

ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดความขุ่นสูงในน้ำของระบบผลิตน้ำประปา Optimum Alum Dosage for High Turbidity Removal in Water Treatment Plant

วีระพล พูลสวัสดิ์ (Weerapol Poonsawatt)* ดร.ธัญลักษณ์ ราษฎร์ภักดิ์ (Dr.Thunyalux Ratpukdi)**,**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณความต้องการสาร โคลแอกกูแลนที่เหมาะสมในสถานะที่น้ำมีความขุ่นสูงของระบบผลิตน้ำประปา โดยสังเคราะห์น้ำตัวอย่างจากดินเกาลินและดินธรรมชาติบริเวณริมแม่น้ำเลย อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย พบว่าปริมาณดินทั้งสองชนิดที่ใช้ทำให้น้ำมีความขุ่นเพิ่มขึ้นนั้นเป็นสัดส่วนกันโดยตรงแต่ดินธรรมชาติจะต้องใช้ในปริมาณที่มากกว่า การทดลองทำจาร์เทสที่สังเคราะห์จากดินเกาลินที่ค่าความขุ่น 3,000 NTU และ 7,000 NTU และน้ำตัวอย่างที่สังเคราะห์จากดินธรรมชาติที่ค่าความขุ่น 3,000 NTU พบว่าปริมาณสารส้มที่เหมาะสมคือ 50 mg/l, 90 mg/l และ 50 mg/l ตามลำดับ น้ำตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยดินเกาลินที่ค่าความขุ่น 3,000 NTU และ 7,000 NTU หลังจากเติมสารส้ม 50 mg/l และ 90 mg/l จะเกิดตะกอนที่มีปริมาตร 50 ml และ 100 ml และมีความเป็นด่างคงเหลือเท่ากับ 68 mg/l as CaCO₃ และ 20 mg/l as CaCO₃ ตามลำดับ ส่วนน้ำตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยดินธรรมชาติที่ค่าความขุ่น 3,000 NTU หลังจากเติมสารส้ม 50 mg/l จะเกิดตะกอนที่มีปริมาตร 50 ml และมีความเป็นด่างคงเหลือเท่ากับ 10 mg/l as CaCO₃

ABSTRACT

This work investigated the optimum alum dosage for high turbidity water in water treatment plant. Synthetic high turbidity water were prepared by Kaolin clay (3,000 NTU, 7,000 NTU) and by natural soil from the Loei River, Wang Saphung District, Loei Province Thailand (3,000 NTU). Jar tests were used to evaluate the coagulation efficiencies. The experimental results showed that turbidity increased with increase the concentration of Koalin clay and soil. The optimum alum dosage for high turbidity water (by Kaolin clay) at 3,000 NTU, 7,000 NTU were 50 mg/l, 90 mg/l, respectively while that of by soil was 50 mg/l. For Koaline clay, alum sludge volume at the optimum alum dosage were 50 ml and 100 ml for turbidity of 3,000 NTU and 7,000 NTU respectively. The alkalinity level after coagulation were with 68 mg/l as CaCO₃ and 20 mg/l as CaCO₃. For soil, alum sludge volume at the optimum alum dosage was 50 ml for turbidity of 3,000 NTU. Alkalinity was 10 mg/l as CaCO₃.

คำสำคัญ: สารส้ม, ความขุ่นสูง, ระบบประปา

Keywords: Alum, High turbidity, Water Supply

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*** ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ปัจจุบันแหล่งน้ำดิบที่เหมาะสมในการนำมาผลิตน้ำประปาเพื่ออุปโภคและบริโภคมีอยู่อย่างจำกัด ปัญหาด้านปริมาณและคุณภาพน้ำดิบ ทำให้ต้องมีการพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีคุณภาพดี สะอาดปลอดภัยตามมาตรฐานซึ่งต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำหลายขั้นตอน อย่างไรก็ตามวิธีการและรูปแบบเหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบแต่ละแห่ง โดยให้ความสำคัญสูงสุดกับความสะอาดและความปลอดภัย การจัดการกับความขุ่นของน้ำดิบอันเนื่องมาจากอนุภาคคอลลอยด์และสารแขวนลอยในน้ำ เป็นกระบวนการส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นและใช้เวลานานกว่ากระบวนการอื่น ความขุ่นของน้ำดิบจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อกำลังการผลิตน้ำประปาและเกี่ยวพันต่อเนื่องถึงปริมาณน้ำที่จ่ายออกไปยังผู้ใช้

ระบบการผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน โดยทั่วไปประกอบไปด้วยการเติมสารเคมีในกระบวนการการโคแอกกูเลชันฟล็อกคูเลชัน การตกตะกอน การกรอง และการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งในสถานะที่คุณภาพน้ำดิบเป็นปกติระบบดังกล่าวจะสามารถทำงานได้ดี อย่างไรก็ตามในสถานะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่แปรปรวนมาก (Extreme weather event) เช่น เกิดพายุฝนลมแรง หรือดินโคลนถล่ม จะส่งผลให้คุณภาพน้ำเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือน้ำดิบจะมีความขุ่นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดขึ้นเป็นเวลาหลายสัปดาห์ (Annadurai et al., 2004) และทำให้เกิดปัญหาแก่ระบบผลิตน้ำประปาได้ โดยทั่วไปแล้วผู้ควบคุมระบบผลิตน้ำประปาจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนปริมาณสารเคมีให้เหมาะสมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน การที่น้ำดิบมีความขุ่นสูงจึงต้องใช้สารเคมีเพิ่มขึ้น

โรงผลิตน้ำประปา การประปาส่วนภูมิภาคสาขาวังสะพุง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย รับน้ำดิบจากแม่น้ำเลยเข้าสู่ระบบการผลิต ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวเป็นภูเขาสูงและมีภูมิประเทศลาดชัน เมื่อมีฝนตกหนักจึงทำให้เกิดการกัดเซาะหน้าดินและชะล้างตะกอนต่างๆ ลงสู่ลำน้ำอย่างรวดเร็ว ทำให้น้ำมีความขุ่นเพิ่มสูงขึ้นกว่าปกติ โดยพบว่าในฤดูฝนค่าความขุ่นสูงสุดของน้ำดิบที่ตรวจวัดในปี พ.ศ. 2560 มีค่าสูงถึง 5,000 NTU เป็นเวลาต่อเนื่องหลายวัน (การประปาส่วนภูมิภาค, 2561) และการควบคุมระบบการผลิตน้ำประปาเมื่อน้ำดิบที่นำเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ มีค่าความขุ่นสูงเกินค่าที่ออกแบบไว้ (2,000 NTU; Kawamura, 2000) โดยทั่วไปต้องหยุดระบบการผลิตทั้งหมด แต่หากต้องหยุดระบบไว้เป็นเวลานานต่อเนื่องหลายวัน จะส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำที่จ่ายให้ประชาชนในพื้นที่บริการ จึงจำเป็นต้องดำเนินการผลิตโดยปรับการจ่ายสารเคมีเพิ่มมากขึ้นและอาจใช้สารเคมีชนิดอื่นร่วมด้วย เช่น Polymer, Polyaluminium chloride (Baghvand et al., 2010; Xia et al., 2018) รวมถึงการลดกำลังการผลิตลงครึ่งหนึ่งเพื่อลดปริมาณตะกอนที่เข้าสู่ถังตกตะกอน ด้วยเหตุดังกล่าวจึงยังไม่มีข้อมูลที่ครบถ้วนและแนวทางปฏิบัติที่ชัดเจนเพื่อประยุกต์ใช้งานและควบคุมระบบผลิตได้อย่างเหมาะสมเมื่อพบกรณีน้ำดิบที่มีความขุ่นสูง

การวิจัยในครั้งนี้จึงได้มุ่งศึกษาระดับของความขุ่นสูง ต่อปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ตกตะกอน โดยผลการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติในการผลิตน้ำประปาได้อย่างเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์การวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณความต้องการสารโคแอกกูแลนต์ในสถานะที่น้ำมีความขุ่นสูงของระบบผลิตน้ำประปา

