

ประสิทธิภาพการลดความขุ่นในน้ำด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี ร่วมกับการกรองอย่างง่าย

WATER TURBIDITY REMOVAL EFFICIENCY OF COMBINATION METHODS BETWEEN CHEMICAL COAGULATION AND SIMPLE FILTRATION

ณัฐสิมา โทชน์*, วีระวัฒน์ อุ่นเสนหา และ ณพัฏฐอร บัวฉวน

Natsima Tokhun*, Weerawat Ounsaneha and Napattaorn Buachoon

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี
Faculty of Science and Technology, Valay Alongkorn Rajabhat University under the Royal
Patronage, Pathum Thani Province

Received: 28 March 2022

Accepted: 10 August 2022

บทคัดย่อ

ชุมชนในชนบทนอกจากประสบปัญหาความไม่สมดุลของปริมาณน้ำฝนและภัยแล้งแล้วการเข้าถึงน้ำสะอาดเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ต้องได้รับการพิจารณาเช่นกัน โดยเฉพาะความขุ่นของน้ำซึ่งไม่เหมาะสมต่อการบริโภคในครัวเรือน ซึ่งการสำรวจเบื้องต้นพบว่า น้ำใช้ชุมชนเป็นสีน้ำตาลอ่อน มีความเป็นกลาง (pH 7.77) และความขุ่นสูง (499.33 NTU) ดังนั้นจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาวิธีการกำจัดความขุ่นของน้ำใช้ในชุมชนชนบท โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการกำจัดความขุ่นและ pH ของน้ำที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า วิธีการตกตะกอนด้วยสารส้ม (1% alum, 25 mg/L) ร่วมกับวิธีการกรองอย่างง่าย (ผ่านชั้นกรองถ่าน กรวด และทรายหยาบ) มีประสิทธิภาพกำจัดความขุ่นในน้ำได้สูงถึง 99.12% (ค่าความขุ่นเท่ากับ 4.42 NTU) และช่วยปรับค่า pH ให้เหมาะสมต่อการบริโภค (pH 7.42) ซึ่งวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้มสามารถช่วยลดความขุ่นของน้ำได้ดีกว่าวิธีการกรองร่วมกับการตกตะกอนและวิธีการกรองอย่างง่าย ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การใช้สารเคมีกำจัดความขุ่นหรือการใช้วัสดุกรองในท้องถิ่นนอกจากช่วยกำจัดความขุ่นในน้ำแล้ว

* ผู้ประสานงาน: ณัฐสิมา โทชน์

อีเมล: natsima@vru.ac.th

ควรพิจารณาค่า pH ของน้ำร่วมด้วยเพื่อความปลอดภัยต่อผู้บริโภค และควรทำให้น้ำสะอาดผ่านการฆ่าเชื้อโรคก่อนใช้บริโภค

คำสำคัญ: การตกตะกอนทางเคมี, การกรองอย่างง่าย, ความขุ่น, สารส้ม, จาร์เทส

Abstract

The rural community always face the problem of the imbalance rainfall water volume. Moreover, it faces the problem of drought and the problem about accessing the water too. This problem should be considered especially the turbidity of water that is not suitable for use in the household. The preliminary investigation found that water supply for community had brown color, natural (pH 7.77) and high turbidity level (499.33 NTU). The objective for study methods of turbidity removal from water supply by comparing which methods had the most effective way that suitable for removing turbidity and pH. The result showed the combination method between the flocculation (1% alum, 25 mg/L) and simple filtration (through the charcoal filter layer gravel and coarse sand) is the most water turbidity removal efficiency in 99.12% (turbidity 4.42 NTU) and this method can adjust the pH level (pH 7.42) that is suitable for use in the household. The alum floc method can reduce the turbidity in the water better than combination and simple filtration methods, respectively. This result showed that the chemical agents and using the filter can eliminate the turbidity in the water but we should consider the pH for water safety for consumers. Moreover, it suggests that the consumer should clean the water through disinfection before using it for consumption in the household.

Keywords: chemical flocculation, simple filtration, turbidity, alum, JAR test

บทนำ

การจัดหาน้ำสะอาดในชุมชนเป็นความจำเป็นขั้นพื้นฐานที่รัฐต้องส่งเสริมให้ประชาชนมีน้ำสะอาดเพื่อการอุปโภคบริโภคอย่างเพียงพอ ซึ่งนอกจากประชาชนในชุมชนมีสุขภาพที่ดีแล้วยังช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำสะอาดในชุมชน โดยติดตั้งระบบประปาหมู่บ้านและติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำให้เป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาส่วนภูมิภาคตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลกที่กำหนด (WHO, 2011) อย่างไรก็ตามหลายพื้นที่โดยเฉพาะเขตชนบทยังคงประสบกับปัญหาคุณภาพน้ำไม่ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งจากผลการสุ่มตรวจคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านปี 2561 จำนวน 445 แห่งพบว่า คุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านผ่านเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้เพียงร้อยละ 19.1 (ดนัย ชีวันดา, 2562) ซึ่งสาเหตุหลักเกิดจากกระบวนการผลิตน้ำประปาและคุณภาพของแหล่งน้ำดิบที่นำมาใช้ไม่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำประปาได้ และแหล่งน้ำส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ผลิตน้ำประปาเป็นแหล่งน้ำผิวดินที่พบตามหมู่บ้าน เช่น แม่น้ำ ห้วย หนอง คลองและบึง แต่ปัญหาที่พบของแหล่งน้ำผิวดินดังกล่าวคือ การปนเปื้อนของสารอินทรีย์ แบคทีเรียและความขุ่น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากสภาพพื้นที่ ฤดูกาลและการใช้ประโยชน์ที่ดินรอบๆ แหล่งน้ำที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำ (อมรรัตน์ วงษ์กลม และ ถนัด ธนะฉัตรชัยรัตน์, 2561) โดยเฉพาะแหล่งน้ำดิบจากสระหนองและบึงที่ใช้ผลิตน้ำประปาหมู่บ้านที่พบปัญหาความขุ่นของน้ำและการปนเปื้อนแบคทีเรีย (เชษฐพันธ์ กภาพแก้ว, 2542) ซึ่งค่าความขุ่น (turbidity) มีผลทำให้รสชาติและสีของน้ำไม่เหมาะสมต่อการบริโภคและใช้ประโยชน์ รวมทั้งก่อให้เกิดความเสี่ยงทางสุขภาพได้ เช่น น้ำที่มีความขุ่นมากจะทำให้คลอรีนมีประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อโรคลดลง เนื่องจากสารแขวนลอยในน้ำจะห่อหุ้มตัวจุลินทรีย์ไว้ทำให้ประสิทธิภาพของคลอรีนในการทำลายจุลินทรีย์ลดลงและทำให้เกิดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคได้ รวมทั้งเพิ่มต้นทุนในการผลิตน้ำประปา ดังนั้น ความขุ่นของน้ำจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อกำลังการผลิตน้ำประปาและเกี่ยวพันต่อเนื่องถึงปริมาณน้ำที่จ่ายออกไปยังผู้ใช้ น้ำ และเป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของระบบน้ำประปาหมู่บ้านแบบผิวดินของกรมอนามัย เนื่องจากการจัดการความขุ่นของน้ำดิบอันเนื่องมาจากอนุภาคคอลลอยด์และสารแขวนลอยในน้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นและใช้เวลานานกว่ากระบวนการอื่นๆ (วิระพล พูลสวัสดิ์ และธัญลักษณ์ ราษฎร์ภักดี, 2562) นอกจากนี้ความขุ่นของน้ำยังเป็นคุณลักษณะของน้ำทางกายภาพหลักที่ชาวบ้านใช้พิจารณาเมื่อนำน้ำมาใช้ประโยชน์

