

การกำจัดโมโนคลอโรอะซิโตนไนไตรล์ด้วยกระบวนการยูวีแอลอีดีคลอรีนและยูวีคลอรีนออกซิเดชัน Removal of Monochloroacetonitrile by UV-LED/Chlorine and VUV/Chlorine Oxidation Process

สมพงษ์ สุนทะโร (Somphong Soontharo)* ดร.ธัญลักษณ์ ราชภูริภักดี (Dr.Thunyalux Ratpukdi)**

บทคัดย่อ

ฮาโลอะซิโตนไนไตรล์ (HANs) จัดเป็นสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคกลุ่มไนโตรเจน เกิดจากสารฆ่าเชื้อโรค (คลอรีน คลอรามิน หรือคลอรีนไดออกไซด์) ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา HANs ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีความเป็นพิษมากกว่าสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคที่ถูกควบคุม เช่น ไตรฮาโลมีเทนและกรด ฮาโลอะซิติก UV-Cl₂ based AOPs เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ โดยกระตุ้น Cl₂ ในกระบวนการ เพื่อสร้าง Cl•, •Cl₂⁻ และ •OH ปัจจุบัน UV แบบไดโอดเปล่งแสง (UV-LED) ได้รับความสนใจจากนักวิจัย งานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการกำจัดโมโนคลอโรอะซิโตนไนไตรล์ (MCAN) ด้วย UV-LED VUV และผลของปริมาณ Cl₂ ต่อการกำจัด MCAN จากการศึกษาพบว่า MCAN ถูกกำจัดด้วย VUV/Cl₂ ได้ดีกว่า VUV UV-LED/Cl₂ UV-LED และ Cl₂ เพียงอย่างเดียว โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ประโยชน์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการ UV-LED และ VUV เพื่อกำจัด MCAN ในน้ำดื่มที่ผลิตจากน้ำประปา

ABSTRACT

Haloacetonitriles (HANs) are categorized as nitrogenous disinfection byproducts (N-DBPs). HANs are formed by the reaction of disinfectants (chlorine, chloramine, or chlorine dioxide) with dissolved organic nitrogen. During the past decade, HANs has received more attention because it has more toxicity compared to regulated DBPs (trihalomethanes and haloacetic acids). UV-Cl₂ based AOPs are an effective treatment processes to remove organic contaminants by activating chlorine to generate oxidizing radical species (Cl•, •Cl₂⁻, and •OH). In recent years, UV-LED has gained attention by researchers. This work investigated the removal of monochloroacetonitrile (MCAN) by UV-LED and VUV. The effect of Cl₂ dose with respect to MCAN removal was also examined. The results show that first order rate constants for MCAN removal. The removal efficiencies of MCAN by VUV/Cl₂ has better than VUV alone, UV-LED/Cl₂ UV-LED and Cl₂ alone. The benefit of this study is to investigate the feasibility of using UV-LED process to remove MCAN in drinking water from tap water.

คำสำคัญ: โมโนคลอโรอะซิโตนไนไตรล์ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ยูวีแอลอีดี

Keywords: Monochloroacetonitrile, Advanced oxidation processes, UV-LED

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ศูนย์วิจัยเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อมและ
สารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (คสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทนำ

ฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles; HANs) จัดเป็นสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคกลุ่มไนโตรเจน (Nitrogenous disinfection byproducts; N-DBPs) HANs เกิดจากสารฆ่าเชื้อโรค คลอรีน (Chlorine; Cl₂) คลอรามิน หรือ คลอรีนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (Dissolved organic nitrogen, DON) (Kiattisaksiri, Khan, Punyapalukul, & Ratpukdi, 2016; Muellner et al., 2007) ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา HANs ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีความเป็นพิษมากกว่าสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection byproducts; DBPs) ที่ถูกควบคุม เช่น ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes; THMs) และกรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic acids; HAAs) (Wagner & Plewa, 2017)