วิธีการวิจัย

แผนการทดลอง

รวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคสาขาวังสะพุง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย ซึ่งน้ำดิบที่นำมาผลิตเป็นน้ำประปานั้นมาจากแม่น้ำเลยที่บริเวณอำเภอวังสะพุงและมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูง โดยเป็นการศึกษาข้อมูลค่าความขุ่นของน้ำดิบทางสถิติย้อนหลังในระยะเวลา 2 ปี ระหว่างปี พ.ศ. 2559 ถึงปี พ.ศ. 2560 และเก็บข้อมูลค่าความเข้มข้นของตะกอนที่ก้นถังตกตะกอน อัตราการไหลของน้ำเข้าถังตกตะกอน และพื้นที่ผิวของถังตกตะกอน เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะที่ใช้สำหรับการทดลองและวิเคราะห์ระบบในขั้นตอนต่อไป

สังเคราะห์น้ำดิบตัวอย่างที่มีค่าความขุ่นสูงโดยใช้ดินเกาหลีผสมน้ำ ซึ่งค่าความขุ่นที่ใช้จะอ้างอิงตามสถิติค่าความขุ่นของแม่น้ำเลยในระบบผลิตน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคสาขาวังสะพุง โดยจะสังเคราะห์น้ำที่มีความขุ่น 3,000 และ 7,000 NTU แล้วนำมาหาปริมาณการเติมสารส้มที่เหมาะสมโดยการทำการทดสอบซึ่งควบคุมความเป็นด่างและ pH จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณตะกอนที่เกิดจากการเติมสารส้มในปริมาณที่เหมาะสม

เตรียมดินธรรมชาติที่เก็บมาจากบริเวณพื้นที่อำเภอวังสะพุง โดยนำมาตากให้แห้งและแยกดินละเอียด โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์#100 แล้วนำดินที่ได้มาสังเคราะห์ความขุ่นที่ 3,000 NTU เพื่อเปรียบเทียบปริมาณดินธรรมชาติและปริมาณของดินเกาหลีที่ใช้ในการสร้างความขุ่น จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณการเติมสารส้มที่เหมาะสมโดยการทำการทดสอบซึ่งควบคุมความเป็นด่างและ pH แล้วหาปริมาณตะกอนที่เกิดจากการเติมสารส้มในปริมาณที่เหมาะสม

การทำার্เทศ

นำน้ำตัวอย่างใส่บีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร เติมน้ำละลายสารส้มที่มีความเข้มข้น 1 % ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์แรกและเพิ่มปริมาณขึ้นทีละ 1 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ต่อไป ทำการกวนเร็วที่ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที แล้วกวนช้าต่อที่ความเร็ว 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนอีก 20 นาที นำน้ำใส่ไปวัดค่าความขุ่นคงเหลือเทียบกับปริมาณสารส้มที่เติมลงไป

