

การสลายฮาโลแอกซีโตไนโตรลีในน้ำด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต
ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

นายเกียรติศักดิ์ นิกบุญ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Degradation of Haloacetonitriles in water by Ultraviolet Irradiation
combined with Hydrogenperoxide

Mr. Kiattisak Nakboon



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

เกียรติศักดิ์ นักบุญ : การสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์ในน้ำด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Degradation of Haloacetonitriles in water by Ultraviolet Irradiation combined with Hydrogenperoxide) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.อรอนงค์ ลามปริสุทธิ, 172 หน้า.

ฮาโลแอซีโตไนไตรล์ (HANs) เป็นสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ (DBPs) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนหรือโบรมีนกับสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ มักเกิดขึ้นในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ โดย HANs เป็นสารที่เป็นพิษต่อมนุษย์และธรรมชาติ องค์การอนามัยโลกระบุไว้ว่าเป็นสารก่อมะเร็งระดับซี ดังนั้นจึงควรมีการกำจัดออกจากน้ำดื่มและน้ำเสียก่อนปล่อยออกไปสู่สิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษการสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์ 3 ชนิด ได้แก่ โมโนคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (MCAN) ไดคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (DCAN) และ ไตรคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (TCAN) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 $\mu\text{g/L}$ ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และชนิดสุญญากาศ (VUV) กำลัง 15 watt ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นด้วย Modified EPA method 551.1 โดยใช้เทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟี (GC) พบว่า หลังจากระยะเวลา 90 min VUV สามารถสลาย MCAN DCAN และ TCAN ได้ร้อยละ 4.62, 70.21 และมากกว่า 99.90 ตามลำดับ แต่ UV-C สามารถสลายได้เพียง TCAN ร้อยละ 16.54 ทั้งนี้ในการสลาย HANs ผสมก็ให้ผลใกล้เคียงกัน เมื่อศึกษากลไกการสลายด้วยการเติมเทอร์เชียรี บิวทิลแอลกอฮอล์ (TBA) เป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล โดยเลือก DCAN และ HANs ผสมเป็นตัวแทนในการศึกษาการสลายของ UV-C และ VUV พบว่าเมื่อเติม TBA ก็ได้ค่าคงที่ปฏิกิริยาใกล้เคียงกันเดิม ทั้ง UV-C และ VUV ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่ากลไกหลักคือการสลายด้วยแสงโดยตรง (Direct photolysis) จึงทำการศึกษการเพิ่มประสิทธิภาพการสลายด้วยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่ 5, 10 และ 20 mg/L พบว่า การสลาย DCAN ด้วย VUV/ H_2O_2 ที่ความเข้มข้น H_2O_2 20 mg/L ทำให้การสลายเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 96.57 และค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเป็น 0.0452 min^{-1} แต่ UV-C/ H_2O_2 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง สอดคล้องกับผลการทดลองการหาปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลด้วยการทำปฏิกิริยากับกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) 5 μM โดย UV-C/ H_2O_2 ให้ปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นช่วง 3.60×10^{-13} ถึง $6.00 \times 10^{-13} \text{ M} \cdot \text{min/L}$ และ VUV/ H_2O_2 อยู่ในช่วง 6.95×10^{-12} ถึง $1.34 \times 10^{-11} \text{ M} \cdot \text{min/L}$ ซึ่งเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่ใช้ในการสลายมากกว่า

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570131921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: DEGRADATION / HALOACETONITRILES / ULTRAVIOLET RADIATION / VACUUM UV / PHOTOLYSIS / HYDROGENPEROXIDE

KIATTISAK NAKBOON: Degradation of Haloacetonitriles in water by Ultraviolet Irradiation combined with Hydrogenperoxide. ADVISOR: ON-ANONG LARPPARISUDTHI, Ph.D., 172 pp.

Haloacetonitriles (HANs) are disinfection by-products (DBPs) formed by reactions between chlorine or bromine and natural organic matter (NOM) in water. HANs are toxic to human and the environment. World Health Organization reports that some haloacetonitriles are type C carcinogen. Therefore, they have to be removed from drinking water and wastewater before release into the environment. In this research, degradation of monochloroacetonitrile (MCAN), dichloroacetonitrile (DCAN) and trichloroacetonitrile (TCAN) were investigated. Synthetic wastewater at 100 µg/L initial concentration was treated by ultraviolet-C (UV-C) and vacuum ultraviolet (VUV) at 15 watts. HANs was analyzed by Modified EPA method 551.1 using GC. The experimental results showed that VUV could degrade MCAN, DCAN and TCAN for 4.61%, 70.28% and more than 99.90%, respectively after 90 minute irradiation. On the other hand, UV-C could degrade only 16.54% of TCAN. The results of Mix-HANs degradation were similar to those of individual HANs. To study the main mechanism, *tert*-Butyl Alcohol (TBA) was added as a radical scavenger in the degradation of DCAN and mixed-HANs. It was found that the k values with and without addition of TBA were similar, so it might be concluded that the main mechanism was direct photolysis. To increase oxidation efficiency, hydrogen peroxide (H₂O₂) was added at 5, 10 and 20 mg/L. It was found that the addition of 20 mg/L H₂O₂ with VUV irradiation enhanced the DCAN degradation to 96.57% and followed first order reaction at $k = 0.0452 \text{ min}^{-1}$. However, no improvement was observed in UV-C/H₂O₂. These were comparable to the results of OH• generation by using *p*CBA as a chemical probe. The generated OH• by VUV/H₂O₂ were 6.95×10^{-12} to $1.34 \times 10^{-11} \text{ M} \cdot \text{min/L}$ which was more than that generated by UV-C/H₂O₂ that was 3.60×10^{-13} to $6.00 \times 10^{-13} \text{ M} \cdot \text{min/L}$.

Department: Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้ ถ้าขาดความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่านๆ ผู้วิจัยจึงกราบขอบพระคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

อาจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้คอยให้คำปรึกษา และแนะนำทางในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิจัย แก้ไขข้อบกพร่อง และมีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุลและ รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญเนตร สมบัติสมภพ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบ และให้คำแนะนำ ดีชม เพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์เป็นไปในทางที่ดีขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้ความรู้และอบรมสั่งสอนตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาอยู่

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณรามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำเทคนิคในการใช้เครื่องมือต่างๆ

กราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆเรื่องมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจในระหว่างดำเนินงานวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ	ฌ
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 การเกิดฮาโลแอซีไตนไตรล์	4
2.2 ชนิด โครงสร้าง และสมบัติของฮาโลแอซีไตนไตรล์	5
2.3 การเกิดฮาโลแอซีไตนไตรล์ในระบบการผลิตน้ำดื่ม	7
2.3.1 ความเป็นพิษของฮาโลแอซีไตนไตรล์	7
2.3.2 ผลกระทบของฮาโลแอซีไตนไตรล์ต่อสิ่งแวดล้อม.....	8
2.3.3 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับฮาโลแอซีไตนไตรล์.....	9
2.4 กระบวนการกำจัดฮาโลแอซีไตนไตรล์.....	10
2.4.1 การควบคุมหรือกำจัดสารอินทรีย์ในโทรเจนที่อยู่ในน้ำก่อนเข้ากระบวนการฆ่าเชื้อ โรค.....	10

2.4.1.1	กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดร่วมกับกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Adsorption by Granular Activated Carbon (GAC) Process and Coagulation Process).....	10
2.4.1.2	กระบวนการใช้โอโซน (Ozonation)	11
2.4.1.3	กระบวนการกรองด้วยเมมเบรน (Membrane Filtration)	11
2.4.1.4	กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV irradiation)	11
2.4.2	การเลือกใช้กระบวนการฆ่าเชื้อโรค.....	12
2.4.2.1	การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน.....	12
2.4.3	การกำจัดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้น.....	12
2.4.3.1	กระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับ.....	12
2.4.3.2	กระบวนการออกซิเดชัน.....	13
2.5	กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง.....	13
2.6	แสงอัลตราไวโอเล็ต.....	14
2.6.1	การแบ่งประเภทของรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	15
2.6.2	แหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	16
2.6.3	หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	17
2.7	กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต.....	17
2.8	กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Ultraviolet/Hydrogen Peroxide, UV/H ₂ O ₂).....	23
2.9	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1	แผนการทดลอง.....	27
3.2	ตัวแปรในการวิจัย.....	27
3.2.1	ตัวแปรอิสระ.....	27

3.2.2 ตัวแปรคงที่.....	27
3.2.3 ตัวแปรตาม	27
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.4 สารเคมีและอื่นๆ.....	29
3.5 พารามิเตอร์ต่างๆ.....	30
3.6 การออกแบบถังปฏิกิริยา.....	31
3.7 การศึกษาปริมาณการเกิดของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลด้วย UV และ UV/H ₂ O ₂	32
3.8 การดำเนินงานวิจัย.....	35
3.8.1 การเตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์.....	35
3.8.2 การวิเคราะห์หาปริมาณสารฮาโลแอกซีไตนไตรล์.....	36
3.9 การศึกษาการสลายฮาโลแอกซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	38
3.10 การศึกษาการสลายฮาโลแอกซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตรวมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	39
3.11 การศึกษากลไกการสลายฮาโลแอกซีไตนไตรล์	41
3.12 การวิเคราะห์ข้อมูล	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	44
4.1 ปริมาณการเกิดของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลด้วย UV และ UV/H ₂ O ₂	44
4.1.1 กลไกการการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA)	45
4.1.1.1 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C).....	45
4.1.1.2 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV)	46
4.1.2 ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA).....	47
4.1.2.1 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C).....	47
4.1.2.2 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV)	48

4.1.3 ปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต.....	50
4.2 การสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	51
4.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อวัดความเข้มข้นฮาโลแอซีไตนไตรล์ และการควบคุม คุณภาพการวิเคราะห์.....	52
4.2.2 ผลของการสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์ในชุดควบคุม.....	53
4.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์ด้วยแสง อัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และชนิดสุญญากาศ (VUV).....	53
4.2.3.1 โมโนคลอโรแอซีไตนไตรล์ (MCAN).....	53
4.2.3.2 ไดคลอโรแอซีไตนไตรล์ (DCAN).....	55
4.2.3.3 ไตรคลอโรแอซีไตนไตรล์ (TCAN).....	56
4.2.3.4 ฮาโลแอซีไตนไตรล์ (HANs).....	58
4.3 การศึกษากลไกหลักของการสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์.....	62
4.3.1 ไดคลอโรแอซีไตนไตรล์ (DCAN).....	62
4.3.1.1 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C).....	62
4.3.1.2 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV).....	63
4.3.2 ฮาโลแอซีไตนไตรล์ (HANs).....	64
4.3.2.1 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C).....	64
4.3.2.2 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV).....	65
4.4 การสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์.....	67
4.4.1 ศึกษาความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการสลายไดคลอโรแอซีไตนไตรล์ ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	67
4.4.1.1 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C).....	67
4.4.1.2 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV).....	68

4.4.2 ผลการสลายโมนโคลโรแอซีไต์ไนไตรล์ (MCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	71
4.4.3 ผลการสลายไตรคลอโรแอซีไต์ไนไตรล์ (TCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	74
4.4.4 ผลการสลายฮาโลแอซีไต์ไนไตรล์ (HANs) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	76
4.4.4.1 แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี	76
4.4.4.2 แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)	78
4.5 วิจารณ์ผลของการสลายฮาโลแอซีไต์ไนไตรล์.....	81
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	83
5.1 สรุปผลการทดลอง	83
5.1.1 ผลของการการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล.....	83
5.1.1.1 แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C).....	83
5.1.1.2 แสงอัลตราไวโอเลตสุญญากาศ (VUV).....	83
5.1.2 ผลของการทดลองในชุดควบคุม.....	83
5.1.3 ผลของการเปรียบเทียบการสลายฮาโลแอซีไต์ไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดต่างๆ.....	84
5.1.3.1 โมนโคลโรแอซีไต์ไนไตรล์	84
5.1.3.2 ไตรคลอโรแอซีไต์ไนไตรล์	84
5.1.3.3 ไตรคลอโรแอซีไต์ไนไตรล์	84
5.1.3.4 ฮาโลแอซีไต์ไนไตรล์.....	84
5.1.4 ผลของการศึกษากลไกหลักของการสลายฮาโลแอซีไต์ไนไตรล์	85
5.1.5 ผลของการสลายฮาโรแอซีไต์ไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	85

5.1.5.1 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ร่วมกับการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต	85
5.1.5.2 ผลของการสลายฮาโลเอซีโตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
รายการอ้างอิง	87
ภาคผนวก ก การคำนวณถึงปฏิกรณ์	94
ภาคผนวก ข ผลความเข้มข้นของกรดพาราคลอโรเบนโซอิก ในการหาปริมาณอนุมลอิสระไฮดรอกซิล และการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยา สำหรับกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA)	97
ภาคผนวก ค ผลความเข้มข้นและร้อยละของฮาโลเอซีโตนไตรล์ ในการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	105
ภาคผนวก ง การคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยา สำหรับฮาโลเอซีโตนไตรล์	146
ภาคผนวก จ ผลโครมาโทกราฟีของเครื่อง Gas Chromatograph สำหรับการสลายฮาโลเอซีโตนไตรล์	164
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	172

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารกลุ่มฮาโลแอซีโตไนไตรล์ชนิดต่างๆ	6
ตารางที่ 2.2 ผลกระทบต่อสุขภาพ (กรมควบคุมมลพิษ, 2556).....	7
ตารางที่ 2.3 ค่า LD ₅₀ ของสารฮาโลแอซีโตไนไตรล์ที่ทดลองในหนูทดลองโดยการกิน	8
ตารางที่ 2.4 ปริมาณความเข้มข้นของฮาโลแอซีโตไนไตรล์ที่กำหนดไว้สำหรับน้ำดื่ม.....	9
ตารางที่ 2.5 ผล Electric energy per order (EE/O) และประสิทธิภาพในการกำจัดสารกลุ่มฮาโลแอซีโตไนไตรล์.....	20
ตารางที่ 2.6 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต	22
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบที่พบเป็นร้อยละในการย่อยสลายด้วย UV/H ₂ O ₂ และ	25
ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	30
ตารางที่ 3.2 เวลาในการเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างทั้งหมดสำหรับการทดลองช่วงที่ 1 (ค่าคงที่ปฏิกิริยาของการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง).....	34
ตารางที่ 3.3 เวลาในการเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างทั้งหมดสำหรับการทดลองช่วงที่ 1.....	35
ตารางที่ 3.4 เวลาในการเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างทั้งหมดสำหรับการทดลอง ช่วงที่ 2.....	39
ตารางที่ 3.5 เวลาในการเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างทั้งหมดสำหรับการทดลองช่วงที่ 3.....	41
ตารางที่ 3.6 เวลาในการเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างทั้งหมดสำหรับการทดลองช่วงที่ 4.....	43
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ในการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับ การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H ₂ O ₂) ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ.....	48
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ในการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศร่วมกับ การเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H ₂ O ₂) ที่ความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ต่างๆ.....	49
ตารางที่ 4.3 ปริมาณอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	51

ตารางที่ 4.4 ผลของการเปรียบเทียบค่าคงที่ปฏิกิริยาระหว่างการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และชนิดสุญญากาศ (VUV).....	61
ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ในการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์แบบผสมด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) และแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศกับการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (VUU/TBA).....	66
ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ในการสลายไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ (DCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H ₂ O ₂) ที่ความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ต่างๆ	70
ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ในการสลายไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์ด้วยกระบวนการต่างๆ	76
ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ในการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์แบบผสมด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) และแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUU/H ₂ O ₂).....	80

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 สัดส่วนปริมาณของผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้นในน้ำดื่มจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน	5
ภาพที่ 2.2 แถบสเปกตรัม (Spectrum) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ เรียงตามขนาดความยาวคลื่น (นาโนเมตร, nm).....	15
ภาพที่ 3.1 ผังการทดลองทั้ง 4 ช่วง.....	28
ภาพที่ 3.2 ถังปฏิกิริยาแบบทีละเท (Batch Reactor).....	31
ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาช่วงที่ 1 (ค่าคงที่ปฏิกิริยาของการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง)	33
ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาช่วงที่ 1	34
ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการสกัดและเตรียมตัวอย่างสารกลุ่มฮาโลเอซีไตนไตรล์.....	37
ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาช่วงที่ 2.....	38
ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาช่วงที่ 3.....	40
ภาพที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาช่วงที่ 4.....	42
ภาพที่ 4.1 ความเข้มข้นของกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) เทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครโมลต่อลิตร ในการทดลองด้วย UV-C และ UV-C/TBA.....	45
ภาพที่ 4.2 กราฟ - ln (C / C ₀) เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ด้วย VUV และ VUV/TBA.....	46
ภาพที่ 4.3 กราฟ - ln (C / C ₀) เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ด้วย UV-C/H ₂ O ₂	47
ภาพที่ 4.4 กราฟ - ln (C / C ₀) เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ด้วย VUV และ VUV/H ₂ O ₂	49
ภาพที่ 4.5 กราฟมาตรฐานของฮาโลเอซีไตนไตรล์	52
ภาพที่ 4.6 ร้อยละการสลายโมโนคลอโรเอซีไตนไตรล์ (MCAN) กับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในการทดลองด้วย UV-C และ VUV.....	53

ภาพที่ 4.7 กราฟ - $\ln(C / C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายโมโนคลอโร แอกซีไตนไตรล์ (MCAN) ด้วย VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร	54
ภาพที่ 4. 8 ร้อยละการสลายไตรคลอโรแอกซีไตนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อ ลิตรในการทดลองด้วย UV-C และ VUV.....	55
ภาพที่ 4.9 กราฟ - $\ln(C / C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายไตรคลอโรแอกซี ไตนไตรล์ด้วย VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร	56
ภาพที่ 4.10 ร้อยละการสลายไตรคลอโรแอกซีไตนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อ ลิตรในการทดลองด้วย UV-C และ VUV.....	57
ภาพที่ 4.11 กราฟ - $\ln(C / C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายไตรคลอโร แอกซีไตนไตรล์ด้วย UV-C และ VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร	58
ภาพที่ 4.12 ร้อยละการสลายฮาโลแอกซีไตนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการทดลองด้วย UV-C	58
ภาพที่ 4.13 ร้อยละการสลายฮาโลแอกซีไตนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการทดลองด้วย VUV	59
ภาพที่ 4.14 กราฟ - $\ln(C / C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายฮาโลแอกซีไ ตนไตรล์แบบผสมด้วย UV-C และ VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร.....	60
ภาพที่ 4.15 ความเข้มข้นของไตรคลอโรแอกซีไตนไตรล์ (DCAN) เทียบกับเวลาที่ความเข้มข้น เริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการทดลองด้วย UV-C และ UV-C/TBA	63
ภาพที่ 4.16 กราฟ - $\ln(C / C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายไตรคลอโรแ อกซีไตนไตรล์ด้วย VUV และ VUV/TBA	64
ภาพที่ 4.17 กราฟ - $\ln(C / C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายฮาโลแอกซีไ ตนไตรล์ด้วย UV-C และ UV-C/TBA.....	65
ภาพที่ 4.18 กราฟ - $\ln(C / C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายฮาโลแอกซีไ ตนไตรล์ด้วย VUV และ VUV/TBA	66
ภาพที่ 4. 19 ร้อยละการสลายไตรคลอโรแอกซีไตนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อ ลิตรในการทดลองด้วย UV-C/H ₂ O ₂	68

ภาพที่ 4.20 ร้อยละการสลายไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในการทดลองด้วย VUV/H ₂ O ₂	69
ภาพที่ 4.21 กราฟ - ln (C / C ₀) เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายไตรคลอเอซีไตนไตรล์ด้วย VUV/H ₂ O ₂ ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	70
ภาพที่ 4.22 ร้อยละการสลายโมนโคลอโรเอซีไตนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในการทดลองด้วย UV-C/H ₂ O ₂ และ VUV/H ₂ O ₂	72
ภาพที่ 4.23 กราฟ - ln (C / C ₀) เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายโมนโคลอเอซีไตนไตรล์ด้วย VUV/H ₂ O ₂	73
ภาพที่ 4.24 ร้อยละการสลายไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในการทดลองด้วย UV-C/H ₂ O ₂ และ VUV/H ₂ O ₂	74
ภาพที่ 4.25 กราฟ - ln (C / C ₀) เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายไตรคลอเอซีไตนไตรล์ด้วย VUV/H ₂ O ₂	75
ภาพที่ 4.26 ร้อยละการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในการทดลองด้วย UV-C และ UV-C/H ₂ O ₂	77
ภาพที่ 4.27 กราฟ - ln (C / C ₀) เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ด้วย UV-C/H ₂ O ₂	78
ภาพที่ 4.28 ร้อยละการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในการทดลองด้วย VUV และ VUV/H ₂ O ₂	79
ภาพที่ 4.29 กราฟ - ln (C / C ₀) เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ด้วย VUV/H ₂ O ₂	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่เป็นที่นิยมคือ การเติมสารฆ่าเชื้อโรคกลุ่มสารฮาโลเจน เช่น คลอรีน (Cl) หรือโบรมีน (Br) เป็นต้น เพราะสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ดีและยังคงฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปนเปื้อนมาในระบบส่งจ่ายในภายหลังด้วย สารที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือคลอรีน ประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนนั้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักๆคือปริมาณคลอรีนและระยะเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค โดยจะต้องเติมคลอรีนในปริมาณที่มากเกินไปจนเกิดเป็นคลอรีนอิสระ จึงจะทำให้การฆ่าเชื้อโรคมีประสิทธิภาพ แต่การเติมคลอรีนในน้ำจะทำให้เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ (Disinfection by Products, DBPs) เนื่องจากคลอรีนจะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่อยู่ในน้ำเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ โดยแบ่งเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆคือ สารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดจากคาร์บอน (C-DBPs) เช่น กลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane, THMs) และกลุ่มกรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic acid, HAAs) เป็นต้น และอีกกลุ่มคือ สารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดจากไนโตรเจน (N-DBPs) เช่น กลุ่มฮาโลเอซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles, HANs) เป็นต้น (Chen และคณะ, 2010)

ฮาโลเอซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles, HANs) เป็นสารที่เกิดจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์ไนโตรเจนกับสารฮาโลเจน ซึ่งความเข้มข้นของฮาโลเอซิโตไนไตรล์ที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 10 ของความเข้มข้นของสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าฮาโลเอซิโตไนไตรล์มีความเป็นพิษรุนแรงกว่าสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนและกรดฮาโลอะซิติก และอาจเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของฮาโลเอซิโตไนไตรล์ไปเป็นฮาโลเอซิตาไมด์ (Haloacetamides) และกรดฮาโลอะซิติกซึ่งเป็นพิษด้วยเช่นกัน (กัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์, 2555) โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) (World Health Organization, 2012) ได้กำหนดค่าแนะนำสำหรับไดคลอโรเอซิโตไนไตรล์ (Dichloroacetonitrile, DCAN) ในน้ำไว้ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการกำจัดฮาโลเอซิโตไนไตรล์ด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Shin และคณะ, 2013) และกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Prarat และคณะ, 2011) ซึ่งต้องคำนึงถึงการกำจัดตัวดูดซับหลังใช้งานด้วย

การใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่นซี (UV-C, 253 นาโนเมตร) เพื่อกำจัดหรือสลายสารมลพิษที่ต้องการ (กัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์, 2555) และสารอินทรีย์ไนโตรเจน (Parkinson

และคณะ, 2001) พบว่าได้ประสิทธิภาพดี โดย UV-C เป็นแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีช่วงความยาวคลื่นสั้น และในปัจจุบันมีการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงสุญญากาศ (Vacuum Ultraviolet, VUV) ซึ่งมีการรายงานถึงความสามารถในการสลายสารอินทรีย์ได้ดี (Imoberdorf และคณะ, 2011) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำ VUV มาใช้ในกระบวนการกำจัดสารในกลุ่มฮาโลเอซีไคโนไตรล์ได้

นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับกระบวนการอื่นเช่น การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติมสารออกซิไดซ์ เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษ หนึ่งในนั้นคือการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อเป็นการเพิ่มอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ซึ่งช่วยในการออกซิเดชันสารมลพิษได้ดียิ่งขึ้น (Tuhkanen, 2004) จึงมีการนำมาประยุกต์ใช้กับการสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติที่เป็นสารตั้งต้นของการเกิดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ พบว่าสามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Penru และคณะ, 2012) แต่สำหรับการกำจัดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้โดยตรงยังนั้นไม่พบรายงาน

ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้จึงสนใจนำแสงอัลตราไวโอเล็ตทั้ง UV-C และ VUV มาใช้ในการสลายสารฮาโลเอซีไคโนไตรล์ และมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการออกซิเดชันให้ดียิ่งขึ้น โดยผลที่ได้อาจเป็นประโยชน์และเป็นทางเลือกหนึ่งในการพัฒนากระบวนการผลิตน้ำประปาให้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการสลายและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสลายฮาโลเอซีไคโนไตรล์ โดยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตและกลไกการสลายในช่วง UV-C และ VUV
- 1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการสลายฮาโลเอซีไคโนไตรล์ โดยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต UV-C หรือ VUV ร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิตั้ง ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตในการวิจัยได้แก่

- 1.3.1 น้ำที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่เติมโมโนคลอโรเอซีไคนไตรล, ไดคลอโรเอซีไคนไตรล และไตรคลอโรเอซีไคนไตรล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท (Batch Reactor)
- 1.3.2 ทดสอบปริมาณของการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลด้วยการเติมกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (*para*-chlorobenzoic acid, *p*CBA)
- 1.3.3 ทำการศึกษาโดยเลือกโมโนคลอโรเอซีไคนไตรล, ไดคลอโรเอซีไคนไตรล และไตรคลอโรเอซีไคนไตรลเป็นตัวแทน และทำการศึกษากับตัวอย่างที่เติมสารฮาโลเอซีไคนไตรลแบบผสม
- 1.3.4 ทดสอบการสลายฮาโลเอซีไคนไตรลด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีช่วงความยาวคลื่น UV-C และ VUV
- 1.3.5 ทดสอบการสลายฮาโลเอซีไคนไตรลด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกันคือ 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 1.3.6 ทดสอบกลไกการเกิดออกซิเดชันด้วยการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (*tert*-butyl alcohol)
- 1.3.7 เตรียมตัวอย่างด้วยการสกัดและทำการวิเคราะห์ปริมาณสารฮาโลเอซีไคนไตรลด้วยเทคนิค GC/ECD
- 1.3.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด และค่าจลพลศาสตร์ของแต่ละวิธีการบำบัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบประสิทธิภาพในการสลายฮาโลเอซีไคนไตรลทั้ง 3 ชนิด โดยใช้ UV-C กับ VUV และปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม
- 1.4.2 เพื่อใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดฮาโลเอซีไคนไตรลที่เกิดขึ้นในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคได้

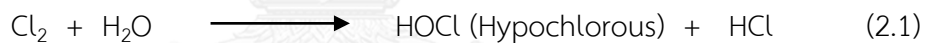
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฮาโลแอซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles)

2.1 การเกิดฮาโลแอซิโตไนไตรล์

กระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำเป็นกระบวนการที่มีความจำเป็นในการผลิตน้ำประปา ซึ่งการฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่มีด้วยกันหลายวิธี เช่นการเติมสารฮาโลเจน (มันซิน ตันทูลเวคม์, 2542) โดยนิยมเติมคลอรีนเติมลงในน้ำเพื่อฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากคลอรีนสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ดี ให้ประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99 รวมถึงสามารถฆ่าเชื้อไวรัสและเชื้ออีโคไล (E.coli) ได้ และคลอรีนยังสามารถคงฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปนเปื้อนมาภายหลังด้วย นอกจากนี้คลอรีนยังมีข้อดี คือราคาถูก นำมาใช้ได้ง่าย และสามารถเก็บรักษาได้ง่าย โดยคลอรีนที่นำมาใช้มีด้วยกันหลายรูปแบบตัวอย่างเช่น คลอรีนผง คลอรีนเม็ด คลอรีนน้ำ และก๊าซคลอรีน เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำ ดังสมการ (2.1) ถึง (2.2) (การประปานครหลวง, 2557)

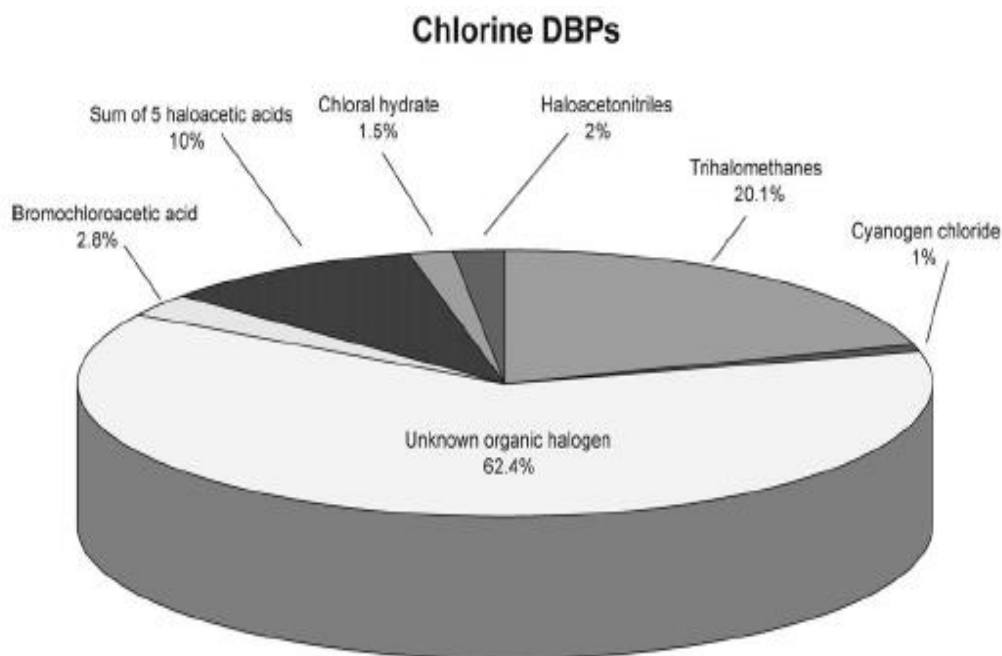


โดยที่ Cl_2 , HOCl และ OCl^- เรียกว่าคลอรีนอิสระคงเหลือ (Free residual Chlorine) แต่การใช้คลอรีนมีผลเสียคือการเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ (Disinfection by Product, DBPs) โดยเมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ละลายอยู่ในน้ำจะเกิด DBPs ที่อยู่ในรูปของสารประกอบในหลายชนิด เช่น กลุ่มของไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane, THMs กรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic acid, HAAs) ฮาโลแอซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles, HANs) และอื่นๆ ดังสมการ (2.3) (บุญฤทธิ์ ปัญญาภิบาล, 2556)



สัดส่วนของผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้นจากการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนในน้ำดื่มดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยพบว่าปริมาณของฮาโลแอซิโตไนไตรล์ที่เกิดขึ้นมีประมาณร้อยละ 2 โดยทั่วไป

ปริมาณที่พบของผลิตภัณฑ์พลอยได้จะมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ แต่หากได้รับต่อเนื่องเป็นเวลานาน อาจส่งผลต่อสุขภาพทำให้เกิดโรคได้ (Richardson, 2003)



ภาพที่ 2.1 สัดส่วนปริมาณของผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้นในน้ำดื่มจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Richardson, 2003)

ในกระบวนการผลิตน้ำดื่มเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการฆ่าเชื้อโรคแล้วพบสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ ซึ่งสารกลุ่มหลักจะเป็น THMs และพบว่ามีสารกลุ่ม HANs เกิดขึ้นจะมีประมาณร้อยละ 10 ของความเข้มข้นสารกลุ่ม THMs แต่สารกลุ่ม HANs จะมีความเป็นพิษสูงกว่า THMs (พนิดา ปรารัตน์ , 2554)


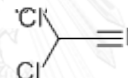
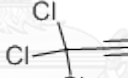

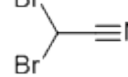
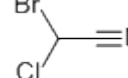
ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาปริมาณของฮาโลเอซีไตรีโตรีในน้ำประปาของไทย โดยใช้น้ำประปาจากห้องปฏิบัติการ พบความเข้มข้นของไตรคลอโรเอซีไตรีโตรีประมาณ 8 – 10 ไมโครกรัมต่อลิตร

2.2 ชนิด โครงสร้าง และสมบัติของฮาโลเอซีไตรีโตรี

สารกลุ่มฮาโลเอซีไตรีโตรี ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารฮาโลเจน มีทั้งหมดด้วยกันอยู่ 6 ชนิด ได้แก่ โมโนคลอโรเอซีไตรีโตรี (Monochloroacetonitrile), ไตรคลอ

โรแอสิตไอน์ไตรล์ (Dichloroacetonitrile), ไตรคลอโรแอสิตไอน์ไตรล์ (Trichloroacetonitrile), โมโนโบรโมแอสิตไอน์ไตรล์ (Monobromoacetonitrile), ไดโบรโมแอสิตไอน์ไตรล์ (Dibromoacetonitrile) และโบรโมคลอโรแอสิตไอน์ไตรล์ (Bromochloroacetonitrile) โดยคุณสมบัติเบื้องต้นแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารกลุ่มฮาโลแอสิตไอน์ไตรล์ชนิดต่างๆ
(พินดา ปรารัตน์, 2554)

ชื่อสารฮาโลแอสิตไอน์ไตรล์	สูตรโมเลกุล	สูตรโครงสร้าง	น้ำหนัก โมเลกุล (กรัม/โมล)	จุดเดือด (°C)	ค่าการ ละลายน้ำ (มก./มล.)
โมโนคลอโรแอสิตไอน์ไตรล์ (Monochloroacetonitrile:MCAN)	C_2H_2ClN		75.50	126	100
ไดคลอโรแอสิตไอน์ไตรล์ (Dichloroacetonitrile:DCAN)	C_2HCl_2N		109.94	112-113	10-50
ไตรคลอโรแอสิตไอน์ไตรล์ (Trichloroacetonitrile:TCAN)	C_2Cl_3N		144.39	181	<1
โมโนโบรโมแอสิตไอน์ไตรล์ (Monobromoacetonitrile:MBAN)	C_2H_2BrN		119.95	150	50-100
ไดโบรโมแอสิตไอน์ไตรล์ (Dibromoacetonitrile:DBAN)	C_2HBr_2N		198.85	170	50
โบรโมคลอโรแอสิตไอน์ไตรล์ (Bromochloroacetonitrile:BCAN)	$C_2HBrClN$		154.39	138-140	-

การเกิดสารประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของน้ำดิบได้แก่ ปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติและปริมาณสารฆ่าเชื้อที่เติมลงไปใต้น้ำ นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิหรือลดพีเอช จะทำให้ความเข้มข้นของสารกลุ่มฮาโลแอสิตไอน์ไตรล์มากขึ้นด้วย (Siddiqui และคณะ, 1993)

2.3 การเกิดฮาโลแอกซีโตไนด์ในไตรล์ในระบบการผลิตน้ำดื่ม

ฮาโลแอกซีโตไนด์เป็นสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ได้จากการฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม เกิดจากในน้ำดิบมีสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารฆ่าเชื้อโรคเช่นคลอรีน คลอรามิน หรือโบรมีน จากการศึกษาสารในกลุ่มฮาโลแอกซีโตไนด์ที่พบมากหลังจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนคือ ไตรคลอโรแอกซีโตไนด์ โดยมีการรายงานปริมาณไตรคลอโรแอกซีโตไนด์ในตัวอย่างน้ำดื่มเช่น ในรัฐ South Florida ประเทศสหรัฐอเมริกา พบปริมาณไตรคลอโรแอกซีโตไนด์ในน้ำดื่ม 42 ไมโครกรัมต่อลิตร และประเทศแคนาดา พบไตรคลอโรแอกซีโตไนด์ในน้ำดื่ม 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (Smith และคณะ, 1989)

2.3.1 ความเป็นพิษของฮาโลแอกซีโตไนด์

ความเป็นพิษของฮาโลแอกซีโตไนด์ที่พบ คือจะมีผลในการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมของมนุษย์ (Daniel และคณะ, 1986) และเมื่อได้รับเป็นเวลานานๆจะมีแนวโน้มทำให้เกิดโรคมะเร็งในระดับซี ตามที่ระบุโดยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, 2012) เนื่องจากยังไม่มีรายงานที่แน่ชัดว่าเป็นสารก่อมะเร็ง แต่พบว่าความเป็นพิษมากกว่าสารกลุ่ม THMs และ HAAs มาก Plewa และคณะ (2008) พบว่าสารฮาโลแอกซีโตไนด์มีผลกระทบต่อร่างกายหากได้รับเข้าสู่ร่างกาย ดังตาราง 2.2 และมีค่า LD₅₀ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบต่อสุขภาพ (กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

ลักษณะการเข้าสู่ร่างกาย	ผลกระทบต่อร่างกาย
หายใจ	การหายใจเข้าไปทำให้มีอาการไอ และวิตกกังวล
ผิวหนัง	การสัมผัสผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคือง
กินหรือกลืนเข้าไป	การกลืนหรือกินเข้าไปทำให้มีอาการปวดท้อง คลื่นไส้ และเกิดกรดไฮโดรไซยานิก
ตา	การสัมผัสตาทำให้ตาแดง และปวดตา
การก่อมะเร็งและความผิดปกติอื่นๆ	- ความเข้มข้นในบรรยากาศที่อันตรายที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการระเหยกลายเป็นไออย่างรวดเร็วที่ 20 องศาเซลเซียส - สารนี้เข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจหรือการกินเข้าไป

ตารางที่ 2.3 ค่า LD₅₀ ของสารฮาโลเอซีไตนไตรล์ที่ทดลองในหนูทดลองโดยการกิน (Clearsynth, 2013, U.S. Department Health and Human Services, 2013)

ชื่อสารฮาโลเอซีไตนไตรล์	สูตรโมเลกุล	LD ₅₀ (มก./กก.)
โมนอคลอโรเอซีไตนไตรล์ (Monochloroacetonitrile:MCAN)	C ₂ H ₂ ClN	300
ไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ (Dichloroacetonitrile:DCAN)	C ₂ HClN	300
ไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์ (Trichloroacetonitrile:TCAN)	C ₂ Cl ₃ N	250
โมนอโบรมอเอซีไตนไตรล์ (Monobromoacetonitrile:MBAN)	C ₂ H ₂ BrN	269
ไดโบรมอเอซีไตนไตรล์ (Dibromoacetonitrile:DBAN)	C ₂ HBr ₂ N	245
โบรมอคลอโรเอซีไตนไตรล์ (Bromochloroacetonitrile:BCAN)	C ₂ HBrClN	300

2.3.2 ผลกระทบของฮาโลเอซีไตนไตรล์ต่อสิ่งแวดล้อม

โดยส่วนใหญ่สารอินทรีย์ธรรมชาติที่อาจก่อให้เกิดฮาโลเอซีไตนไตรล์ มาจากหลายแหล่งด้วยกันเช่น จากสาหร่าย กรดฟุลวิก (Fulvic acid) และโปรตีน เป็นต้น ซึ่งสารอินทรีย์ธรรมชาตินี้มีอยู่ในน้ำดิบก่อนที่จะมีการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน และหากปล่อยฮาโลเอซีไตนไตรล์แพร่กระจายลงสู่แหล่งน้ำอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของฮาโลเอซีไตนไตรล์ เช่นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดพีเอช จะทำให้ความเข้มข้นของฮาโลเอซีไตนไตรล์เพิ่มมากขึ้น (Glezer และคณะ, 1999) และพบว่าฮาโลเอซีไตนไตรล์จะมีการกระจายได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากผลของการไฮโดรไลซิส (Oliver, 1983) เช่นหากปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ใน 8 ชั่วโมงแรกจะมีการรวมตัวทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจาก 8 ชั่วโมงจนถึง 96 ชั่วโมงจะมีการรวมตัวอย่างช้าๆ และหลังจาก 96 ชั่วโมงจะเริ่มเสถียร

แต่สำหรับ MBAN จะมีความเสถียรมากกว่า 96 ชั่วโมง และสำหรับ BCAN ที่พบจะมีความเสถียรมากกว่า DCAN

2.3.3 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับฮาโลแอกซีไธไนไตรล์

ในปัจจุบันได้มีการกำหนดระดับความเข้มข้นของการปนเปื้อนฮาโลแอกซีไธไนไตรล์ในน้ำดื่มโดยหลายภาคส่วนด้วยกันเช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) ได้กำหนดระดับความปนเปื้อนมากที่สุด (Pontius, 2003) และองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, 2012) ได้แนะนำ ระดับที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ (Maximum Contaminant Levels and Health Advisory Levels) ของน้ำดื่ม สำหรับฮาโลแอกซีไธไนไตรล์ที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์วัยผู้ใหญ่ที่มีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม ดังตารางที่ 2.4 (World Health Organization, 2012) สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการระบุไว้ในมาตรฐานน้ำดื่มและบริโภค

ตารางที่ 2.4 ปริมาณความเข้มข้นของฮาโลแอกซีไธไนไตรล์ที่กำหนดไว้สำหรับน้ำดื่ม

ฮาโลแอกซีไธไนไตรล์	US EPA, 1999 มิลลิกรัมต่อลิตร	WHO, 2011 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไดคลอโรอะซีไธไนไตรล์	≤ 0.006	≤ 0.02
ไดโบรโมอะซีไธไนไตรล์	≤ 0.02	≤ 0.07
ไตรคลอโรอะซีไธไนไตรล์	ข้อมูลยังไม่เพียงพอที่จะสรุปได้	≤ 0.001
โบรโมคลอโรอะซีไธไนไตรล์	ข้อมูลยังไม่เพียงพอที่จะสรุปได้	ข้อมูลยังไม่เพียงพอที่จะสรุปได้

2.4 กระบวนการกำจัดฮาโลเอซีไคโนไตรล์

การกำจัดหรือการควบคุมการเกิดฮาโลเอซีไคโนไตรล์ในน้ำดื่มสามารถทำได้ที่ขั้นตอนหลักในการผลิตน้ำดื่ม ดังนี้

1. ควบคุมหรือกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำก่อนเข้ากระบวนการฆ่าเชื้อโรค
2. การเลือกใช้กระบวนการฆ่าเชื้อโรคที่ก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้น้อยที่สุด
3. การกำจัดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้น

2.4.1 การควบคุมหรือกำจัดสารอินทรีย์ในโตรเจนที่อยู่ในน้ำก่อนเข้ากระบวนการฆ่าเชื้อโรค

การควบคุมการเกิดของสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ โดยการกำจัดหรือควบคุมปริมาณของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่อยู่ในน้ำดิบก่อนทำปฏิกิริยากับสารคลอรีนที่เติมเข้าไปเพื่อฆ่าเชื้อโรค

2.4.1.1 กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดร่วมกับกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Adsorption by Granular Activated Carbon (GAC) Process and Coagulation Process)

จากการแนะนำโดย U.S. EPA (1999) ให้เลือกใช้เทคนิคการตกตะกอนทางเคมี (Coagulation) หรือกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular activated carbon, GAC) ในการลดปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ ทำให้เมื่อผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนแล้ว ปริมาณของสารผลิตภัณฑ์พลอยได้จะลดลงด้วย แต่ผลยังไม่น่าพอใจนัก เนื่องจากเมื่อสิ้นสุดกระบวนการฆ่าเชื้อโรคแล้วยังพบสารผลิตภัณฑ์พลอยได้อยู่ ทำให้ต้องหาวิธีการกำจัดต่อไป (พนิดา ปรารัตน์, 2554) เช่น Uyak และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดสารตั้งต้นของสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ด้วยการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powered activated carbon, PAC) โดยการตกตะกอนทางเคมีด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งสามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติโมเลกุลขนาดใหญ่และที่มีประจุเป็นลบได้ดี และตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ชนิดผงสามารถดูดซับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและไม่มีประจุได้

2.4.1.2 กระบวนการใช้โอโซน (Ozonation)

กระบวนการใช้โอโซนเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติ โดยเกิดการออกซิเดชันทำให้ปริมาณของสารอินทรีย์ธรรมชาติลดลง เมื่อนำมาใช้เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนเข้ากระบวนการฆ่าเชื้อโรคทำให้สารผลิตภัณฑ์พลอยได้ลดลง Wang และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้โอโซนก่อนการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค โดยน้ำที่ใช้จากทะเลสาบ Tai พบว่าช่วยลดการเกิดของกรดไตรฮาโลอะซีติก (Trihaloacetic acid), ไดฮาโลอะซีโตนไนไตรล์ (Dihaloacetonitiles) และไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes) แต่จะเพิ่มการเกิดฮาโลไนโตรมีเทน (Halonitromethanes) และฮาโลคีโตน (Haloketone)

