



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การกำจัดสารตั้งต้นของสารพลอยได้กลุ่มไตรฮาโลมีเทนในน้ำผิวดินและน้ำทิ้งโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก

Removal of Trihalomethanes (THMs) precursors in surface water and effluent by Magnetic Ion Exchange (MIEX) resin

ณัฐวิกรานต์ หมิ่นญะเขียว¹ วัธสา คงนคร² ปณิธาน จูฑาพร^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย (EHSM) มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110

Natthawikran Muenphukhiaw¹ Watsa Khongnakorn² Panitan Jutaporn^{1*}

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

² Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Center of Excellence in Membrane Science and Technology, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand 90110

* Corresponding author.

E-mail: panitju@kku.ac.th; Telephone: 06 2167 8688

วันที่รับบทความ 20 ตุลาคม 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 14 ธันวาคม 2563 ; วันที่ตอบรับบทความ 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

แหล่งน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาส่วนใหญ่ คือ น้ำผิวดิน ซึ่งมีแนวโน้มที่จะถูกปนเปื้อนด้วยน้ำเสียและน้ำทิ้งจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ซึ่งในน้ำทิ้งนี้มีสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างจากสารอินทรีย์ธรรมชาติทั่วไป โดยสารเคมีฆ่าเชื้อโรคในระบบผลิตน้ำประปาสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ละลายน้ำก่อให้เกิดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-products, DBPs) ซึ่งเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง สารกลุ่ม DBPs ที่สำคัญและถูกระบุไว้ในมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของประเทศไทย คือ สารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (THMs) ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีต่อการเกิดสารพลอยได้กลุ่ม THMs และการกำจัดสารตั้งต้นของสารกลุ่ม THMs โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก (Magnetic ion exchange resin, MIEX) สองรุ่นคือเรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD โดยใช้น้ำตัวอย่างจากแม่น้ำพอง จังหวัดขอนแก่น และเก็บตัวอย่างตามระยะทางแตกต่างกัน 6 จุด แต่ละจุดเก็บน้ำตัวอย่างถือเป็นตัวแทนของน้ำที่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมรอบข้างตลอดลำน้ำ ทั้งการเกษตรกรรม ชุมชน รวมไปถึงจุดที่ได้น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ที่อาจมีปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งสูงและส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติได้ พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดได้แก่ คาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC), ไนโตรเจนละลายน้ำ (TDN), Specific UV absorbance (SUVA) และศักยภาพในการเกิดสารกลุ่ม THMs (THM-FP) จากผลการศึกษาพบว่า สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดเป็นสารกลุ่ม THMs สูงกว่าสารอินทรีย์จากจุดอื่นๆ ในแม่น้ำพอง โดยค่า THM-FP จำเพาะ ของสารอินทรีย์ (THM-FP/DOC) มีค่าอยู่ที่ 84.7 µg/mg สำหรับน้ำทิ้ง และมีค่าอยู่ในช่วง 55.3-61.3 µg/mg สำหรับน้ำผิวดิน ประสิทธิภาพการกำจัด DOC ของเรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD อยู่ในช่วง 54-61% และ 50-62% ตามลำดับ และสามารถกำจัด TDN ได้ในช่วง 12-42% และ 13-53% ตามลำดับ เรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD สามารถกำจัดสารตั้งต้นของ THMs ได้ในช่วง 59-75% และ 61-84% ตามลำดับ ทั้งนี้เรซินทั้งสองชนิดแสดงพฤติกรรมในการเลือกกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติก

ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ THMs จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าเรซิน MIEX GOLD มีประสิทธิภาพการกำจัด TDN และสารตั้งต้นของ THMs สูงกว่าเรซิน MIEX DOC เนื่องจากมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่า มีความพรุนสูงกว่า และมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเรซินสูงกว่า

คำสำคัญ

สารอินทรีย์ธรรมชาติ สารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง สารพลอยได้ ไตรฮาโลมีเทน เรซินแลกเปลี่ยนประจุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก

Abstract

The main water source for water supply is surface water, which can be contaminated with wastewater and effluent from human activities. Effluent organic matter (EfOM) has different characteristics from natural surface water (NOM). Disinfectant used in water supply plants can react with organic matter and form carcinogenic disinfection by-products (DBPs). One of the important DBPs that is regulated in the water supply standards of Thailand is trihalomethanes (THMs). This study aims to evaluate effect of EfOM of THMs formation and THMs precursor removal by magnetic ion exchange (MIEX) resins, including MIEX DOC and MIEX GOLD resins. Water samples were collected six different locations along Phong river, Khon Kaen province. Each sampling location represents effect of human activities along the river, including agricultural, municipality, and industrial effluent discharges, which might affect water quality of the river. Water quality parameters before and after MIEX treatment were measured, including dissolved organic carbon (DOC), total dissolved nitrogen (TDN), specific UV absorbance (SUVA), and THMs formation potential (THM-FP). The results showed that pulp and paper EfOM had greater THM-FP/DOC compared to organic matter from other sampling locations. MIEX DOC and MIEX GOLD resins achieved DOC removal of 54-61% and 50-62%, respectively. TDN removal by MIEX DOC and MIEX GOLD were 12-42% and 13-53%, respectively. THMs precursor removal by MIEX DOC and MIEX GOLD resin were in the range of 59-75% and 61-84%, respectively. The two resins had preferential removal of aromatic organic matter, which greatly contributed to THMs formation. Overall, MIEX GOLD had greater TDN and THMs precursor removal efficiency compared to MIEX DOC resin owing to its larger pore opening, greater porosity and higher surface area per resin volume.

Keywords

natural organic matter; effluent organic matter; disinfection by-products; trihalomethanes; MIEX resin

1. คำนำ

ระบบผลิตน้ำประปาส่วนใหญ่ของประเทศไทยใช้น้ำจากแหล่งน้ำผิวดิน เช่น แม่น้ำ เป็นแหล่งน้ำดิบในการผลิตน้ำประปา กระบวนการผลิตน้ำประปาแบบดั้งเดิมประกอบด้วย กระบวนการสร้างและรวมตะกอน การกรองทราย และการฆ่าเชื้อโรค กระบวนการสร้างและรวมตะกอนและการกรองทรายนั้น มีหน้าที่หลัก คือ กำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยขนาดเล็ก ส่วนกระบวนการฆ่าเชื้อโรค มีหน้าที่เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เพื่อให้ได้น้ำประปาที่สะอาดสำหรับใช้ในการอุปโภคบริโภค ในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคนั้น นิยมใช้คลอรีนหรือสารประกอบคลอรีนเป็นสารเคมีเพื่อฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูง มีราคาไม่แพง และสามารถมีคลอรีนหลงเหลือเพื่อฆ่าเชื้อในระบบเส้นท่อส่งจ่ายน้ำประปาได้ [1], [2]

ระบบการผลิตน้ำประปาแบบดั้งเดิมนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ดี แต่กำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic matter, DOM) ได้ไม่ดีนัก เมื่อเข้าสู่กระบวนการฆ่าเชื้อโรค สารอินทรีย์ละลายน้ำที่หลงเหลืออยู่สามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนหรือสารประกอบคลอรีนก่อให้เกิดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-products, DBPs) ซึ่งสารในกลุ่มนี้ถือเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง [3] สารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคมีหลายกลุ่มด้วยกัน โดยกลุ่มซึ่งเป็นที่รู้จักและได้รับการกำหนดในมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของ United State Environmental Protection Agency (US EPA) ได้แก่ สารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) และสารกลุ่มกรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic acids, HAAs) [2], [3] ซึ่งสารทั้งสองกลุ่มนี้เป็นสารกลุ่มที่พบมากเมื่อสารฆ่าเชื้อโรคทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในธรรมชาติ (Natural organic matter, NOM) ที่มีอยู่ทั่วไปในน้ำผิวดินทุกแห่ง องค์ประกอบหลักกว่า 50% ของ NOM ใน