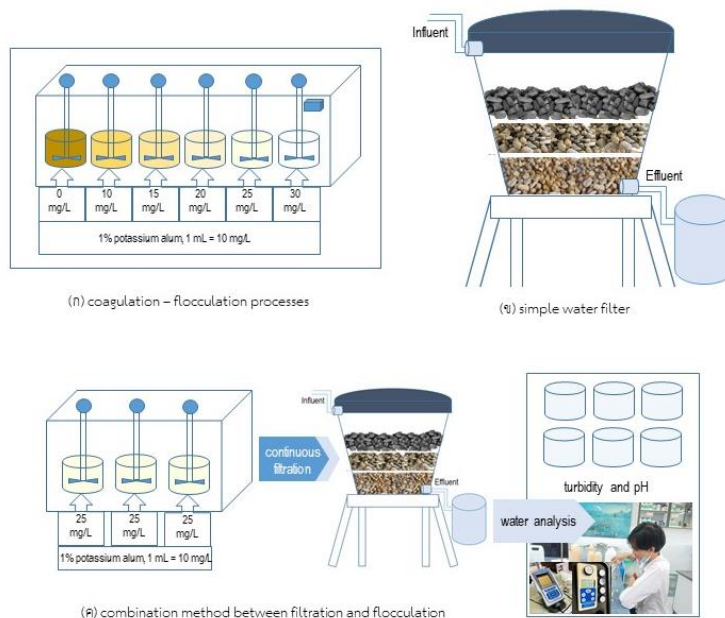
การกำจัดความขุ่นของน้ำเพื่อให้คุณภาพน้ำได้มาตรฐานสำหรับใช้ในการอุปโภคและบริโภคจะมีวิธีที่ใช้และเทคนิคที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำของแต่ละพื้นที่ โดยวิธีการกำจัดความขุ่นที่นิยมนำมาใช้ทั่วไปคือ กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (coagulation-flocculation) โดยการเติมสารรวมตะกอน (coagulant) เพื่อให้สารแขวนลอยเกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่หรือฟล็อก (floc) และเกิดการตกตะกอน (sedimentation) จากนั้นนำไปผ่านการกรอง (filtration) ก่อนใช้ประโยชน์ ซึ่งสารส้ม (alum) เป็นโคแอกกูแลนต์ (coagulant) ที่นิยมใช้กันมากที่สุด และทำให้ความเป็นด่าง (alkalinity) ลดลง เนื่องจากสารส้ม (alum) มีสูตรเคมี $\text{Al}(\text{SO}_4)_3$ ใช้ได้ดีกับแหล่งน้ำต่างๆ หาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพง เมื่อเติมลงในน้ำจะแตกตัวให้อิออนบวกและลบ (2Al^{+3} และ 3SO_4^{-2}) (พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ, 2545) และทำให้น้ำมีค่า pH ลดลงมีสภาพเป็นกรด ซึ่งจาร์เทสต์ (JAR test) เป็นอีกหนึ่งวิธีการทดลองหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมสำหรับเติมลงในน้ำดิบ (optimum dose of coagulation) เพื่อตกตะกอนสารแขวนลอยในน้ำ (การประปาส่วนภูมิภาค สาขาวัฒนานคร, 2560) และนำผลที่ได้ไปปรับจ่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยวิธีจาร์เทสต์เป็นการจำลองการทำงานของถังตกตะกอน ซึ่งเริ่มจากการกวนเร็วเพื่อจ่ายสารส้มให้สม่ำเสมอ การกวนช้าเพื่อให้สารส้มมีโอกาสเคลื่อนที่เข้ารวมกับความขุ่นเพื่อสร้างฟล็อก และการทิ้งให้ตกตะกอน (กรมควบคุมคุณภาพน้ำ, 2544) ทั้งนี้จากรายงานของ เกศรินทร์ วรเดชวิทยา (2552) พบว่าการใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 25 mg/L มีประสิทธิภาพกำจัดความขุ่นต่ำกว่า 50 NTU ได้ถึง 88.54% แต่การใช้สารส้มเป็นสารตกตะกอนมีข้อจำกัด คือ มีสภาพเป็นกรด จึงส่งผลทำให้ pH และสภาพด่าง (alkalinity) ของน้ำในระบบผลิตน้ำประปาลดต่ำลง ซึ่งตามค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาส่วนภูมิภาคตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลกที่กำหนดให้ค่า pH ของน้ำประปาอยู่ระหว่าง 6.5 – 8.5 (WHO, 2011) ซึ่งหากน้ำมีค่า pH < 6.5 จะกีดกีดร่อนเส้นทางท่อส่งน้ำประปาและมีผลประสิทธิภาพของคลอรีนในการกำจัดเชื้อโรคในน้ำประปา อีกทั้งส่งผลต่อการสุขภาพและการใช้ประโยชน์ของมนุษย์ได้ (พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ, 2553; การประปาส่วนนครหลวง, 2560) ดังนั้น กรณีที่น้ำที่มีความขุ่นมากจะไม่สามารถใช้สารส้มในปริมาณมากในการกำจัดความขุ่นได้เพราะจะทำให้ pH ลดลง อีกทั้งปริมาณสารส้มที่ยังมีผลทำให้เกิดตกค้างของอะลูมิเนียมในน้ำหลังการบำบัดได้ แต่ปริมาณการตกค้างจะแตกต่างกันตามระดับ pH ของน้ำ เช่น เมื่อค่า pH 6.5 – 7.0 พบอะลูมิเนียมตกค้างน้ำประมาณ 0.02 - 0.075 mg/L และเมื่อ pH 8.5 จะส่งผลทำให้อะลูมิเนียมตกค้าง

