

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นของสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนโดยใช้ เรซินแลกเปลี่ยนประจุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กและการสร้างและรวมตะกอน

Comparison between magnetic ion exchange resin and coagulation for THM precursors removal

นารีนานู รันทม¹, และ ปณิธาน จุฑาพร^{1*}

¹Research Center for Environmental and Hazardous Substance Management (EHSM), Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002, Thailand

*Corresponding author; E-mail address: panitju@kku.ac.th

บทคัดย่อ

คุณภาพน้ำประปาที่สะอาดปลอดภัย เป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมากในปัจจุบัน การเติมสารเคมีเพื่อฆ่าเชื้อโรค อาจนำไปสู่ความเสี่ยงในการรับสัมผัสสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (disinfection by products, DBPs) อันเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารอินทรีย์ละลายน้ำและคลอรีน งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำจากน้ำดิบคลองอู่ตะเภา จ. สงขลา วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และการลดศักยภาพการเกิด DBPs กลุ่มไตรฮาโลมีเทน (trihalomethanes, THMs) โดยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เปรียบเทียบกับการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก (magnetic ion exchange (MIEX) resin) น้ำดิบมีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) เท่ากับ 2.31 mg/L เมื่อเติมคลอรีนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อให้เกิด THMs 349 µg/L เรซิน MIEX มีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC มากกว่ากระบวนการสร้างและการรวมตะกอน กล่าวคือ การใช้กระบวนการสร้างและรวมตะกอน สามารถกำจัด DOC ได้ 43% และลดการเกิด THMs ได้ 45% ในขณะที่การบำบัดด้วยเรซิน MIEX สามารถกำจัด DOC ได้ 64% และลดการเกิด THMs ได้ 63% การสร้างและรวมตะกอนลดการเกิดคลอโรฟอร์มได้ดี แต่ส่งผลให้เกิด THMs ที่มีโบรมไนด์เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น การบำบัดน้ำด้วยเรซิน MIEX สามารถลดการเกิด THMs ทั้งที่มีโบรมไนด์และไม่มีโบรมไนด์เป็นองค์ประกอบได้ ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงกว่า การบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX ก่อนการสร้างและรวมตะกอนยังสามารถลดความต้องการสารสร้างแกนตะกอนและความต้องการคลอรีนได้ดี จากผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสารอินทรีย์ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์เอ็กซ์ไซเทชัน-อิมิสชัน เมทริกซ์ บ่งชี้ว่าการสร้างและรวมตะกอนแสดงพฤติกรรมเลือกกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิก ในขณะที่เรซิน MIEX สามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิก ฟุลวิก และโปรตีน ได้ดีทุกกลุ่ม

คำสำคัญ: สารอินทรีย์ละลายน้ำ, การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน, ไตรฮาโลมีเทน, เรซินแลกเปลี่ยนประจุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก

Abstract

Quality of water supply is always a crucial matter of concern, especially after Covid-19 pandemic. Chemical disinfection could lead to a health risk due to an exposure to carcinogenic disinfection by-products (DBPs) due to a reaction between dissolved organic matter (DOM) and chlorine-based disinfectant. This study investigates water treatment process for the removal of DOM from a raw water collected from U-tapao canal, Songkla province. Conventional poly-aluminum chloride coagulation was compared to magnetic ion exchange (MIEX) resin for its efficacy in DOM removal and reduction of DBPs formation. The raw water contained 2.31 mg/L of dissolved organic carbon (DOC), resulted in trihalomethane formation potential (THM-FP) of 349 µg/L under 24-hour chlorination. MIEX resin was more effective than coagulation at DOC removal. At its optimum dose, coagulation achieved 43% and 45% of DOC removal and THMs formation potential reduction, respectively. MIEX treatment alone removed 64% of DOC and thus reduced THMs formation potential by 63%. Coagulation treatment was effective at reduction of formation of chloroform but led to an increase in brominated THMs formation. MIEX treatment reduced formation of both chlorinated and brominated THMs effectively. MIEX pre-treatment prior to coagulation reduced coagulation demand and chlorine demand. DOM characterization using fluorescence excitation emission matrix revealed that coagulation showed

preferential removal of humic-like substances, while MIEX resin was effective at removal of all DOM fractions.

Keywords: dissolved organic carbon, chlorination, trihalomethanes, magnetic ion exchange resin

1. บทนำ

การผลิตน้ำประปาโดยทั่วไปประกอบด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน การตกตะกอน การกรองทราย ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ มีหน้าที่กำจัดความขุ่นหรืออนุภาคแขวนลอยในน้ำ ไม่สามารถกำจัดเชื้อโรคหรือจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำได้ ดังนั้นการฆ่าเชื้อโรคในน้ำจึงเป็นหนึ่งในกระบวนการสำคัญในการผลิตน้ำประปาเพื่อให้ได้มาตรฐานและมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้น้ำ กระบวนการฆ่าเชื้อโรคส่วนใหญ่นิยมใช้สารเคมีในการฆ่าเชื้อ เช่น คลอรีนแก๊ส คลอรีนน้ำในรูปโซเดียมไฮโปคลอไรท์ คลอรีนไดออกไซด์ และคลอรามิน แม้การเติมสารเหล่านี้ทำให้ได้น้ำประปาที่ปราศจากเชื้อโรค แต่อาจนำไปสู่ความเสี่ยงจากการรับสัมผัสสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อ (disinfection by product, DBPs) สารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบคลอรีนและสารอินทรีย์ละลายน้ำ สารพลอยได้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของสารฆ่าเชื้อโรคและองค์ประกอบของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ [1] สารพลอยได้เหล่านี้บางชนิดมีศักยภาพในการก่อมะเร็ง จึงถูกกำหนดเป็นหนึ่งในค่ามาตรฐานน้ำประปาในหลายประเทศ สำหรับประเทศไทยจึงกำหนดค่ามาตรฐานตามเอกสารแนะนำขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) [2] โดยกำหนดเกณฑ์ค่ามาตรฐานของสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (trihalomethane, THMs) 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม (chloroform, CHCl_3), โบโรไดคลอโรมีเทน (bromodichloromethane, CHBrCl_2), ไดโบโรคลอโรมีเทน (dibromochloromethane, CHBr_2Cl) และโบโรฟอร์ม (bromoform, CHBr_3) มีค่าไม่เกิน 300, 60, 100 และ 100 $\mu\text{g/L}$ ตามลำดับ และยังกำหนดค่าผลรวมของอัตราส่วนความเข้มข้นของสารกลุ่ม THMs แต่ละชนิดต่อค่าแนะนำ (THMs Ratio) ให้มีค่าไม่เกิน 1 [3]

การควบคุมการเกิดสารพลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพทำได้โดยการกำจัดสารตั้งต้นของสารพลอยได้ ได้แก่ สารอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic matter, DOM) ซึ่งสามารถกำจัดได้หลายวิธี เช่น การสร้างและรวมตะกอน (coagulation) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และการกรองด้วยเมมเบรน เป็นต้น กระบวนการที่นิยมใช้ในการผลิตน้ำประปาของประเทศไทย ได้แก่ การสร้างและรวมตะกอนด้วยสารเคมีกลุ่มอะลูมิเนียม เช่น โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (poly-aluminum chloride, PACl) และสารส้ม (alum) แต่กระบวนการสร้างและรวมตะกอนนั้นมีข้อเสียคือ ใช้สารเคมีในปริมาณมาก เกิดตะกอนที่ต้องกำจัด และยังต้องการค่าความเป็นด่าง (alkalinity) ในการสร้างตะกอน จึงไม่เหมาะกับน้ำดิบที่มีค่าความขุ่นสูงและมีค่าความเป็นด่างต่ำ อีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำในต่างประเทศ คือเรซินแลกเปลี่ยนประจุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก (magnetic ion exchange (MIEX) resin) เรซิน MIEX เป็นเรซินแลกเปลี่ยนประจุลบชนิดต่างแก๊ว โครงสร้างเป็นโพลีอะคริลิกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