แม่น้ำ ได้แก่ สารกลุ่มฮิวมิก [4] ซึ่งสารกลุ่มฮิวมิกนี้ ถือเป็นสารตั้งต้นของสารกลุ่ม THMs และ HAAs [5] ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค เป็นไปตามเอกสารคำแนะนำคุณภาพน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) ปี 2011 ซึ่งมีการกำหนดค่าสูงสุดสำหรับสารในกลุ่ม THMs แต่ละตัว ดังนี้ คือ Bromodichloromethane (CHBrCl_2) 60 $\mu\text{g/L}$, Bromoform (CHBr_3) และ Dibromochloromethane (CHBr_2Cl) 100 $\mu\text{g/L}$, และ Chloroform (CHCl_3) 300 $\mu\text{g/L}$ และกำหนดมาตรฐานผลรวมของอัตราส่วนความเข้มข้นของสารกลุ่ม THMs แต่ละชนิดต่อค่า Guideline value มีค่าไม่เกิน 1 [6]

ในปัจจุบันแหล่งน้ำผิวดินหลายต่อหลายแห่งได้รับการปนเปื้อนจากน้ำเสียและน้ำทิ้ง ทั้งจากอุตสาหกรรม ชุมชน และการเกษตรกรรม ทำให้องค์ประกอบของสารอินทรีย์ในลำน้ำผิวดินเปลี่ยนไป สารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง (Effluent organic matter, EfOM) มีองค์ประกอบแตกต่างจากสารอินทรีย์ละลายน้ำในธรรมชาติ คือ มีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (Soluble microbial products, SMPs) นอกจากนี้ น้ำทิ้งที่ยังมีส่วนประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น แอมโมเนีย ไนโตรเจน ไบโอมัด และไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเมื่อปนเปื้อนในน้ำผิวดินและเข้าสู่ระบบฆ่าเชื้อโรค ก็จะส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของสารพลอยได้ที่เกิดขึ้นอีกด้วย [7] ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องศึกษาผลกระทบจากการระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ คุณภาพน้ำทิ้งในพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารฆ่าเชื้อโรคและสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนจากน้ำทิ้ง

ทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ คือ การใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก (Magnetic ion exchange resin, MIEX) ซึ่งเป็นเรซินชนิดประจุลบที่มีโครงสร้างเป็นแบบมีรูพรุน เรซินแต่ละเม็ดนั้นมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก จึงทำให้เม็ดเรซินเกิดการรวมตัวกัน และตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว การแยกเรซิน ออกจากน้ำและนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ จึงทำได้โดยง่าย [8] เรซิน MIEX รุ่นแรกที่ใช้ชื่อว่า MIEX DOC ซึ่งออกแบบมาเพื่อกำจัด DOC ในการผลิตน้ำประปาโดยเฉพาะ และเมื่อไม่นานมานี้ ทางบริษัท ผู้ IXOM ผลิตเรซินได้มีการปรับปรุงผลิตภัณฑ์เรซินรุ่นใหม่ คือ MIEX GOLD ซึ่งมีความพรุนมากกว่า และมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่า MIEX DOC

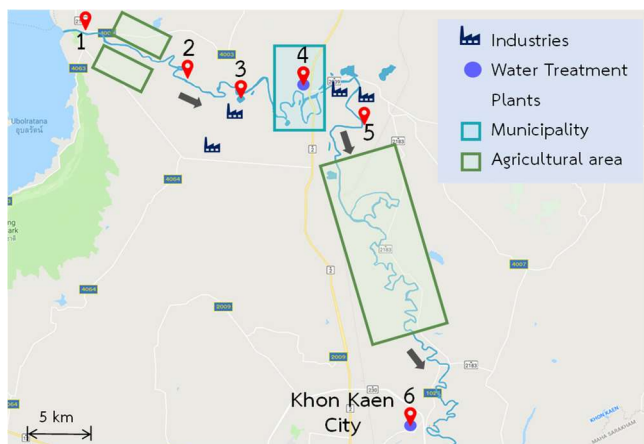
[9] เรซิน MIEX GOLD นั้นถูกออกแบบมาให้กำจัด DOC ควบคู่ไปกับสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (Dissolved organic nitrogen, DON) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเรซินชนิด MIEX GOLD มาทดสอบกับน้ำเสียหรือน้ำผิวดินที่ปนเปื้อนน้ำเสียที่มีไนโตรเจนสูง

งานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีศึกษาเกี่ยวกับการนำเรซิน MIEX มาใช้เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำผิวดินอย่างแพร่หลาย เช่น Singer & Bilyk [5] และ Rajca et al. [10] พบว่าเรซิน MIEX DOC มีประสิทธิภาพสูงในการลดสารตั้งต้นของสารพลอยได้กลุ่ม THMs และ HAAs ได้มากกว่า 60% อย่างไรก็ตาม ยังมีงานวิจัยเพียงจำนวนไม่มากนักที่ทดสอบใช้เรซิน MIEX กับน้ำเสีย หรือน้ำผิวดินที่ปนเปื้อนน้ำเสีย เช่น Gan et al. [11] พบว่า MIEX DOC มีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ในน้ำผิวดินสูงกว่าในน้ำผิวดินที่ปนเปื้อนน้ำเสีย สำหรับเรซิน MIEX GOLD นั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใหม่กว่า จึงยังมียานวิจัยใช้งานไม่มาก ยกตัวอย่างเช่น Jutaporn et al. [12] พบว่า เรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD สามารถกำจัดสารตั้งต้นของสารพลอยได้ในน้ำผิวดินได้ดีกว่าในน้ำทิ้ง จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่า ยังไม่เคยมีงานวิจัยใดที่ทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพเรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD ในการกำจัดสารตั้งต้นของสารกลุ่ม THMs ในประเทศไทยมาก่อน

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีต่อการเกิดสารพลอยได้ และการกำจัดสารตั้งต้นของสารพลอยได้กลุ่ม THMs โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กชนิด MIEX DOC และ MIEX GOLD น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ น้ำจากแม่น้ำพอง จ. ขอนแก่น ตามระยะตลอดแนวลำน้ำจากเขื่อนอุบลรัตน์ถึงระบบผลิตน้ำประปาบ้านโกทา ซึ่งเป็นระบบประปาหลักของจังหวัดขอนแก่น มีกำลังการผลิตน้ำประปา 139,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ผลการทดลองที่ได้ สามารถบ่งบอกถึงปริมาณและคุณภาพของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่เปลี่ยนแปลงตามกิจกรรมต่าง ๆ ริมลำน้ำ และยังสามารถบ่งชี้ความเป็นไปได้ของการใช้เรซิน MIEX ในการกำจัดสารตั้งต้นของสารพลอยได้ อันจะเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยปรับปรุงให้ระบบผลิตน้ำประปามีประสิทธิภาพในการผลิตน้ำประปาที่สะอาดและปลอดภัยต่อผู้บริโภคมากยิ่งขึ้น

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

น้ำตัวอย่างสำหรับการทดลอง ได้ถูกเก็บจากจุดเก็บตัวอย่างต่าง ๆ ตามทิศทางแนวทางการไหลของแม่น้ำพอง ซึ่งเป็นแหล่งน้ำธรรมชาติที่เป็นแหล่งน้ำสำคัญในการผลิตน้ำประปาที่หล่อเลี้ยงประชากรของจังหวัดขอนแก่น แม่น้ำพองอาจได้รับการปนเปื้อนจากน้ำทิ้งจากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ตั้งอยู่ริมลำน้ำ การเก็บตัวอย่างเกิดขึ้นในเดือนมกราคม พ.ศ. 2563 โดยเลือกจุดเก็บน้ำตัวอย่างก่อนและหลังลำน้ำไหลผ่านย่านเกษตรกรรม ชุมชน และอุตสาหกรรมต่าง ๆ จำนวน 6 จุด ดังรูปที่ 1 สารแขวนลอยในน้ำตัวอย่างถูกกำจัดออกด้วยการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว ขนาดรูพรุน $0.7\ \mu\text{m}$ (GF/F, Whatman) จากนั้นน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกำจัดสารแขวนลอยแล้ว จะถูกใช้เพื่อในการทดลองกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเรซิน และการวิเคราะห์ศักยภาพในการเกิดสารพลอยได้ต่อไป



รูปที่ 1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำในแม่น้ำพอง ได้แก่ (1) สะพานห้วยทราย, (2) สะพานมิตรสัมพันธ์, (3) บึงโจด, (4) การประปาส่วนภูมิภาค สาขา น้ำพอง, (5) สะพานปากเสียว, และ (6) การประปาส่วนภูมิภาค สาขา โกทา