น้ำประมาณ 0.050 mg/L (Qureshi & Malmberg, 1985) การตกค้างดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้ ดังนั้นการเลือกสารตกตะกอนในการกำจัดความขุ่นของน้ำ จึงต้องมีการศึกษาหาสภาวะและปริมาณความเหมาะสมของสารตกตะกอนที่นำมาใช้ เพื่อประสิทธิภาพการผลิตน้ำประปารวมถึงความปลอดภัยทางสุขภาพของผู้ใช้น้ำ

สำหรับในบางพื้นที่สภาพความเป็นอยู่ในชนบทที่ยังไม่มีระบบน้ำประปาหรือระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านไม่ได้มาตรฐาน รวมทั้งชาวบ้านยังคงใช้น้ำบ่อหรือน้ำบาดาล การแก้ปัญหาโดยใช้เครื่องกรองน้ำเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมแต่ราคาค่อนข้างแพงและบางครั้งเรือืนไม่สามารถซื้อได้ จึงมีการพัฒนาเครื่องกรองน้ำโดยใช้วัสดุกรองต่างๆ ที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น เช่น การใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ถ่านลูกตาล ถ่านกะลามะพร้าว และถ่านแกลบ (ศวิตา รัตน์, 2545) การใช้วัสดุธรรมชาติ ได้แก่ หิน กรวด ทราย และถ่าน (น้ำฝน เบ้าทองคำ และ ดำรัสวิทย์ ปทุมมาศ, 2562) ซึ่งการใช้กรวดขนาดต่างๆ และปล่อยน้ำไหลผ่านสามารถลดความขุ่นเฉลี่ยของน้ำได้ถึง 70% และยังสามารถกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้ถึง 40% (กัมปนาท พลอมาตย์, 2544) และการใช้ทรายละเอียดกรองแบบต่อเนื่องลดความขุ่นของน้ำได้ถึง 95.5% (Mahvi et al., 2003) ซึ่งระบบการกรองน้ำดังกล่าวถือว่ามีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นของน้ำและจุลินทรีย์ได้ และคุณภาพน้ำที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย อีกทั้งยังเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ยุ่งยาก วัสดุที่นำมาใช้ยังสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่นและมีต้นทุนต่ำ จึงเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการกำจัดความขุ่นของน้ำและใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนนำไปใช้ประโยชน์ แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบการกรองจะขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบและวัสดุที่นำมาใช้ในการในเครื่องกรอง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเลือกวิธีการและรูปแบบการปรับปรุงน้ำประปาที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบแต่ละพื้นที่ และเน้นความสำคัญด้านความสะอาดและความปลอดภัยของน้ำอุปโภคบริโภคเป็นหลัก ดังนั้นในการศึกษารั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการกำจัดความขุ่นของน้ำใช้ในครัวเรือนชนบท โดยวิธีการตะกอนทางเคมี วิธีการกรองน้ำอย่างง่าย และการประยุกต์ใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีร่วมกับการกรองอย่างง่าย โดยข้อมูลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำจัดความขุ่นของน้ำที่เหมาะสม เพื่อให้ทำให้น้ำประปามีคุณภาพ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดค่าใช้จ่ายในการในการผลิตน้ำประปา รวมถึงลดผลกระทบทางสุขภาพของมนุษย์ อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาเลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพคุณภาพน้ำในแต่ละพื้นที่ชุมชนนั้นๆ ได้

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง ในพื้นที่ชุมชนชนบทแห่งหนึ่งของจังหวัดสระแก้ว และช่วงเดือนกันยายน 2564 เป็นช่วงฤดูฝนที่ชุมชนมีปัญหา น้ำประปามีความขุ่นมากและไม่เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ จึงมีการประเมินความขุ่นและ pH ของน้ำในชุมชน โดยการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำประปาในชุมชนและโรงเรียนจำนวน 4 จุด ผสมน้ำตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทำการตรวจวัดค่า pH และวัดค่าความขุ่นของน้ำก่อนการทดลอง จากนั้นนำตัวอย่างน้ำไปทดลองกำจัดความขุ่นในน้ำโดยใช้การตกตะกอนทางเคมีด้วยวิธีจาร์เทส (JAR Test) วิธีการกรองอย่างง่าย และการประยุกต์วิธีการตกตะกอนเคมีร่วมกับการกรองอย่างง่าย (รูปที่ 1) มีวิธีการศึกษา ดังนี้



