การศึกษาสารตกตะกอนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปา การประปานครหลวง

The Study of Optimal Coagulants for Water Treatment Process of Metropolitan Waterworks Authority

ญาณิศา ตันติปาลกุล[1*] คุณัช ปาลวัฒน์วิไชย[2] ธิดารัตน์ เดชฉกรรจ์[1] และ เจมจิรา ไขสาร[1]

Yanisa Tantipalakul[1*], Kunut Palawatwichai[2], Tidarat Detchakan[1] and Jamjira Khaisan[1]

[1]สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

[2]ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง

[1]Department of Industrial Chemistry, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

[2]Water Quality Analysis Section, Bangkhen Water Treatment Plant, Metropolitan Waterworks Authority

Received : 26 October 2017

Accepted : 15 January 2018

Published online : 23 January 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสารตกตะกอนที่เหมาะสมกับสำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปา ในช่วงน้ำดิบความขุ่นต่ำ (10 – 30 เอ็นทียู) ความขุ่นปกติ (30 – 50 เอ็นทียู) และความขุ่นสูง (100 – 120 เอ็นทียู) โดยใช้สารส้ม พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตเป็นสารตกตะกอนในการผลิตน้ำประปาด้วยวิธีจาร์เทสต์ และทำการปรับค่าความเป็นด่างของน้ำดิบเท่ากับ 10 60 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า สารตกตะกอนทั้ง 4 ชนิดสามารถกำจัดความขุ่นของน้ำดิบให้ต่ำกว่า 4 เอ็นทียู ตามมาตรฐานการประปานครหลวงได้ โดยเมื่อความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 10 – 30 เอ็นทียู สารตกตะกอนที่เหมาะสมคือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวที่ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่างน้ำดิบเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 83.02 ค่าใช้จ่ายเท่ากับ 0.096 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 30 – 50 เอ็นทียู สารตกตะกอนที่เหมาะสมคือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูงที่ความเข้มข้น 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่าง 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 92.16 ค่าใช้จ่ายเท่ากับ 0.137 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 120 – 150 เอ็นทียู สารตกตะกอนที่เหมาะสมคือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่าง 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 97.04 ค่าใช้จ่ายเท่ากับ 0.240 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

คำสำคัญ : สารตกตะกอน ความขุ่น กระบวนการผลิตน้ำประปา

***Corresponding author. E-mail** : g.yanisa@hotmail.com

Abstract

This research was conducted to investigate the optimal coagulants for water treatment process in raw water with low turbidity (10 – 30 NTU), normal turbidity (30 – 50 NTU) and high turbidity (120 – 150 NTU) using alum, polyaluminium chloride (PACl), polyaluminium chloride high basicity (PACl HB) and aluminium chlorohydrate (ACH) as coagulants with jar test method. Variation of alkalinity of raw water were 10, 60 and 100 mg/L as $CaCO_3$. It was found that all coagulants could remove turbidity from raw water below 4 NTU to meet water quality standards of Metropolitan Waterworks Authority. At 10 – 30 NTU of raw water turbidity, the optimal coagulant was 8 mg/L of polyaluminium chloride with alkalinity 100 mg/L as $CaCO_3$. The turbidity removal efficiency was 83.02%. The cost of coagulant was 0.096 bath/cubic meter. At 30 – 50 NTU of raw water turbidity, the optimal coagulant was 6 mg/L of polyaluminium chloride high basicity with alkalinity 100 mg/L as $CaCO_3$. The turbidity removal efficiency was 92.16%. The cost of coagulant was 0.137 bath/cubic meter. At 120 – 150 NTU of raw water turbidity, the optimal coagulant was 20 mg/L of polyaluminium chloride with alkalinity 100 mg/L as $CaCO_3$. The turbidity removal efficiency was 97.04%. The cost of coagulant was 0.240 bath/cubic meter.

Keywords : coagulant, turbidity, water treatment process

บทนำ

น้ำสะอาดเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิต มนุษย์มีความต้องการใช้น้ำเพื่ออุปโภคและบริโภค 180 – 200 ลิตรต่อคนต่อวัน สำหรับชุมชนในเขตเมือง (Ministry of Natural Resource and Environment, 2012) ดังนั้นระบบประปาจึงมีความสำคัญต่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาให้ได้ตามมาตรฐานเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำ โดยกระบวนการผลิตน้ำประปาขึ้นอยู่กับคุณภาพแหล่งน้ำเป็นสำคัญ แหล่งน้ำผิวดินเป็นแหล่งน้ำส่วนใหญ่ที่ใช้ผลิตน้ำประปา เนื่องจากมีปริมาณเพียงพอต่อการผลิต ซึ่งปัญหาของแหล่งน้ำผิวดินที่พบ ได้แก่ การปนเปื้อนของน้ำที่มาจากสภาพพื้นที่หรือผลจากฤดูกาล ส่งผลให้คุณภาพน้ำมีการเปลี่ยนแปลง เช่น ความขุ่นของน้ำ องค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำ เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงมีผลกระทบโดยตรงกับกระบวนการผลิตน้ำประปา ได้แก่ ปริมาณสารตกตะกอนที่ใช้ การใช้สารเคมีเพื่อปรับสภาพความเป็นกรดหรือด่างของน้ำดิบและน้ำประปา ปริมาณการใช้คลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อ เป็นต้น (Yupaporn *et al.*, 2011)

