกว่า UV - C เนื่องจาก VUV ให้ความยาวคลื่นที่ 185 นาโนเมตร



และ 254 นาโนเมตร โดยความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร สามารถทำให้น้ำเกิดการแตกตัว เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลที่สามารถไปออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ส่งผลให้สารอินทรีย์เกิดการสลาย แต่จากการศึกษาในนี้กลับพบว่า UV - C สามารถสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนได้ดีกว่า VUV จึงสันนิษฐานว่า เวลาที่ใช้ในการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลไม่เพียงพอ จึงได้ทำการทดลองโดยการเพิ่มเวลาในการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเป็น 60 นาที แล้วทำการศึกษากลไกหลักที่เกิดขึ้น (ภาคผนวก ฉ) จากการเปรียบเทียบค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายในนาที่ที่ 30 ให้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4 - 26 และ 4 - 27



ภาพที่ 4 - 26 กราฟ  $-\ln(C/C_0)$  เทียบกับเวลา ในการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV - C ในเวลา 30 นาที



ภาพที่ 4 - 27 กราฟ  $1/C$  เทียบกับเวลา ในการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย VUV ในเวลา 30 นาที

จากภาพที่ 4 – 26 จากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วย UV – C เป็นเวลา 30 นาที พบว่า กลไกหลักที่เกิดขึ้นในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วย UV – C เป็นกระบวนการโฟโตไลซิส เนื่องจากความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่วัดได้จากกรณีที่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ปฏิริยาการสลายยังคงเป็นปฏิริยาอันดับหนึ่ง และมีค่าคงที่ปฏิริยาการสลายใกล้เคียงกัน โดยมีค่า 0.1820 และ 0.1795 ต่อนาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นกระบวนการหลักที่เกิดขึ้นยังคงเป็นกระบวนการโฟโตไลซิส แต่ใน VUV (ภาพที่ 4 – 27) พบว่า การสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน เป็นปฏิริยาอันดับสองและมีค่าคงที่ปฏิริยาการสลาย  $1.0 \times 10^{-4}$  และ  $8.0 \times 10^{-5}$  ลิตรต่อไมโครกรัม นาที กรณีที่ไม่มีการเติมและเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์อาจจะไปขัดขวางปฏิริยาออกซิเดชันของอนุมูลไฮดรอกซิล ดังนั้นกลไกหลักที่เกิดขึ้นในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วย VUV มีแนวโน้มเกิดกระบวนการออกซิเดชัน เนื่องจากอันดับปฏิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV – C และ VUV แตกต่างกันไปจึงไม่สามารถเปรียบเทียบค่าคงที่ปฏิริยาการสลายได้ โดยจากการเปรียบเทียบร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ก็ยังคงพบว่า การใช้ UV – C ยังคงให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ VUV ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุมาจากลักษณะของถังปฏิริยาที่ใช้ไม่เหมาะสม โดยจากงานวิจัยของ Yoon และคณะ (2008) ได้พบว่าการใช้ถังปฏิริยาแบบไหลผ่านจะให้ประสิทธิภาพการสลายดีกว่าการใช้ถังปฏิริยาแบบที่ละเท เนื่องจากระยะห่างระหว่างผิวน้ำกับหลอด VUV มีผลต่อการสลาย ซึ่งถังปฏิริยาแบบไหลผ่านจะมีระยะห่างระหว่างผิวน้ำกับหลอดน้อย จึงให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ถังปฏิริยาแบบที่ละเท

จากการศึกษาค่าทางจลนพลศาสตร์ของการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน 100 500 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่าการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV – C จะเป็นปฏิริยาอันดับหนึ่ง โดยมีค่าคงที่ของปฏิริยาการสลายจะอยู่ในช่วง 0.20 – 0.26 ต่อนาที ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chowdhury และคณะ (2011) และ Tang และคณะ (2012) ที่พบว่าปฏิริยาการสลายสเตียรอยด์ฮอร์โมนเป็นปฏิริยาอันดับหนึ่ง และเมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ปฏิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV – C กับวิธีทางชีวภาพ (Homklin และคณะ (2012)) พบว่า การใช้ UV – C จะให้ประสิทธิภาพดีกว่า และสามารถใช้เวลาในการสลายได้เร็วกว่าวิธีทางชีวภาพ โดยค่าคงที่ของปฏิริยาในการสลายด้วยวิธีทางชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วง 0.002 – 0.003 ต่อนาที ซึ่งช้ากว่าการใช้ UV – C ถึง 20 เท่า ส่วนการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย VUV จะเป็นปฏิริยาอันดับสอง โดยค่าคงที่ของปฏิริยาการสลายอยู่ในช่วง 1.21 – 1.73 ลิตรต่อไมโครกรัม นาที ซึ่งไม่สามารถเปรียบเทียบกับ UV – C ได้ เนื่องจากเป็นปฏิริยาคนลอันดับ

เมื่อทราบกำลังของไฟฟ้าที่ใช้และอันดับปฏิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน เป็นปฏิริยาอันดับหนึ่ง ทำให้สามารถคำนวณพลังงานที่ใช้ต่ออันดับได้และสามารถนำค่าพลังงานไฟฟ้าต่ออันดับที่คำนวณได้ไปคูณด้วยค่าไฟต่อหน่วย ทำให้สามารถคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดได้

จากการศึกษากลไกหลักที่เกิดขึ้นในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV – C และ VUV ในถึงปฏิกรณ์แบบที่ละเทพบว่าการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นตัวขัดขวางปฏิกิริยาออกซิเดชันลงไป แล้วไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV – C ทำให้สรุปได้ว่ากลไกหลักที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการโฟโตไลซิส ซึ่งเป็นกระบวนการที่สารเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับพลังงานที่เหมาะสม (Stefan, 2004) ส่วนกลไกหลักที่เกิดขึ้นในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร เป็นกระบวนการโฟโตไลซิสเนื่องจากค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายในกรณีที่มีการเติมและไม่เติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์แตกต่างกันเล็กน้อย แต่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร กลับพบว่าค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายในกรณีที่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ต่ำกว่ากรณีที่ไม่เติมอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นกลไกหลักที่เกิดขึ้นจึงมีแนวโน้มเป็นกระบวนการออกซิเดชัน

เมื่อทราบกลไกหลักที่เกิดขึ้นจากการใช้ UV – C และ VUV แล้ว ก็สามารถทำนายได้ว่า ในกรณีที่มีน้ำมีไบคาร์บอเนตไอออนและคาร์บอเนตไอออนจะไม่มีผลต่อการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน เนื่องจากไอออนทั้งสองชนิดนี้ก็ถือเป็นตัวขัดขวางปฏิกิริยาออกซิเดชันเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

#### 4.9 การนำไปประยุกต์ใช้

จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น การใช้แสงยูวีในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน มีข้อดีกว่าวิธีทางชีวภาพ โดยจะใช้เวลาในการสลายน้อยกว่า และมีข้อดีกว่าวิธีการดูดซับบนตัวดูดซับ เนื่องจากไม่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายของตัวดูดซับและค่าใช้จ่ายในกรณีนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ หรือค่าใช้จ่ายในการกำจัดตัวดูดซับ แต่การใช้แสงยูวีมีข้อจำกัดอยู่อย่างหนึ่ง คือสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ โดยสารแขวนลอยเหล่านี้จะไปขัดขวางแสงยูวีทำให้ประสิทธิภาพการสลายลดลง ส่วนการกวนผสมในถึงปฏิกรณ์จะไม่มีผล เนื่องจากเมื่อเก็บน้ำที่ผ่านการฉายแสง ณ เวลาสุดท้ายไปวัดความเข้มข้นก็ยังคงพบว่าความเข้มข้นที่ได้ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นหากต้องการออกแบบระบบบำบัดน้ำที่ปนเปื้อน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ควรมีการกรองน้ำก่อนเข้าสู่บ่อพักน้ำ เพื่อกำจัดตะกอนที่จะไปขัดขวางประสิทธิภาพระบบบำบัดด้วยแสงยูวี ซึ่งถ้าต้องการออกแบบระบบบำบัดด้วย UV – C ที่มีอัตราการไหลต่อเนื่อง สามารถออกแบบได้ดังนี้

กำหนด สูบน้ำด้วยอัตราการไหล 45 ลิตรต่อนาที (0.045 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที)

หาเวลากักเก็บน้ำจากค่าทางจลนพลศาสตร์ ถ้าต้องการให้บำบัดให้ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ลดลงร้อยละ 90 โดยค่า  $k = 0.2634$  ต่อนาที

จากปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$C = C_0 e^{-kt}$$

เมื่อ  $C$  คือ ความเข้มข้นสุดท้าย (ไมโครกรัมต่อลิตร)

$C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (ไมโครกรัมต่อลิตร)

$k$  คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย (ต่อนาที)

$t$  คือ เวลาที่ใช้ในการสลาย (นาที)

แทนค่าลงในสมการ

$$10 = 100e^{-(0.2634)t}$$

$$10/100 = e^{-(0.2634)t}$$

$$0.1 = e^{-(0.2634)t}$$

$$\ln 0.1 = -0.2634t \ln e$$

$$\ln 0.1 = -0.2634t$$

$$t = 8.74 \text{ นาที}$$

ดังนั้นเวลาในการกักเก็บน้ำประมาณ 9 นาที

คำนวณขนาดถังปฏิกรณ์

จาก  $Q = V/t$

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อนาที)

$t$  คือ เวลาเก็บน้ำ (นาที)

$V$  คือ ปริมาตรน้ำ (ลูกบาศก์เมตร)