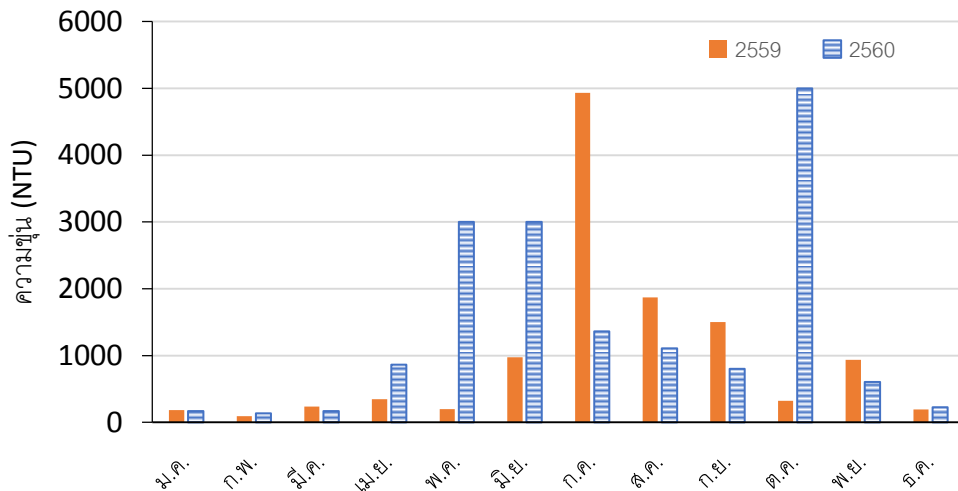
สถานที่ในการทำการทดลอง

การประปาส่วนภูมิภาคสาขาวังสะพุง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย, การประปาส่วนภูมิภาคเขต 7 จังหวัดอุดรธานี, ห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผลการวิจัย

สถิติค่าความขุ่นของแม่น้ำเลย

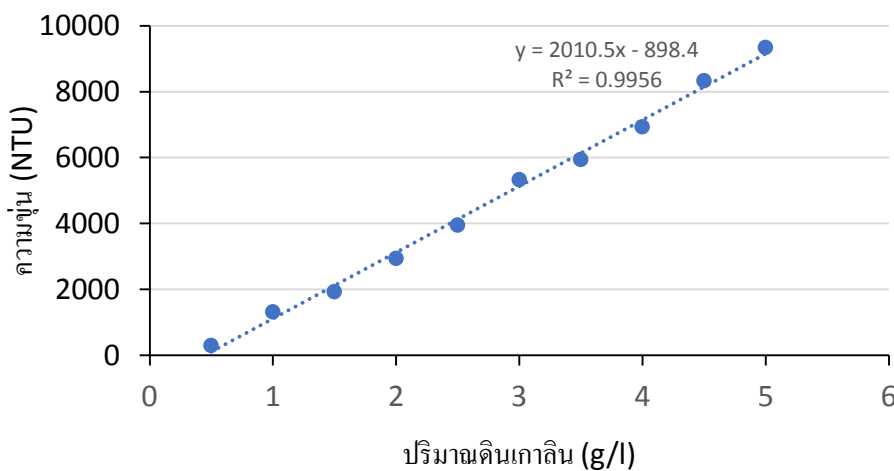
จากการรวบรวมข้อมูลทางสถิติค่าความขุ่นของแม่น้ำเลย บริเวณพื้นที่อำเภอวังสะพุงระหว่างปี พ.ศ. 2559-2560 พบว่าค่าความขุ่นจะมีค่าสูงเกิน 1,000 NTU ในช่วงฤดูฝน และความขุ่นจะสูงมากในช่วงต้นและปลายฤดูฝนโดยมีค่าความขุ่นสูงถึง 5,000 NTU (รูปที่ 1) โดยระยะเวลาที่เกิดความขุ่นสูงประมาณ 1-2 สัปดาห์ ซึ่งทำให้ระบบผลิตประปามีคุณภาพน้ำประปาที่ลดลงและต้องใช้ปริมาณสารเคมีที่สูงขึ้นในการกำจัดความขุ่น



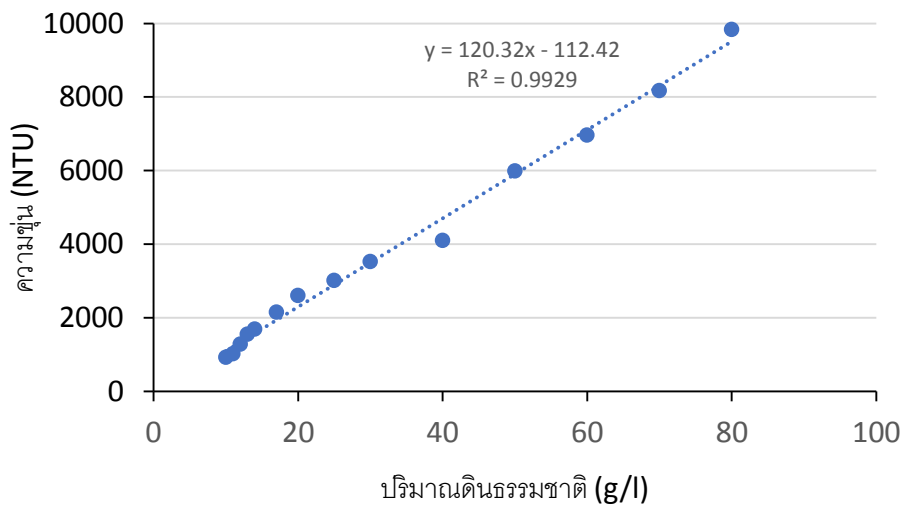
รูปที่ 1 แสดงค่าความขุ่นสูงสุดรายเดือนในปี พ.ศ. 2559 และ 2560

