

การประเมินศักยภาพในการเกิดไตรฮาโลมีเทนในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาโดยใช้เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์เอ็กซ์ไซเทชัน-อีมิสชัน เมทริกซ์

วันนีย์ เหล่าเลิศวรกุล¹ ปณิธาน จูฑาพร^{2*}

มหาวิทยาลัยขอนแก่น ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (HSM) แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

กิตติยศ ตั้งสัจจวงศ์³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

สุชาติ เหลืองประเสริฐ⁴

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10903

และ วัสตา คงนคร⁵

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

* Corresponding Author: panitju@kku.ac.th

¹ นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย (EHSM) และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (HSM)

² อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย (EHSM) และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (HSM)

³ อาจารย์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

⁴ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

⁵ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 23 มกราคม 2563

แก้ไข : 5 สิงหาคม 2563

ตอบรับ : 10 สิงหาคม 2563

คำสำคัญ :

ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา /

สารอินทรีย์ละลายน้ำ /

ไตรฮาโลมีเทน / ฟลูออเรสเซนซ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะของสารอินทรีย์ในน้ำกับศักยภาพในการเกิดสารฟลูออไรด์กลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) ในการทำปฏิกิริยากับสารฆ่าเชื้อโรคกลุ่มคลอรีน ซึ่งสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนประกอบไปด้วย คลอโรฟอร์ม โบรโมไดคลอโรมีเทน ไดโบรโมคลอโรมีเทน และโบรโมฟอร์ม โดยเก็บน้ำตัวอย่างจากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปามหาวิทยาลัยขอนแก่น เป็นระยะเวลา 7 เดือน (ธันวาคม 2560 ถึง มิถุนายน 2561) และศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์โดยการตรวจวัดค่าการดูดซับแสงที่คลื่นความยาว 254 นาโนเมตร (ultraviolet absorbance at 254 nm, UVA₂₅₄) ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC) และฟลูออเรสเซนซ์เอ็กซ์ไซเทชัน-อีมิสชัน เมทริกซ์ (fluorescence excitation-emission matrix, EEM) จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณความต้องการคลอรีนเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับค่า DOC และศักยภาพการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนทั้งสิ้น (Total THM formation potential, TTHM-FP₂₄) ของน้ำเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล คือ มีค่าสูงในช่วงเดือนธันวาคม-กุมภาพันธ์ จากนั้นมีค่าลดลงในเดือนมีนาคม-มิถุนายน การเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคลงในน้ำตัวอย่างส่งผลให้เกิดคลอโรฟอร์มสูงกว่าสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนชนิดอื่น เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ EEM ทำให้สามารถจำแนกประเภทสารอินทรีย์ได้สามประเภท คือ สารอินทรีย์ที่มีสมบัติเหมือนกรดฟูลวิก สารอินทรีย์ที่มีสมบัติเหมือนกรดฮิวมิก และสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเหมือนโปรตีน และพบว่าค่า TTHM-FP₂₄ แปรผันตามสารอินทรีย์กลุ่มกรดฮิวมิกอย่างมีนัยสำคัญ ($R^2 = 0.61, p < 0.01$) มากกว่าค่า UVA₂₅₄ และ DOC ($R^2 = 0.30-0.50, p < 0.01$) ผลจากการศึกษาสมบัติเชิงฟลูออเรสเซนซ์ของสารอินทรีย์นี้สามารถนำไปใช้เพื่อควบคุมกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาในการกำจัดสารตั้งต้นของสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนได้

Assessing Trihalomethanes (THMs) Formation Potential in a Water Supply Plant Using Fluorescence Excitation-Emission Matrix

Watjaneer Laolertworakul¹, Panitan Jutaporn^{2*},

Khon Kaen University, Tambon Naimuang, Amper Muang, Khon Kaen, Thailand, 40002, and Center of Excellence on Hazardous Substance Management (HSM), Phatumwan, Bangkok, Thailand 10330

Kitiyot Tungsudjawong³,

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangsue, Bangkok, Thailand 10800

Suchat Leungprasert⁴

Kasetsart University, Lad Yao, Chatuchak, Bangkok 10903

and Watsa Khongnakorn⁵

Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110

* Corresponding Author: panitju@kku.ac.th

¹ Graduate Student, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Research Center for Environmental and Hazardous Substance Management (EHSM), and Center of Excellence on Hazardous Substance Management (HSM).

² Lecturer, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Research Center for Environmental and Hazardous Substance Management (EHSM), and Center of Excellence on Hazardous Substance Management (HSM).

³ Lecturer, Division of Environmental Science and Technology, Faculty of Science and Technology.

⁴ Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering.

⁵ Assistant Professor, Center of Excellence in Membrane Science and Technology, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: January 23, 2020

Revised: August 5, 2020

Accepted: August 10, 2020

Keywords:

Water Treatment /

Dissolved Organic Matter /

Trihalomethanes /

Fluorescence

This research study aimed to investigate relationships between aquatic organic matter and total trihalomethanes formation potential (TTHM-FP₂₄) via the reactions with chlorine disinfectants. The trihalomethanes studied included chloroform, bromodichloromethane, dibromochloromethane and bromoform. Water samples were collected from Khon Kaen University water supply plant during 7-month period of December 2017 – June 2018. Dissolved organic matter (DOM) was characterized using ultraviolet absorbance at 254 nm (UVA₂₅₄), dissolved organic carbon (DOC) content and fluorescence excitation-emission matrix (EEM). The results indicated that water samples with higher DOC contents possessed higher chlorine demand. TTHM-FP₂₄ of raw water sources varied seasonally. Higher TTHM-FP₂₄ was noted during December 2017 – February 2018, while during March – June 2018 TTHM-FP₂₄ was lower. The dominant THM species formed during chlorination of all water samples was CHCl₃. Through the use of fluorescent EEM, DOM was characterized into three groups according to its sources and chemical characteristics viz. fulvic-like DOM, humic-like DOM and microbial protein-like DOM. TTHM-FP₂₄ significantly correlated with the humic-like DOM ($R^2 = 0.61$, $p < 0.01$), while correlated to UVA₂₅₄ and DOC to a lesser extent ($R^2 = 0.30-0.50$, $p < 0.01$). DOM characterization results via EEM should prove useful in the operational control of a water supply plant in term of THMs precursors removal.

1. บทนำ

โดยทั่วไปกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำของระบบผลิตน้ำประปา ประกอบด้วย กระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนด้วยการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (coagulation and flocculation) การตกตะกอน (sedimentation) และการกรองผ่านชั้นทราย (sand filtration) จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการฆ่าเชื้อโรค (disinfection) ก่อนจะส่งจ่ายน้ำไปตามระบบเส้นท่อประปา ซึ่งกระบวนการตกตะกอนและกรองทรายนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารแขวนลอยและความขุ่น โดยค่าประสิทธิภาพของระบบกรองทรายจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของชั้นกรอง เช่น ขนาดเม็ดของตัวกลาง (sand effective diameter, d_e) และค่าความสม่ำเสมอของขนาดเม็ดทราย (uniformity coefficient, UCs) [1] และโดยทั่วไปถึงกรองทรายมีประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคสารแขวนลอยได้ดี [2] แต่สารอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic matter, DOM) นั้น มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่า 0.45 ไมครอน [3] จึงส่งผลให้สารอินทรีย์ละลายน้ำดังกล่าว ไม่สามารถถูกกำจัดออกจากถังกรองทรายได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อผ่านมาถึงกระบวนการฆ่าเชื้อโรค ที่นิยมใช้คลอรีนหรือสารประกอบคลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อโรค สารอินทรีย์ละลายน้ำจะทำปฏิกิริยากับสารกลุ่มคลอรีน ก่อให้เกิดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (disinfection by-products, DBPs) ซึ่งสารในกลุ่มนี้ถูกรายงานว่ามีศักยภาพในการก่อมะเร็ง [4-5] สารในกลุ่ม DBPs มีหลายชนิดด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น สารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (trihalomethanes, THMs) สารกลุ่มกรดฮาโลอะซิติก (haloacetic acids, HAAs) และ สารกลุ่มฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (haloacetonitriles, HANs) เป็นต้น [6-7]

แม้ว่าสารเคมีเพื่อการฆ่าเชื้อโรคจะมีด้วยกันหลายชนิด แต่คลอรีนและสารประกอบคลอรีนก็ยังเป็นที่นิยมแพร่หลายในประเทศกำลังพัฒนา รวมถึงประเทศไทยด้วย ซึ่งผลพลอยได้จากปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนและสารอินทรีย์ละลายน้ำก่อให้เกิดสารกลุ่ม THMs และ HAAs เป็นกลุ่มหลัก [8] สารกลุ่ม THMs ประกอบไปด้วย คลอโรฟอร์ม (chloroform, CHCl_3) โบโรโมไดคลอโรมีเทน (bromodichloromethane, CHBrCl_2) ไดโบโรโมคลอโรมีเทน (dibromochloromethane, CHBr_2Cl) และ โบโรโมฟอร์ม (bromoform, CHBr_3) [4] โดยการอุปโภคและบริโภคน้ำที่ปนเปื้อนสารกลุ่ม THMs นี้ เป็นระยะเวลานาน มี

แนวโน้มเพิ่มความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งกระเพาะปัสสาวะได้ [9] และเมื่อพิจารณาค่าความเป็นพิษจากการทดลองที่ทำให้หนูตายครึ่งหนึ่ง (lethal dose, LD_{50}) พบว่า ค่า LD_{50} ของ CHCl_3 , CHBrCl_2 , CHBr_2Cl และ CHBr_3 ตามลำดับ คือ 908, 916, 1186 และ 1388 mg/kg ของน้ำหนักตัว ในหนูเพศผู้ และ 1117, 969, 848, และ 1147 mg/kg ของน้ำหนักตัว ในหนูเพศเมีย [10-11] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า CHCl_3 และ CHBrCl_2 มีความเป็นพิษกับมนุษย์ โดยมีอาการทางพิษวิทยา คือ ทำลายระบบประสาทส่วนกลาง เสียการทรงตัว ง่วงซึม เกิดความผิดปกติที่ไต และท่อไต อาการอื่นในมนุษย์ที่ได้รับคลอโรฟอร์มในปริมาณมาก คือ การหมดสติ จนถึงขั้นสามารถเสียชีวิตได้ [11]

เนื่องจากสารกลุ่ม DBPs ส่งผลเสียต่อสุขภาพอนามัยของผู้บริโภค DBPs จึงเป็นจุดสนใจหลักในงานวิจัยทางด้านคุณภาพน้ำดื่มและระบบการผลิตน้ำประปา และถูกตั้งเป็นหนึ่งในค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม ในประเทศสหรัฐอเมริกา United State Environmental Protection Agency กำหนดมาตรฐานการปนเปื้อนสูงสุดของผลรวมสารประกอบ THMs ทั้งสี่ชนิด ไว้ไม่เกิน 80 $\mu\text{g/L}$ [7] สำหรับในประเทศไทยนั้น มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค ได้เป็นไปตามเอกสารคำแนะนำคุณภาพน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (WHO) ปี 2011 ซึ่งมีการกำหนดค่าสูงสุดสำหรับสารในกลุ่ม THMs แต่ละตัว ดังนี้ คือ CHBrCl_2 60 $\mu\text{g/L}$ CHBr_3 และ CHBr_2Cl 100 $\mu\text{g/L}$ และ CHCl_3 300 $\mu\text{g/L}$ [8] และกำหนดมาตรฐานผลรวมของอัตราส่วนความเข้มข้นของสารกลุ่ม THMs แต่ละชนิดต่อค่า guideline value ไม่ควรมีค่าเกิน 1

ปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อศักยภาพการเกิด DBPs (DBP formation potential, DBP-FP) คือ ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำที่เข้าสู่ระบบฆ่าเชื้อโรคนั่นเอง เนื่องจากสารอินทรีย์มีองค์ประกอบที่หลากหลาย ประกอบกับความซับซ้อนของโครงสร้างโมเลกุล ทำให้การศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีขั้นสูง ในเบื้องต้นนั้นการตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ นิยมใช้การวัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (total organic carbon, TOC) หรือปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) การวัดปริมาณสารอินทรีย์ดังกล่าวแสดงผลในรูปแบบปริมาณมิลลิกรัมคาร์บอนต่อ 1 ลิตรของน้ำตัวอย่าง (mg-C/L) แต่ไม่สามารถจำแนกได้ว่าสารอินทรีย์นั้นมาจากแหล่งกำเนิด

ชนิดใด หรือมีองค์ประกอบโมเลกุลเช่นไร ทำให้ต้องใช้เทคนิคอื่นร่วมด้วย การตรวจวัดสมบัติเชิงแสง (Spectrophotometric analysis) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะของสารอินทรีย์ได้ เนื่องจากสารประกอบกลุ่มไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนเบนซีนเป็นองค์ประกอบ (aromatics) ในสารอินทรีย์มีการดูดซับแสงทั้งในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV ความยาวคลื่น 100-400 nm) และแสงขาวที่เรามองเห็น (visible ความยาวคลื่น 400-700 nm) การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำจึงมีผลกับสมบัติเชิงแสง (optical properties) โดยตรง ตัวอย่างเช่น การวัดการดูดซับแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 nm (UVA_{254}) สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดปริมาณสารอินทรีย์โดยรวมในน้ำได้ [3] ค่าการดูดซับแสงจำเพาะ (Specific UV absorbance, $SUVA = UVA_{254}/DOC \times 100$) (L/mg-m) แปรผันโดยตรงกับค่าความเป็น aromatic ของสารอินทรีย์ จึงสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ได้ การที่น้ำตัวอย่างมีค่า $SUVA$ สูง บ่งชี้ว่าน้ำนั้นประกอบด้วยสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิก (humic) ในปริมาณมาก [12] อีกทั้งยังมีค่าความหนาแน่นประจุ (charge density) สูง จึงเหมาะสมที่จะใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการสร้างตะกอนและรวมตะกอนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มดังกล่าว [13]

นอกจากจะดูดซับแสงแล้ว เมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นในรูปแสง โมเลกุลของสารอินทรีย์สามารถคายพลังงานในรูปของแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่าได้อีกด้วย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสารอินทรีย์โดยใช้เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์เอ็กซิเทชันอีมิสชันเมทริกซ์ (fluorescence excitation-emission matrix, EEM) ซึ่งได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการตรวจสอบติดตามการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของสารอินทรีย์ในน้ำ [14-15] การวิเคราะห์ EEM มีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์ขั้นสูงอื่นๆ คือ สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดและแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ได้ โดยใช้ตัวอย่างน้ำปริมาณน้อย ไม่ต้องมีการสกัดหรือแยกส่วนตัวอย่าง วิเคราะห์ได้รวดเร็ว และสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์มากกว่าการดูดซับแสง UV [16] มีหลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้ประยุกต์ใช้ EEM ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสารอินทรีย์ และรายงานผลว่าค่าการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกในน้ำผิวดิน มีความสัมพันธ์โดยตรง

กับการเกิดสารกลุ่ม THMs [17-20]

ดังนั้น งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ EEM ในการศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคในหน่วยต่างๆ ของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา และหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์คุณภาพน้ำกับค่าศักยภาพในการเกิด THMs ในเวลา 24 ชั่วโมง (THMs formation potential, THM-FP₂₄) โดยเก็บน้ำตัวอย่างจากหน่วยต่างๆ ในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาของมหาวิทยาลัยขอนแก่น (KKU WTP) เนื่องจาก KKU WTP มีการก่อสร้างเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงระบบและขยายกำลังการผลิตน้ำประปาจาก 500 ลบ.ม./วัน เป็น 1,000 ลบ.ม./วัน ในปี พ.ศ. 2560 และไม่เคยมีการตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลดศักยภาพการเกิด DBPs หรือสารอินทรีย์ที่เรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ ในหน่วยต่างๆ ของ KKU WTP มาก่อน แม้ว่าที่ KKU WTP จะใช้คลอรีนไดออกไซด์ (ClO₂) เป็นสารฆ่าเชื้อโรค ซึ่งปฏิกิริยาระหว่าง ClO₂ และสารอินทรีย์นั้น ก่อให้เกิดสารกลุ่ม THMs ในปริมาณน้อย แต่ KKU WTP ใช้แหล่งน้ำดิบจากลำน้ำพองที่ได้รับน้ำจากเขื่อนอุบลรัตน์ ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบเดียวกันกับระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาขนาดใหญ่ที่ใช้ในจังหวัดขอนแก่น ทำให้คุณลักษณะของสารอินทรีย์กลุ่มหลักที่พบในน้ำดิบมีลักษณะคล้ายคลึงกัน และ THMs เป็นสารกลุ่ม DBPs เพียงกลุ่มเดียวที่มีระบุไว้ในมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะมุ่งเน้นศึกษาศักยภาพในการเกิดสารกลุ่ม THMs เป็นหลัก

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 จุดเก็บตัวอย่าง และการเตรียมตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ ทำการเก็บน้ำตัวอย่างจาก KKU WTP โดยมีจุดเก็บตัวอย่างน้ำ 6 จุด คือ (1) แหล่งน้ำดิบจากสถานีสูบน้ำดิบบ้านโกทา (Kotha pump station) (2) สระรับน้ำฝนภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น (KKU reservoir) (3) ถังน้ำดิบ (raw water tank) (4) น้ำใสจากถังตกตะกอน (sedimentation tank) (5) น้ำใสจากถังกรองทราย (sand filtration tank) และ (6) น้ำประปา (tap water) ที่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคด้วย chlorine dioxide (ClO₂) ในปริมาณ 0.5 – 1.0 mg/L

ในการเก็บตัวอย่างนั้น ทำการเก็บตัวอย่างแบบ grab sample โดยเก็บตัวอย่างน้ำปริมาณ 2 ลิตร จากทุกจุดเก็บ

ตัวอย่างในวันเดียวกัน มีความถี่เดือนละหนึ่งครั้ง อย่างต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 7 เดือน ตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 ถึงเดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561 ค่าพีเอช และค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง ถูกวิเคราะห์ทันที จากนั้น ได้มีการกำจัดตะกอนแขวนลอยออก โดยใช้การกรองผ่านเมมเบรน cellulose acetate (CA) ขนาด รูพรุน 0.45 μm (Filtrex, India) ก่อนนำน้ำตัวอย่างไปทำการ ทดลองวิเคราะห์หาปริมาณไอออนของน้ำต่างๆ ต่อไป

2.2 ศักยภาพในการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน ในเวลา 24 ชั่วโมง (THMs formation potential, THM-FP₂₄)

ในการศึกษาศักยภาพในการเกิดสารกลุ่ม THM-FP₂₄ น้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแยกตะกอนแขวนลอยจากหัวข้อ 2.1 ได้ถูกนำมาเติมคลอรีน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl) ตามวิธี uniform formation conditions (UFC) [21] ควบคุมอัตราส่วน Cl: DOC อยู่ในช่วง 1.5 - 2.0 mg Cl / mg C ในสภาวะค่า pH ในช่วง 8 $\pm$ 0.2 และให้ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมงในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 20°C ในที่มีตะกอนแขวนลอย น้ำตัวอย่างในหลอดทดลองไม่มีอากาศเหนือผิวน้ำ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองเติมคลอรีนแบบอื่น เช่น Formation Potential (FP) แล้ว สภาวะการเติมคลอรีนแบบ UFC นั้น จะก่อให้เกิด สารกลุ่ม DBPs ที่ปริมาณต่ำกว่า เพราะใช้ระยะเวลาสัมผัสสั้นกว่า อีกทั้งที่ pH 8 นั้น คลอรีนอยู่ในรูปแบบ OCl⁻ มากกว่า (HOCl: OCl⁻ 3:7) ซึ่งคลอรีนในสถานะ OCl⁻ มีความสามารถในการ ออกซิไดส์สารอินทรีย์ต่ำกว่าในสถานะ HOCl อย่างไรก็ตาม การเติมคลอรีนในสภาวะ UFC นี้ เป็นที่ใช้กันแพร่หลายใน สหรัฐอเมริกาและในงานวิจัยต่างๆ เพราะสามารถทำนายการ เกิด DBPs ได้ตามสภาวะการทำงานของระบบผลิตน้ำประปาจริง ได้อย่างแม่นยำกว่าสภาวะ FP

จากนั้นปริมาณคลอรีนตกค้าง (residual chlorine) ได้ถูก วิเคราะห์ด้วยวิธีดีดี DPD (N,N-diethyl-p-phenylenediamine) [22] โดยใช้เครื่องมือ Portable Colorimeter II (HACH รุ่น DR300, USA) จากนั้นตัวอย่างที่มีคลอรีนตกค้างเหลืออยู่ 1 $\pm$ 0.2 mg/L ได้ถูกเลือกเพื่อไปทำการสกัดและวิเคราะห์ THMs ต่อไป ซึ่งวิธีการเติมคลอรีนในแบบ UFC ดังกล่าวเป็นวิธีที่จำลอง สภาวะการไหลของน้ำประปาในระบบเส้นท่อประปา

ในการวิเคราะห์สารกลุ่ม THMs ทั้ง 4 ได้แก่ คลอโรฟอร์ม

(CHCl₃) โบโรโมไดคลอโรมีเทน (CHBrCl₂) ไดโบโรโมไดคลอโรมีเทน (CHBr₂Cl) และ โบโรโมฟอร์ม (CHBr₃) ใช้วิธีการวิเคราะห์ตาม U.S. EPA method 551.1 โดยดัดแปลงเล็กน้อยตาม [23] กล่าวคือใช้วิธีสกัดด้วยสารละลาย (liquid-liquid extraction, LLE) โดยใช้ Methyl tert butyl ether (MtBE) เป็นสารสกัด และตรวจวัดความเข้มข้นของ THMs ด้วย gas chromatography-electron capture detector (GC-ECD, Agilent 7890B, USA) คอลัมน์ที่ใช้คือ HP-5 ควบคุมอุณหภูมิในการฉีด (injection) อยู่ที่ 150°C และอุณหภูมิของ detector อยู่ที่ 250°C โปรแกรม อุณหภูมิของคอลัมน์ เริ่มต้นที่ 40°C เป็นเวลา 5 min จากนั้น ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 40°C ต่อนาที จนอุณหภูมิสูงถึง 240°C เป็นเวลา 1 นาที ระยะเวลาเก็บกัก (retention time) ของ CHCl₃ CHBrCl₂ CHBr₂Cl และ CHBr₃ อยู่ที่ 1.61 นาที 2.11 นาที 3.27 นาที และ 5.54 นาที ตามลำดับ ทุกตัวอย่างถูกสกัด ซ้ำสองครั้งและฉีดตัวอย่างที่สกัดแล้วเข้าวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC อย่างน้อยสองครั้ง ผลค่าความเข้มข้นของ THMs ที่รายงาน คือค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวิเคราะห์ด้วย เครื่อง GC 4 - 6 ครั้ง ความเข้มข้นของโบโรไมด์ในน้ำตัวอย่าง วัดด้วยวิธี Ion Chromatography (IC) (882 Compact IC plus, Metrohm)