คำนวณหาปริมาตรน้ำ

$$V = 0.045 \times 9$$

$$= 0.405 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

กำหนดความกว้างของถังปฏิกรณ์จากโคมสะท้อนแสง 2 โคม แต่ละโคมกว้าง 0.25 เมตร

ดังนั้นความกว้างทั้งหมด เท่ากับ  $2 \times 0.25 = 0.50$  เมตร

น้ำในถังปฏิกรณ์ควรมีความสูง 0.05 เมตร

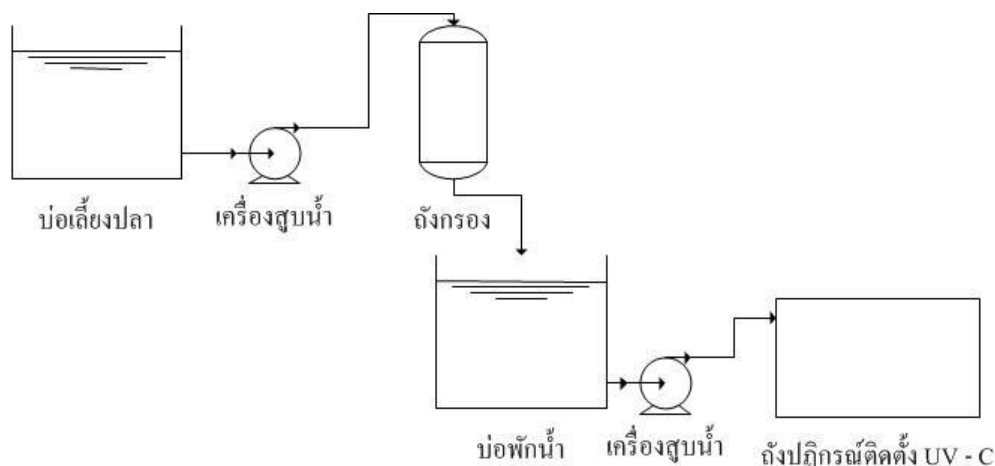
$$\text{ความยาวถังปฏิกรณ์} = 0.045 / (0.05 \times 0.5)$$

$$= 16.2 \text{ เมตร}$$

โคมสะท้อนแสงแต่ละอันมีความยาว 0.65 เมตร ดังนั้นต้องติดตั้งโคม  $16.2/0.65 = 24.92$  แถว ซึ่งประมาณ 25 แถว

ดังนั้นต้องใช้หลอดไฟ  $25 \times 2 = 50$  หลอด

สรุปในการออกแบบถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งหลอด UV - C ควรมีความกว้าง 0.50 เมตร ยาว 16.2 เมตร และสูง 0.20 เมตร (เพิ่มระยะห่างระหว่างหลอดไฟและผิวน้ำ 0.15 เมตร) ซึ่งสามารถสรุปการออกแบบระบบบำบัดดังแสดงในภาพที่ 4 - 30



ภาพที่ 4 - 28 การออกแบบระบบบำบัดถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งหลอด UV - C

สามารถคำนวณค่าไฟจากค่าพลังงานไฟฟ้าต่ออันดับได้

$$\begin{aligned} \text{จาก } EE / O &= P / (Q \log \frac{C_i}{C_f}) \\ &= (56 \times 20) / (0.045 \log 100/10) \\ &= 414.81 \text{ วัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

ถ้าในบ่อเลี้ยงปลาใช้น้ำทั้งหมด 80 ลูกบาศก์เมตร

ดังนั้นใช้กำลังไฟ =  $414.81 \times 80 = 33.81$  กิโลวัตต์ชั่วโมง ประมาณ 34 กิโลวัตต์ชั่วโมง

ถ้าค่าไฟ 15 หน่วยแรก หน่วยละ 1.8632 บาท คิดเป็นเงิน  $15 \times 1.8632 = 27.948$  บาท

10 หน่วยถัดไป หน่วยละ 2.5026 บาท คิดเป็นเงิน  $10 \times 2.5026 = 25.026$  บาท

9 หน่วยที่เหลือ หน่วยละ 2.7549 บาท คิดเป็นเงิน  $9 \times 2.7549 = 24.7941$  บาท

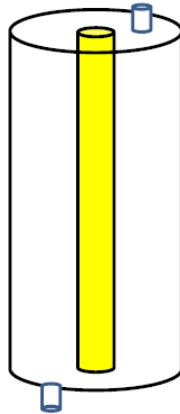
ดังนั้นต้องจ่ายค่าไฟทั้งสิ้น 77.80 บาท

หมายเหตุ อัตราค่าไฟฟ้าอ้างอิงจากการไฟฟ้านครหลวง ณ วันที่ 28 เมษายน 2557

ในการบำบัดหนึ่งรอบใช้เวลาในการบำบัด 1,778 นาที (ประมาณ 30 ชั่วโมง)

ดังนั้นต้องเสียค่าไฟประมาณ  $77.80/30 = 2.60$  บาทต่อชั่วโมง

ส่วนการออกแบบถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งหลอด VUV ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในระดับห้องปฏิบัติการต่อไปโดยอาจออกแบบลักษณะถังเป็นทรงกระบอกแล้วให้น้ำไหลผ่าน ดังแสดงในภาพที่ 4 - 30



ภาพที่ 4 - 29 ตัวอย่างแบบถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งหลอด VUV

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 ผลการวัดกำลังแสงจริงในถังปฏิกรณ์

จากการศึกษาการหาค่ากำลังแสงในถังปฏิกรณ์ด้วยวิธีเฟอริคออกซาลेट แอคทีโนมิเตอร์พบว่ากำลังของแสงที่วัดได้ในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งหลอด UV - C และ VUV มีค่าเท่ากันคือประมาณ 11 วัตต์ ซึ่งใช้พลังงานประมาณ 55 % ของกำลังหลอดทั้งหมดเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานแสง

##### 5.1.2 ผลการทดลองในชุดควบคุม

จากการศึกษาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ในสภาวะที่ไม่มีการฉายแสงพบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน 100 และ 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

##### 5.1.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าทางจลนพลศาสตร์

5.1.3.1 การใช้ UV - C สลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ VUV โดย UV - C สามารถสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ได้มากกว่า 90 % แต่ VUV สลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ได้เพียง 50 - 60 % ในระยะเวลาที่ใช้ในการสลายเท่ากัน

5.1.3.2 ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV - C เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง มีค่าอยู่ในช่วง 0.19 - 0.26 ต่อนาที ส่วนการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย VUV เป็นปฏิกิริยาอันดับสอง มีค่าคงที่ปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 0.0001 - 0.0010 ลิตรต่อไมโครกรัมนาที

5.1.3.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน มีผลต่อค่าคงที่ปฏิกิริยาในการสลาย เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายลดลง ส่งผลให้การสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน เกิดได้ช้าลง

5.1.4 ผลการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

การสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV – C จะใช้พลังงานน้อยกว่าการใช้ VUV และที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ต่ำๆ ใช้พลังงานน้อยกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงๆ

5.1.5 ผลการศึกษากลไกที่เกิดจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV – C และ VUV

เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ปฏิกิริยาของการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ในกรณีที่มีการเติมและไม่เติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ พบว่าค่าคงที่ปฏิกิริยาไม่แตกต่างกัน ดังนั้นกลไกที่เกิดในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV – C เป็นกระบวนการโฟโตไลซิส ส่วนกลไกที่เกิดในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย VUV จะเกิดทั้งกระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการออกซิเดชัน โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงๆ มีแนวโน้มที่จะเกิดกระบวนการออกซิเดชัน

5.1.6 ผลการศึกษาผลกระทบของไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตไอออนที่มีผลต่อการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

การที่น้ำมีไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตไอออนจะไม่มีผลต่อการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ซึ่งไอออนทั้งสองชนิดนี้จัดเป็นตัวขัดขวางการออกซิเดชันของอนุมูลไฮดรอกซิล แต่ในระหว่างการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วย UV – C และ VUV จะไม่เกิดกระบวนการออกซิเดชัน ดังนั้นจึงไม่มีการทำงานของไอออนทั้งสองชนิดนี้ จึง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับกรณีที่น้ำไม่มีไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตไอออน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการวัดกำลังแสงควรมีการวัดด้วยเครื่องมือวัดเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดด้วยสารเคมี

5.2.2 ถ้าต้องการนำค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ไปใช้คำนวณเวลาในการสลายควรเลือกใช้ค่าดังนี้ ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำกว่า 100 ไมโครกรัมต่อลิตร เลือกใช้ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายที่ 0.2634 ต่อนาที ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 101 – 500 ไมโครกรัมต่อลิตรควรเลือกใช้ค่า ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายที่ 0.2203 ต่อนาที ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 500 – 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรควรเลือกใช้ค่า ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายที่ 0.1995 ต่อนาที สำหรับการสลายด้วย UV – C ส่วนใน VUV ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำกว่า 100 ไมโครกรัมต่อลิตร เลือกใช้



ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายที่ 0.0010 ลิตรต่อไมโครกรัมนาที ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 101 – 500 ไมโครกรัมต่อลิตรควรเลือกใช้ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายที่ 0.0002 ลิตรต่อไมโครกรัมนาที ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 500 – 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรควรเลือกใช้ค่า ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายที่ 0.0001 ลิตรต่อไมโครกรัมนาที

- 5.2.2 เพื่อให้การสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย VUV มีประสิทธิภาพดีขึ้น ควรออกแบบถังปฏิกรณ์แบบไหลผ่าน
- 5.2.3 เพื่อให้การวิเคราะห์ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน มีความละเอียดยิ่งขึ้น ควรวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการสลาย ด้วยเครื่องมือ Mass Spectrometer ที่ต่อร่วมกับ HPLC
- 5.2.4 เพื่อให้ประสิทธิภาพการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ดีขึ้น อาจใช้แสงยูวีร่วมกับวิธีอื่น เช่น การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การเติมโอโซน เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