เรซินชนิด MIEX DOC และ MIEX GOLD ผลิตโดยบริษัท IXOM Watercare (Australia) เรซินทั้งสองรุ่นนี้มีความแตกต่างกันคือ ค่าเฉลี่ยขนาดของรูพรุนของ MIEX DOC และ MIEX GOLD มีค่าเป็น 24.2 และ $35.2\ \mu\text{m}$ ตามลำดับ [12] นอกจากนี้เรซิน MIEX GOLD ยังมีพื้นที่ผิวที่ขรุขระและมีจำนวนรูพรุนต่อปริมาตรมากกว่าเรซิน MIEX DOC จึงส่งผลให้เรซิน MIEX GOLD มีค่าความพรุนมากกว่า MIEX DOC

เรซินทั้งสองชนิดถูกเก็บไว้ในน้ำเกลือ (5% NaCl) เพื่อให้เรซินคงความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูงสุดจนกว่าจะถึงเวลาใช้ในการทดลอง การวัดปริมาณเรซินทำโดยใช้กระบอกตวงและตั้งให้เรซินเกิดการตกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงรายงานปริมาณเรซินเป็นมิลลิลิตรของเรซินต่อปริมาตรน้ำตัวอย่างในการทดลองในหน่วยลิตร (mL/L) การทดลองกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำทำโดยใช้เครื่องจาร์เทส (Jar test) ชุดการทดลองเริ่มต้นจากการหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกวนผสม (Optimum mixing time) โดยเรซินสัมผัสกับน้ำตัวอย่างจากแม่น้ำพองจุดหนึ่ง และกวนผสมเร็วที่อัตรา 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 80 นาที และเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดทุก 5-10 นาที เพื่อหาระยะเวลาที่สั้นที่สุดที่ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุด จากนั้น ใช้ Optimum mixing time ที่หามาได้ เพื่อกวนผสมเรซินและทำการทดลองซ้ำกับน้ำจากจุดเก็บตัวอย่าง 6 จุด โดยทำการปรับปริมาณเรซินในแต่ละถังกวนตั้งแต่ 1 – 10 mL/L จากนั้นให้เวลาเรซินตกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที [13] และนำน้ำใสที่ได้ไปทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำต่อไป

การวิเคราะห์อินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved organic carbon ,DOC) และไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved nitrogen ,TDN) ใช้เครื่อง multi N/C® 2100 TOC Analyzer (Analytik Jena AG) ค่าการดูดซับแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm (UV_{254}) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DR6000 Spectrophotometry (Hach) ค่าความดูดซับแสงจำเพาะ (Specific UV absorbance, SUVA) คำนวณจากค่า UV_{254} ต่อค่า DOC ของตัวอย่างน้ำนั้น ๆ ซึ่งค่า SUVA นั้นสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ความเป็นอะโรมาติกของสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ [14]

น้ำตัวอย่างก่อนและหลังการสัมผัสกับเรซิน ถูกเติมคลอรีนโดยใช้สารละลาย NaOCl ตามวิธี Uniform formation conditions (UFC) [15] โดยใช้เวลาสัมผัสคลอรีน 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นวิธีการเติมคลอรีนที่สามารถทำนายการศักยภาพการเกิด DBPs ได้อย่างสมจริงตามระบบเส้นท่อสูบน้ำประปา การวิเคราะห์คลอรีนตกค้าง ใช้วิธีวัดสี DPD (N,N-diethyl-p-phenylenediamine) จากนั้นตัวอย่างที่มีค่าคลอรีนตกค้างอยู่ที่ $1 \pm 0.4\ \text{mg/L}$ ได้ถูกเลือกไปสกัดสารพลอยได้ กลุ่ม THMs 4

ชนิดคือ Chloroform (CHCl_3), Bromodichloromethane (CHBrCl_2), Dibromochloromethane (CHBr_2Cl) และ Bromoform (CHBr_3) ตามวิธีของ U.S. EPA method 1.551 โดยใช้เครื่อง Gas chromatography- electron capture detector (GC-ECD, Agilent 4890D) และคอลัมน์ HP-5

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 คุณภาพน้ำ ณ จุดต่างๆ ในแม่น้ำพอง

การเก็บตัวอย่างน้ำจากลำน้ำพองทั้ง 6 จุดเก็บตัวอย่างเกิดขึ้นในเดือน มกราคม พ.ศ. 2563 น้ำตัวอย่างมีค่า UV_{254} อยู่ในช่วง $0.08\text{--}0.73\text{ cm}^{-1}$ และมีค่า DOC อยู่ในช่วง $5.1\text{--}22\text{ mg-C/L}$ โดยน้ำที่มีปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของค่า DOC สูงสุดคือ น้ำจากจุดเก็บน้ำบึงโจด (22 mg-C/L) ซึ่งเป็นน้ำผิวดินที่ได้รับการปนเปื้อนจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษที่บริเวณ อ.น้ำพอง ในขณะที่น้ำตัวอย่างที่มีค่า DOC ต่ำสุดคือน้ำดิบของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำบ้านโกทา บริเวณท้ายน้ำที่ อ.เมืองขอนแก่น (5.08 mg-C/L) ผลการตรวจวัดนี้แสดงให้เห็นว่า แม่น้ำพองยังมีความสามารถในการฟื้นตัวอยู่ในเกณฑ์ดีและการระบายน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมและชุมชน ไม่ได้มีผลกระทบร้ายแรงต่อปริมาณของสารอินทรีย์ในลำน้ำช่วงท้ายน้ำ

สำหรับผลการวิเคราะห์ค่า SUVA ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความเป็นอะโรมาติกของสารอินทรีย์ละลายน้ำ พบว่า น้ำบริเวณต้นน้ำ (สะพานห้วยทรายและสะพานมิตรสัมพันธ์) มีค่า SUVA ค่อนข้างต่ำ ($1.64\text{--}1.65\text{ L/mg-m}$) เมื่อเทียบกับแหล่งน้ำผิวดิน

อื่นๆ ที่ถูกใช้เป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปา เช่น แม่น้ำเจ้าพระยา ($\text{SUVA} = 3.2\text{ L/mg-m}$) [16] และคลองอุตตะเกา ($1.0\text{--}5.3\text{ L/mg-m}$) [17] น้ำจากบึงโจดมีค่า SUVA สูงที่สุดคือ 3.30 L/mg-m สอดคล้องกับชนิดของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษที่มักจะมีสารจำพวกลิกนินและแทนนินซึ่งเป็นสารที่ย่อยสลายยากและมีความเป็นอะโรมาติกสูง [18] น้ำตัวอย่างบริเวณช่วงกลางและช่วงท้ายของลำน้ำ ณ ตำแหน่ง สะพานปากเสียวและประปาบ้านโกทา มีค่า SUVA สูงกว่าน้ำจากบริเวณต้นน้ำ ซึ่งบ่งชี้ว่าการปนเปื้อนจากกิจกรรมต่าง ๆ ระหว่างการไหลของลำน้ำ ส่งผลให้สารอินทรีย์ในลำน้ำมีองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไปในทางที่มีความเป็นอะโรมาติกสูงขึ้น

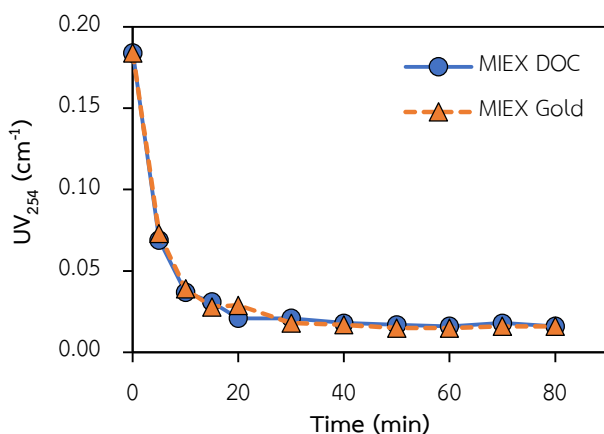
นอกจากนี้แล้ว ข้อมูลในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าน้ำจากบึงโจดมีค่า TDN สูงสุด คือ 2.63 mg/L ในขณะที่น้ำจากจุดอื่นๆ ในแม่น้ำพอง ซึ่งมีค่า TDN อยู่ในช่วง $0.63\text{--}1.11\text{ mg/L}$ ทั้งนี้ ปกติแล้วน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ ที่มีกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) อย่างมีประสิทธิภาพ จะมีไนโตรเจนละลายน้ำในรูปแบบไนเตรทเป็นส่วนใหญ่ จากการวิเคราะห์ไนโตรเจนในรูปแบบต่าง ๆ เพิ่มเติม พบว่า น้ำตัวอย่างจากบึงโจด มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย ต่ำกว่า 1 mg/L และไนโตรเจนกว่า 90% อยู่ในรูปของไนเตรท สำหรับค่า TDN ที่ระบบผลิตน้ำประปาบ้านโกทาซึ่งเป็นบริเวณท้ายน้ำ มีค่าใกล้เคียงกับ TDN ที่บริเวณต้นน้ำและจุดอื่นๆ ในลำน้ำ คือมีค่า 0.93 mg/L