2.3 การศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) ใช้เครื่อง multi N/C® 2100 TOC Analyzer (Analytik Jena AG, Germany) การ ดูดซับแสงที่ความยาวคลื่น 254 nm (UV₂₅₄) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DR6000 Spectrophotometry (Hach, USA) จากนั้นค่าการ ดูดซับแสงจำเพาะ Specific UV absorbance, SUVA) ถูก คำนวณโดยใช้ค่า UVA₂₅₄หารด้วยปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ละลายน้ำ (SUVA = UVA₂₅₄/DOC*100) ซึ่งค่า SUVA จะแปรผัน โดยตรงกับ aromaticity ของสารอินทรีย์ [12] การวิเคราะห์ ฟลูออเรสเซนซ์ EEM ใช้เครื่อง Jasco FP-8200 Spectro fluorometer โดยตั้งค่าคลื่นแสงประเภทเอ็กไซไซเทชันให้มี ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 และเพิ่มความยาวคลื่นขึ้นครั้งละ 5 nm จนถึง 500 nm ค่าคลื่นแสงประเภทอีมิสชัน ตรวจวัดที่ความยาว คลื่นตั้งแต่ 250 และเก็บข้อมูลทุกช่วงความยาวคลื่น 1 nm จนถึง 550 nm ซึ่งทำการตรวจวัด blank EEM โดยใช้ milli-

Q water ทุกครั้งก่อนตรวจวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยผลสัญญาณ fluorescence ของน้ำตัวอย่างนั้น ถูกปรับด้วยค่า excitation-emission correction factor [24] เพื่อขจัด bias ของเครื่องมือวัด จากนั้นหาค่าด้วยค่า blank EEM และทำการ normalize ด้วยค่าพื้นที่ใต้กราฟ Raman ของน้ำ milli-Q (ex 350 nm/em 368-450 nm) ทำให้รายงานผลสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ ได้ในหน่วย Raman Unit (RU) ในเบื้องต้น การประมวลผลข้อมูล EEM ใช้หลักการเลือกจุดที่ความเข้มของการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์สูง (peak-picking technique) ทำให้สามารถแบ่งประเภทสารอินทรีย์ตามแหล่งที่มาและสมบัติเชิงเคมีของสารอินทรีย์นั้น ได้เป็นสามกลุ่ม [14], [24], [25] ดังนี้

1. สารอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายของพืชและมีสมบัติเหมือนกรดฮิวมิก (terrestrial humic-like DOM) หรือ peak A ซึ่งมีรูปแบบสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ excitation/emission (ex/em) maxima อยู่ที่ ex 250 nm/ em 450 nm

2. สารอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายของพืชและมีสมบัติเหมือนกรดฟุลวิก (terrestrial fulvic-like DOM) หรือ peak C ซึ่งมีค่าฟลูออเรสเซนซ์ maxima อยู่ที่ ex 350 nm/ em 450 nm

3. สารอินทรีย์ที่มาจากกระบวนการของจุลินทรีย์และมีสมบัติเหมือนโปรตีน (microbially-derived protein-like DOM) หรือ peak T ซึ่งมีค่าฟลูออเรสเซนซ์ maxima อยู่ที่ ex 275 nm/ em 340 nm

โดยค่าสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ ที่รายงาน ในงานวิจัยนี้เป็นค่าเฉลี่ยของการตรวจวัด EEM สามครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง การประมวลผลข้อมูล EEM ใช้โปรแกรม Matlab R2016a (MathWorks) และ DOMFluor Toolbox ตามวิธีการของ Stedmon & Bro [24]

3. ผลการทดลอง

3.1 คุณภาพน้ำตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 - มิถุนายน พ.ศ. 2561 แสดงไว้ในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาคุณภาพแหล่งน้ำดิบ พบว่า น้ำจากสถานีสูบน้ำดิบบ้านโกทา (Kotha pump station) ซึ่งเป็นน้ำจากแม่น้ำพอง มีค่า DOC เฉลี่ย อยู่ที่ 4.70 mg-C/L ซึ่งน้อยกว่าค่า DOC ของน้ำจากสระรับน้ำฝนภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น (6.23 mg-C/L) แต่เมื่อพิจารณาค่า SUVA ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัด aromaticity ของสารอินทรีย์ พบว่าค่า SUVA ของน้ำบ้านโกทา (4.08 L/mg.m) มีค่าสูงกว่าค่า SUVA ของน้ำจากสระรับน้ำฝน (2.66 L/mg.m) อย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่า น้ำจากบ้านโกทามีความเข้มข้นของสารอินทรีย์น้อยกว่าน้ำจากสระรับน้ำฝน แต่สารอินทรีย์จากบ้านโกทามีส่วนประกอบของสารอินทรีย์กลุ่มที่มีวงแหวน (aromatic) มากกว่าสารอินทรีย์ในน้ำจากสระรับน้ำฝน อีกทั้งยังพบว่า ความขุ่นและปริมาณสารอินทรีย์ในจุดเก็บตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงตามกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยค่า DOC ของน้ำประปา เฉลี่ยอยู่ที่ 2.93 mg-C/L ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับ DOC ของน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคของจังหวัดขอนแก่น [26] สำหรับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำจากทุกจุดเก็บตัวอย่าง มีค่าเป็นกลางค่อนข้างต่ำ เล็กน้อย และมีความเปลี่ยนแปลงของค่า pH ต่ำ ตลอดระยะเวลา 6 เดือน สำหรับค่าความนำไฟฟ้านั้น พบว่า น้ำหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนและตกตะกอน มีแนวโน้มค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้ เนื่องจากการเติมสารสร้างตะกอน (coagulant) คือโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (poly aluminum chloride, PACl) ในปริมาณ 30-40 mg/L ซึ่งการเติม coagulant นั้นส่งผลให้เกิดการตกตะกอนสารแขวนลอย ลดความขุ่นและปริมาณสารอินทรีย์ลง แต่ในขณะเดียวกันก็เพิ่มค่าความนำไฟฟ้าให้กับน้ำ [27]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำในหน่วยต่างๆ ของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา มหาวิทยาลัยขอนแก่น เฉลี่ยระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 - มิถุนายน พ.ศ. 2561

พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ	UVA ₂₅₄ (cm ⁻¹)	DOC (mg-C/L)	SUVA (L/mg.m)	Turbidity (NTU)	pH	Conductivity (μS/cm)
สถานีสูบน้ำดิบบ้านโกทา (Kotha pump station)	0.182	4.70	3.90	1.34	7.83	153
สระรับน้ำฝน (reservoir)	0.163	6.23	2.66	1.61	7.76	149
ถังเก็บน้ำดิบ (raw water)	0.176	4.10	4.30	1.56	7.50	152
น้ำออกจากถังตกตะกอน (sedimentation)	0.143	3.52	4.08	0.85	7.47	162
น้ำออกจากถังกรองทราย (sand filtration)	0.138	3.21	4.32	0.47	7.36	154
น้ำประปา หลังการเติม ClO ₂ (tap water)	0.127	2.93	4.37	0.41	7.25	161

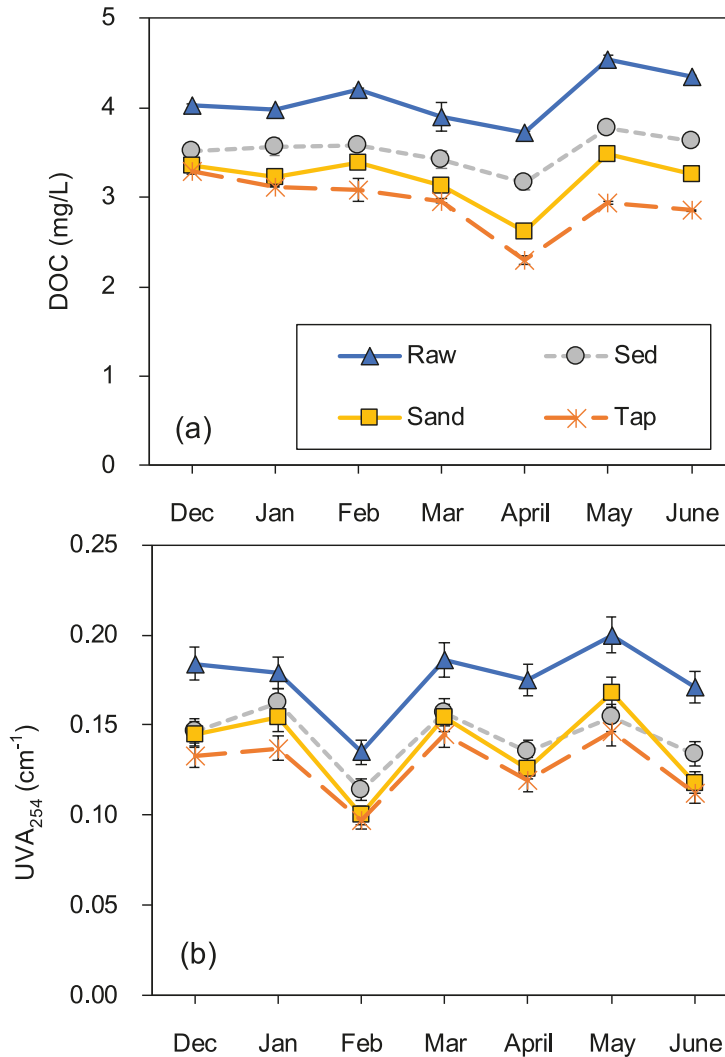
รูปที่ 1a แสดงค่าสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) เป็นรายเดือน ระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 - มิถุนายน พ.ศ. 2561 จากผลการตรวจวัดพบว่า ค่า DOC มีการเปลี่ยนแปลงลดลงตามลำดับของหน่วยกระบวนการในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา โดยถังเก็บน้ำดิบมีค่า DOC สูงที่สุดอยู่ในช่วง 3.9 - 4.5 mg-C/L ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแหล่งน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาที่อื่นในประเทศไทย [28-29] และน้ำประปาที่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนไดออกไซด์ (ClO₂) แล้ว มีค่า DOC อยู่ในช่วง 2.8 - 3.3 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ของกระบวนการตกตะกอนด้วย PACl ปริมาณ 30-40 mg/L กระบวนการกรองทราย และการเติมคลอรีน อยู่ที่ 14%, 9.0% และ 8.6% ตามลำดับ ถือว่าประสิทธิภาพในการลด DOC ของกระบวนการตกตะกอนด้วย PACl ของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำประปานี้มีค่าต่ำกว่าในงานวิจัยอื่น เช่น Musikawong et al. [30] ได้รายงานไว้ว่า PACl ที่ความเข้มข้น 40 mg/L สามารถกำจัด DOC ได้ถึง 55% สำหรับการดูดซับแสงที่มีความยาวคลื่น 254 nm (UVA₂₅₄) (รูปที่ 1b) พบว่าค่า UVA₂₅₄ มีแนวโน้มคล้ายเคียงกับค่า DOC คือ ค่า UVA₂₅₄ ของน้ำดิบมีค่าสูงที่สุด อยู่ในช่วง 0.14 - 0.20 cm⁻¹ และน้ำประปามีค่า UVA₂₅₄ ต่ำที่สุด อยู่ในช่วง 0.10 - 0.15 cm⁻¹ คิดเป็น