รูปที่ 1 แผนผังการทดลองวิธีกำจัดความขุ่นในน้ำ โดย (ก) การตกตะกอนด้วยสารส้ม
(ข) การกรองอย่างง่าย และ (ค) การตกตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับการกรองอย่างง่าย

1. วิธีทดลองการตกตะกอนเคมี โดยทำการเตรียมสารละลายสารส้ม 1% ใช้สารส้ม (Potassium alum: $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) 10 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1,000 mL โดยสารละลายนี้ 1 mL = 10 mg/L และมีความถ่วงจำเพาะ 1.0047 จากนั้นทำการทดลอง

JAR Test (รุ่น Plus 6 LED ยี่ห้อ Wizard) โดยตวงน้ำใช้จากชุมชน 1,000 mL ลงในบีกเกอร์ ขนาด 2,000 mL จำนวน 6 ใบ วางบนเครื่องกวนสารละลาย (hotplate stirrer) ซึ่งจำลอง เดียวกันกับสภาวะถังตกตะกอน โดยเริ่มปั่นกวนเร็ว 100 รอบ/นาที พร้อมกับเติมสารละลาย สารส้ม 1% พร้อมกันทุกความเข้มข้นตามปริมาตรคาดการณ์จากการพิจารณาค่าความขุ่น ในน้ำตัวอย่างคือ 0 (ชุดควบคุม), 10, 15, 20, 25 และ 30 mg/L ในแต่ละบีกเกอร์ เป็นเวลา 1 นาที และลดความเร็วปั่นกวนช้า 30 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนอีก 20 นาที จากนั้นนำน้ำที่ใสไปตรวจวัดค่าความขุ่นคงเหลือ (turbidity meter รุ่น TN100 ยี่ห้อ EUTECH) เทียบกับปริมาณสารส้มที่เติมลงไป รวมทั้งตรวจสอบ pH ของน้ำด้วย (pH meter รุ่น PH100 ยี่ห้อ EXTECH) (วิระพล พูลสวัสดิ์ และ ธัญลักษณ์ ราชภูริภักดี, 2562; การประปาส่วนภูมิภาค สาขาฉะเชิงเทรา, 2560)

2. วิธีทดลองการกรองอย่างง่าย จัดทำถังกรองอย่างง่าย โดยการประยุกต์วิธีของ กรมอนามัย (2563) ที่ให้น้ำไหลผ่านชั้นวัสดุกรองจากบนลงล่างคือ ชั้นน้ำ ถ่านไม้ (biochar) กรวดหยาบ และทรายหยาบอย่างละ 25% (25 kg) ที่บรรจุในถังพลาสติกขนาด 100 ลิตร ซึ่งในส่วนชั้นล่างของถังมีก๊อกเปิด-ปิดน้ำ น้ำที่ผ่านการกรองแล้วถูกนำไปตรวจวัดค่าความขุ่น คงเหลือและตรวจวัด pH ของน้ำ สำหรับวัสดุกรองในการทดลองหาได้จากท้องถิ่นและมีขนาด 15–50 มิลลิเมตร

3. วิธีทดลองการตกตะกอนร่วมกับกรองอย่างง่าย พิจารณาค่าความขุ่นหลงเหลือ และ pH ของน้ำที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนการตกตะกอนเคมีด้วยสารละลายสารส้ม 1% เปรียบเทียบกับคู่มือปฏิบัติงานของ การประปาส่วนภูมิภาค (2560) คือค่าความขุ่นต่ำกว่า 10 NTU (Nephelometric turbidity unit; 1 NTU = 1 mg (formazin)/mg) และ pH (ที่ 25°C) อยู่ในช่วง 6.5 – 8.5 รวมปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม (optimum dose) โดยเลือก ตัวอย่างที่มีปริมาณสารเคมีน้อยที่สุดที่ทำให้ตกตะกอนได้ดีที่สุด เมื่อเลือกตัวอย่างที่มีความ ข้นเหมาะสมแล้วทำการทดลองตกตะกอนอีกครั้ง ซึ่งน้ำที่ใสจะถูกส่งต่อไปยังถังกรอง อย่างง่ายผ่านชั้นวัสดุกรอง

4. การวิเคราะห์ข้อมูล โดยข้อมูลความขุ่นและ pH ถูกนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพ ในแต่ละวิธีเพื่อประเมินความสามารถในการกำจัดความขุ่นหรือค่า pH ในน้ำก่อนและหลัง การทดลองสามารถคำนวณได้จาก ประสิทธิภาพ (%) = $\frac{[(\text{ก่อนทดลอง} - \text{หลังทดลอง}) / \text{ก่อนทดลอง}] \times 100$ (ปริยญา ไกรวุฒินันท์ และอัจฉรา โลราช, 2558) สำหรับชุดข้อมูลที่ได้

ในการทดลองถูกนำไปวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ตามแผนการทดลองสุ่มแบบสมบูรณ์ (CRD) ของแต่ละปัจจัยการทดลอง และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Fisher's least-significant difference (LSD) ด้วยโปรแกรม Statistix8 (Analysis software, Tallahassee, FL, USA, 1985-2003) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การทดลองกำจัดความขุ่นโดยการตกตะกอนทางเคมีของน้ำด้วยวิธีทดสอบการตกตะกอน (JAR Test) ซึ่งมีสารละลายสารส้ม (1% potassium alum) เป็นสารเคมีที่มีประจุบวกสูงเติมลงไปในปริมาตรต่างๆ คือ 0 (ชุดควบคุม), 10, 15, 20, 25 และ 30 mg/L ช่วยในกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (coagulation/flocculation) โดยให้ผลการหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนในน้ำใช้ชุมชน (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ผลการทดลองกำจัดความขุ่นในน้ำโดยการตกตะกอนด้วยสารละลายสารส้ม 1%