(macroporous) เรซิน MIEX มีขนาดเม็ดเล็กประมาณ 150 – 180 μm ซึ่งเล็กกว่าเรซินที่ใช้ทั่วไปในท้องตลาดถึง 2 – 5 เท่า ทำให้มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น และคุณสมบัติแม่เหล็กในเม็ดเรซิน ช่วยให้เรซินรวมตัวและตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้น้ำเรซินกลับมาพื้นสภาพและนำมาใช้ใหม่ได้ง่าย [4] ประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) ของเรซิน MIEX อยู่ในช่วง 36 – 72% [5] ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบ โดยในน้ำดิบที่มีค่าการดูดซับแสงจำเพาะ (specific ultraviolet absorbance, SUVA) สูง เรซินจะมีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC สูงกว่าในน้ำที่มีค่า SUVA ต่ำ เนื่องจากเรซินกำจัดสารอินทรีย์ที่อะโรมาติกได้ดี [6] อย่างไรก็ตามเรซิน MIEX ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานกับน้ำบางชนิดเช่น น้ำที่มีสารอินทรีย์กลุ่มที่มีคุณสมบัติเป็นกลางหรือเป็นประจุบวก หรือน้ำที่มีไอออนประจุลบในความเข้มข้นสูง เช่น น้ำกร่อยที่มีคลอไรด์ไอออนสูง เนื่องจากไอออนประจุลบอื่น ๆ มีคุณสมบัติเป็นไอออนแข่งขัน (competing ion) กับสารอินทรีย์ นอกจากนี้ ในการผลิตน้ำประปา จำเป็นต้องใช้เรซิน MIEX ควบคู่กับกระบวนการอื่น ๆ ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เนื่องจากเรซิน MIEX ไม่สามารถกำจัดความขุ่นและไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ [4]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดสารตั้งต้นของสารพลอยได้ในน้ำดิบจากคลองอู่ตะเภา จ.สงขลา โดยใช้เรซิน MIEX เปรียบเทียบกับกระบวนการสร้างและรวมตะกอนด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ศึกษาศักยภาพการเกิดสารพลอยได้กลุ่ม THMs และศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำอันเป็นสารตั้งต้นของสารพลอยได้ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์เอ็กซิเทชัน-อีมิสชัน เมทริกซ์ (fluorescence excitation-emission matrix, fluorescence EEM) ผลการศึกษาสามารถนำไปขยายผลประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อการผลิตน้ำประปาที่ใช้น้ำดิบจากคลองอู่ตะเภาได้

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 น้ำตัวอย่าง

น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองถูกเก็บจากคลองอู่ตะเภา ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดิบของระบบผลิตน้ำประปาขนาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2565 การขนส่งตัวอย่างน้ำจาก จ. สงขลา ไปยัง จ.ขอนแก่น ใช้รถขนส่งตัวอย่างที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ต่ำกว่า 4 $^{\circ}\text{C}$ เพื่อเก็บรักษาตัวอย่างก่อนทำการทดลอง

2.2 การหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์

การหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ ทำการทดลองด้วยเครื่องจาร์เทส (jar test) แบบหกใบพัด ใช้ PACl เป็นสารสร้างตะกอน สำหรับน้ำดิบใช้ PACl ที่ความเข้มข้น 10 - 60 mg/L และสำหรับน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX GOLD ใช้ PACl ที่ความเข้มข้น 5 - 30 mg/L กระบวนการสร้างและรวมตะกอนประกอบไปด้วย การกวนเร็วที่ความเร็วรอบ 150 rpm เป็นเวลา 2 นาที

และการกวนซ้ำที่ความเร็วรอบ 35 rpm เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นจึงหยุดการกวนผสมและปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที [7] นำน้ำใสที่ได้หลังการตกตะกอนไปวัดความขุ่น จากนั้นจึงทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/F ขนาด 0.7 μm เพื่อกำจัดตะกอนแขวนลอยตกค้าง ก่อนนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำในขั้นตอนต่อไป

2.3 การหาปริมาณเรซินที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์

การทดลองเบื้องต้นเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการกวนผสมเรซินสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ ใช้เรซิน MIEX GOLD 5 mL/L และทำการกวนผสมกับน้ำดิบที่ความเร็วรอบ 150 rpm และเก็บตัวอย่างน้ำใสในช่วง 5 - 90 นาที นำไปวิเคราะห์หาคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ เพื่อหาระยะเวลาที่การกำจัด DOC เข้าสู่จุดสมดุลจากผลการทดลองขั้นต้น พบว่าการกำจัด DOC โดยเรซินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 - 20 นาทีแรกของการกวนผสม จากนั้นค่า DOC ของน้ำใส ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จึงสรุปเวลาที่เหมาะสมในการกวน คือ 20 นาที จากนั้นจึงนำเวลา 20 นาที ที่ได้จากการทดลองนี้ไปใช้ในการทดลองการหาปริมาณเรซินที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ โดยทดสอบการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำตัวอย่างโดยใช้เรซินที่อัตราบำบัด 1, 2, 3, 5, 7 และ 10 mL/L และกวนผสมเป็นเวลา 20 นาที [8] หลังจากนั้นแยกเรซินออกจากน้ำตัวอย่างโดยการตกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที นำน้ำใสที่ได้ไปวัดความขุ่น จากนั้นจึงทำการกรองด้วยกระดาษกรอง GF/F ขนาด 0.7 μm เพื่อกำจัดตะกอนแขวนลอย ก่อนที่จะนำน้ำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำต่อไป

2.4 วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำของน้ำตัวอย่างใช้การวิเคราะห์ pH และสภาพความนำไฟฟ้าด้วยเครื่อง multimeter ยี่ห้อ HACH รุ่น HQ 40D วิเคราะห์ความเป็นด่างด้วยวิธีการไตเตรท (APHA 2320B) วิเคราะห์ความขุ่นด้วยเครื่องวัดความขุ่น (nephelometric turbidimeter) ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100P วิเคราะห์ DOC ด้วยเครื่อง TOC analyzer ยี่ห้อ Analytik Jena AG รุ่น multi N/C® 2100 วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ 254 nm (ultraviolet absorbance at 254 nm, UVA₂₅₄) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ยี่ห้อ HACH รุ่น DR 6000 ค่า SUVA ซึ่งใช้บ่งบอกความเป็นอะโรมาติกของสารอินทรีย์ในน้ำ คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่าง UVA₂₅₄ และ DOC [9]

น้ำดิบ น้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วย PACl น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซิน MIEX น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX ตามด้วย PACl ถูกเติมคลอรีนด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite, NaOCl) ตามวิธี uniform formation condition (UFC) เพื่อจำลองสภาวะการเติมคลอรีนของน้ำประปาในเส้นทาง [10] ภายใต้อุณหภูมิ pH 8 \pm 0.2 ควบคุมอุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วิเคราะห์คลอรีนคงเหลือด้วยวิธีวัดสี DPD (N,N-diethyl-p-phenylenediamine) และเลือกตัวอย่างที่ปริมาณคลอรีนคงเหลืออยู่ในช่วง 1.0 \pm 0.4 mg/L ไปสกัดสารพอลิไดคัล THMs 4 ชนิด คือ คลอโรฟอร์ม (TCM) โบรมไคโคลโรฟอร์มเทน (BDCM) ไดโบรมไคโคลโรฟอร์มเทน (DBCM) และโบรมิฟอร์ม