HANs ประกอบด้วย 7 สารประกอบ ได้แก่ โมโนคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (Monochloroacetonitrile; MCAN) ไดคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (Dichloroacetonitrile; DCAN) ไตรคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (Trichloroacetonitrile; TCAN) โมโนโบรโมอะซิโตไนไตรล์ (Monobromoacetonitrile; MBAN) โบรโมคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (Bromochloroacetonitrile; BCAN), ไดโบรโมอะซิโตไนไตรล์ (Dibromoacetonitrile; DBAN) และไอโอดออะซิโตไนไตรล์ (Iodoacetonitrile; IAN) ในกลุ่มเหล่านี้ DCAN ถูกตรวจพบมากที่สุดในน้ำประปา (World Health Organization [WHO], 2017) ในหลายพื้นที่ที่ตรวจพบ HANs ในน้ำประปา อยู่ในช่วง 0.6-24 µg/L (Mian, Hu, Hewage, Rodriguez, & Sadiq, 2018) ในสหรัฐอเมริกา แคนาดา และสกอตแลนด์ ความเข้มข้นของ DCAN DBAN และ BCAN โดยปกติตรวจพบต่ำกว่า 10 µg/L (Goslan et al., 2009; Krasner et al., 1989; Williams, LeBel, & Benoit, 1997) ในออสเตรเลียโดยปกติตรวจพบความเข้มข้นเฉลี่ยแต่ละชนิดของ HANs (MCAN, MBAN, BCAN, DBAN, DCAN, TCAN) ต่ำกว่า 3 µg/L (Liew, Linge, & Joll, 2016) แต่ในบางพื้นที่ความเข้มข้นสูงสุดรวมของ 4 ชนิด (DCAN, BCAN, DBAN และ TCAN) ตรวจพบสูงถึง 36 µg/L (Bond, Huang, Templeton, & Graham, 2011) และในประเทศไทยตรวจพบ HANs (DCAN TCAN และ DBAN) สูงถึง 30 µg/L (Ratpukdi, Sinorak, Kiattisaksiri, Punyapalukul, & Siripattanakul-Ratpukdi, 2019) HANs มีความเป็นพิษที่มีผลอย่างรุนแรงและเรื้อรังต่อเซลล์สารพันธุกรรม โดยความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity, Chinese hamster overall cell (CHO) chronic cytotoxicity assays) DBAN มีความเป็นพิษสูงสุด MBAN IAN BCAN DCAN MCAN และ TCAN มีความเป็นพิษน้อยลงตามลำดับ ขณะที่ความเป็นพิษต่อสารพันธุกรรม (Genotoxicity, CHO single cell gel electrophoresis assays) IAN มีความเป็นพิษสูงสุด MBAN DBAN BCAN MCAN TCAN และ DCAN มีความเป็นพิษน้อยลงตามลำดับ (Wagner & Plewa, 2017) ปัจจุบันองค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO) ได้ให้คำแนะนำปริมาณความเข้มข้นในน้ำดื่มสำหรับ DCAN และ DBAN ไม่เกิน 20 และ 70 µg/L ตามลำดับ (WHO, 2017)

วิธีการกำจัด HANs ในน้ำดื่มสำหรับผู้บริโภคแบบหนึ่งคือการปรับปรุงระบบเครื่องกรองน้ำให้มีขีดความสามารถในการกำจัด HANs ได้ ซึ่งเรียกว่าการบำบัด ณ จุดใช้งาน (point of use, POU) โดยทั่วไปแล้วในการบำบัดขั้นสุดท้ายของ POU จะมีแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) เพื่อใช้สำหรับฆ่าเชื้อโรคในน้ำก่อนบริโภค อีกทั้งยังกระตุ้น Cl₂ ที่คงเหลือในน้ำประปาทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation processes, AOPs) (UV-Cl₂ based AOPs) (Fang, Fu, & Shang, 2014; D. Wang, 2015) จึงสามารถกำจัด HANs ได้

UV-Cl₂ based AOPs เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ (Khan, Gagnon, Templeton, & Dionysiou, 2018) ในทางปฏิบัติโดยปกติแล้ว UV ที่ใช้เป็นหลอดที่มีความดันไอปรอทต่ำและปานกลาง อย่างไรก็ตามหลอด UV เหล่านี้มีอายุการใช้งานที่สั้น ใช้พลังงานมากและมีมลพิษที่เกิดจากปรอท ปัจจุบัน UV แบบไดโอดเปล่งแสง (UV light emitting diode; UV-LED) ได้รับความสนใจจากนักวิจัย เนื่องจากมีข้อดีหลายอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับหลอด UV แบบเดิม เช่น ระยะเวลาทำให้หลอด UV พร้อมใช้งานต่ำ ใช้งานง่าย ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ และที่สำคัญไม่มีปรอท นอกจากนี้ยัง