2.4.1.3 กระบวนการกรองด้วยเมมเบรน (Membrane Filtration)

กระบวนการกรองด้วยเมมเบรนเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติออกจากน้ำก่อนเข้ากระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม โดยกระบวนการนี้ยังสามารถกำจัดความขุ่น, สารอินทรีย์ และจุลชีพได้อีกด้วย แต่น้ำดิบที่นำมากำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาตินั้นมีความแตกต่างของสารอินทรีย์ธรรมชาติจึงทำให้เกิดความหลากหลายในการเลือกใช้นิคมของเมมเบรน เช่น อัลตราฟิวเทชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิวเทชัน (Nanofiltration) เป็นต้น เช่น Chellam และคณะ (2008) ใช้นาโนฟิวเทชันในการบำบัดน้ำขั้นต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำดื่ม โดยสามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ และลดสารที่ก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำด้วย

2.4.1.4 กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV irradiation)

กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีอยู่ในน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารเคมี ซึ่งเป็นการลดสารตั้งต้นของสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ โดยมีการประยุกต์ใช้แสงอาทิตย์เพื่อทำการสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติเรียกว่ากระบวนการโฟโตไลซิสด้วยแสงอาทิตย์ (Solar photolysis) และแสงอัลตราไวโอเล็ต ในการกำจัดหรือสลายมลพิษในน้ำ พบว่าปริมาณของแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ UV_{dose} จะต้องมีปริมาณเพียงพอกับการดูดซับของกรดฟลูอิกและกรดฮิวมิก พบว่าสามารถสลายสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำได้ดีที่การดูดกลืนแสง 254 นาโนเมตร โดยองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่สามารถสลายได้ดีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น Aldehydes และ Carboxylic acids (Corin และคณะ, 1996)

2.4.2 การเลือกใช้กระบวนการฆ่าเชื้อโรค

2.4.2.1 การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน

เพื่อให้การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถเปลี่ยนชนิดของสารฆ่าเชื้อโรคจากคลอรีนไปเป็นคลอรามิน เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยคลอรามินที่เหลือในระบบส่งจ่ายน้ำจะสามารถเกิดปฏิกิริยาคลอรีนชัน (Chlorination) ได้ (พนิดา พรารัตน์, 2554) โดยโมโนคลอรามิน (Monochloramine) ทำให้เกิด THMs และ HAAs ลดลง และส่งผลต่อการเกิดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้กลุ่มอื่นด้วย โดยเพิ่มขึ้นในรูปของ HANs และ iodo-THMs (*i*-THMs) (Bichsel และคณะ, 2000) และต่อมามีการศึกษาเปรียบเทียบการเกิดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการเติมคลอรีนอิสระและโมโนคลอรามิน พบว่าการเติมคลอรามินทำให้เกิด THMs ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 10 เท่า แต่ทำให้เกิดไดคลอโรอะซิโตไนโตรล์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 5 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คลอรีนอิสระ (Lee และคณะ, 2007)

2.4.3 การกำจัดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้น

เมื่อผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรคแล้วอาจจะเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ ซึ่งอาจต้องมีกระบวนการกำจัดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ โดยมีอยู่หลายกระบวนการดังต่อไปนี้

2.4.3.1 กระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับ

เป็นกระบวนการที่อาศัยกลไกทางกายภาพและทางเคมีเพื่อทำการแยกหรือกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ต้องการออก (ชุตินา กัลยาประสิทธิ์, 2551) โดยทั่วไปจะนิยมใช้สารที่มีรูพรุนสูงเช่น ตัวดูดซับคาร์บอน ตัวดูดซับซิลิกา เป็นต้น โดยอาจมีการปรับปรุงคุณภาพและสภาวะการดูดซับเพื่อให้มีการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น เช่น การกำจัดฮาโลอะซิโตไนโตรล์ในน้ำด้วยกระบวนการดูดซับโดยการปรับปรุงเมโซพอร์ซิลิกา (พนิดา พรารัตน์, 2554) เป็นต้น แต่กระบวนการดูดซับนี้ทำให้เกิดของเสียอีกชนิดขึ้นคือตัวดูดซับที่มีสารมลพิษติดอยู่ ทำให้ต้องหาวิธีการกำจัดตัวดูดซับนี้ด้วย

2.4.3.2 กระบวนการออกซิเดชัน

กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) ใช้ลดความเป็นพิษของมลพิษ โดยทำการเติมสารออกซิไดซ์เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของมลพิษ ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและทำให้มีขนาดเล็กลง หรือทำให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษน้อยลง ทำให้สามารถนำไปบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพหรือกระบวนการอื่นๆต่อไปได้ กระบวนการออกซิเดชันจะให้ประสิทธิภาพดีในการกำจัดสารอินทรีย์หลายชนิด เช่น สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เป็นสารประกอบคลอรีน (Chlorinated VOCs), เมอร์แคปแทน (Mercaptan, CH_4S), ฟีนอล (Phenol, $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$) และไซยาไนด์ (Cyanide, HCN) เป็นต้น โดยสารออกซิไดซ์ได้แก่ โอโซน (Ozone, O_3), ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide, H_2O_2) และคลอรีน (Chlorine, Cl) รวมทั้งสารประกอบ ไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite, HClO), เปอร์ซัลเฟต (Persulfate), เปอร์คลอเรต (Perchlorate, ClO_4^-) และเปอร์แมงกาเนต (Permanganate) เป็นต้น ซึ่งการเติมสารออกซิไดซ์ในบางครั้งอาจมีข้อเสียเนื่องจากเมื่อเติมสารพวกนี้เข้าไปอาจทำให้เพิ่มความเป็นพิษมากขึ้นในน้ำได้ เช่น การเติมคลอรีนบางครั้ง จะทำให้เกิดความเป็นพิษเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม เมื่อของเสียมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนผสมอยู่ เป็นต้น (Tchobanoglous และคณะ, 1993, ธีรวิทย์ สว่างปัญญากร, 2547)

2.5 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Process, AOPs) เป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่สลายยากในน้ำและน้ำเสีย โดยอาศัยหลักการออกซิเดชันด้วยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical, $\text{OH}\cdot$) เพื่อเปลี่ยนรูปหรือสลายสารอินทรีย์ให้เป็นอนุมูลของสารอินทรีย์ ซึ่งจะเป็นตัวเพิ่มกำลังของการออกซิเดชัน เนื่องจากมีการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์โมเลกุลอื่นๆได้ต่อไป ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดโมเลกุลให้เล็กลง และโครงสร้างที่เหมาะสมกับการบำบัดด้วยกระบวนการอื่นต่อไป หรือเป็นการลดความเป็นพิษของสารมลพิษและช่วยในการลดสารอินทรีย์ในน้ำโดยไม่มีการเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์ออกจากเฟสน้ำด้วย (อาทิตย์พันธุ์ สัยยะนิจู, 2547)

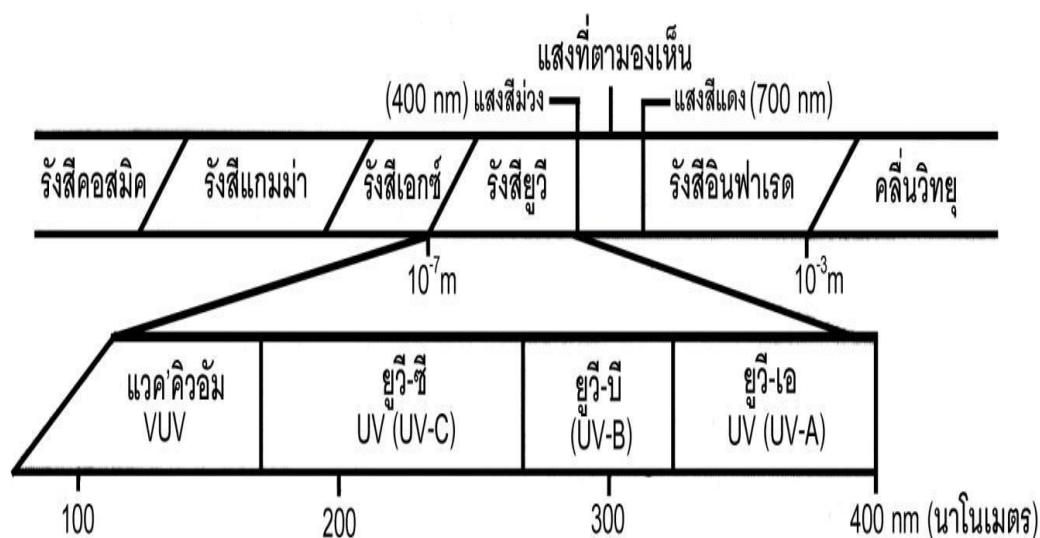
กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการใช้โอโซน (Ozone process), กระบวนการอัลตราซาวด์ (Ultrasound process), กระบวนการโฟโตอิเล็กโทรคะตะไลซิส (Photoelectro-catalysis process), กระบวนการฉายรังสี (Radiation process), กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Photolysis process) และการใช้หลายกระบวนการร่วมกัน เช่น กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Ultraviolet/Hydrogen Peroxide, $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$) เป็นต้น

นอกจากนี้ในการสลายสารมลพิษอาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันร่วมกับปฏิกิริยาอื่น ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษากลไกในการสลายมลพิษจึงมีการเติม Hydroxyl radical scavenger เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลกับสารมลพิษเพื่อเปรียบเทียบกับการสลายสารมลพิษที่ไม่เติม radical scavengers

Maniero และคณะ (2008) ศึกษาการสลาย estrogen, 17 β -estradiol และ 17-ethinylestradiol ด้วยกระบวนการใช้โอโซน และการใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่พีเอช ต่างกัน โดยเติม *tert*-butyl alcohol ที่มีความเข้มข้น 4×10^{-3} โมลต่อลิตร ที่พีเอช 7 และ 11 ผลปรากฏว่า estrogen สลายได้น้อยกว่าที่ไม่เติม *tert*-butyl alcohol จึงสรุปว่าที่พีเอช 7 และ 11 เป็นกระบวนการสลาย estrogen เป็นกระบวนการออกซิเดชัน ต่อมาได้มีการศึกษากระบวนการออกซิเดชันของ Bisoprolol (BIS) ด้วยระบบให้ความร้อนร่วมกับเปอร์ซัลเฟตกับน้ำ และเติม *tert*-butyl alcohol 0.4 โมลต่อลิตร พบว่าจะมีการสลาย Bisoprolol ลดลงร้อยละ 51 จึงสรุปได้ว่าการสลาย Bisoprolol เป็นกระบวนการออกซิเดชันของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Ghauch และคณะ, 2012) Hazime และคณะ(2014) ศึกษาการย่อยสลาย imazalil ด้วยกระบวนการ 3 กระบวนการ คือ UV/TiO₂, UV/K₂S₂O₈ และ UV/TiO₂/K₂S₂O₈ พบว่า เมื่อเติม *tert*-butyl alcohol ทำให้การสลายลดลงร้อยละ 66 ทำให้สรุปได้ว่าการสลายที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการออกซิเดชัน

2.6 แสงอัลตราไวโอเล็ต

แสงอัลตราไวโอเล็ต หรือ แสงยูวี เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่มีช่วงความยาวคลื่น 100 ถึง 400 นาโนเมตร โดยรังสีมีการแบ่งช่วงที่แตกต่างกันดังภาพที่ 2.2 แถบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่าสเปกตรัม (Spectrum) (แสง เกิดประทุม, 2552)



ภาพที่ 2.2 แถบสเปกตรัม (Spectrum) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ เรียงตามขนาดความยาวคลื่น (นาโนเมตร, nm) (แสวง เกิดประทุม, 2552)

2.6.1 การแบ่งประเภทของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

การแบ่งชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ตออกตามความยาวคลื่นสามารถแบ่งได้เป็น 4 ช่วง คือ (แสวง เกิดประทุม, 2552)

1. ช่วงความยาวคลื่นยาว หรือ UV-A มีช่วงความยาวคลื่นที่ 315 - 400 นาโนเมตร หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Long Wave Ultraviolet Radiation ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่มีพลังงานต่ำสุดของรังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นช่วงคลื่นที่อยู่ใกล้กับช่วงที่ตามองเห็นเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า near UV โดยทั่วไปจะส่งผลกระทบต่อผิวหนังมีสีน้ำตาล แต่ไม่ทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต
2. ช่วงความยาวคลื่นปานกลาง หรือ UV-B มีช่วงความยาวคลื่นที่ 280 - 315 นาโนเมตร หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Middle Wave Ultraviolet Radiation หรือ Sunburn Radiation จะมีพลังงานสูงขึ้น สามารถทำให้ผิวหนังไหม้และมีหลักฐานว่าเป็นเหตุของการเกิดมะเร็งผิวหนังได้
3. ช่วงความยาวคลื่นสั้น หรือ UV-C มีช่วงความยาวคลื่นที่ 200 - 280 นาโนเมตร หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Short Wave Ultraviolet Radiation หรือ Germicidal Radiation เนื่องจากสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ โดยที่ในช่วงความยาวคลื่นสั้นนี้มีพลังงานสูงกว่าช่วงความยาวสองชนิดแรก สามารถดูดกลืนได้โดย DNA และ RNA ในนิวเคลียสของเซลล์ให้เกิดการกลายพันธุ์เกิดเซลล์มะเร็งและเกิดการตายของเซลล์ ในสมัยโบราณมีการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตในการฆ่าเชื้อ

เซลล์ที่อยู่บนผิวหนังของคนที่เป็นโรคเรื้อน ถ้ามองด้วยตาเปล่า อาจทำให้เกิดการไหม้ของจอประสาทตา ทำให้ตาบอดและทำให้สารประกอบในกระจกตาขุ่น เป็นโรคต้อกระจกได้

4. ช่วงความยาวคลื่นสุญญากาศ หรือ VUV มีช่วงความยาวคลื่นที่ 100 - 200 นาโนเมตร บางครั้งอาจเรียกว่า Ozone UV เพราะเป็นแสงอัลตราไวโอเล็ตที่สามารถกระตุ้นออกซิเจนในอากาศให้เกิดเป็นโอโซนได้ เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ตช่วงความยาวคลื่นนี้ถูกดูดกลืนโดยไอน้ำ และออกซิเจนในอากาศ ดังนั้น ถ้าแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 นาโนเมตร เคลื่อนที่ผ่านบรรยากาศจะถูกดูดกลืนหมด ดังนั้นตัวกลางต้องเป็นสุญญากาศแสงยูวีจึงจะส่องผ่านได้ จึงเรียก Vacuum UV แสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 200 นาโนเมตรจะมีพลังงานสูงที่สุดและมากพอที่จะทำลายพันธะทางเคมี และถูกดูดกลืนโดยสารประกอบได้

2.6.2 แหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

โดยปกติแล้วจะแบ่งแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 ประเภท คือแหล่งกำเนิดที่มาจากธรรมชาติ และแหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น

1. แหล่งกำเนิดที่มาจากธรรมชาติ

แสงอัลตราไวโอเล็ตที่เกิดจากธรรมชาติจะเกิดจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar Radiation) แสงอาทิตย์จะมีการเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศของโลก บรรยากาศโลกชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) ที่มีก๊าซไอออนอยู่จะดูดกลืนแสง โดยแสง UV-C เกือบทั้งหมดจะถูกดูดกลืนไว้ในชั้นนี้ เหลือเพียงแสง UV-A และ UV-B ที่ส่องผ่านมาถึงผิวโลก และการเดินทางของแสงอัลตราไวโอเล็ตจะเดินทางโดยการแผ่รังสี แต่หากมีเมฆหรือหมอกก็อาจขัดขวางการเดินทางของแสงได้ (แสง เกิดประทุม, 2552)

2. แหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น

แสงอัลตราไวโอเล็ตที่มนุษย์สร้างขึ้น (Artificial sources) เกิดขึ้นเมื่อมีการให้พลังงานกับวัตถุจนอุณหภูมิสูงกว่า 2500 เคลวิน วัตถุนั้นจะทำการปล่อยรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ ซึ่งการปล่อยสเปกตรัมจะขึ้นอยู่กัธรรมชาติของโมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านกระแสไฟฟ้าแรงดัน และสภาวะของกระแสที่ปล่อยออกมา ทำให้รังสีที่ได้แตกต่างกันตามแรงดัน ลักษณะการใช้งาน รูปร่างของหลอด เป็นต้น (กมลวรรณ ปรีชาวนา, 2547)

2.6.3 หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ปัจจุบันได้มีการแบ่งชนิดของหลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตไว้ 3 ชนิด ดังนี้ (ปรัศนี เจริญสิน, 2549)

1. หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันสูง (High-pressure lamp) โดยหลอดชนิดนี้สามารถทนความดันสูงได้เนื่องจากภายในบรรจุด้วยไอปรอทหรือก๊าซอาร์กอน ตัวหลอดทำจากท่อควอทซ์ (Quartz pipe) เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ถึง 30 มิลลิเมตร และขั้วหลอดเป็นแบบ exoxidated electrodes (wolfram wires coated with strontium and barium carbonates) โดยมีขั้วหลอดปิดปลายทั้งสองด้าน ส่วนหลอดควอทซ์บรรจุปรอทที่ความดันสูงประมาณ 1 - 10 atm จะให้กำเนิดแสงขาว (Visible light) รังสีอินฟราเรด (Infrared ray) และรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความคลื่นอยู่ระหว่าง 365.0 - 366.3 นาโนเมตร หากมีการใช้งานจะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากความร้อน โดยอุณหภูมิจะร้อนขึ้นจนถึง 300 องศาเซลเซียส

2. หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันปานกลาง (Medium-pressure lamp) ภายในบรรจุไอปรอท ซึ่งมีความดันแก๊สทั้งหมดอยู่ที่ 10 - 30 MPa (1 - 3 bar)

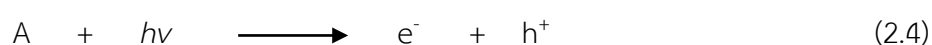
3. หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันต่ำ (Low-pressure lamp) ตัวหลอดทำจากท่อแก้ว (Uviol) มีกำลัง 15 - 60 วัตต์ และมีความดันประมาณ 0.001 atm หลอดความดันต่ำนี้มีรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณร้อยละ 70 ของรังสีที่เกิดขึ้นทั้งหมด และร้อยละ 60 ของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เกิดขึ้นจะมีความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ซึ่งเหมาะกับการกำจัดเชื้อโรคและทำลายพันธะเคมีต่างๆ และให้ประสิทธิภาพสูง

2.7 กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต

การฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation) จะเป็นการนำแสงอัลตราไวโอเล็ตมาใช้ในการสลายสารมลพิษ โดยจะทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตไปสลายสารมลพิษโดยตรงเรียกว่า กระบวนการโฟโตไลซิสโดยตรง (Direct Photolysis) หรือฉายแสงเพื่อให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระในน้ำ สำหรับกระบวนการออกซิเดชันต่อไป เรียกว่า กระบวนการโฟโตไลซิสทางอ้อม (Indirect Photolysis) (Parsons, 2004, กัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์, 2555)

กระบวนการโฟโตไลซิสโดยตรง (Direct photolysis) เป็นกระบวนการให้แสง โดยที่แสงจะต้องมีความยาวคลื่นที่พอดีกับพันธะของสาร เพื่อให้สารมีการดูดกลืนแสงที่สภาวะปกติ สารจะ

อยู่ในสถานะที่เรียกว่าสถานะพื้น (Ground State) คือระดับมีพลังงานต่ำสุด เมื่อสารได้รับแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมจะมีการดูดกลืนแสงเข้าไป ทำให้เกิดสถานะที่เรียกว่าสถานะเร้า (Excited State) เป็นสถานะที่ถูกกระตุ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน ซึ่งเมื่อได้รับพลังงานมากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกตัวในที่สุด โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ เมื่อโมเลกุลมีการดูดกลืนแสงจะทำให้ภายในโมเลกุลมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการหลุดออกของคู่อิเล็กตรอน (e^-) และเกิดโพรงอิเล็กตรอน (hole, h^+) ดังสมการที่ (2.4) เรียกสมการนี้ว่า Photoexcitation (Parsons, 2004) โดยที่ A คือ สารมลพิษ และ $h\nu$ แสงอัลตราไวโอเล็ต

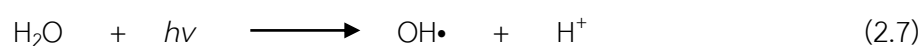


หลังจากผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยแสงดังกล่าวแล้ว อาจเกิดความร้อนขึ้นเนื่องจากเกิดการกลับมารวมตัวกันใหม่ได้อย่างรวดเร็วหรืออาจเกิดกระบวนการดูดซับที่บริเวณผิวของสารดังสมการที่ (2.5) เรียกว่าสมการ Recombination



สำหรับกลไกในการออกซิเดชันของสารที่ต้องการย่อยสลายในน้ำ ซึ่งมีกลไกทางเคมีของกระบวนการออกซิเดชันแบ่งออกเป็น 2 กลไก คือ กลไกออกซิเดชันกับโพรงอิเล็กตรอนโดยตรง ซึ่งเป็นไปตามที่กล่าวมาข้างต้น และกลไกออกซิเดชันกับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งมีกลไกหลักเป็นกระบวนการออกซิเดชันด้วยแสงจะเป็นการออกซิไดซ์โดยอนุมูลอิสระ (Parsons, 2004)

กระบวนการออกซิเดชันกับอนุมูลอิสระเกิดขึ้นเมื่อน้ำได้รับแสงเข้าไป และเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($OH\cdot$) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดี สามารถทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการสลายได้อย่างรวดเร็ว และหากทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ ดังขั้นตอนตามสมการที่ (2.6) ถึง (2.8) กระบวนการทั้งหมดนี้อาจเรียกว่า กระบวนการโฟโตไลซิสทางอ้อม (Indirect photolysis)



Chen และคณะ (2010) ศึกษาการใช้แสงอาทิตย์เพื่อสลายสารฮาโลเอซีไตนไตรล์ในน้ำ ที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย ที่มีความหลากหลายของสารผลิตภัณฑ์พลอยได้อยู่ โดยฮาโลเอซีไตนไตรล์ที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ โบรโมคลอโรเอซีไตนไตรล์ และไดโบรโมเอซีไตนไตรล์ ทำการสลายด้วยแสงอาทิตย์เป็นเวลา 6 ถึง 8 ชั่วโมง พบว่าแสงอาทิตย์สามารถสลายสารกลุ่มฮาโลเอซีไตนไตรล์ได้ โดยสามารถสลายไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ได้ร้อยละ 46 โบรโมคลอโรเอซีไตนไตรล์สลายได้ร้อยละ 26 และไดโบรโมเอซีไตนไตรล์สลายได้ร้อยละ 12 สำหรับค่าคงอัตราการเกิดปฏิกิริยาของโบรโมคลอโรเอซีไตนไตรล์เป็น 0.329 ต่อชั่วโมง และค่าคงอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไดโบรโมเอซีไตนไตรล์เป็น 0.324 ต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สำหรับค่าคงอัตราการเกิดปฏิกิริยาของไดคลอโรเอซีไตนไตรล์เป็น 0.063 ต่อชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่าสารทั้งสองตัวที่กล่าวมา เมื่อพิจารณาโครงสร้างของสารแต่ละชนิดซึ่งมีองค์ประกอบที่ต่างกันระหว่าง Mono-halogenated Dihalogenated และ Trihalogenated ด้วยการทำ QSAR modeling ปรากฏว่า การลดลงของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากสารอินทรีย์ไนโตรเจนจะลดลงได้เร็วกว่าสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดจากสารอินทรีย์คาร์บอน เรียงตามลำดับดังนี้ N-nitroso (N-NO) > nitro (NO₂) > nitrile (C≡N) > carbonyl (C=O) > carboxyl (COOH) นอกจากนี้ยังพบว่า สารที่มีองค์ประกอบของโบรมีนจะสลายได้ง่ายกว่าสารที่มีองค์ประกอบของคลอรีนและสารที่มีหมู่ฮาโลเจนมาก จะมีความเสถียรต่ำกว่าสารที่มีหมู่ฮาโลเจนต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา Lekkas และคณะ (2004) ที่มีการสรุปว่า โมโนคลอโรเอซีไตนไตรล์ยากที่จะสลายด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส (Chen และคณะ, 2010) ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้แสงอาทิตย์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Solar-photocatalysis, UV_{solar}/TiO₂) เพื่อกำจัดไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ที่พบจากน้ำดื่ม โดยใช้แสงยูวีจากหลอดไฟไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ลดลงร้อยละ 20 หลังจากบำบัดด้วย UV_{solar}/TiO₂ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.98×10^{-3} ต่อนาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการใช้โอโซนพบว่า สามารถกำจัดไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ได้ร้อยละ 40 ในเวลา 4 ชั่วโมง และมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 1.9×10^{-3} ต่อนาที และให้ผลดีกว่ากระบวนการ UV_{solar}/TiO₂ เนื่องจากการใช้โอโซนจะมีศักยภาพในการออกซิเดชันสูงกว่าและใช้พลังงานรวมต่ำกว่า (Shin และคณะ, 2013)

สำหรับการกำจัดสารกลุ่มฮาโลเอซีไตนไตรล์ด้วยการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต มีการศึกษาการบำบัดน้ำจากสระว่ายน้ำที่ใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่เป็น Medium pressure Ultraviolet โดยสารกลุ่มฮาโลเอซีไตนไตรล์ที่ทำการศึกษาได้แก่ ไดคลอโรเอซีไตนไตรล์

โบรมคลอโรแอกซีไตไนไตรล์ ไตโบรมแอกซีไตไนไตรล์ และไตรคลอโรแอกซีไตไนไตรล์ โดยมีความเข้มข้นของฮาโลแอกซีไตไนไตรล์ผสมเป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ให้แสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 90 นาที พบว่า การสลายเป็นปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง มีค่าคงที่จลพลศาสตร์สำหรับการสลายไตรคลอโรแอกซีไตไนไตรล์เท่ากับ 0.024 ± 0.006 ต่อนาที สำหรับการสลายโบรมคลอโรแอกซีไตไนไตรล์เท่ากับ 0.094 ± 0.010 ต่อนาที สำหรับการสลายไตโบรมแอกซีไตไนไตรล์ 0.200 ± 0.021 ต่อนาที และสำหรับการสลายไตรคลอโรแอกซีไตไนไตรล์เท่ากับ 0.130 ± 0.021 ต่อนาที จะเห็นได้ว่าการกำจัดไตโบรมแอกซีไตไนไตรล์เกิดเร็วกว่าโบรมคลอโรแอกซีไตไนไตรล์และไตรคลอโรแอกซีไตไนไตรล์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับการใช้แสงอาทิตย์กับการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตสูงกว่าแสงอาทิตย์ พบว่าค่าคงที่ทางจลพลศาสตร์สูงกว่าด้วย เมื่อพิจารณาค่า Electric energy per order (EE/O) สำหรับการกำจัดสารกลุ่มฮาโลแอกซีไตไนไตรล์ จะได้ประสิทธิภาพดังตารางที่ 2.5 (Hansen และคณะ, 2013)

ตารางที่ 2.5 ผล Electric energy per order (EE/O) และประสิทธิภาพในการกำจัดสารกลุ่มฮาโลแอกซีไตไนไตรล์

สารกลุ่มฮาโลแอกซีไตไนไตรล์	EE/O กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อ ลูกบาศก์เมตร	C/C _i	ร้อยละ การกำจัด ต่อวัน
ไตรคลอโรแอกซีไตไนไตรล์	9.1	0.71	29
โบรมคลอโรแอกซีไตไนไตรล์	2.3	0.27	73
ไตโบรมแอกซีไตไนไตรล์	1.1	0.06	94
ไตรคลอโรแอกซีไตไนไตรล์	1.7	0.16	84

การศึกษาการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงสุญญากาศ (Vacuum-ultraviolet , VUV) เพื่อใช้กำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำผิวดิน พบว่าการใช้ VUV (185 นาโนเมตร) เป็นเวลา 180 นาที สามารถลดสารอินทรีย์คาร์บอนจาก 4.95 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) 254 นาโนเมตร และการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/H₂O₂) พบว่าการใช้ VUV ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่ากระบวนการ UV และ UV/H₂O₂ และประสิทธิภาพจะ

สูงขึ้นอีกเมื่อมีการใช้ VUV ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการใช้ VUV เหมาะสมกับการสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำก่อนเข้าสู่การย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วย (Imoberdorf และคณะ, 2011)

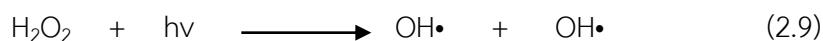


ตารางที่ 2.6 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสลายฮาโลเอซีไตนไตรด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

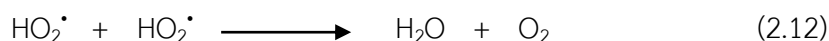
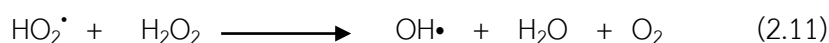
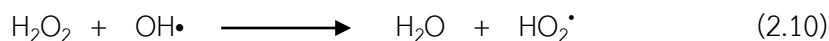
ชนิดของ ฮาโลเอซีไตนไตรล์	ปริมาณที่พบ	แหล่งกำเนิด แสง	กระบวนการรวม	ค่าคงที่อัตราการ เกิดปฏิกิริยา	ประสิทธิภาพ การกำจัด	ผู้วิจัย
ไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ โบรมีคลอโรเอซีไตนไตรล์ ไดโบรมีเอซีไตนไตรล์	500-1000 ไมโครกรัมต่อลิตร	UVsolar	-	0.063 ต่อชั่วโมง 0.329 ต่อชั่วโมง 0.324 ต่อชั่วโมง	46% 26% 12%	Chen และคณะ (2010)
ไดคลอโรเอซีไตนไตรล์	1 มิลลิกรัมต่อลิตร	UVsolar	ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO ₂	0.98×10^{-3} ต่อนาที	20%	Shin และคณะ (2013)
ไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ โบรมีคลอโรเอซีไตนไตรล์ ไดโบรมีเอซีไตนไตรล์ ไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์	100 ไมโครกรัมต่อลิตร	UV (Medium Pressure)	-	0.024±0.006 ต่อนาที 0.094±0.010 ต่อนาที 0.200±0.021 ต่อนาที 0.130±0.021 ต่อนาที	29% 73% 94% 84%	Hansen และคณะ 2013

2.8 กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Ultraviolet/Hydrogen Peroxide, UV/H₂O₂)

กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Ultraviolet/Hydrogen Peroxide, UV/H₂O₂) เป็นกระบวนการที่นำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบและกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากและให้ประสิทธิภาพสูง (Tuhkanen, 2004) กระบวนการ UV/ H₂O₂ เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในขั้นเดียวคือ แสงอัลตราไวโอเลตทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการ (2.9)



เมื่อนำแสงอัลตราไวโอเลตมาใช้ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical, OH•) และอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นนี้จะไปทำการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (RH) โดยมีหรือไม่มีโฟตอน กลายเป็นอนุมูลอิสระของสารอินทรีย์ (R•) และสามารถออกซิไดซ์ต่อเนื่องได้ สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ที่เกิดอย่างสมบูรณ์ จะเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ และสารพิษที่เป็นสารอินทรีย์จะเปลี่ยนเป็นเกลือในขั้นสุดท้าย ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติม จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน หากเติมปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เหมาะสมจะทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ที่เกิดจากการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่หากมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไป ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่วนเกินจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลกลายเป็นน้ำและออกซิเจนดังสมการที่ (2.10) ถึง (2.12) ทำให้เกิดการสูญเสีย OH• (Tuhkanen, 2004)



การศึกษากระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำทะเลที่มีองค์ประกอบเป็นกรดฮิวมิกและกรดฟุลวิก มีปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) 0.88 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตรและ BOD₇ 0.75 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อ

ลิตร โดยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ในช่วงร้อยละ 30 ถึง 50 ขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติม และพบว่าสามารถเกิด Mineralization ประมาณร้อยละ 10 ซึ่งให้ประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตเพียงอย่างเดียว ประมาณร้อยละ 5 และค่า BOD₇ เพิ่มขึ้นเฉพาะกระบวนการ UV/H₂O₂ โดยกระบวนการหลักที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการออกซิไดซ์ด้วยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ที่เกิดจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และพบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย (Penru และคณะ, 2012) สำหรับการสลาย nitrosamine ในน้ำ ที่เป็นสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ ที่มีความเข้มข้น nitrosamine 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการ UV/H₂O₂ (253.7 นาโนเมตร) โดยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 25 ถึง 250 ไมโครโมลต่อลิตร พบว่าให้ผลเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Penru และคณะ (2012) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้การกำจัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น แต่จะแตกต่างกันไปตามสารอินทรีย์แต่ละชนิด โดยการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 95.03 ถึง 99.93 (Zhou และคณะ, 2012)

Jo และคณะ (2011) เตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ให้เป็นไปตามองค์ประกอบที่พบในน้ำหลังผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม ที่ประกอบด้วย สารที่ทำให้เกิดกลิ่น (Odorants) 2 ชนิด, ไตรฮาโลมีเทน (THMs) 4 ชนิด, เตตระฮาโลมีเทน 2 ชนิด, กรดฮาลออะซิติก (HAAs) 6 ชนิด และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยความเข้มข้นของสารแต่ละชนิด ร้อยละการสลายด้วย UV/H₂O₂ และค่าคงที่อัตราการสลายด้วย UV/H₂O₂ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 เมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราการสลายร่วมกับครึ่งชีวิตของการสลายสาร เปรียบเทียบกันระหว่างกรดย่อยสลายด้วย UV กับ UV/H₂O₂ พบว่าการสลายด้วย UV/H₂O₂ เกิดได้เร็วกว่าการสลายด้วย UV เพียงอย่างเดียว และสารประกอบที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบ จะสลายได้เร็วกว่าสารประกอบคลอรีน นอกจากนี้แสงอัลตราไวโอเล็ตเพียงอย่างเดียวไม่สามารถสลายไตรคลอโรมีเทน และกรดฮาลออะซิติกที่มีโบรมีนได้

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบที่พบเป็นร้อยละในการย่อยสลายด้วย UV/H₂O₂ และ
ค่าคงที่อัตราของการย่อยสลายด้วย UV/H₂O₂ (Jo และคณะ, 2011)

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น เริ่มต้น (ไมโครกรัมต่อ ลิตร)	ร้อยละในการ สลายด้วย UV/H ₂ O ₂	ค่าคงที่อัตราของ การสลายด้วย UV/H ₂ O ₂ (ต่อวินาที)
Odorants			
Geosmin	0.04 - 0.2	96 - 98	1.6×10^{-2}
2-MIB	0.1 - 0.3	65	7.2×10^{-3}
THMs			
ไตรคลอโรมีเทน	60-500	26	1.5×10^{-3}
โบรโมไดคลอโรมีเทน	90	53	2.2×10^{-3}
ไดโบรโมคลอโรมีเทน	80	99	1.0×10^{-2}
ไตรโบรโมมีเทน	80-550	>99	2.9×10^{-2}
Tetrahalomethanes			
คาร์บอน เตตระคลอไรด์	350	ไม่มีการระบุไว้	ไม่มีการระบุไว้
คาร์บอน เตตระโบรไมด์	1000	ไม่มีการระบุไว้	ไม่มีการระบุไว้
HAAs			
กรดคลอโรอะซิติก (MCAA)	270	ไม่มีการระบุ	1.1×10^{-3}
กรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA)	190	ไม่มีการระบุ	1.3×10^{-2}
กรดไตรคลอโรอะซิติก (TCAA)	180	ไม่มีการระบุ	6.4×10^{-2}
กรดโบรโมอะซิติก (MBAA)	200	ไม่มีการระบุ	5.8×10^{-4}
กรดไดโบรโมอะซิติก (DBAA)	190	80	5.0×10^{-4}
กรดไตรโบรโมอะซิติก (TBAA)	160	99	2.9×10^{-4}
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	6000	-	-

2.9 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติ ที่ส่งผลต่อการเกิดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ แต่ก็ยังพบการเกิดขึ้นของสารผลิตภัณฑ์พลอยได้อีก ประกอบกับเทคนิคการกำจัดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ในกลุ่มไนโตรเจนยังมีงานวิจัยอยู่น้อย และประสิทธิภาพในการบำบัดยังไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น UV-C และ VUV ในการศึกษาประสิทธิภาพของแต่ละช่วงความยาวคลื่นสำหรับการสลายฮาโลเอซีโตนไตรล์ และการประยุกต์ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายฮาโลเอซีโตนไตรล์อีกด้วย



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการสลายของฮาโลแอกซีไตรีโนไตรล์ในน้ำ โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

น้ำที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ ที่ทำการเติมโมโนคลอโรแอกซีไตรีโนไตรล์ ไดคลอโรแอกซีไตรีโนไตรล์ ไตรคลอโรแอกซีไตรีโนไตรล์และสารผสมฮาโลแอกซีไตรีโนไตรล์ ในถึงปฏิกิริยาแบบที่ละเท สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น UV-C และ VUV เพียงอย่างเดียวและทำการสลายร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ช่วงการทดลองดังภาพที่ 3.1

3.2 ตัวแปรในการวิจัย

3.2.1 ตัวแปรอิสระ

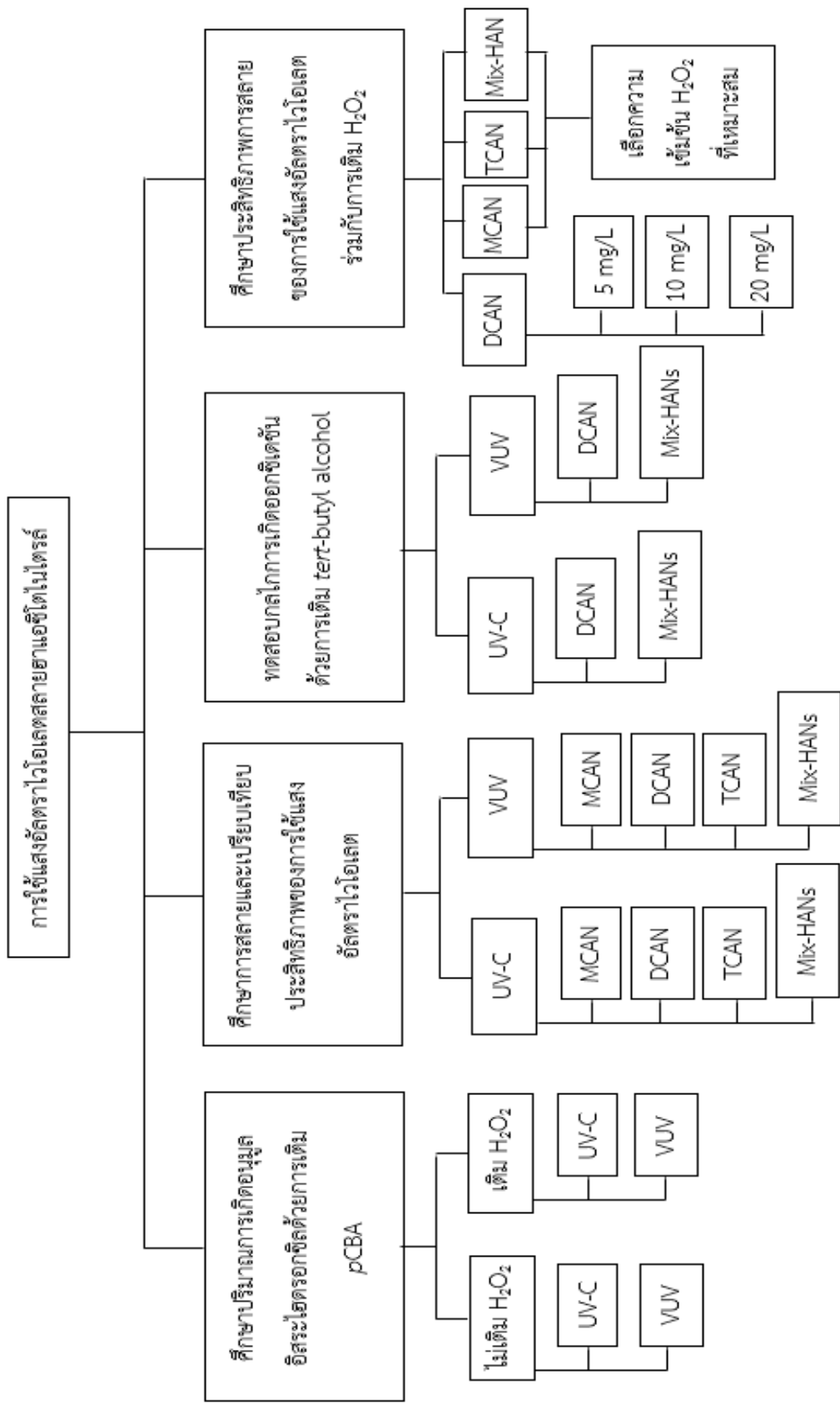
- แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต ได้แก่ หลอด UV-C และ VUV กำลัง 15 วัตต์
- ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2.2 ตัวแปรคงที่

- ปริมาณน้ำตัวอย่าง 5 ลิตร
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารกลุ่มฮาโลแอกซีไตรีโนไตรล์ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

3.2.3 ตัวแปรตาม

- ประสิทธิภาพในการสลายสารกลุ่มฮาโลแอกซีไตรีโนไตรล์



ภาพที่ 3.1 ผังการทดลองทั้ง 4 ช่วง

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. หลอด UV-C และหลอด VUV รุ่น TL-K ยี่ห้อ Philips ขนาด 15 วัตต์
2. ถังปฏิกิริยาแบบทีละเท (Batch Reactor) ปริมาตร 5 ลิตร
3. เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatograph, HPLC) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 1100 Series
4. เครื่อง Gas Chromatograph, GC/ECD ยี่ห้อ Agilent รุ่น GC6890
5. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ AND
6. เครื่องเขย่า ยี่ห้อ Labcon
7. เครื่องวัด pH/mV มิเตอร์ ยี่ห้อ AMTAST รุ่น pH900
8. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)
9. เครื่องกวนสารแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
10. ตู้อบ
11. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
12. นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ Casio
13. เข็มฉีดยา GC
14. เข็มฉีดยา ยี่ห้อ Nipro
15. กระดาษกรอง GF/C ยี่ห้อ Filtrex
16. ออโต้ปีเปต ยี่ห้อ Eppendorf

3.4 สารเคมีและอื่นๆ

1. สารโมโนคลอโรเอซีไตนไตรล์ (C_2H_2ClN) ความบริสุทธิ์ 98% ยี่ห้อ Wako
2. สารไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ (C_2HCl_2N) ความบริสุทธิ์ 98% ยี่ห้อ Sigma-Aldrich
3. สารไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์ (C_2Cl_3N) ความบริสุทธิ์ 98% ยี่ห้อ Sigma-Aldrich

4. สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความบริสุทธิ์ 30% ยี่ห้อ Ajax Finechem
5. สารเมทิลเทอร์เชียรีบิวทิลอีเทอร์ (MtBE) เกรด HPLC ยี่ห้อ Fisher
6. สารโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) Anhydrous crystals ยี่ห้อ Carlo Erba reagents
7. สารเทอเชียรี บิวทิลแอลกอฮอล์ (*tert-butyl alcohol*) เกรด HPLC ยี่ห้อ Penreac
8. สารพาราคลอโรเบนโซอิก (*pCBA*) ความบริสุทธิ์ 98% ยี่ห้อ Sigma-Aldrich
9. สารเมทานอล (CH_3OH) เกรด HPLC ยี่ห้อ Labscan
10. สารอะซิโตน (CH_3COCH_3) เกรด HPLC ยี่ห้อ Labscan
11. สารอโรฟอสโฟริกแอซิด (H_3PO_4) ความบริสุทธิ์ 85% เกรด AR ยี่ห้อ QRèC
12. น้ำ Deionized

3.5 พารามิเตอร์ต่างๆ

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีการวิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้ โดยอาศัยเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