การสังเคราะห์ความขุ่นในน้ำดิบ

ในการทดลองเพื่อหาปริมาณสารส้มที่ใช้ตกตะกอนที่เหมาะสมจำเป็นต้องสังเคราะห์น้ำที่มีความขุ่นในการศึกษานี้ใช้ดินเหนียวและดินธรรมชาติบริเวณริมแม่น้ำเลย อำเภอวังสะพุง ผลการสังเคราะห์ความขุ่นในน้ำตัวอย่างด้วยการเติมดินเหนียวสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2 และผลของการเติมดินธรรมชาติเพื่อสังเคราะห์ความขุ่นแสดงในรูปที่ 3 โดยพบว่าปริมาณดินเหนียวหรือดินธรรมชาติที่เติมลงไป ปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้น้ำมีความขุ่นเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกันโดยตรง แต่ที่ค่าความขุ่นที่เท่ากันจะต้องใช้ปริมาณดินธรรมชาติมากกว่าดินเหนียวในการสังเคราะห์ความขุ่น ทั้งนี้เป็นเพราะดินธรรมชาติมีส่วนประกอบของ Sand, Silt และ Clay โดยที่ Sand และ Silt มีขนาด 2.0 - 0.075 mm และ 0.075 - 0.002 mm ตามลำดับ สำหรับ Clay นั้นจะมีขนาดเล็กกว่า 0.002 mm (American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2019) ดังนั้นเมื่อผสมน้ำแล้วบางส่วนอาจจะตกตะกอนไม่ทำให้เกิดความขุ่นได้ ในขณะที่ดินเหนียวซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 0.002 mm (Imerys Kaolin, 2019) จึงสามารถแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนในน้ำ ทำให้สร้างค่าความขุ่นได้สูงแม้จะมีความเข้มข้นน้อยกว่าดิน