แหล่งน้ำผิวดินในการผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวงใช้น้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นหลัก ความขุ่นปกติอยู่ในช่วง 30 – 50 เอ็นทียู (NTU, Nephelometric Turbidity Units) สภาพปัญหาสามารถแบ่งออกได้ตามฤดูกาล คือ ช่วงฤดูหนาวและฤดูร้อน น้ำดิบมีความขุ่นต่ำ (10 – 30 เอ็นทียู) ส่งผลให้ปริมาณสาหร่ายในน้ำดิบสูง ซึ่งสาหร่ายบางชนิดสามารถอุดตันบ่อกรองได้ ส่วนฤดูฝนพบน้ำดิบมีความขุ่นสูง (มากกว่า 100 เอ็นทียู) ปริมาณสารอินทรีย์และสีในน้ำดิบสูง ส่งผลให้ต้องใช้สารตกตะกอนปริมาณมาก และจำเป็นต้องใช้สารเคมีในการปรับพีเอช (pH) ของน้ำ โรงงานผลิตน้ำบางเขนใช้ถังตกตะกอนสัมผัส (solid contact clarifier) ประเภทหมุนเวียนตะกอน (sludge recirculation) ที่มีการใช้งานมากกว่า 37 ปี (เปิดดำเนินการปี พ.ศ. 2522) ข้อจำกัดของถังตกตะกอนนี้คือ ไม่เหมาะกับน้ำดิบความขุ่นสูงมากกว่า 70 เอ็นทียู และเนื่องจากโรงงานผลิตน้ำบางเขนต้องผลิตน้ำวันละ 4,400,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 60 ของกำลังผลิตทั้งหมดของ

การประปานครหลวง (Metropolitan Waterworks Authority, 2017) การปรับปรุงกระบวนการผลิตที่จำเป็นต้องหยุดกระบวนการผลิตไม่สามารถทำได้ ดังนั้น การแก้ปัญหาโดยการหาสารตกตะกอนที่มีความเหมาะสมกับน้ำดิบแต่ละช่วงความขุ่นจึงมีความเหมาะสมมากกว่า ซึ่งการผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวงในปัจจุบันใช้กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (coagulation-flocculation) และใช้สารส้ม (aluminium sulphate, alum, $Al_2(SO_4)_3$) เป็นสารตกตะกอนหลัก ข้อจำกัดของสารส้ม คือ มีสภาพเป็นกรด ทำให้พีเอชและค่าความเป็นด่างของน้ำในระบบผลิตและน้ำประปาต่ำลง แต่องค์การอนามัยโลก (World Health Organization, 2011) กำหนดค่าพีเอชน้ำบริโภคต้องอยู่ระหว่าง 6.5 – 8.5 ส่งผลให้เมื่อน้ำดิบมีความขุ่นสูงมากจะไม่สามารถใช้สารส้มในปริมาณมากได้ เพราะทำให้พีเอชลดต่ำกว่า 6.5 รวมทั้งก่อให้เกิดการกัดกร่อนเส้นท่อส่งน้ำประปา (Metropolitan Waterworks Authority, 2017; Pornsak, 2010)

กระบวนการสร้างและรวมตะกอนเป็นการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์โดยใช้สารเคมี เพื่อทำการแยกอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำ สร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคและทำให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ และสามารถตกตะกอนได้เร็วขึ้น ช่วยกำจัดความขุ่นหรือสารแขวนลอยออกจากน้ำ ทำให้น้ำใสและมีลักษณะที่น่าใช้ (Munsin, 1989) โดยสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนมีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ สารส้ม (Kirsten *et al*., 2003) พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (polyaluminium chloride, PACl, $Al_2(OH)_3Cl_3$) (Ning *et al*., 2014) อะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (aluminium chlorohydrate, ACH, $Al_2(OH)_5Cl$) (Muhummad *et al*., 2016) เฟอร์ริคคลอไรด์ (ferric chloride, $FeCl_3$) (Jia *et al*., 2015) และเฟอร์ริคซัลเฟต (ferric sulphate, $Fe_2(SO_4)_3$) (Tak-Hyun *et al*., 2003) เป็นต้น แต่สารตกตะกอนที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำประปาควรเป็นสารที่หาง่าย ราคาถูก และไม่มีความเป็นพิษหลงเหลือในน้ำ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของสารตกตะกอนที่เป็นสารประกอบของอะลูมิเนียม ส่วนเฟอร์ริคคลอไรด์และเฟอร์ริคซัลเฟตเป็นสารที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนค่อนข้างสูง จึงทำให้ค่าพีเอชและค่าความเป็นด่าง (alkalinity) ของน้ำลดลง และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแล้วจะทำให้มีเหล็กหลงเหลืออยู่ในน้ำ (Ploypailin, 2013) ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้น้ำ จึงไม่เป็นที่นิยมใช้กำจัดความขุ่นในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำได้แตกต่างกัน การเลือกสารตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปาจึงต้องมีการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของสารแต่ละชนิด และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้างตะกอนจะสมบูรณ์ต้องอาศัยส่วนประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในน้ำที่สำคัญ ได้แก่ ค่าความเป็นด่างในน้ำ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอช เพื่อให้ปฏิกิริยาในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสารตกตะกอนที่เหมาะสมกับน้ำดิบในช่วงความขุ่นต่ำ (10 – 30 เอ็นทียู) ความขุ่นปกติ (30 – 50 เอ็นทียู) และความขุ่นสูง (100 – 120 เอ็นทียู) โดยใช้พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง (polyaluminium chloride high basicity, PACl HB, $Al_2(OH)_3Cl_3$) และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตเป็นสารตกตะกอนเปรียบเทียบกับสารส้ม รวมถึงศึกษาผลของค่าความเป็นด่างที่มีต่อประสิทธิภาพของสารตกตะกอนแต่ละชนิด และคำนวณค่าใช้จ่ายของสารตกตะกอนและต้นทุนการบำบัดน้ำ เพื่อรองรับสถานการณ์การผลิตของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง ซึ่งประโยชน์ที่จะได้รับคือน้ำประปามีคุณภาพ และลดค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำประปา

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สารเคมี

คุณลักษณะเฉพาะของสารตกตะกอนที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะเฉพาะของสารตกตะกอน

สารตกตะกอน	ร้อยละของ อะลูมิเนียมออกไซด์* ($\%Al_2O_3$)	ร้อยละของ ค่าเบสิกซิตี้* (%basicity)	ราคา (บาท/ตัน)	ผู้ผลิต
alum	6.7	-	4,800	บริษัท ท่าไทย จำกัด
PACl	10.90	61.90	12,000	บริษัท เหลียงเคมี อินเตอร์เนชั่นแนล
PACl HB	12.26	79.45	22,857	บริษัท ดรากอนอล จำกัด
ACH	12.73	70.45	39,474	บริษัท บรอมมา (ประเทศไทย) จำกัด