พบว่า UV-LED มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าหลอด UV แบบเดิม (3,000-50,000 ชั่วโมง กับ 5,000-12,000 ชั่วโมง) (Chen, Loeb, & Kim, 2017; Ibrahim, MacAdam, Autin, & Jefferson, 2014; U.S. Department of Energy, 2014) ดังนั้นจึงทำให้ UV-LED เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับ Point of use treatment system แวกคู่อัลตราไวโอเล็ต (Vacuum ultraviolet; VUV) เป็นอีกตัวเลือกหนึ่งที่ถูกใช้กำจัดสารอินทรีย์ใน AOPs โดยข้อดีของ VUV นั้นสามารถสร้าง OH[•] ได้จากน้ำโดยไม่ต้องเติมสารเคมี อีกทั้งยังมีการใช้งานที่ง่าย (Kiattisaksiri et al., 2016).

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ UV-LED และ VUV สารฆ่าเชื้อโรค เช่น Cl₂ ถูกเติมในกระบวนการ ทำให้เกิด Cl[•] ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความรุนแรง (Liu, Ye, Ou, & Lin, 2017; W. L. Wang et al., 2017) กระบวนการ UV-LED ออกซิเดชันด้วย Cl₂ สามารถกำจัดไอบูโพรเฟน (Ibuprofen) และไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene) ได้สำเร็จ (Kwon et al., 2018) การศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการ UV-LED ออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H₂O₂) หรือ Cl₂ ถูกรายงานว่า UV-LED/Cl₂ มีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บามาเซพีน (Carbamazepine) สูงกว่า UV-LED/H₂O₂ (W. L. Wang et al., 2017) รวมทั้งกระบวนการ VUV ออกซิเดชันด้วย Cl₂ สามารถกำจัดยูรีดินและซัลฟาเมธาซีนได้อย่างสมบูรณ์ (Li et al., 2018, 2016)

แม้ว่าการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ปนเปื้อนด้วย UV-LED/Cl₂ และ VUV/Cl₂ ถูกดำเนินการไปแล้วหลายสาร แต่การกำจัด MCAN ยังไม่มีการศึกษาการกำจัด ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการกำจัด MCAN ด้วย UV-LED VUV และผลของปริมาณ Cl₂ ต่อการกำจัด MCAN

วัตถุประสงค์การวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นได้ในการใช้กระบวนการ UV-LED และ VUV ในการกำจัด MCAN ในน้ำดื่มที่ผลิตจากน้ำประปา

วิธีการวิจัย

การเตรียมน้ำตัวอย่าง MCAN สังเคราะห์

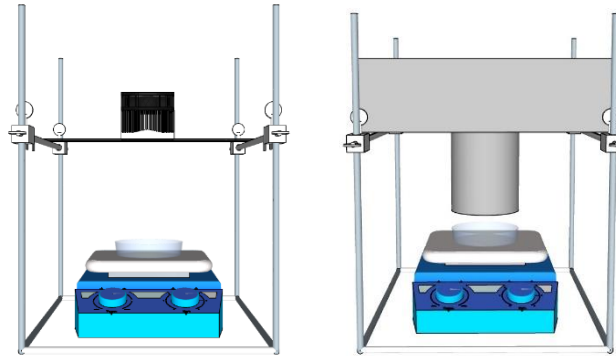
น้ำตัวอย่าง MCAN (98%, Wako, Japan) สังเคราะห์ถูกเตรียมด้วยการละลายในอะซิโตนและเจือจางให้มีความเข้มข้น 100 µg/L ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มี Ionic strength 10 mM (Prarat, Ngamcharussrivichai, Khaodhjar, & Punyapalakul, 2011) (pH 7) ซึ่งเตรียมจาก Na₂HPO₄·7H₂O (Panreac, Spain) และ NaH₂PO₄·H₂O (Carlo Erba, France)