### ภาษาอังกฤษ

- Andersen, L., Goto-Kazeto, R., Trant, J.M., Nash, J.P., Korsgaard, B. and Bjerregaard, P. 2006. Short-term exposure to low concentrations of the synthetic androgen methyltestosterone affects vitellogenin and steroid levels in adult male zebrafish (*Danio rerio*). Aquatic Toxicology. 76: 343-352.
- Bhasin, S. et al. 1998. Issues in testosterone replacement in old men. Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism. 83: 3435-3448.
- Blasberg, M.E., Langan, C.J. and Clark, A.S. The effects of 17 $\alpha$  – Methyltestosterone, Methandrostenolone, and Nandrolone Decanoate on the Rat Estrous Cycle. Physiol.Behav. 61: 265-272.
- Bledzka, D., Gmurek, M., Gryglik, M., Olak, M., Miller, J.S., and Ledakowicz, S. 2010b. Photodegradation and advanced oxidation of endocrine disruptors in aqueous solutions. Catalysis Today. 151: 125-130.
- Budavari, S., O'Neil, M.J., Smith, A. and Heckelman, P.E. 1989. Merck Index: An Encyclopedia.
- Chowdhury, R., Charpentier, P.A. and Ray, M.B. 2011. Photodegradation of 17  $\beta$  – estradiol in aquatic solution under solar irradiation: Kinetic and influencing water parameters. Journal of Photochemistry and Photobiology A:Chemistry. 219: 67-75.
- Caupos, E., Mazellier, P. and Croue.J.P. 2011. Photodegradation of estrone enhanced by dissolved organic matter under simulated sunlight. Water Research. 45: 3341-3350.
- Czech, P., Weber, K., Dietrich D.R. 2001. Effects of endocrine modulating substances on reproduction in the hermaphroditic snail *Lymnaea Stagnalis* L. Aquatic Toxicology. 53: 103-114.
- Daneshvar, N., Aleboye, A. and Khataee, A.R. 2005. The evaluation of electrical energy per order ( $E_{EO}$ ) for photooxidative decolorization of four textile dye solutions by the kinetic model. Chemosphere. 59: 761 – 767.
- Davie, P.S. and Thorarensen, H. 1997. Heart growth in rainbow trout in response to exogenous testosterone and 17  $\alpha$  – Methyltestosterone. Comp.Biochem.Physiol. 117: 227-230.

- Fitzpatrick, M. S. and Contreras-Sanchez, W. M. 2000. Fate of Methyltestosterone in the pond environment: detection of MT in soil after treatment with MT food. PD/A CRSP seventeenth annual technical report. pp. 109-112. Oregon State University, Corvallis, Oregon, U.S.A.
- Fuguson et al., 2005. TiO<sub>2</sub> – photocatalyzed AS(III) oxidation in aqueous suspensions: reaction kinetics and effects of adsorption. Environmental Science & Technology. 39: 1880 – 1886.
- Goldstein, S. and Rabini, J. 2008. The ferrioxalate and iodide – iodate actinometers in UV region. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 193: 50 – 55.
- Gonzalez, M.G., Oliveros, E., Wörner, M. and Braun, A.M. 2004. Review Vacuum-ultraviolet photolysis of aqueous reaction systems. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 5: 225-246.
- Gryglik, D., Olak, M., and Miller, J.S. 2010. Photodegradation kinetics of androgenic steroids boldenone and trenbolone in aqueous solutions. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 212: 14-19.
- Homklin, S., Ong, S.K., and Limpiyakorn, T. 2010. Biotransformation of 17 $\alpha$ -methyltestosterone in sediment under different electron acceptor conditions. Chemosphere. 068: 211-217.
- Homklin, S., Ong, S.K., Limpiyakorn, T. 2012. Degradation of 17 $\alpha$  – methyltestosterone by *Rhodococcus* sp. and *Nocardioides* sp. Isolated from a masculinizing pond of Nile tilapia fry. Journal of Hazardous Materials. 221-222: 35-44.
- Hossain, M.A. 2005. Over – wintering growth of normal and monosex GIFT tilapia, *Oreochromis niloticus* in Bangladesh fed on formulated diet. Journal of Aquaculture in the Tropics. 20: 271 – 285.
- Huang, L., Jing, H., Cheng, Z. and Dong, W. 2013. Different photodegradation behavior of 4-tert - octylphenol under UV and VUV irradiation in aqueous solution. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 251: 69-77.
- Hu, X. et al. 2011. Adsorption and heterogeneous Fenton degradation of 17 $\alpha$  – methyltestosterone on nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/MWCNTs in aqueous solution. Applied Catalysis B: Environmental. 107: 274-283.
- Hu, X.B., Deng, Y.H., Gao, Z.Q., Liu, B.Z. and Sun, C. 2012. Transformation and reduction of androgenic activity of 17 $\alpha$  – Methyltestosterone in Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/MWCNTs-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system. Applied Catalysis B: Environmental. 127: 167- 174.

- Imoberdorf, G. and Mohseni, M. 2011. Degradation of natural organic matter in surface water using vacuum-UV irradiation. Journal of Hazardous Materials. 186: 240-246.
- Jing, C., Peng-yi, Z. and Jian, L. 2007. Photodegradation of perfluorooctanoic acid by 185 nm vacuum ultraviolet light. Journal of Environmental Sciences. 19: 387-390.
- Kang, I. J. et al. 2008. The effects of methyltestosterone on the sexual development and reproduction of adult medaka (*Oryzias latipes*). Aquatic Toxicology. 87: 37-46.
- Kasiri, M.B. and Khataee, A.R. 2012. Removal of organic dyes by UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process: modeling and optimization. Environ. Techno. 33 (12): 1417 – 1425.
- Klavarioti, M., Mantzavinos, D., and Kassinos, D. 2009. Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. Environment International. 35: 402-417.
- Korsgaard, B. 2006. Effects of the model androgen methyltestosterone on vitellin in male and female eelpout *Zoarces viviparous*. Mar. Environ. Res. 62: S205-S210.
- Leech, D.M., Snyder, M.T. and Wetzel, R.G. 2009. Natural organic matter and sunlight accelerate the degradation of 17  $\beta$  – estradiol in water. Science of the Total Environment. 407: 2087 - 2092.
- Light Sources. Low Pressure Mercury Lamps [Online]. 2013. Available from: <http://www.light-sources.com/germicidal-uvc-lamps/products/low-pressure-mercury-lamps> [2014, March 22]
- Liu, B. and Liu, X. 2004. Direct photolysis of estrogens in aqueous solutions. Science of the Total Environment. 320: 269-274.
- Macintosh, D.J. Risks associated with using methyl testosterone in tilapia farming. [Online]. 2008. Available from: [http://media.sustainablefish.org/MT\\_WP.pdf](http://media.sustainablefish.org/MT_WP.pdf) [2013, Jan 9]
- Maniero, M.G., Bila, D.M. and Dezotti, M. 2008. Degradation and estrogenic activity removal of 17  $\beta$  – estradiol and 17  $\alpha$  – ethinylestradiol by ozonation and O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Science of The Total Environment. 407: 105-115.
- Masschelein, W.J. Ultraviolet light in water and wastewater sanitation. United States of America. Lewis Publishers. 2002.

- Monica Harvey. The impacts of UV direct photolysis and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation processes on the formation of nitrosamines and oranic chloramines from subsequent chlor(am)ination. Department of Civil Engineering, University of Toronto, 2009.
- Moltalti, M., Crede, A., Prodi, L. and Gandolfi, M.T. 2006. Handbook of Photochemistry. pp 601 – 616. Taylor & Francis Group. U.S.
- Murov, S.L., Carmichael, I. and Hug, G.L. 1993. Handbook of Photchemistry. pp 299 - 305 Marcel Dekker. New York.
- National Water Research Institue. 3.0 Advanced oxidation process. [Online]. 2013. Available from: <http://www.nwri-usa.org/pdfs/TTChapter3AOPs.pdf> [2012, Feb 5]
- Oppenländer, T. Photooxidation purification of water and air. betzdruck GmbH, Darmstadt. Wiley-VCH. 2002.
- Parsons, S. 2004. Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment. pp 7-49. Pubishing, Alliance House, 12 Caxton Street, London, UK.
- Rahn, R.O., Stefen, M.I., Bolton, J.R. Goren, E., Shaw, P. and Lykke, K.R. 2003. Quantum yield of the iodide – iodate chemical actinometer: Dependence on wavelength and concentration. Photochemistry and Photobiology. 78(2): 146 – 152.
- Roberts, J.T., and Essenhigh, D.M. 1986. Adenocarcinoma of prostate in 40-year old body builder. Lancet 2: 742.
- Rosenfeldt, E.J., Chen, P.J., Kullman, S. and Linden, K.G. 2007. Destruction of estrogenic activity in water using UV advanced oxidation. Science of the Total Environment. 377: 105-113.
- Selzsam, B. et al. 2005. Effects of methyltestosterone on reproduction in the Japanese quail (*Coturnix coturnix japonica*). Environ.Res. 99: 327-334.
- Schreck, C.B. 2000. Elimination of methyltestosterone from intensive masculinization systems: Use of ultraviolet irradiation of water. PD/A CRSP seventeenth annual technical report. pp. 185-195. Oregon State University, Corvallis, Oregon, U.S.A.
- Schulte-Oehlmann. U., Oetken, M., Bachmann, J. and Oehlmann, J. 2004. Effects of Ethinyloestradiol and Methyltestosterone in Prosobranch Snails, In: K.Kümmerer (Ed.) Pharmaceuticals in the Environment. Sources, Fate, Effects and Risks, 2<sup>nd</sup> Edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberge: 233-247.