(TBM) ตามวิธีของ U.S. EPA method 551.1 [11] และวิเคราะห์ความเข้มข้นของ THMs ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง gas chromatography (GC-ECD, Shimadzu Nexis GC - 2030, Japan) ใช้คอลัมน์ RtX® - 5 ค่า THM ratio ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของคุณภาพน้ำประปา สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1)

$$\frac{C_{CF}}{GV_{CF}} + \frac{C_{BDCM}}{GV_{BDCM}} + \frac{C_{DBCM}}{GV_{DBCM}} + \frac{C_{BF}}{GV_{BF}} \leq 1 \quad (1)$$

เมื่อ C คือความเข้มข้นของ THMs แต่ละชนิด
GV คือค่าแนะนำของ THMs แต่ละชนิด

การวิเคราะห์คุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเทคนิค fluorescence EEM วิเคราะห์ด้วยเครื่อง spectrofluorometer ยี่ห้อ Edinburgh รุ่น FS - 5 ตั้งค่าความยาวคลื่นที่ประเภท excitation ที่ 200 - 500 nm โดยเพิ่มความยาวคลื่นครั้งละ 5 nm ค่าความยาวคลื่นประเภท emission ที่ 250 - 550 nm โดยเพิ่มความยาวคลื่นครั้งละ 1 nm ใช้ควเวทแบบควอตซ์ (quartz cuvette) ในการตรวจวัด ค่าที่ตรวจวัดได้จะถูกนำมาสร้างเป็นแผนภาพ contour จากข้อมูลของ EEM ด้วยโปรแกรม MATLAB (MATLAB R2018, MathWorks) จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยวิธีการเลือกจุดยอดของสารอินทรีย์แต่ละชนิด (peak picking) [12] โดยเปรียบเทียบตำแหน่ง peak ของน้ำตัวอย่างและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระบุตำแหน่งเป็นค่า excitation และ emission (Ex/Em) ซึ่งตำแหน่ง peak ที่ Ex/Em 250/400, 350/450 และ 275/340 คือ peak A, C, T เป็นตัวแทนสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติคล้ายกรดฟุลวิก (fulvic-like DOM) สารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติคล้ายกรดฮิวมิก (humic-like DOM) และ สารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติคล้ายโปรตีนชนิดทริปโตฟาน (tryptophan-like DOM) ตามลำดับ [13], [14] ซึ่งแหล่งที่มาของสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกและฟุลวิกคือพืชและพื้นดิน (terrestrial derived) ส่วนสารอินทรีย์กลุ่มที่มีคุณสมบัติคล้ายโปรตีนนั้นมาจากกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (microbial derived) [15]

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 คุณภาพน้ำดิบ

คุณลักษณะของน้ำดิบจากคลองอู่ตะเภา จ.สงขลา ที่ทำการเก็บตัวอย่างในเดือนพฤษภาคม 2565 แสดงไว้ดังตารางที่ 1 ค่า DOC ของน้ำดิบมีค่า 2.31 mg/L และ UVA₂₅₄ มีค่า 0.099 cm⁻¹ ทำให้ค่า SUVA ของน้ำดิบมีค่าสูงถึง 4.29 L/mg-m บ่งบอกได้ว่าสารอินทรีย์ในน้ำดิบมีความเป็นอะโรมาติกสูงเป็นตัวบ่งชี้สารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิก ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของน้ำดิบจากคลองอู่ตะเภาก่อนหน้าซึ่งมีค่า SUVA อยู่ในช่วง 2.8 - 8.1 L/mg-m [16] เมื่อเทียบกับแหล่งน้ำผิวดินอื่นที่ใช้สำหรับผลิตน้ำประปา เช่น แม่น้ำเจ้าพระยา (SUVA = 3.2 L/mg-m) [17] แม่น้ำพอง (SUVA = 1.6 - 2.8 L/mg-m) [8] พบว่าน้ำดิบจากคลองอู่ตะเภา มีค่า SUVA สูงกว่าน้ำดิบจากแหล่งอื่น ๆ

น้ำดิบมีค่าความเป็นด่างและความขุ่นอยู่ที่ 35.0 mg/L as CaCO₃ และ 38.1 NTU ตามลำดับ ซึ่งค่าความเป็นด่างที่ต่ำขนาดนี้ อาจส่งผลให้กระบวนการสร้างและรวมตะกอนมีประสิทธิภาพต่ำ [18] ในระบบผลิตน้ำประปาขนาดใหญ่จึงได้มีการเติมโซดาแอซ (Na₂CO₃) และโซดาไฟ (NaOH) เพื่อปรับสภาพน้ำดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการสร้างตะกอน อย่างไรก็ตาม ในการทดลองนี้ มุ่งเน้นทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างและรวมตะกอนเปรียบเทียบกับเรซิน MIEX โดยไม่ทำการปรับสภาพความเป็นด่างและค่า pH ของน้ำตัวอย่าง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำดิบจากระบบผลิตน้ำประปาขนาดใหญ่

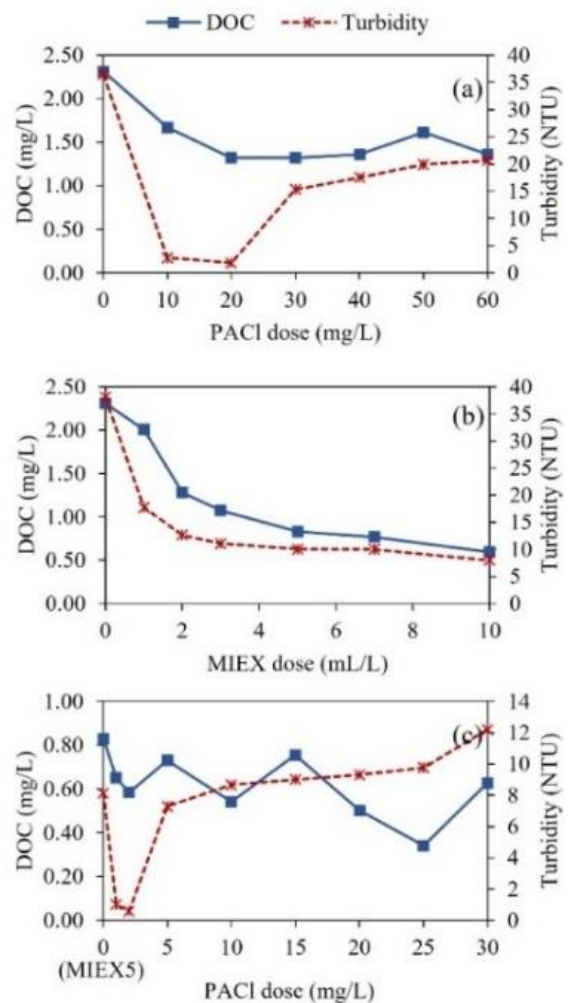
คุณลักษณะน้ำดิบ	หน่วย	ค่าที่วิเคราะห์
pH	-	6.29
สภาพการนำไฟฟ้า	μS/cm	222
ความเป็นด่าง	mg/L as CaCO ₃	35.0
ความขุ่น	NTU	38.1
DOC	mg/L	2.31
UVA ₂₅₄	cm ⁻¹	0.099
SUVA	L/mg-m	4.29