พารามิเตอร์	เครื่องมือและอุปกรณ์
แหล่งกำเนิดแสง	ชุดกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้หลอด UV-C และหลอด VUV
น้ำตัวอย่าง	ถังปฏิกิริยาแบบที่ละเท (Batch Reactor) ปริมาตร 5 ลิตร
ความเข้มข้นของสารฮาโลเอซีไคน์ไตรล์	วิธีประยุกต์ EPA method 551.1 เครื่อง Gas Chromatograph
pH	เครื่องวัด pH/mV มิเตอร์
อุณหภูมิ	เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)
เวลา	นาฬิกาจับเวลา

3.6 การออกแบบถังปฏิกริยา

ถังปฏิกริยาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นถังปฏิกริยชนิดที่ละเท (Batch Reactor) โดยออกแบบให้เป็นระบบปิด ถังปฏิกริยาเป็นถังสแตนเลสทรงกระบอกปริมาตร 5 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.2 เซนติเมตร สูง 35 เซนติเมตรทำจากสแตนเลส ภายในบรรจุท่อควอทซ์ (Quartz sleeve) ทรงกระบอกปลายปิดที่กึ่งกลางถังปฏิกริยโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 เซนติเมตรสำหรับใส่แหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็นหลอดไฟที่มีขั้วเดียว โดยแสงจะสามารถกระจายได้รอบทิศทาง และด้านข้างถังจะมีวาล์วน้ำเปิด-ปิด เพื่อใช้ในการเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ สำหรับการทดลองในแต่ละครั้งจะใส่น้ำตัวอย่างปริมาตร 5 ลิตร (ความสูงน้ำ 33.16 เซนติเมตร) ดังภาพที่ 3.2 (ภาคผนวก ก) ตั้งบนเครื่องกวนสารแห่งชาติ ทำการกวนผสมตลอดเวลา



ภาพที่ 3.2 ถังปฏิกริยาแบบที่ละเท (Batch Reactor)

3.7 การศึกษาปริมาณการเกิดของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลด้วย UV และ UV/H₂O₂

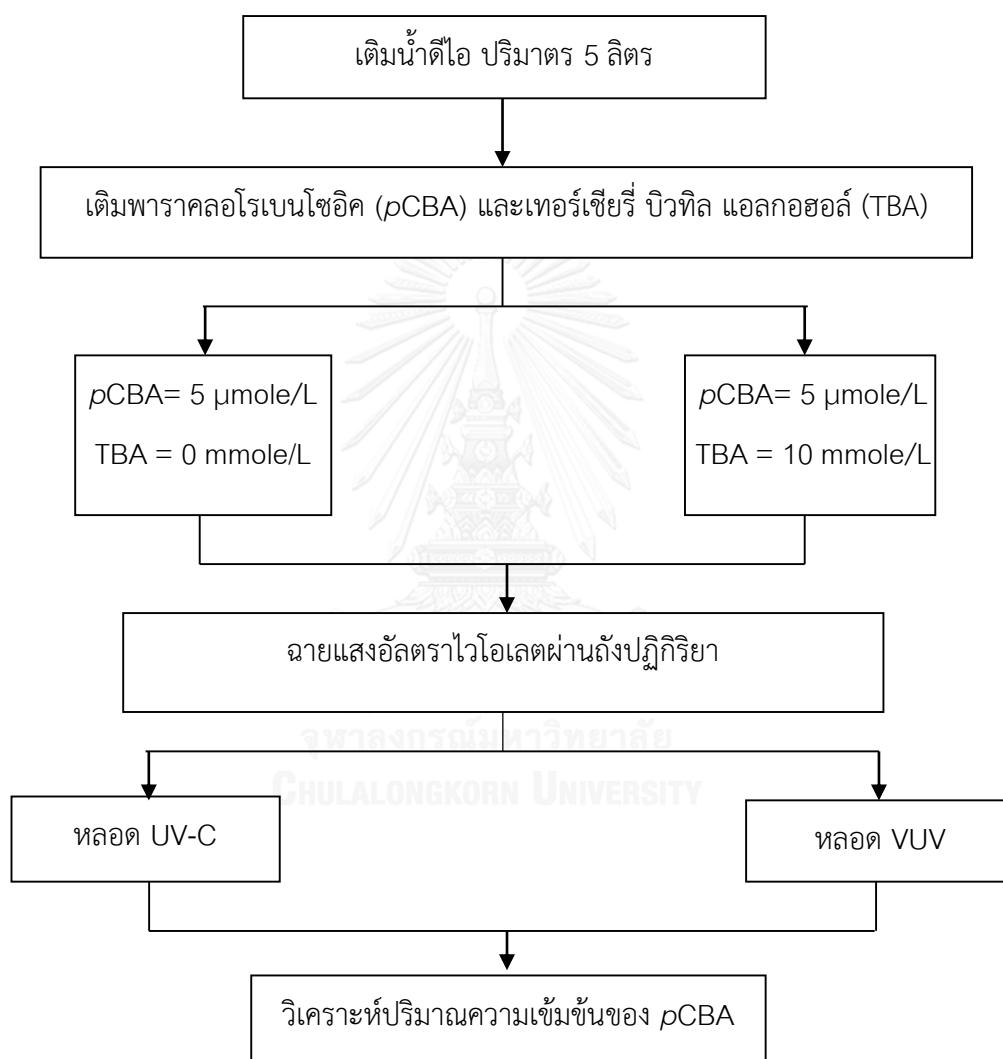
การหาปริมาณของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่ถูกสร้างขึ้น ใช้ในการประเมินการเกิดออกซิเดชันขั้นสูง จากการศึกษาปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในน้ำ หาได้จากการเกิดของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่สามารถออกซิเดชันกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (*para*-chlorobenzoic acid, *p*CBA) ดังสมการที่ (3.1) (Ratpukdi และคณะ, 2010, Rosenfeldt และคณะ, 2006)

$$\int_0^t [\text{OH} \cdot] dt = \frac{(k_{obs} - k_d)t}{k_{\text{OH} \cdot, \text{pCBA}}} \quad (3.1)$$

โดยที่	OH•	คือ อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นสำหรับการออกซิเดชัน
	k_{obs}	คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการกำจัด <i>p</i> CBA (s^{-1})
	k_d	คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการกำจัดด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง (Direct photolysis) <i>p</i> CBA (s^{-1})
	$k_{\text{OH} \cdot, \text{pCBA}}$	คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาของการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นกับ <i>p</i> CBA = 5×10^9 ลิตรต่อโมลวินาที
	t	คือ เวลา

ในการทดลองถึงปฏิกิริยาภายในบรรจุน้ำ Deionized ปริมาตร 5 ลิตร และเติม *p*CBA ความเข้มข้น 5 ไมโครโมลต่อลิตร ทั้งนี้เพื่อทำการหาค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการกำจัดด้วยแสงโดยตรงจึงต้องทดลองการสลายด้วยแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอด UV-C และ VUV กำลัง 15 วัตต์ และเปรียบเทียบกับสลายด้วยแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอด UV-C และ VUV กับการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ เพื่อเป็นการตรวจสอบกลไกหลักของการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง (Direct photolysis) และการออกซิเดชันของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น (Oxidation process) การทดลองดังสรุปในภาพที่ 3.3 เวลาเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างดังตารางที่ 3.2 หลังจากนั้นจะทำการทดลองฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอด UV-C กำลังวัตต์ 15 วัตต์ เก็บตัวอย่างตามเวลา ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นทำการทดลองโดยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน แล้วจึงเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอด VUV กำลังวัตต์ 15 วัตต์ ทำการทดลองเช่นเดียวกัน สำหรับชุดควบคุมทำการทดลอง 1 ครั้ง เพื่อนำไปพิจารณาเป็นค่าเฉลี่ย การทดลองดังสรุปในภาพที่ 3.4 เวลาเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างดังตารางที่ 3.3

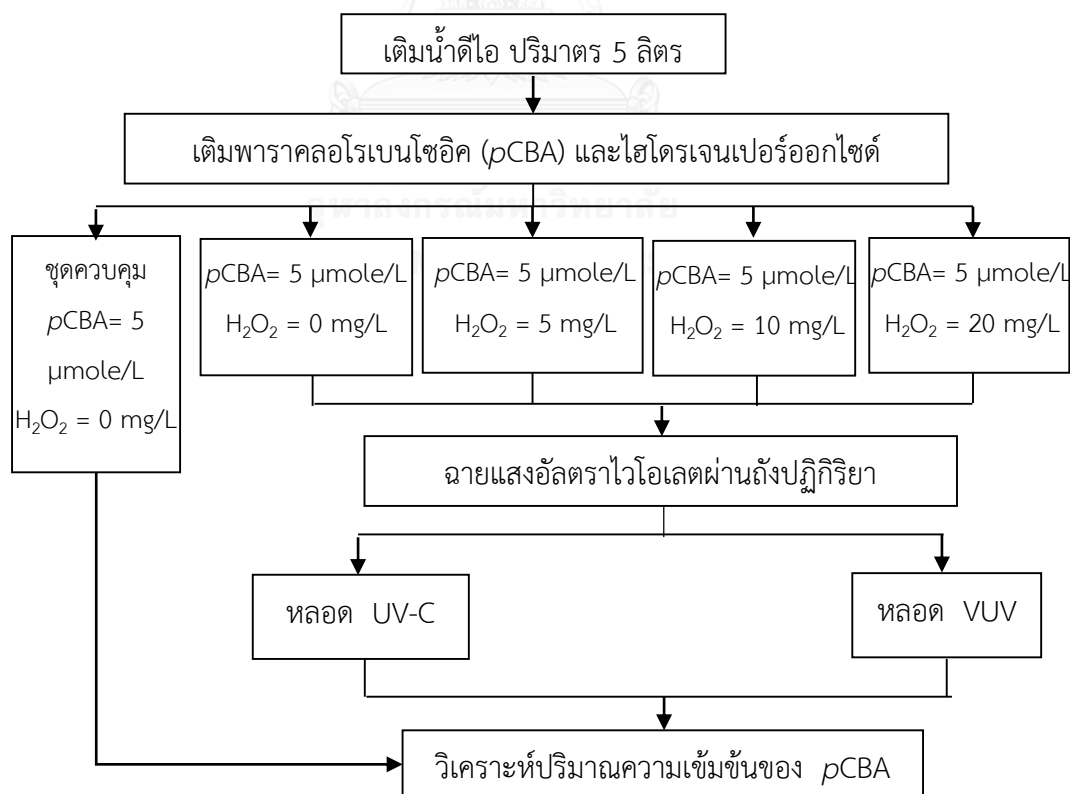
สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นของ *p*CBA จะวิเคราะห์โดยใช้เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatograph, HPLC/C18 Agilent รุ่น 1100 Series) คอลัมน์ C-18 และใช้ UV/vis เป็นตัววัดที่ช่วงความยาวคลื่น 240 นาโนเมตร ซึ่งอัตราส่วนของเฟสของไหลระหว่างเมททานอลต่อน้ำ (ที่ปรับพีเอชเป็น 2 ด้วยกรดฟอสฟอริก) เป็น 75:25 โดยที่ปริมาณที่ตัวอย่างที่ใช้ในการวัดเป็น 100 ไมโครลิตร



ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาช่วงที่ 1 (ค่าคงที่ปฏิกิริยาของการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง)

ตารางที่ 3.2 เวลาในการเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างทั้งหมดสำหรับการทดลองช่วงที่ 1 (ค่าคงที่ปฏิกิริยาของการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง)

ช่วงความยาวคลื่น	ความเข้มข้น pCBA (ไมโครโมลลาร์)	ความเข้มข้น TBA (มิลลิโมลต่อลิตร)	เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ตัวอย่างทั้งหมด
C	5	0 10	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75 และ 90	66
VUV	5	0 10	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75 และ 90	66



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาช่วงที่ 1

ตารางที่ 3.3 เวลาในการเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างทั้งหมดสำหรับการทดลองช่วงที่ 1

ช่วงความยาวคลื่น	ความเข้มข้น pCBA (ไมโครโมลลาร์)	ความเข้มข้น ไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ตัวอย่างทั้งหมด
ชุดควบคุม	5	0	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75 และ 90	11
C	5	0 5 10 20	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75 และ 90	132
VUV	5	0 5 10 20	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75 และ 90	132

3.8 การดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ใช้โมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์, ไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์, ไตรคลอโรแอซิโตไนไตรล์ และสารผสมฮาโลแอซิโตไนไตรล์ โดยใช้โมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์, ไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ และไตรคลอโรแอซิโตไนไตรล์ ทำการทดลองภายในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท โดยมีแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตที่เป็นหลอด UV-C หรือ VUV บรรจุภายในถังปฏิกรณ์

3.8.1 การเตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์

ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ของสารฮาโลแอซิโตไนไตรล์ โดยตัวอย่างที่ใช้การทดลองแบ่งเป็น 4 ชนิด ดังนี้

1. โมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (MCAN) ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

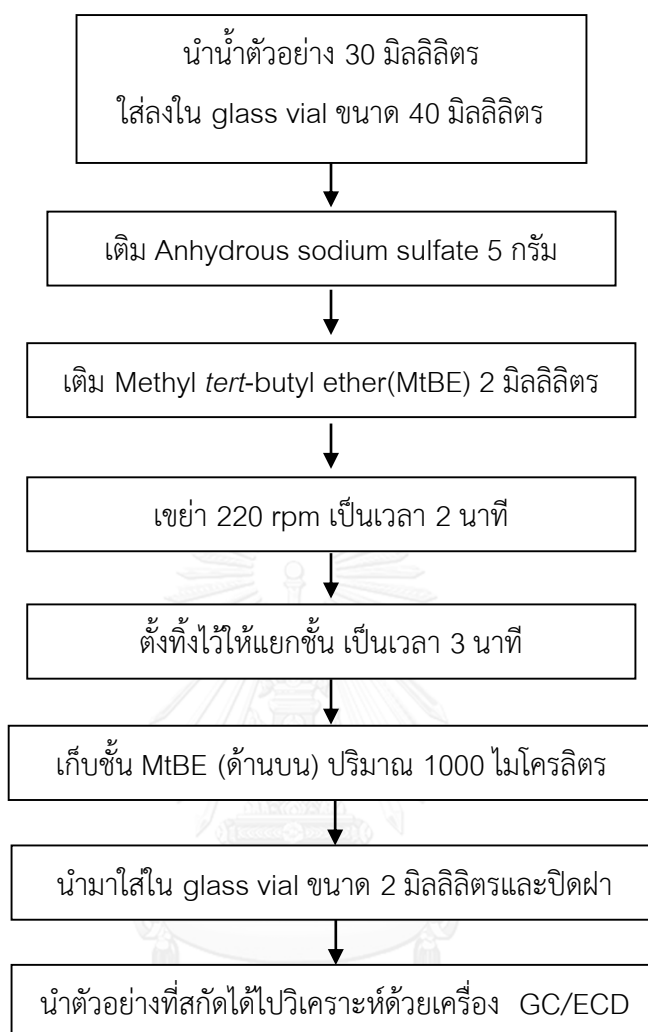
2. ไตรโคลอโรเอซีไตนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร
3. ไตรโคลอโรเอซีไตนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร
4. ฮาโลเอซีไตนไตรล์ผสม 3 ชนิด คือ โมโนโคลอโรเอซีไตนไตรล์ (MCAN), ไตรโคลอโรเอซีไตนไตรล์ (DCAN) และไตรโคลอโรเอซีไตนไตรล์ (TCAN) โดยมีความเข้มข้นแต่ละชนิด 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

3.8.2 การวิเคราะห์หาปริมาณสารฮาโลเอซีไตนไตรล์

ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารฮาโลเอซีไตนไตรล์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือการสกัดและเตรียมตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.5 และวิเคราะห์หาปริมาณสารฮาโลเอซีไตนไตรล์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph, GC/ECD (Agilent GC6890) จะใช้ความเร็วของฮีเลียม (Helium-carrier) ประมาณ 25 เซนติเมตรต่อวินาที และใช้ในโตรเจนในการ make-up เลือกใช้คอลัมน์สำหรับการวิเคราะห์ด้วย GC/ECD เป็น fused silica capillary column (HP-1, 30 m x 0.32 mm i.d. x 0.25 μ m film thickness) โดยตั้งอุณหภูมิในการฉีด (injection) ที่ 200 องศาเซลเซียส ระบบการฉีดสารตัวอย่างเป็นแบบ split mode และคงไว้ที่ 300 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิของคอลัมน์ภายในตู้อบจะตั้งโปรแกรมดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิเริ่มต้นเป็น 33 องศาเซลเซียส นาน 5.5 นาที
2. เพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 35 องศาเซลเซียส โดยที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 0.5 องศาเซลเซียสต่อนาที นาน 4 นาที จบโปรแกรม

เตรียมกราฟมาตรฐานฮาโลเอซีไตนไตรล์ของทุกชนิด เพื่อให้นำมาวิเคราะห์ปริมาณที่สลายได้ต่อไป



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการสกัดและเตรียมตัวอย่างสารกลุ่มฮาโลเอซีโตไนโตรล์
(U.S. EPA method 551.1; พนิดา ปรารัตน์, 2554)

การวิเคราะห์ร้อยละการนำกลับ (%Recovery)

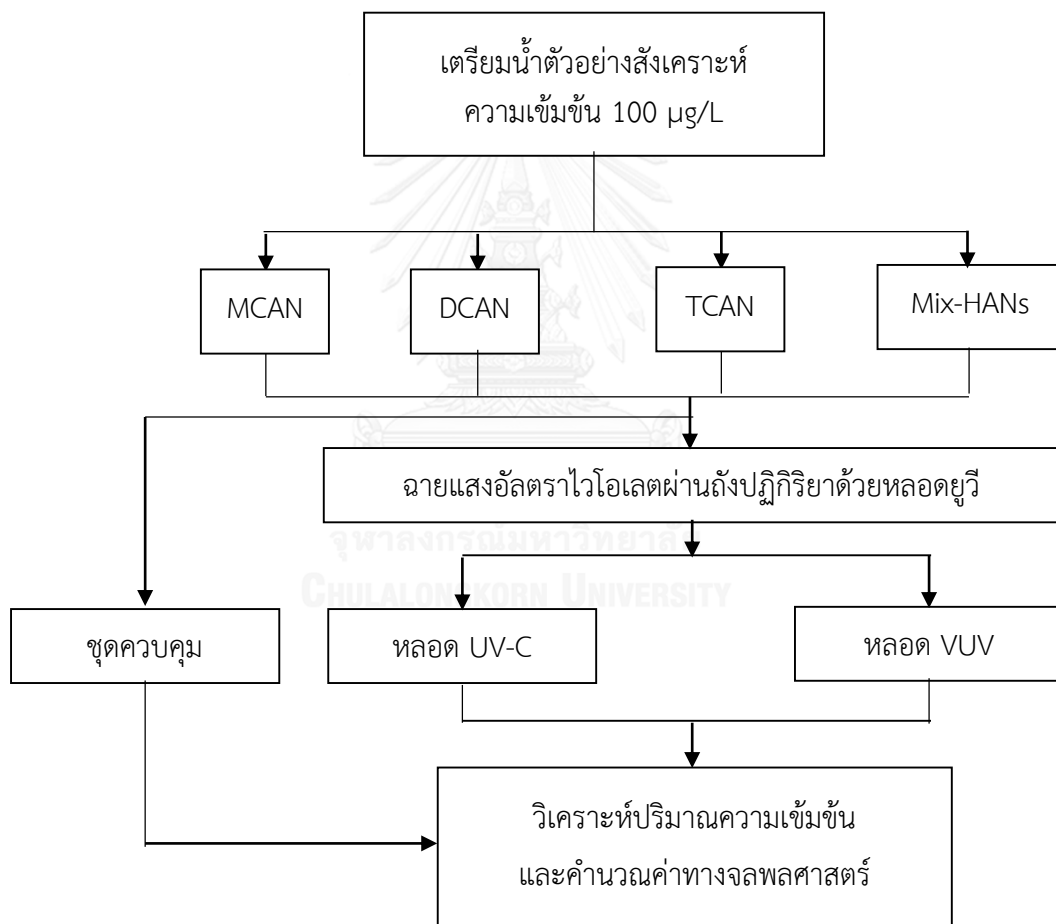
เนื่องจากความเข้มข้นที่วัดได้จะเป็นความเข้มข้นที่ผ่านกระบวนการสกัดจึงต้องพิจารณาร้อยละการนำกลับดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละการนำกลับ (\%Recovery)} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่วัดได้}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ทราบ}} \times 100$$

โดยที่ร้อยละการนำกลับจะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 75 ถึง 125 (U.S. EPA method 551.1)

3.9 การศึกษาการสลายฮาโลเอซีไคนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

ถึงปฏิกิริยาภายในบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้นโมโนคลอโรเอซีไคนไตรล์ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำตัวอย่าง 5 ลิตร โดยทำตามขั้นตอนจาก 3.8.1 ฉายแสงด้วยแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอด UV-C กำลังวัตต์ 15 วัตต์ เก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อนำไปพิจารณาเป็นค่าเฉลี่ย ทำเช่นเดียวกันโดยใช้ตัวอย่างไดคลอโรเอซีไคนไตรล์, ไตรคลอโรเอซีไคนไตรล์ และฮาโลเอซีไคนไตรล์ผสม ทำการทดลองโดยใช้หลอด VUV กำลังวัตต์ 15 วัตต์ สำหรับชุดควบคุมทำการทดลอง 1 ครั้ง การทดลองดังสรุปในภาพที่ 3.6 เวลาเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างดังตารางที่ 3.4



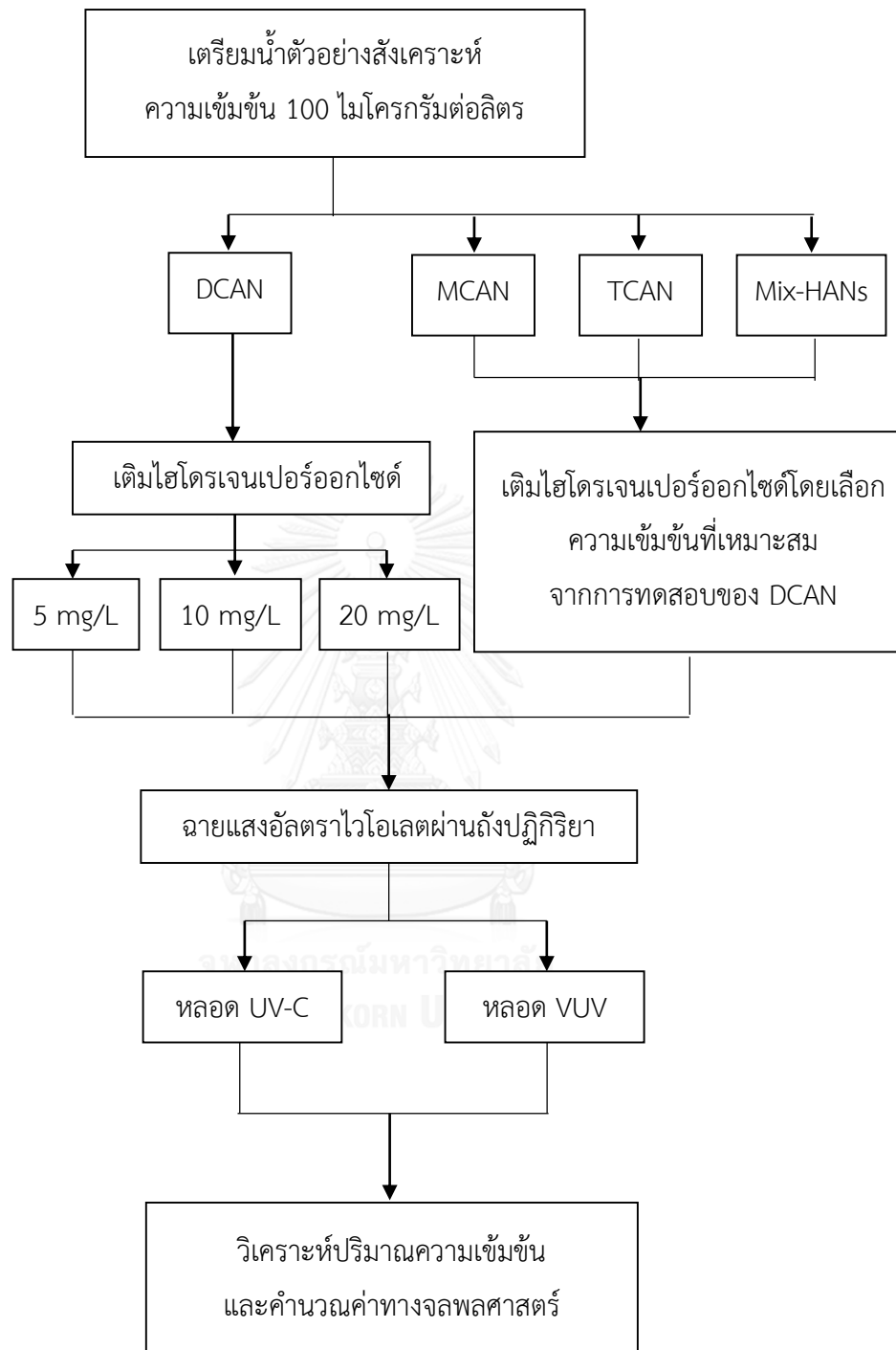
ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาช่วงที่ 2

ตารางที่ 3.4 เวลาในการเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างทั้งหมดสำหรับการทดลอง ช่วงที่ 2

ช่วงความยาวคลื่น	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ไมโครกรัมต่อลิตร)	เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ตัวอย่างทั้งหมด
ชุดควบคุม	100	0, 15, 30, 45, 60,75 และ 90	28
C	100	0, 15, 30, 45, 60,75 และ 90	84
VUV	100	0, 15, 30, 45, 60,75 และ 90	84

3.10 การศึกษาการสลายฮาโลแอกซีไนด์ไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตรวมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ถึงปฏิกิริยาภายในบรรจุน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ปริมาตรน้ำ 5 ลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้น ไดคลอโรแอกซีไนด์ไนไตรล์ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยทำตามขั้นตอนจาก 3.8.1 เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในแต่ละครั้งดังต่อไปนี้ 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉายแสงโดยมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอด UV-C กำลังวัตต์ 15 วัตต์ เก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นเปลี่ยนเป็นหลอด VUV กำลังวัตต์ 15 วัตต์ จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกันสำหรับสารโมโนคลอโรแอกซีไนด์ไนไตรล์ ไตรคลอโรแอกซีไนด์ไนไตรล์ และสารผสมฮาโลแอกซีไนด์ไนไตรล์แต่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นเหมาะสมจากการทดสอบ DCAN การทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.7 และเวลาในการเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างในการทดลองช่วงที่ 3 ดังตารางที่ 3.5



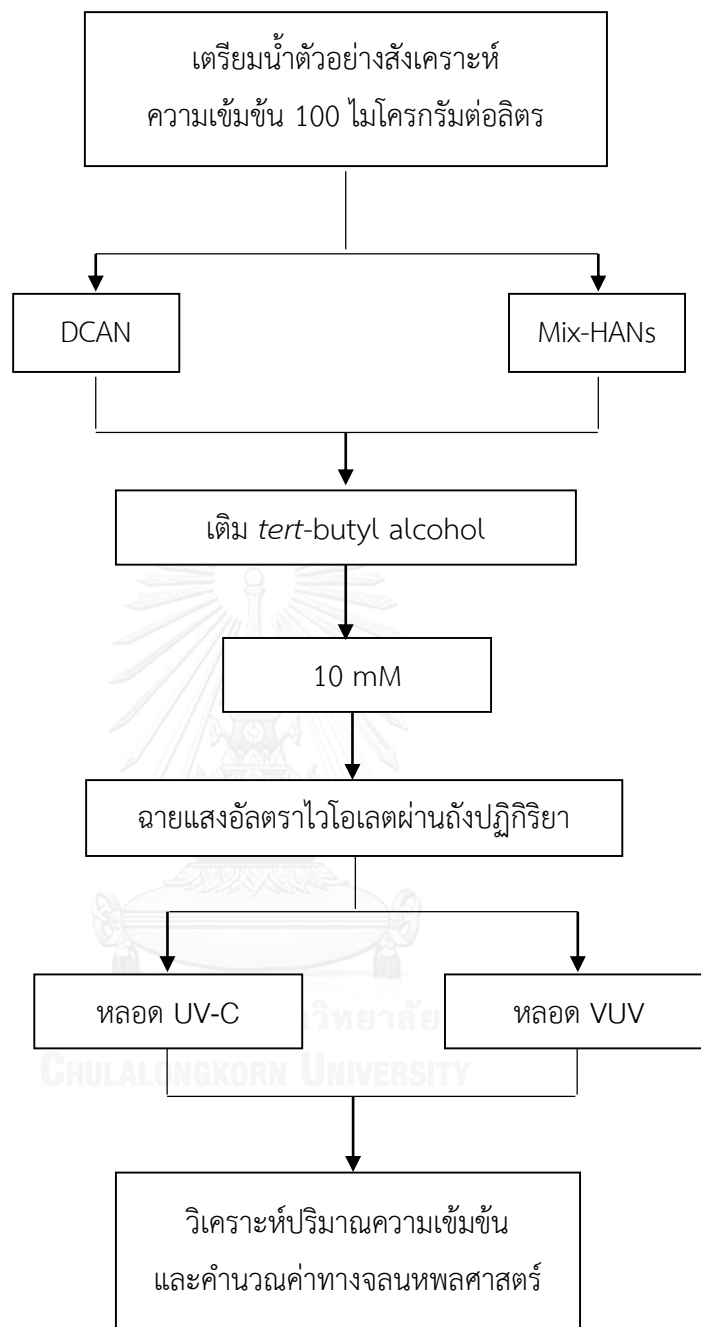
ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาช่วงที่ 3

ตารางที่ 3.5 เวลาในการเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างทั้งหมดสำหรับการทดลองช่วงที่ 3

ช่วงความยาวคลื่น	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ตัวอย่างทั้งหมด
C	100	5 10 20	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75 และ 90	198
VUV	100	5 10 20	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75 และ 90	198

3.11 การศึกษากลไกการสลายฮาโลแอกซีโตไนไตรล์

ถึงปฏิกิริยาภายในบรรจุภัณฑ์ตัวอย่างสังเคราะห์ปริมาตร 5 ลิตร ความเข้มข้นไดคลอโรแอกซีโตไนไตรล์เริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยทำตามขั้นตอนจาก 3.8.1 และเติม *tert-butyl alcohol* ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ฉายแสงโดยมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอด UV-C กำลังวัตต์ 15 วัตต์ เก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทำการทดลองเช่นเดียวกันโดยเปลี่ยนเป็นสารผสม จากนั้นทำการทดลองโดยเปลี่ยนแหล่งกำเนิดเป็นหลอด VUV กำลังวัตต์ 15 วัตต์ ครั้ง การทดลองดังภาพที่ 3.8 และเวลาในการเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างในการทดลองช่วงที่ 4 ดังตารางที่ 3.6



ภาพที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาช่วงที่ 4

ตารางที่ 3.6 เวลาในการเก็บตัวอย่างและจำนวนตัวอย่างทั้งหมดสำหรับการทดลองช่วงที่ 4

ช่วงความยาวคลื่น	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น <i>tert-butyl alcohol</i> (มิลลิโมลลาร์)	เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที)	ตัวอย่างทั้งหมด
C	100	10	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75 และ 90	66
VUV	100	10	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 75 และ 90	66

3.12 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่วัดได้จากการทดลอง 3 ซ้ำ จะนำมาหาค่าเฉลี่ย และวิเคราะห์ความแม่นยำ ด้วยการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ในแต่ละชุดการทดลอง แล้วนำมาพิจารณาโดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต้องไม่เกินร้อยละ 10 เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องและแม่นยำ (กัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์, 2555)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและค่าทางจลนพลศาสตร์ของการสลายสารฮาโลเอซีไตนไตรล์ 3 ชนิด ได้แก่ โมโนคลอโรเอซีไตนไตรล์ (MACN) ไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ (DCAN) และไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์ (TCAN) โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต 2 ชนิด คือ แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) กำลัง 15 วัตต์ ในถังปริมาตรขนาด 5 ลิตร เพื่อหาประสิทธิภาพของการสลายของฮาโลเอซีไตนไตรล์ และในการทดลองนี้มีการปรับปรุงกระบวนการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยใช้กระบวนการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

- | | |
|--------------|---|
| ขั้นตอนที่ 1 | ศึกษาปริมาณการเกิดของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลด้วย UV และ UV/H ₂ O ₂ |
| ขั้นตอนที่ 2 | ศึกษาการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต |
| ขั้นตอนที่ 3 | ศึกษากลไกหลักของการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ |
| ขั้นตอนที่ 4 | ศึกษาการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ |

โดยการทดลองที่กล่าวมา ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ปริมาณการเกิดของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลด้วย UV และ UV/H₂O₂

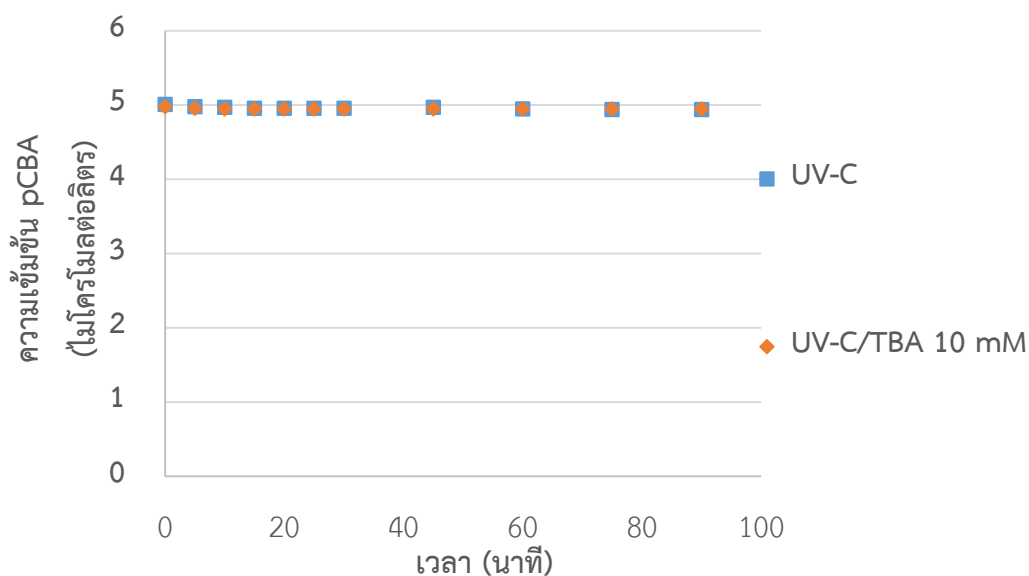
สำหรับการทดลองเพื่อหาปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล จะหาได้จากการเกิดของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่สามารถออกซิเดชันกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) และทำการคำนวณปริมาณของการเกิดจากสมการ 3.1 ดังนั้นจึงแบ่งออกเป็น 2 ช่วงการทดลอง ดังต่อไปนี้

4.1.1 กลไกการการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA)

เพื่อเป็นการหาค่าคงที่ปฏิกิริยาในการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิกด้วยกลไกการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง (Direct photolysis) จะสามารถตรวจสอบด้วยการเติมเทอร์เชียรี บิวทิลแอลกอฮอล์ (TBA) เปรียบเทียบค่าทางจลนพลศาสตร์ หากการสลายเกิดช้าลง แสดงว่ามีกระบวนการออกซิเดชันเกิดขึ้นด้วย

4.1.1.1 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C)

การสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และทำการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) โดยมีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (TBA) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร เพื่อเปรียบเทียบกับกรสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) เพียงอย่างเดียว ได้ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 (ภาคผนวก ข.1 และภาคผนวก ข.2)



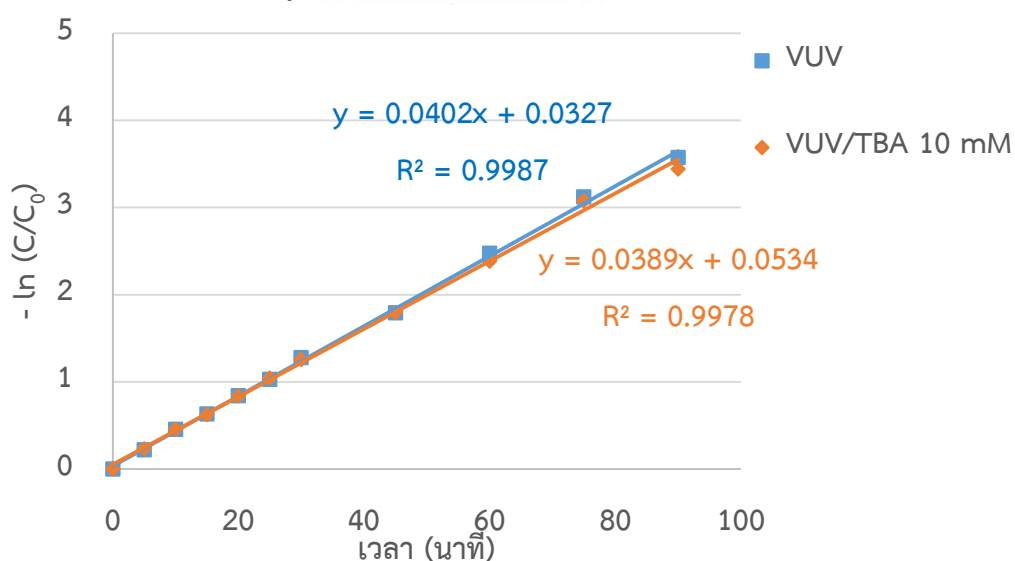
ภาพที่ 4.1 ความเข้มข้นของกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) เทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครโมลต่อลิตร ในการทดลองด้วย UV-C และ UV-C/TBA

จากภาพที่ 4.1 พบว่าความเข้มข้นของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีกับการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจากกล่าวได้ว่า แสง

อัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) ไม่สามารถการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิกได้ จึงไม่มีกระบวนการใดเกิดขึ้น

4.1.1.2 แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) เพียงอย่างเดียว และเมื่อมีการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (TBA) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร (ภาคผนวก ข.3 และภาคผนวก ข.4) และเมื่อนำผลมาคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา ดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่าความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Ratpukdi และคณะ, 2010) ว่าการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตที่เกิดขึ้นนั้นเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสำหรับการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) เพียงอย่างเดียวเป็น 0.0402 ต่อนาที และค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสำหรับการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (VUV/TBA) เป็น 0.0389 ต่อนาที ซึ่งทั้งสองกระบวนการให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้สรุปได้ว่ากลไกหลักที่เกิดขึ้นเป็นกลไกการสลายด้วยแสงโดยตรง (Direct photolysis) และให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศโดยตรง (k_d, VUV) มีค่าเป็น 0.0389 ต่อนาที เนื่องจากเป็นค่าคงที่ปฏิกิริยาที่ได้จากการสลายด้วยแสงโดยตรงเท่านั้น โดยจะนำไปคำนวณหาปริมาณการเปิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในหัวข้อ 4.1.3 ต่อไป



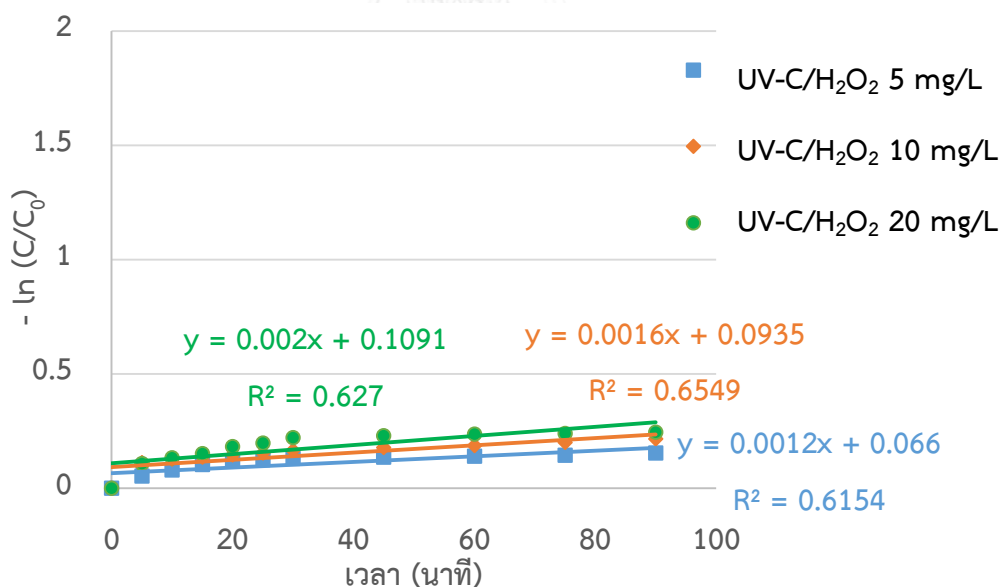
ภาพที่ 4.2 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ด้วย VUV และ VUV/TBA

4.1.2 ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA)

สำหรับการทดลองในครั้งนี้ ได้มีการปรับปรุงกระบวนการเพื่อเพิ่มการสลายสารมลพิษ โดยการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลสำหรับการออกซิเดชันสารมลพิษ ซึ่งมีผลของการทดลอง ดังนี้

4.1.2.1 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C)

สำหรับผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยนำผลที่ได้มาคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ (ภาคผนวก ข.5 ถึงภาคผนวก ข.7) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กราฟ - ln (C / C₀) เทียบกับเวลา ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งสำหรับการหาปริมาณอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นต่อไปดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก pCBA (k_{obs}) จะใช้ในการหาปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในหัวข้อ 4.1.3 ต่อไป



ภาพที่ 4.3 กราฟ - ln (C / C₀) เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ด้วย UV-C/H₂O₂

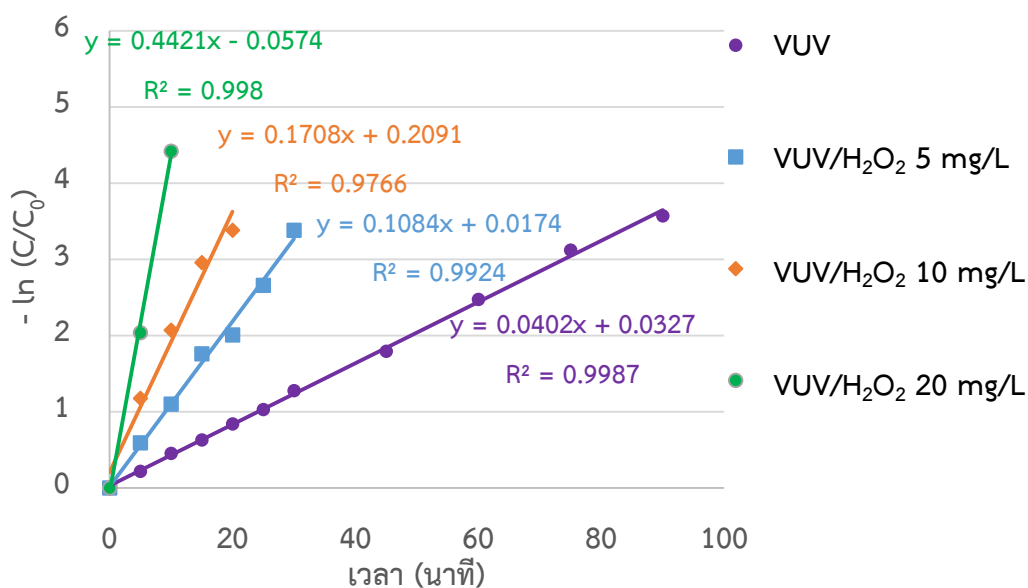
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ในการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่างๆ

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง(k) (ต่อนาที)	R ²
0	-	-
5	0.0012	0.6154
10	0.0016	0.6549
20	0.0020	0.6270

ทั้งนี้ พบว่าเมื่อเมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก pCBA (k_{obs}) เพิ่มขึ้นด้วย โดยสามารถกล่าวได้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะสามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพื่อใช้ในการสลายสารมลพิษได้มากยิ่งขึ้นด้วย

4.1.2.2 แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

สำหรับผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยนำผลที่ได้มาคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ (ภาคผนวก ข.8 ถึงภาคผนวก ข.10) และนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา ดังแสดงในภาพที่ 4.4 และค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งสำหรับการหาปริมาณอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นดังแสดงในตาราง 4.2 โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งของการกำจัด pCBA (k_{obs}) จะใช้ในการหาปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในหัวข้อ 4.1.3 ต่อไป



ภาพที่ 4.4 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ด้วย VUV และ VUV/H₂O₂

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ในการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) ที่ความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ต่างๆ