- Smith, E.S. and Phelps, R.P. Reproductive Efficiency, Fry Growth, and Response to Sex Reversal Of Nile and Red Tilapia. [Online]. 1997. Available from : <http://pdacrsp.oregonstate.edu/pubs/technical/14tchpdf/2.c.5.pdf> [2013, Jan 9]
- Soe, K.L., Soe, M., and Gluud, C. 1992. Liver pathology associated with the use of anabolicandrogenic steroids. Liver International. 12: 73-9. Space Environment Technologies, ISO 21348 Definitions of Solar Irradiance Spectral Categories [Online]. 2013. Available from: [www.spacewx.com/pdf/SET\\_21348\\_2004.pdf](http://www.spacewx.com/pdf/SET_21348_2004.pdf) [2013, Feb 5]
- Stefan, M. I., ed. (2004). Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment, IWA, London.
- Tang, T. et al. 2012. Photodegradation of quinetrol in waters and the transformation products by UV irradiation. Chemosphere. 89: 1419-1425.
- Throsten Hüffer. Determination of 17 $\alpha$  – Methyltestosterone in sediment samples form a Nile tilapia nursery pond. Master's Thesis, Department of Environmental Management, Chulalongkorn University, 2009.
- Velle, W., 1982. The Use of Hormones in Animal Production. FAP Animal Production and Health Papers 31: 53 pp.
- Vulliet, E., Falletta, M., Marote, P., Lomberget, T., Paise, J.O., and Loustalot, M.F.G. 2010. Light induced degradation of testosterone in waters. Science of the Total Environment. 408: 3554-3559.
- Wason, S., Pohlmeier-Esch, G., Pallen, C., Palazzi, X., Espuña, G. and Bars, R. 2003. 17 $\alpha$  – Methyltestosterone: 28-day oral toxicity study in the rat base on the “Enhanced OECD Test Guideline 407” to detect endocrine effects. Toxicology. 192: 119-137.
- Whidbey, C.M. et al. 2012. Photochemical induced changes of in vitro estrogenic activity of steroid hormones. Water Research. 46: 5287-5296.
- Wu, C. and Linden, K. G. 2010. Phototransformation of selected organophosphorus pesticides: Roles of hydroxyl and carbonate radicals. Water Research. 44: 3585- 3594.
- Yoon, S.H., Lee, J.H., Oh, S. and Yang, J.E. 2008. Photochemical oxidation of As(III) by vacuum-UV lamp irradiation. Water Research. 42: 3455-3463.
- Zhang, Z., Feng, Y., Liu, Y., Sun, Q., Gao, P. and Ren, N. 2010. Kinetic degradation model and estrogenicity changes of EE<sub>2</sub> (17  $\alpha$  – ethinyl estradiol) in aqueous solution by UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> technology. Journal of Harardous Materails. 181: 1127-1133.

- Zhang, Y., Zhou, J.L. and Ning, B. 2007. Photodegradation of estrone and 17  $\beta$  – estradiol in water. Water Research. 41: 19 – 26.
- Zhou, H., and Smith, D. W. (2001). Advanced Technologies in Water and Wastewater Treatment. Canadian Journal of Civil Engineering 28: 49-66.

## ภาษาไทย

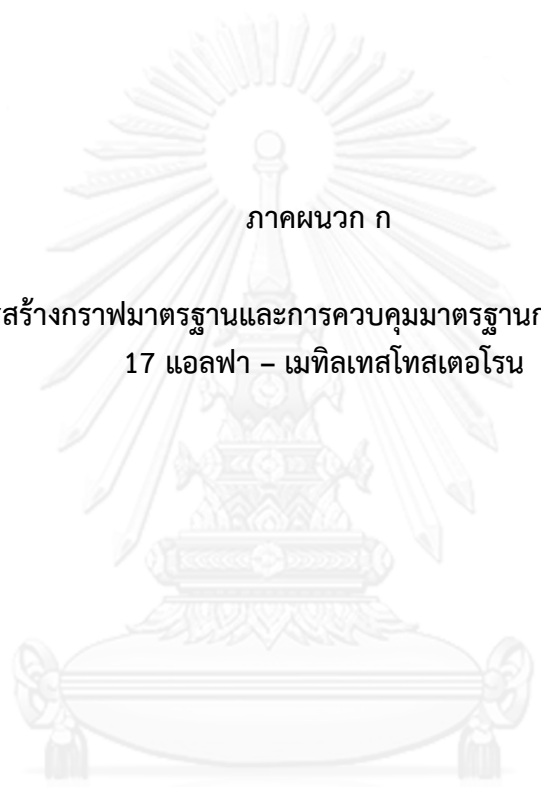
- กัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์. การย่อยสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- ธงชัย เย็นเป้ง, วรวิทย์ พรหมปากดี, สมศรี งามวงศ์ชน และ ธราพันธ์ วัฒนะมหายัตย์. กรมประมง. การศึกษาระดับของฮอร์โมน(17 alpha methyltestosterone) ที่ตกค้างในการผลิตลูกปลานิลแปลงเพศ ระบบน้ำหมุนเวียน. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: [www.fisheries.go.th/ifm\\_sarakham/web2/images/kik/vijai55.pdf](http://www.fisheries.go.th/ifm_sarakham/web2/images/kik/vijai55.pdf) [6 กุมภาพันธ์ 2556]
- ปรัศนี เจริญสิน. 2549. การกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและไททาเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปวีตรา โชติสุกานต์. 2551. การดูดซับของสารเมทิลเทสโทสเตอโรนโดยตะกอนดินชนิดต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พุทธรัตน์ เป้าประเสริฐกุล, เบญจพร สัมฤทธิ์เวช, สันติชัย รังสิยาภิรมย์ และ เต็มดวง สมศิริ. กรมประมง. การตรวจฮอร์โมน 17 อัลฟา เมทิลเทสโทสเตอโรนในปลานิลแปลงเพศ. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: [www.fisheries.go.th/ifm\\_sarakham/web2/images/kik/vijai55.pdf](http://www.fisheries.go.th/ifm_sarakham/web2/images/kik/vijai55.pdf) [19 มีนาคม 2557]
- เพ็ญพรรณ ศรีสกุลเตียว. 2553 ฮอร์โมนในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- เย็นหทัย แน่นหนา. 2549. อัลตราไวโอเล็ตสเปกโทรสโกปี. สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 530 หน้า.
- สุนา ชมพูทวีป. 2541. เภสัชวิทยาของฮอร์โมน. ภาควิชาเภสัชวิทยา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 203 หน้า.
- อุตุนิยมวิทยา,กรม. ศูนย์ตรวจวิเคราะห์ไอโซนและ รังสี สำนักตรวจและเฝ้าระวังสภาวะอากาศ . ไอโซนรังสีดวงอาทิตย์ และมลภาวะ. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา <http://ozone.tmd.go.th/uvbasic.htm>. [2556, มกราคม 9]



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**





ภาคผนวก ก

การสร้างกราฟมาตรฐานและการควบคุมมาตรฐานการวิเคราะห์  
17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก - 1 พื้นที่ใต้กราฟที่ความเข้มข้นต่างๆของสารละลายมาตรฐาน17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (ไมโครกรัมต่อลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟ
10	4.82
20	11.31
50	27.97
100	50.04
300	147.49
600	306.33
1000	506.37
1200	609.90

ตารางที่ ก - 2 ค่า % Recovery


% Recovery			ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
92.06	88.14	85.32	88.51	3.38	3.82

เมื่อ % RSD คือ ค่าความแม่นยำ (Precision) เป็นค่าที่บอกความสอดคล้องกันของข้อมูลจากการวัดสองครั้งขึ้นไป จากการทดลองแบบเดียวกัน โดยถ้าค่าที่ได้จากการวัดหลายๆครั้งเป็นค่าที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน แสดงว่าการวัดนั้นมีความแน่นอนสูง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\% \text{ RSD} = \frac{\text{SD}}{\bar{X}}$$

โดย SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
 $\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ย

หมายเหตุ ค่า % RSD ยิ่งต่ำยิ่งมีความแม่นยำมาก



ภาคผนวก ข

ผลการคำนวณความเข้มแสงกำลังแสงของหลอด UV - C และ VUV

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข - 1 ผลความเข้มแสงและกำลังของแสงในหลอด UV - C

ตำแหน่งที่วัด	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	โมลของเฟอร์รัสไอออน (ไอสไตน์ต่อวินาที)	ความเข้มแสง (มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)	กำลังของแสง (วัตต์)
ตรงกลาง	1	2.403	1.7958E-07	5.10	11
	2	2.400	1.7938E-07	5.09	11
	3	2.400	1.7940E-07	5.09	11
ด้านข้าง	1	2.405	1.7978E-07	5.10	11
	2	2.394	1.7891E-07	5.08	11
	3	2.395	1.7903E-07	5.08	11
ค่าเฉลี่ย		2.400	1.7935E-07	5.09	11
SD		0.004	3.2813E-10	0.009	0.020
% RSD		0.183	0.183	0.183	0.183