3.2 การกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำและความขุ่น

ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปา ต้องคำนึงถึงความขุ่นและสารอินทรีย์ละลายน้ำ เนื่องจากเป็นความขุ่นเป็นคุณภาพน้ำที่สามารถสังเกตได้ง่าย และสารอินทรีย์ละลายน้ำเป็นสารตั้งต้นของการเกิดสารพลอยได้จากคลอรีนฆ่าเชื้อโรค จากผลการกำจัด DOC และความขุ่นของน้ำดิบโดยใช้กระบวนการสร้างและรวมตะกอนด้วย PACL ที่ความเข้มข้น 10 – 60 mg/L (รูปที่ 1a) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า DOC ของน้ำดิบลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อใช้ PACL ในช่วงความเข้มข้น 10 – 20 mg/L จากนั้นค่า DOC ลดลงเล็กน้อยในช่วงความเข้มข้น 20 – 60 mg/L ดังนั้นค่าความเข้มข้นของ PACL ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำอยู่ที่ 20 mg/L ซึ่งสามารถลดค่า DOC ของน้ำดิบจาก 2.31 mg/L ให้เหลือ 1.32 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัด DOC เท่ากับ 43% ขณะที่ปริมาณของสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดความขุ่น อยู่ในช่วงความเข้มข้น 10 – 20 mg/L โดยสามารถลดความขุ่นของน้ำดิบจาก 38.05 NTU เหลือ 2.76 – 1.83 NTU ซึ่งเป็นค่าความขุ่นที่ผ่านค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค (5 NTU) [16] เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนในช่วง 30 – 60 mg/L ความขุ่นของน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับเพิ่มสูงขึ้น อยู่ในช่วง 15.3-20.6 NTU แสดงให้เห็นว่าปริมาณประจุบวกที่เกิดขึ้นจากการเติม PACL มีมากกว่าปริมาณประจุบวกที่ต้องการสำหรับสร้างเสถียรภาพให้กับประจุลบของความขุ่นในน้ำดิบ [18]

เมื่อทำการบำบัดน้ำด้วยเรซิน MIEX (รูปที่ 1b) พบว่าค่า DOC ของน้ำที่ผ่านการบำบัดลดลงเมื่อใช้ปริมาณเรซินเพิ่มขึ้น ค่า DOC ของน้ำดิบลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อใช้เรซินที่อัตราบำบัด 1 – 5 mL/L จากนั้น ค่า DOC ลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มอัตราบำบัดสูงกว่า 5 mL/L ดังนั้น ปริมาณเรซินที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ คือ 5 mL/L ซึ่งคิดเป็น

ประสิทธิภาพในการกำจัด DOC เท่ากับ 64% แนวโน้มในการกำจัดความขุ่นด้วยเรซิน MIEX มีลักษณะคล้ายคลึงกับการกำจัด DOC โดยค่าความขุ่นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงปริมาณเรซินที่อัตราบำบัด 1 – 3 mL/L สามารถลดค่าความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบจาก 38.05 NTU ให้เหลือ 11.05 NTU จากนั้นค่าความขุ่นลดลงเล็กน้อยในช่วงปริมาณเรซินที่อัตราบำบัด 3 – 10 mL/L (ค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 11.05 – 7.98 NTU) ที่ปริมาณเรซินที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ (5 mL/L) สามารถลดค่าความขุ่นของดิบให้เหลือ 10.06 NTU แม้เรซิน MIEX ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อกำจัด DOC โดยเฉพาะ แต่เรซิน MIEX สามารถกำจัดความขุ่นของน้ำดิบได้เช่นกัน ที่ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ของ PACL (20 mg/L) และเรซิน MIEX (5 mL/L) พบว่า PACL สามารถกำจัดความขุ่นได้ดีกว่าเรซิน MIEX แต่เรซิน MIEX มีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการเกิด DBPs ได้ดีกว่าการสร้างและรวมตะกอน สอดคล้องกับผลงานวิจัยอื่น ๆ ในอดีต [5], [19], [20]



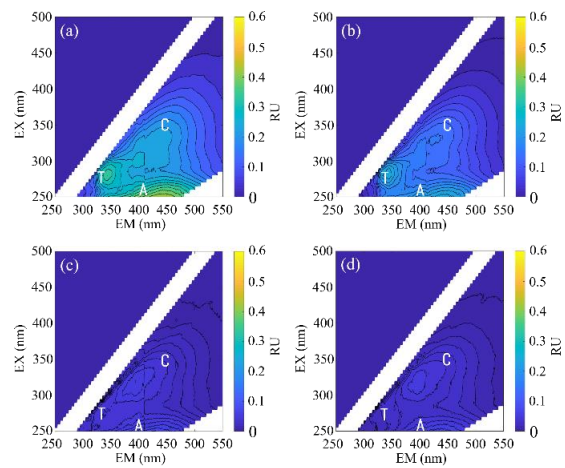
รูปที่ 1. ความสัมพันธ์ของคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) และความขุ่นที่เปลี่ยนแปลง เมื่อบำบัดด้วย (a) PACL 10 – 60 mg/L (b) เรซิน MIEX 1 – 10 mL/L และ (c) น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX 5 mL/L ตามด้วย PACL 1 – 30 mg/L

ผลการกำจัด DOC และความขุ่นของน้ำดิบที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX 5 mL/L ตามด้วย PACl ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (รูปที่ 1c) จะเห็นว่าไม่มีแนวโน้มของการกำจัด DOC ที่เกิดจากการบำบัดด้วย PACl หลังจากเรซิน หรือกล่าวได้ว่าสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ไม่สามารถถูกกำจัดด้วยเรซิน MIEX ก็ไม่สามารถถูกกำจัดด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนได้ ขณะที่ค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX ตามด้วย PACl ที่ความเข้มข้น 1 - 2 mg/L มีค่าลดลงเหลือเพียง 1.01-0.58 NTU ดังนั้นการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX ก่อนการเติม PACl สามารถช่วยลดปริมาณสารสร้างและรวมตะกอนที่ต้องการเพื่อกำจัดความขุ่น สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้น้ำตัวอย่างจากแม่น้ำพอง เมื่อบำบัดเบื้องต้นด้วยเรซิน สามารถลดความต้องการสารสร้างแกตะกอนจาก 40 mg/L เหลือเพียง 5 mg/L [8]

3.3 คุณสมบัติของสารอินทรีย์ละลายน้ำ

การศึกษาคุณสมบัติของสารอินทรีย์โดยเทคนิค Fluorescence EEM สามารถนำมาใช้เพื่อบ่งบอกแหล่งที่มาของสารอินทรีย์และเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารอินทรีย์ละลายน้ำ ผลการศึกษาคุณสมบัติของสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำดิบ น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย PACl น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซิน MIEX และน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX ตามด้วย PACl แสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นแผนภาพเส้นเค้าโครง (contour) ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่จุดต่าง ๆ จะเห็นว่า เกิดจุดยอด (peak) ที่มีความเข้มแสงสูงอย่างเห็นได้ชัด 3 จุด ได้แก่ จุด A (Ex/Em 250/400), C (Ex/Em 350/450) และ T (Ex/Em 275/340) ซึ่งทั้ง 3 จุดนี้ เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์กลุ่มฟุลวิก ฮิวมิก และโปรตีนทรูปโตฟาน ตามลำดับ [13], [14]