ประสิทธิภาพในการกำจัด UVA₂₅₄ ของกระบวนการตกตะกอน การกรองทราย และการเติมคลอรีน อยู่ที่ 18%, 3.7% และ 7.9% ตามลำดับ

ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของกระบวนการตกตะกอน การกรองทราย และการเติมคลอรีน เฉลี่ยอยู่ที่ 46%, 45% และ 13% ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า กระบวนการผลิตน้ำประปาแบบดั้งเดิมนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์น้อยกว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ซึ่งอธิบายได้ว่า การเติมสารสร้างแกนตะกอนทำให้เกิดการรวมตัวกันของตะกอนที่เป็นสาเหตุของความขุ่น เมื่อตะกอนตกลงสู่ก้นถังได้เกิดการดึงเอาสารอินทรีย์บางส่วนให้ตกตะกอนไปพร้อมกัน กระบวนการตกตะกอนจึงกำจัดความขุ่นได้ดี แต่กำจัด DOC ได้น้อยกว่า ส่วนการเติมคลอรีนนั้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและ DOC น้อยที่สุด เนื่องจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคและเกิดการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ แต่ไม่ได้มุ่งเน้นให้เกิดการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ [31] ซึ่งสารอินทรีย์ละลายน้ำที่หลงเหลืออยู่สามารถก่อให้เกิด สี กลิ่น รส ที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำประปา นอกจากนี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีน เกิดเป็นสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคต่อไป [32]

การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของ ค่า DOC และ UVA_{254} เป็นรายเดือนนั้น พบว่า ในช่วงเดือน ธันวาคม – กุมภาพันธ์ ซึ่งเป็นช่วงฤดูหนาว มีค่า DOC ค่อนข้างคงที่ และปริมาณสารอินทรีย์มีแนวโน้มลดลงในเดือนมีนาคม – เมษายน ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อน จากนั้นปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นในเดือน พฤษภาคมและมิถุนายน เนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่มีฝนตก

จึงทำให้เกิดความขุ่น และการชะล้างสารอินทรีย์จากพื้นดินลงสู่ลำนํ้ามากขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงในลำนํ้าอื่นๆ ในประเทศไทย เช่น Tungudjawong et al. [29] ได้รายงานว่ แม่นํ้าเจ้าพระยา มีค่า DOC ในช่วงฤดูฝนสูงกว่าในช่วงฤดูร้อน

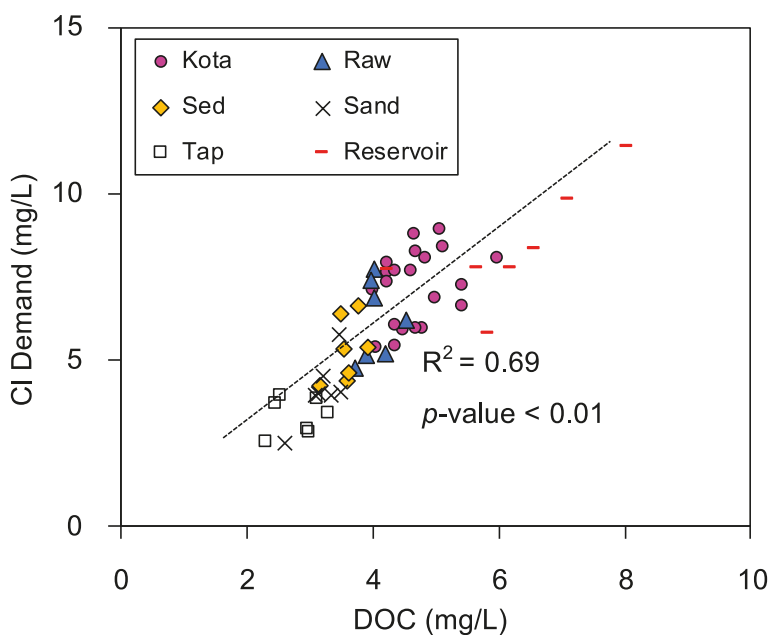


รูปที่ 1 (a) ปริมาณคาร์บอนละลายน้ำ (DOC) และ (b) การดูดซับแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm (UVA_{254}) จากจุดเก็บตัวอย่างในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ได้แก่ ถังน้ำดิบ (Raw), ถังตกตะกอน (Sed), ถังกรองทราย (Sand), และน้ำประปา (Tap) ในระหว่างเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2560 ถึง เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2561

3.2 ศักยภาพในการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (THMs formation potential, THMFP₂₄)

ปริมาณความต้องการคลอรีนของน้ำตัวอย่าง คำนวณได้จากปริมาณคลอรีนที่เติมลงไป หักลบด้วยปริมาณคลอรีนหลงเหลือ หลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมง ซึ่งปริมาณความต้องการคลอรีนเทียบกับค่า DOC ของน้ำตัวอย่างที่เก็บตลอดระยะเวลา 7 เดือน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า ค่าความต้องการคลอรีนมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linear) แปรผันตามค่า DOC เนื่องจากคลอรีนที่เติมลงไป ได้ถูกใช้เพื่อออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำ เมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์สูงขึ้น จึงทำให้ค่าความต้องการคลอรีนเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ [33-34] โดยน้ำจากสระรับน้ำฝน ที่มีค่า DOC เฉลี่ยสูงสุด (ตารางที่ 1) ก็มีค่าความต้องการคลอรีนสูงสุดเช่นกัน จากนั้นเมื่อน้ำเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาในแต่ละขั้นตอน ทำให้สารอินทรีย์ในน้ำถูกกำจัดไปตามกระบวนการ ทำให้ค่า DOC และความต้องการคลอรีนลดลงตามลำดับ

โดยปกติแล้ว ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ใช้แหล่งน้ำดิบจากสถานีสูบน้ำดิบบ้านโกทาเป็นหลัก และใช้น้ำจากสระรับน้ำฝนภายในมหาวิทยาลัยเป็นแหล่งน้ำสำรองเมื่อสูบน้ำจากสถานีบ้านโกทามาไม่เพียงพอ ซึ่งน้ำจากบ้านโกทานั้นมาจากแม่น้ำพอง ที่เป็นแม่น้ำใหญ่ที่ไหลอย่างต่อเนื่องจึงมีการสะสมของสารอินทรีย์น้อย แต่น้ำดิบที่ได้จากสระรับน้ำฝน เป็นการรวบรวมน้ำฝนที่ไหลบ่าบนผิวดินและรางระบายน้ำ อีกทั้งยังเป็นสระน้ำนิ่งไม่มีการไหลวน จึงเกิดการสะสมของสารอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายจากซากพืชซากสัตว์ [35] ทำให้น้ำในสระรับน้ำฝนนี้มีสารอินทรีย์สะสมในปริมาณสูง ส่งผลทำให้ค่า DOC สูง จึงต้องการปริมาณคลอรีนมากขึ้นตามไปด้วย โดยเบื้องต้นจากผลการวัดความต้องการคลอรีน สรุปได้ว่า การใช้น้ำจากสระรับน้ำฝนภายในมหาวิทยาลัยเป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปา จะทำให้ต้องใช้ปริมาณคลอรีนมากกว่าการใช้น้ำดิบจากสถานีสูบน้ำดิบบ้านโกทา



รูปที่ 2 ปริมาณความต้องการคลอรีนเทียบกับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) จากแหล่งน้ำดิบ และระหว่างขั้นตอนต่างๆ ของ ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในระหว่างเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2560 ถึง เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2561

ผลการวิเคราะห์ศักยภาพในการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนจากการเติมคลอรีน เปรียบเทียบระหว่างน้ำจากถังเก็บน้ำดิบ (Raw) และน้ำประปาที่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคแล้ว (Tap) แสดงไว้ในรูปที่ 3a โดยใช้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยวิธีวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's correlation) จากผลการทดลองพบว่า น้ำในถังเก็บน้ำดิบมีปริมาณสารอินทรีย์สูงที่สุด (DOC เฉลี่ย 4.10 mg-C/L, ตารางที่ 1) เมื่อทำปฏิกิริยากับคลอรีนจึงทำให้เกิดสารกลุ่ม THMs เป็นผลพลอยได้ในปริมาณสูง ศักยภาพในการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด (total trihalomethanes, TTHM-FP₂₄) ของน้ำดิบ เฉลี่ยตลอดระยะเวลา 7 เดือน มีค่าเท่ากับ 306+65 µg/L ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งน้ำดิบที่มีคุณภาพดี และมีค่า TTHM-FP₂₄ ต่ำกว่าน้ำดิบจากแหล่งน้ำผิวดินอื่นๆ ในประเทศไทย เช่น อ่างเก็บน้ำศรีตรัง จ.สงขลา มีค่า TTHM-FP₂₄ สูงถึง 578 µg/L [28] เมื่อผ่านระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาแล้ว น้ำประปาของมหาวิทยาลัยขอนแก่นมีปริมาณสารอินทรีย์ลดลง (DOC เฉลี่ย 2.93 mg-C/L, ตารางที่ 1) ส่งผลให้มีค่า TTHM-FP₂₄ เฉลี่ยอยู่ที่ 143+39 µg/L ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรายเดือนของค่า TTHM-FP₂₄ ของน้ำดิบและน้ำประปามีความสอดคล้องกันกับค่า DOC คือค่า DOC ของน้ำประปามีค่าต่ำสุด (2.30 mg-C/L) ในเดือนเมษายน ส่งผลให้มีค่า TTHM-FP₂₄ ต่ำสุด (138 µg/L) เช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าค่า TTHM-FP₂₄ ของน้ำดิบมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลมากกว่าน้ำประปา แสดงให้เห็นถึงความมีเสถียรภาพของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาที่ไม่อ่อนไหวตามคุณภาพน้ำดิบ