ตัวอย่างการคำนวณ ตำแหน่งที่วัดตรงกลาง วัดครั้งที่ 1 มีค่าการดูดกลืนแสง = 2.403

$$\begin{aligned}
 \text{โมลของเฟอร์รัสไอออน} &= \frac{\Delta A \times V_1 \times V_3}{\phi_\lambda \times \epsilon_{510} \times V_2 \times l \times t \times 1000} \\
 &= \frac{2.403 \times 80 \times 3.5 \times 10}{1.25 \times 111000 \times 1000 \times 3 \times 900} \\
 &= 1.7958E-07 \text{ ไอสไตน์ต่อวินาที} \\
 \text{ความเข้มแสง} &= \frac{\text{โมลของเฟอร์รัสไอออน} \times 4.716 \times 10^8}{\text{พื้นที่ผิวของปีกเกอร์}} \\
 &= \frac{1.7958E-07 \times 4.716 \times 10^8}{16.62} \\
 &= 5.10 \text{ มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร} \\
 \text{กำลังของแสง} &= \frac{5.10 \times 2,100}{1,000} \\
 &= 11 \text{ วัตต์}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ข – 2 ผลความเข้มแสงและกำลังของแสงในหลอด VUV

ตำแหน่ง ที่วัด	ครั้งที่	ค่าการ ดูดกลืนแสง	โมลของเฟอร์สไอออน (ไอสไตน์ต่อวินาที)	ความเข้มแสง (มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)	กำลังของแสง (วัตต์)
ตรงกลาง	1	2.429	1.8155E-07	5.15	11
	2	2.433	1.8182E-07	5.16	11
	3	2.429	1.8157E-07	5.15	11
ด้านข้าง	1	2.457	1.8364E-07	5.21	11
	2	2.456	1.8356E-07	5.21	11
	3	2.452	1.8324E-07	5.20	11
ค่าเฉลี่ย		2.443	1.8256E-07	5.18	11
SD		0.014	1.0187E-09	0.029	0.061
% RSD		0.558	0.558	0.558	0.558



ภาคผนวก ค

ผลการวัดความเข้มข้นชั้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค - 1 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในชุดควบคุมที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	95.70	101.41	105.31	100.81	4.83	4.79	
3	93.78	102.16	103.87	99.94	5.40	5.41	
6	93.56	97.85	103.44	98.29	4.96	5.04	
9	94.23	96.48	103.12	97.94	4.62	4.72	
12	94.04	96.47	103.54	98.02	4.93	5.03	
15	93.49	97.27	103.21	97.99	4.90	5.00	

ตารางที่ ค - 2 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในชุดควบคุมที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	481.92	495.08	501.17	492.72	9.84	2.00	
3	473.68	507.26	505.19	495.38	18.82	3.80	
6	483.08	502.42	503.16	496.22	11.39	2.29	
9	486.73	504.84	504.87	498.81	10.47	2.10	
12	486.71	498.84	502.07	495.87	8.10	1.63	
15	480.82	507.99	504.87	497.89	14.87	2.99	

ตารางที่ ค - 3 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในชุดควบคุมที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	1005.95	1000.99	992.39	999.78	6.86	0.69	
3	1012.32	1004.14	995.49	1003.98	8.41	0.84	
6	1006.25	1007.51	1000.82	1004.86	3.55	0.35	
9	994.57	1008.98	1000.04	1001.20	7.27	0.73	
12	1008.28	1006.17	1000.22	1004.89	4.18	0.42	
15	1010.34	1011.87	999.20	1007.13	6.92	0.69	

ตารางที่ ค - 4 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	103.60	105.61	105.29	104.83	1.08	1.03	
3	44.32	45.65	45.89	45.29	0.85	1.87	
6	19.71	22.51	20.16	20.79	1.51	7.24	
9	9.75	10.08	9.72	9.85	0.20	1.99	SPE
12	4.95	4.23	4.52	4.57	0.36	7.89	SPE
15	2.41	2.59	2.72	2.57	0.16	6.08	SPE



ตารางที่ ค - 5 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	508.08	509.64	508.52	508.75	0.81	0.16	
3	266.38	261.65	266.66	264.90	2.82	1.06	
6	138.80	140.35	137.77	138.97	1.30	0.94	
9	64.07	69.04	64.32	65.81	2.80	4.26	
12	37.87	36.78	37.62	37.42	0.57	1.52	
15	16.60	17.91	18.71	17.74	1.07	6.00	

ตารางที่ ค - 6 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	1013.75	1013.61	1008.22	1011.86	3.15	0.31	
3	563.67	569.77	557.47	563.64	6.15	1.09	
6	321.18	319.59	315.26	318.68	3.06	0.96	
9	173.26	171.03	166.60	170.30	3.39	1.99	
12	89.92	90.13	87.62	89.23	1.39	1.56	
15	50.86	51.79	54.08	52.24	1.65	3.17	

ตารางที่ ค - 7 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	103.58	101.54	100.72	101.95	1.47	1.44	
3	78.23	79.37	77.21	78.27	1.08	1.38	
6	66.27	64.68	63.38	64.78	1.45	2.23	
9	52.30	55.36	50.78	52.81	2.33	4.41	
12	46.35	46.82	45.04	46.07	0.92	2.00	
15	40.30	40.53	37.20	39.34	1.86	4.73	

ตารางที่ ค - 8 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	492.97	493.33	504.89	497.06	6.78	1.36	
3	415.67	414.07	407.31	412.35	4.44	1.08	
6	339.03	331.28	328.09	332.80	5.62	1.69	
9	284.35	278.19	272.85	278.46	5.75	2.07	
12	257.81	246.48	248.31	250.87	6.09	2.43	
15	217.02	212.69	219.26	216.32	3.34	1.54	

ตารางที่ ค - 9 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	1010.12	1001.50	1006.64	1006.09	4.34	0.43	
3	876.93	870.86	868.07	871.95	4.53	0.52	
6	751.89	748.36	766.45	755.56	9.59	1.27	
9	638.01	639.04	635.34	637.46	1.91	0.30	
12	569.85	555.06	563.30	562.74	7.41	1.32	
15	528.10	503.98	522.35	518.14	12.60	2.43	

ตารางที่ ค - 10 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	98.44	100.07	101.52	100.01	1.54	1.54	
3	44.24	45.66	44.28	45.06	0.81	1.80	
6	19.59	20.84	19.75	20.06	0.68	3.40	
9	8.34	8.97	7.69	8.33	0.64	7.70	SPE
12	3.81	3.76	4.56	4.04	0.45	11.04	SPE
15	2.49	2.44	2.69	2.54	0.14	5.33	SPE

ตารางที่ ค - 11 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	479.07	485.02	483.63	482.57	3.11	0.65	
3	234.04	231.66	234.04	233.25	1.38	0.59	
6	120.32	121.04	119.77	120.38	0.64	0.53	
9	58.93	59.97	57.92	55.61	1.02	1.84	
12	25.28	26.51	28.83	26.87	1.80	6.70	
15	15.81	15.43	15.36	13.53	0.24	1.77	

ตารางที่ ค - 12 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	1005.88	1004.38	1000.17	1003.48	2.96	0.30	
3	555.55	550.31	548.01	551.29	3.86	0.70	
6	312.32	317.67	310.02	306.34	3.92	1.28	
9	156.36	151.63	155.55	147.85	2.53	1.71	
12	76.23	76.08	78.41	76.90	1.30	1.70	
15	45.35	47.83	41.84	41.67	3.01	7.23	

ตารางที่ ค - 13 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	103.20	98.96	100.12	100.76	2.19	2.17	
3	78.49	74.86	77.75	77.03	1.92	2.49	
6	67.35	65.75	66.66	66.59	0.80	1.20	
9	52.61	52.52	51.53	52.22	0.60	1.14	
12	44.01	41.75	42.37	42.71	1.17	2.74	
15	40.08	38.62	37.90	38.87	1.11	2.86	

ตารางที่ ค - 14 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	504.38	500.09	502.43	502.30	2.15	0.43	
3	402.05	400.08	401.14	401.09	0.99	0.25	
6	336.98	330.49	333.62	333.70	3.24	0.97	
9	293.97	300.02	286.89	293.62	6.57	2.24	
12	247.58	247.14	243.37	246.03	2.31	0.94	
15	213.76	211.02	209.28	211.35	2.26	1.07	

ตารางที่ ค - 15 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	996.46	993.87	994.34	994.89	1.38	0.14	
3	899.96	913.63	893.68	902.42	10.20	1.13	
6	817.06	828.17	818.25	821.16	6.10	0.74	
9	712.38	738.96	713.24	721.53	15.10	2.09	
12	636.93	659.85	620.71	639.16	19.67	3.08	
15	562.67	569.93	545.30	559.30	12.66	2.26	

ตารางที่ ค - 16 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 0.5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	100.21	99.98	98.29	99.49	1.05	1.05	
3	47.41	53.41	47.73	49.52	3.37	6.81	
6	24.25	28.73	22.67	25.22	3.14	12.45	
9	10.32	13.80	11.56	11.89	1.76	14.80	
12	4.35	6.35	6.75	5.82	1.28	22.07	SPE
15	2.18	2.20	2.21	2.20	0.01	0.55	SPE

ตารางที่ ค - 17 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	102.58	100.39	100.09	101.02	1.36	1.34	
3	45.65	44.64	43.83	44.71	0.91	2.04	
6	21.96	22.12	20.85	20.98	0.69	3.29	
9	9.36	9.70	9.82	9.63	0.24	2.47	SPE
12	4.97	4.88	4.83	5.23	0.07	1.35	SPE
15	2.62	2.74	2.98	2.81	0.18	6.54	SPE

ตารางที่ ค - 18 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 50 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	98.07	98.65	98.26	98.33	0.29	0.30	
3	49.66	47.53	46.47	47.89	1.63	3.40	
6	23.28	23.14	24.24	23.55	0.60	2.54	
9	11.71	11.96	11.98	11.88	0.15	1.23	
12	7.62	7.38	7.22	7.41	0.20	2.71	SPE
15	3.51	3.56	3.38	3.48	0.09	2.54	SPE