จากรูปที่ 2a จะเห็นว่าน้ำดิบนั้นมีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์สูงทั้ง 3 จุด โดยที่ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ จุด A > T > C สอดคล้องกับการศึกษาคุณสมบัติของอินทรีย์ของน้ำจากคลองอู่ตะเภา ในปี พ.ศ. 2556 [21] แต่ต่างจากคุณสมบัติของน้ำผิวดินจากแหล่งอื่น ๆ เช่น แม่น้ำเจ้าพระยา [22] ซึ่งมีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ จุด A > C > T การที่ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ จุด T สูงกว่า จุด C นั้น บ่งบอกได้ว่าน้ำดิบของคลองอู่ตะเภา มีสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีนทรูปโตฟานในปริมาณสูง โดยปกติแล้วน้ำผิวดินทั่วไป มักจะอุดมไปด้วยสารอินทรีย์กลุ่มฟุลวิกและฮิวมิกที่มาจากพืชและพื้นดิน ส่วนสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีนทรูปโตฟานนั้น มีการตรวจพบในปริมาณสูงในน้ำเสียหรือน้ำทิ้ง [23] เนื่องจากโปรตีนทรูปโตฟานนั้นเป็นสารอินทรีย์กลุ่มซึ่งมาที่มาจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ [22] น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซิน MIEX 5 mL/L มีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ต่ำกว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย PACl 20 mg/L มาก (รูปที่ 2b และ 2c) และการบำบัดด้วย PACl หลังจากเรซิน MIEX สังเกตไม่พบความแตกต่างในแผนภาพเส้นเค้าโครงความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ (รูปที่ 2d) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่ค่า DOC ไม่ลดลงเมื่อบำบัดด้วย PACl หลังจากเรซิน MIEX



รูปที่ 2. Fluorescence excitation-emission matrices (EEM) contour แสดงตำแหน่งจุด A, C และ T ของ (a) น้ำดิบ, (b) น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย PACl 20 mg/L, (c) น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซิน MIEX 5 mL/L, และ (d) น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วย MIEX 5 mL/L ตามด้วย PACl 5 mg/L

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์แต่ละชนิดของกระบวนการบำบัดน้ำ สามารถทำการเปรียบเทียบเชิงปริมาณได้โดยดึงข้อมูลค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของแต่ละจุด มาแสดงเป็นแผนภูมิแท่งดังแสดงในรูปที่ 3 สำหรับน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย PACl (รูปที่ 3a) พบว่ามีค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ลดลงเมื่อความเข้มข้นของ PACl เพิ่มขึ้น เมื่อใช้ PACl ที่ความเข้มข้น 20 mg/L สามารถลดค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ จุด A, C และ T ได้ 43%, 38% และ 34% ตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการสร้างและรวมตะกอนด้วย PACl สามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มฟุลวิกและฮิวมิกได้ดีกว่าสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีน ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวิเคราะห์ค่า SUVA ของน้ำตัวอย่าง เนื่องจากค่า SUVA เป็นดัชนีที่ใช้ในการชี้วัดสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกในน้ำ ค่า SUVA ที่สูงบ่งบอกว่าสารอินทรีย์ละลายน้ำนั้นมีค่าความเป็นอะโรมาติกสูง หรือน้ำตัวอย่างนั้นอุดมไปด้วยสารอินทรีย์ในกลุ่มฮิวมิก [24] น้ำที่ดิบจากคลองอู่ตะเภา มีค่า SUVA เท่ากับ 4.29 L/mg-m และเมื่อผ่านการบำบัดด้วย PACl ที่ความเข้มข้น 20 mg/L ส่งผลให้ ค่า SUVA ของน้ำลดลงจากเป็น 1.82 L/mg-m แสดงให้เห็นว่า สารอินทรีย์ละลายน้ำนั้นมีคุณสมบัติความเป็นอะโรมาติกลดลง

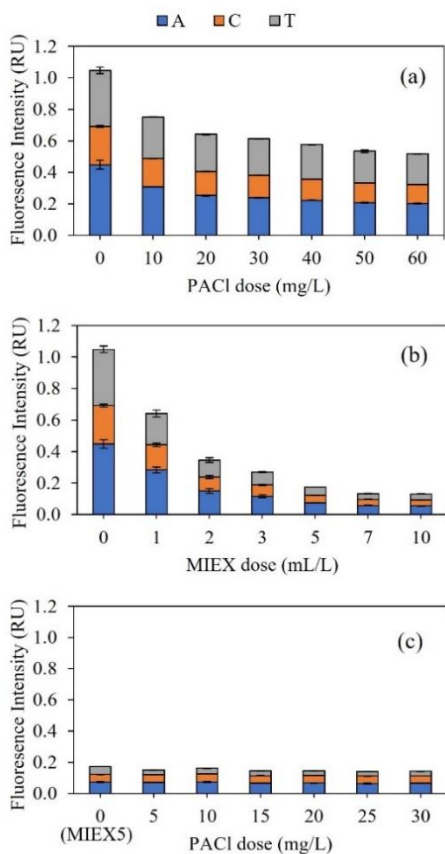
สำหรับน้ำตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซิน MIEX (รูปที่ 3b) ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของน้ำที่ผ่านการบำบัดลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณเรซินที่ใช้ในการบำบัดอยู่ในช่วง 1 - 5 mg/L เมื่อใช้เรซินที่ 5 mL/L สามารถลดค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ จุด A, C และ T ได้ 83%, 80% และ 86% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเรซิน MIEX มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์ทั้งกลุ่มฟุลวิก ฮิวมิก และโปรตีน และมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีนใกล้เคียงกับสารอินทรีย์กลุ่มฟุลวิกและฮิวมิก ส่งผลให้น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซิน 5 mL/L มีค่า SUVA เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 4.29 เป็น 4.40 L/mg-m

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ทดสอบเรซินกับน้ำผิวดิน ที่มีค่าความเป็นฮิวมิกสูง คือมีอัตราส่วนความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ จุด A/T

เท่ากับ 6.4 พบว่า เรซิน MIEX มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกและฟุลวิกได้ดีกว่ากลุ่มโปรตีน หรือมีพฤติกรรมเลือกกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิก [15] แต่เมื่อใช้เรซิน MIEX กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทั้งหมด พบว่าเรซินสามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีนได้ดีเท่า ๆ กับสารอินทรีย์กลุ่มฟุลวิก [14] น้ำดิบจากคลองอู่ตะเภานั้นมีสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีนอยู่มาก คือมีค่าอัตราส่วนความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ จุด A/T เท่ากับ 1.26 ส่งผลให้เรซินซึ่งมีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนประจุสูงสามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีนได้ดีเท่ากับสารอินทรีย์กลุ่มฟุลวิก

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ของเรซิน MIEX สูงกว่าการสร้างและรวมตะกอนด้วย PACl ในน้ำดิบที่มีค่า SUVA สูง เรซิน MIEX มีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC และ UVA₂₅₄ สูง [5], [25] และองค์ประกอบและคุณลักษณะของสารอินทรีย์ของน้ำดิบ ยังส่งผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการเลือกกำจัดสารอินทรีย์บางชนิดของเรซิน MIEX ด้วย

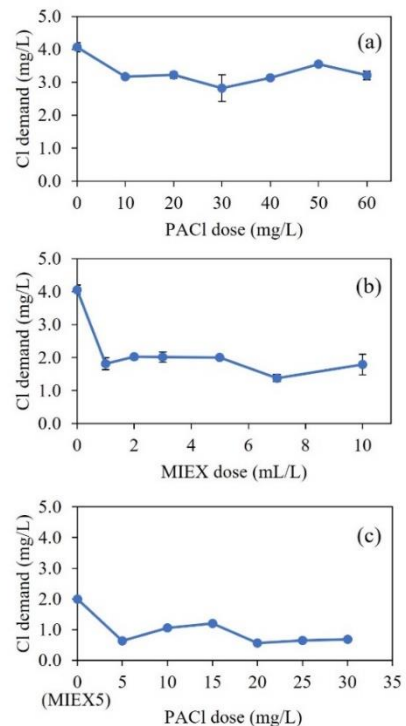
สำหรับน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX 5 mL/L มาแล้ว การบำบัดด้วย PACl ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ (รูปที่ 3c) กล่าวได้ว่าการเติม PACl หลังการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์เพิ่มได้ แต่สามารถกำจัดความขุ่นที่หลงเหลืออยู่ในน้ำได้ โดยใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนที่น้อยลง