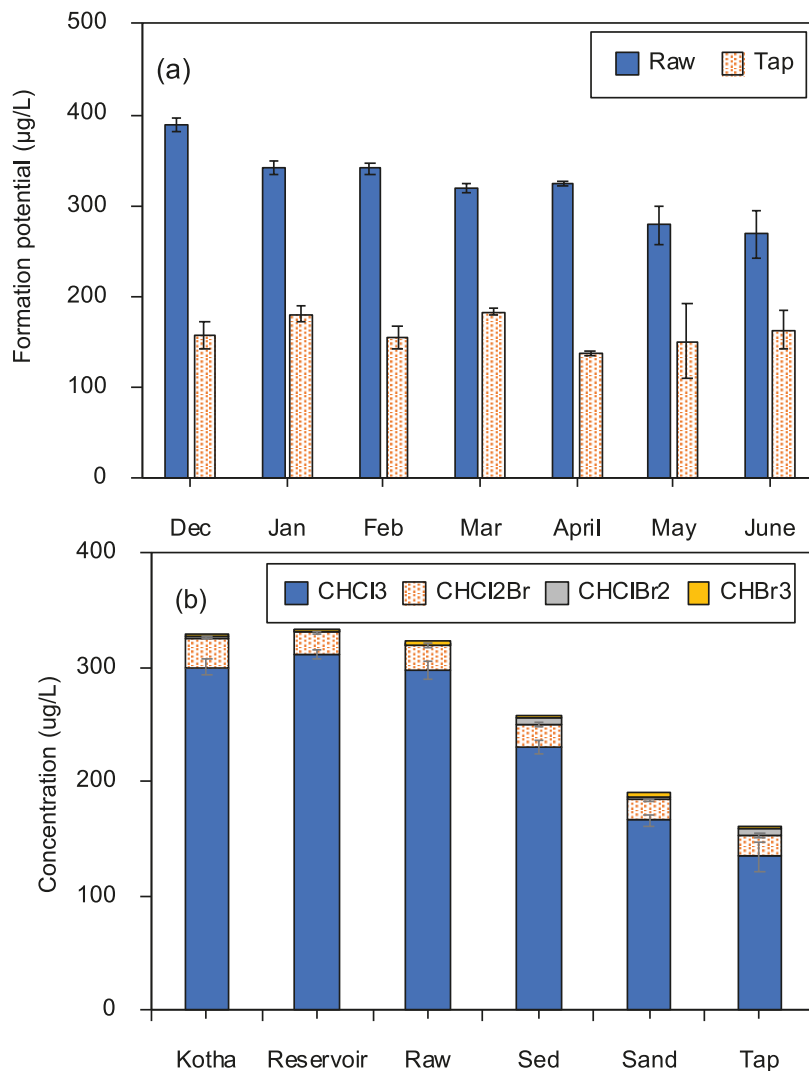
เมื่อพิจารณาศักยภาพในการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนในน้ำตัวอย่างทุกจุดเก็บตัวอย่าง พบว่า สารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนที่ตรวจวัดได้ความเข้มข้นสูงสุดคือ CHCl₃ ตามด้วย CHBrCl₂ และ CHBr₂Cl ตามลำดับ และสารที่ตรวจพบในความเข้มข้นน้อยที่สุดคือ CHBr₃ (รูปที่ 3b) โดยค่าศักยภาพในการเกิด CHCl₃ CHBrCl₂ CHBr₂Cl และ CHBr₃ ในตัวอย่างน้ำประปาเฉลี่ยมีค่า 135, 19, 5.4 และ 2.5 µg/L ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [26] ที่รายงานว่า CHCl₃ เป็นสารกลุ่ม THMs ที่ตรวจพบในความเข้มข้นสูงสุด และ CHBr₃ มีอยู่ในปริมาณน้อยที่สุด เมื่อทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโบรมีน (Br-) ในตัวอย่างน้ำดิบในเดือนมกราคม และมิถุนายน พบว่าน้ำดิบจากแม่น้ำพองมีค่าความเข้มข้นของโบรมีนต่ำกว่า 0.1 mg/L (detection limit ของเครื่อง IC)

ผลการตรวจวัดแสดงให้เห็นว่า น้ำดิบของ KCU WTP มีความเข้มข้นของโบรมีนต่ำ การเติมคลอรีนจึงก่อให้เกิดกรดไฮโปโบรมัสในปริมาณน้อย ในกรณีที่น้ำดิบมีโบรมีนสูง เช่น แหล่งน้ำผิวดินจาก Tod Reservoir ที่รัฐเซาท์ออสเตรเลีย มีความเข้มข้นของโบรมีนอยู่ที่ 4.13 mg/L [36] การเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคจะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดส์ไอออนโบรมีน เกิดเป็นกรดไฮโปโบรมัส ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำ และได้ผลเป็นสารกลุ่ม THMs ที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ CHBrCl₂ CHBr₂Cl และ CHBr₃ [37]

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ THM-FP₂₄ ในน้ำประปา ของ KCU WTP กับเกณฑ์ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค ซึ่งเป็นไปตามเอกสารคำแนะนำคุณภาพน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (WHO) ปี 2011 ที่กำหนดค่าสูงสุดสำหรับสารในกลุ่มไตรฮาโลมีเทนแต่ละชนิด คือ CHBrCl₂ 60 µg/L CHBr₃ และ CHBr₂Cl 100 µg/L และ CHCl₃ 300 µg/L [8] พบว่า ปริมาณ THM-FP₂₄ ในน้ำประปาของมหาวิทยาลัยขอนแก่น ยังเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค อย่างไรก็ตาม การใช้ ClO₂ เป็นสารฆ่าเชื้อโรคของ KCU WTP ทำให้ความเข้มข้นของ THMs ในน้ำประปาที่ผลิตโดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น มีค่าต่ำกว่าค่า THMs ของน้ำประปาที่ผลิตจากโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำอื่นๆ ในจังหวัดขอนแก่น ดังงานวิจัยของ Ratpukdi et al. [26] ที่ศึกษาความเข้มข้นของสารกลุ่ม THMs ในน้ำประปาที่ผลิตจากโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาของจังหวัดขอนแก่น ทั้ง 3 แห่ง คือ โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาโกทาและท่าพระที่ใช้คลอรีนอิสระเป็นสารฆ่าเชื้อโรค และจาก KCU WTP ที่ใช้ ClO₂ เป็นสารฆ่าเชื้อโรค และพบว่า ความเข้มข้นสูงสุดของ CHCl₃ ที่ตรวจวัดตลอดทั้งปีในน้ำประปาที่ผลิตจากโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ โกทา ท่าพระ และมหาวิทยาลัยขอนแก่น มีค่า อยู่ที่ 147, 211 และ 41 µg/L ตามลำดับ นอกจากนี้แล้ว ความเข้มข้นของสารกลุ่ม THMs ในน้ำประปาที่ผลิตจากโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาทั้ง 3 แห่ง ยังมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามระยะทางระหว่างจุดเก็บตัวอย่างกับโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม สำหรับ KCU WTP ที่ใช้ ClO₂ เป็นสารฆ่าเชื้อโรค ปฏิกิริยาระหว่าง ClO₂ กับสารอินทรีย์สามารถก่อให้เกิดสาร DBPs กลุ่มอื่นๆ เช่น คลอไรท์และคลอเรต แต่เนื่องจากยังไม่มีมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาใดในประเทศไทยกล่าวถึง

สารสองชนิดนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาสารกลุ่ม THMs เป็นหลัก ที่ควรศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัยอนาคตต่อไป การวิเคราะห์การเกิดคลอไรท์และคลอเรต เป็นอีกหัวข้อหนึ่ง



รูปที่ 3 ศักยภาพการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน ระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2560 - มิถุนายน พ.ศ. 2561 (a) Total THMs formation potential (TTHM-FP₂₄) ในน้ำจากถังเก็บน้ำดิบ (Raw) และน้ำประปาที่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคแล้ว (Tap) และ (b) องค์ประกอบของสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด (ค่าเฉลี่ย 7 เดือน)

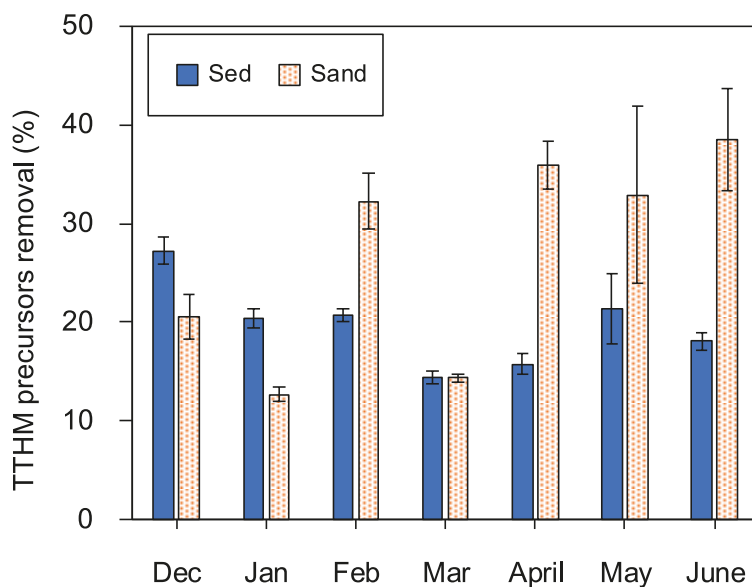
หน่วยกระบวนการที่สำคัญของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา คือ ถังตกตะกอน และถังกรองทราย ซึ่งมีหน้าที่หลักในการกำจัดตะกอนอนุภาคอันเป็นสาเหตุความขุ่น และในขณะเดียวกันก็กำจัดสารอินทรีย์ที่ตรวจวัดในรูปแบบของ DOC

ได้บางส่วนด้วย (ตารางที่ 1) ในงานวิจัยนี้ได้ตรวจวัดประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นของสารพลอยได้กลุ่มไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด (THM precursors removal) ของทั้งสองหน่วยกระบวนการดังกล่าว และได้แสดงผลไว้ดังรูปที่ 4

จากผลการตรวจวิเคราะห์พบว่า ระหว่างเดือนธันวาคม 2560 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2561 ถึงตกตะกอนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นอยู่ในช่วง 20-27% และประสิทธิภาพมีแนวโน้มลดลงในเดือนมีนาคม – มิถุนายน (14-20%) ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นของถังตกตะกอนตลอดระยะเวลา 7 เดือนที่ทำการตรวจวัด มีค่าเท่ากับ 20% ในระยะเวลา 7 เดือนของการเก็บตัวอย่าง คิดเป็นประสิทธิภาพรวมในการกำจัดสารตั้งต้นของระบบตกตะกอนและกรองทราย เฉลี่ยอยู่ที่ 41.2%

สำหรับถังกรองทรายนั้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นมีความแปรปรวนสูง เช่นในเดือนมิถุนายน 2562 ถังกรองทรายมีประสิทธิภาพในการลดสารตั้งต้นได้สูงสุด อยู่ที่ 39% แต่ในเดือนมกราคม ถังกรองทรายสามารถกำจัดสารตั้งต้นได้เพียง 13% เท่านั้น และคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้น

ของถังกรองทรายเฉลี่ยตลอด 7 เดือน เท่ากับ 27% แม้ว่าโดยเฉลี่ยแล้ว ถังกรองทรายมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นได้สูงกว่ากระบวนการตกตะกอน แต่ประสิทธิภาพของถังกรองทรายนั้นมีความแปรปรวนมากกว่า จึงทำให้ผู้วิจัยมีข้อสันนิษฐานว่า ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำดิบมีผลต่อประสิทธิภาพของถังกรองทรายมากกว่าถังตกตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้แล้ว ความถี่ในการล้างย้อนถังกรองทรายก็เป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งเดือนที่ถังกรองทรายมีประสิทธิภาพต่ำนั้นสันนิษฐานว่า เนื่องมาจากเป็นวันที่ใกล้รอบของการล้างย้อนถังกรอง หรือทำการล้างย้อนถังกรองไม่เพียงพอ ซึ่งการสะสมของตะกอนในถังกรองทราย เนื่องจากความถี่ในการล้างย้อนนั้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานของถังกรองทรายเป็นอย่างมาก [1]



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นของสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนทั้ง 4 ชนิด (TTHM precursors removal) ของถังตกตะกอน และถังกรองทราย (ค่าเฉลี่ย 7 เดือน)

3.3 คุณลักษณะการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารอินทรีย์

เนื่องจากการตรวจวัดสารอินทรีย์โดยใช้ค่า DOC นั้นเป็นค่าบ่งบอกถึงปริมาณคาร์บอนอินทรีย์โดยรวม แต่ไม่สามารถจำแนกคุณลักษณะทางเคมีและแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ได้