ตารางที่ ค - 19 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 0.5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	98.74	100.21	98.45	99.13	0.95	0.95	
3	71.87	79.11	71.75	74.24	4.22	5.68	
6	56.47	61.76	55.90	58.04	3.23	5.56	
9	45.97	46.36	45.68	46.01	0.34	0.74	
12	42.94	43.24	43.27	43.15	0.18	0.42	
15	36.83	37.34	35.83	36.66	0.77	2.10	

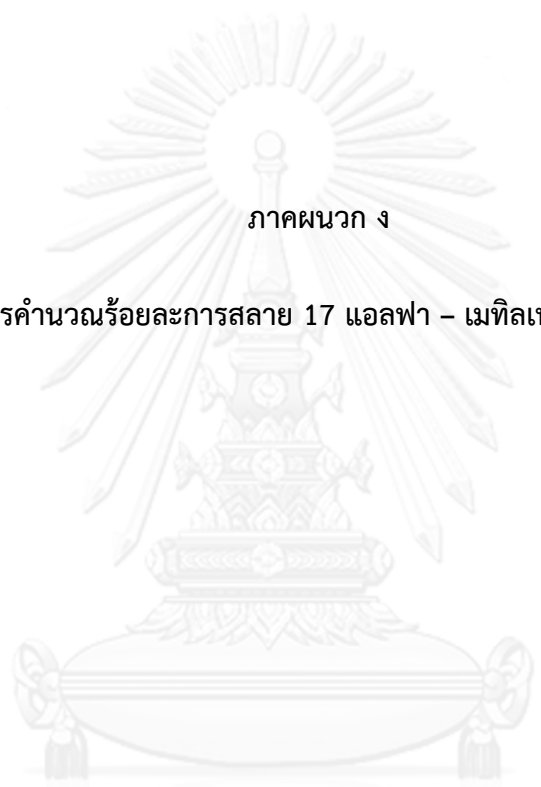
ตารางที่ ค - 20 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	99.17	97.95	99.50	98.87	0.82	0.83	
3	75.65	76.65	75.95	76.08	0.51	0.68	
6	62.38	60.95	60.04	61.12	1.18	1.93	
9	46.45	46.54	48.02	47.00	0.88	1.87	
12	40.08	39.54	38.12	39.25	1.01	2.57	
15	36.44	38.69	37.80	37.64	1.13	3.00	



ตารางที่ ค - 21 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 50 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	98.76	98.87	100.27	99.30	0.84	0.85	
3	74.25	76.72	79.80	76.92	2.78	3.62	
6	56.41	58.68	60.59	58.56	2.09	3.57	
9	53.77	50.77	53.63	52.72	1.70	3.22	
12	41.27	42.47	43.11	42.28	0.93	2.21	
15	36.40	35.77	38.73	36.97	1.56	4.21	



ภาคผนวก ง

ผลการคำนวณร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ง – 1 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UV – C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	0	0	0	0	0	0	
3	57.22	56.77	56.41	56.80	0.40	0.71	
6	80.98	78.69	80.86	80.17	1.29	1.61	
9	90.58	90.46	90.76	90.60	0.15	0.17	SPE
12	95.22	95.99	95.71	95.64	0.39	0.41	SPE
15	97.67	97.55	97.41	97.54	0.13	0.13	SPE

ตารางที่ ง – 2 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UV – C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	0	0	0	0	0	0	
3	47.57	48.66	47.56	47.93	0.63	1.32	
6	72.68	72.46	72.91	72.68	0.22	0.31	
9	87.39	86.45	87.35	87.06	0.53	0.61	
12	92.55	92.78	92.60	92.64	0.12	0.13	
15	96.73	96.49	96.32	96.51	0.21	0.21	

ตารางที่ ง – 3 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UV – C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	0	0	0	0	0	0.00	
3	44.40	43.79	44.71	44.30	0.47	1.06	
6	68.32	68.47	68.73	68.51	0.21	0.30	
9	82.91	83.13	83.48	83.17	0.29	0.34	
12	91.13	91.11	91.31	91.18	0.11	0.12	
15	94.98	94.89	94.64	94.84	0.18	0.19	

ตารางที่ ง – 4 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	0	0	0	0	0	0	
3	24.47	21.83	23.35	23.22	1.33	5.71	
6	36.02	36.30	37.07	36.46	0.54	1.49	
9	49.51	45.48	49.58	48.19	2.35	4.87	
12	55.25	53.89	55.28	54.81	0.80	1.45	
15	61.10	60.08	63.07	61.42	1.52	2.47	

ตารางที่ ง – 5 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	0	0	0	0	0	0	
3	15.68	16.07	19.33	17.02	2.00	11.76	
6	31.23	32.85	35.02	33.03	1.90	5.76	
9	42.32	43.61	45.96	43.96	1.84	4.20	
12	47.70	50.04	50.82	49.52	1.62	3.27	
15	55.98	56.89	56.57	56.48	0.46	0.82	

ตารางที่ ง – 6 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	0	0	0	0	0	0	
3	13.19	13.04	13.77	13.33	0.38	2.87	
6	25.56	25.28	23.86	24.90	0.91	3.66	
9	36.84	36.19	36.89	36.64	0.39	1.06	
12	43.59	44.58	44.04	44.07	0.50	1.13	
15	47.72	49.68	48.11	48.50	1.04	2.14	

ตารางที่ ง – 7 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UVC ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 0.5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	0	0	0	0	0	0	
3	52.69	46.58	51.43	50.24	3.23	6.42	
6	75.80	71.27	76.93	74.67	3.00	4.01	
9	89.70	86.20	88.24	88.05	1.76	2.00	
12	95.66	93.65	93.13	94.15	1.33	1.42	SPE
15	97.82	97.80	97.76	97.79	0.03	0.03	SPE

ตารางที่ ง – 8 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UVC ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	0	0	0	0	0	0	
3	55.50	55.53	56.21	55.75	0.40	0.72	
6	78.59	77.97	79.17	78.58	0.60	0.76	
9	90.88	90.34	90.19	90.47	0.36	0.40	SPE
12	95.15	95.14	95.17	95.15	0.02	0.02	SPE
15	97.45	97.27	97.02	97.25	0.21	0.22	SPE

ตารางที่ ง – 9 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย UVC ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 50 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	0	0	0	0	0	0	
3	49.36	51.82	52.71	51.29	1.74	3.38	
6	76.26	76.55	75.33	76.05	0.63	0.83	
9	88.05	87.88	87.81	87.92	0.12	0.14	
12	92.23	92.51	92.65	92.46	0.22	0.23	SPE
15	96.43	96.39	96.56	96.46	0.09	0.09	SPE

ตารางที่ ง – 10 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 0.5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	0	0	0	0	0	0	
3	27.22	21.06	27.11	25.13	3.53	14.04	
6	42.81	38.38	43.22	41.47	2.69	6.48	
9	53.44	53.73	53.60	53.59	0.15	0.27	
12	56.51	56.85	56.05	56.47	0.40	0.71	
15	62.70	62.74	63.61	63.02	0.51	0.81	

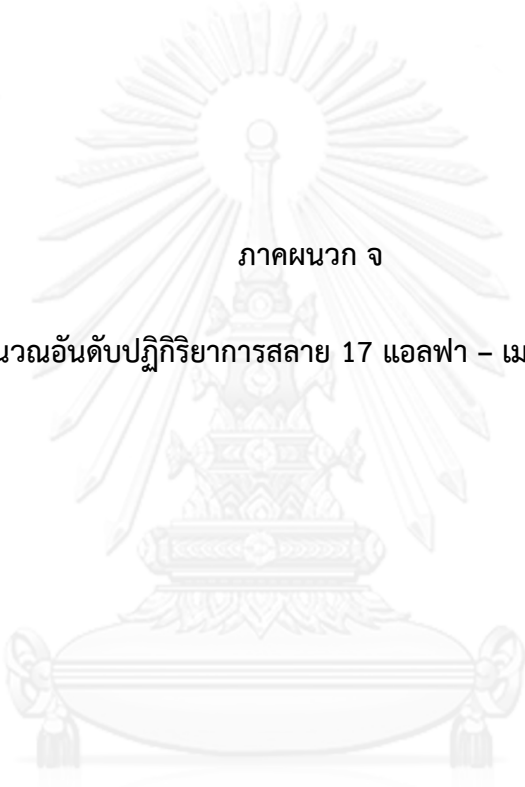
ตารางที่ ง – 11 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาท)	ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	0	0	0	0	0	0	
3	23.72	21.74	23.67	23.04	1.13	4.89	
6	37.10	37.78	39.66	38.18	1.33	3.48	
9	53.16	52.49	51.74	52.46	0.71	1.35	
12	59.59	59.63	61.69	60.30	1.20	1.99	
15	63.25	60.50	62.01	61.92	1.38	2.23	

ตารางที่ ง – 12 ร้อยละการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการทดลองด้วย VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรและมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 50 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาท)	ร้อยละการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน			ความเข้มข้นเฉลี่ย	SD	% RSD	หมายเหตุ
	1	2	3				
0	0	0	0	0	0	0	
3	24.82	22.40	20.41	22.54	2.21	9.80	
6	42.88	40.65	39.57	41.03	1.69	4.11	
9	45.55	48.66	46.51	46.91	1.59	3.39	
12	58.21	57.04	57.01	57.42	0.69	1.19	
15	63.14	63.82	61.38	62.78	1.26	2.01	





ภาคผนวก จ

ผลการคำนวณอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ จ - 1 การคำนวณอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (C) (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ln (C)	ln (dC / dt)
0	104.83	4.65	-
3	45.29	3.81	2.99
6	20.79	3.03	2.10
9	9.85	2.29	1.29
12	4.57	1.52	0.57
15	2.57	0.95	-0.41