รูปที่ 3 ค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ จุด A, C และ T ของ (a) PACl 10-60 mg/L (b) เรซิน MIEX 1-10 mL/L และ (c) น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX 5 mL/Lตามด้วย PACl 5-30 mg/L

3.4 ความต้องการคลอรีน

ความสามารถในการทำปฏิกิริยากับคลอรีนของสารอินทรีย์ละลายน้ำเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการควบคุมการเกิดสารพอลิไดจากการฆ่าเชื้อโรค ความต้องการคลอรีนเพื่อการฆ่าเชื้อโรคและเพื่อให้มีคลอรีนอิสระคงเหลือในเส้นท่อ ยังเป็นต้นทุนที่สำคัญในการผลิตน้ำประปาอีกด้วย [1] ค่าความต้องการคลอรีนของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย PACl 10 – 60 mg/L และน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซิน MIEX 1 – 10 mL/L หลังการเติม NaOCl เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงได้ดังรูปที่ 4 น้ำดิบมีความต้องการคลอรีนเท่ากับ 4.06 mg/L การบำบัดด้วย PACl ลดความต้องการคลอรีนลงได้เล็กน้อย คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดความต้องการคลอรีนได้ 12 – 30% (รูปที่ 4a) การบำบัดด้วยเรซิน MIEX สามารถลดความต้องการคลอรีนได้ 50 – 66% (รูปที่ 4b) ดังนั้น การกำจัดสารอินทรีย์โดยเรซิน MIEX สามารถลดความต้องการคลอรีนได้มากกว่าการสร้างและรวมตะกอนสำหรับน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX ตามด้วย PACl นั้นไม่พบแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความต้องการคลอรีน (รูปที่ 4c) ในการทดลองนี้ ค่าความต้องการคลอรีนต่ำสุดที่ประเมินได้คือ 0.64 mg/L ในน้ำที่การบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน 5 mL/L ตามด้วย PACl 5 mg/L คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดความต้องการคลอรีนได้ 84% ดังนั้น การบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX นอกจากช่วยลดปริมาณสารสร้างตะกอนแล้วยังสามารถช่วยลดความต้องการคลอรีนได้อีกด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Boyer et al [6] ซึ่งกล่าวว่า การบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX ลดความต้องการการสารสร้างแกนตะกอนและความต้องการคลอรีนได้ 67% และ 50% ตามลำดับเมื่อเทียบกับน้ำดิบ



รูปที่ 4. ความต้องการคลอรีนของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย (a) PACl 10-60 mg/L (b) เรซิน MIEX 1-10 mL/L และ (c) น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX 5 mL/Lตามด้วย PACl 5-30 mg/L

3.5 ศักยภาพการเกิดสารพลอยด์ได้กลุ่มไตรฮาโลมีเทน (THM-FP)

ผลการเกิดสารพลอยด์ได้ กลุ่ม THMs 4 ชนิด (TCM, BDCM, DBCM, และ TBM) และค่า THMs ratio ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของคุณภาพน้ำประปา ตามที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) แสดงไว้ดังรูปที่ 5 เมื่อเติมคลอรีนลงในน้ำดิบเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของ THMs 349 µg/L เมื่อพิจารณาค่าการก่อตัวของ THMs แต่ละชนิดพบว่า TCM เกิดมากที่สุดที่ 238 µg/L คิดเป็น 68% ของ THMs ที่เกิดขึ้นทั้งหมด ตามด้วย BDCM (26%) DBCM (6%) และ TBM (3%) การกระจายตัวของสาร THMs ทั้ง 4 ชนิด มีลักษณะคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ใช้น้ำจากคลองอู่ตะเภา ในปี พ.ศ. 2551 – พ.ศ. 2552 [26] ผลการก่อตัวของ THMs ดังกล่าว สามารถคำนวณเป็นค่า THMs ratio ของน้ำดิบได้เท่ากับ 2.44

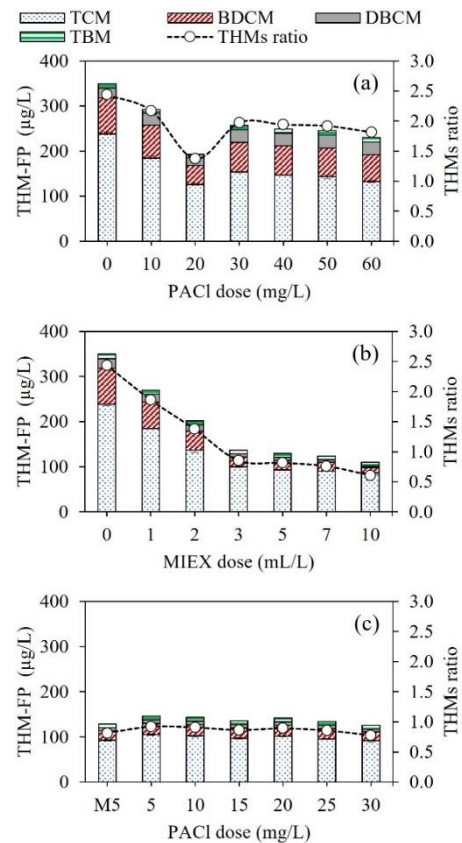
ผลการเกิด THMs เมื่อเติมคลอรีนลงในน้ำดิบ น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย PACI น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซิน MIEX และน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX ตาม PACI แสดงดังรูปที่ 5a, 5b และ 5c ตามลำดับ พบว่าค่า THM-FP ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย PACI ที่ความเข้มข้น 10 – 60 mg/L ลดลงทีละเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของ PACI ที่ใช้ในการบำบัดเพิ่มขึ้น และค่า THM-FP ลดลงมากที่สุด เท่ากับ 45% เมื่อใช้ PACI 20 mg/L ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของสารพลอยด์ได้กลุ่ม THMs ทั้ง 4 ชนิด พบว่าการสร้างและรวมตะกอนด้วย PACI ลดการเกิด TCM และ BDCM ได้ดีกว่า DBCM และ TBM กล่าวคือ PACI สามารถกำจัดสารตั้งต้นของ THMs ที่ไม่มีโบรม์หรือมีโบรม์เป็นองค์ประกอบเพียงหนึ่งโมเลกุล (TCM และ BDCM) ได้ดี นอกจากนี้เมื่อใช้ PACI ที่ความเข้มข้นเกินกว่า 20 mg/L กลับส่งผลให้ค่า DBCM-FP และ TCM-FP เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการกำจัดสารอินทรีย์โดยการสร้างและรวมตะกอนที่มีพฤติกรรมเลือกกำจัดสารกลุ่มฮิวมิคและฟุลวิก ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของ THMs เมื่อเติมคลอรีน และมีสาร THMs ที่มีโบรม์เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น[27] แม้ว่าน้ำดิบจะมีค่าความเข้มข้นของโบรม์ต่ำ