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง(k) (ต่อนาที)	R ²
0	0.0402	0.9987
5	0.1084	0.9924
10	0.1708	0.9766
20	0.4421	0.9980

ทั้งนี้ พบว่าเมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) ในผลเช่นเดียวกับการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) คือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก pCBA (k_{obs}) เพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้ทราบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล

ในการสลายสารมลพิษมากขึ้นด้วย โดยปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตจะทำการศึกษาในหัวข้อ 4.1.3

4.1.3 ปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต

สำหรับการศึกษาปริมาณของการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1) โดยใช้ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่ 1 จากการทดลองที่ผ่านมา (ภาคผนวก ข.11)

$$\int_0^t [\text{OH}\cdot] dt = \frac{(k_{obs} - k_d)t}{k_{\text{OH}\cdot, \text{pCBA}}} \quad (4.1)$$

โดยที่	$\text{OH}\cdot$	คือ อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นสำหรับการออกซิเดชัน
	k_{obs}	คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับหนึ่งของการกำจัดกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) (ต่อนาที)
	k_d	คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับหนึ่งของการกำจัดกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง (Direct photolysis) (ต่อนาที)
	$k_{\text{OH}\cdot, \text{pCBA}}$	คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาของการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นกับกรดพาราคลอโรเบนโซอิก pCBA = 3×10^{11} ลิตรต่อโมลนาที่
	t	คือ เวลา (นาที)

จากตารางที่ 4.3 ปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นจากการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตทั้งสองชนิดร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นไปตามทฤษฎี Tuhkanen (2004) และงานวิจัยของ Rosenfeldt และคณะ (2006) เมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น โดยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) จาก 0 โมลนาที่ต่อลิตร ไปเป็น 3.60×10^{-13} , 4.80×10^{-13} และ 6.00×10^{-13} โมลนาที่ต่อลิตร ตามลำดับ และพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้ปริมาณของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) ให้ผลสอดคล้องกันกับการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) โดยเพิ่มขึ้นจากจาก 3.90×10^{-13} โมลนาที่ต่อลิตร เป็น 6.95×10^{-12} , 8.79×10^{-12} และ 1.34×10^{-11} โมลนาที่ต่อลิตร ทั้งนี้พบว่า การสลายด้วยแสง

อัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) จะให้ปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมากกว่าการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี (Rosenfeldt และคณะ, 2006) และงานวิจัยที่ผ่านมาว่า แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) เป็นแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร เป็นช่วงความยาวคลื่นที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงได้ดีทำให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลได้ดีกว่าแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) ที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (พิมลทิพย์ ชุณหพิมล, 2556)

ตารางที่ 4.3 ปริมาณอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

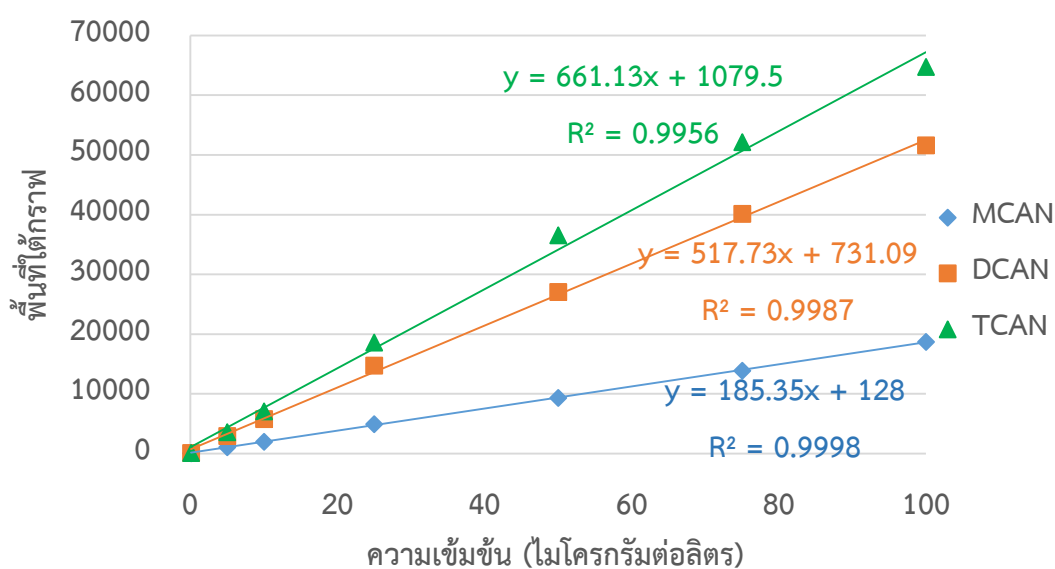
แสงอัลตราไวโอเลต	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้น (โมลนาที่ต่อลิตร)
UV-C	0	0
	5	3.60×10^{-13}
	10	4.80×10^{-13}
	20	6.00×10^{-13}
VUV	0	3.90×10^{-13}
	5	6.95×10^{-12}
	10	8.79×10^{-12}
	20	1.34×10^{-11}

4.2 การสลายฮาโลแอกซีโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลต

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการสลายฮาโลแอกซีโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตสองชนิด คือชนิด UV-C และ VUV โดยสารฮาโลแอกซีโตไนไตรล์ที่นำมาศึกษาได้แก่ โมโนคลอโรแอกซีโตไนไตรล์ ไดคลอโรแอกซีโตไนไตรล์ และไตรคลอโรแอกซีโตไนไตรล์ ทั้งสามสามารถแบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ตามขั้นตอนการทดลอง ดังต่อไปนี้

4.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อวัดความเข้มข้นฮาโลเอซีไตนไตรล์ และการควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของฮาโลเอซีไตนไตรล์ ทำการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณหาความเข้มข้นของฮาโลเอซีไตนไตรล์ โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0.1, 5, 10, 25, 50, 75 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร สารละลายมาตรฐานทั้งหมดจะนำไปผ่านกระบวนการขั้นตอนการสกัดและเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับตัวอย่าง และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph ทำให้ได้ค่าพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำมาสร้างเป็นกราฟความเข้มข้นกับพื้นที่ใต้กราฟ ผลการทดลองในภาคผนวก ค.1 และดังแสดงในภาพ 4.5



ภาพที่ 4.5 กราฟมาตรฐานของฮาโลเอซีไตนไตรล์

จากภาพที่ 4.5 จะได้กราฟเป็นเส้นตรงและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) อยู่ในช่วง 0.9998 - 0.9956 โดยสมการเส้นตรงที่ได้นี้จะใช้ในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นโดย ค่า x เป็นความเข้มข้นของฮาโลเอซีไตนไตรล์ และค่า y เป็นพื้นที่ใต้กราฟ

สำหรับกระบวนการสกัดสารและเตรียมตัวอย่างสารกลุ่มฮาโลเอซีไตนไตรล์ (U.S. Modified EPA method 551.1) จะต้องวิเคราะห์หาร้อยละการนำกลับ (%Recovery) จากกระบวนการนี้จะอยู่ที่ 91.28% ซึ่งอยู่ในช่วง 75 ถึง 125 (U.S. EPA method 551.1) ตามที่กำหนดไว้ จึงถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ (ภาคผนวก ค.2)

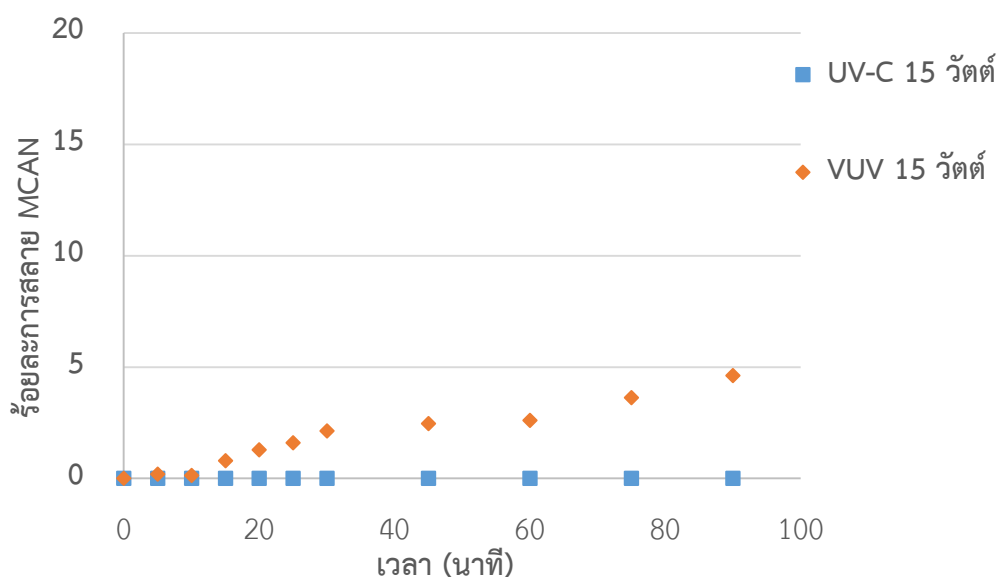
4.2.2 ผลของการสลายฮาโลเอซีไตรีโตนไตรล์ในชุดควบคุม

ผลของการทดลองโดยเติมน้ำเสียสังเคราะห์ของฮาโลเอซีไตรีโตนไตรล์ที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรทั้ง 3 ชนิด โดยไม่มีการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตและกวนผสมตลอดเวลาในถังปฏิกิริยาเป็นเวลา 90 นาที พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง (ภาคผนวก ค.3)

4.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสลายฮาโลเอซีไตรีโตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และชนิดสุญญากาศ (VUV)

4.2.3.1 โมโนคลอโรเอซีไตรีโตนไตรล์ (MCAN)

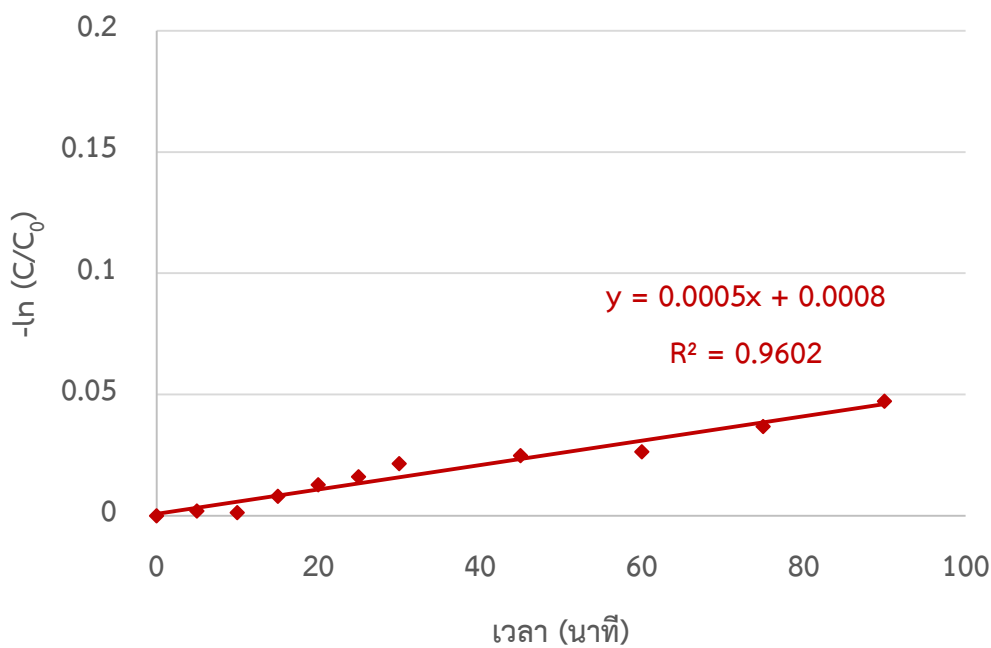
สำหรับการสลายโมโนคลอโรเอซีไตรีโตนไตรล์เข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) ที่เวลาต่างๆ ได้ผลดังแสดงในภาคผนวก ค.4 ถึงภาคผนวก ค.6 และภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ร้อยละการสลายโมโนคลอโรเอซีไตรีโตนไตรล์ (MCAN) กับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในการทดลองด้วย UV-C และ VUV

จากภาพที่ 4.6 พบว่าเมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) จะไม่พบการเปลี่ยนแปลง โดยความเข้มข้นของโมโนคลอโรเอซีไตรีโตนไตรล์ (MCAN) ใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่เมื่อทำการสลายโมโนคลอโรเอซีไตรีโตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

ชนิดสุญญากาศ (VUV) จะสามารถสลายโมโนคลอโรเอซีไตนไตรล์ลดลงเหลือ 94.72 ไมโครกรัมต่อลิตร และพบว่าที่เวลา 90 นาทีจะทำให้ร้อยละการสลายเป็น 4.62 ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการลดลงเล็กน้อย



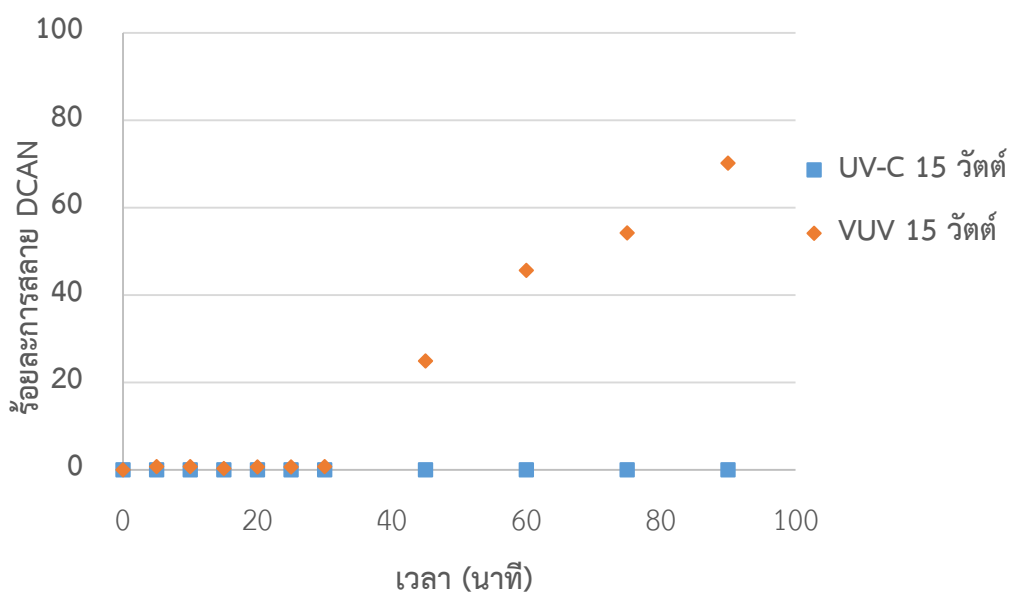
ภาพที่ 4.7 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายโมโนคลอโรเอซีไตนไตรล์ (MCAN) ด้วย VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

จากงานวิจัยที่ผ่าน (Hansen และคณะ, 2013) สำหรับการสลายผลิตภัณฑ์พลอยได้ (จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรค) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตจะมีปฏิกิริยาการสลายเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ซึ่งสำหรับการทดลองสลายโมโนคลอโรเอซีไตนไตรล์นี้ เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา (ภาคผนวก ง.1) จะให้ผลแสดงดังภาพที่ 4.7 ปรากฏว่าให้ผลเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Hansen และคณะ, 2013 สำหรับการสลายโมโนคลอโรเอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) เท่านั้น โดยมีค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเป็น 0.0005 ต่อนาที

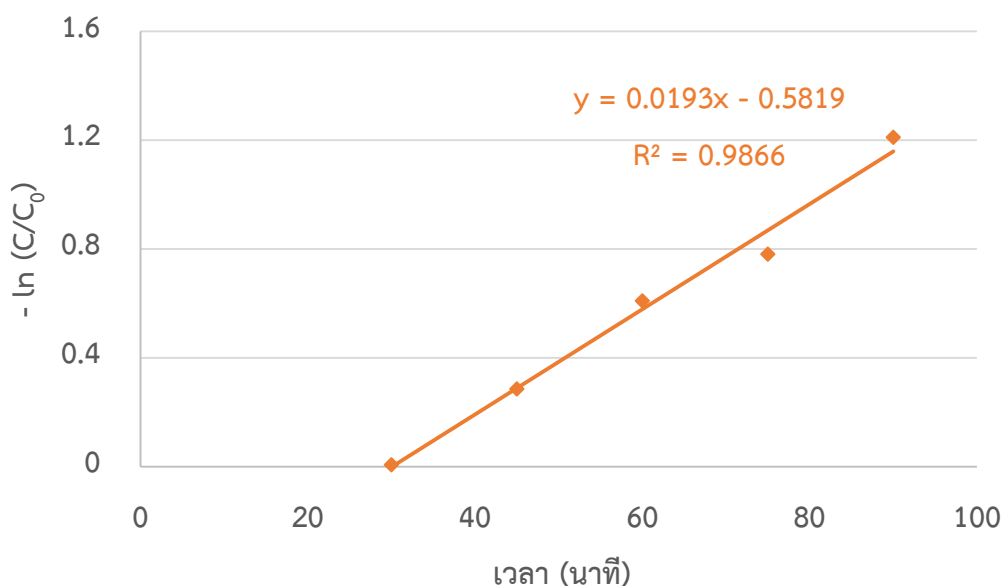
4.2.3.2 ไคคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (DCAN)

สำหรับการสลายไคคลอโรแอซิโตไนไตรล์เข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) ที่เวลาต่างๆ ได้ผลดังแสดงในภาคผนวก ค.7 ถึงภาคผนวก ค.9 และภาพที่ 4.8

จากภาพที่ 4.8 พบว่าเมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) จะไม่พบการเปลี่ยนแปลง ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ โดยความเข้มข้นของไคคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (DCAN) ใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่เมื่อทำการสลายไคคลอโรแอซิโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) พบว่าช่วงเวลา 0 ถึง 30 นาที ไม่พบการสลายของไคคลอโรแอซิโตไนไตรล์ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากพลังงานที่ได้จากแสงอัลตราไวโอเลตสุญญากาศที่ใช้สำหรับการสลายพันธะไม่เพียงพอจึงเป็นเพียงการสะสมพลังงานเท่านั้น แต่เมื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเลตหลังจาก 30 ถึง 90 นาที พบว่าสามารถสลายไคคลอโรแอซิโตไนไตรล์ลดลงเหลือ 30.09 ไมโครกรัมต่อลิตร และให้ร้อยละการสลายเป็น 70.21



ภาพที่ 4. 8 ร้อยละการสลายไคคลอโรแอซิโตไนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการทดลองด้วย UV-C และ VUV

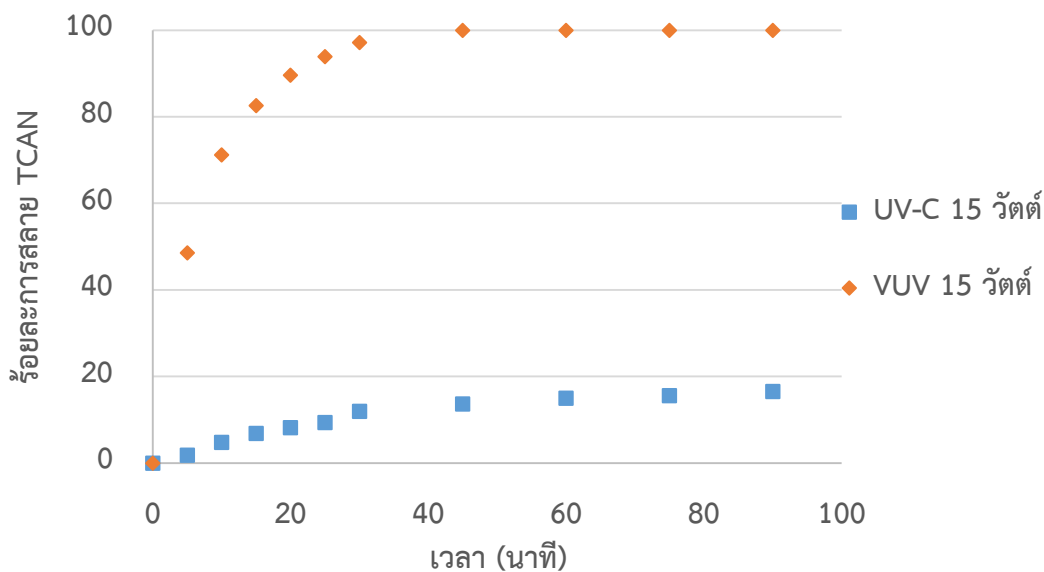


ภาพที่ 4.9 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายไดคลอโรเอซีโตไนไตรล์ด้วย VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

จากงานวิจัยที่ผ่านมา สำหรับการสลายผลิตภัณฑ์พลอยได้ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตจะมีปฏิกิริยาการสลายเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ซึ่งสำหรับการทดลองสลายไดคลอโรเอซีโตไนไตรล์นี้เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา (ภาคผนวก ง.2) จะให้ผลแสดงดังภาพที่ 4.14 ปรากฏว่าให้ผลเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งซึ่งสอดคล้องกับผลของการสลายโมโนคลอโรเอซีโตไนไตรล์ สำหรับการสลายไดคลอโรเอซีโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) เท่านั้น โดยมีค่าคงที่ปฏิกิริยาเป็น 0.0193 ต่อนาที ซึ่งมีค่ามากกว่าโมโนคลอโรเอซีโตไนไตรล์

4.2.3.3 ไตรคลอโรเอซีโตไนไตรล์ (TCAN)

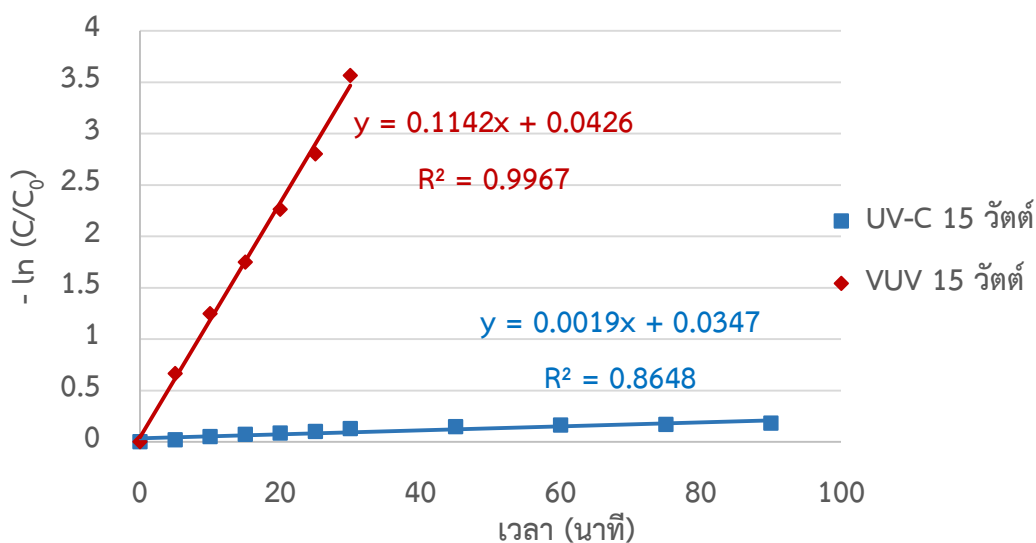
สำหรับการสลายไตรคลอโรเอซีโตไนไตรล์เข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก ค.10 ถึงภาคผนวก ค.12 และภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ร้อยละการสลายไตรโคลโรเอซีไต่ไนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการทดลองด้วย UV-C และ VUV

จากภาพที่ 4.10 พบว่าเมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) ที่เวลา 90 นาที พบว่าสามารถสลายไตรโคลโรเอซีไต่ไนไตรล์ ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรเหลือ 81.56 ไมโครกรัมต่อลิตรและต่ำกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร และโดยคิดเป็นร้อยละ 16.54 และมากกว่าร้อยละ 99.90 ตามลำดับ โดยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) สามารถสลายไตรโคลโรเอซีไต่ไนไตรล์ได้มากกว่าร้อยละ 99.90 ตั้งแต่ 45 นาทีแรก ซึ่งให้ประสิทธิภาพดีกว่าการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)

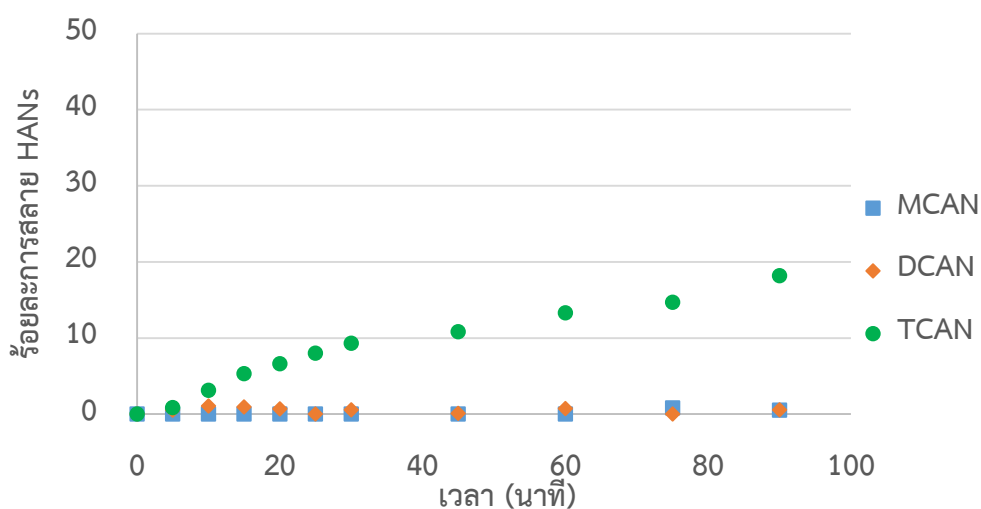
สำหรับการสลายไตรโคลโรเอซีไต่ไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง สอดคล้องกับผลของการสลายสารฮาโลเอซีไต่ไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดอื่น เนื่องจากเมื่อนำผลของการสลายไตรโคลโรเอซีไต่ไนไตรล์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา (ภาคผนวก ง.3) จะให้ผลแสดงดังภาพที่ 4.11 ปรากฏว่าการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และชนิดสุญญากาศ (VUV) ให้ผลเป็นเส้นตรงทั้งสองชนิด โดยให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งเป็น 0.0019 และ 0.1142 ต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งค่าคงที่ปฏิกิริยาของการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) มากกว่าการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากช่วงความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเลตสุญญากาศ (VUV) จะให้พลังงานที่มากกว่าและเป็นช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับการสลายพันธะของไตรโคลโรเอซีไต่ไนไตรล์มากกว่าแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)



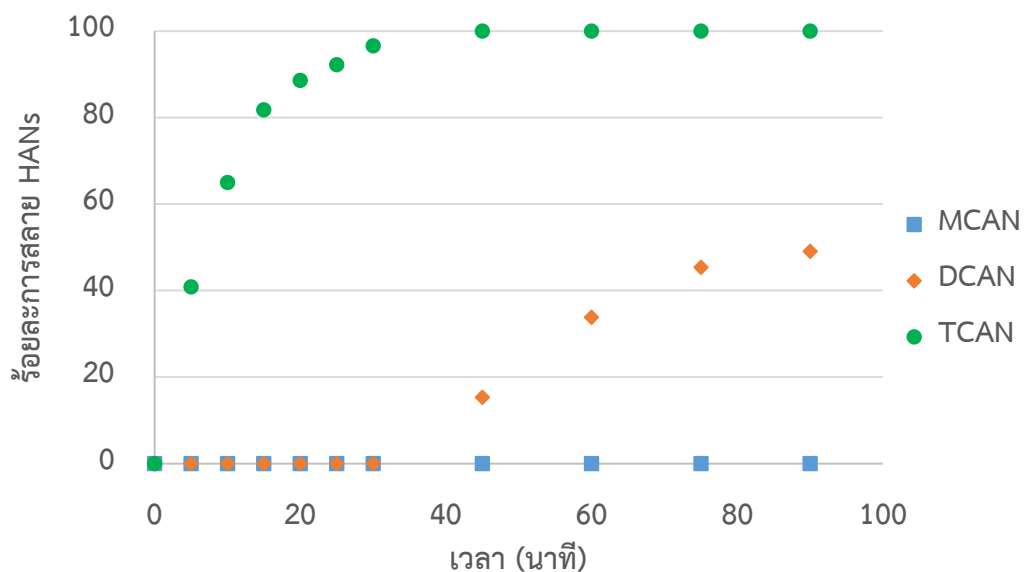
ภาพที่ 4.11 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายไตรคลอโรเอซีไตไนไตรล์ด้วย UV-C และ VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

4.2.3.4 ฮาโลเอซีไตไนไตรล์ (HANS)

สำหรับการสลายฮาโลเอซีไตไนไตรล์แบบผสมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ โมโนคลอโรเอซีไตไนไตรล์ ไดคลอโรเอซีไตไนไตรล์ และไตรคลอโรเอซีไตไนไตรล์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฮาโลเอซีไตไนไตรล์แต่ละชนิดเป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยผลของการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก ค.13 ถึงภาคผนวก ค.20 และภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.12 ร้อยละการสลายฮาโลเอซีไตไนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในการทดลองด้วย UV-C



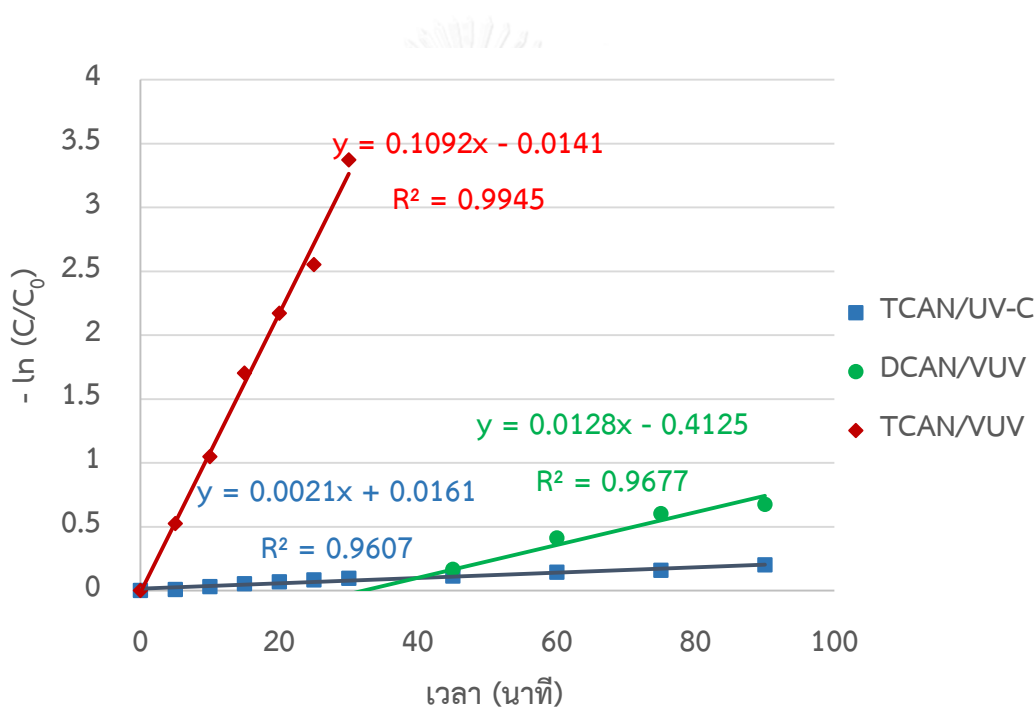
ภาพที่ 4.13 ร้อยละการสลายฮาโลเอซีไตโนไตรัลกับความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในการทดลองด้วย VUV

จากภาพที่ 4.12 พบว่าเมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) ที่เวลา 90 นาที ร้อยละการสลายไตรฮาโลเอซีไตโนไตรัลเป็น 18.21 แต่โมโนคลอโรเอซีไตโนไตรัลและไดคลอโรเอซีไตโนไตรัลจะไม่เกิดการสลาย สำหรับผลของการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) สลายฮาโลเอซีไตโนไตรัลแบบผสม ดังแสดงในภาพที่ 4.13 พบว่าสำหรับไดคลอโรเอซีไตโนไตรัลจะให้ผลกับการทดลองแบบชนิดเดียวโดยที่เวลา 0 ถึง 30 นาทีจะยังไม่มี การสลาย แต่หลังจาก 30 นาที จนถึง 90 นาที พบว่าร้อยละการสลายไดคลอโรเอซีไตโนไตรัลเป็น 49.03 แต่สำหรับไตรคลอโรเอซีไตโนไตรัลจะเริ่มสลายตั้งแต่เริ่มฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตสุญญากาศ (VUV) โดยที่เวลา 90 นาที จะให้ร้อยละการสลายไตรคลอโรเอซีไตโนไตรัล มากกว่าร้อยละ 99 โดยที่ไตรคลอโรเอซีไตโนไตรัลสลายหมดตั้งแต่ 45 นาทีแรก แต่โมโนคลอโรเอซีไตโนไตรัลไม่เกิดการสลาย ทำให้พบว่าประสิทธิภาพของการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) ดีกว่าการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ตสุญญากาศ (VUV) มีช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับการสลายพันธะของสารฮาโลเอซีไตโนไตรัล และให้พลังงานในการสลายพันธะของสารฮาโลเอซีไตโนไตรัลมากกว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C)

สำหรับการสลายฮาโลเอซีไตโนไตรัลแบบผสมด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตพบว่า เป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา (ภาคผนวก ง.4) จะให้ผลแสดงดังภาพที่ 4.14 โดยการสลายไตรคลอโรเอซีไตโนไตรัลด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และชนิดสุญญากาศ (VUV) ให้ผลเป็นเส้นตรงทั้งสองชนิด ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเป็น

0.0021 และ 0.1092 ต่อนาที ตามลำดับ และการสลายไตรคลอโรเอธิไคนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเป็น 0.0128 ต่อนาที พบว่าค่าคงที่ปฏิกิริยาของการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) มากกว่าการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) อีกด้วย

จากผลการทดลองสลายฮาโลเอธิไคนไตรล์แบบทีละชนิด และแบบผสมด้วยแสงอัลตราไวโอเลตที่ผ่านมา พบว่าให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และคณะ (2010) สารที่มีองค์ประกอบของคลอรีนและสารที่มีหมู่ฮาโลเจนมาก จะมีความเสถียรต่ำกว่าสารที่มีหมู่ฮาโลเจนต่ำ คือ โมโนคลอโรเอธิไคนไตรล์ (MCAN) < ไตรคลอโรเอธิไคนไตรล์ (DCAN) < ไตรคลอโรเอธิไคนไตรล์ (TCAN) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.14 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายฮาโลเอธิไคนไตรล์แบบผสมด้วย UV-C และ VUV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.4 ผลของการเปรียบเทียบค่าคงที่ปฏิกิริยาระหว่างการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และชนิดสุญญากาศ (VUV)

กระบวนการที่ใช้	ชนิดของฮาโลแอซิโตไนโตรล์	ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ของการสลายแบบทีละชนิด (ต่อนาที)	ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ของการสลายแบบผสม (ต่อนาที)
UV-C	MCAN	-	-
	DCAN	-	-
	TCAN	0.0019	0.0021
VUV	MCAN	0.0005	-
	DCAN	0.0193	0.0119
	TCAN	0.1142	0.1092

จากตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบการสลายฮาโลแอซิโตไนโตรล์แบบทีละชนิดกับแบบผสมพบว่า สำหรับการสลายฮาโลแอซิโตไนโตรล์แบบผสมจะให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย เนื่องมาจากการแตกตัวของหมู่ฮาโลเจน คือ ไตรฮาโลแอซิโตไนโตรล์แตกตัวเป็นไดคลอโรแอซิโตไนโตรล์ และไดคลอโรแอซิโตไนโตรล์แตกตัวเป็นโมนอกโลโรแอซิโตไนโตรล์ ทั้งนี้สำหรับการสลายฮาโลแอซิโตไนโตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตทั้งสองชนิดจะให้ผลสอดคล้องกันคือ เกิดการแตกตัวของหมู่ฮาโลเจนเพียงเล็กน้อยจึงทำให้การสลายฮาโลแอซิโตไนโตรล์แบบผสมมีค่าคงที่ปฏิกิริยาลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากผลการทดลองที่ผ่านมาี้ สำหรับการสลายฮาโลแอซิโตไนโตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) เปรียบเทียบกับแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) พบว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) จะให้ประสิทธิภาพในการสลายสารฮาโลแอซิโตไนโตรล์ได้ดีกว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Imoberdorf และ Mohseni (2011) แสดงว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) เป็นช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับการดูดกลืนแสงของฮาโลแอซิโตไนโตรล์ ทำให้ฮาโลแอซิโตไนโตรล์เกิดการสลายตัวได้ดีกว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต ทั้งนี้แสงอัลตราไวโอเล็ตสุญญากาศอาจทำให้น้ำเกิดการสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นตัวช่วยเพิ่มการออกซิเดชันในสารมลพิษด้วย เพื่อให้แน่ใจว่ากลไกของการสลายฮาโลแอซิโตไนโตรล์ที่เกิดขึ้นนั้น เป็นผลมาจากกลไกการสลายด้วยแสงโดยตรงหรือการออกซิเดชันจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล จึงต้องมีการศึกษากลไกหลักที่เกิดขึ้น ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.3

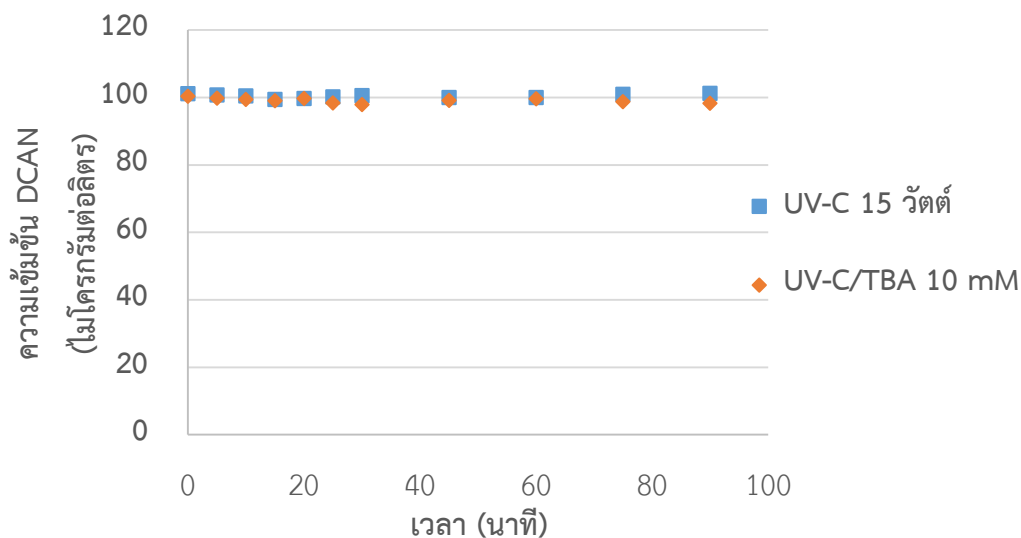
4.3 การศึกษากลไกหลักของการสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์

สำหรับการศึกษากลไกหลักของการสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์ ทำการทดลองโดยการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร เนื่องจากเป็นตัวขัดขวางการออกซิเดชันของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล โดยถ้านำค่าจลนพลศาสตร์มาเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าการสลายเกิดช้าลง แสดงว่ากลไกหลักในการสลายสารมลพิษเป็นกระบวนการออกซิเดชัน ในการทดลองสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์นี้ได้เลือกการสลายไดคลอโรแอซีโตไนไตรล์ และการสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์แบบผสม เป็นตัวแทนเพื่อดูกลไกหลักในการสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์ ว่าเป็นกระบวนการสลายสารมลพิษโดยตรง (Direct Photolysis) หรือกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process)

4.3.1 ไดคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (DCAN)

4.3.1.1 แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)

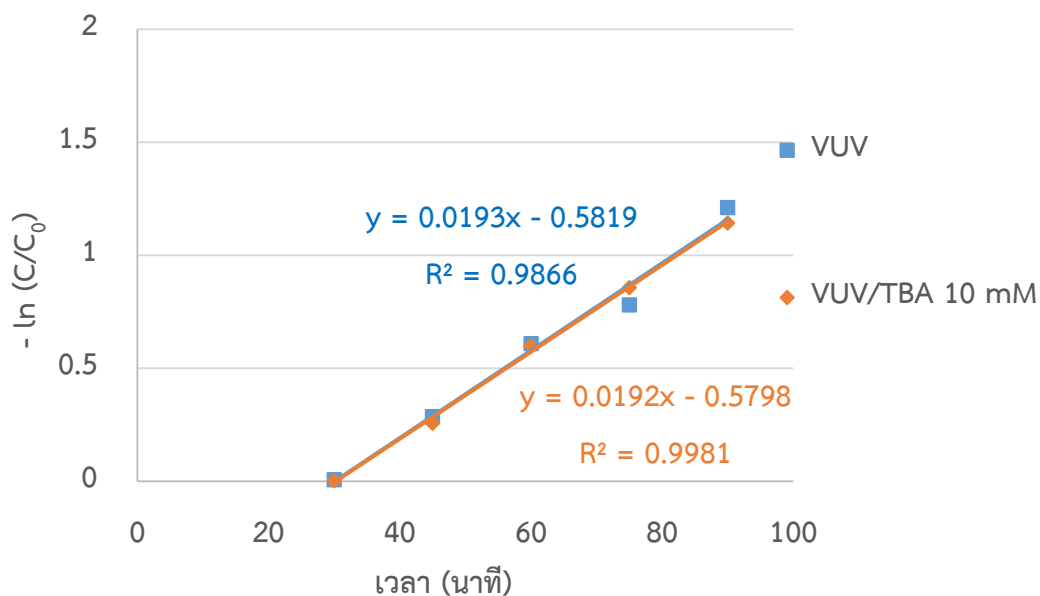
สำหรับผลของการสลายไดคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้นของไดแอซีโตไนไตรล์เป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) กับเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (*tert-butyl alcohol*, TBA) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร โดยผลของการสลายไดคลอโรแอซีโตไนไตรล์ในภาคผนวก ค.7 และภาคผนวก ค.44 และดังภาพที่ 4.15 โดยพบว่าเมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และการใช้แสงอัลตราไวโอเลตกับการเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA) ไม่เกิดการสลายไดคลอโรแอซีโตไนไตรล์ จึงสามารถระบุได้ว่าไม่เกิดทั้งการสลายด้วยแสงโดยตรง (Direct Photolysis) และกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)



ภาพที่ 4.15 ความเข้มข้นของไดคลอโรแอสिटโนไตรล์ (DCAN) เทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการทดลองด้วย UV-C และ UV-C/TBA

4.3.1.2 แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

สำหรับผลของการสลายไดคลอโรแอสिटโนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) โดยมีและไม่มีเทมเปอร์เจอร์ฮีทรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (TBA) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร ดังแสดงในภาคผนวก ง.14 และเมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา ดังแสดงในภาพที่ 4.16 เมื่อเทมเปอร์เจอร์ฮีทรี บิวทิล แอลกอฮอล์ 10 มิลลิโมลต่อลิตร กับการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV/TBA) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) ปกติ ได้ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเป็นกระบวนการสลายด้วยแสงโดยตรง (Direct Photolysis)

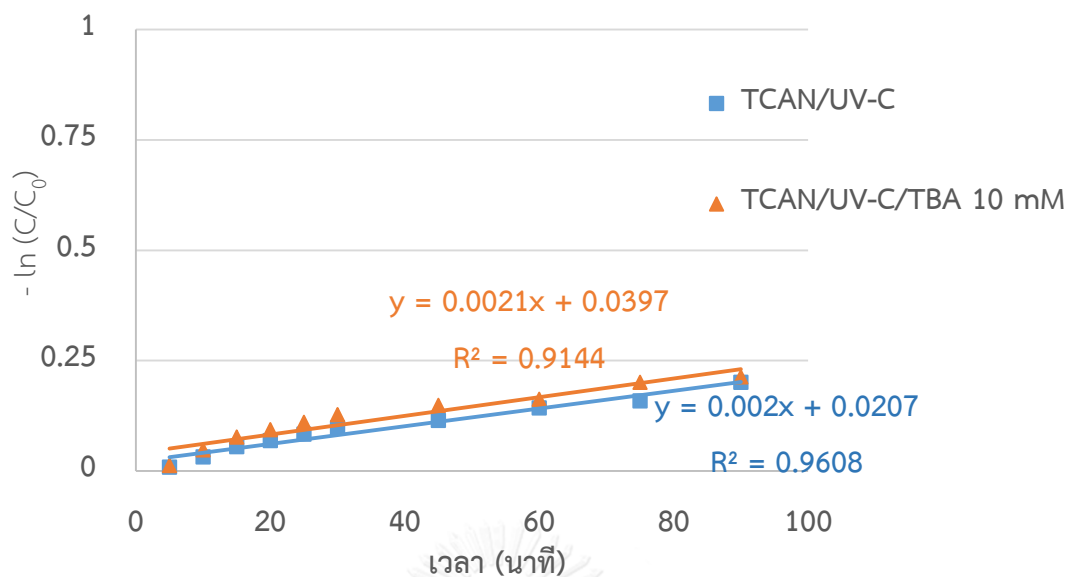


ภาพที่ 4.16 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ด้วย VUV และ VUV/TBA