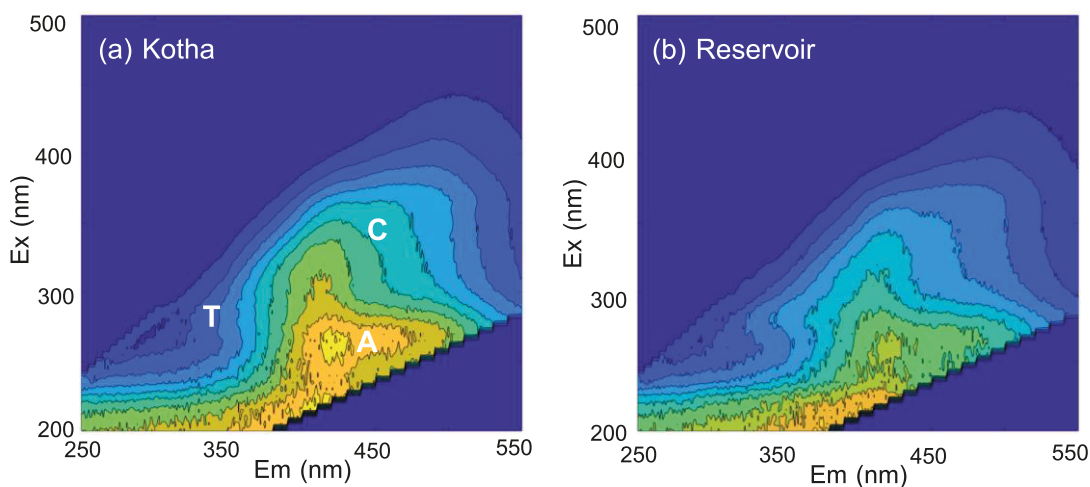
งานวิจัยนี้จึงใช้ข้อมูลการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารอินทรีย์มาเพื่อจำแนกคุณลักษณะของสารอินทรีย์ แผนภาพ ฟลูออเรสเซนซ์ EEM ของน้ำตัวอย่างจากจุดสูบน้ำบ้านโกทา (Kotha) สระเก็บน้ำในมหาวิทยาลัยขอนแก่น (Reservoir) น้ำใสจากถังตกตะกอน (Sedimentation Tank) และน้ำใสจากถังกรองทราย

(Sand filtration) ซึ่งเก็บตัวอย่างในเดือนมกราคม พ.ศ. 2561 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6a-6d ตามลำดับ โดยแผนภาพ contour ดังกล่าว มีค่าแกน x เป็นความยาวคลื่นอีมิสชัน ค่าแกน y เป็นความยาวคลื่นเอ็กซีเซเทชัน และแกนสีแสดงถึงความเข้มของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ ที่แตกต่างกัน จุดตำแหน่ง ฟลูออเรสเซนซ์ ex/em maxima ของ peak A (ฟูลวิค) C (ฮิวมิก) และ T (โปรตีน) [14] แสดงไว้ในรูปที่ 5a

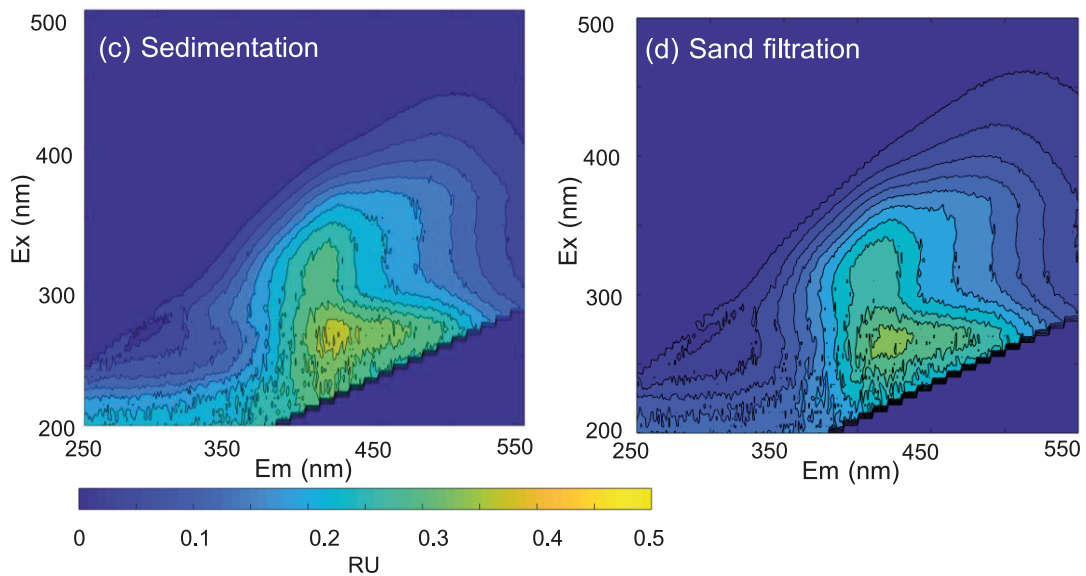
จากรูปที่ 5a และ 5b เมื่อเปรียบเทียบแหล่งน้ำดิบของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำมหาวิทยาลัยขอนแก่นทั้งสองแหล่ง พบว่าตัวอย่างน้ำจากบ้านโกทามีค่าความเข้มแสงที่ตำแหน่ง peak A และ C มากกว่าน้ำจากสระเก็บน้ำในมหาวิทยาลัย แต่ตัวอย่างน้ำจากสระเก็บน้ำมีค่าความเข้มแสงที่ peak T สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับข้อเท็จจริงในประเด็นเรื่องแหล่งที่มาของน้ำจากบ้านโกทา คือ เขื่อนอุบลรัตน์ และแม่น้ำพอง ซึ่งเป็นแหล่งน้ำขนาดใหญ่ มีสารอินทรีย์จากพืชที่ทับถมในปริมาณมาก อีกทั้งอยู่ใกล้กับพื้นที่เกษตรกรรม และมีการไหลของน้ำสม่ำเสมอ ทำให้จุลินทรีย์เติบโตได้น้อย แต่น้ำจากสระเก็บน้ำภายในมหาวิทยาลัยนั้นเป็นสระรองรับน้ำฝนและน้ำที่ระบายจากถนนเป็นหลัก อีกทั้งยังเป็นลักษณะบึงที่เป็นน้ำนิ่ง จึงมีโอกาสน้ำให้จุลินทรีย์เติบโตได้มากกว่า ทำให้ค่าความเข้มแสง

ฟลูออเรสเซนซ์ที่ตำแหน่ง peak T สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด บ่งชี้ว่าน้ำจากสระเก็บน้ำมีสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิก น้อยกว่า แต่มีสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีนจากจุลินทรีย์มากกว่าน้ำจากสถานีสูบน้ำบ้านโกทา ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cory et al. [38] ซึ่งรายงานว่าอัตราส่วนของสารอินทรีย์ที่มาจากจากจุลินทรีย์ต่อสารอินทรีย์ทั้งหมดมีความสัมพันธ์แปรผันโดยตรงกับระยะเวลาเก็บกักของแหล่งน้ำ คือแหล่งน้ำที่มีลักษณะเป็นน้ำนิ่ง มีระยะเวลาการเก็บกักยาวนาน เช่น ทะเลสาบ เป็นต้น ส่งผลให้องค์ประกอบของสารอินทรีย์เป็นสารอินทรีย์ที่กลุ่มมาจากจุลินทรีย์สูงขึ้น

สำหรับน้ำผิวดินลักษณะที่ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ตำแหน่ง peak A สูงกว่า peak C และ T นั้น สอดคล้องกับรูปแบบสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ของน้ำผิวดินจากที่อื่นๆ ที่เป็นแหล่งผลิตน้ำประปาของประเทศไทย เช่นแม่น้ำเจ้าพระยา [29] คลองอู่ตะเภา [39] และ University Lake มลรัฐนอร์ทคาโรไลนา ประเทศสหรัฐอเมริกา [19] เมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาตามขั้นตอนต่างๆ คือการตกตะกอนและการกรองทราย ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ทั้ง 3 จุด ลดลงเป็นลำดับ แสดงให้เห็นว่าเกิดการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว



รูปที่ 5 Fluorescence EEM contour ของน้ำตัวอย่างจาก (a) สถานีสูบน้ำบ้านโกทา (Kotha), (b) สระเก็บน้ำในมหาวิทยาลัยขอนแก่น (Reservoir), (c) น้ำใสจากถังตกตะกอน (Sedimentation), และ (d) น้ำใสจากถังกรองทราย (Sand filtration) ซึ่งเก็บตัวอย่างในเดือนมกราคม พ.ศ. 2561

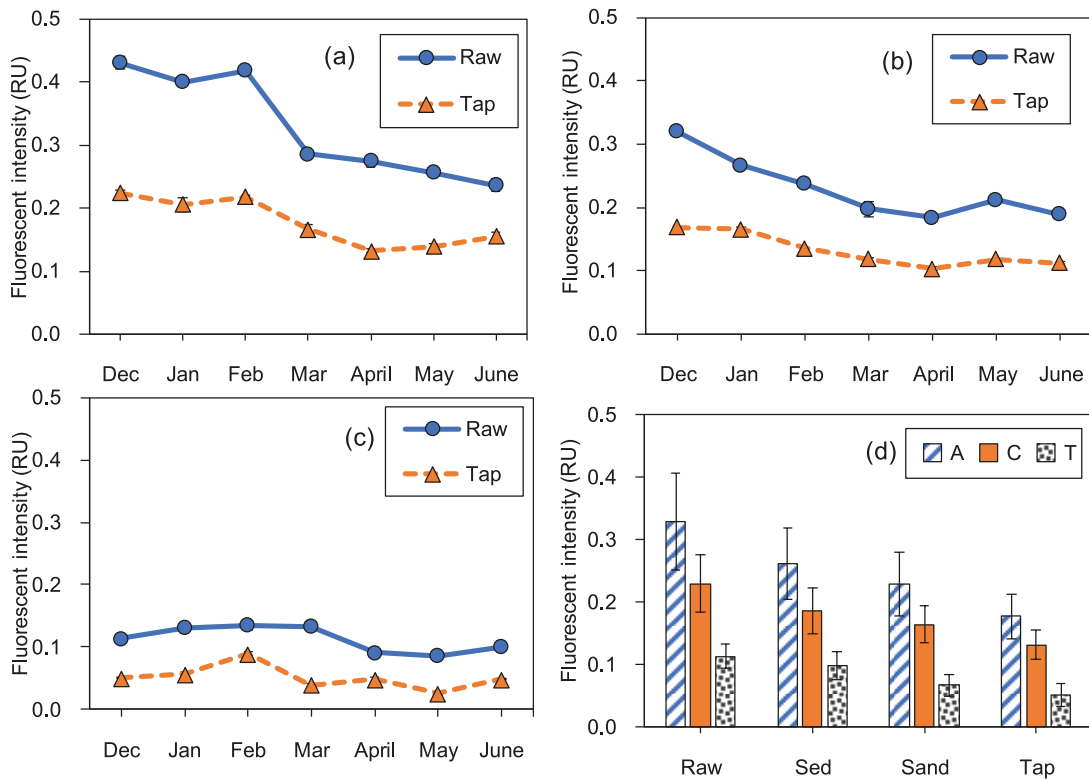


รูปที่ 5 Fluorescence EEM contour ของน้ำตัวอย่างจาก (a) สถานีสูบน้ำบ้านโกทา (Kotha), (b) สระเก็บน้ำในมหาวิทยาลัยขอนแก่น (Reservoir), (c) น้ำใสจากถังตกตะกอน (Sedimentation), และ (d) น้ำใสจากถังกรองทราย (Sand filtration) ซึ่งเก็บตัวอย่างในเดือนมกราคม พ.ศ. 2561 (ต่อ)