รูปที่ 2 ปริมาณดินเหนียวที่ทำให้เกิดค่าความขุ่น

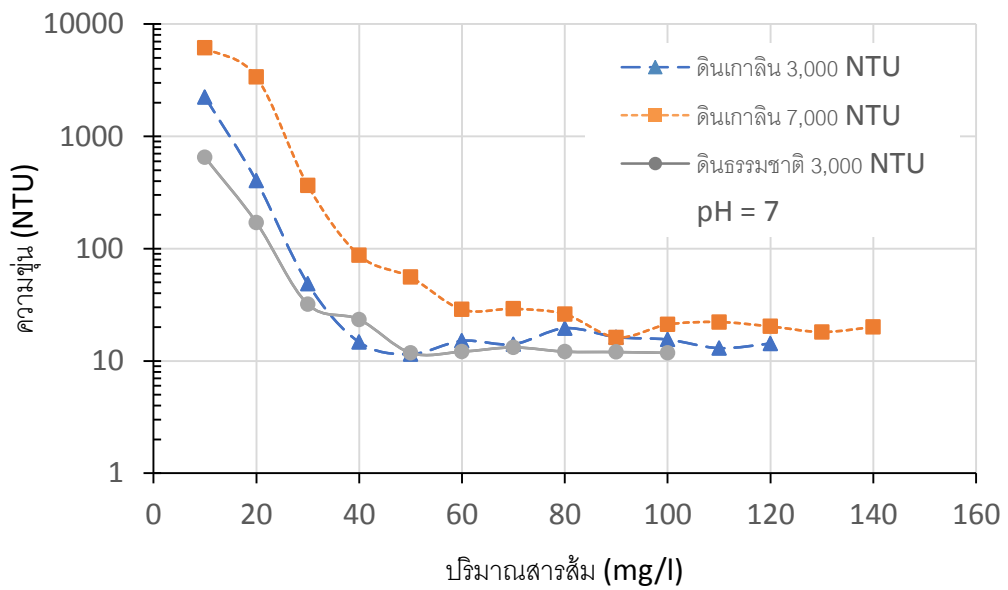


รูปที่ 3 ปริมาณดินธรรมชาติที่ทำให้เกิดค่าความขุ่น

ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่นสูง

การทำjar testเพื่อหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4 ซึ่งน้ำตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยดินเกลิน ที่ค่าความขุ่น 3,000 NTU และ 7,000 NTU จะใช้สารส้มปริมาณ 50 mg/l และ 90 mg/l ตามลำดับ และน้ำตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยดินธรรมชาติ ที่ค่าความขุ่น 3,000 NTU จะใช้สารส้มปริมาณ 50 mg/l โดยน้ำตัวอย่างทั้งหมดก่อนเติมสารส้มและหลังเติมสารส้มแล้วสามารถวัดค่า pH ได้เท่ากับ 7

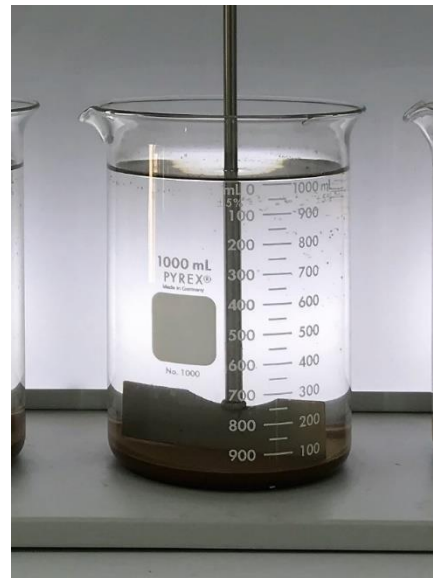
น้ำตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยดินเกลิน ที่ค่าความขุ่น 3,000 NTU และ 7,000 NTU หลังจากเติมสารส้ม 50 mg/l และ 90 mg/l แล้วจะเกิดตะกอนที่มีปริมาตร 50 ml และ 100 ml และมีความเป็นด่างคงเหลือเท่ากับ 68 mg/l as CaCO₃ และ 20 mg/l as CaCO₃ ส่วนน้ำตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยดินธรรมชาติที่ค่าความขุ่น 3,000 NTU หลังจากเติมสารส้ม 50 mg/l จะเกิดตะกอนที่มีปริมาตร 50 ml และมีความเป็นด่างคงเหลือเท่ากับ 10 mg/l as CaCO₃ ซึ่งความเป็นด่างในน้ำมีส่วนสำคัญในการสะเทินกรดที่เกิดจากการเติมสารส้ม หากไม่มีความเป็นด่างคงเหลืออยู่ในน้ำเลย น้ำจะมี pH ลดลงทำให้สารประกอบอะลูมิเนียมจากการเติมสารส้มนั้นไม่ตกตะกอน และน้ำจะมีสภาวะเป็นกรดที่เกิดจาก H₂SO₄ (Ye et al., 2007)



รูปที่ 4 ปริมาณสารส้มต่อความขุ่นของน้ำที่สังเคราะห์ด้วยดินเหนียวและดินธรรมชาติ



(a)



(b)

รูปที่ 5 (a) น้ำสังเคราะห์จากดินธรรมชาติที่ความขุ่น 3000 NTU ก่อนเติมสารส้ม, (b) น้ำสังเคราะห์จากดินธรรมชาติที่ความขุ่น 3000 NTU หลังทำอาร์เทส

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ค่าความขุ่นของแม่น้ำเลย บริเวณพื้นที่อำเภอสว่างพระระหว่างปี พ.ศ. 2559-2560 พบว่ามีค่าได้ต่ำสุดที่ 35 NTU และสูงสุดที่ 5,000 NTU ซึ่งในฤดูฝนน้ำจะมีความขุ่นสูงขึ้น โดยเฉพาะช่วงต้นฤดูฝนและปลายฤดูฝน