4.3.2 ฮาโลแอซิโตไนไตรล์ (HANs)

4.3.2.1 แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)

สำหรับผลของการสลายฮาโลแอซิโตไนไตรล์แบบผสม ได้แก่ โมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (MCAN) ไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (DCAN) และไตรคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) ที่มีและไม่มีสารเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร



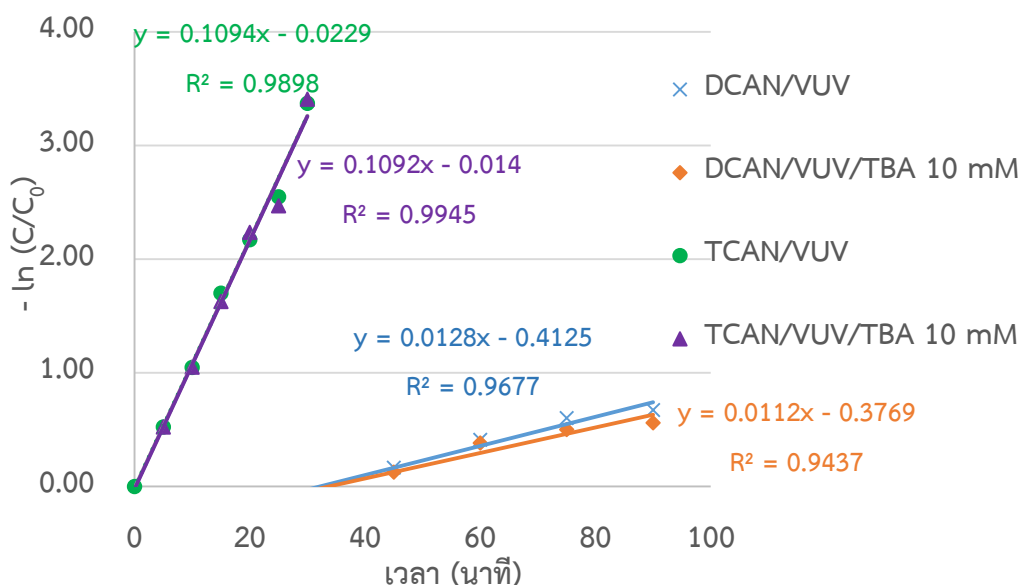
ภาพที่ 4.17 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายฮาโลเอซีไตโนไตรล์ด้วย UV-C และ UV-C/TBA

ได้ผลดังแสดงในภาคผนวก ง.5 และภาคผนวก ง.16 เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) ไม่สามารถสลายโมโนคลอโรเอซีไตโนไตรล์ (MCAN) และไดคลอโรเอซีไตโนไตรล์ (DCAN) ได้ แต่สามารถสลายไตรคลอโรเอซีไตโนไตรล์ (TCAN) ได้ จึงทำการเปรียบเทียบกับ การสลายฮาโลเอซีไตโนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) ดังภาพที่ 4.17 พบว่าค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าเป็นกระบวนการสลายด้วยแสงโดยตรง (Direct Photolysis)

4.3.2.2 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV)

สำหรับผลของการสลายฮาโลเอซีไตโนไตรล์แบบผสม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแต่ละชนิดเป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) ที่มีและไม่มี การเติมเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (VUV/TBA) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อลิตร ได้ผลแสดงในภาคผนวก ง.4 และภาคผนวก ง.15 เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) จะไม่สามารถสลายโมโนคลอโรเอซีไตโนไตรล์ (MCAN) แต่สามารถสลายไดคลอโรเอซีไตโนไตรล์ (DCAN) และสามารถสลายไตรคลอโรเอซีไตโนไตรล์ (TCAN) ได้ จึงทำการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยาของไดคลอโรเอซีไตโนไตรล์ (DCAN) และไตรคลอโรเอซีไตโนไตรล์ (TCAN) ดังแสดงในภาพที่ 4.18 และค่าคงที่ปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 4.5 และพบว่าให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งที่มีความใกล้เคียง

กัน ดังนั้นกลไกหลักที่เกิดขึ้นในการสลายไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์และไตรคลอโรแอซิโตไนไตรล์เป็นกระบวนการสลายแสงโดยตรง (Direct Photolysis) เช่นเดียวกับการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)



ภาพที่ 4.18 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายฮาโลแอซิโตไนไตรล์ด้วย VUV และ VUV/TBA

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ในการสลายฮาโลแอซิโตไนไตรล์แบบผสมด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับการเติมเทอร์เชียรีบิวทิล แอลกอฮอล์ (VUV/TBA)

ชนิดของฮาโลแอซิโตไนไตรล์	กระบวนการที่ใช้	ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง(k) (ต่อนาที)	R ²
DCAN	VUV	0.0128	0.9677
	VUV/TBA	0.0112	0.9437
TCAN	VUV	0.1094	0.9898
	VUV/TBA	0.1092	0.9945

จากการทดสอบกลไกหลักของการสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์ที่ผ่านมา พบว่ากลไกหลักที่พบเป็นกระบวนการสลายด้วยแสง (Direct photolysis) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน จึงมีการประยุกต์ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.4

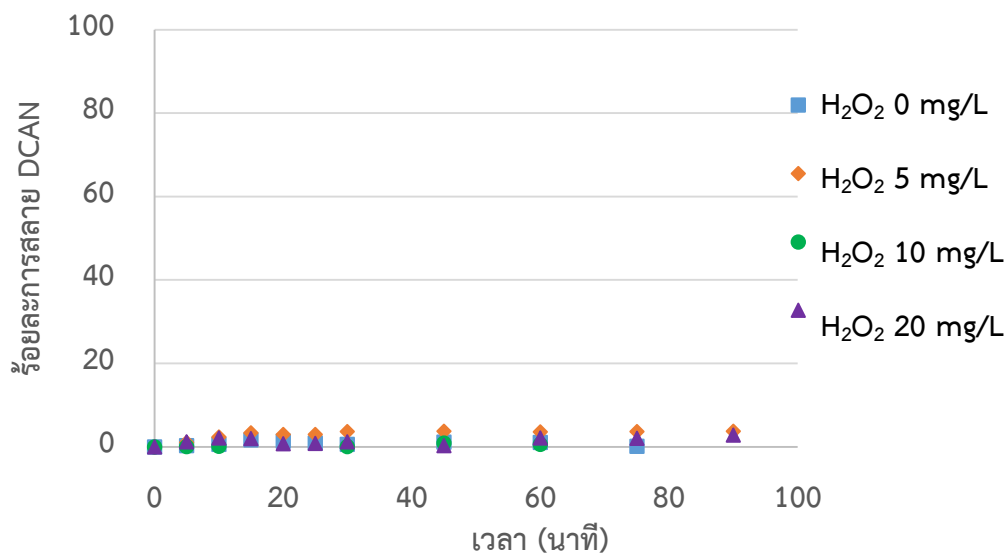
4.4 การสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในการสลายสารฮาโลแอซีไตนไตรล์เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์เพิ่มมากขึ้น ในการศึกษาจะใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพของการสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์ด้วย ดังนั้นจึงอาจแบ่งเป็น 2 ช่วงการทดลองดังต่อไปนี้ โดยเลือกไดคลอโรแอซีไตนไตรล์เป็นตัวแทนในการศึกษา

4.4.1 ศึกษาความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการสลายไดคลอโรแอซีไตนไตรล์ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต

4.4.1.1 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C)

สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของไดคลอโรแอซีไตนไตรล์เป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0, 5, 10 และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี โดยร้อยละการสลายของฮาโลแอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) ดังแสดงในภาพที่ 4.19 และภาคผนวก ค.21 ถึงภาคผนวก ค.23

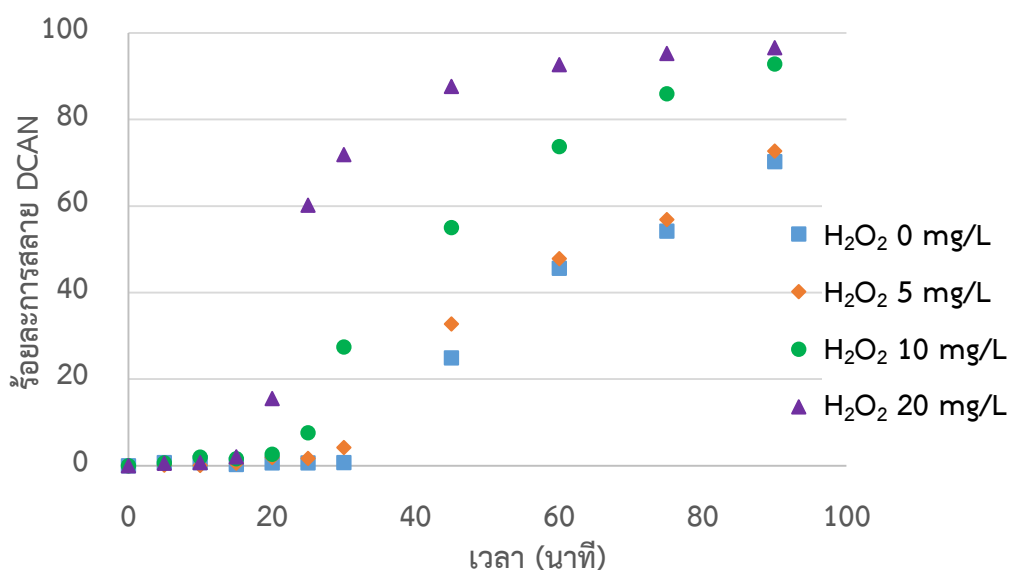


ภาพที่ 4. 19 ร้อยละการสลายไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์กับความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการทดลองด้วย UV-C/H₂O₂

จากภาพที่ 4.19 พบว่าการสลายไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์ร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ไม่ทำให้ร้อยละการสลายไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) อาจไม่เหมาะสมกับการดูดกลืนแสงของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรืออาจไม่ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สลายตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลได้ จึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการออกซิเดชันเพิ่มขึ้น

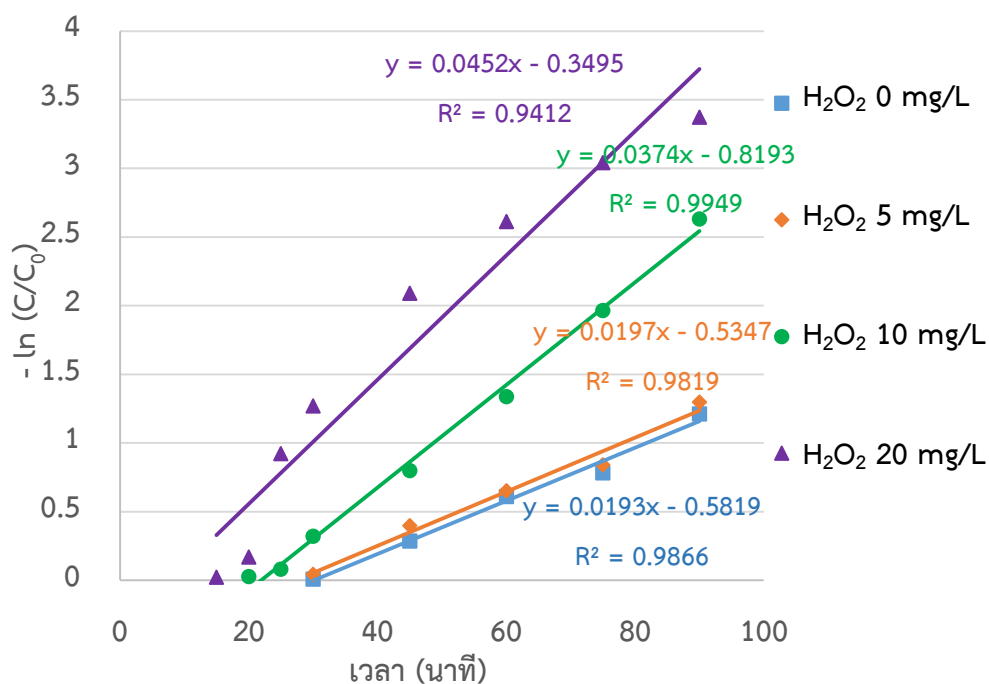
4.4.1.2 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV)

สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์เป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0, 5, 10 และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ โดยร้อยละการสลายของฮาโลแอกซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.20 และภาคผนวก ค.24 ถึงภาคผนวก ค.29



ภาพที่ 4.20 ร้อยละการสลายไดคลอโรแอกซีไตรีนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการทดลองด้วย VUV/H₂O₂

จากภาพที่ 4.20 เมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสูญญากาศร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าในสำหรับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้การสลายไดคลอโรแอกซีไตรีนไตรล์เกิดเร็วขึ้นโดยเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเริ่มต้นสลายที่เวลา 25, 20 และ 15 นาที ตามลำดับ เนื่องจากเกิดกระบวนการออกซิเดชันจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยที่ผ่านมา (Jo และคณะ, 2011) และที่เวลา 90 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จะสามารถสลายไดคลอโรแอกซีไตรีนไตรล์ได้เพิ่มขึ้น พบว่าร้อยละการสลายไดคลอโรแอกซีไตรีนไตรล์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นได้แก่ 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ร้อยละการสลายไดคลอโรแอกซีไตรีนไตรล์เป็น 72.66, 92.79 และ 96.57 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.21 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ด้วย VUV/ H_2O_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ในการสลายไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (DCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสูญญากาศร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/ H_2O_2) ที่ความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ต่างๆ

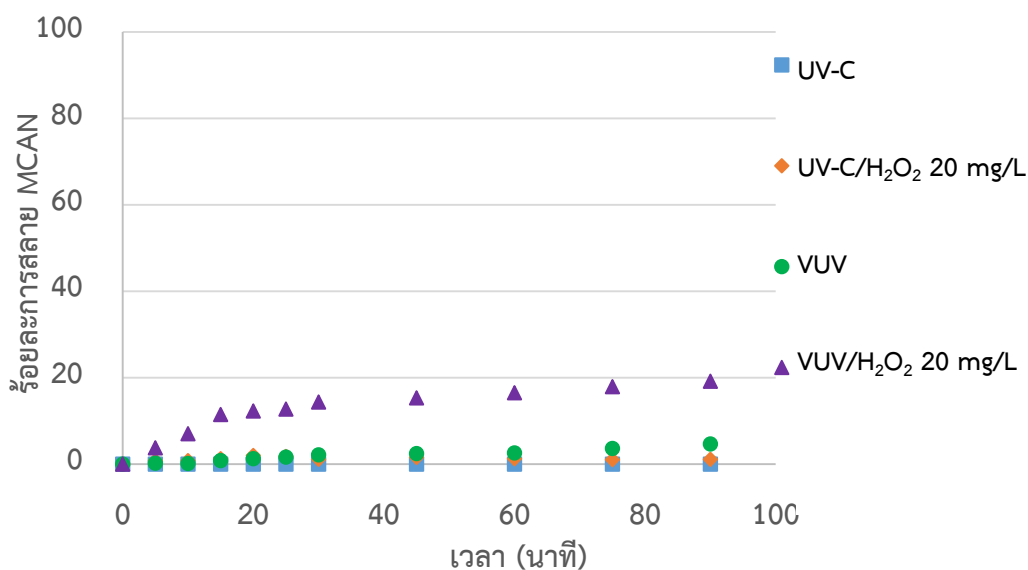
ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง(k) (ต่อนาที)	R^2
0	0.0193	0.9866
5	0.0197	0.9819
10	0.0374	0.9949
20	0.0452	0.9412

สำหรับการสลายไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/ H_2O_2) พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.21 ภาคผนวก ง.6 ถึงภาคผนวก ค.9 และตารางที่ 4.6 โดยพบว่าจากการกราฟความสัมพันธ์ของสลายได

คลอโรแอกซีโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) (-ln(C/C₀)) มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่ทุกๆความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งของการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีค่ามากกว่าที่ไม่เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และพบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเพิ่มขึ้นอีกด้วย จากการทดลองนี้ที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งเพิ่มขึ้นจากการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศเพียงอย่างเดียวจาก 0.0193 เป็น 0.0452 ต่อนาที ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Penru และคณะ (2012) แสดงว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมลงไปเกิดการสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์รุนแรงทำให้เกิดการออกซิเดชันกับสารมลพิษจึงทำให้เกิดการสลายตัวได้ดียิ่งขึ้น เพื่อศึกษาว่าการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายสารฮาโลแอกซีโตไนไตรล์ชนิดอื่นๆด้วย จึงต้องมีการศึกษาการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นดีที่สุดจากการทดลองนี้คือ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการสลายสารฮาโลแอกซีโตไนไตรล์ชนิดอื่นดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

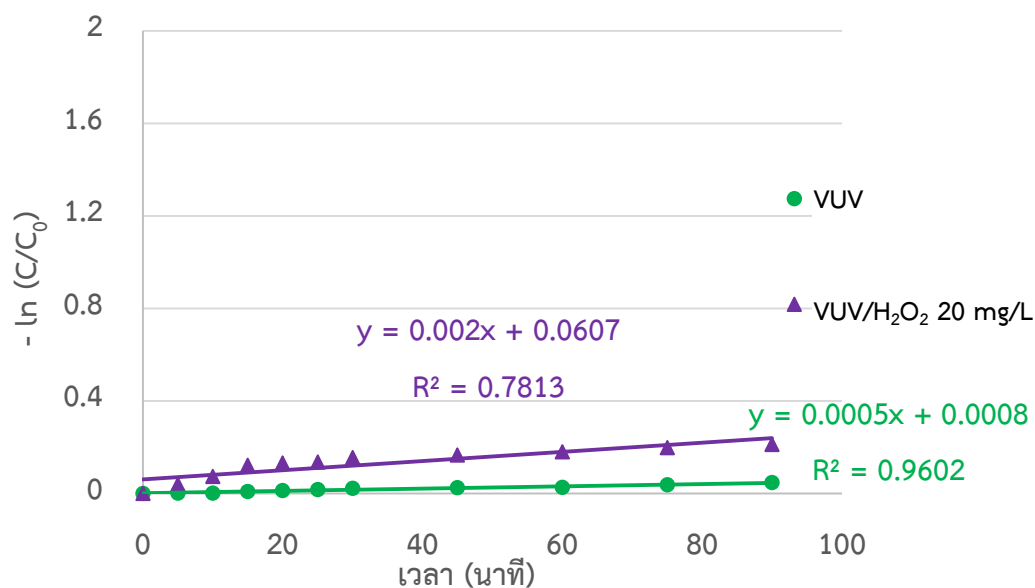
4.4.2 ผลการสลายโมโนคลอโรแอกซีโตไนไตรล์ (MCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สำหรับการศึกษาการสลายโมโนคลอโรแอกซีโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของโมโนคลอโรแอกซีโตไนไตรล์เป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และชนิดสุญญากาศ (VUV) ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.29 และ ภาคผนวก ค.30 ถึงภาคผนวก ค.32



ภาพที่ 4.22 ร้อยละการสลายโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์กับความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในการทดลองด้วย UV-C/H₂O₂ และ VUV/H₂O₂

จากภาพที่ 4.22 พบว่าที่ 90 นาที การใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีวีร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรปรากฏว่าไม่สามารถสลายโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ได้ ดังนั้นการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการสลายโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์จึงไม่เป็นผล แต่สำหรับการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จะสามารถสลายโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ได้มากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) เพียงอย่างเดียว โดยร้อยละการสลายโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ของการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 19.13 จากเดิมที่การสลายโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) เพียงอย่างเดียวซึ่งเท่ากับร้อยละ 4.62

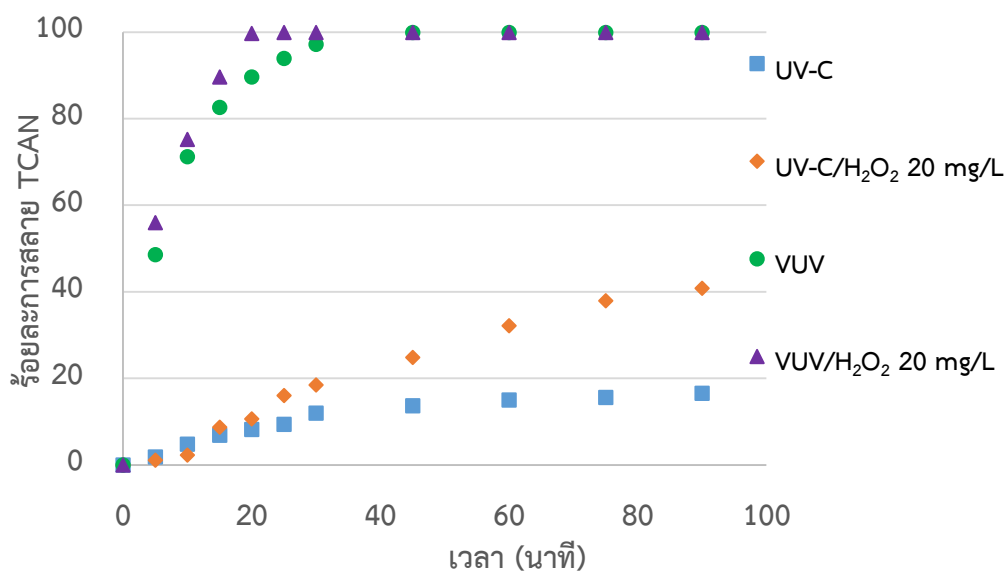


ภาพที่ 4.23 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายโมโนคลอโรเอซีโตไนไตรล์ด้วย VUV/H₂O₂

สำหรับการสลายโมโนคลอโรเอซีโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับผลของการสลายไดคลอโรเอซีโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา (ภาคผนวก ง.9) ดังภาพที่ 4.23 พบว่าการสลายโมโนคลอโรเอซีโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) เป็นเส้นตรง โดยค่าคงที่ปฏิกิริยา จะมีค่าเป็น 0.0020 ต่อนาที ซึ่งมากกว่าที่ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งของการสลายโมโนคลอโรเอซีโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) เพียงอย่างเดียวที่มีค่าเป็น 0.0005 ต่อนาที ซึ่งสอดคล้องกับผลของการสลายไดคลอโรเอซีโตไนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂)

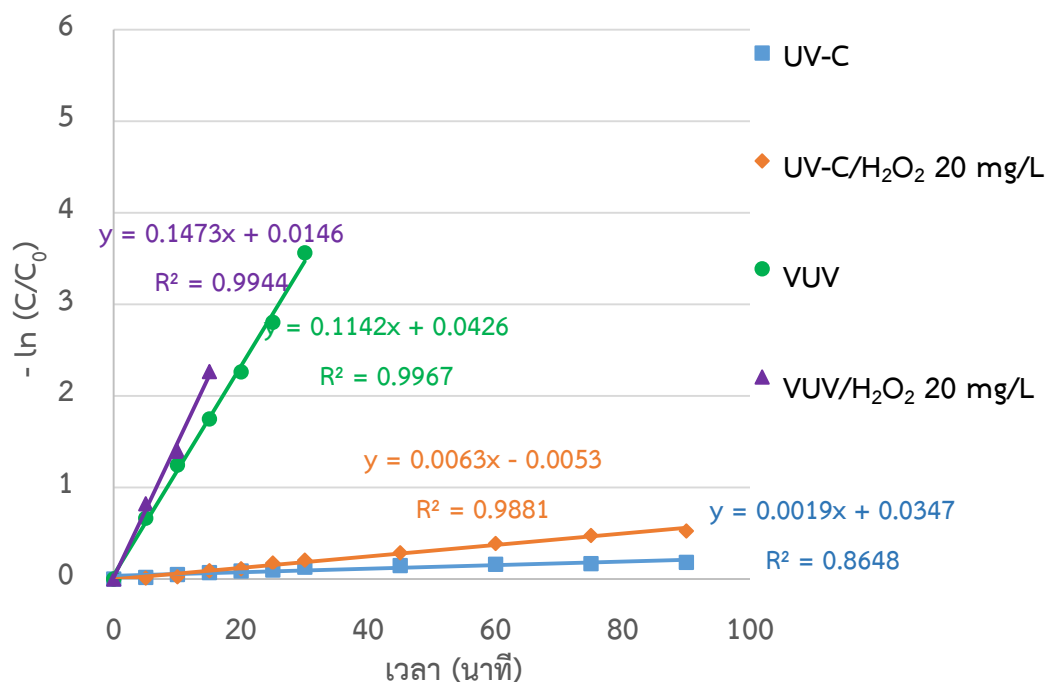
4.4.3 ผลการสลายไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์ (TCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สำหรับการศึกษาการสลายไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของโมโนคลอโรเอซีไตนไตรล์เป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และชนิดสุญญากาศ (VUV) ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.24 และภาคผนวก ค.33 ถึงภาคผนวก ค.35



ภาพที่ 4.24 ร้อยละการสลายไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการทดลองด้วย UV-C/H₂O₂ และ VUV/H₂O₂

จากภาพที่ 4.24 พบว่าที่ 90 นาที การใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรากฏว่าการสลายไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 16.45 เป็นร้อยละ 40.84 เมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) สำหรับการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จะสามารถสลายไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์ได้ต่ำกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตรที่ได้ในเวลา 20 เร็วกว่าการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) เพียงอย่างเดียวที่ 45 นาที



ภาพที่ 4.25 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายไตรคลอโรเอซีโตนไไตรล์ด้วย VUV/H₂O₂

สำหรับการสลายไตรคลอโรเอซีโตนไไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ดังภาคผนวก ง.10 และแสดงดังภาพที่ 4.25 โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งกระบวนการสลายไตรคลอโรเอซีโตนไไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) ให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งที่มากกว่าการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และเมื่อพิจารณาการสลายไตรคลอโรเอซีโตนไไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) พบว่าให้ผลเช่นเดียวกับการสลายไตรคลอโรเอซีโตนไไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) คือเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ดังภาพที่ 4.25 โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาเท่ากับ 0.1473 ต่อนาที ซึ่งมากกว่าที่ค่าคงที่ปฏิกิริยาของการสลายไตรคลอโรเอซีโตนไไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) เพียงอย่างเดียวที่มีค่าเป็น 0.1142 ต่อนาที ซึ่งสอดคล้องกับผลของการสลายฮาโลเอซีโตนไไตรล์ชนิดอื่นๆ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเกิดการออกซิเดชันของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลกับสารฮาโลเอซีโตนไไตรล์ โดยสารอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เติมเข้าไปในระบบ

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ในการสลายไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์ด้วยกระบวนการต่างๆ

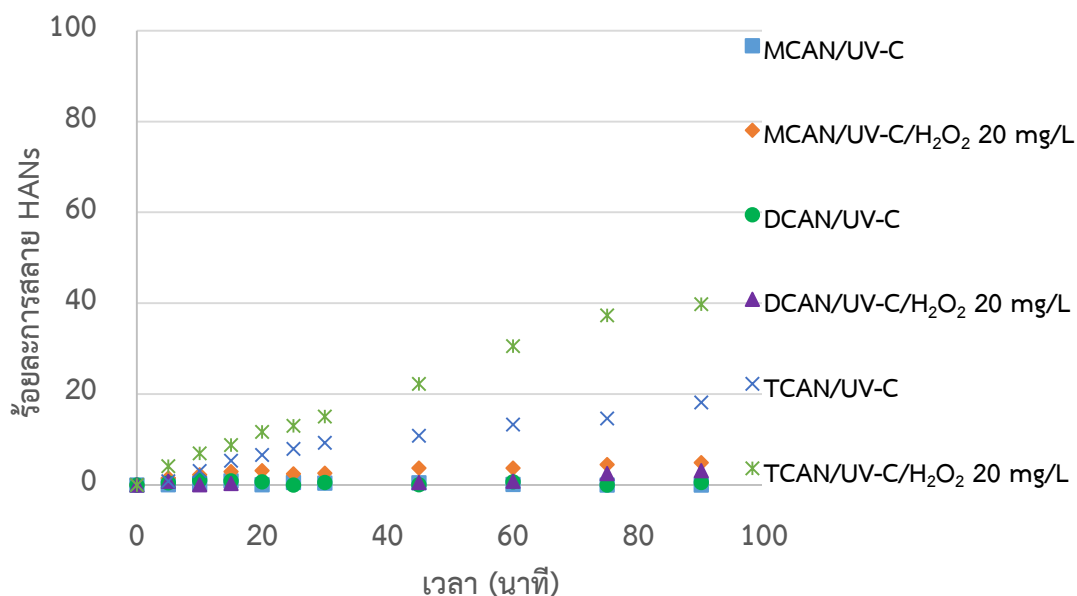
กระบวนการที่ใช้	ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง(k) (ต่อนาที)	R ²
UV-C	0.0019	0.8648
UV-C/H ₂ O ₂	0.0063	0.9881
VUV	0.1142	0.9967
VUV/H ₂ O ₂	0.1473	0.9944

ทั้งนี้ผลของการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าการสลายด้วยไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าการสลายด้วยไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมาในหัวข้อ 4.1.3 เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) เป็นช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับการสลายพันธะของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมากกว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี จึงทำให้ประสิทธิภาพในการสลายไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์เพิ่มมากขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลด้วย

4.4.4 ผลการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ (HANS) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

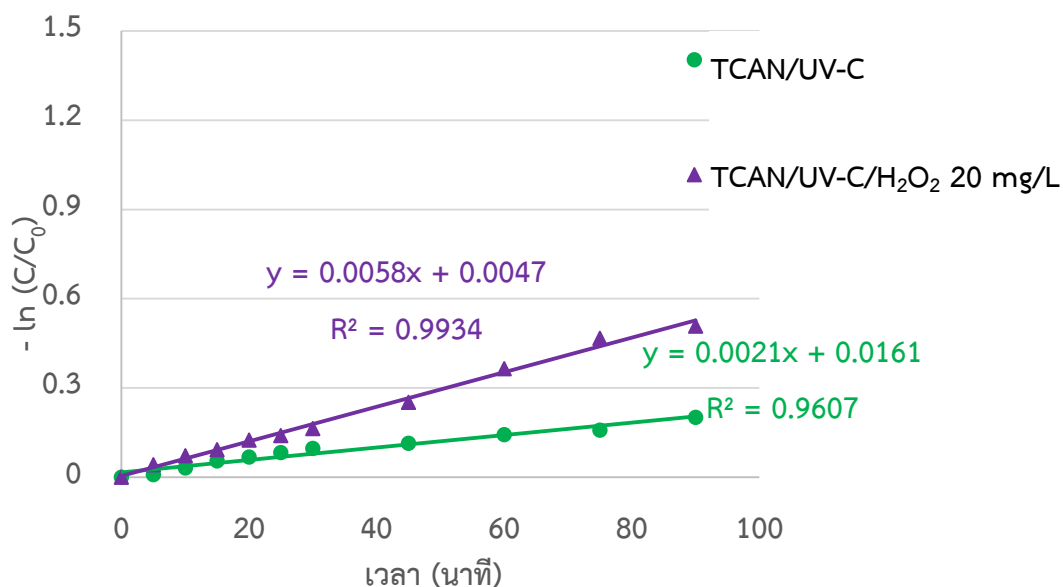
4.4.4.1 แสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี

ผลของการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ (HANS) แบบผสมด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฮาโลเอซีไตนไตรล์แบบผสมทั้งสามชนิดได้แก่ โมโนคลอโรเอซีไตนไตรล์ (MCAN) ไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ (DCAN) และไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์แต่ละชนิดเป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) ให้ร้อยละการสลายดังแสดงในภาพที่ 4.26 และภาคผนวก ค.36 ถึงภาคผนวก ค.39



ภาพที่ 4.26 ร้อยละการสลายฮาโลแอกซีไตนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในการทดลองด้วย UV-C และ UV-C/H₂O₂

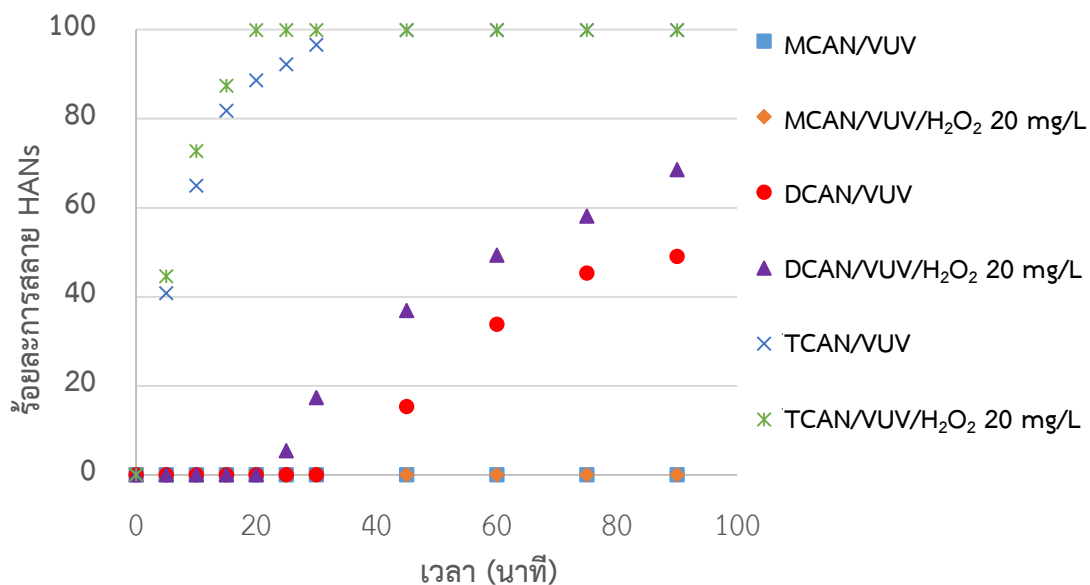
ผลการทดลองใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 90 นาที ปรากฏว่าความเข้มข้นของโมโนคลอโรแอกซีไตนไตรล์และไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ความเข้มข้นของไตรคลอโรแอกซีไตนไตรล์ลดลง โดยไตรคลอโรแอกซีไตนไตรล์ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) ลดลงร้อยละ 39.84 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 18.21 ที่เกิดจากการสลายด้วย UV-C เพียงอย่างเดียว สำหรับการสลายฮาโลแอกซีไตนไตรล์แบบผสมด้วยแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะให้ผลสอดคล้องกับการสลายฮาโลแอกซีไตนไตรล์แต่ละชนิดด้วยแสงอัลตราไวโอเลต โดยเฉพาะไตรคลอโรแอกซีไตนไตรล์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.27 และภาคผนวก ง.12 โดยค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งของการสลายไตรคลอโรแอกซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) คือ 0.0021 ต่อ นาที และการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) คือ 0.0058 ต่อ นาที ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับการสลายไตรคลอโรแอกซีไตนไตรล์เดี่ยวๆด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂) แสดงว่าการสลายฮาโลแอกซีไตนไตรล์แบบผสมจะไม่ส่งผลต่อการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂)



ภาพที่ 4.27 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ด้วย UV-C/H₂O₂

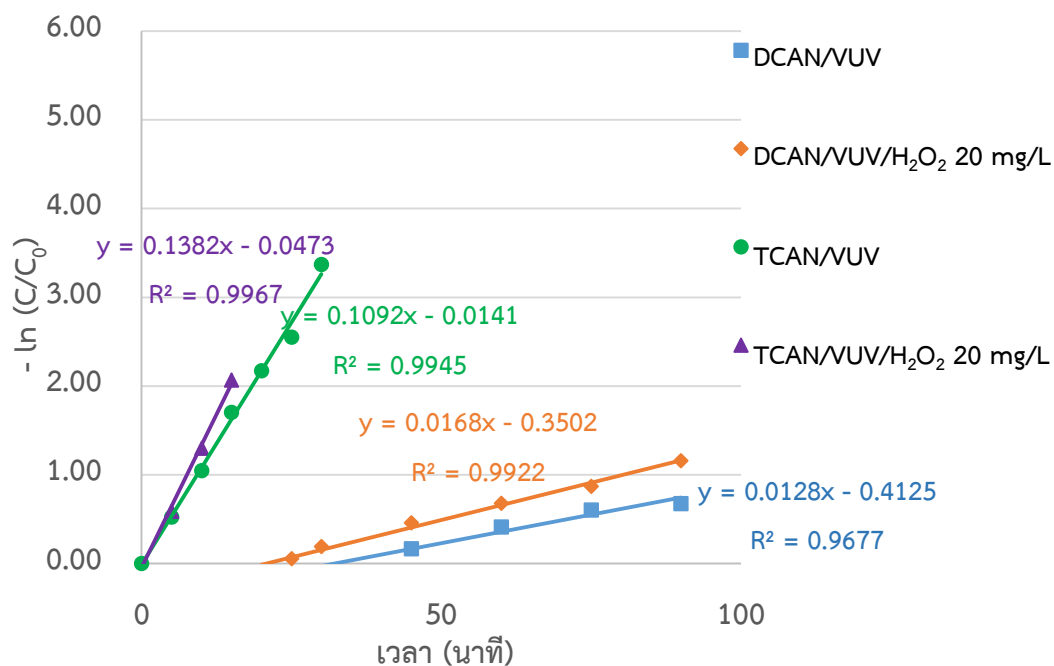
4.4.4.2 แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศ (VUV)

ผลของการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ (HANS) แบบผสมด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฮาโลเอซีไตนไตรล์แบบผสมทั้งสามชนิดได้แก่ โมโนคลอโรเอซีไตนไตรล์ (MCAN) ไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ (DCAN) และไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์แต่ละชนิดเป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศ (VUV) โดยผลของการสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.28 และภาคผนวก ค.40 ถึงภาคผนวก ค.43



ภาพที่ 4.28 ร้อยละการสลายฮาโลแอซิโตไนไตรล์กับเวลาที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในการทดลองด้วย VUV และ VUV/H₂O₂

ผลของการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) และการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) สลายฮาโลแอซิโตไนไตรล์แบบผสม ที่เวลา 90 นาที สำหรับโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์พบว่าไม่เกิดการสลาย สำหรับไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์พบว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) ทำให้ความเข้มข้นลดลงร้อยละ 49.03 และการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) ทำให้ความเข้มข้นของไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ลดลงร้อยละ 68.57 และสำหรับไตรคลอโรแอซิโตไนไตรล์ทั้งสองกระบวนการสามารถสลายไตรคลอโรแอซิโตไนไตรล์ให้ลดลงเหลือต่ำกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยที่การใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) จะใช้เวลา 20 นาทีซึ่งเร็วกว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) ใช้เวลา 45 นาที ซึ่งผลของความเข้มข้นของการสลายฮาโลแอซิโตไนไตรล์แบบผสมนี้จะให้ผลใกล้เคียงกับการสลายฮาโลแอซิโตไนไตรล์ทีละชนิด



ภาพที่ 4.29 กราฟ $-\ln(C/C_0)$ เทียบกับเวลา เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์ด้วย VUV/H₂O₂

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (k) ในการสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์แบบผสมด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศ (VUV) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂)

ชนิดของฮาโลแอซีโตไนไตรล์	กระบวนการที่ใช้	ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง(k) (ต่อนาที)	R ²
DCAN	VUV	0.0128	0.9677
	VUV/H ₂ O ₂	0.0168	0.9922
TCAN	VUV	0.1092	0.9945
	VUV/H ₂ O ₂	0.1382	0.9967

ผลของการสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์แบบผสมด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศ (VUV) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) จะให้ผลสอดคล้องกับการสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์แบบเดี่ยวๆ โดยพบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.29 ภาคผนวก ง.12 และภาคผนวก ง.13 และตารางที่ 4.8 แสดง

ค่าคงที่ปฏิกิริยา ซึ่งการสลายฮาโลเอซีไตโนไตรล์แบบผสมให้ผลใกล้เคียงกับการสลายฮาโลเอซีไตโนไตรล์แบบเดี่ยวๆ

ทั้งนี้การใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและทำให้เกิดสลายฮาโลเอซีไตโนไตรล์ได้เร็วยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมา (Tuhkanen, 2004) สำหรับการใส่แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเป็นการเพิ่มอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล นำไปสู่การออกซิเดชันสารมลพิษเพิ่มอีกขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการสลายสารมลพิษเพิ่มขึ้น และเกิดได้เร็วกว่าการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตเพียงอย่างเดียว

4.5 วิจัยผลของการสลายฮาโลเอซีไตโนไตรล์

จากงานวิจัยที่ของ Chen และคณะ (2010) ได้ทำการสลายไดคลอโรเอซีไตโนไตรล์ด้วยแสงอาทิตย์ ทำการสลายเป็นเวลา 6 ถึง 8 ชั่วโมงสามารถสลายได้ร้อยละ 46 และค่าคงที่ปฏิกิริยาเป็น 1.05×10^{-3} ต่อนาที ทั้งนี้มีงานวิจัยประยุกต์การสลายไดคลอโรเอซีไตโนไตรล์ด้วยแสงอาทิตย์ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Solar-photocatalysis, UV_{solar}/TiO₂) พบว่าสามารถสลายไดคลอโรเอซีไตโนไตรล์ลดลงร้อยละ 20 หลังจากบำบัดด้วย UV_{solar}/TiO₂ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.98×10^{-3} ต่อนาที เปรียบเทียบกับกระบวนการใช้โอโซนพบว่า สามารถกำจัดไดคลอโรเอซีไตโนไตรล์ได้ร้อยละ 40 ในเวลา 4 ชั่วโมง และมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 1.9×10^{-3} ต่อนาที (Shin และคณะ, 2013) Hansen และคณะ (2013) ได้ศึกษาการสลายไดคลอโรเอซีไตโนไตรล์และไตรคลอโรเอซีไตโนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตที่เป็น Medium pressure Ultraviolet (MP) ได้ร้อยละในการสลายต่อวันเป็น 29 และ 84 และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.200 ± 0.021 และ 0.130 ± 0.021 ต่อนาที ตามลำดับ จากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมานี้ พบว่าให้ร้อยละในการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศ (VUV) และการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในการทดลองนี้ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าและเร็วกว่า โดยร้อยละการสลายไดคลอโรเอซีไตโนไตรล์เป็น 70.21 และมากกว่า 96.57 ในเวลา 90 นาที ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายเป็น 0.0193 และ 0.0452 ต่อนาที ตามลำดับ ทั้งนี้ได้มีการทดลองเพิ่มพบว่าแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศ (VUV) สามารถสลายไดคลอโรเอซีไตโนไตรล์ได้หมดภายในเวลา 5 ถึง 6 ชั่วโมง แต่สำหรับการสลายไดคลอโรเอซีไตโนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) ใช้เวลา 10 ชั่วโมงจะมีร้อยละการสลายเป็น 19.47 และสำหรับการสลายไตรคลอโรเอซีไตโนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศ (VUV) และการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ได้

ร้อยละการสลายไตรคลอโรเอซิโตไนโตรล์มากกว่า 99.90 ที่เวลา 45 และ 20 นาที และค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายเป็น 0.1142 และ 0.1473 ต่อนาที ตามลำดับ

ทั้งนี้จากผลการทดลองที่ผ่านมา พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/H₂O₂) สำหรับการใส่แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/H₂O₂) จะทำให้ประสิทธิภาพในการสลายเพิ่มขึ้นจากเดิมมาก เนื่องจากอิทธิพลของกระบวนการออกซิเดชันที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นกลไกที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/H₂O₂) จะเป็นกลไกการสลายสารมลพิษโดยตรง (Direct photolysis) และกลไกการออกซิเดชัน (Oxidation process) ที่เพิ่มขึ้นด้วย



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลของการเกิดการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล

5.1.1.1 แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)

ผลของการศึกษาปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระด้วยกรดคลอโรเบนอิก (pCBA) โดยการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) พบว่าไม่มีการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล แต่เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะทำให้ปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น โดยให้ค่าคงที่ปฏิกิริยาในการเกิดอนุมูลอิสระอยู่ในช่วง 0.0012 ถึง 0.0020 ต่อนาที และปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล จะอยู่ในช่วง 3.60×10^{-13} ถึง 6.00×10^{-13} โมลนาที่ต่อลิตร