*ค่าจากใบรับรองผลการตรวจวิเคราะห์ (certificate of analysis, COA)

2. เครื่องมือ

เครื่องจาร์เทสต์ (jar test) ชนิดตั้งโต๊ะ 6 ใบพัด ยี่ห้อ PHIPPS & BIRD เครื่องวัดความขุ่น (turbidity meter) รุ่น 2100N ยี่ห้อ HACH เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น 3200P ยี่ห้อ Agilent Technologies และวิเคราะห์ค่าความเป็นด่างด้วยการไทเทรตตามวิธีวิเคราะห์ 2320B (Eaton & Franson, 2005)

3. วิธีวิจัย

3.1 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำดิบของสารตกตะกอนแต่ละชนิด

เก็บตัวอย่างน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยา แหล่งเดียวกับการประปานครหลวง เพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำเริ่มต้นและใช้สำหรับทดสอบกระบวนการสร้างและรวมตะกอนในห้องปฏิบัติการ (จาร์เทสต์) โดยใช้วิธีเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วง (grab sampling) ที่มีช่วงความขุ่นตั้งแต่ 10 – 30 30 – 50 และ 120 – 150 เอ็นทียู มาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ความขุ่น ค่าความเป็นด่าง และพีเอช จากนั้นนำมาปรับค่าความเป็นด่างด้วยปูนขาว (CaO) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ตวงน้ำดิบที่ผ่านการปรับค่าความเป็นด่าง 1,000 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร 6 ใบ เติมสารตกตะกอนที่ความเข้มข้นต่างๆ และทำการตกตะกอนด้วยเครื่องจาร์เทสต์ โดยจำลองสภาวะเดียวกับถังตกตะกอนของการประปานครหลวง คือ รอบที่ 1 ปั่นกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที รอบที่ 2 ปั่นกวนช้า 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที รอบที่ 3 ปั่นกวนช้า 20 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และรอบที่ 4 หยุดนิ่ง เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นดูดน้ำใสส่วนบนมาทำการวิเคราะห์ค่าความขุ่น ค่าความเป็นด่าง ค่าพีเอช และเลือกความเข้มข้นของสารตกตะกอนที่ทำให้น้ำมีความขุ่นต่ำกว่า 4 เอ็นทียู ตามมาตรฐานของการประปานครหลวง คำนวณหาค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ดังสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น} = \left(\frac{T_{in}-T_{out}}{T_{in}}\right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ T_{in} = ความขุ่นของน้ำดิบเริ่มต้น

T_{out} = ความขุ่นของน้ำใสที่ผ่านการตกตะกอน

ทำการศึกษาสารตกตะกอน 4 ชนิด ได้แก่ สารส้ม พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต ตามลำดับ ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

3.2 ศึกษาผลของค่าความเป็นด่างที่มีต่อประสิทธิภาพของสารตกตะกอนแต่ละชนิด

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำดิบของสารตกตะกอนแต่ละชนิด และทำการปรับค่าความเป็นด่างเป็น 10 60 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (mg/L as $CaCO_3$) ตามลำดับ ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

3.3 ศึกษาค่าใช้จ่ายของสารตกตะกอนและต้นทุนการบำบัดน้ำ

นำปริมาณสารตกตะกอนที่เหมาะสมที่ทำให้น้ำมีความขุ่นต่ำกว่า 4 เอ็นทียู ตามมาตรฐานของการประปานครหลวงมาคำนวณค่าใช้จ่ายของสารตกตะกอนที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา ดังสมการที่ (2) – (3) เพื่อเลือกสารตกตะกอนที่มีต้นทุนการบำบัดน้ำต่ำที่สุด

ค่าใช้จ่ายสารตกตะกอนหนึ่งหน่วย = (ปริมาณสารตกตะกอนที่เหมาะสม × ราคาสารตกตะกอน)/1,000,000 (2)

(บาทต่อลูกบาศก์เมตร) (มิลลิกรัมต่อลิตร) (บาทต่อตัน)

โดย 1,000,000 คือ ตัวแปลงหน่วย (unit conversion factor) สำหรับแปลงหน่วยมิลลิกรัมเป็นตันและลิตรเป็นลูกบาศก์เมตร

ต้นทุนการบำบัดน้ำหนึ่งหน่วย = ค่าใช้จ่ายสารตกตะกอนหนึ่งหน่วย + ค่าใช้จ่ายการปรับค่าความเป็นด่างหนึ่งหน่วย(3)

(บาทต่อลูกบาศก์เมตร) (บาทต่อลูกบาศก์เมตร) (บาทต่อลูกบาศก์เมตร)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำดิบของสารตกตะกอนแต่ละชนิด

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำดิบของสารตกตะกอนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ สารส้ม พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต พบว่า ช่วงความขุ่นต่ำ (10 – 30 เอ็นทียู) (ตารางที่ 2) สารตกตะกอนทั้ง 4 ชนิด สามารถกำจัดความขุ่นของน้ำดิบได้ต่ำกว่า 4 เอ็นทียูตามมาตรฐานการประปานครหลวง โดยสารส้ม พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 73.87 – 82.03 69.38 – 83.02 73.02 – 81.76 และ 67.39 – 85.66 ตามลำดับ และเนื่องจากสารตกตะกอนที่จะนำมาใช้ในกระบวนการกำจัดความขุ่นของระบบผลิตน้ำประปาจะต้องเป็นสารตกตะกอนที่มีต้นทุนการบำบัดน้ำต่ำที่สุด (Kunut, 2017) ดังนั้น เมื่อน้ำดิบมีความขุ่น 10 – 30 เอ็นทียู