การเตรียมสารละลาย Cl₂

การทดลอง UV-LED/Cl₂ VUV/Cl₂ และ Cl₂ จะใช้ Cl₂ ความเข้มข้น 4 mg/L โดยเตรียมจากสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Sodium hypochlorite, NaOCl, Hyter, Thailand) ซึ่งจะต้องวิเคราะห์ความเข้มข้นของ Cl₂ ในขวดก่อนโดยใช้วิธีวิเคราะห์ไอโอดิเมตริก วิธีที่ 1 (Iodometric method I) จากนั้นเจือจางต่อด้วยน้ำดีไอออนซีให้มีความเข้มข้น 1,000 mg-Cl₂/L วิเคราะห์ความเข้มข้นของ Cl₂ อีกครั้ง แล้วจึงนำไปเจือจางต่อด้วยน้ำตัวอย่าง MCAN สังเคราะห์ให้มีความเข้มข้น 4 mg-Cl₂/L ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของ Cl₂ คงเหลือในน้ำประปา

การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ UV-LED และ VUV

การทดลองใช้ UV-LED (275-280 nm, 80-100 mW, model TY-UVC-COB-275-280nm-100-B, TaoYuan Electron (HK) Limited, Hong Kong) พร้อม Heat sink และหลอด VUV (185 + 254 nm, model GPH383T5/VH/HO, Universal Lights Source, Inc., San Francisco, CA, USA) ใน Coordinate beam ในตำแหน่ง 7 cm เหนือ Petri Dish (Ø 100 mm × 15 mm) (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 การติดตั้ง UV-LED และ VUV

การออกแบบและขั้นตอนการทดลอง

ชุดการทดลอง UV-LED Oxidation ประกอบด้วย 1) UV-LED/Cl₂ และ ชุดควบคุมได้แก่ 2) Cl₂ และ 3) UV-LED และชุดการทดลอง VUV Oxidation ประกอบด้วย 1) VUV/Cl₂ และ ชุดควบคุมได้แก่ 2) Cl₂ และ 3) VUV จะทำในถึงปฏิกรณ์แบบกะ (Batch) โดยใช้สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ที่มี MCAN ปริมาตร 50 mL มี pH 7 ตรวจสอบด้วยเครื่องวัด pH (HACH sension 2, USA) โดยเติมสารละลาย NaOCl ให้มีความเข้มข้นของคลอรีนเท่ากับ 4 mg-Cl₂/L ในการทำปฏิกิริยาเก็บน้ำตัวอย่างครั้งละ 5 mL ในช่วงเวลา 0 5 15 30 45 และ 60 min น้ำตัวอย่างถูกรักษาด้วยการเติมกรดอะซิติกเข้มข้น 1 M ปริมาตร 100 µL เพื่อป้องกันการไฮโดรไลซิสของ MCAN โดยการทดลองแต่ละชุดทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

วิธีการวิเคราะห์

ความเข้มข้นของ MCAN จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีชนิดไอซีดี (GC-ECD, Agilent 4890D, USA) หลังจากการสกัด Liquid-Liquid Extraction โดยใช้ USEPA method 551.1 (Munch & Hautman, 1995) น้ำตัวอย่าง 5 mL ใส่ลงในขวดใสที่มีปริมาตร 40 mL ที่มีฝาเป็น Polypropylene และมี Septum ที่ทำจาก Telfon[®] เติม Na₂SO₄ (Carlo Erba, France) 1 g เติมน้ำด้วย Muffle furnace ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 30 min และทิ้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้นก่อนนำมาทำการสกัด เติม Methyl-t-Butyl Ether (MtBE, HPLC grade, RCI Labscan, Thailand) 5 mL จากนั้นเขย่าขวดเป็นเวลา 2 min และตั้งทิ้งไว้ 4 min ให้ MtBE แยกชั้นจึงเก็บใส่ขวดสีชาที่มีปริมาตร 2 mL และเก็บไว้ในช่องแช่แข็ง (<-10 °C) จนกว่าจะทำการวิเคราะห์ ซึ่งจะต้องวิเคราะห์ภายใน 7 วัน