วิธีหาอันดับปฏิกิริยา

จาก

$$r_A = -kC_A^N$$

$$\ln(-r_A) = \ln k + N \ln C_A$$

เมื่อ

$$r_A = -dC_A / dt$$

แล้วสร้างกราฟระหว่าง  $r_A$  (แกน y) กับ  $\ln C_A$  (แกน x) เพื่อหาความชันกราฟ (N)

$$\text{ความชัน (N)} = \text{อันดับปฏิกิริยา}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ที่เวลา 3 นาที

$$\ln(dC / dt) = \ln \frac{(104.83 - 45.29)}{(3 - 0)}$$

$$= 2.99$$

ตารางที่ จ - 2 การคำนวณอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ  
UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500  
ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (C) (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ln (C)	ln (dC / dt)
0	508.75	6.23	-
3	264.90	5.58	4.40
6	138.97	4.93	3.74
9	65.81	4.19	3.19
12	37.42	3.62	2.25
15	17.74	2.88	1.88

ตารางที่ จ - 3 การคำนวณอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ  
UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000  
ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (C) (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ln (C)	ln (dC / dt)
0	1011.86	6.92	-
3	563.64	6.33	5.01
6	318.68	5.76	4.40
9	170.30	5.14	3.90
12	89.23	4.49	3.30
15	52.24	3.96	2.51

ตารางที่ จ - 4 การคำนวณอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

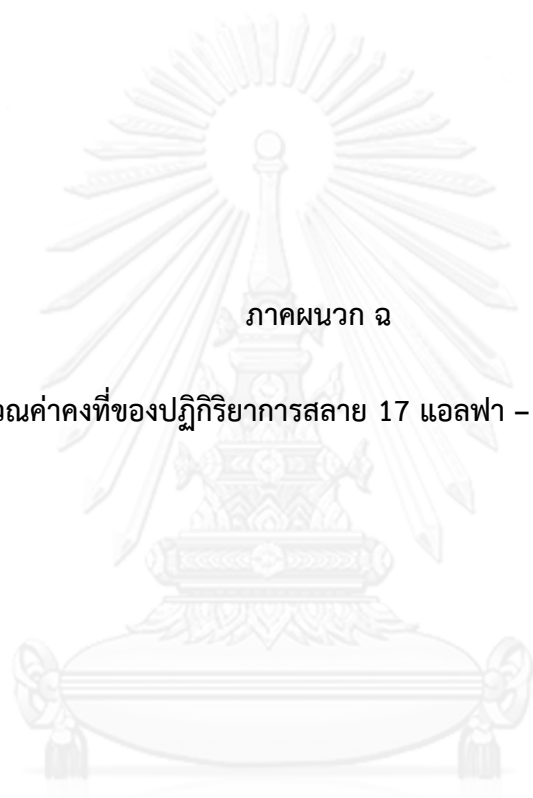
เวลา (นาที่)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (C) (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ln (C)	ln (dC / dt)
0	101.95	4.62	-
3	78.27	4.36	2.07
6	64.78	4.17	1.50
9	52.81	3.97	1.38
12	46.07	3.83	0.81
15	39.34	3.67	0.81

ตารางที่ จ - 5 การคำนวณอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที่)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (C) (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ln (C)	ln (dC / dt)
0	497.06	6.21	-
3	412.35	6.02	3.34
6	332.80	5.81	3.28
9	278.46	5.63	2.90
12	250.87	5.52	2.22
15	216.32	5.38	2.44

ตารางที่ จ - 6 การคำนวณอันดับปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาทื)	ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (C) (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ln (C)	ln (dC / dt)
0	1006.09	6.91	-
3	871.95	6.77	3.80
6	755.56	6.63	3.66
9	637.46	6.46	3.67
12	562.74	6.33	3.22
15	518.14	6.25	2.70



ภาคผนวก ฉ

ผลการคำนวณค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย

- ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$\ln C = \ln C_0 - kt$$

$$\ln C - \ln C_0 = -kt$$

$$\ln (C/C_0) = -kt$$

$$-\ln (C/C_0) = kt$$

แล้วสร้างกราฟระหว่าง  $-\ln (C/C_0)$  (แกน y) กับ เวลา (แกน x)

- ปฏิกิริยาอันดับสอง

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + kt$$

แล้วสร้างกราฟระหว่าง  $\frac{1}{C}$  (แกน y) กับ เวลา (แกน x)

ตารางที่ ๑ - 1 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$C_0$	C	$C_0$	C	$C_0$	C
0	103.60	103.60	105.61	105.61	105.29	105.29
3	103.60	44.32	105.61	45.65	105.29	45.89
6	103.60	19.71	105.61	22.51	105.29	20.16
9	103.60	9.75	105.61	10.08	105.29	9.72
12	103.60	4.95	105.61	4.23	105.29	4.52
15	103.60	2.41	105.61	2.59	105.29	2.72

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ฉ - 2 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$C_0$	C	$C_0$	C	$C_0$	C
0	508.08	508.08	509.64	509.64	508.52	508.52
3	508.08	266.38	509.64	261.65	508.52	266.66
6	508.08	138.80	509.64	140.35	508.52	137.77
9	508.08	64.07	509.64	69.04	508.52	64.32
12	508.08	37.87	509.64	36.78	508.52	37.62
15	508.08	16.60	509.64	17.91	508.52	18.71

ตารางที่ ฉ - 3 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$C_0$	C	$C_0$	C	$C_0$	C
0	1013.75	1013.75	1013.61	1013.61	1008.22	1008.22
3	1013.75	563.67	1013.61	569.77	1008.22	557.47
6	1013.75	321.18	1013.61	319.59	1008.22	315.26
9	1013.75	173.26	1013.61	171.03	1008.22	166.60
12	1013.75	89.92	1013.61	90.13	1008.22	87.62
15	1013.75	50.86	1013.61	51.79	1008.22	54.08



ตารางที่ ฉ - 4 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ  
VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100  
ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$C_0$	C	$C_0$	C	$C_0$	C
0	103.58	103.58	101.54	101.54	100.72	100.72
3	103.58	78.23	101.54	79.37	100.72	77.21
6	103.58	66.27	101.54	64.68	100.72	63.38
9	103.58	52.30	101.54	55.36	100.72	50.78
12	103.58	46.35	101.54	46.82	100.72	45.04
15	103.58	40.30	101.54	40.53	100.72	37.20

ตารางที่ ฉ - 5 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ  
VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500  
ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$C_0$	C	$C_0$	C	$C_0$	C
0	492.97	492.97	493.33	493.33	504.89	504.89
3	492.97	415.67	493.33	414.07	504.89	407.31
6	492.97	339.03	493.33	331.28	504.89	328.09
9	492.97	284.35	493.33	278.19	504.89	272.85
12	492.97	257.81	493.33	246.48	504.89	248.31
15	492.97	217.02	493.33	212.69	504.89	219.26

ตารางที่ ๖ - 6 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$C_0$	C	$C_0$	C	$C_0$	C
0	1010.12	1010.12	1001.50	1001.50	1006.64	1006.64
3	1010.12	876.93	1001.50	870.86	1006.64	868.07
6	1010.12	751.89	1001.50	748.36	1006.64	766.45
9	1010.12	638.01	1001.50	639.04	1006.64	635.34
12	1010.12	569.85	1001.50	555.06	1006.64	563.30
15	1010.12	528.10	1001.50	503.98	1006.64	522.35

ตารางที่ ๖ - 7 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ UV -C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรที่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$C_0$	C	$C_0$	C	$C_0$	C
0	98.44	98.44	100.07	100.07	101.52	101.52
3	98.44	44.24	100.07	45.66	101.52	44.28
6	98.44	19.59	100.07	20.84	101.52	19.75
9	98.44	8.34	100.07	8.97	101.52	7.69
12	98.44	3.81	100.07	3.76	101.52	4.56
15	98.44	2.49	100.07	2.44	101.52	2.69

ตารางที่ ๘ - 8 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ UV -C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500 ไมโครกรัมต่อลิตรที่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาทีก)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$C_0$	C	$C_0$	C	$C_0$	C
0	479.07	479.07	485.02	485.02	483.63	483.63
3	479.07	234.04	485.02	231.66	483.63	234.04
6	479.07	120.32	485.02	121.04	483.63	119.77
9	479.07	58.93	485.02	59.97	483.63	57.92
12	479.07	25.28	485.02	26.51	483.63	28.83
15	479.07	15.81	485.02	15.43	483.63	15.36

ตารางที่ ๘ - 9 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ UV -C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรที่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาทีก)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$C_0$	C	$C_0$	C	$C_0$	C
0	1005.88	1005.88	1004.38	1004.38	1000.17	1000.17
3	1005.88	555.55	1004.38	550.31	1000.17	548.01
6	1005.88	312.32	1004.38	317.67	1000.17	310.02
9	1005.88	156.36	1004.38	151.63	1000.17	155.55
12	1005.88	76.23	1004.38	76.08	1000.17	78.41
15	1005.88	45.35	1004.38	47.83	1000.17	41.84

ตารางที่ ฉ - 10 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ  
VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100  
ไมโครกรัมต่อลิตรที่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$C_0$	C	$C_0$	C	$C_0$	C
0	103.20	103.20	98.96	98.96	100.12	100.12
3	103.20	78.49	98.96	74.86	100.12	77.75
6	103.20	67.35	98.96	65.75	100.12	66.66
9	103.20	52.61	98.96	52.52	100.12	51.53
12	103.20	44.01	98.96	41.75	100.12	42.37
15	103.20	40.08	98.96	38.62	100.12	37.90