จากการศึกษาการสังเคราะห์ความขุ่นโดยใช้ดินเหนียวและดินธรรมชาติพบว่าที่ความขุ่นเท่ากันจะใช้ปริมาณของดินเหนียวในการสังเคราะห์น้อยกว่าดินธรรมชาตินั้น เนื่องจากดินเหนียวมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 0.002 mm จึงสามารถแขวนลอยในน้ำได้ดีกว่าดินธรรมชาติ และผลการทำอาร์เทสที่ความขุ่น 3,000 NTU น้ำที่สังเคราะห์ด้วยดิน

เกาตินและดินธรรมชาติต้องการปริมาณสารส้มเท่ากันที่ 50 mg/l จึงพอสรุปได้ว่าดินเกาตินสามารถนำมาใช้เป็นสารสังเคราะห์ความขุ่นในการทดลองแทนน้ำตัวอย่างจากธรรมชาติได้

การบำบัดน้ำที่มีความขุ่นสูงตั้งแต่ 1,000 NTU ขึ้นไปโดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์เพียงชนิดเดียวนั้นสามารถทำได้ แต่การใช้สารส้มนั้นต้องควบคุมค่า pH และความเป็นด่างด้วย ซึ่งความเป็นด่างจะเป็นตัวที่ช่วยสะเทินกรดจากการเติมสารส้ม งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาหากความขุ่นของน้ำสูงมากกว่า 1,000 NTU ขึ้นไปจะใช้สารโคแอกกูแลนต์มากกว่าหนึ่งชนิดในการบำบัดน้ำ ส่วนหนึ่งเพื่อเป็นการลดปริมาณกรดที่เกิดจากการเติมสารส้มและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำ จากงานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปเป็นแนวทางการประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติสำหรับการผลิตน้ำประปาได้อย่างเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ การประปาส่วนภูมิภาคสาขาวังสะพุง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย และการประปาส่วนภูมิภาคเขต 7 จังหวัดอุดรธานี เป็นอย่างสูง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านสถานที่ วัสดุ อุปกรณ์ ในการทำวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุนวิจัยจากศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- การประปาส่วนภูมิภาค. (2561). รายงานผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบ. ค้นเมื่อ 19 ตุลาคม 2561, จาก <https://ois.pwa.co.th/webapps/report.do?service=Init&report=QLTRP3110>
- American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (2019). **Soil Classification**. ค้นเมื่อ 19 ตุลาคม 2561, จาก <http://faculty.uml.edu/ehajduk/Teaching/14.330/documents/14.330SoilClassification.pdf>
- Annadurai, G., Sung, S.S., Lee, D.J. (2004). Simultaneous removal of turbidity and humic acid from high turbidity stormwater. **Advances in Environmental Research**, 8, 713–725.
- Baghvand, A., Zand, A.D., Mehrdadi, N., Karbassi, A. (2010). Optimizing coagulation process for low to high turbidity waters using aluminum and iron salts. **American Journal of Environmental Sciences**, 6(5), 442-448.
- Imerys kaolin. (2019). **Stockalite datasheet**. ค้นเมื่อ 19 ตุลาคม 2561, จาก <https://www.ulprospector.com/documents/1508516.pdf?bs=34064&b=709979&st=20&r=asia&ind=coatings>
- Kawamura, S. (2000). **Integrated design and operation of water treatment facilities**. 2nd ed. USA: John Wiley & Sons.
- Xia, X., Lan, S., Li, X., Xie, Y., Liang, Y., Yan, P., Chen, Z., Xing, Y. (2018). Characterization and coagulation-flocculation performance of a composite flocculant in high-turbidity drinking water treatment. **Chemosphere**, 206, 701-708.
- Ye, C., Wang, D., Shi, B., Yu, J., Qu, J., Edwards, M., Tang, H., (2007). Alkalinity effect of coagulation with polyaluminum chlorides: Role of electrostatic patch. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**, 294, 163–173.