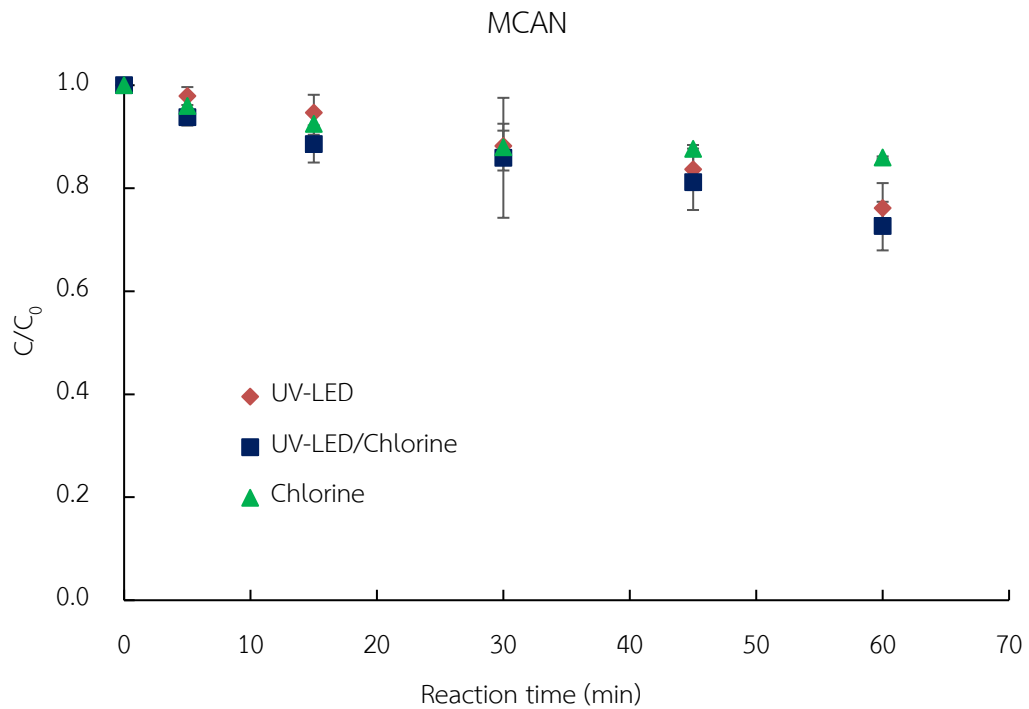
วิเคราะห์ความเข้มข้นของ MCAN (Extraction solvent 1 μ L) ด้วยเครื่อง GC-ECD คอลัมน์ชนิด fused silica capillary (HP-5, 30 m \times 0.25 mm I.D. \times 0.25 μ m film thickness, Agilent, USA) คอลัมน์ head pressure 2 psi อัตราการไหลของ Carrier gas (He gas) 1.3 mL/min อัตราการไหลทั้งหมด (He + N₂ gas) 40 mL/min ตั้งอุณหภูมิ Injection port และ Detector ที่ 200 °C และ 250 °C ตามลำดับ ส่วน GC temperature program เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 5 min จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปที 240 °C โดยเพิ่มขึ้นในอัตรา 40 °C/min เมื่อถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ให้คงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 min