สารตกตะกอนที่เหมาะสมคือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวที่ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่างน้ำดิบเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายเพียง 0.096 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพ ความเข้มข้นที่เหมาะสม คุณภาพน้ำก่อนและหลังการกำจัดความขุ่น และค่าใช้จ่ายของสารตกตะกอนแต่ละชนิดที่ช่วงความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 10 – 30 เอ็นทียู

ชนิดของสารตกตะกอน	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (ร้อยละ)	ความเข้มข้นที่เหมาะสม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความขุ่น (เอ็นทียู)		ความเป็นด่าง (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)		พีเอช		ค่าใช้จ่ายสารตกตะกอน (บาทต่อ ลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการปรับความเป็นด่างน้ำดิบ (บาทต่อ ลบ.ม.)
			เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย		
alum	80.63	20	14.30	2.77	10.0	4.6	5.50	5.18	0.096	0.996
PACl	69.38	18	13.00	3.98	10.0	5.0	5.50	5.31	0.216	1.116
PACl HB	76.64	12	14.30	3.34	10.0	6.0	5.50	5.32	0.274	1.174
ACH	80.70	8	14.30	2.76	10.0	8.0	5.50	5.38	0.316	1.216
alum	73.87	15	11.90	3.11	60.0	55.0	7.12	6.89	0.072	0.472
PACl	71.51	8	10.60	3.02	60.0	57.0	7.12	6.91	0.096	0.496
PACl HB	73.02	8	10.60	2.86	60.0	57.3	7.12	6.92	0.183	0.583
ACH	67.39	6	11.90	3.88	60.0	58.0	7.12	7.02	0.237	0.637
alum	82.03	25	18.70	3.36	100.0	92.6	7.86	7.45	0.120	0.120
PACl	83.02	8	15.90	2.70	100.0	95.2	7.86	7.66	0.096	0.096
PACl HB	81.76	6	18.70	3.41	100.0	97.2	7.86	7.74	0.137	0.137
ACH	85.66	6	15.90	2.28	100.0	98.0	7.86	7.79	0.237	0.237

หมายเหตุ : ข้อมูลคุณภาพน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง พ.ศ. 2559 (Bangkhen Water Treatment Plant, 2016) พบว่าความเป็นด่างของน้ำดิบมีค่าเฉลี่ย 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้น ที่น้ำดิบมีความเป็นด่าง 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต จึงไม่มีค่าใช้จ่ายการปรับค่าความเป็นด่าง

ช่วงความขุ่นน้ำดิบปกติ (30 – 50 เอ็นทียู) (ตารางที่ 3) ผลการศึกษาพบว่า สารตกตะกอนทั้ง 4 ชนิด สามารถกำจัดความขุ่นได้ต่ำกว่า 4 เอ็นทียูตามมาตรฐานการประปานครหลวง โดยสารส้ม พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 87.46 – 92.19 90.60 – 92.65 92.03 – 92.44 และ 90.89 – 92.99 ตามลำดับ ยกเว้น ที่ค่าความเป็นด่างน้ำดิบเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อเติมสารส้มลงไป ค่าพีเอชของน้ำหลังการตกตะกอนมีค่าต่ำกว่า 5.5 ซึ่งสารส้มสามารถกำจัดความขุ่นได้ดีในช่วงพีเอช 6 – 7 (Munsin, 1989; Hongxiao *et al*., 2015; Muhummad *et al*., 2016) ส่งผลให้สารส้มไม่สามารถกำจัดความขุ่นให้ต่ำกว่า 4 เอ็นทียู ตามมาตรฐานการประปานครหลวงได้ และเนื่องจากสารตกตะกอนที่จะ

นำมาใช้ในกระบวนการกำจัดความขุ่นของระบบผลิตน้ำประปาจะต้องเป็นสารตกตะกอนจะต้องมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ทำให้น้ำหลังผ่านการตกตะกอนมีความขุ่นต่ำกว่า 4 เอ็นทียู ตามมาตรฐานของการประปานครหลวง และมีต้นทุนการบำบัดน้ำต่ำที่สุด ดังนั้น เมื่อน้ำดิบมี ความขุ่น 30 – 50 เอ็นทียู สารตกตะกอนที่เหมาะสมคือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูงที่ความเข้มข้น 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่างน้ำดิบเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายเพียง 0.137 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพ ความเข้มข้นที่เหมาะสม คุณภาพน้ำก่อนและหลังการกำจัดความขุ่น และค่าใช้จ่ายของสารตกตะกอนแต่ละชนิด ที่ช่วงความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 30 – 50 เอ็นทียู

ชนิดของสารตกตะกอน	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (ร้อยละ)	ความเข้มข้นที่เหมาะสม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความขุ่น (เอ็นทียู)		ความเป็นด่าง (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)		พีเอช		ค่าใช้จ่ายสารตกตะกอน (บาทต่อลบ.ม.)	ค่าใช้จ่ายในการปรับค่าความเป็นด่าง (บาทต่อลบ.ม.)
			เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย		
alum	87.46	45	41.80	5.24	10.0	N.A.	5.75	4.23	-	-
PACl	90.60	42	41.80	3.93	10.0	1.2	5.75	5.03	0.504	1.404
PACl HB	92.03	22	40.80	3.25	10.0	4.2	5.75	5.41	0.503	1.403
ACH	90.89	14	41.80	3.81	10.0	5.6	5.75	5.48	0.553	1.453
alum	93.79	50	49.90	3.10	60.0	41.8	7.12	6.48	0.240	0.640
PACl	94.69	20	49.90	2.65	60.0	52.0	7.12	6.69	0.240	0.640
PACl HB	92.44	14	43.00	3.25	60.0	55.0	7.12	6.90	0.320	0.720
ACH	92.99	10	49.90	3.50	60.0	56.0	7.12	6.96	0.395	0.795
alum	92.19	45	43.00	3.36	100.0	75.0	7.86	6.82	0.216	0.216
PACl	92.65	14	43.00	3.16	100.0	83.4	7.86	7.34	0.168	0.168
PACl HB	92.16	6	43.00	3.37	100.0	83.6	7.86	7.46	0.137	0.137
ACH	92.93	10	43.00	3.04	100.0	87.8	7.86	7.59	0.395	0.395