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ จากจุดเก็บตัวอย่างน้ำในแม่น้ำพอง ในเดือน มกราคม พ.ศ. 2563

จุดเก็บตัวอย่าง	ชนิดของแหล่งน้ำ	pH	$\text{UV}_{254}\text{ (cm}^{-1}\text{)}$	DOC (mg/L)	SUVA (L/mg-m)	TDN (mg/L)
(1) สะพานห้วยทราย	ต้นน้ำ	7.75 ± 0.15	0.093 ± 0.01	5.68 ± 0.36	1.64 ± 0.04	0.91 ± 0.01
(2) สะพานมิตรสัมพันธ์	น้ำไหลผ่านย่านเกษตรกรรม	8.01 ± 0.13	0.090 ± 0.01	5.47 ± 1.32	1.65 ± 0.35	0.63 ± 0.02
(3) บึงโจด	น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษ	8.22 ± 0.17	0.732 ± 0.01	22.2 ± 0.55	3.30 ± 0.02	2.63 ± 0.03
(4) ประปาน้ำพอง	น้ำดิบเข้าระบบประปา ต้นน้ำ	7.83 ± 0.08	0.084 ± 0.01	5.27 ± 0.22	1.59 ± 0.03	1.11 ± 0.04
(5) สะพานปากเสียว	น้ำไหลผ่านชุมชนและอุตสาหกรรม	8.09 ± 0.09	0.098 ± 0.01	5.34 ± 0.96	1.84 ± 0.20	0.99 ± 0.05
(6) ประปาโกทา	น้ำดิบเข้าระบบประปา ท้ายน้ำ	7.83 ± 0.11	0.117 ± 0.01	5.08 ± 0.25	2.30 ± 0.02	0.93 ± 0.05

3.2 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเรซิน (Optimum resin mixing time)

การทดลองเบื้องต้นเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเรซินนั้นใช้น้ำดิบจากระบบประปาบ้านโกทาซึ่งเก็บตัวอย่างในเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2562 และเปรียบเทียบเรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD โดยใช้ปริมาณเรซินต่อปริมาณน้ำตัวอย่าง 5 mL /L ทำการกวนผสมให้เรซินสัมผัสกับน้ำตัวอย่างเป็นเวลา 80 นาที เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดด้วยเรซิน จากนั้นตรวจวัดค่า UV_{254} ของน้ำหลังการบำบัดด้วยเรซินที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 2 การหาค่าระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเรซิน (optimum mixing time)

จากผลการทดลอง พบว่า ค่า UV_{254} ของน้ำดิบ ก่อนการบำบัดด้วยเรซิน มีค่าเท่ากับ 0.184 cm^{-1} ระหว่างการบำบัดด้วยเรซินทั้งสองชนิด ค่า UV_{254} ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก หลังจาก 30 นาทีเป็นต้นไป ค่า UV_{254} ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 จากผลการทดลองนี้ สามารถสรุปได้ว่า เวลาการกวนผสม 30 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดด้วยเรซิน ซึ่งระยะเวลาการผสม 30 นาทีนี้ มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นที่ทดลองใช้เรซิน MIEX [5] และเป็นค่าที่แนะนำโดยบริษัทผู้ผลิตเรซินอีกด้วย [19] ค่า UV_{254} ของน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วย MIEX DOC และ MIEX GOLD ที่เวลา 30 นาที มีค่าเป็น 0.021 cm^{-1} และ 0.018 cm^{-1} ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด UV_{254}

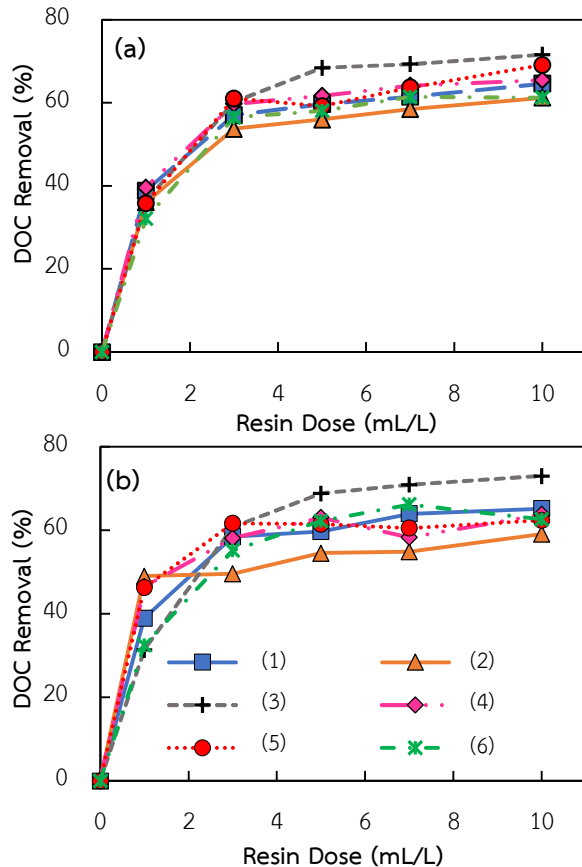
ของเรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD เท่ากับ 88.6% และ 90.2 % ตามลำดับ แสดงว่าเรซิน MIEX GOLD มีประสิทธิภาพดีกว่า MIEX DOC เล็กน้อย

3.3 Dissolved organic carbon (DOC) removal

เมื่อได้ระยะเวลาการผสมที่เหมาะสมแล้ว การทดลองเพื่อหาปริมาณเรซินที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปแบบของ DOC นั้นใช้เรซินในช่วงความเข้มข้น 1-10 mL/L ผลการกำจัด DOC ของเรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3a และ 3b ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ของเรซินทั้งสองชนิด เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงปริมาณเรซินที่ 1-3 mL/L แต่ประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในช่วงปริมาณเรซิน 3-10 mL/L ดังนั้นความเข้มข้นของเรซินที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ในกลุ่มน้ำตัวอย่างเหล่านี้คือ 3 mL/L ที่ความเข้มข้นนี้ เรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD สามารถกำจัด DOC ได้ 54-61% และ 50-62% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ของเรซิน MIEX กับกระบวนการผลิตน้ำประปาแบบดั้งเดิมของขอนแก่น พบว่า กระบวนการตกตะกอนด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl 30-40 mg/L) สามารถกำจัด DOC ได้ 14% และกระบวนการกรองทราย กำจัด DOC ได้ 9.0% เท่านั้น (ค่าเฉลี่ยจากการเก็บตัวอย่าง 7 เดือน) [20] เรซิน MIEX จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC สูงกว่ากระบวนการผลิตน้ำประปาแบบดั้งเดิม อย่างมีนัยสำคัญ

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเรซิน MIEX ทั้งสองชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ทั้งในน้ำที่มีค่า DOC ตั้งต้นปานกลาง (5.08-5.698 mg/L) และน้ำที่มีค่า DOC ตั้งต้นสูง (บึงโจด, DOC 22.2 mg/L) ทั้งนี้ ทางผู้วิจัยมีข้อสันนิษฐานว่า คุณสมบัติและองค์ประกอบของสารอินทรีย์มีผลต่อประสิทธิภาพของเรซินมากกว่าปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด น้ำตัวอย่างจากบึงโจด แม้จะมีค่า DOC สูง แต่ด้วยความที่บึงโจดรองรับน้ำทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งสารอินทรีย์ในน้ำทั้งชนิดนี้ มีคุณลักษณะเป็นสารอินทรีย์กลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และมีความเป็นอะโรมาติกอยู่มาก เช่น ลิกนิน จากกระบวนการฟอกและล้างเยื่อกระดาษ [18] งานวิจัยที่ผ่าน

มาได้รายงานไว้ว่าเรซิน MIEX DOC มีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ และยังมีประสิทธิภาพดีในน้ำที่มีค่า SUVA สูง [14], [21] น้ำตัวอย่างจากบึงโจดนั้นมีค่า SUVA สูงสุด (3.30 L/mg-m) เรซิน MIEX GOLD มี Functional group เหมือนกับเรซิน MIEX DOC เรซินทั้งสองชนิดจึงสามารถกำจัด DOC ที่บึงโจดได้ดี