5.1.1.2 แสงอัลตราไวโอเลตสุญญากาศ (VUV)

สำหรับผลของการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) พบว่าเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล 3.90×10^{-13} โมลนาที่ต่อลิตร และค่าคงที่ปฏิกิริยาเป็น 0.0402 ต่อนาที เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะให้ผลเช่นเดียวกับการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) โดยมีปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเกิดมากขึ้นด้วย อยู่ในช่วง 6.95×10^{-12} ถึง 1.34×10^{-12} โมลนาที่ต่อลิตร และให้ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเป็น 0.1084 ถึง 0.4421 ต่อนาที

5.1.2 ผลของการทดลองในชุดควบคุม

จากการทดลองสลายฮาโลแอกซีโตไนไตรล์ ในสภาวะที่ไม่มีการฉายแสงอัลตราไวโอเลต เมื่อผ่านเวลา 90 นาที ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น แสดงว่าไม่เกิดการสลายฮาโลแอกซีโตไนไตรล์

5.1.3 ผลของการเปรียบเทียบการสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดต่างๆ

5.1.3.1 โมโนคลอโรแอซีไตนไตรล์

สำหรับการสลายโมโนคลอโรแอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเลตสุญญากาศ (VUV) จะให้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก โดยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีจะไม่เกิดการสลายโมโนคลอโรแอซีไตนไตรล์ แต่แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) จะสามารถสลายโมโนคลอโรแอซีไตนไตรล์ได้เล็กน้อย ได้ร้อยละการสลายโมโนคลอโรแอซีไตนไตรล์เป็น 4.62 และค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเป็น 0.0005 ต่อนาที

5.1.3.2 ไคคลอโรแอซีไตนไตรล์

ผลของการสลายไคคลอโรแอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเลตสุญญากาศ (VUV) จะให้คล้ายกับการสลายโมโนคลอโรแอซีไตนไตรล์ โดยที่แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) จะไม่เกิดการสลายไคคลอโรแอซีไตนไตรล์ แต่แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) จะสามารถสลายไคคลอโรแอซีไตนไตรล์ได้ร้อยละการสลายไคคลอโรแอซีไตนไตรล์เป็น 70.21 และค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเป็น 0.0193 ต่อนาที ซึ่งสลายได้ดีกว่าโมโนคลอโรแอซีไตนไตรล์

5.1.3.3 ไตรคลอโรแอซีไตนไตรล์

ผลของการสลายไตรคลอโรแอซีไตนไตรล์ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเลตสุญญากาศ (VUV) ได้ร้อยละการสลายไตรคลอโรแอซีไตนไตรล์เป็น 16.54 และมากกว่า 99.90 (45 นาที) ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเป็น 0.0019 และ 0.1142 ต่อนาที ซึ่งการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) สามารถสลายได้ดีกว่าแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)

5.1.3.4 ฮาโลแอซีไตนไตรล์

สำหรับผลของการสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์แบบผสมด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเลตสุญญากาศ (VUV) จะให้ผลสอดคล้องกับการสลายฮาโลแอซีไตนไตรล์แบบทีละชนิด โดยไม่สามารถสลายโมโนคลอโรแอซีไตนไตรล์ได้ แต่สามารถสลายไคคลอโรแอซี

ไต่ไนโตรสและไตรคลอโรเอซีไต่ไนโตรสได้ใกล้เคียงกับการสลายเพียงชนิดเดียว และการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) สามารถสลายได้ดีกว่าแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) ทั้งนี้ร้อยละการสลายฮาโลเอซีไต่ไนโตรสจะอยู่ในช่วง 18.21 ถึงมากกว่า 99.90 (45 นาที) ค่าคงที่ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งเป็น 0.0021 และ 0.1092 ต่อนาที ทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าและเร็วกว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และยังสามารถสรุปได้ว่าสารฮาโลเอซีไต่ไนโตรสที่มีหมู่ฮาโลเจนมากจะสามารถสลายได้ดีกว่าสารที่มีหมู่ฮาโลเจนต่ำกว่า

5.1.4 ผลของการศึกษากลไกหลักของการสลายฮาโลเอซีไต่ไนโตรส

สำหรับการศึกษากลไกหลักของการสลายฮาโลเอซีไต่ไนโตรสด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) โดยการเติมเทอร์เชียรีบิวทิลแอลกอฮอล์ 10 มิลลิโมลต่อลิตร ทั้งการสลายไตรคลอโรเอซีไต่ไนโตรส และฮาโลเอซีไต่ไนโตรสพบว่ากลไกหลักทั้งหมดเป็นการสลายสารมลพิษโดยตรง (Direct Photolysis)

5.1.5 ผลของการสลายฮาโรเอซีไต่ไนโตรสด้วยแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

5.1.5.1 ผลของความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ร่วมกับการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลต

สำหรับการศึกษาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะใช้การสลายไตรคลอโรเอซีไต่ไนโตรสเป็นตัวแทนในการศึกษา โดยพบว่าถ้าเพิ่มความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้ประสิทธิภาพในการสลายดีขึ้นและเร็วขึ้นด้วย โดยในการทดลองนี้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ดีที่สุดคือ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (สำหรับช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทั้งการใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และใช้แสงอัลตราไวโอเลตสุญญากาศ (VUV)

5.1.5.2 ผลของการสลายฮาโลเอซีไต่ไนโตรสด้วยแสงอัลตราไวโอเลตกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สำหรับการสลายฮาโลเอซีไต่ไนโตรสด้วยแสงอัลตราไวโอเลตกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเพิ่มร้อยละการสลายของไตรคลอโรเอซีไต่ไนโตรสได้ ทั้งแบบชนิดเดียวและ

แบบผสม โดยใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร้อยละการสลายไตรคลอโรเอซิโตไนไตรล์จะเพิ่มจาก 16.45 เป็น 40.84 และค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายจาก 0.0019 เป็น 0.0063 ต่อนาที และใช้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะสามารถสลายหมดได้เร็วยิ่งขึ้นจาก 45 นาทีเป็น 20 นาที และค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายจาก 0.1142 เป็น 0.1473 ต่อนาที และที่เวลา 90 นาที ร้อยละการสลายไตรคลอโรเอซิโตไนไตรล์จะเพิ่มจาก 70.21 เป็น 96.57 และค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายจาก 0.0193 เป็น 0.0452 ต่อนาที และร้อยละการสลายโมโนคลอโรเอซิโตไนไตรล์จะเพิ่มจาก 4.62 เป็น 19.13 และค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลายจาก 0.0005 เป็น 0.0020 ต่อนาที ทั้งนี้จะให้ผลใกล้เคียงกันกับการทดลองสลายฮาโลเอซิโตไนไตรล์แบบผสมด้วย ทั้งนี้กลไกหลักสำหรับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเป็นสลายด้วยแสงโดยตรง (Direct Photolysis) และกลไกออกซิเดชัน (Oxidation) มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 เนื่องจากการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) ให้ผลที่ไม่ดีมากนักทั้งนี้อาจเป็นเพราะกำลังไฟที่ใช้ในการทดลองนี้มีกำลังต่ำ หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพอาจต้องเลือกแสงอัลตราไวโอเลตที่มีกำลังสูงกว่า 15 วัตต์
- 5.2.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลาย สามารถทำได้โดยเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ ทั้งนี้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นจะต้องเหมาะสมไม่มากเกินไปจนกลายเป็นตัวขัดขวางการออกซิเดชันได้
- 5.2.3 สำหรับความเข้มข้นฮาโลเอซิโตไนไตรล์ในน้ำประปา และน้ำดื่ม สำหรับประเทศไทย ยังไม่มีการรายงานที่แน่ชัด จึงควรมีการตรวจวัด จัดทำ และกำหนดเป็นมาตรฐานในการรับเข้าสู่ร่างกาย
- 5.2.4 เพื่อนำกระบวนการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตไปประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงควรออกแบบถึงปฏิกิริยาแบบไหลผ่านต่อเนื่อง
- 5.2.5 สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการผลิตน้ำประปา สามารถนำไปประยุกต์ใช้โดยติดตั้งระบบใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หลังจากผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน จะทำให้สามารถกำจัดสารฮาโลเอซิโตไนไตรล์ก่อนออกสู่ระบบส่งจ่ายน้ำต่อไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

แสวง เกิดประทุม. แสงอัลตราไวโอเล็ต. [ออนไลน์]. 2552, แหล่งที่มา:

<http://203.151.206.68/ed/images/stories/engineer/article/UVlight.pdf>. [15 พ.ย. 2556].

กมลวรรณ ปรีชาวนา, 2547. ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อในระบบผลิตน้ำประปาด้วยโอโซนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต. สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กรมควบคุมมลพิษ. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์(MSDS). [ออนไลน์]. 2556, แหล่งที่มา:

<http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?VID=451#อันตรายต่อสุขภาพอนามัย> (Health Effect) [25 พ.ย. 2556].

กัตตินาฏ สุกุสวัตติพันธ์, 2555. การย่อยสลาย 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

การประปานครหลวง. การฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่มด้วยคลอรีน. [ออนไลน์]. 2557, แหล่งที่มา:

http://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=440. [3 พ.ค. 2548].

ชุติมา กัลยาประสิทธิ์, 2551. ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของมิโซพอร์สซิลิเกตต่อการดูดซับกรดฮาลออะซีติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธีรวิทย์ สว่างปัญญากร. กระบวนการออกซิเดชัน. [ออนไลน์]. 2547, แหล่งที่มา:

<http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning47/EA443/room/chap3/chap35.asp>. [15 พ.ย. 2556].

บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล. ความเสี่ยงของสารก่อมะเร็งในน้ำประปา. [ออนไลน์]. 2556, แหล่งที่มา:

<https://sites.google.com/a/thankfilter.com/thank-filter/bthkhwam/sarkxmarengninaprapa>. [15 พ.ย. 2556].

ปรีศนี เจริญสิน, 2549. การกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและไทเทเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พนิดา ปรรำรัตน์, 2554. การกำจัดสารฮาโลเอซีโตไนด์ในไตรสโดยการดูดซับบนวัสดุมีรูพรุนอนินทรีย์ที่ดัดแปร. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิมลทิพย์ ชุณหพิมล, 2556. การย่อยสลาย 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรนโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงยูวีซีและยูวีในช่วงสุญญากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันสิน ตันตุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมประปา. กรุงเทพฯ.: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อาทิตย์พันธุ์ สัยยะนิจู, 2547. การลดความเป็นพิษของน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยกระบวนการอัลตราไวโอเล็ต/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ภาษาอังกฤษ

- Bichsel, Y. and Von Gunten, U. 2000. Formation of iodo-trihalomethanes during disinfection and oxidation of iodide-containing waters. Environmental science & technology 34(13): 2784-2791.
- Chellam, S., Sharma, R. R., Shetty, G. R. , and Wei, Y. 2008. Nanofiltration of pretreated Lake Houston water: Disinfection by-product speciation, relationships, and control. Separation and Purification Technology 64(2): 160-169.
- Chen, B., Lee, W., Westerhoff, P. K., Krasner, S. W. , and Herckes, P. 2010. Solar photolysis kinetics of disinfection byproducts. Water research 44(11): 3401-3409.
- Clearsynth. Material Safety Data Sheet. [Online]. 2013, Available: <http://www.clearsynth.com/docs/MSD-CS-PD-00603.pdf>.
- Corin, N., Backlund, P. , and Kulovaara, M. 1996. Degradation products formed during UV-irradiation of humic waters. Chemosphere 33(2): 245-255.
- Daniel, F., Schenck, K., Mattox, J., Lin, E., Haas, D. , and Pereira, M. 1986. Genotoxic properties of haloacetonitriles: drinking water by-products of chlorine disinfection. Toxicological Sciences 6(3): 447-453.
- Ghauch, A. and Tuqan, A. M. 2012. Oxidation of bisoprolol in heated persulfate/H₂O systems: kinetics and products. Chemical Engineering Journal 183: 162-171.

Glezer, V., Harris, B., Tal, N., Iosefzon, B. , and Lev, O. 1999. Hydrolysis of haloacetonitriles: linear free energy relationship, kinetics and products. Water research 33(8): 1938-1948.

Hansen, K. M., Zortea, R., Piketty, A., Vega, S. R. , and Andersen, H. R. 2013. Photolytic removal of DBPs by medium pressure UV in swimming pool water. Science of the Total Environment 443: 850-856.

Hazime, R., Nguyen, Q., Ferronato, C., Salvador, A., Jaber, F. , and Chovelon, J.-M. 2014. Comparative study of imazalil degradation in three systems: UV/TiO₂, UV/K₂S₂O₈ and UV/TiO₂/K₂S₂O₈. Applied Catalysis B: Environmental 144: 286-291.

Imoberdorf, G. and Mohseni, M. 2011. Degradation of natural organic matter in surface water using vacuum-UV irradiation. Journal of hazardous materials 186(1): 240-246.

Jo, C. H., Dietrich, A. M. , and Tanko, J. M. 2011. Simultaneous degradation of disinfection byproducts and earthy-musty odorants by the UV/H₂O₂ advanced oxidation process. Water research 45(8): 2507-2516.


Lee, W., Westerhoff, P. , and Croué, J.-P. 2007. Dissolved organic nitrogen as a precursor for chloroform, dichloroacetonitrile, N-nitrosodimethylamine, and trichloronitromethane. Environmental science & technology 41(15): 5485-5490.

Lekkas, T. D. and Nikolaou, A. D. 2004. Degradation of disinfection byproducts in drinking water. Environmental engineering science 21(4): 493-506.

- Maniero, M. G., Bila, D. M. , and Dezotti, M. 2008. Degradation and estrogenic activity removal of 17 β -estradiol and 17 α -ethinylestradiol by ozonation and O₃/H₂O₂. Science of the Total Environment 407(1): 105-115.
- Oliver, B. G. 1983. Dihaloacetonitriles in drinking water: algae and fulvic acid as precursors. Environmental science & technology 17(2): 80-83.
- Parkinson, A., Barry, M. J., Roddick, F. A. , and Hobday, M. D. 2001. Preliminary toxicity assessment of water after treatment with UV-irradiation and UV-C/H₂O₂. Water research 35(15): 3656-3664.
- Parsons, S. 2004. Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. IWA publishing. Alliance House, 12 Caxton Street, London, UK. 7-49
- Penru, Y., Guastalli, A. R., Esplugas, S. , and Baig, S. 2012. Application of UV and UV/H₂O₂ to seawater: disinfection and natural organic matter removal. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 233: 40-45.
- Plewa, M. J., Wagner, E. D., Muellner, M. G., Hsu, K.-M. , and Richardson, S. D. 2008. Comparative mammalian cell toxicity of N-DBPs and C-DBPs. Urbana 51: 61801.
- Pontius, F. 2003. Drinking water regulation and health. John Wiley & Sons. Cincinnati, OHIO.
- Prarat, P., Ngamcharussrivichai, C., Khaodhiar, S. , and Punyapalukul, P. 2011. Adsorption characteristics of haloacetonitriles on functionalized silica-based porous materials in aqueous solution. Journal of hazardous materials 192(3): 1210-1218.

- Ratpukdi, T., Siripattanakul, S. , and Khan, E. 2010. Mineralization and biodegradability enhancement of natural organic matter by ozone–VUV in comparison with ozone, VUV, ozone–UV, and UV: Effects of pH and ozone dose. Water research 44(11): 3531-3543.
- Richardson, S. D. 2003. Disinfection by-products and other emerging contaminants in drinking water. TrAC Trends in Analytical Chemistry 22(10): 666-684.
- Rosenfeldt, E. J., Linden, K. G., Canonica, S. , and Von Gunten, U. 2006. Comparison of the efficiency of OH radical formation during ozonation and the advanced oxidation processes O₃/H₂O₂ and UV/H₂O₂. Water research 40(20): 3695-3704.
- Shin, D., Jang, M., Cui, M., Na, S. , and Khim, J. 2013. Enhanced removal of dichloroacetonitrile from drinking water by the combination of solar-photocatalysis and ozonation. Chemosphere 93(11): 2901-2908.
- Siddiqui, M. S. and Amy, G. L. 1993. Factors affecting DBP formation during ozone-bromide reactions. Journal-American Water Works Association 85(1): 63-72.
- Smith, M., Randall, J., Stober, J. , and Read, E. 1989. Developmental toxicity of dichloroacetonitrile: a by-product of drinking water disinfection. Toxicological Sciences 12(4): 765-772.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. , and Vigil, S. 1993. Integrated solid waste management: engineering principles and management issues. McGraw-Hill, Inc.
- Tuhkanen, T. 2004. Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. IWA publishing. Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street, London, UK.

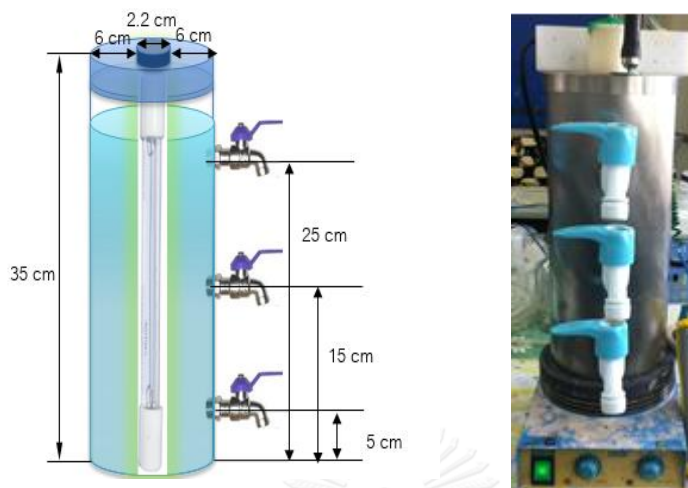
- U.S. Department Health and Human Services. Toxicity Effects. [Online]. 2013, Available: <http://ntp.niehs.nih.gov/?objectid=E8829CFF-BDB5-82F8-F956E643ABC466EF>. [18 Nov 2013].
- Uyak, V., Yavuz, S., Toroz, I., Ozaydin, S. , and Genceli, E. A. 2007. Disinfection by-products precursors removal by enhanced coagulation and PAC adsorption. Desalination 216(1): 334-344.
- Wang, F., Ruan, M., Lin, H., Zhang, Y., Hong, H. , and Zhou, X. 2014. Effects of ozone pretreatment on the formation of disinfection by-products and its associated bromine substitution factors upon chlorination/chloramination of Tai Lake water. Science of the Total Environment 475: 23-28.
- World Health Organization, 2012. Guidelines for drinking-water quality fourth edition. Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland: 375-377.
- Zhou, C., Gao, N., Deng, Y., Chu, W., Rong, W. , and Zhou, S. 2012. Factors affecting ultraviolet irradiation/hydrogen peroxide (UV/H₂O₂) degradation of mixed N-nitrosamines in water. Journal of hazardous materials 231: 43-48.



ภาคผนวก ก
การคำนวณถึงปฏิกรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. การคำนวณถังปฏิกรณ์



ภาพที่ ก.1 ถังปฏิกรณ์แบบทีละเท

ขนาดหลอดจริง

เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร และยาว 30.3 เซนติเมตร

ลักษณะและขนาดของถังปฏิกรณ์

เป็นทรงกระบอก 2 ชั้น

ชั้นใน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร

ชั้นนอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.2 เซนติเมตร สูง 35 เซนติเมตร

ความสูงน้ำ

ปริมาตรน้ำ 5 ลิตร(กำหนดให้ 1 ลิตร = 1,000 มิลลิลิตร)

สูตรการหาปริมาตรทรงกระบอก

$$\text{ปริมาตรทรงกระบอก} = \pi \times \text{รัศมี}^2 \times \text{สูง}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรทรงกระบอก 2 ชั้น} &= (\pi \times \text{รัศมีภายนอก}^2 \times \text{สูง}) - (\pi \times \text{รัศมีภายใน}^2 \times \text{สูง}) \\ &= \pi \times \text{สูง} \times (\text{รัศมีวงนอก}^2 - \text{รัศมีวงใน}^2) \end{aligned}$$


ปริมาตรน้ำ 5000 มิลลิตร จะได้

$$5000 \text{ มิลลิตร} = \pi \times \text{สูง} \times (7^2 - 1^2)$$

$$\text{ความสูง} = 33.16 \text{ เซนติเมตร}$$

ดังนั้น ความสูงน้ำ 33.16 เซนติเมตร เมื่อให้ปริมาตรน้ำเป็น 5 ลิตร





ภาคผนวก ข
ผลความเข้มข้นของกรดพาราคลอโรเบนโซอิก
ในการหาปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล
และการคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยา
สำหรับกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.1 ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น กรดพาราคลอโรเบนโซอิก			ความเข้มข้น เฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
			0	5.6	26			
5	5.5	26	5.02	5.01	4.92	4.98	0.06	
10	5.5	26	5.01	4.98	4.91	4.97	0.05	
15	5.5	26	5.00	4.97	4.90	4.96	0.05	
20	5.5	26	5.00	4.96	4.91	4.96	0.05	
25	5.5	26	5.01	4.96	4.90	4.96	0.06	
30	5.5	26	4.99	4.98	4.92	4.96	0.04	
45	5.5	26	5.01	4.97	4.92	4.97	0.05	
60	5.5	26	4.98	4.96	4.91	4.95	0.04	
75	5.5	26	4.97	4.96	4.90	4.94	0.04	
90	5.4	26	4.98	4.95	4.90	4.94	0.04	

ตารางที่ ข.2 ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น กรดพาราคลอโรเบนโซอิก			ความเข้มข้น เฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
			0	5.6	26			
5	5.5	26	4.96	5.00	4.93	4.96	0.04	
10	5.5	26	4.96	4.98	4.92	4.95	0.03	
15	5.5	26	4.97	4.98	4.91	4.95	0.04	
20	5.5	26	4.95	4.97	4.92	4.95	0.03	
25	5.5	26	4.96	4.97	4.91	4.95	0.03	
30	5.5	26	4.95	4.96	4.93	4.95	0.02	
45	5.5	26	4.96	4.96	4.93	4.95	0.02	
60	5.5	26	4.97	4.96	4.91	4.95	0.03	
75	5.5	26	4.97	4.97	4.92	4.95	0.03	
90	5.4	26	4.96	4.97	4.91	4.95	0.03	

ตารางที่ ข.3 ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น กรดพาราคลอโรเบนโซอิกเฉลี่ย (ไมโครกรัมต่อลิตร)	C_0 (ไมโครกรัมต่อลิตร)	$-\ln(C/C_0)$ (ต่อนาที)	หมายเหตุ
0	4.99	4.99	0	
5	4.00	4.99	0.2211	
10	3.16	4.99	0.4569	
15	2.65	4.99	0.6329	
20	2.15	4.99	0.8420	
25	1.78	4.99	1.0308	
30	1.39	4.99	1.2781	
45	0.83	4.99	1.7938	
60	0.42	4.99	2.4749	
75	0.22	4.99	3.1216	
90	0.14	4.99	3.5735	

ตารางที่ ข.4 ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น กรดพาราคลอโรเบนโซอิกเฉลี่ย (ไมโครกรัมต่อลิตร)	C_0 (ไมโครกรัมต่อลิตร)	$-\ln(C/C_0)$ (ต่อนาที)	หมายเหตุ
0	5.00	5.00	0	
5	3.96	5.00	0.2332	
10	3.17	5.00	0.4557	
15	2.67	5.00	0.6274	
20	2.16	5.00	0.8393	
25	1.76	5.00	1.0441	
30	1.42	5.00	1.2588	
45	0.83	5.00	1.7958	
60	0.46	5.00	2.3860	
75	0.23	5.00	3.0791	
90	0.16	5.00	3.4420	

ตารางที่ ข.5 ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น กรดพาราคลอโรเบนโซอิกเฉลี่ย (ไมโครกรัมต่อลิตร)	C ₀ (ไมโครกรัมต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	หมายเหตุ
0	5.04	5.04	0	
5	4.78	5.04	0.0530	
10	4.65	5.04	0.0805	
15	4.54	5.04	0.1045	
20	4.48	5.04	0.1178	
25	4.45	5.04	0.1245	
30	4.42	5.04	0.1313	
45	4.40	5.04	0.1358	
60	4.38	5.04	0.1404	
75	4.36	5.04	0.1449	
90	4.32	5.04	0.1542	

ตารางที่ ข.6 ผลของการสลายกรดพาราคลอโรคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้น กรดพาราคลอโรคลอโรเบนโซอิกเฉลี่ย (ไมโครกรัมต่อลิตร)	C ₀ (ไมโครกรัมต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	หมายเหตุ
0	5.10	5.10	0	
5	4.56	5.10	0.1119	
10	4.49	5.10	0.1274	
15	4.45	5.10	0.1363	
20	4.41	5.10	0.1454	
25	4.37	5.10	0.1545	
30	4.32	5.10	0.1660	
45	4.27	5.10	0.1776	
60	4.23	5.10	0.1870	
75	4.17	5.10	0.2013	
90	4.11	5.10	0.2158	

ตารางที่ ข.7 ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นกรดพาราคลอโรเบนโซอิกเฉลี่ย (ไมโครกรัมต่อลิตร)	C ₀ (ไมโครกรัมต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	หมายเหตุ
0	4.97	4.97	0	
5	4.46	4.97	0.1083	
10	4.35	4.97	0.1332	
15	4.27	4.97	0.1518	
20	4.14	4.97	0.1827	
25	4.08	4.97	0.1973	
30	3.98	4.97	0.2221	
45	3.95	4.97	0.2297	
60	3.92	4.97	0.2373	
75	3.91	4.97	0.2399	
90	3.89	4.97	0.2450	

ตารางที่ ข.8 ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดยูวีกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นกรดพาราคลอโรเบนโซอิกเฉลี่ย (ไมโครกรัมต่อลิตร)	C ₀ (ไมโครกรัมต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	หมายเหตุ
0	5.00	5.00	0	
5	2.76	5.00	0.5942	
10	1.66	5.00	1.1026	
15	0.86	5.00	1.7603	
20	0.67	5.00	2.0099	
25	0.35	5.00	2.6593	
30	0.17	5.00	3.3814	
45	N.D.	5.00	-	
60	N.D.	5.00	-	
75	N.D.	5.00	-	
90	N.D.	5.00	-	

*N.D. (Detection limited = 0.05 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ข.9 ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น กรดพาราคลอโรเบนโซอิกเฉลี่ย (ไมโครกรัมต่อลิตร)	C ₀ (ไมโครกรัมต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	หมายเหตุ
0	5.00	5.00	0	
5	1.54	5.00	1.1777	
10	0.63	5.00	2.0715	
15	0.26	5.00	2.9565	
20	0.17	5.00	3.3814	
25	N.D.	5.00	-	
30	N.D.	5.00	-	
45	N.D.	5.00	-	
60	N.D.	5.00	-	
75	N.D.	5.00	-	
90	N.D.	5.00	-	

*N.D. (Detection limited = 0.05 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ข.10 ผลของการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น กรดพาราคลอโรเบนโซอิกเฉลี่ย (ไมโครกรัมต่อลิตร)	C ₀ (ไมโครกรัมต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	หมายเหตุ
0	4.99	4.99	0	
5	0.65	4.99	2.0382	
10	0.06	4.99	4.4208	
15	N.D.	4.99	-	
20	N.D.	4.99	-	
25	N.D.	4.99	-	
30	N.D.	4.99	-	
45	N.D.	4.99	-	
60	N.D.	4.99	-	
75	N.D.	4.99	-	
90	N.D.	4.99	-	

*N.D. (Detection limited = 0.05 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ผลของการคำนวณหาปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจากการสลายกรดพาราคลอโรเบนโซอิก (pCBA) ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเล็ตสูญญากาศ (VUV) กับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂, VUV/H₂O₂) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

$$\text{จากสมการ} \quad \int_0^t [\text{OH}\cdot] dt = \frac{(k_{obs}-k_d)t}{k_{\text{OH}\cdot, \text{pCBA}}}$$

โดยที่	OH•	คือ อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นสำหรับการออกซิเดชัน
	k_{obs}	คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการกำจัดกรดพาราเบนโซอิก (pCBA) (ต่อนาที)
	k_d	คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการกำจัดกรดพาราเบนโซอิก (pCBC) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตโดยตรง (Direct photolysis) (ต่อนาที) โดยที่ UV-C = 0 และ VUV = 0.0389 ต่อนาที
	$k_{\text{OH}\cdot, \text{pCBA}}$	คือ ค่าคงที่ปฏิกิริยาของการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นกับกรดพาราเบนโซอิก $\text{pCBA} = 3 \times 10^{11}$ ลิตรต่อโมลนาที
	t	คือ เวลา (นาที)


ตัวอย่างการคำนวณ

ที่ VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ;

$$\text{OH}\cdot = \frac{(0.4421-0.0389)10}{3 \times 10^{11}} = 1.34 \times 10^{-11} \text{ โมลนาทีต่อลิตร}$$

ตารางที่ ข.11 ผลของการหาปริมาณการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นจากการสลายด้วย
กระบวนการใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/H₂O₂)

แสงอัลตราไวโอเลต	ความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลา (t) (นาที)	k _{obs} (ต่อนาที)	OH• (โมลนาที่ต่อลิตร)
UV-C	0	90	0	0
	5	90	0.0012	3.60×10^{-13}
	10	90	0.0016	4.80×10^{-13}
	20	90	0.0020	6.00×10^{-13}
VUV	0	90	0.0013	3.90×10^{-13}
	5	30	0.0695	6.95×10^{-13}
	10	20	0.1319	8.79×10^{-13}
	20	10	0.4032	1.34×10^{-13}



ภาคผนวก ค
ผลความเข้มข้นและร้อยละของฮาโลแอซิโตไนไตรล์
ในการสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.1 พื้นที่ใต้กราฟที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายมาตรฐานฮาโลเอซีโตไนไตรล์

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ฮาโลเอซีโตไนไตรล์ (ไมโครกรัมต่อลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟ โมนอคลอโรเอซี โตไนไตรล์ (MCAN)	พื้นที่ใต้กราฟ ไดคลอโรเอซี โตไนไตรล์ (DCAN)	พื้นที่ใต้กราฟ ไตรคลอโรเอซี โตไนไตรล์ (TCAN)
0.1	33.6	108.9	136.5
5	1058	2930	3616
10	2012.5	5779.6	7062.5
25	4941.8	14730.9	18576.8
50	9354.7	27064	36554
75	13898.9	40136.1	52137.6
100	18733.5	51618.3	64738

ตารางที่ ค.2 ร้อยละการนำกลับ

% Recovery			ค่าเฉลี่ย	SD	% RSD
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
93.41	90.76	89.68	91.28	1.9192	2.10

โดย % RSD คือ ค่าความแม่นยำ (Precision) เป็นค่าที่แสดงความสอดคล้องกันของข้อมูลจากการวัดสองครั้งขึ้นไป จากการทดลองแบบเดียวกัน โดยถ้าค่าที่ได้จากการวัดหลายๆครั้งเป็นค่าที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน แสดงว่าการวัดนั้นมีความแน่นอนสูง ซึ่งคำนวณได้จาก

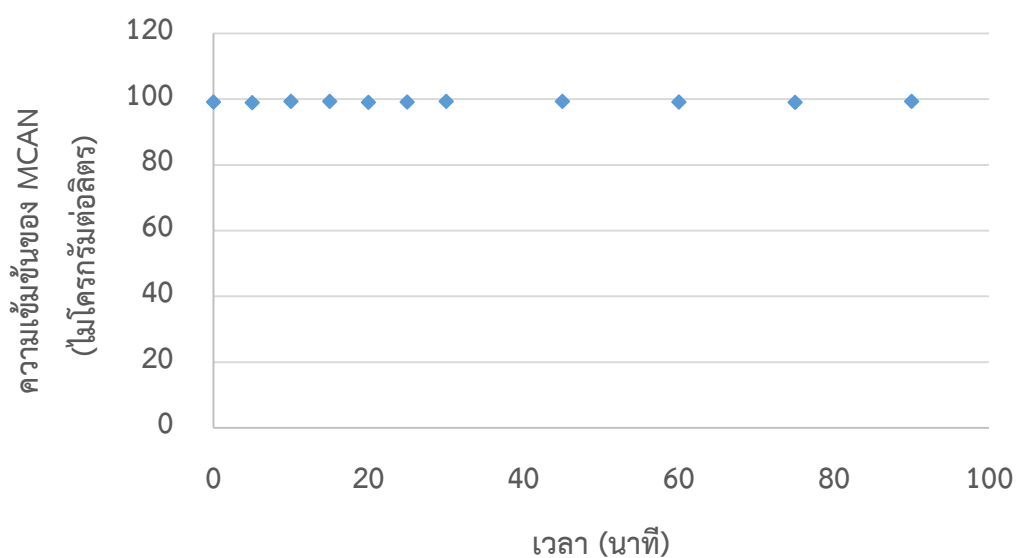
$$\% \text{ RSD} = \frac{\text{SD}}{\bar{X}}$$

โดย SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 \bar{X} คือ ค่าเฉลี่ย

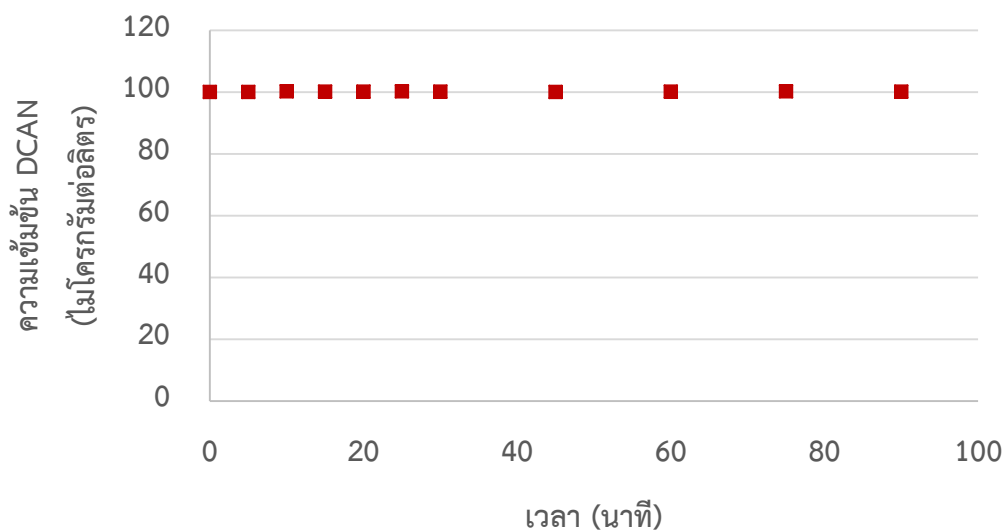
หมายเหตุ ค่า % RSD ยิ่งต่ำยิ่งมีความแม่นยำมาก

ตารางที่ ค.3 ผลความเข้มข้นของฮาโลแอกซีโตไนไตรล์ในชุดควบคุม ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

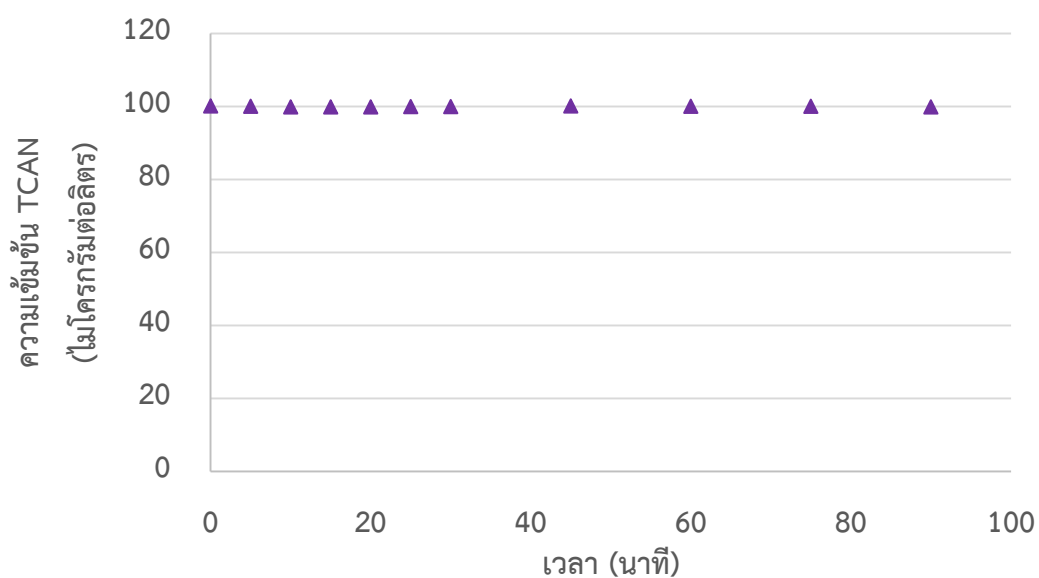
เวลา (นาที)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ฮาโลแอกซีโตไนไตรล์			หมายเหตุ
			MCAN	DCAM	TCAN	
0	5.6	27	99.20	100.10	100.20	
5	5.6	27	99.00	100.10	100.10	
10	5.6	27	99.30	100.30	99.90	
15	5.6	27	99.30	100.20	99.90	
20	5.6	27	99.10	100.20	99.90	
25	5.6	27	99.20	100.30	100.00	
30	5.6	27	99.30	100.20	100.00	
45	5.6	27	99.30	100.10	100.20	
60	5.6	27	99.20	100.20	100.10	
75	5.6	27	99.10	100.30	100.10	
90	5.6	27	99.30	100.20	99.90	



ภาพที่ ค.1 ความเข้มข้นของโมนอคลอโรแอกซีโตไนไตรล์ (MCAN) เทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการทดลองชุดควบคุม



ภาพที่ ค.2 ความเข้มข้นของไตรคลอโรเอซีโตนไตรล์ (DCAN) เทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการทดลองชุดควบคุม



ภาพที่ ค.3 ความเข้มข้นของไตรคลอโรเอซีโตนไตรล์ (TCAN) เทียบกับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการทดลองชุดควบคุม

ตารางที่ ค.4 ผลของการสลายโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (MCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น โมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์			ความเข้มข้น เฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
			0	5.6	27			
5	5.5	27	98.68	102.05	99.45	100.06	1.77	
10	5.5	27	96.06	101.96	98.55	98.86	2.96	
15	5.5	27	96.18	102.45	97.39	98.67	3.33	
20	5.5	27	98.95	100.98	97.76	99.23	1.63	
25	5.5	27	99.14	100.21	98.64	99.33	0.80	
30	5.5	27	99.01	102.56	98.11	99.89	2.36	
45	5.5	27	98.18	102.45	97.23	99.29	2.78	
60	5.5	27	97.03	100.78	97.09	98.30	2.15	
75	5.5	27	98.80	101.38	98.27	99.48	1.66	
90	5.4	27	99.60	101.97	98.82	100.13	1.64	

ตารางที่ ค.5 ผลของการสลายโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (MCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น โมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์			ความเข้มข้น เฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
			0	5.6	27			
5	5.5	27	98.53	97.34	101.47	99.11	2.13	
10	5.5	27	98.60	97.16	101.78	99.18	2.36	
15	5.5	27	97.44	96.89	101.21	98.51	2.35	
20	5.5	27	97.99	96.02	100.11	98.04	2.05	
25	5.5	27	96.63	96.88	99.66	97.72	1.68	
30	5.5	27	96.03	96.47	99.09	97.20	1.65	
45	5.5	27	96.70	95.35	98.56	96.87	1.61	
60	5.5	27	95.67	95.89	98.60	96.72	1.63	
75	5.5	27	94.96	94.21	97.96	95.71	1.98	
90	5.4	27	93.05	94.67	96.45	94.72	1.70	

ตารางที่ ค.6 ร้อยละของการสลายโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (MCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาทีก)	UV-C		VUV		หมายเหตุ
	ความเข้มข้น โมโนคลอโร แอซิโตไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย โมโนคลอโร แอซิโตไนไตรล์	ความเข้มข้น โมโนคลอโร แอซิโตไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย โมโนคลอโร แอซิโตไนไตรล์	
0	100.20	0	99.31	0	
5	100.06	*	99.11	0.20	
10	98.86	*	99.18	0.13	
15	98.67	*	98.51	0.80	
20	99.23	*	98.04	1.28	
25	99.33	*	97.72	1.60	
30	99.89	*	97.19	2.13	
45	99.29	*	96.87	2.46	
60	98.30	*	96.72	2.61	
75	99.48	*	95.71	3.63	
90	100.13	*	94.72	4.62	

*เนื่องจากการไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่มีการสลาย ได้ค่าร้อยละการสลายเป็น 0

ตารางที่ ค.7 ผลของการสลายไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)

เวลา (นาที)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์			ความเข้มข้น เฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.5	26	98.56	103.56	101.11	101.08	2.50	
5	5.5	26	97.20	102.68	102.45	100.78	3.10	
10	5.5	26	97.74	100.96	102.78	100.49	2.55	
15	5.5	26	96.27	100.42	101.55	99.41	2.78	
20	5.5	26	96.68	99.97	102.48	99.71	2.91	
25	5.5	26	97.79	100.97	101.79	100.18	2.11	
30	5.5	26	96.59	102.35	102.64	100.52	3.41	
45	5.5	26	96.84	101.38	100.86	99.96	2.48	
60	5.5	26	96.80	102.04	101.45	100.01	2.87	
75	5.5	26	97.26	103.64	101.98	100.96	3.31	
90	5.5	26	97.44	103.77	102.46	101.22	3.34	

ตารางที่ ค.8 ผลของการสลายไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาที)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์			ความเข้มข้น เฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	6.3	26	100.70	97.41	104.94	101.02	3.77	
5	6.1	26	100.24	97.17	103.45	100.29	3.14	
10	5.5	26	100.32	96.45	104.02	100.26	3.79	
15	5.2	26	100.83	97.13	104.16	100.71	3.52	
20	5.0	26	100.27	96.66	104.24	100.39	3.79	
25	4.9	26	100.12	97.56	103.37	100.35	2.91	
30	4.7	26	100.50	96.51	103.84	100.28	3.67	
45	4.6	26	74.00	74.76	78.83	75.86	2.60	
60	4.5	27	54.84	57.26	52.70	54.93	2.28	
75	4.4	27	45.22	47.88	45.66	46.25	1.43	
90	4.3	28	30.31	31.11	28.84	30.09	1.15	

ตารางที่ ค.9 ร้อยละของการสลายไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาที)	UV-C		VUV		หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอซิโตไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอซิโตไนไตรล์	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอซิโตไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอซิโตไนไตรล์	
0	101.08	0	101.02	0	
5	100.78	*	100.29	0.72	
10	100.49	*	100.26	0.75	
15	99.41	*	100.71	0.31	
20	99.71	*	100.39	0.62	
25	100.18	*	100.35	0.66	
30	100.52	*	100.28	0.73	
45	99.96	*	75.86	24.91	
60	100.01	*	54.93	45.62	
75	100.96	*	46.25	54.22	
90	101.22	*	30.09	70.21	

*เนื่องจากการไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่มีการสลาย ได้ค่าร้อยละการสลายเป็น 0

ตารางที่ ค.10 ผลของการสลายไตรโคลโรเอซีไตนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไตรโคลโรเอซีไตนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.7	25	97.73	99.45	95.97	97.72	1.74	
5	5.6	25	97.60	96.42	93.78	95.93	1.96	
10	5.6	25	93.72	94.76	90.67	93.05	2.13	
15	5.6	25	92.24	91.02	89.87	91.04	1.19	
20	5.6	25	90.32	89.61	89.22	89.72	0.56	
25	5.6	26	90.05	88.54	87.13	88.57	1.46	
30	5.5	26	86.35	85.98	85.79	86.04	0.28	
45	5.5	26	85.16	84.78	83.12	84.35	1.08	
60	5.5	26	83.81	84.04	81.45	83.10	1.43	
75	5.5	26	83.35	83.11	81.09	82.52	1.24	
90	5.5	26	82.80	81.56	80.32	81.56	1.24	

ตารางที่ ค.11 ผลของการสลายไตรโคลโรเอซีไตนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไตรโคลโรเอซีไตนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.7	25	99.14	102.76	98.78	100.23	2.20	
5	5.2	25	52.22	50.98	51.55	51.58	0.62	
10	5.0	25	30.47	27.17	28.87	28.84	1.65	
15	4.8	25	18.13	16.38	17.88	17.46	0.95	
20	4.8	25	10.49	9.67	11.12	10.43	0.73	
25	4.7	26	6.28	6.07	5.89	6.08	0.20	
30	4.6	26	3.09	2.98	2.45	2.84	0.34	
45	4.3	26	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
60	4.3	26	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
75	4.3	27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
90	4.1	27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

*N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ค.12 ร้อยละของการสลายไตรโคลโรแอกซีไนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาที)	UV-C		VUV		หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไตรโคลโร แอกซีไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไตรโคลโร แอกซีไนไตรล์	ความเข้มข้น ไตรโคลโร แอกซีไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไตรโคลโร แอกซีไนไตรล์	
0	97.72	0	100.23	0	
5	95.93	1.83	51.58	48.54	
10	93.05	4.78	28.84	71.23	
15	91.04	6.84	17.46	82.58	
20	89.72	8.19	10.43	89.59	
25	88.57	9.36	6.08	93.93	
30	86.04	11.95	2.84	97.17	
45	84.35	13.68	N.D.	N.D.	
60	83.10	14.96	N.D.	N.D.	
75	82.52	15.55	N.D.	N.D.	
90	81.56	16.54	N.D.	N.D.	