ความเข้มข้นสารส้ม 1% (mg/L)	Turbidity (NTU)	pH (-)	Turbidity removal efficiency (%)
0	499.33 $\pm$ 1.53 ^a	7.77 $\pm$ 0.06 ^a	-
10	473.33 $\pm$ 4.73 ^b	7.50 $\pm$ 0.10 ^b	5.21 $\pm$ 0.95 ^d
15	281.50 $\pm$ 4.50 ^c	7.13 $\pm$ 0.15 ^c	43.63 $\pm$ 0.90 ^c
20	13.11 $\pm$ 1.05 ^d	6.83 $\pm$ 0.06 ^d	97.38 $\pm$ 0.21 ^b
25	4.42 $\pm$ 0.24 ^e	6.53 $\pm$ 0.06 ^e	99.12 $\pm$ 0.05 ^a
30	4.27 $\pm$ 0.28 ^e	4.36 $\pm$ 0.20 ^f	99.13 $\pm$ 0.04 ^a
F-test	**	**	**
CV (%)	1.30	1.75	0.86

หมายเหตุ: ข้อมูลจากตารางเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=4) วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างความขุ่น (turbidity) ความเป็นด่าง (pH) และประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น (turbidity removal efficiency) ที่ระดับความเข้มข้นของสารส้มต่างๆ กับชุดควบคุมด้วยวิธี LSD ที่ $p \leq 0.05$, * และ $p \leq 0.01$, **

The figure consists of two side-by-side line graphs. Both graphs have '1% Potassium alum (mg/L)' on the x-axis, ranging from 0 to 40. The left graph's y-axis is 'Turbidity (NTU)', ranging from 0 to 600. It shows a blue line with circular markers representing Turbidity data points, which starts at approximately 500 NTU at 0 mg/L and drops sharply to near 0 NTU by 20 mg/L. A dotted blue line represents the linear regression, with the equation $y = -20.245x + 550.07$ and $R^2 = 0.8494$. The right graph's y-axis is 'pH', ranging from 0 to 10. It shows a blue line with circular markers representing pH data points, which starts at approximately 8.0 at 0 mg/L and decreases gradually to about 4.5 at 30 mg/L. A dotted blue line represents the linear regression, with the equation $y = -0.0954x + 8.2821$ and $R^2 = 0.7226$.

ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 (2565) ISSN 2287-0083 | Vol.10 Issue.2 (2022) ISSN 2287-0083

การทดลองกำจัดความขุ่นในน้ำใช้ของชุมชนด้วยการกรองอย่างง่าย (simple filtration) โดยการให้น้ำไหลผ่านชั้นถ่านคาร์บอน กรวดหยาบและทรายหยาบ และการตกตะกอนทางเคมีด้วยวิธี JAR Test ที่ใช้สารส้ม 1% ความเข้มข้น 25 mg/L ถูกนำมาพิจารณาทดลองร่วมกับการกรองอย่างง่าย โดยให้ผลการหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนในน้ำใช้ชุมชน (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ผลการทดลองกำจัดความขุ่นในน้ำโดยวิธีการตกตะกอนร่วมกับการกรอง

Treatments	Turbidity (NTU)	pH (-)	Turbidity removal efficiency (%)
น้ำตัวอย่างก่อนทดลอง	499.33 $\pm$ 1.53 ^a	7.77 $\pm$ 0.06 ^a	-
การตกตะกอนด้วยสารส้ม	4.42 $\pm$ 0.24 ^c	6.53 $\pm$ 0.06 ^c	99.12 $\pm$ 0.05 ^a
การกรองอย่างง่าย	6.87 $\pm$ 0.06 ^b	7.57 $\pm$ 0.10 ^b	98.62 $\pm$ 0.01 ^b
การตะกอนร่วมกับการกรอง	4.45 $\pm$ 0.12 ^c	7.42 $\pm$ 0.13 ^b	99.11 $\pm$ 0.03 ^a
F-test	**	**	**
CV (%)	0.60	1.42	0.04

หมายเหตุ: ข้อมูลจากตารางเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=4) วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างความขุ่น (turbidity) ความเป็นด่าง (pH) และประสิทธิภาพการลดค่าความขุ่น (turbidity removal efficiency) ในกรรมวิธีต่างๆ กับชุดควบคุมด้วยวิธี LSD ที่ $p \leq 0.05$, * และ $p \leq 0.01$, **

ตารางที่ 2 ผลการทดลองกำจัดความขุ่นในน้ำโดยวิธีการตกตะกอนร่วมกับการกรองพบว่า สามารถกำจัดความขุ่นในน้ำได้ไม่แตกต่างจากวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้ม แต่แตกต่างจากการกรองอย่างง่ายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ซึ่งการกรองอย่างง่ายสามารถกำจัดความขุ่นได้น้อยกว่า ในขณะที่ค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (pH=7.42) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้ม (pH=6.53) นอกจากนี้ วิธีการตกตะกอนร่วมกับการกรองมีประสิทธิภาพกำจัดความขุ่น (99.11%) มากกว่าการกรองอย่างง่าย (98.62%) อย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่แตกต่างจากวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้ม (99.12%) จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า วิธีการกรองอย่างง่ายช่วยเพิ่มค่า pH แต่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นยังน้อยกว่าวิธีการตกตะกอนด้วยสารส้มและวิธีการตกตะกอนร่วมกับการกรอง

ซึ่งวิธีการอย่างง่ายเป็นการที่น้ำดิบไหลผ่านวัสดุกรองชั้นถ่านไม้ กรวดและทรายหยาบมีผลต่อการเพิ่ม pH ของน้ำ เนื่องจากวัสดุกรองดังกล่าวมีค่า pH สูง จึงช่วยลดค่าความเป็นกรดของน้ำ โดยระบบน้ำประปาชุมชนส่วนใหญ่ใช้วิธีการตกตะกอนด้วยสารส้มที่ pH 5.0–5.5 เพื่อกำจัดสีในน้ำ และผ่านระบบกรองทรายที่ถูกปรับ pH เป็น 8.0–8.5 (บริษัท ชัยนริศกูเกิด เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด, 2561; Liang et al., 2006)