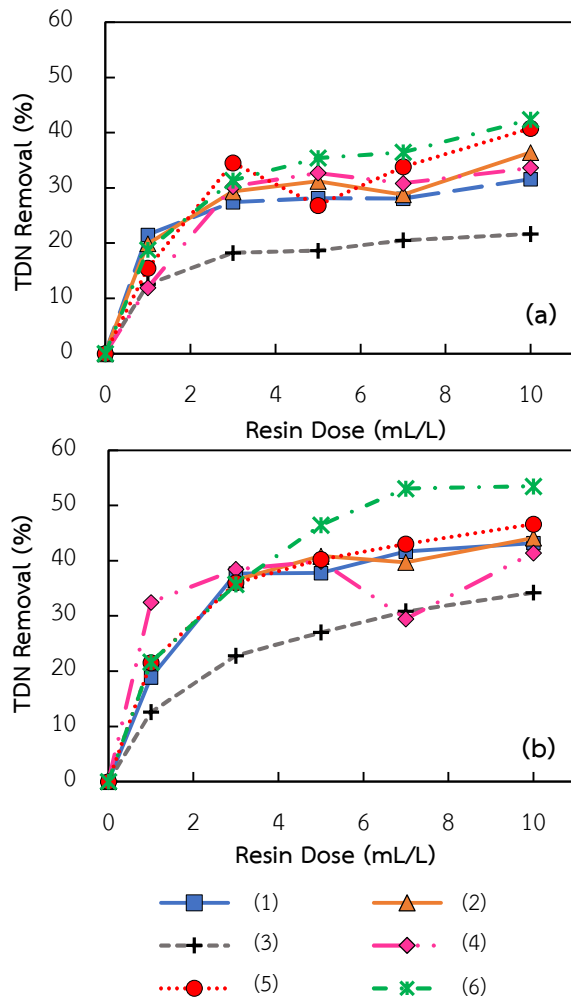
รูปที่ 3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำของเรซินชนิด (a) MIEX DOC และ (b) MIEX GOLD โดยจุดเก็บตัวอย่างคือ (1) สะพานห้วยทราย, (2) สะพานมิตรสัมพันธ์, (3) บึงโจด, (4) ระบบผลิตน้ำประปา น้ำพอง, (5) สะพานปากเสียว, และ (6) ระบบผลิตน้ำประปา บ้านโกทา

3.4 Total Dissolved Nitrogen (TDN) Removal

ผลการกำจัด TDN โดยเรซินแม่เหล็กชนิด MIEX DOC และ MIEX GOLD ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4a และ 4b ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัด TDN ของเรซิน MIEX ทั้งสองชนิด มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงปริมาณเรซิน 1-3 mL/L หลังจากนั้นการเพิ่มปริมาณ

เรซิน ไม่ได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด TDN เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับการกำจัด DOC แต่แนวโน้มของการกำจัด TDN นั้นมีความแตกต่างระหว่างน้ำจากจุดเก็บตัวอย่างต่าง ๆ กล่าวคือเรซิน MIEX ทั้งสองชนิด มีความสามารถในการกำจัด TDN ในน้ำจากบึงโจดต่ำกว่าในน้ำตัวอย่างจากจุดอื่น ๆ เนื่องจากน้ำตัวอย่างจากบึงโจดมีค่า TDN ตั้งต้นสูง (2.63 mg/L) ที่ปริมาณเรซิน 3 mL/L ประสิทธิภาพในการกำจัด TDN ของเรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD อยู่ในช่วง 18-35% และ 23-38% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองการกำจัด DOC (รูปที่ 3) กับการกำจัด TDN (รูปที่ 4) นั้น พบว่าเรซินทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC สูงกว่า TDN

การทดสอบสมมติฐานตามหลักสถิติ 2 Tailed paired t-test ได้ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จากน้ำตัวอย่างทั้ง 6 จุด พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ระหว่างเรซินทั้งสองชนิดนี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} > 0.01$) แต่ประสิทธิภาพในการกำจัด TDN ของเรซินชนิด MIEX GOLD สูงกว่าเรซิน MIEX DOC อย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.01$) พฤติกรรมของเรซิน MIEX ที่สามารถกำจัด DOC ได้ดีกว่า TDN นั้น เนื่องมาจากการที่เรซิน MIEX มี Functional group เป็น Quaternary amide ซึ่งสามารถกำจัดสารอินทรีย์โดยการแลกเปลี่ยนประจุ และมีความชอบ (Affinity) ที่จะแลกเปลี่ยนประจุกับสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กและกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ เช่น สารกลุ่มกรดอินทรีย์ กรดฮิวมิก (Humic) และกรดฟุลวิก (Fulvic) เป็นต้น แต่ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำนั้น ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการทางชีววิทยาและมีคุณสมบัติคล้ายโปรตีน เช่น Extracellular polymeric substance (EPS) ซึ่งสารกลุ่มนี้มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าสารกลุ่มฮิวมิก ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในรูพรุนของเรซินชนิด MIEX DOC ได้ ดังที่ Jutaporn et al. [13] ได้รายงานว่าการคัดแยกด้วยขนาด (Size exclusion) คือกลไกหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของเรซินลดลง

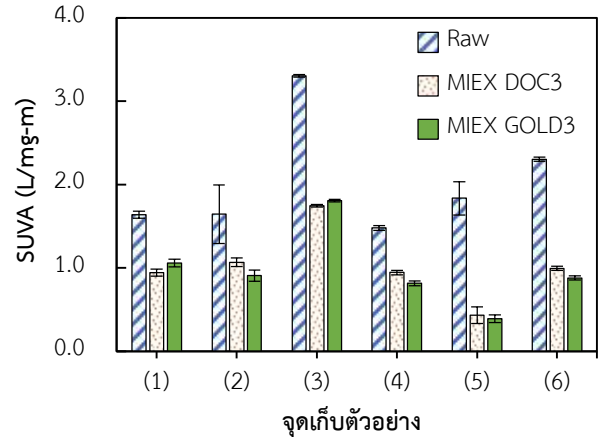


รูปที่ 4 ประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (TDN) ของเรซินชนิด (a) MIEX DOC และ (b) MIEX GOLD โดยจุดเก็บตัวอย่าง คือ (1) สะพานห้วยทราย, (2) สะพานมิตรสัมพันธ์, (3) บึงโจด, (4) ระบบผลิตน้ำประปา น้ำพอง, (5) สะพานปากเสียว, และ (6) ระบบผลิตน้ำประปา บ้านโกทา

นอกจากนี้ จากการที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของ MIEX DOC และ MIEX GOLD มีค่าเป็น 2.24 และ 2.35 μm ตามลำดับ [12] ขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่า ทำให้ เรซิน MIEX GOLD สามารถกำจัดได้ทั้งสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก และขนาดโมเลกุลใหญ่ จึงสามารถใช้อธิบายผลการทดลองที่เรซิน MIEX GOLD มีประสิทธิภาพในการกำจัด TDN ได้สูงกว่าเรซิน MIEX DOC

3.5 Changes in Specific UV Absorbance (SUVA)

ค่า SUVA เริ่มต้นของน้ำตัวอย่างทั้ง 6 จุด อยู่ในช่วง 1.59–3.30 L/mg-m โดยน้ำจากบึงโจด มีค่า SUVA สูงที่สุด และน้ำดิบจากการประปาส่วนภูมิภาคสาขาน้ำพอง มีค่า SUVA ต่ำที่สุด การบำบัดน้ำด้วยโดยเรซินชนิด MIEX DOC และ MIEX GOLD ที่ปริมาณเรซิน 3 mL/L ส่งผลให้ค่า SUVA ของน้ำตัวอย่างทั้ง 6 จุด ลดลง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5 การลดลงของค่า SUVA แสดงว่าเรซิน MIEX ทั้งสองชนิด มีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มที่ดูดซับแสง UV ซึ่งเป็นสารอินทรีย์กลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ และมีความเป็นอะโรมาติกมากกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต [8], [14], [21] จากผลการทดลองในรูปที่ 5 คิดเป็นประสิทธิภาพในการลดค่า SUVA ในน้ำตัวอย่างทั้ง 6 จุดของ เรซินแม่เหล็กชนิด MIEX DOC และ MIEX GOLD อยู่ที่ 35–76% และ 35–79% ตามลำดับ เรซินทั้งสองชนิดสามารถลดค่า SUVA ได้สูงสุดในน้ำที่เก็บจากจุดเก็บตัวอย่างสะพานปากเสียว ดังนั้น ประสิทธิภาพของเรซินทั้งสองชนิดในการลดค่า SUVA ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่าของ SUVA ของน้ำจากจุดเก็บตัวอย่างในแม่น้ำพอง โดยเรซินชนิด MIEX DOC และ MIEX GOLD ที่ความเข้มข้น 3 mL/L จุดเก็บตัวอย่างคือ (1) สะพานห้วยทราย, (2) สะพานมิตรสัมพันธ์, (3) บึงโจด, (4) ระบบผลิตน้ำประปา น้ำพอง, (5) สะพานปากเสียว, และ (6) ระบบผลิตน้ำประปา บ้านโกทา