ตารางที่ ฉ - 11 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ  
VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 500  
ไมโครกรัมต่อลิตรที่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$C_0$	C	$C_0$	C	$C_0$	C
0	504.38	504.38	500.09	500.09	502.43	502.43
3	504.38	402.05	500.09	400.08	502.43	401.14
6	504.38	336.98	500.09	330.49	502.43	333.62
9	504.38	293.97	500.09	300.02	502.43	286.89
12	504.38	247.58	500.09	247.14	502.43	243.37
15	504.38	213.76	500.09	211.02	502.43	209.28

ตารางที่ ฉ - 12 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ  
VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000  
ไมโครกรัมต่อลิตรที่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	$C_0$	C	$C_0$	C	$C_0$	C
0	996.46	996.46	993.87	993.87	994.34	994.34
3	996.46	899.96	993.87	913.63	994.34	893.68
6	996.46	817.06	993.87	828.17	994.34	818.25
9	996.46	712.38	993.87	738.96	994.34	713.24
12	996.46	636.93	993.87	659.85	994.34	620.71
15	996.46	562.67	993.87	569.93	994.34	545.30

ตารางที่ ฉ - 13 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ  
UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000  
ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาท)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	$C_0$	C	$C_0$	C
0	1006.15	1006.15	1004.97	1004.97
3	1006.15	572.40	1004.97	567.60
6	1006.15	341.27	1004.97	338.20
9	1006.15	169.25	1004.97	173.69
12	1006.15	90.46	1004.97	90.69
15	1006.15	46.98	1004.97	51.47
20	1006.15	18.11	1004.97	19.75
30	1006.15	7.01	1004.97	6.99
45	1006.15	3.72	1004.97	3.54
60	1006.15	3.29	1004.97	3.36

ตารางที่ ฉ - 14 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ UV - C ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรที่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์


เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	$C_0$	C	$C_0$	C
0	1002.90	1002.90	1003.46	1003.46
3	1002.90	596.95	1003.46	593.22
6	1002.90	296.76	1003.46	303.60
9	1002.90	132.35	1003.46	137.76
12	1002.90	84.15	1003.46	90.91
15	1002.90	55.55	1003.46	52.83
20	1002.90	23.23	1003.46	25.83
30	1002.90	7.09	1003.46	7.30
45	1002.90	3.85	1003.46	3.93
60	1002.90	3.47	1003.46	3.64

ตารางที่ ฉ - 15 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	$C_0$	C	$C_0$	C
0	1003.70	1003.70	1002.87	1002.87
3	1003.70	849.46	1002.87	846.51
6	1003.70	779.55	1002.87	774.52
9	1003.70	658.57	1002.87	660.46
12	1003.70	584.79	1002.87	580.33
15	1003.70	511.57	1002.87	508.18
20	1003.70	418.27	1002.87	420.69
30	1003.70	283.30	1002.87	277.89
45	1003.70	158.00	1002.87	160.30
60	1003.70	94.95	1002.87	92.60

ตารางที่ ฉ - 16 การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนในการ  
 VUV ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1000  
 ไมโครกรัมต่อลิตรที่มีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 5 มิลลิโมลาร์

เวลา (นาที)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	$C_0$	C	$C_0$	C
0	997.60	997.60	997.48	997.48
3	997.60	831.12	997.48	829.73
6	997.60	717.07	997.48	717.84
9	997.60	578.01	997.48	577.97
12	997.60	510.89	997.48	510.44
15	997.60	458.11	997.48	457.93
20	997.60	379.99	997.48	378.21
30	997.60	246.65	997.48	249.00
45	997.60	135.57	997.48	136.51
60	997.60	75.95	997.48	74.17



ภาคผนวก ข

ผลการคำนวณค่าทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นในการสลาย 17 แอลฟา -  
เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย ANOVA

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY




ตารางที่ ช - 1 อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นในการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน  
ด้วย UV - C

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.005279042	2	0.002639521	209.7077154	2.80552E-06	5.14325285
Within Groups	0.00007552	6	1.25867E-05			
Total	0.005354562	8				

ตารางที่ ช - 2 อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นในการสลาย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน  
ด้วย VUV

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.000429002	2	0.000214501	57.95586911	0.000119211	5.14325285
Within Groups	2.22067E-05	6	3.70111E-06			
Total	0.000451209	8				



ภาคผนวก ซ  
การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับปฏิกิริยา (EE / O)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ซ - 1 การคำนวณพลังงานพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับปฏิกิริยา (EE / O) ใน UV - C

การคำนวณในส่วนนี้จะใช้ความเข้มข้นเฉลี่ย 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน โดยค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

$$\text{กำลังไฟฟ้า (P)} = 0.02 \text{ กิโลวัตต์}$$

$$\text{เวลาที่ใช้ในการสลาย (t)} = 15 \text{ นาที}$$

$$\text{ปริมาตรน้ำเสียส่งเคราะห์ในถังปฏิกรณ์ (V)} = 10 \text{ ลิตร}$$

แล้วนำค่าต่างๆมาแทนลงในสมการเพื่อหาค่าพลังงานพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับปฏิกิริยา

$$EE / O = \frac{P \times t \times 1000}{V \times 60 \times \log \frac{C_i}{C_f}}$$

ซึ่งสามารถสรุปได้ในตารางที่ ซ - 1

ความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ยของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (C <sub>i</sub> ) ไมโครกรัมต่อลิตร	ความเข้มข้นสุดท้ายเฉลี่ยของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (C <sub>f</sub> ) ไมโครกรัมต่อลิตร	พลังงานพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับปฏิกิริยา กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร
104.83	2.57	0.31
508.75	17.74	0.34
1011.86	52.24	0.39

ซ - 2 การคำนวณพลังงานพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับปฏิกิริยา (EE / O) ใน VUV สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ ซ - 2

ความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ยของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (C <sub>i</sub> ) ไมโครกรัมต่อลิตร	ความเข้มข้นสุดท้ายเฉลี่ยของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (C <sub>f</sub> ) ไมโครกรัมต่อลิตร	พลังงานพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับปฏิกิริยา กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร
101.95	39.34	1.21
497.06	216.32	1.38
1006.09	518.14	1.73

ซ - 3 การคำนวณพลังงานพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับปฏิกิริยา (EE / O) ในงานวิจัยของ Zhang และคณะ

โดยค่าที่ได้จากการศึกษามีดังนี้

$$\text{กำลังไฟฟ้า (P)} = 0.015 \text{ กิโลวัตต์}$$

$$\text{เวลาที่ใช้ในการสลาย (t)} = 60 \text{ นาที}$$

$$\text{ปริมาตรน้ำเสียส่งเคราะห์ในถังปฏิกรณ์ (V)} = 0.7 \text{ ลิตร}$$

$$\text{ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 เบต้า - เอสตระไดออล (C<sub>i</sub>)} = 100 \text{ นาโนกรัมต่อลิตร}$$

$$\text{ค่าความเข้มข้นสุดท้ายของ 17 เบต้า - เอสตระไดออล (C<sub>f</sub>)} = 2 \text{ นาโนกรัมต่อลิตร}$$

เมื่อนำค่าที่ได้มาแทนในสมการเพื่อหา

$$\begin{aligned} \text{EE / O} &= \frac{0.015 \times 60 \times 1000}{0.7 \times 60 \times \log \frac{100}{2}} \\ &= 0.013 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

ซ - 4 การคำนวณพลังงานพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่ออันดับปฏิกิริยา (EE / O) ในงานวิจัยของ กัตตินาฏ

- หลอด UV - B

โดยค่าที่ได้จากการศึกษามีดังนี้

$$\text{กำลังไฟฟ้า (P)} = 0.018 \text{ กิโลวัตต์}$$

$$\text{เวลาที่ใช้ในการสลาย (t)} = 120 \text{ นาที}$$

$$\text{ปริมาตรน้ำเสียส่งเคราะห์ในถังปฏิกรณ์ (V)} = 10 \text{ ลิตร}$$

$$\text{ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (C<sub>i</sub>)} = 100 \text{ ไมโครกรัมต่อลิตร}$$

$$\text{ค่าความเข้มข้นสุดท้ายของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (C<sub>f</sub>)} = 15.34 \text{ ไมโครกรัมต่อลิตร}$$

เมื่อนำค่าที่ได้มาแทนในสมการเพื่อหา

$$\begin{aligned} \text{EE / O} &= \frac{0.018 \times 120 \times 1000}{10 \times 60 \times \log \frac{100}{15.34}} \\ &= 4.42 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

- หลอด UV – C

โดยค่าที่ได้จากการศึกษามีดังนี้

กำลังไฟฟ้า (P) = 0.020 กิโลวัตต์

เวลาที่ใช้ในการสลาย (t) = 12 นาที

ปริมาตรน้ำเสียส่งเคราะห์ในถังปฏิกรณ์ (V) = 10 ลิตร

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (C<sub>i</sub>) = 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

ค่าความเข้มข้นสุดท้ายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (C<sub>f</sub>) 3.12 ไมโครกรัมต่อลิตร

เมื่อนำค่าที่ได้มาแทนในสมการเพื่อหา

$$\begin{aligned} EE / O &= \frac{0.018 \times 120 \times 1000}{10 \times 60 \times \log \frac{100}{3.12}} \\ &= 0.27 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิมพ์ทิพย์ ชุณหพิมล เกิดเมื่อวันที่ 26 สิงหาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดตรัง สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปีการศึกษา 2553 และเข้า ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2554

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่ได้รับการเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ International Conference on Advances in Civil, Structural, Environmental and Bio-Technology (CSEB) จัดที่โรงแรม G Hotel ณ เมืองกัวลาลัมเปอร์ ประเทศมาเลเซีย ในหัวข้อ Efficiency and Mechanism of 17 $\alpha$  - Methyltestosterone Degradation by UVC ในระหว่าง วันที่ 8 – 9 มีนาคม 2557



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**