ผลการวิจัย

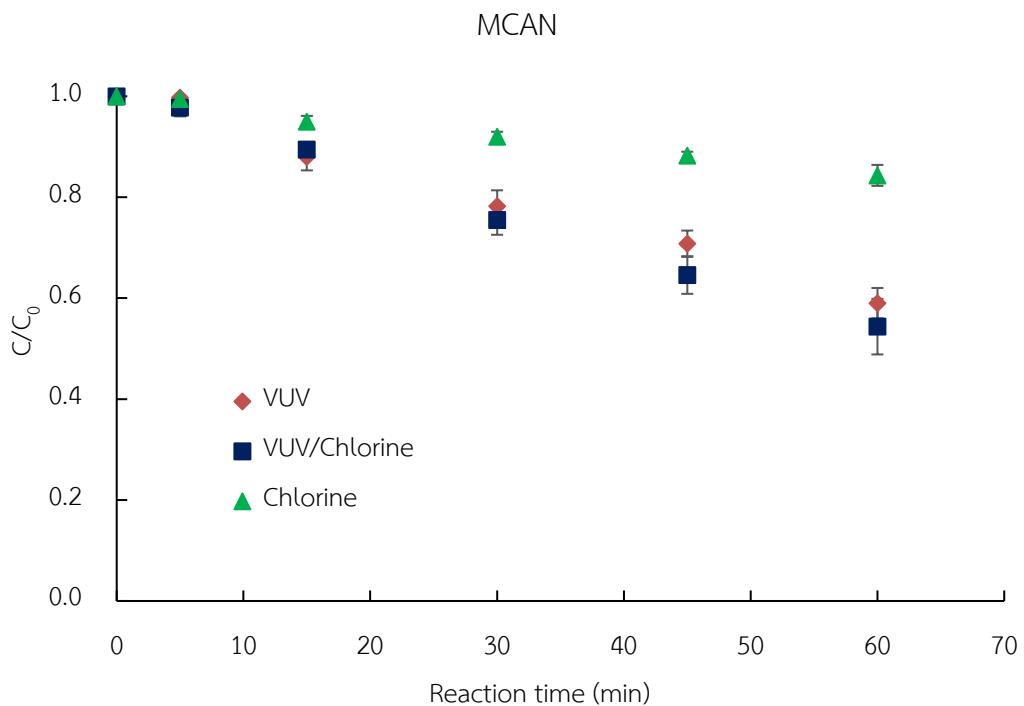
จากการศึกษาพบว่าผลการทดลองของกระบวนการ UV-LED และ VUV เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสำหรับการกำจัด MCAN ซึ่งการทดลองของ UV-LED พบว่ามีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา UV-LED/Cl₂ สูงกว่า UV-LED เพียงอย่างเดียว และ Cl₂ เพียงอย่างเดียว สำหรับการทดลองของ VUV พบว่ามีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา VUV/Cl₂ สูงกว่า VUV เพียงอย่างเดียว และ Cl₂ เพียงอย่างเดียว (ตารางที่ 1) อีกทั้งประสิทธิภาพการกำจัด MCAN สำหรับ UV-LED/Cl₂ UV-LED และ Cl₂ คือ 27.35% 23.87% และ 14.03% ตามลำดับ (รูปที่ 2) และประสิทธิภาพการกำจัด MCAN สำหรับ VUV/Cl₂ VUV และ Cl₂ คือ 45.65% 40.99% และ 15.67% ตามลำดับ (รูปที่ 3)

ตารางที่ 1 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพการกำจัด MCAN

การทดลอง	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k, min^{-1})	ประสิทธิภาพการกำจัดที่ 60 min (%)
UV-LED Oxidation		
UV-LED/Cl ₂	0.0056	27.35
UV-LED	0.0044	23.87
Cl ₂	0.0024	14.03
VUV Oxidation		
VUV/Cl ₂	0.0104	45.65
VUV	0.0087	40.99
Cl ₂	0.0028	15.67



รูปที่ 2 ความเข้มข้นของ MCAN (C/C_0) ที่ pH 7 ภายใต้กระบวนการ UV-LED/ Cl_2 UV-LED และ Cl_2 , $[Cl_2] = 4 \text{ mg-}Cl_2/L$



รูปที่ 3 ความเข้มข้นของ MCAN (C/C_0) ที่ pH 7 ภายใต้กระบวนการ VUV/ Cl_2 VUV และ Cl_2 , $[Cl_2] = 4 \text{ mg-}Cl_2/L$