*N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ค.13 การสลายฮาโลแอกซีไธไนไตรล์แบบผสม โดยผลของโมนอคลอโรแอกซีไธไนไตรล์ (MCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น			ความเข้มข้น เฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			โมนอคลอโรแอกซีไธไนไตรล์					
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.6	26	99.03	102.11	98.95	100.03	1.80	
5	5.5	26	99.46	101.98	98.34	99.93	1.86	
10	5.5	26	98.23	101.76	99.01	99.67	1.85	
15	5.5	26	98.32	100.24	98.78	99.11	1.00	
20	5.5	26	99.54	101.00	99.23	99.92	0.95	
25	5.5	26	99.91	100.42	98.00	99.44	1.28	
30	5.5	26	99.93	100.10	98.78	99.60	0.72	
45	5.5	26	99.97	99.98	98.54	99.50	0.83	
60	5.5	26	100.55	99.87	99.18	99.87	0.69	
75	5.5	26	101.77	100.78	99.92	100.82	0.93	
90	5.4	26	100.52	101.67	99.45	100.55	1.11	

ตารางที่ ค.14 การสลายฮาโลแอกซีไธไนไตรล์แบบผสม โดยผลของไดคลอโรแอกซีไธไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น			ความเข้มข้น เฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ไดคลอโรแอกซีไธไนไตรล์					
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.6	26	102.22	101.17	101.77	101.72	0.53	
5	5.5	26	101.67	100.45	101.44	101.19	0.65	
10	5.5	26	100.75	99.98	101.23	100.65	0.63	
15	5.5	26	101.18	100.78	100.34	100.77	0.42	
20	5.5	26	102.33	100.45	100.29	101.02	1.13	
25	5.5	26	105.57	101.34	101.00	102.64	2.55	
30	5.5	26	101.86	101.05	100.54	101.15	0.67	
45	5.5	26	103.65	100.46	100.78	101.63	1.76	
60	5.5	26	102.03	100.78	100.10	100.97	0.98	
75	5.5	26	103.15	101.67	100.43	101.75	1.36	
90	5.4	26	101.86	100.42	101.23	101.17	0.72	

ตารางที่ ค.15 การสลายฮาโลแอกซีไธโนไตรล์แบบผสม โดยผลของไตรโคลโรแอกซีไธโนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C)

เวลา (นาที)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไตรโคลโรแอกซีไธโนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.6	26	98.52	98.01	99.01	98.51	0.50	
5	5.5	26	97.79	96.43	98.76	97.66	1.17	
10	5.5	26	95.16	94.78	96.32	95.42	0.80	
15	5.5	26	92.89	93.67	93.22	93.26	0.39	
20	5.5	26	91.95	91.89	92.12	91.99	0.12	
25	5.5	26	90.48	91.45	89.98	90.64	0.75	
30	5.5	26	88.95	89.99	89.12	89.35	0.56	
45	5.5	26	87.70	88.8	86.98	87.83	0.92	
60	5.5	26	85.36	84.99	85.78	85.38	0.40	
75	5.5	26	83.08	84.34	84.77	84.06	0.88	
90	5.4	26	80.16	81.32	80.22	80.57	0.65	

ตารางที่ ค.16 ร้อยละของการสลายฮาโลแอกซีไนด์ไตรล์ (HANs) แบบผสม ความเข้มข้นเริ่มต้นของแต่ละชนิด 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C)

เวลา (นาที)	UV-C						หมายเหตุ
	ความเข้มข้น โมนอคลอโร แอกซีไนด์ไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย โมนอคลอโร แอกซีไนด์ไตรล์	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอกซีไนด์ไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอกซีไนด์ไตรล์	ความเข้มข้น ไตรคลอโร แอกซีไนด์ไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไตรคลอโร แอกซีไนด์ไตรล์	
0	100.03	*	101.72	*	98.51	0	
5	99.93	*	101.19	*	97.66	0.86	
10	99.67	*	100.65	*	95.42	3.14	
15	99.11	*	100.77	*	93.26	5.33	
20	99.92	*	101.02	*	91.99	6.62	
25	99.44	*	102.64	*	90.64	7.99	
30	99.60	*	101.15	*	89.35	9.30	
45	99.50	*	101.63	*	87.83	10.84	
60	99.87	*	100.97	*	85.38	13.33	
75	100.82	*	101.75	*	84.06	14.67	
90	100.55	*	101.17	*	80.57	18.21	

*เนื่องจากการไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่มีการสลาย ได้ค่าร้อยละการสลายเป็น 0

ตารางที่ ค.17 การสลายฮาโลแอซิโตไนไตรล์แบบผสม โดยผลของโมนอคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (MCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น โมนอคลอโรแอซิโตไนไตรล์			ความเข้มข้น เฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	6.0	26	98.60	99.45	100.78	99.61	1.10	
5	5.4	26	100.73	100.45	99.23	100.14	0.80	
10	5.0	26	99.60	100.17	99.67	99.81	0.31	
15	4.8	26	104.25	103.89	103.98	104.04	0.19	
20	4.7	26	105.62	105.34	104.27	105.08	0.71	
25	4.6	26	105.85	106.45	105.34	105.88	0.56	
30	4.5	26	105.78	106.21	105.67	105.89	0.29	
45	4.3	27	105.87	105.98	104.87	105.57	0.61	
60	4.2	27	105.00	106.32	104.98	105.43	0.77	
75	4.2	28	106.47	105.87	105.99	106.11	0.32	
90	4.2	28	107.94	106.44	105.09	106.49	1.43	

ตารางที่ ค.18 การสลายฮาโลแอซิโตไนไตรล์แบบผสม โดยผลของไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	6.0	26	101.35	102.45	101.22	101.67	0.68	
5	5.4	26	104.01	103.00	105.77	104.26	1.40	
10	5.0	26	106.66	104.21	105.34	105.4	1.23	
15	4.8	26	108.21	106.45	106.98	107.21	0.90	
20	4.7	26	110.53	107.08	111.33	109.65	2.26	
25	4.6	26	110.53	107.45	110.43	109.47	1.75	
30	4.5	26	110.51	106.67	109.78	108.99	2.04	
45	4.3	27	86.48	85.50	86.35	86.11	0.53	
60	4.2	27	67.94	66.45	67.56	67.32	0.77	
75	4.2	28	55.13	56.76	54.87	55.59	1.02	
90	4.2	28	51.06	53.16	51.23	51.82	1.17	

ตารางที่ ค.19 การสลายฮาโลแอกซีไธไนไตรล์แบบผสม โดยผลของไตรคลอโรแอกซีไธไนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาทีก)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไตรคลอโรแอกซีไธไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	6.0	26	99.84	97.78	100.03	99.22	1.25	
5	5.4	26	59.98	57.98	58.22	58.73	1.09	
10	5.0	26	34.67	34.43	35.23	34.78	0.41	
15	4.8	26	18.27	17.61	18.34	18.07	0.40	
20	4.7	26	10.82	11.21	11.87	11.3	0.53	
25	4.6	26	7.22	7.78	8.21	7.74	0.50	
30	4.5	26	3.79	3.01	3.42	3.41	0.39	
45	4.3	27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
60	4.2	27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
75	4.2	28	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
90	4.2	28	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

*N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ค.20 ร้อยละของการสลายฮาโลแอซีไนด์ (HANs) แบบผสม ความเข้มข้นเริ่มต้นของแต่ละชนิด 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาท)	VUV						หมายเหตุ
	ความเข้มข้น โมนอกลอโร แอซีไนด์ เจลีย์	ร้อยละ การสลาย โมนอกลอโร แอซีไนด์	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอซีไนด์ เจลีย์	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอซีไนด์	ความเข้มข้น ไตรคลอโร แอซีไนด์ เจลีย์	ร้อยละ การสลาย ไตรคลอโร แอซีไนด์	
0	99.61	0	101.67	0	99.22	0	
5	100.14	-0.53*	104.26	-2.55*	58.73	40.81	
10	99.81	-0.20*	105.40	-3.67*	34.78	64.95	
15	104.04	-4.45*	107.21	-5.45*	18.07	81.78	
20	105.08	-5.49*	109.65	-7.86*	11.30	88.61	
25	105.88	-6.29*	109.47	-7.67*	7.74	92.20	
30	105.89	-6.30*	108.99	-7.20*	3.41	96.57	
45	105.57	-5.99*	86.11	15.30	N.D.**	N.D.**	
60	105.43	-5.85*	67.32	33.79	N.D.**	N.D.**	
75	106.11	-6.53*	55.59	45.33	N.D.**	N.D.**	
90	106.49	-6.91*	51.82	49.03	N.D.**	N.D.**	

*เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสลายตัวจากสารอื่น ได้ค่าร้อยละการสลายเป็น ติดลบ

**N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ค.21 ผลของไดคลอโรแอกซีไตโนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสง อัลตราไวโอเลตชนิดซีกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ไดคลอโรแอกซีไตโนไตรล์					
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	6.3	25	102.45	99.76	98.76	100.32	1.91	
5	6.2	25	102.50	97.54	97.74	99.26	2.81	
10	6.1	25	97.38	98.43	98.15	97.99	0.54	
15	6.1	25	96.29	97.33	97.32	96.98	0.60	
20	6.1	25	96.55	97.56	97.89	97.33	0.10	
25	6.1	25	94.97	98.45	98.67	97.36	2.07	
30	6.1	25	94.34	97.19	98.34	96.62	2.06	
45	6.1	25	95.00	97.21	97.46	96.56	1.35	
60	6.1	25	96.50	96.33	97.32	96.72	0.53	
75	6.1	25	94.86	97.88	97.16	96.63	1.58	
90	6.1	25	95.75	97.02	96.98	96.58	0.72	

ตารางที่ ค.22 ผลของไดคลอโรแอกซีไตโนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสง อัลตราไวโอเลตชนิดซีกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ไดคลอโรแอกซีไตโนไตรล์					
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	6.7	25	98.02	106.74	102.87	102.54	4.37	
5	6.5	25	98.32	107.52	101.56	102.47	4.67	
10	6.5	25	97.04	108.00	102.13	102.39	5.48	
15	6.4	25	101.94	107.80	101.22	103.65	3.61	
20	6.4	25	101.02	105.90	101.45	102.79	2.70	
25	6.4	25	100.65	107.98	101.67	103.43	3.97	
30	6.4	25	100.77	104.34	102.37	102.49	1.79	
45	6.4	25	97.72	105.96	101.29	101.66	4.13	
60	6.4	25	99.34	104.32	102.19	101.95	2.50	
75	6.4	25	99.83	107.57	101.78	103.06	4.03	
90	6.4	25	99.91	106.74	101.34	102.66	3.6	

ตารางที่ ค.23 ผลของไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	6.9	25	96.01	98.65	97.67	97.44	1.33	
5	6.7	25	96.94	94.88	97.01	96.28	1.21	
10	6.6	25	95.16	94.62	96.45	95.41	0.94	
15	6.6	25	94.35	94.62	97.56	95.51	1.78	
20	6.6	25	95.37	97.42	97.37	96.72	1.17	
25	6.6	25	96.28	97.09	96.48	96.62	0.42	
30	6.6	25	96.03	96.53	96.22	96.26	0.25	
45	6.5	25	97.88	96.52	97.09	97.16	0.68	
60	6.5	25	93.97	95.51	96.65	95.38	1.34	
75	6.4	25	94.75	95.08	96.55	95.46	0.96	
90	6.4	25	93.8	94.05	96.27	94.71	1.26	

ตารางที่ ค.24 ผลของไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	6.5	25	100.05	99.98	96.45	98.83	2.06	
5	6.3	25	100.61	97.65	97.87	98.71	1.64	
10	6.1	25	100.45	98.43	97.44	98.77	1.53	
15	5.9	25	98.03	98.72	97.98	98.24	0.41	
20	5.7	25	97.04	97.68	96.18	96.96	0.75	
25	5.3	25	96.70	97.45	97.34	97.16	0.41	
30	5.0	26	92.58	96.45	94.99	94.67	1.95	
45	4.9	26	64.06	68.66	66.56	66.43	2.30	
60	4.8	26	49.83	53.78	50.45	51.53	2.12	
75	4.7	27	39.95	44.13	43.77	42.62	2.32	
90	4.6	27	30.94	32.09	30.21	31.08	0.95	

ตารางที่ ค.25 ร้อยละของการสลายไดคลอโรแอกซีไตรีน (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ แสงอัลตราไวโอเลตชนิดยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	UV-C/H ₂ O ₂ 5 mg/L		VUV/H ₂ O ₂ 5 mg/L		หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอกซีไตรีน เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอกซีไตรีน	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอกซีไตรีน เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอกซีไตรีน	
0	100.32	0	98.83	0	
5	99.26	1.06	98.71	0.12	
10	97.99	2.32	98.77	0.06	
15	96.98	3.33	98.24	0.60	
20	97.33	2.98	96.96	1.89	
25	97.36	2.95	97.16	1.69	
30	96.62	3.69	94.67	4.21	
45	96.56	3.75	66.43	32.78	
60	96.72	3.59	51.53	47.86	
75	96.63	3.68	42.62	56.88	
90	96.58	3.73	27.02	72.66	

ตารางที่ ค.26 ผลของไดคลอโรแอกซีไธไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอกซีไธไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
			0	6.9	25			
5	5.9	25	103.47	97.72	98.46	99.88	3.12	
10	5.3	25	101.94	95.82	97.99	98.58	3.10	
15	5.0	25	103.49	95.44	97.87	98.93	4.13	
20	4.8	25	100.69	95.18	97.89	97.92	2.76	
25	4.6	25	95.75	88.17	94.78	92.9	4.12	
30	4.5	25	75.34	70.23	73.45	73.01	2.58	
45	4.4	26	46.86	42.36	46.57	45.26	2.52	
60	4.3	26	27.55	25.54	26.08	26.39	1.04	
75	4.3	26	15.00	13.37	13.98	14.12	0.82	
90	4.2	27	7.43	6.46	7.87	7.25	0.72	

ตารางที่ ค.27 ร้อยละของการสลายไดคลอโรแอกซีไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ แสงอัลตราไวโอเลตชนิดยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	UV-C/H ₂ O ₂ 10 mg/L		VUV/H ₂ O ₂ 10 mg/L		หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอกซีไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอกซีไนไตรล์	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอกซีไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอกซีไนไตรล์	
0	100.32	0	100.55	0	
5	99.26	*	99.88	0.67	
10	97.99	*	98.58	1.96	
15	96.98	*	98.93	1.61	
20	97.33	*	97.92	2.62	
25	97.36	*	92.90	7.61	
30	96.62	*	73.01	27.39	
45	96.56	*	45.26	54.99	
60	96.72	*	26.39	73.75	
75	96.63	*	14.12	85.96	
90	96.58	*	7.25	92.79	

*เนื่องจากมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ค.28 ผลของไดคลอโรแอกซีไธไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอกซีไธไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
			0	6.9	25			
5	6.5	25	98.21	97.62	97.76	97.86	0.31	
10	5.5	25	98.51	97.11	97.54	97.72	0.72	
15	4.9	25	95.56	97.07	96.55	96.39	0.77	
20	4.6	25	81.01	85.56	82.76	83.11	2.30	
25	4.5	25	39.62	39.33	38.56	39.17	0.55	
30	4.4	25	27.50	27.03	28.45	27.66	0.72	
45	4.3	26	13.05	11.82	11.67	12.18	0.76	
60	4.2	26	7.23	6.72	7.74	7.23	0.51	
75	4.2	27	4.73	4.51	4.87	4.70	0.18	
90	4.2	27	3.18	3.42	3.53	3.38	0.18	

ตารางที่ ค.29 ร้อยละของการสลายไดคลอโรแอกซีไนด์ไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	UV-C/H ₂ O ₂ 20 mg/L		VUV/H ₂ O ₂ 20 mg/L		หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอกซีไนด์ไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอกซีไนด์ไนไตรล์	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอกซีไนด์ไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอกซีไนด์ไนไตรล์	
0	97.44	0	98.41	0	
5	96.28	*	97.86	0.56	
10	95.41	*	97.72	0.70	
15	95.51	*	96.39	2.05	
20	96.72	*	83.11	15.55	
25	96.62	*	39.17	60.20	
30	96.26	*	27.66	71.89	
45	97.16	*	12.18	87.62	
60	95.38	*	7.23	92.65	
75	95.46	*	4.70	95.22	
90	94.71	*	3.38	96.57	

*เนื่องจากมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ค.30 ผลของโมนโคลอโรแอซิติโนไตรล์ (MCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น โมนโคลอโรแอซิติโนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
			0	5.6	25			
5	5.5	25	96.01	106.80	101.56	101.46	5.40	
10	5.5	25	96.16	104.48	103.78	101.47	4.61	
15	5.5	25	95.50	104.21	103.45	101.05	4.82	
20	5.5	25	94.88	102.98	102.99	100.28	4.68	
25	5.5	25	95.31	102.78	103.34	100.48	4.48	
30	5.5	25	95.84	104.67	103.10	101.20	4.71	
45	5.5	25	96.51	103.11	102.45	100.69	3.63	
60	5.5	25	96.50	103.97	102.67	101.05	3.99	
75	5.5	25	96.05	104.09	103.55	101.23	4.49	
90	5.5	25	96.46	104.23	102.69	101.13	4.11	

ตารางที่ ค.31 ผลของโมนโคลอโรแอซิติโนไตรล์ (MCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น โมนโคลอโรแอซิติโนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
			0	5.6	25			
5	5.0	25	96.53	94.78	92.15	94.49	2.20	
10	4.7	25	93.94	90.04	89.78	91.25	2.33	
15	4.4	25	87.74	86.33	86.66	86.91	0.74	
20	4.3	26	86.70	86.12	85.42	86.08	0.64	
25	4.3	26	86.44	85.89	84.78	85.70	0.85	
30	4.2	26	82.33	85.76	84.02	84.04	1.72	
45	3.9	26	82.07	84.01	83.21	83.10	0.97	
60	3.9	26	81.06	82.98	81.78	81.94	0.97	
75	3.9	26	79.61	82.16	79.88	80.55	1.40	
90	3.9	26	79.15	80.55	78.45	79.38	1.07	

ตารางที่ ค.32 ร้อยละของการสลายโมโนคลอโรแอกซีไนด์ (MCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ แสงอัลตราไวโอเลตชนิดยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	UV-C/H ₂ O ₂ 20 mg/L		VUV/H ₂ O ₂ 20 mg/L		หมายเหตุ
	ความเข้มข้น โมโนคลอโร แอกซีไนด์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย โมโนคลอโร แอกซีไนด์	ความเข้มข้น โมโนคลอโร แอกซีไนด์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย โมโนคลอโร แอกซีไนด์	
0	102.29	0	98.16	0	
5	101.46	*	94.49	3.74	
10	101.47	*	91.25	7.04	
15	101.05	*	86.91	11.46	
20	100.28	*	86.08	12.31	
25	100.48	*	85.70	12.69	
30	101.20	*	84.04	14.38	
45	100.69	*	83.10	15.34	
60	101.05	*	81.94	16.52	
75	101.23	*	80.55	17.94	
90	101.13	*	79.38	19.13	

*เนื่องจากมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ค.33 ผลของไตรคลอโรแอกซีไธไนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไตรคลอโรแอกซีไธไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	6.3	25	102.03	98.16	101.13	100.44	2.03	
5	6.3	25	101.26	97.23	99.45	99.31	2.02	
10	6.1	25	100.47	95.45	98.63	98.18	2.54	
15	6.1	25	91.67	91.11	92.34	91.71	0.62	
20	6.0	25	89.96	90.22	89.12	89.77	0.57	
25	6.0	25	84.58	83.12	85.33	84.34	1.12	
30	5.9	25	82.40	80.09	83.12	81.87	1.58	
45	5.9	25	75.40	74.32	76.77	75.50	1.23	
60	5.8	25	68.50	67.56	68.47	68.18	0.53	
75	5.7	25	63.94	60.43	62.69	62.35	1.78	
90	5.6	25	60.64	58.74	58.87	59.42	1.06	

ตารางที่ ค.34 ผลของไตรคลอโรแอกซีไธไนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไตรคลอโรแอกซีไธไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.4	27	103.07	100.45	102.77	102.1	1.43	
5	5.2	27	45.76	43.56	45.56	44.96	1.22	
10	4.8	27	26.42	24.68	24.89	25.33	0.95	
15	4.6	27	10.31	11.56	9.97	10.61	0.84	
20	4.4	27	0.2	0.45	0.29	0.31	0.13	
25	4.3	27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
30	4.2	27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
45	4.1	28	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
60	4.0	28	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
75	4.0	28	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
90	4.0	28	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

*N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ค.35 ร้อยละของการสลายไตรคลอโรแอกซีไนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ แสงอัลตราไวโอเลตชนิดยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	UV-C/H ₂ O ₂ 20 mg/L		VUV/H ₂ O ₂ 20 mg/L		หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไตรคลอโร แอกซีไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไตรคลอโร แอกซีไนไตรล์	ความเข้มข้น ไตรคลอโร แอกซีไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไตรคลอโร แอกซีไนไตรล์	
0	100.44	0	102.1	0	
5	99.31	1.13	44.96	55.96	
10	98.18	2.25	25.33	75.19	
15	91.71	8.69	10.61	89.61	
20	89.77	10.62	0.31	99.70	
25	84.34	16.03	N.D.	N.D.	
30	81.87	18.49	N.D.	N.D.	
45	75.5	24.83	N.D.	N.D.	
60	68.18	32.12	N.D.	N.D.	
75	62.35	37.92	N.D.	N.D.	
90	59.42	40.84	N.D.	N.D.	

ตารางที่ ค.36 การสลายฮาโลเอซีไธไนไตรล์แบบผสม โดยผลของโมโนคลอโรเอซีไธไนไตรล์ (MCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น โมโนคลอโรเอซีไธไนไตรล์			ความเข้มข้น เฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.7	26	99.78	98.67	102.78	100.41	2.13	
5	5.7	26	99.27	97.08	100.23	98.86	1.61	
10	5.7	26	98.34	96.88	99.14	98.12	1.15	
15	5.7	26	97.87	95.74	98.76	97.46	1.55	
20	5.7	26	97.11	96.37	98.08	97.19	0.86	
25	5.7	26	96.34	99.71	97.78	97.94	1.69	
30	5.7	26	97.45	98.22	97.68	97.78	0.40	
45	5.6	26	96.09	97.02	96.89	96.67	0.50	
60	5.6	27	96.35	97.22	96.45	96.67	0.48	
75	5.6	27	96.21	96.18	95.21	95.87	0.57	
90	5.6	27	95.78	95.43	95.09	95.43	0.35	

ตารางที่ ค.37 การสลายฮาโลเอซีไธไนไตรล์แบบผสม โดยผลของไดคลอโรเอซีไธไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไดคลอโรเอซีไธไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.7	26	99.89	101.08	98.96	99.98	1.06	
5	5.7	26	98.45	100.75	98.17	99.12	1.42	
10	5.7	26	98.34	101.85	99.45	99.88	1.79	
15	5.7	26	99.56	100.79	98.46	99.60	1.17	
20	5.7	26	99.09	101.31	99.57	99.99	1.17	
25	5.7	26	99.76	104.37	98.63	100.92	3.04	
30	5.7	26	99.45	104.41	98.12	100.66	3.31	
45	5.6	26	98.34	102.07	97.78	99.40	2.33	
60	5.6	27	98.21	101.82	97.34	99.12	2.38	
75	5.6	27	97.11	98.70	96.45	97.42	1.16	
90	5.6	27	96.43	97.83	96.11	96.79	0.91	

ตารางที่ ค.38 การสลายฮาโลแอกซีไธโนไตรล์แบบผสม โดยผลของไตรคลอโรแอกซีไธโนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาทีก)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไตรคลอโรแอกซีไธโนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.7	26	101.44	99.46	99.21	100.04	1.22	
5	5.7	26	95.79	96.12	95.75	95.89	0.20	
10	5.7	26	93.16	92.98	93.07	93.07	0.09	
15	5.7	26	90.79	91.89	90.99	91.22	0.59	
20	5.7	26	88.33	89.43	87.2	88.32	1.12	
25	5.7	26	86.63	88.58	85.67	86.96	1.48	
30	5.7	26	84.82	87.22	82.78	84.94	2.22	
45	5.6	26	77.36	79.45	76.54	77.78	1.50	
60	5.6	27	69.82	70.56	67.98	69.45	1.33	
75	5.6	27	63.70	64.02	60.34	62.69	2.04	
90	5.6	27	59.32	62.78	58.45	60.18	2.29	

ตารางที่ ค.39 ร้อยละของการสลายฮาโลแอกซีไนด์ไตรล์ (HANs) แบบผสม ความเข้มข้นเริ่มต้นของแต่ละชนิด 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	UV-C/H ₂ O ₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร						หมายเหตุ
	ความเข้มข้น โมนอกลอรอ แอกซีไนด์ไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย โมนอกลอรอ แอกซีไนด์ไตรล์	ความเข้มข้น ไดคลอรอ แอกซีไนด์ไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไดคลอรอ แอกซีไนด์ไตรล์	ความเข้มข้น ไตรคลอรอ แอกซีไนด์ไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไตรคลอรอ แอกซีไนด์ไตรล์	
0	100.41	0	99.98	0	100.04	0	
5	98.86	*	99.12	*	95.89	4.15	
10	98.12	*	99.88	*	93.07	6.97	
15	97.46	*	99.60	*	91.22	8.81	
20	97.19	*	99.99	*	88.32	11.72	
25	97.94	*	100.92	*	86.96	13.07	
30	97.78	*	100.66	*	84.94	15.09	
45	96.67	*	99.40	*	77.78	22.25	
60	96.67	*	99.12	*	69.45	30.57	
75	95.87	*	97.42	*	62.69	37.34	
90	95.43	*	96.79	*	60.18	39.84	

*เนื่องจากมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ค.40 การสลายฮาโลเอซีไธไนไตรล์แบบผสม โดยผลของโมนโคลอโรเอซีไธไนไตรล์ (MCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น โมนโคลอโรเอซีไธไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.7	25	101.89	100.46	99.87	100.74	1.04	
5	5.2	25	103.36	100.21	102.89	102.15	1.70	
10	4.9	25	103.87	102.49	102.40	102.92	0.82	
15	4.6	25	111.18	108.69	110.57	110.15	1.30	
20	4.5	25	110.42	110.78	109.89	110.36	0.45	
25	4.4	26	110.38	109.76	110.76	110.30	0.50	
30	4.4	26	114.97	111.09	112.13	112.73	2.01	
45	4.3	26	111.18	110.56	112.45	111.40	0.96	
60	4.2	26	112.52	110.45	111.21	111.39	1.05	
75	4.1	27	111.22	111.79	112.34	111.78	0.56	
90	4.0	27	111.69	110.67	112.09	111.48	0.73	

ตารางที่ ค.41 การสลายฮาโลเอซีไธไนไตรล์แบบผสม โดยผลของไดโคลอโรเอซีไธไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไดโคลอโรเอซีไธไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.7	25	102.21	99.34	100.67	100.74	1.44	
5	5.2	25	107.62	101.45	106.45	105.17	3.28	
10	4.9	25	109.67	105.56	110.87	108.7	2.78	
15	4.6	25	114.34	107.11	112.63	111.36	3.78	
20	4.5	25	106.32	109.52	107.76	107.87	1.60	
25	4.4	26	92.26	94.78	98.76	95.27	3.28	
30	4.4	26	82.41	84.18	83.09	83.23	0.89	
45	4.3	26	62.58	65.19	63.03	63.60	1.40	
60	4.2	26	50.42	52.11	50.56	51.03	0.94	
75	4.1	27	40.84	43.55	42.13	42.17	1.36	
90	4.0	27	30.46	31.76	32.78	31.67	1.16	

ตารางที่ ค.42 การสลายฮาโลเอซีไธไนไตรล์แบบผสม โดยผลของไตรคลอโรเอซีไธไนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไตรคลอโรเอซีไธไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.7	25	99.57	100.56	98.98	99.70	0.80	
5	5.2	25	54.22	55.67	55.89	55.26	0.91	
10	4.9	25	27.68	27.56	26.34	27.19	0.74	
15	4.6	25	12.31	13.01	12.56	12.63	0.35	
20	4.5	25	0.11	0.15	0.13	0.13	0.02	
25	4.4	26	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
30	4.4	26	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
45	4.3	26	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
60	4.2	26	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
75	4.1	27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
90	4.0	27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

*N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)



ตารางที่ ค.43 ร้อยละของการสลายฮาโลแอกซีไนด์ไตรล์ (HANs) แบบผสม ความเข้มข้นเริ่มต้นของแต่ละชนิด 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	VUV/H ₂ O ₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร						หมายเหตุ
	ความเข้มข้น โมนอกลอรอ แอกซีไนด์ไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย โมนอกลอรอ แอกซีไนด์ไตรล์	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอกซีไนด์ไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอกซีไนด์ไตรล์	ความเข้มข้น ไตรคลอโร แอกซีไนด์ไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไตรคลอโร แอกซีไนด์ไตรล์	
0	100.74	0	100.74	0	99.70	0	
5	102.15	-1.40	105.17	-4.40*	55.26	0.59	
10	102.92	-2.16	108.70	-7.90*	27.19	1.30	
15	110.15	-9.34	111.36	-10.54*	12.63	2.07	
20	110.36	-9.55	107.87	-7.07*	0.13	6.64	
25	110.30	-9.49	95.27	5.43	N.D.**	N.D.**	
30	112.73	-11.90	83.23	17.38	N.D.**	N.D.**	
45	111.40	-10.58	63.60	36.87	N.D.**	N.D.**	
60	111.39	-10.58	51.03	49.34	N.D.**	N.D.**	
75	111.78	-10.96	42.17	58.14	N.D.**	N.D.**	
90	111.48	-10.66	31.67	68.57	N.D.**	N.D.**	

*เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสลายตัวจากสารอื่น ได้ค่าร้อยละการสลายเป็น ติดลบ

**N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ค.44 ผลของไดคลอโรแอกซีไตนไตร์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสง อัลตราไวโอเลตชนิดซีกับเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ไดคลอโรแอกซีไตนไตร์					
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.5	25	97.32	102.77	101.10	100.4	2.79	
5	5.6	25	97.66	102.89	98.76	99.77	2.76	
10	5.6	25	98.46	101.45	98.28	99.40	1.78	
15	5.6	25	97.88	101.88	97.46	99.07	2.44	
20	5.6	25	98.84	101.67	98.70	99.74	1.68	
25	5.6	25	95.33	102.21	97.56	98.37	3.51	
30	5.6	25	95.00	101.24	97.32	97.85	3.15	
45	5.7	25	97.28	101.09	99.14	99.17	1.91	
60	5.7	25	97.67	102.78	98.34	99.6	2.78	
75	5.7	25	95.03	102.55	98.55	98.71	3.76	
90	5.7	25	95.32	101.87	97.54	98.24	3.33	

ตารางที่ ค.45 ผลของไดคลอโรแอกซีไตนไตร์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสง อัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (VUV/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ไดคลอโรแอกซีไตนไตร์					
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.7	25	97.88	97.85	103.51	99.75	3.26	
5	5.4	25	99.93	98.26	102.78	100.32	2.29	
10	5.1	25	97.49	99.25	102.96	99.90	2.79	
15	4.9	25	99.49	97.69	100.45	99.21	1.40	
20	4.7	25	99.37	98.88	103.49	100.58	2.53	
25	4.6	25	98.80	99.1	102.36	100.09	1.97	
30	4.5	25	97.41	98.83	101.89	99.38	2.29	
45	4.4	25	79.43	73.22	78.77	77.14	3.41	
60	4.4	25	55.57	50.15	58.43	54.72	4.20	
75	4.3	26	42.56	38.35	45.99	42.30	3.82	
90	4.3	26	32.62	28.53	34.18	31.78	2.92	

ตารางที่ ค.46 ร้อยละของการสลายไคคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับกำมะถันเพอร์ซอร์ไซด์ บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดยูวีร่วมกับกำมะถันเพอร์ซอร์ไซด์ บิวทิล แอลกอฮอล์ (VUV/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาที)	UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร		VUV/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร		หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไคคลอโร แอซิโตไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไคคลอโร แอซิโตไนไตรล์	ความเข้มข้น ไคคลอโร แอซิโตไนไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไคคลอโร แอซิโตไนไตรล์	
0	100.40	0	99.75	0	
5	99.77	*	100.32	*	
10	99.40	*	99.90	*	
15	99.07	*	99.21	*	
20	99.74	*	100.58	*	
25	98.37	*	100.09	*	
30	97.85	*	99.38	0.37	
45	99.17	*	77.14	22.67	
60	99.60	*	54.72	45.14	
75	98.71	*	42.30	57.59	
90	98.24	*	31.78	68.14	

*เนื่องจากมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ค.47 การสลายฮาโลแอซิโตไนไตรล์แบบผสม โดยผลของโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (MCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีกับเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น โมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.8	25	97.98	102.78	101.99	100.92	2.57	
5	5.8	25	98.54	103.37	101.56	101.16	2.44	
10	5.8	25	98.07	101.53	101.73	100.44	2.06	
15	5.8	25	99.01	100.9	101.28	100.4	1.22	
20	5.8	26	98.64	102.82	100.87	100.78	2.09	
25	5.7	26	99.34	104.48	100.98	101.60	2.63	
30	5.7	26	98.32	101.93	101.67	100.64	2.01	
45	5.7	26	98.97	100.3	101.87	100.38	1.45	
60	5.7	26	99.09	102.75	101.99	101.28	1.93	
75	5.7	27	100.17	102.47	100.23	100.96	1.31	
90	5.7	27	98.32	102.66	100.47	100.48	2.17	

ตารางที่ ค.48 การสลายฮาโลแอซิโตไนไตรล์แบบผสม โดยผลของไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีกับเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.8	25	103.24	99.98	102.12	101.78	1.66	
5	5.8	25	102.45	99.12	101.88	101.15	1.78	
10	5.8	25	102.65	98.65	101.09	100.80	2.02	
15	5.8	25	101.47	97.78	101.54	100.26	2.15	
20	5.8	26	102.44	98.32	101.23	100.66	2.12	
25	5.7	26	101.09	100.5	102.34	101.31	0.94	
30	5.7	26	102.54	98.14	102.98	101.22	2.68	
45	5.7	26	102.17	98.06	101.13	100.45	2.14	
60	5.7	26	101.22	98.23	102.55	100.67	2.21	
75	5.7	27	102.39	99.36	101.76	101.17	1.60	
90	5.7	27	101.02	98.66	101.23	100.30	1.43	

ตารางที่ ค.49 การสลายฮาโลแอกซีโตไนไตรล์แบบผสม โดยผลของไตรคลอโรแอกซีโตไนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีกับเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาทีก)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไตรคลอโรแอกซีโตไนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.8	25	99.84	100.06	101.23	100.38	0.75	
5	5.8	25	98.12	99.58	99.75	99.15	0.90	
10	5.8	25	96.11	95.08	95.89	95.69	0.54	
15	5.8	25	92.78	93.88	92.14	92.93	0.88	
20	5.8	26	91.34	91.88	90.99	91.40	0.45	
25	5.7	26	89.87	90.60	89.23	89.90	0.69	
30	5.7	26	88.34	89.10	87.65	88.36	0.73	
45	5.7	26	86.30	87.02	86.15	86.49	0.47	
60	5.7	26	84.09	86.53	85.43	85.35	1.22	
75	5.7	27	81.98	82.59	81.78	82.12	0.42	
90	5.7	27	81.16	81.62	80.56	81.11	0.53	

ตารางที่ ค.50 ร้อยละของการสลายฮาโลแอกซีไนด์ (HANs) แบบผสม ความเข้มข้นเริ่มต้นของแต่ละชนิด 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีกับเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาที)	UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร						หมายเหตุ
	ความเข้มข้น โมนอคลอโร แอกซีไนด์	ร้อยละ การสลาย โมนอคลอโร แอกซีไนด์	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอกซีไนด์	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอกซีไนด์	ความเข้มข้น ไตรคลอโร แอกซีไนด์	ร้อยละ การสลาย ไตรคลอโร แอกซีไนด์	
	เฉลี่ย	เฉลี่ย	เฉลี่ย	เฉลี่ย	เฉลี่ย	เฉลี่ย	
0	100.92	0	101.78	0	100.38	0.00	
5	101.16	*	101.15	*	99.15	1.23	
10	100.44	*	100.80	*	95.69	4.67	
15	100.40	*	100.26	*	92.93	7.42	
20	100.78	*	100.66	*	91.40	8.94	
25	101.60	*	101.31	*	89.90	10.44	
30	100.64	*	101.22	*	88.36	11.97	
45	100.38	*	100.45	*	86.49	13.84	
60	101.28	*	100.67	*	85.35	14.97	
75	100.96	*	101.17	*	82.12	18.19	
90	100.48	*	100.30	*	81.11	19.19	

*เนื่องจากมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ ค.51 การสลายฮาโลเอซีไตนไตร์ลแบบผสม โดยผลของโมนโคลอโรเอซีไตนไตร์ล (MCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (VUV/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น โมนโคลอโรเอซีไตนไตร์ล			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.8	25	97.94	101.23	102.11	100.43	2.20	
5	5.3	25	103.37	101.54	103.21	102.71	1.01	
10	5.1	25	101.00	102.31	104.83	102.71	1.95	
15	4.9	25	107.11	104.17	105.78	105.69	1.47	
20	4.8	25	109.74	106.87	108.23	108.28	1.44	
25	4.8	25	107.53	107.23	106.98	107.25	0.28	
30	4.6	26	107.37	107.18	107.33	107.29	0.10	
45	4.5	26	105.38	106.45	106.80	106.21	0.74	
60	4.2	26	105.00	106.23	105.11	105.45	0.68	
75	4.3	26	104.46	105.78	104.98	105.07	0.66	
90	4.1	27	103.18	105.66	104.22	104.35	1.25	

ตารางที่ ค.52 การสลายฮาโลเอซีไตนไตร์ลแบบผสม โดยผลของไดโคลอโรเอซีไตนไตร์ล (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (VUV/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาท)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไดโคลอโรเอซีไตนไตร์ล			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.8	25	102.32	98.45	98.98	99.92	2.10	
5	5.3	25	104.52	100.78	101.23	102.18	2.04	
10	5.1	25	107.12	101.41	102.24	103.59	3.09	
15	4.9	25	105.77	102.13	103.09	103.66	1.89	
20	4.8	25	106.24	104.23	103.80	104.76	1.30	
25	4.8	25	109.72	106.34	107.10	107.72	1.77	
30	4.6	26	111.81	107.87	109.44	109.71	1.98	
45	4.5	26	87.54	87.90	88.23	87.89	0.35	
60	4.2	26	68.55	67.98	67.88	68.14	0.36	
75	4.3	26	60.22	61.12	60.09	60.48	0.56	
90	4.1	27	56.83	58.45	55.77	57.02	1.35	

ตารางที่ ค.53 การสลายฮาโลแอกซีไธโนไตรล์แบบผสม โดยผลของไตรโคลโรแอกซีไธโนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (VUV/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาทีก)	pH	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น ไตรโคลโรแอกซีไธโนไตรล์			ความ เข้มข้นเฉลี่ย	SD	หมายเหตุ
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0	5.8	25	104.14	99.9	98.67	100.90	2.87	
5	5.3	25	60.37	58.75	59.98	59.70	0.85	
10	5.1	25	35.63	35.45	34.82	35.3	0.43	
15	4.9	25	19.52	20.56	19.24	19.77	0.70	
20	4.8	25	11.45	10.89	10.01	10.78	0.73	
25	4.8	25	8.44	8.90	8.21	8.52	0.35	
30	4.6	26	3.41	3.47	3.12	3.33	0.19	
45	4.5	26	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
60	4.2	26	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
75	4.3	26	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
90	4.1	27	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

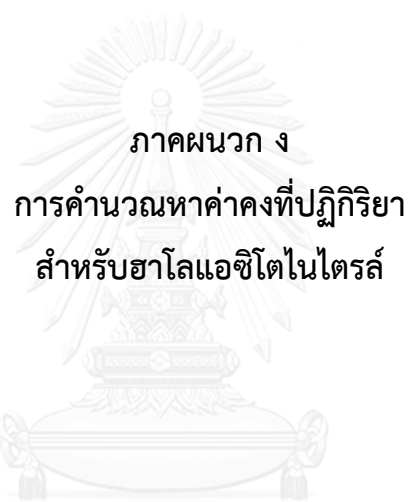
*N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ค.54 ร้อยละของการสลายฮาโลแอซีไนด์ไตรล์ (HANs) แบบผสม ความเข้มข้นเริ่มต้นของแต่ละชนิด 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสูญญากาศกับเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (VUV/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร)

เวลา (นาที)	VUV/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร						หมายเหตุ
	ความเข้มข้น โมนอกลอรอ แอซีไนด์ไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย โมนอกลอรอ แอซีไนด์ไตรล์	ความเข้มข้น ไดคลอโร แอซีไนด์ไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไดคลอโร แอซีไนด์ไตรล์	ความเข้มข้น ไตรคลอโร แอซีไนด์ไตรล์ เฉลี่ย	ร้อยละ การสลาย ไตรคลอโร แอซีไนด์ไตรล์	
0	100.43	0	99.92	0	100.90	0	
5	102.71	-2.27*	102.18	-2.26*	59.70	40.83	
10	102.71	-2.27*	103.59	-3.67*	35.30	65.01	
15	105.69	-5.23*	103.66	-3.75*	19.77	80.40	
20	108.28	-7.82*	104.76	-4.84*	10.78	89.31	
25	107.25	-6.79*	107.72	-7.81*	8.52	91.56	
30	107.29	-6.83*	109.71	-9.79*	3.33	96.70	
45	106.21	-5.76*	87.89	12.04	N.D.**	N.D.**	
60	105.45	-5.00*	68.14	31.81	N.D.**	N.D.**	
75	105.07	-4.62*	60.48	39.47	N.D.**	N.D.**	
90	104.35	-3.91*	57.02	42.94	N.D.**	N.D.**	

*เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสลายตัวจากสารอื่น ได้ค่าร้อยละการสลายเป็น ติดลบ

**N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)



ภาคผนวก ง
การคำนวณหาค่าคงที่ปฏิกิริยา
สำหรับฮาโลเอซีไตนไตรล์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การคำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยาการสลาย

- ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$\begin{aligned}\ln C &= \ln C_0 - kt \\ \ln C - \ln C_0 &= -kt \\ \ln (C/C_0) &= -kt \\ -\ln (C/C_0) &= kt\end{aligned}$$

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

- ปฏิกิริยาอันดับสอง

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

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

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของโมโนคลอโรเอซิโตไนโตรล์ (MACN) ความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ย 99.31 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) ที่เวลา 90 นาที พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยลดลงเหลือ 94.72 ไมโครกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned}y &= -\ln (C/C_0) \\ y &= -\ln (94.72/99.31) \\ y &= 0.0473\end{aligned}$$

นำค่าที่ได้ของแต่ละช่วงเวลาไปสร้างกราฟระหว่าง $-\ln (C/C_0)$ (แกน y) กับ เวลา (แกน x) ถ้าหากได้กราฟเส้นตรง (ภาพที่ 4.7) สามารถบอกได้ว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง และได้ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (k) เป็น 0.0005 ต่อนาที

ตารางที่ ง.1 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (MACN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศ (VUV)

เวลา (นาที)	VUV			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น โมโนคลอโรแอซิ โตไนไตรล์เฉลี่ย	C_0 (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	$-\ln(C/C_0)$ (ต่อนาที)	
0	99.31	99.31	0	
5	99.11	99.31	0.0020	
10	99.18	99.31	0.0013	
15	98.51	99.31	0.0081	
20	98.04	99.31	0.0129	
25	97.72	99.31	0.0161	
30	97.20	99.31	0.0215	
45	96.87	99.31	0.0249	
60	96.72	99.31	0.0264	
75	95.71	99.31	0.0369	
90	94.72	99.31	0.0473	

ตารางที่ ง.2 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของไดคลอโรแอซีไตนไตร์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศ (VUV)

เวลา (นาที)	VUV			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอซี ไตนไตร์เฉลี่ย	C_0 (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	$-\ln(C/C_0)$ (ต่อนาที)	
0	101.02	101.02	0	
5	100.29	101.02	0.0073	
10	100.26	101.02	0.0076	
15	100.71	101.02	0.0031	
20	100.39	101.02	0.0063	
25	100.35	101.02	0.0067	
30	100.28	101.02	0.0074	
45	75.86	101.02	0.2864	
60	54.93	101.02	0.6093	
75	46.25	101.02	0.7813	
90	30.09	101.02	1.2111	

ตารางที่ ง.3 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของไตรคลอโรเอซีไธไนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาที)	UV-C			VUV			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไตรคลอโรเอซี ไธไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	ความเข้มข้น ไตรคลอโรเอซี ไธไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	
0	97.72	97.72	0	100.23	100.23	0.0000	
5	95.93	97.72	0.0185	51.58	100.23	0.6643	
10	93.05	97.72	0.0490	28.84	100.23	1.2457	
15	91.04	97.72	0.0708	17.46	100.23	1.7476	
20	89.72	97.72	0.0854	10.43	100.23	2.2628	
25	88.57	97.72	0.0983	6.08	100.23	2.8025	
30	86.04	97.72	0.1273	2.84	100.23	3.5637	
45	84.35	97.72	0.1471	N.D.	100.23	N.D.	
60	83.10	97.72	0.1621	N.D.	100.23	N.D.	
75	82.52	97.72	0.1691	N.D.	100.23	N.D.	
90	81.56	97.72	0.1808	N.D.	100.23	N.D.	