ผลการประเมินความขุ่นและ pH ของน้ำใช้ชุมชนพบว่า น้ำมีสีน้ำตาลอ่อน มีความขุ่นค่อนข้างสูง (Turbidity = 499.33 NTU) และเป็นด่างอ่อน (pH = 7.77) (รูปที่ 3) ซึ่งน้ำดังกล่าวถูกส่งมาจากระบบน้ำประปาหมู่บ้าน แสดงให้เห็นว่าระบบการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านไม่ได้มาตรฐาน และช่วงทดสอบเป็นฤดูฝนมีผลต่อน้ำดิบที่มีความขุ่นสูง ซึ่งฤดูฝนทำให้ความขุ่นในน้ำสูงกว่า 100 NTU ปริมาณสารอินทรีย์และสีในน้ำดิบสูง ซึ่งส่งผลต่อการใช้สารเคมีตกตะกอนมาก (ญาณิศา ดันติपालกุล และคณะ, 2561) รวมทั้งค่าความขุ่นไม่เป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาส่วนภูมิภาคตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลกที่กำหนดให้ค่าความขุ่นไม่เกิน 4 NTU และ pH 6.5 – 8.5 (WHO, 2011) เมื่อทดลองใช้ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนด้วยวิธี JAR Test ที่ความเข้มข้น 25 mg/L สามารถกำจัดความขุ่นได้ถึง 99.12% ซึ่งมีค่าความขุ่นหลงเหลือในน้ำเท่ากับ 4.42 NTU และยังลดค่า pH 1.24 ทำให้น้ำเป็นกรดอ่อน (pH = 6.53) (ตารางที่ 1) เนื่องจากสารส้มมีความเป็นกรดโดยมีค่า pH = 3.3 (อำไพ พงติวรพงษ์กุล และ สุภัทรา รังสิมาการ, 2563) และเมื่อพิจารณาถึงการตกตะกอนของสารส้มที่สามารถกำจัดความขุ่นของน้ำให้ได้ตามค่ามาตรฐานน้ำประปาส่วนภูมิภาคตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลกที่ความขุ่นของน้ำ ไม่เกิน 4 NTU และ pH 6.5 – 8.5 (WHO, 2011) พบว่าความเข้มข้นของสารส้มที่ใช้ในการทดสอบยังไม่สามารถลดความขุ่นของน้ำได้ต่ำกว่า 4 NTU ซึ่งเกิดเนื่องจากว่าเมื่อเติมสารส้มลงไปค่า pH หลังการตกตะกอนจะลดลงเป็น 5.5 ซึ่งสารส้มจะสามารถกำจัดความขุ่นได้ดีในช่วง pH เหมาะสม คืออยู่ในช่วง 6.0 – 7.5 (วิวัฒน์ อ่อนนาคกล้า, 2563; AWWA, 2005; Twort, 2011) จึงส่งผลทำให้ความเข้มข้นสารส้มที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ไม่สามารถกำจัดความขุ่นให้ต่ำกว่า 4 NTU ตามมาตรฐานค่ามาตรฐานน้ำประปาส่วนภูมิภาคตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลกได้ ดังนั้นเห็นได้ว่า การที่สารส้มจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณของความขุ่นตั้งต้นของน้ำ โดยความขุ่นเริ่มต้นที่สูงขึ้นจะทำให้สารส้มมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของน้ำได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณของแข็ง

แขวนลอยที่เพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้มีโอกาสน้ำที่อนุภาคจะรวมตัวกันเพิ่มสูงขึ้นด้วย (ญาณิศา ตันติपालกุล และคณะ, 2561; มั่นสิน ตันทุลเวศน์, 2542) นอกจากนี้ คุณลักษณะของน้ำ เช่น pH ความเป็นด่าง (alkalinity) และปริมาณของสารตกตะกอนที่ใช้อย่างคงเป็นปัจจัยสำคัญ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของน้ำ อย่างไรก็ตามข้อมูลความเข้มข้นของ สารส้มที่เหมาะสมในการสร้างตะกอนด้วยวิธี JAR Test ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถ นำไปปรับใช้ในการผลิตประปาของหมู่บ้านเพื่อให้ น้ำประปามีคุณภาพและช่วยลดต้นทุน การผลิต หรือสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดความขุ่นของน้ำประปาหรือน้ำดิบจาก แหล่งอื่นๆ เพื่อให้ น้ำมีคุณภาพที่เหมาะสมในการใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 3 ลักษณะของน้ำใช้ชุมชน (ตัวอย่างน้ำทดลอง)

สำหรับวิธีการกรองน้ำอย่างง่าย (Simple filtration) สามารถลดค่าความขุ่น และ pH ได้น้อยกว่าการตกตะกอนด้วยสารส้ม เนื่องจากชุดกรองที่จัดทำขึ้นประกอบด้วยถ่าน คาร์บอน กรวดและทรายหยาบ ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นด่าง โดยมีค่า pH ของถ่าน อยู่ระหว่าง 7.1–10.5 (Inyang et al., 2010; Lehmann et al., 2011) สามารถช่วยปรับ สภาพ pH ของน้ำที่เป็นกรดอ่อนให้เป็นกลางแล้วยังช่วยลดกลิ่นของน้ำภายหลังผ่านชั้นกรอง ซึ่งเห็นได้จากการลดความขุ่นและเพิ่มค่า pH ของน้ำโดยใช้วิธีการตกตะกอนด้วยสารส้ม ร่วมกับการกรองอย่างง่ายทำให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 2) และลดความเสี่ยงอันตรายต่อสุขภาพจากการสัมผัสสารส้มที่มีความเข้มข้นมากเกินไปในน้ำใช้ เช่น เกิดการระคายเคืองผิวหนังและมีผลต่อระบบประสาท (กองควบคุมคุณภาพน้ำ การ ประปาส่วนภูมิภาค, 2558; Berman, 1980; Arena, 1974) เมื่อสัมผัสน้ำที่เป็นกรดจาก กระบวนการตกตะกอนทางเคมีเพียงอย่างเดียว ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อค่า pH ของน้ำ ต่ำกว่า 4