หมายเหตุ: N.A. หมายถึง not available (ไม่สามารถวัดค่าได้), (-) หมายถึง สารตกตะกอนไม่สามารถกำจัดความขุ่นให้ต่ำกว่า 4 เอ็นทียู ตามมาตรฐานการประปานครหลวง จึงไม่นำมาพิจารณา, จากข้อมูลคุณภาพน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง พ.ศ. 2559 (Bangkhen Water Treatment Plant, 2016) พบว่า ความเป็นด่างของน้ำดิบมีค่าเฉลี่ย 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้น ที่น้ำดิบมีความเป็นด่าง 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต จึงไม่มีค่าใช้จ่ายการปรับค่าความเป็นด่าง

ช่วงความขุ่นน้ำดิบสูง (120-150 เอ็นทียู) (ตารางที่ 4) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเป็นด่างน้ำดิบเท่ากับ 10 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต มีเพียงอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตเท่านั้นที่สามารถกำจัดความขุ่นได้ต่ำกว่า 4 เอ็นทียู ตามมาตรฐานการประปานครหลวง โดยประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 96.83 และ 97.36 ตามลำดับ เนื่องจากน้ำที่มีความขุ่นสูงแต่มีความเป็นด่างต่ำ ความเป็นด่างซึ่งเป็นบัฟเฟอร์หรือตัวต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชมีไม่เพียงพอ

เมื่อเติมสารตกตะกอนลงไปจำนวนมากค่าพีเอชจะลดลงต่ำกว่าช่วงที่สารตกตะกอนสามารถกำจัดความขุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อมีการเพิ่มสารตกตะกอนต่อไปอีกจึงเกิดการคืนกลับของเสถียรภาพคอลลอยด์ทำให้ความขุ่นเพิ่มขึ้น (Munsin, 1989; Katesarin, 2009; Sawitri, 2009) แต่ที่ความเป็นด่างน้ำดิบเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต สารตกตะกอนทั้ง 4 ชนิด สามารถกำจัดความขุ่นได้ต่ำกว่า 4 เอ็นทียู ตามมาตรฐานการประปานครหลวง โดยสารส้ม พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 97.34 97.04 96.95 และ 97.52 ตามลำดับ และเนื่องจากสารตกตะกอนที่จะนำมาใช้ในกระบวนการกำจัดความขุ่นของระบบผลิตน้ำประปาจะต้องเป็นสารตกตะกอนที่มีต้นทุนการบำบัดน้ำต่ำที่สุด ดังนั้น เมื่อน้ำดิบมีความขุ่น 120 – 150 เอ็นทียู สารตกตะกอนที่เหมาะสมคือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่างน้ำดิบเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายเพียง 0.240 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพ ความเข้มข้นที่เหมาะสม คุณภาพน้ำก่อนและหลังการกำจัดความขุ่น และค่าใช้จ่ายของสารตกตะกอนแต่ละชนิด ที่ช่วงความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 120 – 150 เอ็นทียู

ชนิดของสารตกตะกอน	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (ร้อยละ)	ความเข้มข้นที่เหมาะสม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความขุ่น (เอ็นทียู)		ความเป็นด่าง (มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต)		พีเอช		ค่าใช้จ่ายสารตกตะกอน (บาทต่อหน่วย)	น้ำดิบน้ำบาดาลในพื้นที่ (บาทต่อหน่วย)
			เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย		
alum	94.37	55	123.00	6.93	10.0	N.A.	5.83	4.71	-	-
PACl	92.59	30	123.00	9.11	10.0	2.0	5.83	5.01	-	-
PACl HB	95.76	30	123.00	5.21	10.0	2.4	5.83	5.11	-	-
ACH	96.83	14	123.00	3.90	10.0	7.2	5.83	5.42	0.553	1.453
alum	96.40	55	129.00	4.65	60.0	42.0	7.15	6.39	-	-
PACl	95.64	20	137.00	5.98	60.0	44.8	7.15	6.60	-	-
PACl HB	96.86	18	150.00	4.71	60.0	49.0	7.15	6.62	-	-
ACH	97.36	14	137.00	3.62	60.0	56.4	7.15	6.93	0.553	0.953
alum	97.34	70	129.00	3.43	100.0	68.0	7.93	6.55	0.336	0.336
PACl	97.04	20	129.00	3.82	100.0	85.2	7.93	7.18	0.240	0.240
PACl HB	96.95	24	129.00	3.94	100.0	87.0	7.93	7.40	0.549	0.549
ACH	97.52	12	129.00	3.20	100.0	89.2	7.93	7.53	0.474	0.474

หมายเหตุ : N.A. หมายถึง not available (ไม่สามารถวัดค่าได้), (-) หมายถึง สารตกตะกอนไม่สามารถกำจัดความขุ่นให้ต่ำกว่า 4 เอ็นทียู ตามมาตรฐานการประปานครหลวง จึงไม่นำมาพิจารณา, จากข้อมูลคุณภาพน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง พ.ศ. 2559 (Bangkhen Water Treatment Plant, 2016) พบว่า ความเป็นด่างของน้ำดิบมีค่าเฉลี่ย 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้น ที่น้ำดิบมีความเป็นด่าง 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต จึงไม่มีค่าใช้จ่ายการปรับค่าความเป็นด่าง