*N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ง.4 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของฮาโลแอซีโตไนไตรล์แบบผสม (HANS) สำหรับไดคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาทีก)	VUV			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอซี โตไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	
0	101.67	101.67	0	
5	104.26	101.67	-0.03*	
10	105.40	101.67	-0.04*	
15	107.21	101.67	-0.05*	
20	109.65	101.67	-0.08*	
25	109.47	101.67	-0.07*	
30	108.99	101.67	-0.07*	
45	86.11	101.67	0.17	
60	67.32	101.67	0.41	
75	55.59	101.67	0.60	
90	51.82	101.67	0.67	

*เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสลายตัวจากสารอื่น ทำให้ได้ค่า $-\ln (C/C_0)$ มีค่าติดลบ

ตารางที่ ง.5 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของฮาโลแอซีโตไนไตรล์ (HANs) สำหรับไตรคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) และแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV)

เวลา (นาที)	UV-C			VUV			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไตรคลอโรแอซี โตไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	ความเข้มข้น ไตรคลอโรแอซี โตไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	
0	98.51	98.51	0	99.22	99.22	0	
5	97.66	98.51	0.0087	58.73	99.22	0.5244	
10	95.42	98.51	0.0319	34.78	99.22	1.0484	
15	93.26	98.51	0.0548	18.07	99.22	1.7029	
20	91.99	98.51	0.0685	11.30	99.22	2.1725	
25	90.64	98.51	0.0833	7.74	99.22	2.5514	
30	89.35	98.51	0.0976	3.41	99.22	3.3716	
45	87.83	98.51	0.1148	N.D.	99.22	N.D.	
60	85.38	98.51	0.1431	N.D.	99.22	N.D.	
75	84.06	98.51	0.1586	N.D.	99.22	N.D.	
90	80.57	98.51	0.2011	N.D.	99.22	N.D.	

*N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ง.6 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของไดคลอโรแอซิโตนไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	VUV/H ₂ O ₂ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอซิ โตนไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	
0	98.83	101.02	0	
5	98.71	101.02	0.0012	
10	98.77	101.02	0.0006	
15	98.24	101.02	0.0060	
20	96.96	101.02	0.0191	
25	97.16	101.02	0.0170	
30	94.67	101.02	0.0430	
45	66.43	101.02	0.3973	
60	51.53	101.02	0.6512	
75	42.62	101.02	0.8411	
90	27.02	101.02	1.2968	

ตารางที่ ง.7 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของไดคลอโรแอซิโตนไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	VUV/H ₂ O ₂ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอซิ โตนไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	
0	100.55	100.55	0	
5	99.88	100.55	0.0067	
10	98.58	100.55	0.0198	
15	98.93	100.55	0.0162	
20	97.92	100.55	0.0265	
25	92.90	100.55	0.0791	
30	73.01	100.55	0.3201	
45	45.26	100.55	0.7982	
60	26.39	100.55	1.3377	
75	14.12	100.55	1.9631	
90	7.25	100.55	2.6297	

ตารางที่ ง.8 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	VUV/H ₂ O ₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอซิ โตไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	
0	98.41	98.41	0	
5	97.86	98.41	0.0056	
10	97.72	98.41	0.0070	
15	96.39	98.41	0.0207	
20	83.11	98.41	0.1690	
25	39.17	98.41	0.9212	
30	27.66	98.41	1.2692	
45	12.18	98.41	2.0893	
60	7.23	98.41	2.6109	
75	4.70	98.41	3.0416	
90	3.38	98.41	3.3713	

ตารางที่ ง.9 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของโมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (MACN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสูญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	VUV/H ₂ O ₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น โมโนคลอโรแอซิ โตไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	
0	98.16	98.16	0	
5	94.49	98.16	0.0381	
10	91.25	98.16	0.0730	
15	86.91	98.16	0.1217	
20	86.08	98.16	0.1313	
25	85.70	98.16	0.1357	
30	84.04	98.16	0.1553	
45	83.10	98.16	0.1666	
60	81.94	98.16	0.1806	
75	80.55	98.16	0.1977	
90	79.38	98.16	0.2124	

ตารางที่ ง.10 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของไตรโคลโรแอซิโตไนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	UV-C/H ₂ O ₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไตรโคลโรแอซิ โตไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัมต่อ ลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	
0	100.44	100.44	0	
5	99.31	100.44	0.0113	
10	98.18	100.44	0.0228	
15	91.71	100.44	0.0909	
20	89.77	100.44	0.1123	
25	84.34	100.44	0.1747	
30	81.87	100.44	0.2044	
45	75.50	100.44	0.2854	
60	68.18	100.44	0.3874	
75	62.35	100.44	0.4768	
90	59.42	100.44	0.5249	

ตารางที่ ง.11 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	VUV/H ₂ O ₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไตรคลอโรเอซี ไตนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	
0	102.1	102.1	0	
5	44.96	102.1	0.8202	
10	25.33	102.1	1.3940	
15	10.61	102.1	2.2642	
20	0.31	102.1	5.7971	
25	N.D.	102.1	N.D.	
30	N.D.	102.1	N.D.	
45	N.D.	102.1	N.D.	
60	N.D.	102.1	N.D.	
75	N.D.	102.1	N.D.	
90	N.D.	102.1	N.D.	

*N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ง.12 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของฮาโลแอกซีไตนไตร์ (HANs) แบบผสม สำหรับไดคลอโรแอกซีไตนไตร์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	UV-C/H ₂ O ₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร			VUV/H ₂ O ₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอกซี ไตนไตร์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาท)	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอกซี ไตนไตร์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาท)	
0	99.98	99.98	0	100.74	100.74	0	
5	99.12	99.98	0.0086*	105.17	100.74	-0.0431*	
10	99.88	99.98	0.0010*	108.70	100.74	-0.0760*	
15	99.60	99.98	0.0038*	111.36	100.74	-0.1002*	
20	99.99	99.98	-0.0001**	107.87	100.74	-0.0684*	
25	100.92	99.98	-0.0094**	95.27	100.74	0.0559	
30	100.66	99.98	-0.0068**	83.23	100.74	0.1910	
45	99.40	99.98	0.0059*	63.60	100.74	0.4599	
60	99.12	99.98	0.0086*	51.03	100.74	0.6801	
75	97.42	99.98	0.0259*	42.17	100.74	0.8708	
90	96.79	99.98	0.0324*	31.67	100.74	1.1573	

*เนื่องจากค่าที่ได้แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ จึงถือว่าค่า $-\ln (C/C_0)$ มีค่าเป็น 0

**เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสลายตัวจากสารอื่น ทำให้ได้ค่า $-\ln (C/C_0)$ มีค่าติดลบ

ตารางที่ ง.13 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของฮาโลแอกซีไตนไตร์ (HANs) แบบผสม สำหรับไตรคลอโรแอกซีไตนไตร์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	UV-C/H ₂ O ₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร			VUV/H ₂ O ₂ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไตรคลอโรแอกซี ไตนไตร์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาท)	ความเข้มข้น ไตรคลอโรแอกซีไ ตนไตร์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาท)	
0	100.04	100.04	0	99.70	99.70	0	
5	95.89	100.04	0.0424	55.26	99.70	0.5901	
10	93.07	100.04	0.0722	27.19	99.70	1.2992	
15	91.22	100.04	0.0923	12.63	99.70	2.0664	
20	88.32	100.04	0.1246	0.13	99.70	6.6424	
25	86.96	100.04	0.1401	N.D.	99.70	N.D.	
30	84.94	100.04	0.1636	N.D.	99.70	N.D.	
45	77.78	100.04	0.2516	N.D.	99.70	N.D.	
60	69.45	100.04	0.3649	N.D.	99.70	N.D.	
75	62.69	100.04	0.4674	N.D.	99.70	N.D.	
90	60.18	100.04	0.5082	N.D.	99.70	N.D.	

*N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ง.14 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ไดคลอโรแอกซีไตนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีกับเทอเชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดยูวีเอกับเทอเชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร			VUV/H ₂ O ₂ 10 มิลลิโมลต่อลิตร			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอกซี ไตนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอกซีโต ไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาที)	
0	100.40	100.40	0	99.75	99.75	0	
5	99.77	100.40	*	100.32	99.75	-0.0057**	
10	99.40	100.40	*	99.90	99.75	-0.0015**	
15	99.07	100.40	*	99.21	99.75	0.0054*	
20	99.74	100.40	*	100.58	99.75	-0.0082*	
25	98.37	100.40	*	100.09	99.75	-0.0034**	
30	97.85	100.40	*	99.38	99.75	0.0037	
45	99.17	100.40	*	77.14	99.75	0.2570	
60	99.60	100.40	*	54.72	99.75	0.6004	
75	98.71	100.40	*	42.30	99.75	0.8579	
90	98.24	100.40	*	31.78	99.75	1.1438	

*เนื่องจากค่าที่ได้แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ จึงถือว่าค่า $-\ln (C/C_0)$ มีค่าเป็น 0

**เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสลายตัวจากสารอื่น ทำให้ได้ค่า $-\ln (C/C_0)$ มีค่าติดลบ

ตารางที่ ง.15 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของฮาโลแอกซีไธไนไตรล์ (HANs) แบบผสม สำหรับไดคลอโรแอกซีไธไนไตรล์ (DCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร แสงอัลตราไวโอเลตชนิดสูญญากาศกับเทอเชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (VUV/TBA 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาที)	VUV/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไดคลอโรแอกซี ไธไนไตรล์เฉลี่ย	C_0 (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	$-\ln(C/C_0)$ (ต่อนาที)	
0	99.92	99.92	0	
5	102.18	99.92	-0.0223*	
10	103.59	99.92	-0.0361*	
15	103.66	99.92	-0.0368*	
20	104.76	99.92	-0.0473*	
25	107.72	99.92	-0.0752*	
30	109.71	99.92	-0.0934*	
45	87.89	99.92	0.1283	
60	68.14	99.92	0.3829	
75	60.48	99.92	0.5021	
90	57.02	99.92	0.5610	

*เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสลายตัวจากสารอื่น ทำให้ได้ค่า $-\ln(C/C_0)$ มีค่าติดลบ

ตารางที่ ง.16 ผลของการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของฮาโลแอซิโตไนไตรล์ (HANs) แบบผสม สำหรับไตรคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (TCAN) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่สลายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีกับเทอเชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร) และแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศกับเทอเชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (VUV/TBA 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

เวลา (นาท)	UV-C/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร			VUV/TBA 10 มิลลิโมลต่อลิตร			หมายเหตุ
	ความเข้มข้น ไตรคลอโรแอซิ โตไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาท)	ความเข้มข้น ไตรคลอโรแอซิโต ไนไตรล์เฉลี่ย	C ₀ (ไมโครกรัม ต่อลิตร)	-ln (C/C ₀) (ต่อนาท)	
0	100.38	100.38	0	100.90	100.90	0	
5	99.15	100.38	0.0123	59.70	100.90	0.5248	
10	95.69	100.38	0.0478	35.30	100.90	1.0502	
15	92.93	100.38	0.0771	19.77	100.90	1.6298	
20	91.40	100.38	0.0937	10.78	100.90	2.2361	
25	89.90	100.38	0.1103	8.52	100.90	2.4721	
30	88.36	100.38	0.1275	3.33	100.90	3.4102	
45	86.49	100.38	0.1489	N.D.*	100.90	N.D.*	
60	85.35	100.38	0.1622	N.D.*	100.90	N.D.*	
75	82.12	100.38	0.2008	N.D.*	100.90	N.D.*	
90	81.11	100.38	0.2131	N.D.*	100.90	N.D.*	

*N.D. (Detection limited = 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตร)

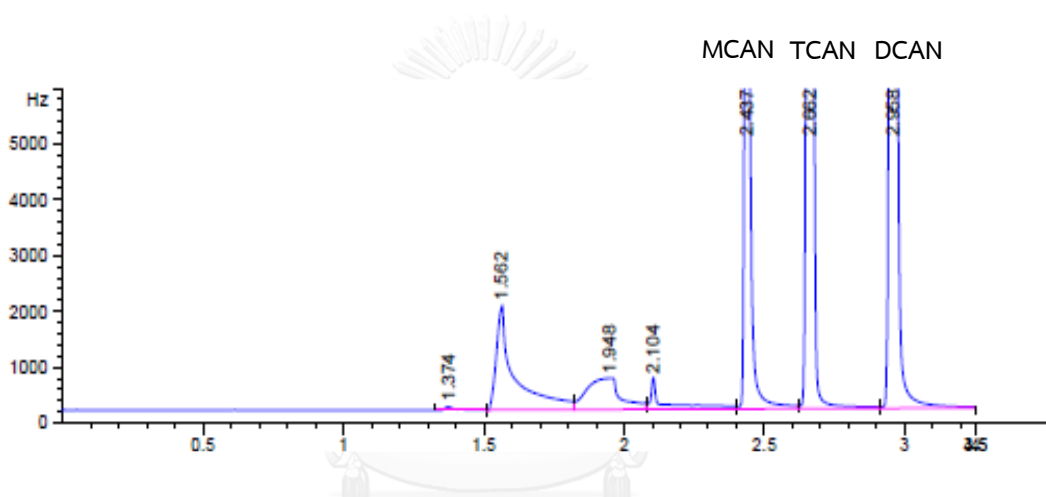
ภาคผนวก จ
ผลโครมาโทกราฟีของเครื่อง Gas Chromatograph
สำหรับการสลายฮาโลเอซีไคน์ไตรล์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

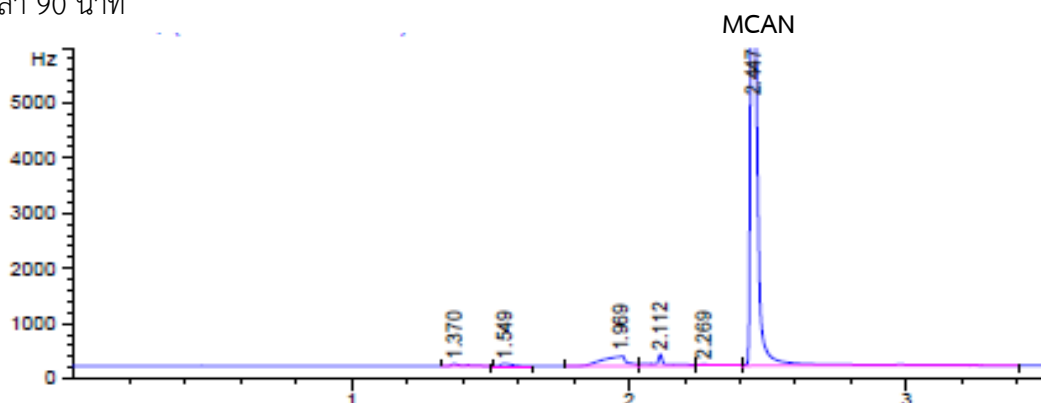
ตารางที่ จ.1 ชนิดของฮาโลเอซีไตนไตรล์กับเวลาที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph

ชนิดของฮาโลเอซีไตนไตรล์	ตำแหน่งเวลาที่เกิด (นาที)
โมนอคลอโรเอซีไตนไตรล์ (MCAN)	2.44
ไดคลออโรเอซีไตนไตรล์ (DCAN)	2.96
ไตรคลออโรเอซีไตนไตรล์ (TCAN)	2.66

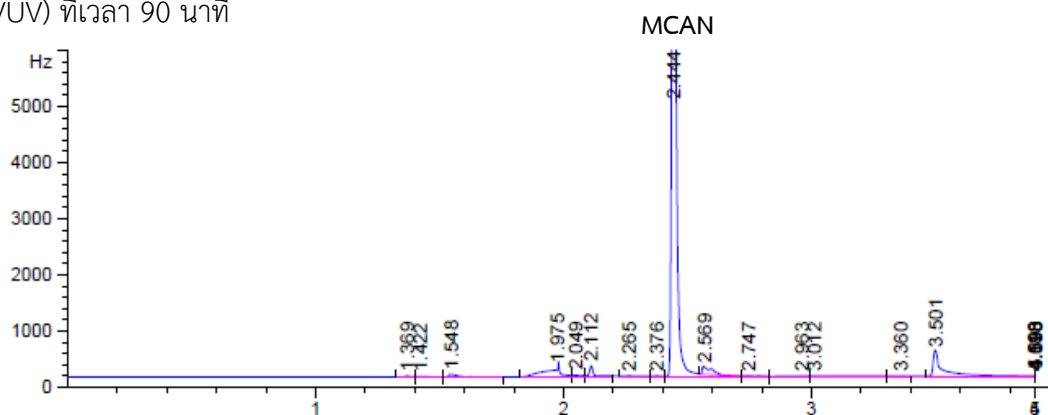
ภาพที่ จ.1 สารฮาโลเอซีไตนไตรล์มาตรฐานที่ความเข้มข้นแต่ละชนิดเป็น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร



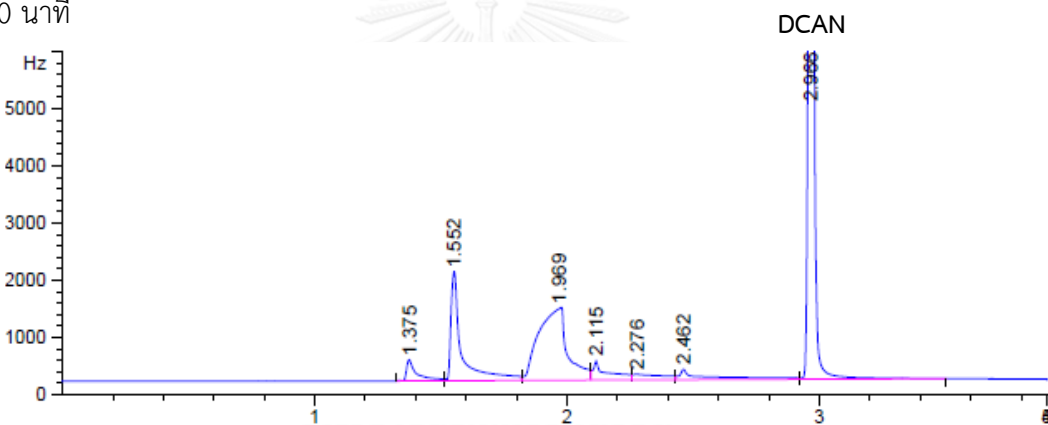
ภาพที่ จ.2 การสลายโมนอคลอโรเอซีไตนไตรล์ (MCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซี (UV-C) ที่เวลา 90 นาที



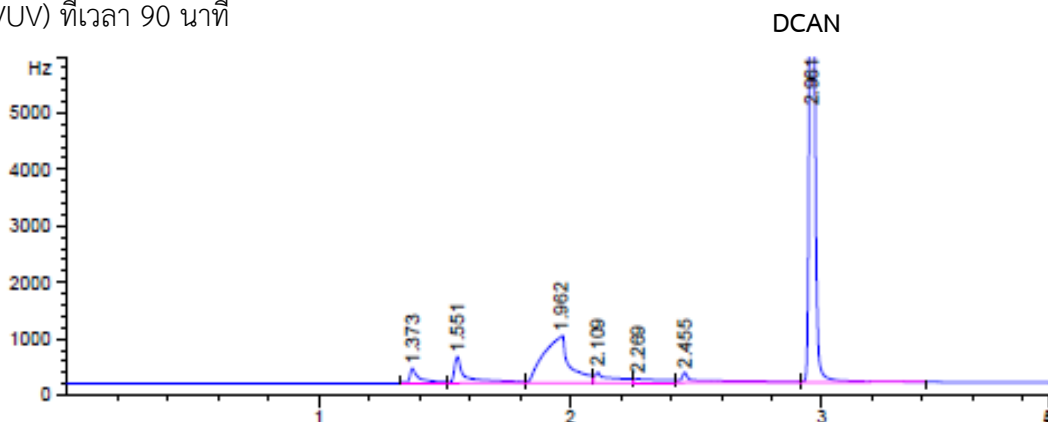
ภาพที่ จ.3 การสลายโมนোকโลโรแอซีไตนไตรล์ (MCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) ที่เวลา 90 นาที



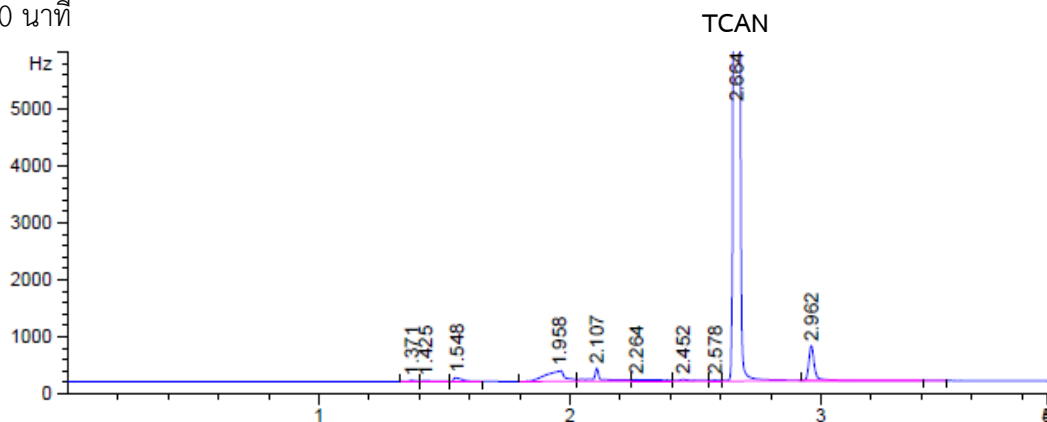
ภาพที่ จ.4 การสลายไดคลอโรแอซีไตนไตรล์ (DCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) ที่เวลา 90 นาที



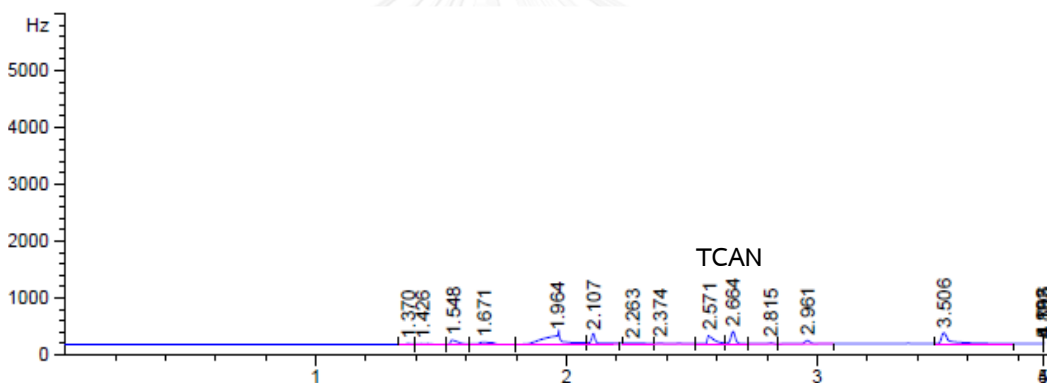
ภาพที่ จ.5 การสลายไดคลอโรแอซีไตนไตรล์ (DCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) ที่เวลา 90 นาที



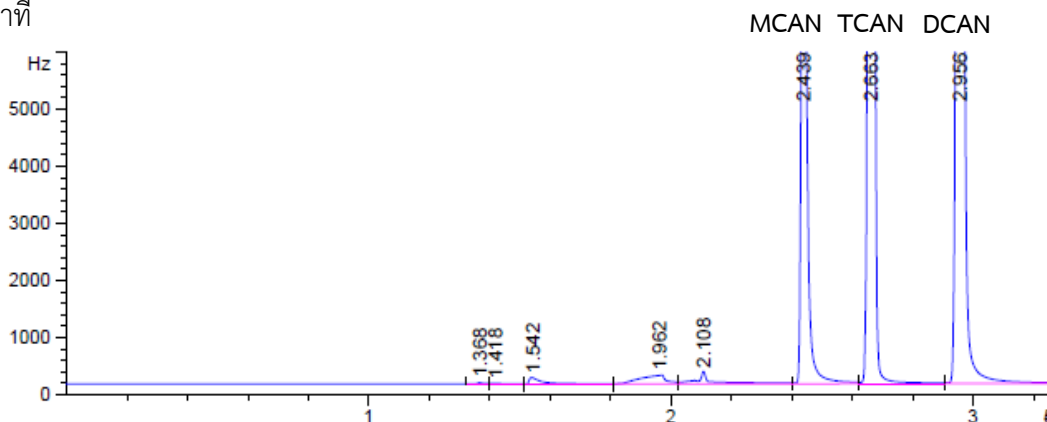
ภาพที่ จ.6 การสลายไตรคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (TCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) ที่เวลา 90 นาที



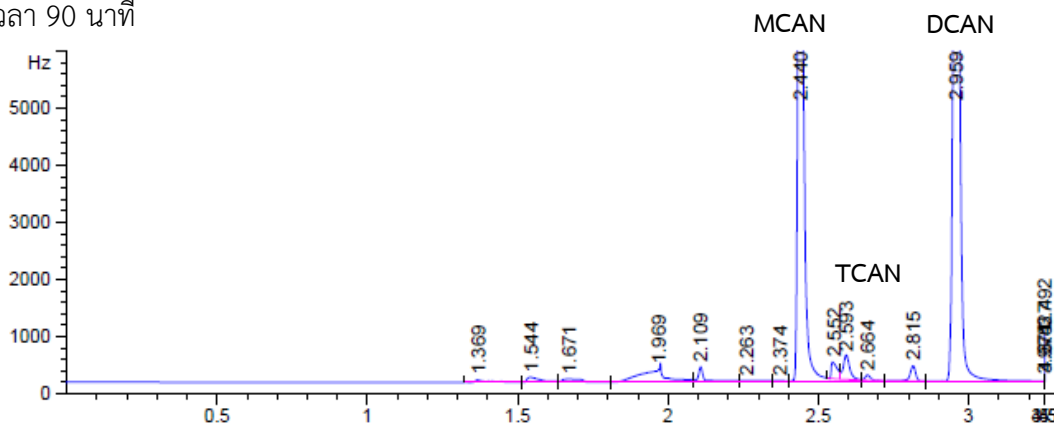
ภาพที่ จ.7 การสลายไตรคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (TCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ (VUV) ที่เวลา 90 นาที



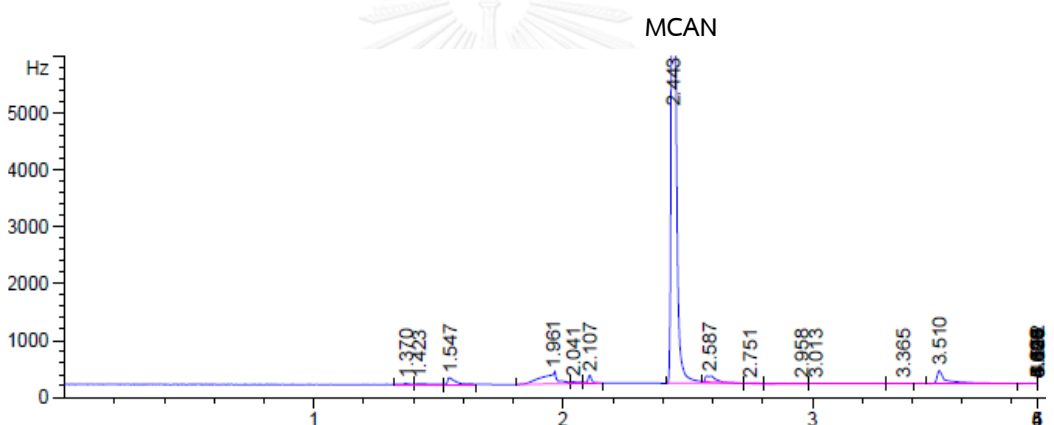
ภาพที่ จ.8 การสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์ (HANS) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซี (UV-C) ที่เวลา 90 นาที



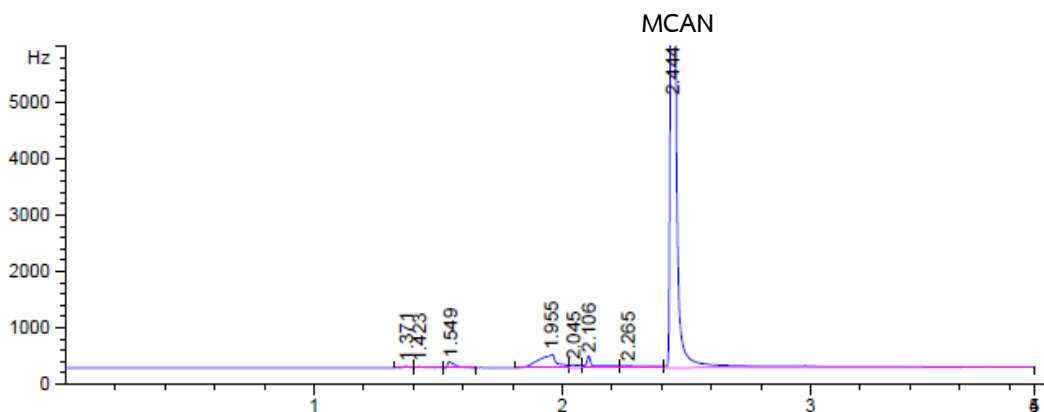
ภาพที่ จ.9 การสลายฮาโลแอซีโตไนไตรล์ (HANS) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศ (VUV) ที่เวลา 90 นาที



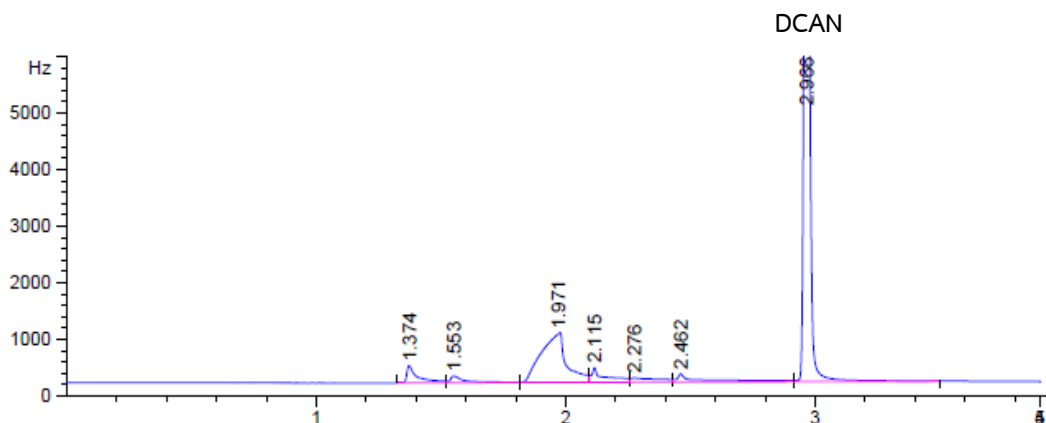
ภาพที่ จ.10 การสลายโมโนคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (MCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 mg/L) ที่เวลา 90 นาที



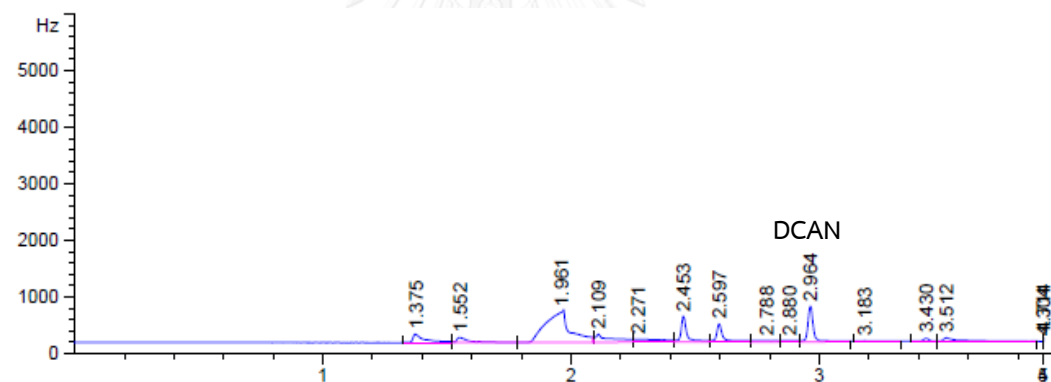
ภาพที่ จ. 11 การสลายโมโนคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (MCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 mg/L) ที่เวลา 90 นาที



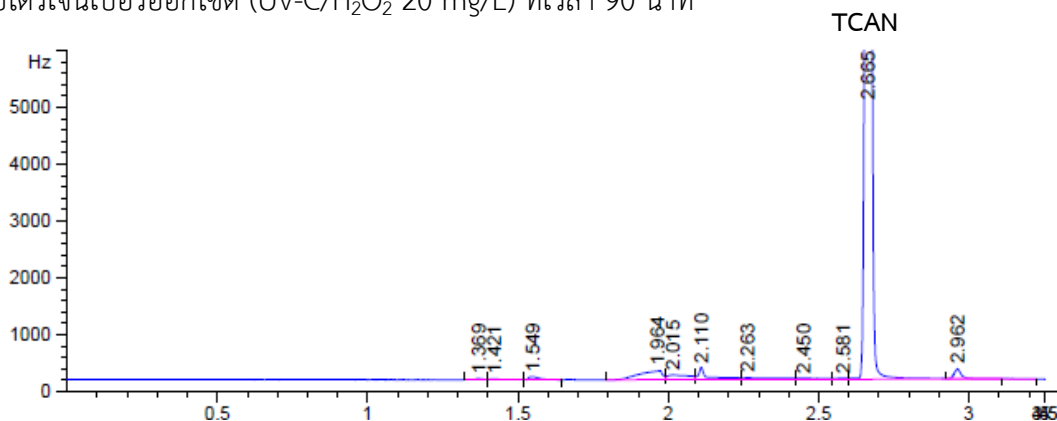
ภาพที่ จ.12 การสลายไดคลอโรแอสिटไนไตรล์ (DCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 mg/L) ที่เวลา 90 นาที



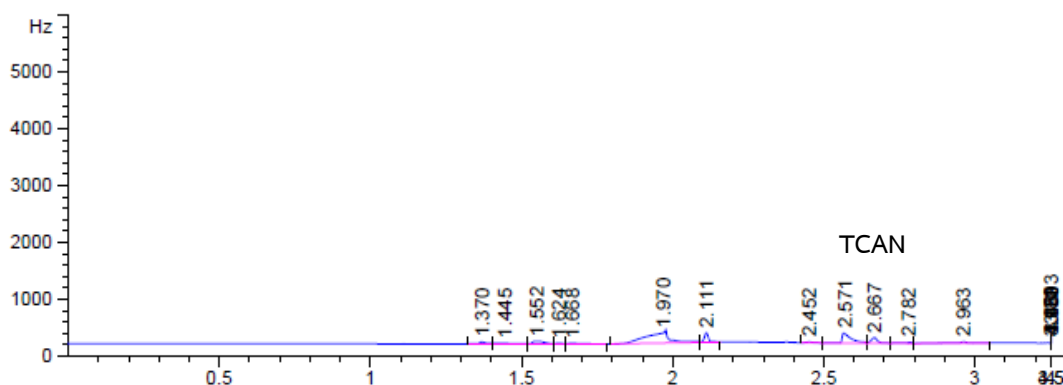
ภาพที่ จ.13 การสลายไดคลอโรแอสिटไนไตรล์ (DCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 mg/L) ที่เวลา 90 นาที



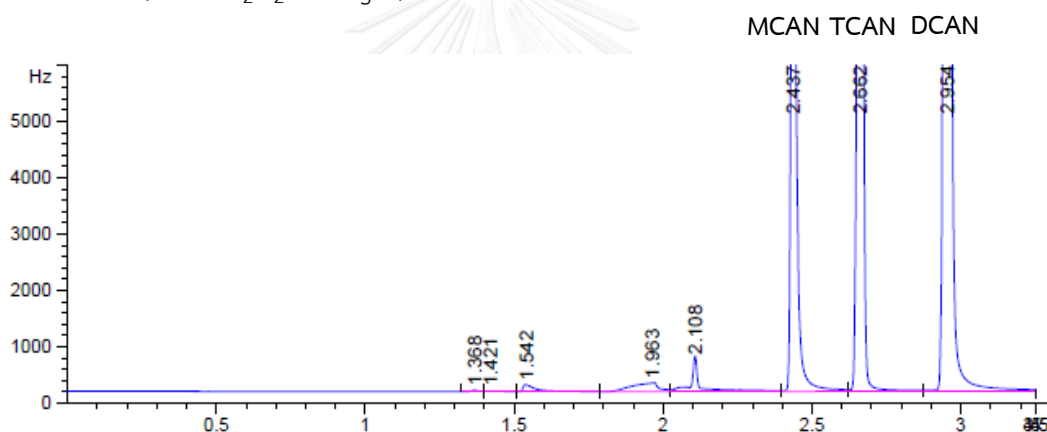
ภาพที่ จ.14 การสลายไตรคลอโรแอสिटไนไตรล์ (TCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 mg/L) ที่เวลา 90 นาที



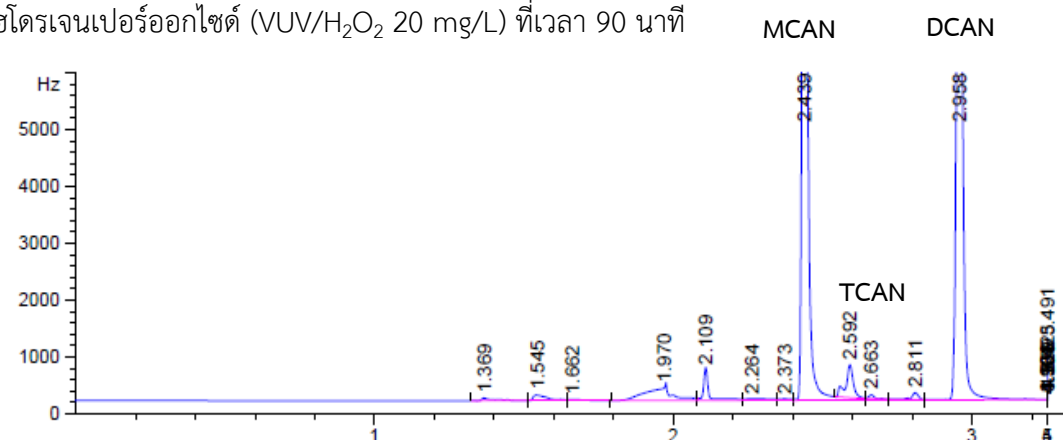
ภาพที่ จ.15 การสลายไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์ (TCAN) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศ ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 mg/L) ที่เวลา 90 นาที



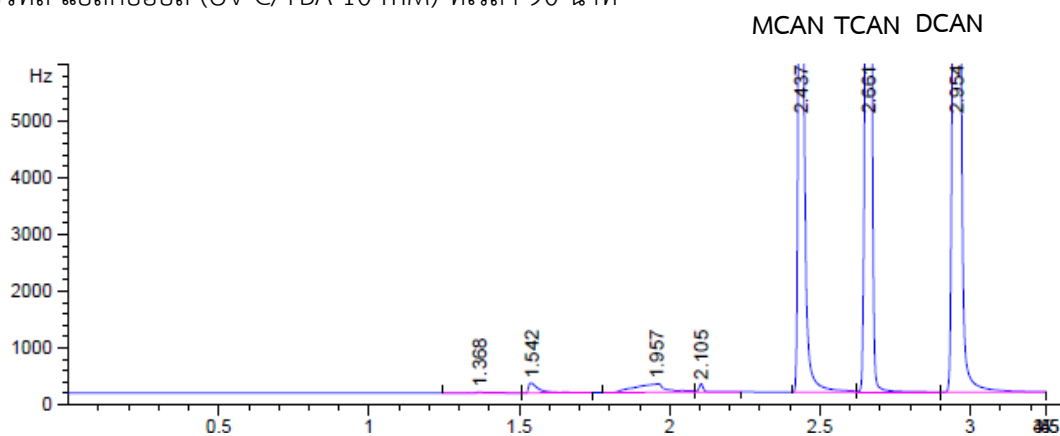
ภาพที่ จ.16 การสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ (HANS) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV-C/H₂O₂ 20 mg/L) ที่เวลา 90 นาที



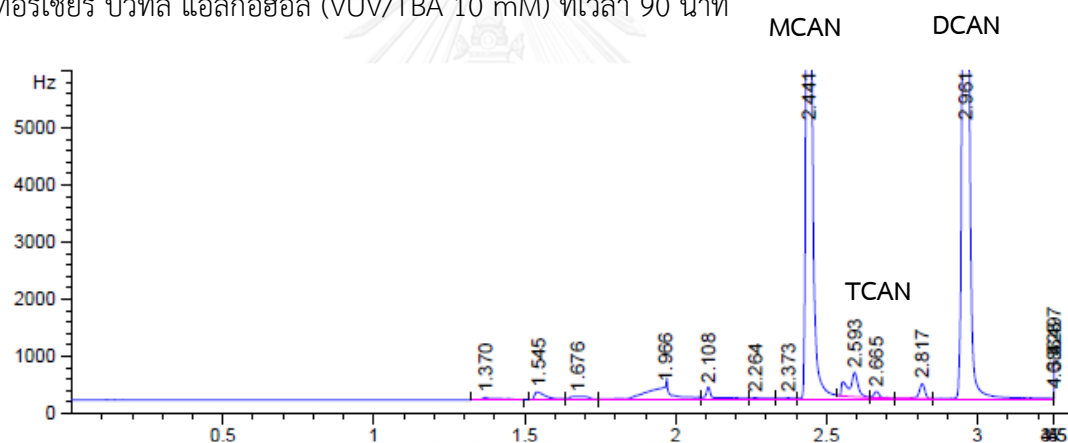
ภาพที่ จ.17 การสลายฮาโลเอซีไตนไตรล์ (HANS) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (VUV/H₂O₂ 20 mg/L) ที่เวลา 90 นาที



ภาพที่ จ.18 การสลายฮาโลแอกซีโตนไทรล์ (HANS) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดซีร่วมกับเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (UV-C/TBA 10 mM) ที่เวลา 90 นาที



ภาพที่ จ.19 การสลายฮาโลแอกซีโตนไทรล์ (HANS) ด้วยแสงอัลตราไวโอเลตชนิดสุญญากาศร่วมกับเทอร์เชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (VUV/TBA 10 mM) ที่เวลา 90 นาที



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเกียรติศักดิ์ นักบุญ เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม เมื่อปี การศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี การศึกษา 2555

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่ได้รับการเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ สิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 14 จัดที่โรงแรมโลตัส ปางสวนแก้ว จังหวัดเชียงใหม่ ในหัวข้อ การ สลายไดคลอโรเอซีไตนไตรลีนน้ำด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ ในระหว่างวันที่ 27 – 29 พฤษภาคม 2558