ผลการตรวจวัด ฟลูออเรสเซนซ์ EEM สามารถนำมาวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อติดตามตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาได้ โดยตั้งค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ตำแหน่ง peak A C และ T ออกมาเปรียบเทียบกับระหว่างตัวอย่างน้ำจากจุดต่างๆ ดังรูปที่ 6 โดยรูปที่ 6a-6c แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ตำแหน่ง peak A C และ T ของน้ำดิบ (Raw) และน้ำประปาตามช่วงเวลา ตั้งแต่เดือน ธ.ค. พ.ศ. 2560 ถึง ม.ค. พ.ศ. 2561 พบว่าในช่วงเดือน ธ.ค. - ก.พ. มีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารที่ตำแหน่ง peak A และ C สูง แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกที่มาจากพืชและพื้นดิน จากนั้นความเข้มแสงที่ peak A และ C ได้ลดลงในช่วงเดือน มี.ค. - มิ.ย. ส่วนความเข้มแสงของสารกลุ่มโปรตีน หรือ peak T มีค่า (รูปที่ 6c) มีค่าต่ำกว่า peak A และ C และมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักตลอดระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 7 เดือน เมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำแล้ว น้ำประปามีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ทั้งสามตำแหน่งลดลง และปริมาณสารอินทรีย์กลุ่มที่เรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ (fluorophore) ในน้ำดิบ มีผลต่อคุณภาพน้ำประปาไม่มากนัก คือปริมาณ fluorophore ใน

น้ำประปาไม่เปลี่ยนแปลงมากนักตลอดระยะเวลา 7 เดือน แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำดิบก็ตาม

รูปที่ 6d แสดงค่าเฉลี่ยของความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ทั้งสามตำแหน่งในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา ซึ่งมีค่าลดลงตามลำดับของระบบ ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ตำแหน่ง peak A C และ T เฉลี่ยตลอดระยะเวลา 7 เดือน ของน้ำจากถังเก็บน้ำดิบ มีค่าเท่ากับ 0.33, 0.23 และ 0.11 RU ตามลำดับ จากนั้น เมื่อน้ำผ่านกระบวนการตกตะกอน กรองทราย และเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคแล้ว น้ำประปามีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ตำแหน่ง peak A C และ T อยู่ที่ 0.18, 0.13, และ 0.05 RU ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัด fluorophore กลุ่มฟูลวีก ฮิวมิก และโปรตีน อยู่ที่ 46, 43 และ 55% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเติมคลอรีนในรูปแบบ ClO₂ เพื่อฆ่าเชื้อโรคสามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม fluorophore ได้ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาออกซิไดส์ของคลอรีนทำให้พันธะเคมีในโมเลกุลของสารอินทรีย์กลุ่มวงแหวนเบนซีนแตกตัว [40] จึงทำให้การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ลดลง



รูปที่ 6 ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ของน้ำดิบ (Raw) และน้ำประปา (Tap) (a) peak A, (b) peak C, (c) peak T, และ (d) ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ peak A, C และ T เฉลี่ย 7 เดือนที่เก็บน้ำดิบ (Raw), น้ำใส่จากถังตกตะกอน (Sed), น้ำออกจากถังกรองทราย (Sand) และน้ำประปา (Tap)

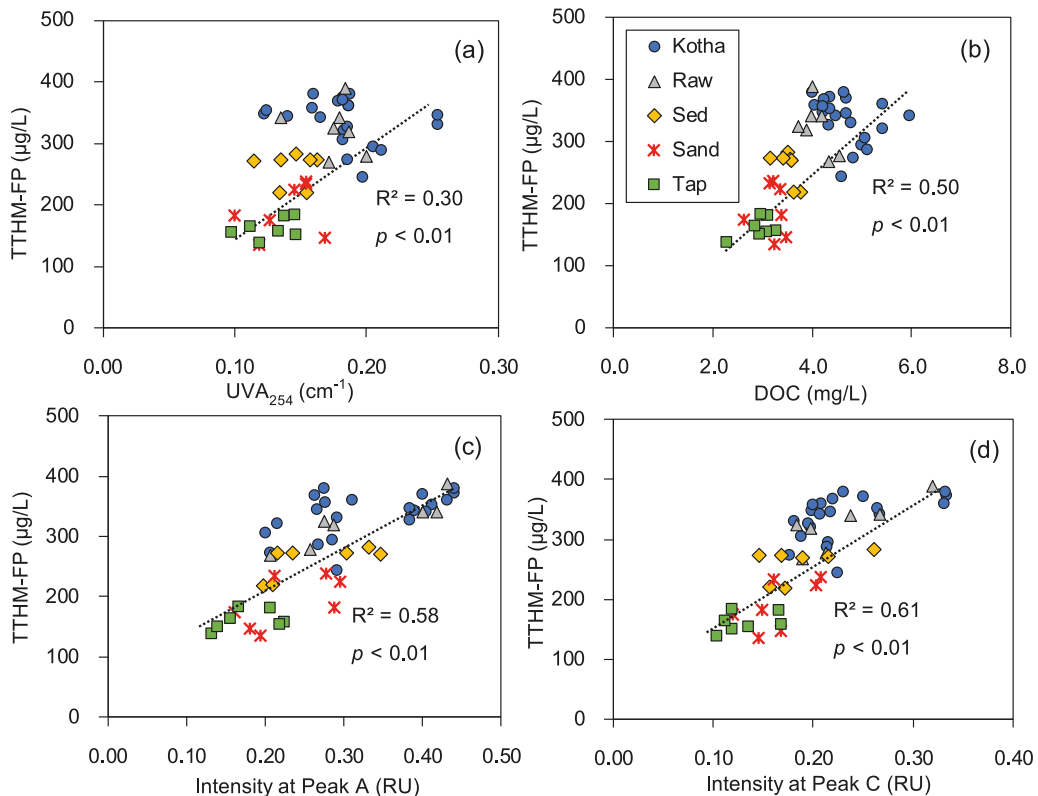
จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ fluorophores บางชนิด มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ DBP formation potential (BDP-FP) เช่น ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารกลุ่มฮิวมิกและฟุลวิก มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยตรงกับ THM-FP₂₄ และ Haloacetic acid formation potential (HAA-FP) [17] ซึ่งการทราบถึงศักยภาพในการเกิด DBPs ของน้ำตัวอย่างหนึ่ง เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการเดินระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา งานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์คุณภาพน้ำต่างๆ คือค่า UVA₂₅₄ DOC รวมไปถึงค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ fluorophores ณ ตำแหน่ง peak A (ฟุลวิก) และ peak C (ฮิวมิก) เทียบกับค่า Total THMs formation potential (TTHM-FP₂₄) ซึ่งเป็นผลรวมของ THMs ทั้ง 4 ชนิด (CHCl₃ CHBrCl₂ CHBr₂Cl และ CHBr₃) โดยใช้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์

เชิงเส้น แบบวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน ผลการทดสอบความสัมพันธ์แบบถดถอยระหว่างตัวแปรต่างๆ ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 7a-7d ซึ่งพบว่า น้ำตัวอย่างจากสระเก็บน้ำในมหาวิทยาลัยขอนแก่นมีค่าที่ไม่สอดคล้องกับน้ำจากสถานีสูบน้ำบ้านโกทาและน้ำจากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา ข้อมูลจากสระเก็บน้ำจึงไม่ถูกนำมารวมในการวิเคราะห์ดังกล่าว

สำหรับน้ำจากสถานีสูบน้ำบ้านโกทาและน้ำจากระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 เดือน พบว่า ค่า TTHM-FP₂₄ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแปรผกผันตามค่า UVA₂₅₄ ($R^2 = 0.30$, $p < 0.01$, รูปที่ 7a) ค่า DOC ($R^2 = 0.50$, $p < 0.01$, รูปที่ 7b) ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ตำแหน่ง peak A ($R^2 = 0.58$, $p < 0.01$, รูปที่ 7c) และ peak C ($R^2 = 0.61$, $p < 0.01$, รูปที่ 7d) ซึ่งค่า R^2 ที่สูงที่สุดที่ได้จากการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง

ค่า TTHM-FP₂₄ กับพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ค่าความเข้มแสงแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารกลุ่มฮิวมิก (peak C) แสดงถึงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างสารกลุ่มฮิวมิกกับค่า TTHM-FP₂₄ ซึ่งผลที่ตรวจพบนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้ค่าความเข้มแสงแสงฟลูออเรสเซนซ์เพื่อทำนายค่าการเกิด THMs จากการเติมคลอรีน [17], [19] จากผลการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าค่าความเข้มแสงแสงฟลูออเรสเซนซ์ ของสารกลุ่มฮิวมิกเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลโดยตรงต่อค่า TTHM-FP₂₄ ซึ่งทางระบบ

ปรับปรุงคุณภาพน้ำสามารถนำข้อมูลของชนิดของสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล และความสัมพันธ์กับการเกิด THMs ไปใช้เพื่อเป็นประโยชน์กับการควบคุมการเดินระบบผลิตน้ำประปาให้มีประสิทธิภาพ และได้น้ำที่สะอาดปลอดภัยต่อผู้บริโภคมากยิ่งขึ้นได้



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Total THMs formation potential (TTHM-FP₂₄) กับ (a) UVA₂₅₄ (b) DOC, (c) ความเข้มแสงแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ตำแหน่ง peak A, และ (d) ความเข้มแสงแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ตำแหน่ง peak C โดยใช้ข้อมูลของน้ำตัวอย่างจากถังเก็บน้ำดิบและจากกระบวนการต่างๆ ของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ผลการทดลอง ระยะเวลา 7 เดือน)

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาการประเมินศักยภาพในการเกิดของไตรฮาโลมีเทนในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปามหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยใช้เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์เอ็กซ์ไซเทชัน-อิมิซชัน

เมทริกซ์ (EEM) โดยทำการเก็บน้ำตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 เดือน (ธันวาคม 2560 ถึง มิถุนายน 2561) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ใช้แหล่งน้ำดิบสองแหล่ง ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันคือ (1) แหล่ง

น้ำดิบจากสถานีสูบน้ำดิบบ้านโกทาใช้น้ำจากแม่น้ำพอง และ (2) แหล่งน้ำดิบจากสระรับน้ำฝนภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำดิบในรูปแบบปริมาณสารอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นของสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน พบว่า น้ำจากสถานีสูบน้ำดิบบ้านโกทามีคุณภาพดีกว่า และมีความต้องการคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคน้อยกว่า

2. ปริมาณสารอินทรีย์และ TTHM-FP₂₄ ของน้ำดิบ มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดยน้ำดิบในช่วงเดือนธันวาคม-กุมภาพันธ์ มีค่า TTHM-FP₂₄ สูงกว่าน้ำในช่วงเดือนมีนาคม-มิถุนายน ในระยะเวลา 7 เดือนของการเก็บตัวอย่าง ระบบตกตะกอนและกรองทรายมีประสิทธิภาพในการลด TTHM-FP₂₄ เฉลี่ยอยู่ที่ 41.2% และสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนที่ตรวจวัดได้ ความเข้มข้นสูงสุดคือ คลอโรฟอร์ม

3. การวิเคราะห์คุณลักษณะของสารอินทรีย์ด้วยเทคนิค EEM ทำให้สามารถแยกสารอินทรีย์ได้เป็น 3 ประเภทคือ peak A (ฟูลวีก) C (ฮิวมิก) และ T (โปรตีน) ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารกลุ่มฮิวมิก (peak C) มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับค่า TTHM-FP₂₄ สูงที่สุด ($R^2 = 0.61, p < 0.01$) ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ตำแหน่ง peak C จึงสามารถใช้ทำนายค่าศักยภาพในการเกิด THMs ได้ดีกว่าค่า UVA₂₅₄ และ DOC