3.6 THMs Precursor Removal

ค่าศักยภาพการเกิดสารกลุ่ม THMs (THMs formation potential, THM-FP) แต่ละชนิด จากการเติมคลอรีนในน้ำดิบ และประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นของสารกลุ่ม THMs

รวมทั้งสี่ชนิด โดยเรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 6a และ 6b ตามลำดับ น้ำจากบึงโจดซึ่งมีค่า DOC สูงสุด ก็มีค่า THM-FP รวมสูงสุดอยู่ที่ 1876 $\mu\text{g/L}$ ในขณะที่น้ำดิบจากแหล่งน้ำอื่น ๆ มีค่า THM-FP รวมอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน คือ 284-348 $\mu\text{g/L}$ (รูปที่ 6a) ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับแหล่งธรรมชาติที่เป็นแหล่งน้ำดิบของระบบผลิตน้ำประปาอื่น ๆ เช่น คลองอู่ตะเภา (175-429 $\mu\text{g/L}$) [22]

เมื่อพิจารณาศักยภาพการเกิดสารกลุ่ม THMs แยกแต่ละชนิด พบว่า สารที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ CHCl_3 คิดเป็น 72-88% ของ THM-FP ทั้งหมด และตามด้วย CHBrCl_2 (11-25%) ส่วน CHBr_2Cl และ CHBr_3 เกิดขึ้นในปริมาณน้อยมาก รวมกันแล้วไม่เกิน 2% ของ THM-FP ทั้งหมด การกระจายตัวของสารกลุ่ม THMs ในรูปแบบนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้ น้ำจากแม่น้ำพอง ในปี พ.ศ. 2558-2559 [1] และ พ.ศ. 2563 [20] ในน้ำตัวอย่างทั้ง 6 จุดที่ทำการทดลอง เรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD ที่ 3 mL/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นของสารกลุ่ม THMs อยู่ในช่วง 59-75% และ 61-84% ตามลำดับ (รูปที่ 6b) โดยเรซิน MIEX DOC มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นสูงสุด 75% ในน้ำจากจุดเก็บตัวอย่างห้วยทรายและระบบผลิตน้ำประปาน้ำพอง และมีประสิทธิภาพต่ำสุดที่ 59% ในน้ำจากสะพานมิตรสัมพันธ์ ในขณะที่เรซิน MIEX GOLD มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสารตั้งต้นได้สูงถึง 84% ในน้ำจากจุดเก็บน้ำห้วยทราย และมีประสิทธิภาพต่ำสุดที่ 61% ในน้ำจากจุดเก็บน้ำระบบผลิตน้ำประปาน้ำพองและสะพานปากเสียว

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัด DOC และประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นของสารกลุ่ม THMs ของเรซินทั้งสองชนิด พบว่า เรซิน MIEX มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นของสารกลุ่ม THMs อยู่ในช่วง 59-84% สูงกว่าประสิทธิภาพในการกำจัด DOC (54-62%, รูปที่ 3) พฤติกรรมนี้ของเรซิน MIEX แสดงให้เห็นถึง คุณสมบัติในการเลือกกำจัด (Preferential removal) สารอินทรีย์กลุ่มที่เป็นสารตั้งต้นของ THMs มากกว่าสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำมวลรวม สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเรซิน MIEX DOC [10], [11] คุณสมบัตินี้ของเรซินเกิดขึ้นเนื่องจากเรซิน MIEX ใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ และสารอินทรีย์กลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ

(Hydrophobic) มักจะมีประจุลบสูงกว่าสารกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เรซิน MIEX จึงกำจัดสารกลุ่ม Hydrophobic ได้ดีกว่า ซึ่งสารกลุ่มนี้ก็คือ สารอินทรีย์กลุ่มที่มีความเป็นอะโรมาติกสูง เช่น สารกลุ่มฮิวมิก อันเป็นสารตั้งต้นของ THMs นั้นเอง จากผลการทดลองนี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า เรซิน MIEX GOLD มีคุณสมบัติในการเลือกกำจัดสารตั้งต้นของ THMs เช่นเดียวกับเรซิน MIEX DOC

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นของ THMs ของ เรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD พบว่าเรซิน MIEX GOLD มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นของ THMs สูงกว่าเรซิน MIEX DOC อยู่เล็กน้อย เมื่อทำการทดสอบในน้ำจากจุดเก็บตัวอย่างสะพานห้วยทราย สะพานมิตรสัมพันธ์ บึงโจด สะพานปากเสียว และระบบผลิตน้ำประปบบ้านโกทา ยกเว้นในน้ำตัวอย่างจากระบบผลิตน้ำประปาน้ำพองที่ MIEX DOC มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นของ THMs สูงกว่าเรซิน MIEX GOLD หากเปรียบเทียบความแตกต่างในเชิงคุณสมบัติเชิงกายภาพของเรซินเพื่ออธิบายความแตกต่างในการกำจัดสารตั้งต้นของ THMs นั้น สามารถอธิบายได้ว่า การที่เรซิน MIEX DOC ที่มีขนาดของรูพรุนเฉลี่ยเล็กกว่าเรซิน MIEX GOLD [12] ทำให้เรซิน MIEX DOC ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำกลุ่มที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า 50,000 Da ได้ [23] การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกายภาพของเรซิน MIEX GOLD โดยการขยายขนาดรูพรุนและเพิ่มจำนวนรูพรุนของเรซิน [9] จึงส่งผลให้เรซิน MIEX GOLD มีความพรุนและพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่า เรซิน MIEX GOLD ซึ่งมีความสามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ได้เพิ่มมากขึ้น ทำให้เรซิน MIEX GOLD มีความสามารถในการกำจัดสารตั้งต้นของ THMs สูงกว่าเรซิน MIEX DOC ในน้ำตัวอย่างบางชนิด

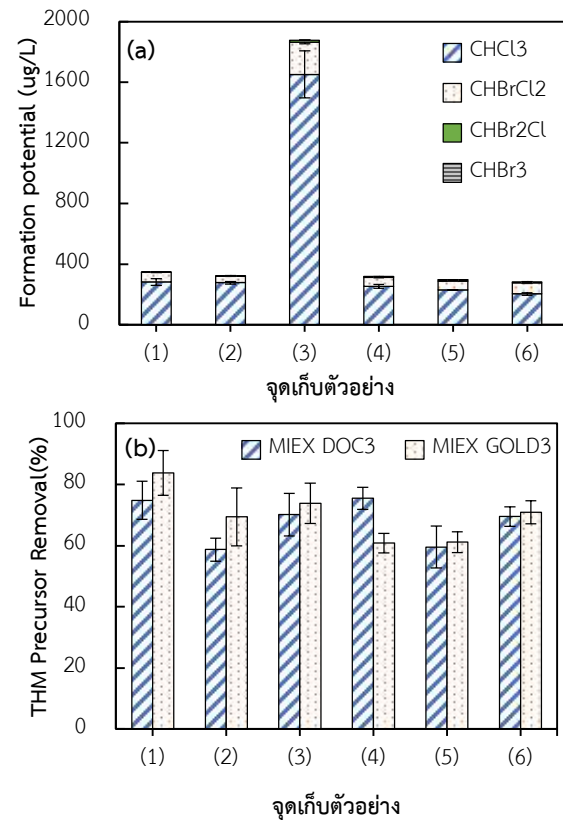
อย่างไรก็ตาม การที่เรซิน MIEX GOLD มีประสิทธิภาพในการกำจัด THM-FP ได้ดีกว่า MIEX DOC เพียงในน้ำตัวอย่างเฉพาะจากบางจุดเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถสรุปแนวโน้มที่แน่นอนได้ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น Gibson & Golubovic [9] ได้รายงานว่ารซิน MIEX GOLD มีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ได้ดีกว่าเรซิน MIEX DOC เมื่อทดสอบกับน้ำผิวดินที่มีค่า DOC สูงแต่มีค่าความเป็นด่างต่ำ แต่ López-Ortiz et al. [24] ซึ่งเปรียบเทียบการกำจัด