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองพบว่า Cl_2 ไม่สามารถกำจัด MCAN ได้ดีเท่าที่ควร เนื่องจาก Cl_2 มีการคัดเลือกสูง รวมทั้งปฏิกิริยาจะจำกัดการทำปฏิกิริยากับเฉพาสาร (สารประกอบอินทรีย์แอลิแฟติกและสารประกอบอะโรมาติก) (Deborde & von Gunten, 2008) ส่วน UV-LED และ VUV สามารถสร้าง $\bullet OH$ จากน้ำ และยังกระตุ้น Cl_2 ในกระบวนการ เพื่อสร้าง $Cl\bullet$ และ $\bullet OH$ สำหรับ $Cl\bullet$ เป็นสารออกซิไดซ์ที่กำจัด MCAN ได้ดีกว่า $\bullet OH$ เนื่องจาก $Cl\bullet$ ตอบสนองเชิงบวกกับสารปนเปื้อนที่อุดมด้วยอิเล็กตรอน อีกทั้ง UV-LED และ VUV ยังง่ายต่อการติดตั้งใน POU ที่สามารถแทนที่หลอด UV ที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค (Miklos et al., 2018) ดังนั้น VUV/ Cl_2 มีประสิทธิภาพการกำจัด MCAN สูงกว่า VUV UV-LED/ Cl_2 UV-LED และ Cl_2 เพียงอย่างเดียว

MCAN ถูกกำจัดด้วย VUV/ Cl_2 ได้ดีกว่า VUV UV-LED/ Cl_2 UV-LED และ Cl_2 เพียงอย่างเดียว โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ประโยชน์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการ UV-LED และ VUV เพื่อกำจัด MCAN ในน้ำดื่มที่ผลิตจากน้ำประปาในระบบ POU

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัยสำหรับคณาจารย์บัณฑิตศึกษาเพื่อให้สามารถรับนักศึกษาที่มีความสามารถและศักยภาพสูงเข้าศึกษาในหลักสูตรและทำวิจัยในสาขาที่อาจารย์มีความเชี่ยวชาญ ประจำปีการศึกษา 2560 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ศูนย์วิจัยเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้งการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์วิจัยจากสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- Bond, T., Huang, J., Templeton, M. R., & Graham, N. (2011). Occurrence and control of nitrogenous disinfection by-products in drinking water - A review. *Water Research* 45(15), 4341–4354. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.05.034>
- Chen, J., Loeb, S., & Kim, J.-H. (2017). LED revolution: fundamentals and prospects for UV disinfection applications. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 3(2), 188–202. <https://doi.org/10.1039/C6EW00241B>
- Deborde, M., & von Gunten, U. (2008, January). Reactions of chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment-Kinetics and mechanisms: A critical review. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.025>
- Fang, J., Fu, Y., & Shang, C. (2014). The roles of reactive species in micropollutant degradation in the UV/free chlorine system. *Environmental Science and Technology*, 48(3), 1859–1868. <https://doi.org/10.1021/es4036094>
- Goslan, E. H., Krasner, S. W., Bower, M., Rocks, S. A., Holmes, P., Levy, L. S., & Parsons, S. A. (2009). A comparison of disinfection by-products found in chlorinated and chloraminated drinking waters in Scotland. *Water Research*, 43(18), 4698–4706. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2009.07.029>
- Ibrahim, M. A. S., MacAdam, J., Autin, O., & Jefferson, B. (2014). Evaluating the impact of LED bulb development on the economic viability of ultraviolet technology for disinfection. *Environmental Technology*, 35(4), 400–406. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.829858>