ทำให้สารสัมผัสตัวให้อะลูมิเนียมออกไซด์และเป็นพิษ (toxicity) ต่อสิ่งมีชีวิตได้ จึงควรรักษา pH ให้อยู่ระหว่าง 6-7 เพื่อกำจัดความขุ่นได้สูงสุดและป้องกันความเป็นพิษ (รพีพรรณ ยงยอด และวรางคณา สังสิทธิ์สวัสดิ์, 2550; นุชา สถิตพงษ์, 2561) แต่อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้วิธีการกำจัดความขุ่นในน้ำที่เหมาะสมกับชุมชน นอกจากจะพิจารณาปัจจัยการใช้สารเคมี และ pH ร่วมกับประสิทธิภาพการลดความขุ่นแล้ว ควรเติมคลอรีนตามวิธีการเติมคลอรีนเพื่อให้มั่นใจว่า น้ำที่ผ่านกรรมวิธีกำจัดความขุ่นดังกล่าวปราศจากเชื้อโรคจริงๆ ก่อนใช้ประโยชน์ต่อไป โดยภายหลังจากการเติมสารละลายคลอรีนไปแล้ว 30 นาที ต้องสามารถวัดปริมาณคลอรีนอิสระได้ระหว่าง 0.2-0.5 mg/L จึงจะสามารถป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อโรคได้ (WHO, 2008)

สรุปผลการวิจัย

ปัญหาของน้ำใช้ในชุมชนชนบทในช่วงฤดูฝนมีสภาพเป็นด่างอ่อน สีน้ำตาลอ่อนและความขุ่นค่อนข้างสูง ซึ่งในการจัดการความขุ่นและ pH ของน้ำเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ระดับครัวเรือนโดยใช้วิธีการตกตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับการกรองอย่างง่ายมีประสิทธิภาพกำจัดความขุ่นได้ถึง 99.11% ซึ่งไม่แตกต่างจากการตกตะกอนด้วยสารส้มเพียงอย่างเดียว (25 mg/L ของ 1% potassium alum) และคุณสมบัติของน้ำ (pH 4.53) อยู่ในช่วงคุณสมบัติน้ำเป็นกลาง (pH 6.6-7.3) ของน้ำใกล้เคียง ในขณะที่วิธีการกรองอย่างง่าย (ถ่านไม้ กรวดและทรายหยาบ) มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้น้อยกว่าวิธีอื่นๆ แต่ค่า pH ไม่แตกต่างจากวิธีการตกตะกอนร่วมกับการกรอง ดังนั้น วิธีกำจัดความขุ่นในน้ำใช้ที่เหมาะสมในครัวเรือนชนบทมากที่สุดคือ การตกตะกอนด้วยสารส้มร่วมกับการกรองอย่างง่าย เนื่องจากค่าความขุ่นและ pH ของน้ำเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาส่วนภูมิภาค และลดการระคายเคืองต่อสุขภาพจากการใช้น้ำที่ไม่เหมาะสม รวมทั้ง ได้ทดสอบการสร้างตะกอนด้วยวิธี JAR Test และวัสดุชุดกรองอย่างง่ายสามารถหาได้ในท้องถิ่น แต่อย่างไรก็ตาม ไม่ควรใช้น้ำที่ผ่านวิธีทดลองดังกล่าวไปอุปโภคโดยไม่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคก่อน โดยวิธีการต้มหรือเติมคลอรีนตามวิธีการเติมคลอรีน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการต่อยอดยกระดับคุณภาพการศึกษาแบบองค์รวมด้วยกระบวนการชุมชนเรียนรู้ทางวิชาชีพ PLC และโครงการนวัตกรรมเชิงบูรณาการจาก Productive Learning ต่อยอดราชวิชาสู่การนำไปใช้จริง มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี

เอกสารอ้างอิง

- กัมปนาท พลอามาตย์. (2544). *การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบในสภาวะที่มีแบคทีเรียเกินมาตรฐานสำหรับกระบวนการทรายกรองช้า*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี).
- กรมอนามัย. (2563). *คู่มือแนวทางการจัดการคุณภาพน้ำบริโภคโรงเรียนในถิ่นทุรกันดาร*. นนทบุรี, กระทรวงสาธารณสุข.
- กองควบคุมคุณภาพน้ำ การประปาส่วนภูมิภาค. (2558). *เอกสารข้อมูลความปลอดภัย (MSDS): สารส้ม*. สืบค้นเมื่อ 16 เมษายน 2564, จาก <http://wqc-portal.pwa.co.th/attachment/topic/30/MSDS-Alum2.pdf>.
- กองควบคุมคุณภาพน้ำ. (2544). *เอกสารประกอบการฝึกอบรมเรื่อง คุณภาพน้ำและการวิเคราะห์*. การประปาส่วนภูมิภาค, กรุงเทพฯ.
- การประปาส่วนภูมิภาค สาขาวัฒนานคร. (2560). *คู่มือปฏิบัติงาน: การทดลองจาร์เทสต์*. สระแก้ว, การประปาส่วนภูมิภาคเขต 1 รหัสเอกสาร WI-VT1-CF-01. 12 หน้า.
- การประปานครหลวง. (2560). *ข้อมูลการใช้ น้ำ*. สืบค้นเมื่อ 11 ธันวาคม 2564, จาก https://www.mwa.co.th/ewt_news.php?nid=1913.
- เกสรินทร์ วรเดชวิทยา. (2552). *การกำจัดความขุ่นและสาหร่ายออกจากน้ำโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).
- เชษฐพันธ์ กากแก้ว. (2542). *ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดิน*. *วารสารส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม*, 22(3), ไม่ปรากฏเลขหน้า.