มลสารอินทรีย์ชนิดใหม่ (Emerging organic contaminants) ที่มีการตรวจพบการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ เช่น Paraben และ Bisphenol A พบว่าเรซิน MIEX DOC มีประสิทธิภาพสูงกว่าเรซิน MIEX GOLD ในทุกการทดลอง จึงอาจสรุปได้ว่าเรซิน MIEX GOLD จะมีประสิทธิภาพดีกว่า MIEX DOC ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีคุณลักษณะเฉพาะบางอย่างหรือเฉพาะในน้ำตัวอย่างเฉพาะจุดเท่านั้น

ในการทดลองนี้ สิ่งที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างเรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD คือ เรซิน MIEX GOLD มีความสามารถในการกำจัด TDN สูงกว่าเรซิน MIEX DOC ซึ่ง TDN นั้นมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดสาร DBPs กลุ่มที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (Nitrogenous DBPs, N-DBPs) เช่น สารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles, HANs) เป็นต้น แม้ว่าการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนจะก่อให้เกิดสารกลุ่ม N-DBPs ในปริมาณน้อยกว่าสารกลุ่ม THMs และ HAAs แต่สารกลุ่ม N-DBPs นี้ก็มีค่าความเป็นพิษมากกว่า [2] งานวิจัยในอนาคตจึงควรทำการศึกษาการเกิดสารกลุ่ม N-DBPs และการกำจัดสารตั้งต้นของสารกลุ่มนี้โดยกระบวนการบำบัดต่าง ๆ รวมไปถึงเรซิน MIEX ทั้งสองชนิดด้วย

การที่ค่า THM-FP ของบึงโจด ซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษเป็นหลัก มีค่าสูงกว่า THM-FP ของน้ำจากจุดอื่น ๆ ทั้งหมด ทั้งที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำอื่น ๆ ก็มีโอกาสปนเปื้อนจากการเกษตรกรรม น้ำทิ้งชุมชน และอุตสาหกรรมน้ำตาล แสดงให้เห็นว่าน้ำจากบึงโจด เป็นแหล่งสำคัญของสารอะโรมาติกอินทรีย์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของสารกลุ่ม THMs พารามิเตอร์หนึ่งที่สามารถนำมาใช้พิจารณาความสามารถของสารอินทรีย์ในการทำปฏิกิริยากับคลอรีน คือค่า THM-FP จำเพาะต่อค่า DOC (Specific THM-FP, THM-FP/DOC) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างค่า THM-FP ของน้ำตัวอย่างหนึ่งต่อค่า DOC ของน้ำตัวอย่างนั้น ๆ [25] และเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถบ่งชี้ได้ว่า เมื่อ 1 mg-C ของน้ำตัวอย่างทำปฏิกิริยากับคลอรีนแล้ว ก่อให้เกิดสารกลุ่ม THMs ได้มากน้อยเพียงใด น้ำจากจุดเก็บน้ำบึงโจดมีค่า THM-FP/DOC เท่ากับ 84.7 $\mu\text{g}/\text{mg}$ ในขณะที่น้ำจากจุดเก็บตัวอย่างอื่น ๆ ในแม่น้ำพอง มีค่า THM-FP/DOC อยู่ในช่วง 55.3-61.3 $\mu\text{g}/\text{mg}$ เท่านั้น (รูปที่ 7) ผลค่า THM-FP/DOC ของน้ำดิบนี้แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษ ไม่

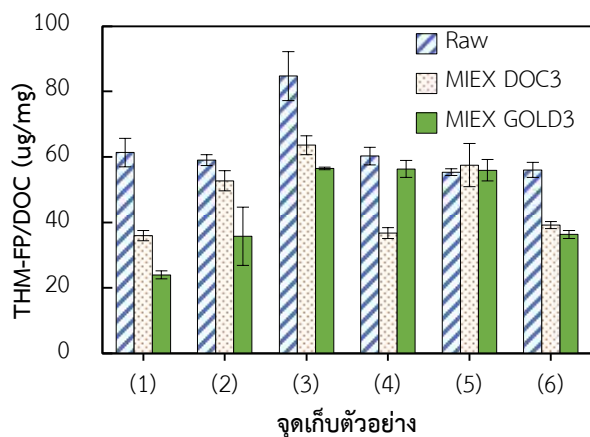
เพียงแต่จะมีปริมาณสูง แต่ยังมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับคลอรีนและเกิดเป็นสารกลุ่ม THMs สูงกว่าสารอินทรีย์ธรรมชาติและสารอินทรีย์น้ำทิ้งจากกิจกรรมอื่น ๆ ของมนุษย์



รูปที่ 6 (a) ค่าศักยภาพการเกิดสารกลุ่ม THMs จากการเติมคลอรีน และ (b) ประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นของสารกลุ่ม THMs รวมทั้งสิ้นชนิด โดยเรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD จุดเก็บตัวอย่างคือ (1) สะพานห้วยทราย, (2) สะพานมิตรสัมพันธ์, (3) บึงโจด, (4) ระบบผลิตน้ำประปา น้ำพอง, (5) สะพานปากเสียว, และ (6) ระบบผลิตน้ำประปาบ้านโกทา

เมื่อผ่านการบำบัดด้วยเรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD ที่ 3 mL/L แล้ว ค่า THM-FP/DOC ของน้ำจาก 5 จุดเก็บตัวอย่างมีแนวโน้มลดลง คือ สะพานห้วยทราย สะพานมิตรสัมพันธ์ บึงโจด ระบบผลิตน้ำประปาน้ำพอง และ ระบบผลิตน้ำประปาบ้านโกทา ยกเว้นน้ำจากจุดเก็บตัวอย่างสะพานปากเสียวที่ค่า THM-FP/DOC ก่อนและหลังการบำบัดด้วยเรซิน ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการกำจัดสารอินทรีย์โดยใช้ เรซิน MIEX เป็นประโยชน์สำหรับน้ำจาก

แม่น้ำพองส่วนใหญ่ คือทำให้ค่าความสามารถในการเกิด THMs ของสารอินทรีย์หลังการบำบัด มีค่าลดลง โดยเฉพาะในน้ำจากสะพานห้วยทราย สะพานมิตรสัมพันธ์ และบึงโจดพบว่า เรซิน MIEX GOLD สามารถลดค่า THM-FP/DOC ได้มากกว่าเรซิน MIEX DOC อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 7 ค่าศักยภาพการเกิดสารกลุ่ม THMs จำเพาะ (THM-FP/DOC) จากการเติมคลอรีน ก่อนและหลังการบำบัดโดยเรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD 3 mL/L จุดเก็บตัวอย่างคือ (1) สะพานห้วยทราย, (2) สะพานมิตรสัมพันธ์, (3) บึงโจด, (4) ระบบผลิตน้ำประปา น้ำพอง, (5) สะพานปากเสียว, และ (6) ระบบผลิตน้ำประปา บ้านโกทา

จากผลการทดลอง บ่งชี้ว่าสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกจากน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมกระดาษบริเวณบึงโจด มีค่า THM-FP/DOC สูงกว่าสารอินทรีย์ในลำน้ำ ณ จุดอื่นๆ ในแม่น้ำพอง แม้ว่าผลการตรวจคุณภาพน้ำดิบของระบบผลิตน้ำประปาทางด้านท้ายน้ำจะยังอยู่ในเกณฑ์ดี แต่ระบบผลิตน้ำประปาที่อยู่ทางด้านท้ายน้ำ ก็ควรมีการตรวจสอบคุณภาพน้ำดิบ และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำของระบบอย่างสม่ำเสมอ การใช้เรซิน MIEX ซึ่งมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกโดยเฉพาะ ก็อาจจะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการบำบัดขั้นที่สามของโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ

นอกจากนี้ เพื่อให้ได้น้ำประปาที่สะอาดปลอดภัย ในการเดินระบบผลิตน้ำประปายังต้องคำนึงถึงการตรวจวัดปริมาณ THMs ที่เกิดขึ้นที่ระบบผลิตน้ำประปา และในระบบสูบน้ำประปา เนื่องจากความเข้มข้นของ THMs นั้นสามารถเพิ่มขึ้นได้ในเส้นท่อเมื่อคลอรีนตกค้างมีระยะเวลาสัมผัสกับ

สารอินทรีย์ที่ตกค้างอยู่ในน้ำประปามากขึ้น [1] อย่างไรก็ตาม การตรวจวัด THM-FP และสารพลอยได้อื่น ๆ นั้นใช้เวลาตรวจวิเคราะห์ค่อนข้างนานและมีการสกัดตัวอย่างที่ยุ่งยาก แนวโน้มของงานวิจัยในอนาคตจึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการหาพารามิเตอร์ตัวแทนที่สามารถบ่งชี้ทำนาย THM-FP ของน้ำตัวอย่างได้ เช่น การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงแสงของสารอินทรีย์ นอกจากนี้ การใช้เรซิน MIEX ก่อนการตกตะกอนยังสามารถช่วยลดปริมาณสารสร้างตะกอนที่ต้องการเพื่อกำจัดความขุ่นได้ [5] ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาเกี่ยวกับความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้เรซิน MIEX เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในระบบผลิตน้ำประปาและลดค่าใช้จ่ายของสารเคมี

4. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีต่อการเกิดสารพลอยได้อีกกลุ่ม THMs และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเรซินชนิด MIEX DOC และ MIEX GOLD ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นของสารกลุ่ม THMs จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมกระดาษมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดเป็นสารกลุ่ม THMs สูงกว่าสารอินทรีย์จากจุดอื่นๆ ในแม่น้ำพอง

เรซิน MIEX DOC และ MIEX GOLD สามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำในธรรมชาติและสารอินทรีย์จากน้ำทิ้งในแม่น้ำพองได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการผลิตน้ำประปาแบบดั้งเดิม เรซินทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติเลือกกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นของสารพลอยได้อีกกลุ่ม THMs มากกว่า DOC และ TDN เนื่องจากเรซิน MIEX มีคุณสมบัติแลกเปลี่ยนประจุกับสารอินทรีย์ที่มีความสามารถในการดูดซับแสง UV ซึ่งเป็นสารอินทรีย์กลุ่มที่มีประจุลบและมีความเป็นอะโรมาติกสูง

ปริมาณเรซินที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่างชุดนี้ คือ 3 mL/L ที่ระยะเวลาทวนผสม 30 นาที เรซินทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC ได้ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 50-62% อย่างไรก็ตาม เรซิน MIEX GOLD มีประสิทธิภาพในการกำจัด TDN และสารตั้งต้นของ THMs สูงกว่า MIEX DOC อย่างมีนัยสำคัญ คุณสมบัติทางกายภาพของ

MIEX GOLD คือขนาดรูพรุนใหญ่กว่า พื้นที่ผิวมีความขรุขระ และมีค่าความพรุนสูงกว่า ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนมากกว่า จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เรซิน MIEX GOLD กำจัดสารอินทรีย์กลุ่มที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ได้ดีกว่าเรซิน MIEX DOC

กิตติกรรมประกาศ

ทางทีมงานผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้สนับสนุนทุนวิจัย และบริษัท IXOM ประเทศไทย ผู้มอบตัวอย่างเรซิน MIEX เพื่อใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ratpukdi T, Sinorak S, Kiattisaksiri P, Punyapalakul P, Siripattanakul- Ratpukdi S. Occurrence of trihalomethanes and haloacetonitriles in water distribution networks of Khon Kaen municipality, Thailand. *Water Supply*. 2019;19(6):1–10.
- [2] US EPA. *Six- Year Review 3 Technical Support Document for Disinfectants/ Disinfection Byproducts Rules*. 2016.
- [3] US EPA. *National Primary Drinking Water Regulations: Stage 1 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rule*. 2001.
- [4] Leenheer JA, Croué J- P. Peer reviewed: Characterizing aquatic dissolved organic matter, Understanding the unknown structures is key to better treatment of drinking water. *Environmental Science & Technology*. 2003;1:18A-26A.
- [5] Singer PC, Bilyk K. Enhanced coagulation using a magnetic ion exchange resin. *Water Research*. 2002; 36(16): 4009–4022.
- [6] World Health Organization. *Guidelines for Drinking-water Quality*. 4th ed. World Health Organization, editor. World Health Organization. Geneva, Switzerland; 2011.
- [7] Krasner SW, Westerhoff P, Chen B, Rittmann BE, Nam S- N, Amy G. Impact of wastewater treatment processes on organic carbon, organic nitrogen, and DBP precursors in effluent organic matter. *Environmental Science & Technology*. 2009;43(8):2911–2918.
- [8] Neale PA, Schäfer AI. Magnetic ion exchange: Is there potential for international development? *Desalination*. 2009; 248(1-3):160–168.
- [9] Gibson A, Golubovic S. MIEX gold resin: demonstration at aireys inlet water. *Water: Journal of the Australian Water Association*. 2015;42(2):50–52.
- [10] Rajca M, Włodyka-Bergier A, Bodzek M, Bergier T. MIEX® DOC process to remove disinfection by-product precursors. *Desalination and Water Treatment*. 2017;64:372–377.
- [11] Gan X, Karanfil T, Kaplan Bekaroglu SS, Shan J. The control of N-DBP and C-DBP precursors with MIEX®. *Water Research*. 2013;47(3):1344–1352.
- [12] Jutaporn P, Armstrong MD, Coronell O. 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 Research*. 2020;172:1–11.
- [13] Jutaporn P, Singer PC, Cory RM, Coronell O. Minimization of short- term low- pressure membrane fouling using a magnetic ion exchange (MIEX®) resin. *Water Research*. 2016;98:225–234.
- [14] Boyer TH, Singer PC. A pilot-scale evaluation of magnetic ion exchange treatment for removal of natural organic material and inorganic anions. *Water Research*. 2006;40(15):2865–2876.
- [15] Summers RS, Hooper SM, Shukairy HM, Solarik G, Owen D. Assessing DBP yield: uniform formation conditions. *Journal American Water Works Association*. 1996;88(6):80–93.
- [16] Tongchang P, Kumsuvan J, Phatthalung WN, Suksaroj C, Wongrueng A, Musikavong C. Reduction by enhanced coagulation of dissolved organic nitrogen as a precursor of N-

- nitrosodimethylamine. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 2018;53(6):583–93.
- [17] Musikavong C, Inthanuchit K, Srimuang K, Suksaroj TT, Suksaroj C. Reduction of fractionated dissolved organic matter and their trihalomethane formation potential with enhanced coagulation. *ScienceAsia*. 2013;39:56–66.
- [18] Pokhrel D, Viraraghavan T. Treatment of pulp and paper mill wastewater - A review. *Science of The Total Environment*. 2004;333(1–3):37–58.
- [19] Slunjski M, Cadee K, Tattersall J. *MIEX® Resin Water Treatment Process*. In: Aquatech Amsterdam. Amsterdam, Netherlands; 2000.
- [20] Laolertworakul W, Jutaporn P, Tungsudjawong K, Leungprasert S, Khongnakorn W. Assessing Trihalomethanes (THMs) Formation Potential in a Water Supply Plant Using Fluorescence Excitation-Emission Matrix. *KMUTT Research and Development Journal*. 2020;43(3):257–275.
- [21] Drikas M, Dixon M, Morran J. Long term case study of MIEX pre-treatment in drinking water; understanding NOM removal. *Water Research*. 2011;45:1539–48.
- [22] Na-Phatthalung W, Musikavong C, Suttinun O. 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*. 2016;51(11):900–13.
- [23] Fabris R, Lee EK, Chow CWK, Chen V, Drikas M. Pre-treatments to reduce fouling of low pressure micro-filtration (MF) membranes. *Journal of Membrane Science*. 2007;289:231–40.
- [24] López-Ortiz CM, Sentana-Gadea I, Varó-Galvañ PJ, Maestre-Pérez SE, Prats-Rico D. Effect of magnetic ion exchange (MIEX®) on removal of emerging organic contaminants. *Chemosphere*. 2018;208:433–40.
- [25] Panyapinyopol B, Marhaba TF, Kanokkantapong V, Pavasant P. Characterization of precursors to trihalomethanes formation in Bangkok source water. *Journal of Hazardous Materials*. 2005;120:229–36.