ผลจากการศึกษาสารตั้งต้นของสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน โดยใช้เทคนิค ฟลูออเรสเซนซ์ EEM มีข้อดี คือ วิธีการวิเคราะห์ ไม่ซับซ้อน ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ตัวอย่างและใช้ปริมาตรตัวอย่างน้อย เทคนิคดังกล่าวสามารถตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์แม้ในปริมาณน้อย และยังสามารถแสดงรายละเอียดคุณลักษณะทางเคมีและแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ได้ ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เพื่อเป็นฐานข้อมูลเชิงปริมาณและคุณภาพของสารอินทรีย์ในน้ำดิบและในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ ในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพน้ำด้านสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรค อีกทั้งยังสามารถประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ประเภทต่างๆ ของหน่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาในแต่ละขั้นตอน เพื่อให้การควบคุมการเดินระบบผลิตน้ำประปาให้มีประสิทธิภาพ และได้น้ำที่สะอาดปลอดภัยต่อผู้บริโภคบริโภคยิ่งขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

1. Elbana, M., Ramirez de Cartagena, F. and Puig-Bargués, J., 2012, "Effectiveness of Sand Media Filters for Removing Turbidity and Recovering Dissolved Oxygen from a Reclaimed Effluent Used for Micro-Irrigation," *Agricultural Water Management*, 111, pp. 27–33.
2. American Water Works Association, 2011, *Water Quality and Treatment: A Handbook on Drinking Water*, 6th ed., McGraw-Hill.
3. Leenheer, J.A. and Croué, J.P., 2003, "Peer Reviewed: Characterizing Aquatic Dissolved Organic Matter, Understanding the Unknown Structures Is Key to Better Treatment of Drinking Water," *Environmental Science and Technology*, 1, pp. 18A-26A.
4. Richardson, S.D., Plewa, M.J., Wagner, E.D., Schoeny, R. and DeMarini, D.M., 2007, "Occurrence, Genotoxicity, and Carcinogenicity of Regulated and Emerging Disinfection By-Products in Drinking Water: A Review and Roadmap for Research," *Mutation Research*, 636, pp. 178–242.
5. US EPA, 2001, National Primary Drinking Water Regulations: Stage 1 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rule.
6. Plewa, M.J., Muellner, M.G., Richardson, S.D., Fasano, F., Buettner, K.M., Woo, Y.T., McKague, A.B. and Wagner, E.D., 2008, "Occurrence, Synthesis, and Mammalian Cell Cytotoxicity and Genotoxicity of Haloacetamides: An Emerging Class of Nitrogenous Drinking Water Disinfection Byproducts," *Environmental Science and Technology*, 42 (3), pp. 955–61.
7. US EPA, 2016, Six-Year Review 3 Technical Support Document for Disinfectants/Disinfection By products Rules.
8. World Health Organization, 2011, *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th ed., Geneva, Switzerland.
9. Villanueva, C.M., Cantor, K.P., Grimalt, J.O., Malats, N., Silverman, D., Tardon, A., Closas, R.G., Serra,

- C., Carrato, A., Vinyals, G.C., Marcos, R., Rothman, N., Real, F.X., Dosemeci, M. and Kogevinas, M, 2007, "Bladder Cancer and Exposure to Water Disinfection By-Products through Ingestion, Bathing, Showering, and Swimming in Pools," *American Journal of Epidemiology*, 165 (2), pp. 148–156.
10. Chu, I., Secours, V., Marino, I. and Villeneuve, D.C., 1980, "The Acute Toxicity of Four Trihalomethanes in Male and Female Rats," *Toxicology and Applied Pharmacology*, 52 (2), pp. 351–353.
11. World Health Organization, 2005, Trihalomethanes in Drinking Water: Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.
12. Weishaar, J.L., Aiken, G.R., Bergamashi, B.A., Fram, M.S., Fujii, R. and Mopper, K., 2003, "Evaluation of Specific Ultra-Violet Absorbance as an Indicator of the Chemical Content of Dissolved Organic Carbon," *Environmental Chemistry*, 37, pp. 4702–4708.
13. Matilainen, A., Vepsäläinen, M. and Sillanpää, M., 2010, "Natural Organic Matter Removal by Coagulation during Drinking Water Treatment: a Review," *Advances in Colloid and Interface Science*, 159, pp. 189–97.
14. Coble, P. G., 1996, "Characterization of Marine and Terrestrial DOM in Seawater Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy," *Marine Chemistry*, 51 (4), pp. 325–346.
15. Stedmon, C., Markager, S. and Bro, R., 2003, "Tracing Dissolved Organic Matter in Aquatic Environments Using a New Approach to Fluorescence Spectroscopy," *Marine Chemistry*, 82, pp. 239–254.
16. Bridgeman, J., Bierozza, M. and Baker, A., 2011, "The Application of Fluorescence Spectroscopy to Organic Matter Characterisation in Drinking Water Treatment," *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 10, pp. 277–290.
17. Hao, R., Ren, H., Li, J., Ma, Z. and Wan, H., 2012, "Use of Three-Dimensional Excitation and Emission Matrix Fluorescence Spectroscopy for Predicting the Disinfection By-Product Formation Potential of Reclaimed Water," *Water Research*, 46, pp. 5765–5776.
18. Hua, B., Veum, K., Yang, J., Jones, J. and Deng, B., 2010, "Parallel Factor Analysis of Fluorescence EEM Spectra to Identify THM Precursors in Lake Waters," *Environmental Monitoring and Assessment*, 161, pp. 71–81.
19. Jutaporn, P., Laolertworakul, W., Armstrong, M.D. and Coronell, O., 2019, "Fluorescence Spectroscopy for Assessing Trihalomethane Precursors Removal by MIEX Resin," *Water Science and Technology*, 79 (5), pp. 820–832.
20. Pifer, A.D. and Fairey, J. L., 2014, "Suitability of Organic Matter Surrogates to Predict Trihalomethane Formation in Drinking Water Sources," *Environmental Engineering Science*, 31 (3), pp.117–126.
21. Summers, R.S., Hooper, S. M., Shukairy, H. M., Solarik, G. and Owen, D., 1996, "Assessing DBP yield: Uniform Formation Conditions," *Journal American Water Works Association*, 88 (6), pp. 80–93.
22. Ha, T.-W., Choo, K.-H. and Choi, S.-J., 2004, "Effect of Chlorine on Adsorption/Ultrafiltration Treatment for Removing Natural Organic Matter in Drinking Water," *Colloid and Interface Science*, 274, pp. 587–593.
23. Kiattisaksiri, P., Khan, E., Punyapalakul, P. and Ratpukdi, T., 2016, "Photodegradation of Haloacetonitriles in Water by Vacuum Ultraviolet Irradiation: Mechanisms and Intermediate Formation," *Water Research*, 98, pp. 160–167.
24. Stedmon, C.A. and Bro, R., 2008, "Characterizing Dissolved Organic Matter Fluorescence with Parallel Factor Analysis : a Tutorial," *Limnology and Oceanography: Methods*, 6, pp. 572–579.
25. Jutaporn, P., Singer, P.C., Cory, R.M. and Coro-

- nell, O., 2016, "Minimization of Short-Term low-Pressure Membrane Fouling Using a Magnetic Ion Exchange (MIEX®) Resin," *Water Research*, 98, pp. 225–234.
26. Ratpukdi, T., Sinorak, S., Kiattisaksiri, P., Punyapalakul, P. and Siripattanakul-Ratpukdi, S., 2019, "Occurrence of Trihalomethanes and Haloacetonitriles in Water Distribution Networks of Khon Kaen Municipality, Thailand," *Water Supply*, 19 (6), pp. 1–10.
27. Tunggolou, J. and Payus, C., 2017, "Application of Moringa Oleifera Plant as Water Purifier for Drinking Water Purposes," *Journal of Environmental Science and Technology*, 10 (5), pp. 268–275.
28. Kueseng, T., Suksaroj, T.T., Musikavong, C. and Suksaroj, C., 2011, "Enhanced Coagulation for Removal of Dissolved Organic Matter and Trihalomethane Formation Potential from Raw Water Supply in Sri-Trang Reservoir, Thailand," *Water Practice and Technology*, 6 (1).
29. Tungsudjawong, K., Leungprasert, S. and Peansawang, P., 2018, "Investigation of Humic Acids Concentration in Different Seasons in a Raw Water Canal, Bangkok, Thailand," *Water Science and Technology Water Supply*, 18 (5), pp. 1727–1738.
30. Musikavong, C., Inthanuchit, K., K. Srimuang, Suksaroj, T.T. and C. Suksaroj, C., 2013, "Reduction of Fractionated Dissolved Organic Matter and Their Trihalomethane Formation Potential with Enhanced Coagulation," *ScienceAsia*, 39, pp. 56–66.
31. Gray, N.F., 2014, "Free and Combined Chlorine," pp. 571–590, in S.L. Percival, D.W. Williams, N.F. Gray, M.V. Yates and R.M. Chalmers (Eds.) *Microbiology of Waterborne Diseases: Microbiological Aspects and Risks*, 2nd ed., Elsevier Ltd.
32. Symons, J.M., McCabe, L. and Geldreich, E., 1999, *Formation and Control of Disinfection by-products in Drinking water*, 1sted. Denver, CO: American Water Works Association.
33. Chen, Y., Arnold, W.A., Griffin, C.G., Olmanson, L.G., Brezonik, P.L. and Hozalski, R.M., 2019, "Assessment of the Chlorine Demand and Disinfection Byproduct Formation Potential of Surface Waters via Satellite Remote Sensing," *Water Research*, 165, pp. 1–12.
34. Yee, L.F., Abdullah, M.P., Ata, S. and Ishak, B., 2006, "Dissolved Organic Matter and Its Impact on the Chlorine Demand of Treated Water," *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 10 (2), pp. 243–250.
35. Thomas, J.D., 1997, "The Role of Dissolved Organic Matter, Particularly Free Amino Acids and Humic Substances, in Freshwater Ecosystems," *Freshwater Biology*, 38 (1), pp. 1–36.
36. Magazinovic, R.S., Nicholson, B.C., Mulcahy, D.E. and Davey, D.E., 2004, "Bromide Levels in Natural Waters: Its Relationship to Levels of Both Chloride and Total Dissolved Solids and the Implications for Water Treatment," *Chemosphere*, 57, pp. 329–335.
37. Sun, Y.X., Wu, Q.Y., Hu, H.Y. and Tian, J., 2009, "Effect of Bromide on the Formation of Disinfection By-Products during Wastewater Chlorination," *Water Research*, 43 (9), pp. 2391–2398.
38. Cory, R.M., McKnight, D.M., Chin, Y.P., Miller, P. and Jaros, C.L., 2007, "Chemical Characteristics of Fulvic Acids from Arctic Surface Waters: Microbial Contributions and Photochemical Transformations," *Journal of Geophysical Research*, 112, pp.1–14.
39. Na-Phatthalung, W., Musikavong, C. and Suttinun, O., 2016, "The Presence of Aliphatic and Aromatic Amines in Reservoir and Canal Water as Precursors to Disinfection By-Products," *Journal of Environmental Science and Health. - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 51 (11), pp. 900–913.
40. Singer, P.C. and K. Bilyk, K., 2002, "Enhanced Coagulation Using a Magnetic Ion Exchange Resin," *Water Research*, 36, pp. 4009–22.