- ญาณิศา ตันติपालกุล, คุณัช ปาลวัฒน์วิไชย, ชิดารัตน์ เดชฉกรรจ์ และ เจมจิรา ไชยสาร. (2561). การศึกษาสารตะกอนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปาการประปานครหลวง. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 23(1), 207–220.
- दनัย रिवंदन. (2562). *ข่าวในรั้ว สธ.* สืบค้นเมื่อ 18 เมษายน 2564, จาก <https://pr.moph.go.th/?url=pr/detail/2/02/124631>.
- นุชา สติพงษ์. (2561). การลดความขุ่นของน้ำโดยใช้สารเคมีร่วมกับการปลูกบัวสายกรณีศึกษา: แหล่งน้ำปิดในมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต. *สิทธิปริทัศน์*, 32(104), 68–82.
- น้ำฝน เป้าทองคำ และ ดำรัสวิทย์ ปทุมมาศ. (2562). การจัดการเรียนการสอนตามแนวคิดการมีส่วนร่วมของประชาชนในสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อแก้ปัญหา น้ำประปา ชุมชนสะเตียง จังหวัดเพชรบูรณ์. *วารสารวิจัยเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่*, 11(3), 234–249.
- บริษัท ชัยนิรศุกเกิด เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด. (2562). ระบบ Reverse Osmosis (RO). สืบค้นเมื่อ 3 สิงหาคม 2565, จาก <https://chainaris.co.th>.
- ปริญญ์ ไกรภูณันท์ และ อัจฉรา โลราช. (2558). ประสิทธิภาพวัสดุตัวกลางในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไปรารอง. *วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 43(2), 260–266.
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. (2545). *กระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) และฟล็อกกูเลชัน (Flocculation)*. สืบค้นเมื่อ 18 เมษายน 2564, จาก https://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=441.
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. (2553). *การแก้ไขปัญหา: คุณภาพน้ำในการผลิตน้ำประปา*. สืบค้นเมื่อ 11 ธันวาคม 2564, จาก https://www.mwa.co.th/download/prd01/water_technology/pdf_water_treatment_plant/wtp_problem.pdf.
- มันสิน ตัญกุลเวศน์. (2542). *วิศวกรรมการประปา*. กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รพีพรรณ ยงยอด และ วรางคณา สังสิทธิ์สวัสดิ์. (2550). การลดความขุ่นในน้ำโดยใช้ผงกระดองปูดำ (*Scylla olivacea*) เป็นสารช่วยสร้างตะกอนร่วมกับสารส้ม. *วารสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น ฉบับบัณฑิตศึกษา*, 7(3), 98–106.

- วิวัฒน์ อ่อนนาคคล้า. (2563). ผลร่วมของการเติมคลอรีนแบบขั้นต้นและสารตกตะกอนต่อการกำจัดความขุ่นของกระบวนการตกตะกอนในระบบผลิตน้ำประปา โดยถังตกตะกอนชนิดขึ้นกรอง. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.*, 13(2), 124–132.
- วีระพล พูลสวัสดิ์ และ ธัญลักษณ์ ราษฎร์ภักดี. (2562). ปริมาณสารลัมที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดความขุ่นสูงในน้ำของระบบน้ำประปา. น. 98–104. ในงานประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ, ครั้งที่ 20 มหาวิทยาลัยขอนแก่น, วันที่ 15 มีนาคม 2562. ขอนแก่น.
- ศวิตา รัตนะ, เสน่ เฟ่งบุญ, สุนทร สุบรรณ, วิทวัส พิสิฐจำนง และ วารินทร์ สมานธารณ์. (2545). การพัฒนาเครื่องกรองน้ำโดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. น. 200–204. ใน: การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 40 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์สาขาการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม, วันที่ 4–7 กุมภาพันธ์ 2545. กรุงเทพฯ.
- อมรรัตน์ วงษ์กลม และ ถนัด ธนะฉัตรชัยรัตนะ. (2561). การกำจัดความขุ่นและสารคาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายน้ำด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน กรณีศึกษาระบบการผลิตน้ำประปา ตำบลทรายมูล อำเภอพิบูลมังสาหาร จังหวัดอุบลราชธานี. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 23(2), 1188–1198.
- อำไพ พุดิทรพงษ์กุล และ สุภัทรา รังสีมาการ. (2563). การศึกษาคุณภาพยาสารสัมผัส. *วารสารแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก*, 18(3), 573–582.
- Arena, J. M. (1974). *Poisoning: Toxicology, Symptoms, Treatment*. 3rd edition. Thomas Springfield: Illinois.
- AWWA (American Water Works Association)/ASCE (American Society of Civil Engineer). (2005). *Water treatment plant design*. 4th edition. New York: McGRAW-Hill.
- Berman, E. (1980). *Toxic metals and their analysis*. Chicago, Heyden & Son, Ltd.
- Inyang, M., Gao, B., Pullammanappallil, P., Ding, W., & Zimmerman, A. R. (2010). Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, 101(22), 8868–8872.

- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar affects on soil biota-a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812–1836.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Grossman, L., O'Neill, B., Skjemstad, J. O., Thies, J., Luizao F. J., Petersen, J. & Neves, E. G. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719–1730.
- Mahvi, A. H., Sheikhi, R. & Naddafi, K. (2003). Total coliforms and turbidity removal of water in the continuous sand filter. *Iran journal public health*, 32(3), 7-13.
- Qureshi, N. & Malmberg, R. H. (1985). Reducing aluminum residuals in finished water. *Journal - American Water Works Association*, 77(10), 101–108.
- Twort, A. C., Ratnayaka, D. D., & Brandt, M. J. (2011). *Water supply*. 5th edition. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- WHO. (2008). Centers for disease control and prevention. de Benoist, B., McLean, E., Egli, I., Cogswell, M., eds. *Worldwide prevalence of anemia 1993–2005*. Geneva: World Health Organization.
- WHO. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. 4th edition. Geneva: World Health Organization.