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการกำจัดความขุ่นของพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต กับสารส้ม ที่ช่วงน้ำดิบความขุ่น 10 – 30 30 – 50 และ 120 – 150 เอ็นทียู (ตารางที่ 2 – 4) จากการศึกษาพบว่า สารส้มมีการใช้สารตกตะกอนในปริมาณที่สูงกว่าสารตกตะกอนอีก 3 ชนิด ตัวอย่างเช่น ที่ความขุ่น 10 – 30 เอ็นทียู (ตารางที่ 2) พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต ใช้ความเข้มข้นเท่ากับ 8 8 และ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่สารส้มต้องใช้ความเข้มข้นถึง 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกหลักของการทำลายเสถียรภาพและการรวมตะกอนของสารตกตะกอนแต่ละชนิด กล่าวคือ สารส้มมีกลไกหลักเป็นการห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น (sweep flocculation) ซึ่งต้องการปริมาณสารตกตะกอนสูงเพื่อไปเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์ให้มีน้ำหนักและขนาดเพิ่มขึ้นสามารถตกตะกอนได้ (Hongxiao *et al*., 2015) สำหรับพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตจะทำลายเสถียรภาพของอนุภาคด้วยกลไกการดูดติดผิว (adsorption coagulation) (Hongxiao *et al*., 2015; Muhummad *et al*., 2016) ดังนั้นการรวมตะกอนด้วยกลไกการดูดติดผิวจึงไม่ต้องการสารตกตะกอนในปริมาณมากดังเช่นกลไกการห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น (Weiying *et al*., 2012)

2. ผลการศึกษาค่าความเป็นด่างที่มีต่อประสิทธิภาพของสารตกตะกอนแต่ละชนิด

ค่าความเป็นด่าง (alkalinity) หมายถึง ความสามารถของน้ำที่จะรับไฮโดรเจนไอออน (H^+) เพื่อทำให้กรดเป็นกลาง (Munsin, 1989) กล่าวคือ ความเป็นด่างทำหน้าที่สะเทินความเป็นกรดที่เกิดขึ้น เป็นบัฟเฟอร์ช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอช ส่งผลให้สารตกตะกอนมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ดี โดยค่าความเป็นด่างและค่าพีเอชจะมีค่าแปรผันตามกัน ค่าความเป็นด่างที่ลดลงแสดงให้เห็นถึงสภาพความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้นในระบบ และมีโอกาสที่ค่าพีเอชจะลดลง (Ploypailin, 2013) เมื่อพิจารณาค่าความเป็นด่างและค่าพีเอชหลังการกำจัดความขุ่นน้ำดิบ จากตารางที่ 2 – 4 พบว่า สารส้มมีผลทำให้ค่าความเป็นด่างและค่าพีเอชของน้ำลดลงมากที่สุด รองลงมาคือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น ที่ความขุ่นน้ำดิบ 30 – 50 เอ็นทียู (ตารางที่ 3) ความเป็นด่างน้ำดิบเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต สารส้ม พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต มีค่าความเป็นด่างสุดท้ายเป็น 75.0 83.4 83.6 และ 87.8 ตามลำดับ และมีค่าพีเอชสุดท้ายเป็น 6.82 7.34 7.46 และ 7.59 ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้ (Jack *et al*., 2017; Katesarin, 2009)

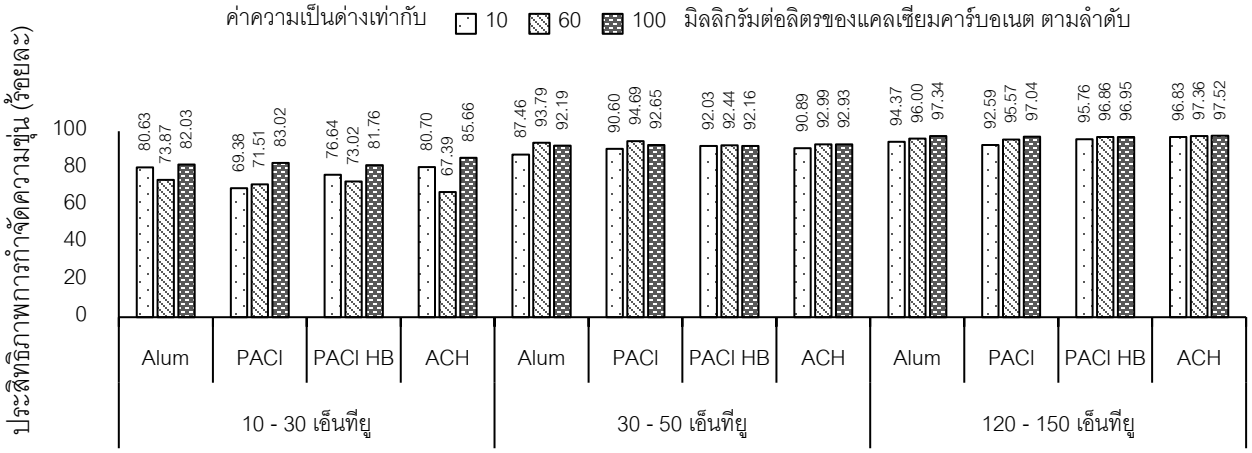
สารส้ม : $Al_2(SO_4)_3\ (aq) + 6H_2O\ (l) \longrightarrow 2Al(OH)_3\ (s) + 6H^+\ (aq) + 3SO_4^{2-}\ (aq)$ (4)

พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ : $Al_2(OH)_3Cl_3\ (aq) + 3H_2O\ (l) \longrightarrow 2Al(OH)_3\ (s) + 3H^+\ (aq) + 3Cl^-\ (aq)$ (5)

อะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต : $Al_2(OH)_5Cl\ (aq) + H_2O\ (l) \longrightarrow 2Al(OH)_3\ (s) + H^+\ (aq) + Cl^-\ (aq)$ (6)

จะเห็นได้ว่า เมื่อเติมสารส้ม 1 โมล ลงในน้ำดิบจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) 6 โมล ซึ่งเข้าทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำทำให้ค่าความเป็นด่างและค่าพีเอชลดลงมาก ในขณะที่พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน 3 โมล และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน 1 โมล ค่าความเป็นด่างและค่าพีเอชของน้ำหลังการกำจัดความขุ่นจึงลดลงน้อยลงตามลำดับ และเนื่องจากพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูงมีค่าเบสิกซิตี้ (basicity) (ค่าเฉลี่ยของ $[OH^-]/[Al^{3+}]$) สูงถึงร้อยละ 79.45 (ตารางที่ 1) ขณะที่พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวมีค่าเบสิกซิตี้ร้อยละ 61.90 นั่นคือพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูงมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนมากกว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว ไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้น ช่วยให้ค่าความเป็นด่างและค่าพีเอชของน้ำหลังการกำจัดความขุ่นด้วยพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูงลดลงน้อยกว่าพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว

สมการที่ (4) – (6) แสดงให้เห็นว่าผลึกอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) มีบทบาทสูงมากในกลไกการรวมตะกอน เนื่องจากเป็นของแข็งไม่ละลายน้ำจึงช่วยกวาดอนุภาคคอลลอยด์ให้ตกตะกอนได้ดี โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ช่วยควบคุมให้เกิดผลึกอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์คือ ค่าความเป็นด่างและค่าพีเอชของน้ำ จากการศึกษาผลของค่าความเป็นด่างที่มีต่อประสิทธิภาพของสารตกตะกอนแต่ละชนิด โดยปรับค่าความเป็นด่างของน้ำดิบเริ่มต้นเท่ากับ 10 60 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ พบว่า ช่วงความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 10 – 30 และ 120 – 150 เอ็นทียู สารตกตะกอนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ สารส้ม พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงที่สุดเมื่อค่าความเป็นด่างเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต และในช่วงความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 30 – 50 เอ็นทียู สารทั้ง 4 ชนิดมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงที่สุดเมื่อค่าความเป็นด่างเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (ดังภาพที่ 1) ทั้งนี้ เนื่องจากเมื่อความขุ่นปกติ 30 – 50 เอ็นทียู ความเป็นด่าง 60 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงพอต่อการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่สารตกตะกอนสามารถกำจัดความขุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อค่าความเป็นด่างเท่ากับ 60 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต พีเอชจะอยู่ในช่วง 6 – 8 ซึ่งเป็นช่วงที่ผลึกของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เกิดได้ดีที่สุด (Amirtharajah & Mills, 1982; Duan *et al*., 2014; Masaoki *et al*., 2013; Muhummad *et al*., 2016; Ning *et al*., 2014; Yan *et al*., 2009)



ภาพที่ 1 ผลของค่าความเป็นด่างต่อประสิทธิภาพของสารตกตะกอนแต่ละชนิด

3. ผลการศึกษาค่าใช้จ่ายของสารตกตะกอนและต้นทุนการบำบัดน้ำ

หลักในการพิจารณาเลือกสารตกตะกอนที่ใช้ในกระบวนการกำจัดความขุ่นของระบบผลิตน้ำประปา โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง คือ สารตกตะกอนจะต้องมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ทำให้น้ำหลังผ่านการตกตะกอนมีความขุ่นต่ำกว่า 4 เอ็นทียู ตามมาตรฐานของการประปานครหลวง และต้องเป็นสารตกตะกอนที่มีต้นทุนการบำบัดน้ำต่ำที่สุด (Kunut, 2017) จากการศึกษาต้นทุนการบำบัดน้ำ (ตารางที่ 2 – 4) พบว่า น้ำดิบที่ค่าความเป็นด่าง 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต มีต้นทุนการบำบัดน้ำต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีการปรับค่าความเป็นด่าง รวมถึงค่าพีเอชหลังการกำจัดความขุ่นของน้ำที่ผลิตได้มีค่าเป็นไปตามเกณฑ์ที่องค์การอนามัยโลกกำหนด (พีเอชน้ำบริโภคต้องอยู่ระหว่าง 6.5 – 8.5) จึงไม่ต้องปรับพีเอชของน้ำหลังการกำจัดความขุ่น โดยที่ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 10 – 30 เอ็นทียู สารตกตะกอนที่เหมาะสมคือพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวที่ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร มีต้นทุนการบำบัดน้ำ 0.096 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ขณะที่สารส้มมีต้นทุนการบำบัดเท่ากับ 0.120 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ลดค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำประปาได้ 0.024 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 30 – 50 เอ็นทียู สารตกตะกอนที่เหมาะสมคือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูงที่ความเข้มข้น 6 มิลลิกรัมต่อลิตร มีต้นทุนการบำบัดน้ำ 0.137 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ขณะที่สารส้มมีต้นทุนการบำบัดเท่ากับ 0.216 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ลดค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำประปาได้ 0.079 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 120-150 เอ็นทียู สารตกตะกอนที่เหมาะสมคือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีต้นทุนการบำบัดน้ำ 0.240 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ขณะที่สารส้มมีต้นทุนการบำบัดเท่ากับ 0.336 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ลดค่าใช้จ่ายในการผลิตน้ำประปาได้ 0.096 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำดิบของสารตกตะกอนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ สารส้ม พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูง และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต พบว่า ช่วงน้ำดิบความขุ่นต่ำ

(10 – 30 เอ็นทียู) สารตกตะกอนทั้ง 4 ชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 67.39 – 85.66 ที่ความขุ่นปกติ (30 – 50 เอ็นทียู) มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นมีค่าร้อยละ 87.46 – 94.69 สำหรับช่วงความขุ่นสูง (120 – 150 เอ็นทียู) มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นมีค่าร้อยละ 92.59 – 97.52 นั่นคือ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำขึ้นกับชนิดสารตกตะกอนและปริมาณความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบ เมื่อความขุ่นเริ่มต้นสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของสารทั้ง 4 ชนิดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้มีโอกาสที่อนุภาคจะรวมตัวกันเพิ่มสูงขึ้น (Munsin, 1989) โดยสารตกตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่นให้ต่ำกว่า 4 เอ็นทียู ตามมาตรฐานการประปานครหลวง เมื่อน้ำดิบความขุ่นต่ำ คือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวที่ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำดิบความขุ่นปกติ คือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดความเป็นเบสสูงที่ความเข้มข้น 6 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำดิบความขุ่นสูง คือ พอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่างของน้ำดิบที่เหมาะสมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต

งานวิจัยนี้ได้นำไปปรับใช้ในการผลิตน้ำประปา โรงงานผลิตน้ำบางเขน ช่วยให้การประปานครหลวงผลิตน้ำประปาที่มีคุณภาพและลดต้นทุนในการผลิต อย่างไรก็ตาม ควรทำการศึกษาสภาวะที่น้ำดิบมีความขุ่นเริ่มต้นสูงกว่า 200 เอ็นทียู เนื่องจาก ปัจจุบันในช่วงฤดูฝนของทุกปีความขุ่นของน้ำดิบจะสูงมากกว่า 200 เอ็นทียู และช่วงสถานการณ์น้ำท่วมความขุ่นของน้ำดิบจะสูงถึง 400 – 500 เอ็นทียู รวมถึงศึกษาการใช้สารช่วยตกตะกอน เพื่อให้ข้อมูลมีความหลากหลายสามารถนำไปประยุกต์ใช้กำจัดความขุ่นของน้ำดิบในแหล่งอื่นๆ หรือกระบวนการผลิตน้ำสำหรับอุตสาหกรรมที่เหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา คณะผู้วิจัยขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างน้ำดิบและอนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพน้ำสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Amirtharajah, A. & Mills, K.M. (1982). Rapid Mix Design for Mechanism of Alum Coagulation. *American Water Works Association*, *74*, 210–216.

Bangkhen Water Treatment Plant. (2016). *Water Quality reports*. Report of the Water Quality Analysis system, Bangkhen Water Treatment Plant, Metropolitan Waterworks Authority. (in Thai)

Duan, S., Xu, H., Xiao, F., Wang, D., Ye, C., Jiao, R. & Liu, Y. (2014). Effects of Al species on coagulation efficiency, residual Al and flocproperties in surface water treatment. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, *459*, 14–21.

Eaton, A.D. & Franson, M.A.H. (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.

Hongxiao, T., Feng, X. & Dongsheng, W. (2015). Speciation, stability, and coagulation mechanisms of hydroxyl aluminum clusters formed by PACl and alum: A critical review. *Advances in Colloid and Interface Science*, *226*, 78–85.

Jack, L., Sara, J.C. & Graeme, J.M. (2017). Effectiveness of aluminium based coagulants for pre-treatment of coal seam water. *Separation and Purification Technology*, *177*, 207–222.

Jia, S.H., Zhun, M., Jianjun, Q., Si, H.S. & Chee-Seng, T. (2015). Inline coagulation–ultrafiltration as the pretreatment for reverse osmosis brine treatment and recovery. *Desalination*, *365*, 242–249.

Katesarin, V. (2009). *Turbidity and algae removal from water by chemical coagulation*. (Master's thesis). Chulalongkorn University, Department of Environmental Engineering. (in Thai)

Kirsten, N.E. & Gary, W.V. (2003). Effects of raw water conditions on solution-state aluminum speciation during coagulant dilution. *Water Research*, *37*, 3341–3350.

Kunut, P. (January 4, 2017). *Interview*. Scientist. Water Quality Analysis Section, Bangkhen Water Treatment Plant, Metropolitan Waterworks Authority.

Masaoki, K., Yoshihiko, M., Kenta, K., Tairyo, B.I., Taku, M. & Nobutaka, S. (2013). Minimizing residual aluminum concentration in treated water by tailoring properties of polyaluminum coagulants. *Water Research*, *47*, 2075–2084.

Metropolitan Waterworks Authority. (2017). *Water Supply Information.* Retrieved May 31, 2017, from https://www.mwa.co.th/ewt_news.php?nid=1913. (in Thai)

Ministry of Natural Resource and Environment. (2012). *Water usage rate*. Retrieved May 4, 2017, from http://local.environnet.in.th/explain_detail.php?id=161. (in Thai)

Muhummad,U., Felicity, R. & Linhua, F. (2016). Comparison of coagulation efficiency of aluminium and ferric-based coagulants as pre-treatment for UVC/H_2O_2 treatment of wastewater RO concentrate. *Chemical Engineering Journal, 284*, 841–849.

Munsin, T. (1989). *Water Engineering Volume 1*. Bangkok: Chulapress. (in Thai)

Ning, W., Zhongguo, Z., Dan, L., Yue, W., Jun, W. & Qunhui, W. (2014). Coagulation behavior of polyaluminum chloride: Effects of pH and coagulant dosage. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *23*, 1041–1046.

Ploypailin, R. (2013). *Turbidity removal by solid contact clarifier with sludge recirculation*. (Master's thesis). Chulalongkorn University, Department of Environmental Engineering. (in Thai)

Pornsak, S. (2010). *Troubleshooting: Water Quality in Water Supply Systems*. Retrieved May 4, 2017, from https://www.mwa.co.th/download/prd01/water_technology/pdf_water_treatment_plant/wtp_problem.pdf. (in Thai)

Sawitri, T. (2009). *Turbidity removal from surface water by aluminum chlorohydrate*. (Master's thesis). Chulalongkorn University, Department of Environmental Science. (in Thai)

Tak-Hyun, K., Chulhwan, P., Eung-Bai, S. & Sangyong, K. (2003). Effects of Cl-based chemical coagulants on electrochemical oxidation of textile wastewater. *Desalination*, *155*, 59-65.

Weiying, X., Baoyu, G., Yan, W., Qinyan, Y. & Haijing, R. (2012). Effect of second coagulant addition on coagulation efficiency, floc properties and residual Al for humic acid treatment by Al_{13} polymer and polyaluminum chloride (PACl).*Journal of Hazardous Materials*, *215–216*, 129–137.

World Health Organization. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. (4th edition). Malta: Gutenberg.

Yan, W., Bao-Yu, G., Xiu-Ming, X., Wei-Ying, X. & Gui-Ying, X. (2009). Characterization of floc size, strength and structure in various aluminum coagulants treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*, *332*, 354–359.

Yupaporn, A., Teerawan, B. & Nanthaphorn, S. (2011). *Improvement of coagulation-flocculation process for water supply system of Samrong sub district administrative Organization at Samrong district, Ubon Ratchathani province.* (Research report). Ubon Ratchathani Rajabhat University. (in Thai)