ค่ามาตรฐานของคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคนั้น กำหนดให้ ค่า THMs ratio ของน้ำประปาที่ผ่านการเติมคลอรีนแล้วมีค่าไม่เกิน 1 ในการทดลองนี้พบว่าค่า THMs ratio ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย PACI มีค่าเกินกว่า 1 ในทุกชุดการทดลอง (รูปที่ 5a) ค่า THMs ratio ต่ำสุดเท่ากับ 1.37 เมื่อใช้ความเข้มข้นของ PACI เท่ากับ 20 mg/L ดังนั้นการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดย PACI ที่ไม่ปรับค่าความเป็นด่าง ไม่ปรับ pH และไม่ใช่โพลีเมอร์ร่วมนั้น ไม่สามารถผลิตน้ำที่ผ่านค่ามาตรฐานด้านสารพลอยด์จากการฆ่าเชื้อโรคได้ ในการเดินระบบผลิตน้ำประปาที่ใช้คลองอู่ตะเภาเป็นแหล่งน้ำดิบ ได้ใช้กระบวนการ enhanced coagulation โดยทำการปรับค่า pH ความเป็นด่าง และใช้โพลีเมอร์ร่วมกับสารสารแกนตะกอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และควบคุมการเกิดสารพลอยด์ได้ อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีต่างๆ ในปริมาณมากส่งผลต่อต้นทุนการผลิตน้ำประปา

ค่า THM-FP ของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซิน MIEX มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเรซินที่ใช้ แนวโน้มการลดลงของ THM-FP มีรูปแบบคล้ายคลึงกับการลดลงของค่า THMs ratio กล่าวคือ เมื่อใช้ปริมาณเรซินที่อัตราบำบัด 1 – 3 mL/L ค่า THM-FP และ THMs ratio ลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้น ค่า THM-FP และ THMs ratio ลดลงเพียงเล็กน้อย ที่ปริมาณเรซิน 5 mL/L มีประสิทธิภาพในการลดค่า THM-FP ได้ 63% และลดค่า THMs ratio จาก 2.44 ให้เหลือ 0.82 ซึ่งมีค่าไม่เกินหนึ่งตามเกณฑ์ที่กำหนด เมื่อพิจารณาการเกิด THMs แต่ละชนิดพบว่าเมื่อบำบัดด้วยเรซิน MIEX ที่อัตราบำบัด 1 – 10 mL/L มีประสิทธิภาพในการลด THM-FP ทั้ง 4 ชนิดได้ดีกว่าการบำบัดด้วย PACI

สำหรับน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX ตามด้วย PACI มีค่า THM-FP และ THMs ratio อยู่ในช่วง 126 – 146 µg/L และ 0.78 – 0.92 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าค่า THMs ratio น้อยกว่า 1 ตามค่ามาตรฐานที่กำหนด และไม่พบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่า THM-FP สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่รายงานว่า การใช้กระบวนการสร้างและรวมตะกอนกับน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX มาแล้วนั้น ไม่ได้ช่วยลดการเกิดสารพลอยด์ได้เพิ่มเติม แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ละลายน้ำที่หลงเหลืออยู่ในน้ำหลังการบำบัดด้วยเรซิน MIEX นั้นมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับคลอรีนต่ำ [5], [28]



รูปที่ 5. ศักยภาพการเกิดสารพลอยด์ได้กลุ่มไตรฮาโลมีเทนและผลรวมอัตราส่วนความเข้มข้นของสารกลุ่ม THMs แต่ละชนิดต่อค่าแนะนำของ (a) น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย PACI (b) น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซิน MIEX และ (c) น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX ตามด้วย PACI

อย่างไรก็ตาม การนำเรซิน MIEX มาใช้งานในระบบผลิตน้ำประปานั้น ยังต้องคำนึงต้นทุนของการผลิตน้ำด้วย หากใช้ ราคาสารสร้างแกนตะกอน PACl ชนิดผง 11 บาท/kg คลอรีน 25 บาท/kg และการเดินระบบของเรซิน MIEX (เกลือสำหรับพื้นสภาพเรซิน) อยู่ที่ 0.27 บาท/m³ คิดเป็นต้นทุนการเดินระบบผลิตน้ำโดยใช้ PACl 25 mg/L และเติมคลอรีน 3.22 mg/L เท่ากับ 0.36 บาท/m³ และการเดินระบบผลิตน้ำโดยใช้เรซินควบคู่กับ PACl 1 mg/L และเติมคลอรีน 0.64 mg/L คิดเป็นต้นทุนการผลิตน้ำเท่ากับ 0.302 บาท/m³ หากพิจารณาต้นทุนการลงทุนเรซิน MIEX 340 บาท/kg พบว่าการลงทุนเรซิน 1 kg ต้องบำบัดน้ำ อย่างน้อย 6355 m³ จึงจะคุ้มค่าการลงทุน ทั้งนี้ ไม่ได้นำต้นทุนสารเคมีอื่น ๆ เช่น pre-chlorination K₂MnO₄ NaOH และ Na₂CO₃ ซึ่งทางระบบผลิตน้ำประปาใช้เพื่อปรับสภาพน้ำก่อนการสร้างตะกอนมาคิดในส่วนนี้ ดังนั้น เมื่อพิจารณาต้นทุนที่ใช้ในการเดินระบบของเรซิน MIEX พบว่าต้นทุนที่ใช้ในการเดินระบบค่อนข้างสูงกว่าการเดินระบบผลิตน้ำประปาแบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม การใช้เรซินในการบำบัดน้ำขั้นต้นก่อนการสร้างตะกอนนั้น ช่วยลดการเกิด THMs ได้ดีกว่า ทำให้ได้น้ำประปาที่สะอาดและมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานมากกว่า

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำและการควบคุมการเกิด THMs ในน้ำจากคลองอู่ตะเภา โดยใช้กระบวนการสร้างและรวมตะกอนด้วย PACl เปรียบเทียบกับการบำบัดด้วยเรซิน MIEX จากผลการทดลอง สรุปได้ดังนี้

สำหรับน้ำตัวอย่างจากคลองอู่ตะเภา ปริมาณ PACl ที่เหมาะสมคือ 20 mg/L สามารถกำจัด DOC ได้ 43% และลดการเกิด THMs ได้ 45% ปริมาณเรซินที่เหมาะสมคือ 5 mL/L สามารถกำจัด DOC ได้ 64% และลดการเกิด THMs ได้ 63% ดังนั้นเรซิน MIEX สามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำและลดการเกิด THMs ได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าการสร้างและรวมตะกอนด้วย PACl

การสร้างและรวมตะกอนด้วย PACl สามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มฟุลวิก และฮิวมิก ได้ดีกว่าโปรตีน ในขณะที่เรซิน MIEX สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดีใกล้เคียงกันทุกกลุ่ม การสร้างและรวมตะกอนกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกเป็นหลัก ทำให้ลดการเกิด THMs ที่ไม่มีโบรไมด์หรือมีโบรไมด์เป็นองค์ประกอบเพียงหนึ่งโมเลกุลได้ดี แต่ในขณะเดียวกัน กลับส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของ THMs เมื่อเติมคลอรีน และมีสาร THMs ที่มีโบรไมด์เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น

การบำบัดน้ำด้วยเรซิน MIEX สามารถลดการเกิด THMs ที่มีโบรไมด์เป็นองค์ประกอบได้ดี ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซิน MIEX มีค่า THMs ratio น้อยกว่า 1 ตามเกณฑ์ที่ค่ามาตรฐานกำหนด

การสร้างและรวมตะกอนด้วย PACl หลังการบำบัดขั้นต้นด้วยเรซิน MIEX ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำหรือลดการเกิด THMs ได้ แต่สามารถกำจัดความขุ่นได้ดี โดยใช้ปริมาณ PACl ที่ลดลงกว่า 90% ของ

ปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้เพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำดิบ และยังคงความต้องการคลอรีนได้ 84% ดังนั้นการใช้งานเรซิน MIEX นอกจากช่วยลดปริมาณสารสร้างแกนตะกอนและลดความต้องการคลอรีนเพื่อลดความต้องการสารเคมีในการผลิตน้ำประปาแล้ว ยังช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาให้ปลอดภัยต่อผู้บริโภคอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ และศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้วิจัยขอขอบคุณการประสานส่วนภูมิภาคสาขาหาดใหญ่ (ชั้นพิเศษ) ผู้อำนวยการความสะดวกในการเก็บตัวอย่างน้ำดิบ และบริษัท IXOM ประเทศไทย ผู้มอบตัวอย่างเรซิน MIEX เพื่อใช้งานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. F. Gilca, C. Teodosiu, S. Fiore, and C. P. Musteret, "Emerging disinfection byproducts: A review on their occurrence and control in drinking water treatment processes," *Chemosphere*, vol. 259. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2020. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127476.
- [2] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th ed. 2011.
- [3] การประปาส่วนภูมิภาค, "มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค." <http://www.thailab.co.th/cms/picture/std/20210501062458.pdf> (accessed Mar. 03, 2023).
- [4] P. A. Neale and A. I. Schäfer, "Magnetic ion exchange: Is there potential for international development?," *Desalination*, vol. 248, no. 1–3, pp. 160–168, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.05.052.
- [5] T. H. Boyer and P. C. Singer, "Bench-scale testing of a magnetic ion exchange resin for removal of disinfection by-product precursors," *Water Res*, vol. 39, no. 7, pp. 1265–1276, 2005, doi: 10.1016/j.watres.2005.01.002.
- [6] T. H. Boyer and P. C. Singer, "A pilot-scale evaluation of magnetic ion exchange treatment for removal of natural organic material and inorganic anions," *Water Res*, vol. 40, no. 15, pp. 2865–2876, 2006, doi: 10.1016/j.watres.2006.05.022.
- [7] P. C. Singer and K. Bilyk, "Enhanced coagulation using a magnetic ion exchange resin," *Water Res*, vol. 36, no. 16, pp. 4009–4022, 2002, doi: 10.1016/S0043-1354(02)00115-X.
- [8] P. Jutaporn, N. Muenphukhiaw, P. Phungsai, S. Leungprasert, and C. Musikavong, "Characterization of DBP precursor removal by magnetic ion exchange resin using spectroscopy and high-resolution mass spectrometry," *Water Res*, vol. 217, p. 118435, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.118435.
- [9] C. J. Johnson and P. C. Singer, "Impact of a magnetic ion exchange resin on ozone demand and bromate formation during drinking water treatment," *Water Res*, vol. 38, no. 17, pp. 3738–3750, 2004, doi: 10.1016/j.watres.2004.06.021.
- [10] R. S. Summers, S. M. Hooper, H. M. Shukairy, G. Solarik, and D. Owen, "Assessing DBP yield: Uniform formation conditions," *J Am Water Works Assoc*, vol. 88, no. 6, pp. 80–93, 1996, doi: 10.1002/j.1551-8833.1996.tb06573.x.
- [11] U. Environmental Protection Agency, "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," 1995.
- [12] P. Jutaporn, P. C. Singer, R. M. Cory, and O. Coronell, "Minimization of short-term low-pressure membrane fouling using a magnetic ion exchange (MIEX®) resin," *Water Research*, vol. 98, pp. 225–234, 2016. doi: 10.1016/j.watres.2016.04.007.
- [13] P. G. Coble, "Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy," 1996.
- [14] P. Jutaporn, W. Laolertworakul, M. D. Armstrong, and O. Coronell, "Fluorescence spectroscopy for assessing trihalomethane precursors removal by MIEX resin," *Water Science and Technology*, vol. 79, no. 5, pp. 820–832, 2019, doi: 10.2166/wst.2019.036.
- [15] P. Jutaporn, M. D. Armstrong, and O. Coronell, "Assessment of C-DBP and N-DBP formation potential and its reduction by MIEX® DOC and MIEX® GOLD resins using fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis," *Water Res*, vol. 172, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.watres.2019.115460.
- [16] C. Musikavong and S. Wattanachira, "Identification of dissolved organic matter in raw water supply from reservoirs and canals as precursors to trihalomethanes formation," *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, vol. 48, no. 7, pp. 760–771, Jun. 2013, doi: 10.1080/10934529.2013.744634.
- [17] P. Tongchang, J. Kumsuvan, W. N. Phatthalung, C. Suksaroj, A. Wongrueng, and C. Musikavong, "Reduction by enhanced coagulation of dissolved organic nitrogen as a precursor of N-nitrosodimethylamine," *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, vol. 53, no. 6,

- pp. 583–593, May 2018, doi: 10.1080/10934529.2018.1428270. [26]
- [18] W. P. Cheng, F. H. Chi, C. C. Li, and R. F. Yu, “A study on the removal of organic substances from low-turbidity and low-alkalinity water with metal-polysilicate coagulants,” *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 312, no. 2–3, pp. 238–244, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.colsurfa.2007.06.060. [27]
- [19] P. C. Singer and K. Bilyk, “Enhanced coagulation using a magnetic ion exchange resin,” 2002.
- [20] B. Sani, E. Basile, L. Rossi, and C. Lubello, “Magnetic ion exchange resin treatment for drinking water production,” *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, vol. 58, no. 1, pp. 41–50, 2009, doi: 10.2166/aqua.2009.081. [28]
- [21] W. N. Phatthalung, C. Musikavong, and O. Suttinun, “The presence of aliphatic and aromatic amines in reservoir and canal water as precursors to disinfection by-products,” *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, vol. 51, no. 11, pp. 900–913, Sep. 2016, doi: 10.1080/10934529.2016.1191303.
- [22] K. Tungsudjawong, S. Leungprasert, and P. Peansawang, “Investigation of humic acids concentration in different seasons in a raw water canal, Bangkok, Thailand,” *Water Sci Technol Water Supply*, vol. 18, no. 5, pp. 1727–1738, Oct. 2018, doi: 10.2166/ws.2017.235.
- [23] A. Baker, “Fluorescence excitation - Emission matrix characterization of some sewage-impacted rivers,” *Environ Sci Technol*, vol. 35, no. 5, pp. 948–953, Mar. 2001, doi: 10.1021/es000177t.
- [24] J. L. Weishaar, G. R. Aiken, B. A. Bergamaschi, M. S. Fram, R. Fujii, and K. Mopper, “Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon,” *Environ Sci Technol*, vol. 37, no. 20, pp. 4702–4708, Oct. 2003, doi: 10.1021/es030360x.
- [25] C. J. Johnson and P. C. Singer, “Impact of a magnetic ion exchange resin on ozone demand and bromate formation during drinking water treatment,” *Water Res*, vol. 38, no. 17, pp. 3738–3750, 2004, doi: 10.1016/j.watres.2004.06.021.
- C. Musikavong, K. Inthanuchit, K. Srimuang, T. T. Suksaroj, and C. Suksaroj, “Reduction of fractionated dissolved organic matter and their trihalomethane formation potential with enhanced coagulation,” *ScienceAsia*, vol. 39, no. 1, pp. 56–66, 2013, doi: 10.2306/scienceasia1513-1874.2013.39.056.
- K. Watson, M. J. Farré, and N. Knight, “Enhanced coagulation with powdered activated carbon or MIEX® secondary treatment: A comparison of disinfection by-product formation and precursor removal,” *Water Res*, vol. 68, pp. 454–466, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.watres.2014.09.042.
- M. Drikas, C. W. K. Chow, and D. Cook, “The impact of recalcitrant organic character on disinfection stability, trihalomethane formation and bacterial regrowth: An evaluation of magnetic ion exchange resin (MIEX®) and alum coagulation,” 2003. [Online]. Available: <https://iwaponline.com/aqua/article-pdf/52/7/475/402404/475.pdf>