- Khan, S. J., Gagnon, G. A., Templeton, M. R., & Dionysiou, D. D. (2018). The rapidly growing role of UV-AOPs in the production of safe drinking water. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 4(9), 1211–1212. <https://doi.org/10.1039/c8ew90033g>
- Kiattisaksiri, P., Khan, E., Punyapalakul, P., & Ratpukdi, T. (2016). Photodegradation of haloacetonitriles in water by vacuum ultraviolet irradiation: Mechanisms and intermediate formation. *Water Research*, 98, 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.010>
- Krasner, S. W., McGuire, M. J., Jacangelo, J. G., Patania, N. L., Reagan, K. M., & Aieta, E. M. (1989). The Occurrence of Disinfection By-products in US Drinking Water. *Journal - American Water Works Association*, 81(8), 41–53. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1989.tb03258.x>
- Kwon, M., Yoon, Y., Kim, S., Jung, Y., Hwang, T.-M., & Kang, J.-W. (2018). Removal of sulfamethoxazole, ibuprofen and nitrobenzene by UV and UV/chlorine processes: A comparative evaluation of 275 nm LED-UV and 254 nm LP-UV. *Science of The Total Environment*, 637–638, 1351–1357. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.080>
- Li, M., Hao, M., Yang, L., Yao, H., Bolton, J. R., Blatchley, E. R., & Qiang, Z. (2018). Trace Organic Pollutant Removal by VUV/UV/chlorine Process: Feasibility Investigation for Drinking Water Treatment on a Mini-Fluidic VUV/UV Photoreaction System and a Pilot Photoreactor. *Environmental Science and Technology*, 52(13), 7426–7433. research-article. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00611>
- Li, M., Qiang, Z., Hou, P., Bolton, J. R., Qu, J., Li, P., & Wang, C. (2016). VUV/UV/Chlorine as an Enhanced Advanced Oxidation Process for Organic Pollutant Removal from Water: Assessment with a Novel Mini-Fluidic VUV/UV Photoreaction System (MVPS). *Environmental Science and Technology*, 50(11), 5849–5856. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00133>
- Liew, D., Linge, K. L., & Joll, C. A. (2016). Formation of nitrogenous disinfection by-products in 10 chlorinated and chloraminated drinking water supply systems. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5529-3>
- Liu, J., Ye, J. shao, Ou, H. se, & Lin, J. (2017). Effectiveness and intermediates of microcystin-LR degradation by UV/H₂O₂ via 265 nm ultraviolet light-emitting diodes. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4676–4684. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8148-1>
- Mian, H. R., Hu, G., Hewage, K., Rodriguez, M. J., & Sadiq, R. (2018). Prioritization of unregulated disinfection by-products in drinking water distribution systems for human health risk mitigation: A critical review. *Water Research*, 147, 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.054>
- Miklos, D. B., Remy, C., Jekel, M., Linden, K. G., Drewes, J. E., & Hübner, U. (2018). Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – A critical review. *Water Research*, 139, 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.042>
- Muellner, M. G., Wagner, E. D., Mccalla, K., Richardson, S. D., Woo, Y. T., & Plewa, M. J. (2007). Haloacetonitriles vs. regulated haloacetic acids: Are nitrogen-containing DBFs more toxic? *Environmental Science and Technology*, 41(2), 645–651. <https://doi.org/10.1021/es0617441>

- Munch, D., & Hautman, D. (1995). Method 551.1: Determination of chlorination disinfection byproducts, chlorinated solvents , and halogenated pesticides/ herbicides in drinking water by liquid-liquid extraction and gas chromatography with electron-capture detection. *Environmental Protection*, 1–61.
- Prarat, P., Ngamcharussrivichai, C., Khaodhiar, S., & Punyapalakul, P. (2011). Adsorption characteristics of haloacetonitriles on functionalized silica-based porous materials in aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 192(3), 1210–1218. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.032>
- Ratpukdi, T., Sinorak, S., Kiattisaksiri, P., Punyapalakul, P., & Siripattanakul-Ratpukdi, S. (2019). Occurrence of trihalomethanes and haloacetonitriles in water distribution networks of Khon Kaen Municipality, Thailand. *Water Science and Technology: Water Supply*, 19(6), 1748–1757. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.049>
- U.S. Department of Energy. (2014). *Lifetime of White LEDs*. Retrieved from <http://www.netl.doe.gov/ssl>
- Wagner, E. D., & Plewa, M. J. (2017). CHO cell cytotoxicity and genotoxicity analyses of disinfection by-products: An updated review. *Journal of Environmental Sciences*, 58, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.04.021>
- Wang, D. (2015). *Application of the UV/Chlorine advanced oxidation process for drinking water treatment*. University of Toronto.
- Wang, W. L., Wu, Q. Y., Li, Z. M., Lu, Y., Du, Y., Wang, T., ... Hu, H. Y. (2017). Light-emitting diodes as an emerging UV source for UV/chlorine oxidation: Carbamazepine degradation and toxicity changes. *Chemical Engineering Journal*, 310, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.097>
- Williams, D. T., LeBel, G. L., & Benoit, F. M. (1997). Disinfection by-products in Canadian drinking water. *Chemosphere*, 34(2), 299–316. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(96\)00378-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(96)00378-5)
- World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum* (4th ed.).