การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสำหรับถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน

A Study of Factor on Turbidity Removal Efficiency for Sludge Recirculation Clarifier

วิวัฒน์ อ่อนนาคคล้ำ*

โรงงานผลิตน้ำมหาสวัสดิ์, การประปานครหลวง ปลายบาง บางกรวย นนทบุรี 11130

Wiwat Onnakklum*

Mahasawat Water Treatment Plant, Metropolitan Waterworks Authority, Plaibang, Bangkruai, Nonthaburi, 11130, Thailand

***Corresponding Author E-mail:** wp_js38@hotmail.com

Received: Aug 12, 2021; **Revised:** Sep 29, 2021; **Accepted:** Oct 29, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน โดยการควบคุมอัตราการเติมสารส้ม 14 มิลลิกรัม/ลิตรและอัตราผิวน้ำล้น 3.2 เมตร/ชั่วโมง ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของความเร็วรอบใบกวนตะกอน 100, 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง ตามลำดับ และความเร็วรอบใบกวาดตะกอน 0.65, 0.75, 0.85 และ 0.95 รอบ/ชั่วโมง ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนและผลร่วมของทั้ง 2 ตัวแปร ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอย่างมีนัยสำคัญ การควบคุมความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอน จะต้องควบคุมให้ค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนให้ลดหลั่นกันอย่างเหมาะสม (Tapered Velocity Gradient) โดยความเร็วรอบของใบกวนตะกอนที่มีค่าสูง จะต้องควบคุมให้ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนให้มีค่าต่ำ และความเร็วรอบขอบใบกวนตะกอนที่มีค่าต่ำ จะต้องเพิ่มความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนให้มีค่าสูง เพื่อให้อนุภาคตะกอนสามารถรวมตัวกันและไม่เกิดการแตกตัว จะส่งผลให้สามารถกำจัดความขุ่นได้ดี จุดที่มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงที่สุด คือ ความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอน 120 และ 0.65 รอบ/ชั่วโมง ตามลำดับ มีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอน 33.2 และ 14.7 วินาที$^{-1}$ มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 93.19 $\pm$ 1.51%

คำสำคัญ: ถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน, ใบกวนตะกอน, ใบกวาดตะกอน, ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น, ระบบผลิตน้ำประปา

Abstract

This paper aims to study of factor on turbidity removal efficiency for sludge recirculation clarifier. Aluminum sulphate adding rate and surface loading rate were controlled by 14 mg/l and 3.2 m/h, respectively. The results were compared turbidity removal efficiency by impeller rotating speeds (100, 110, 120 and 130 rev/h) and scraper rotating speeds were varied (0.65, 0.75, 0.85 and 0.95 rev/h). and scraper rotating speeds, Experimental found that impeller rotating speeds, scraper rotating speeds and interaction of impeller rotating speeds and scraper rotating speeds were

significantly affected on turbidity removal efficiency. Velocity gradient of impeller rotating speeds and scraper rotating speeds should be controlled in tapered velocity gradient. A fast impeller rotating speed and a slow scraper rotating speed or a slow impeller rotating speed and a fast scraper rotating speed should be set up for maintaining formed floc which affected high turbidity removal efficiency. The best turbidity removal condition was 120 rev/h of impeller rotating speeds and 0.65 rev/hr of scraper rotating speeds, which was 33.2 second^{-1} of velocity gradient of impeller, 14.7 second^{-1} of velocity gradient of scraper. And, the best turbidity removal efficiency was 93.19 $\pm$ 1.51%.

Keywords: Sludge recirculation clarifier, impeller, scraper, turbidity removal efficiency, water treatment

1. บทนำ

ถังตกตะกอน เป็นเครื่องจักรในกระบวนการตกตะกอน สำหรับระบบผลิตน้ำประปา ทำหน้าที่ในการแยกสารแขวนลอย คอลลอยด์ สารอินทรีย์ รวมเรียกว่า “ตะกอน” ออกจากน้ำดิบ โดยอาศัยการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของตะกอน เรียกว่า “สารตกตะกอน” ที่มีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของน้ำดิบร่วมกับการควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนต์ของการผสมให้มีความเหมาะสม จะทำให้อนุภาคตะกอนในน้ำดิบสามารถรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่เรียกว่า “ฟล๊อค (Floc)” และสามารถแยกตัวออกมาได้

ถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน (Sludge recirculation clarifier) เป็นถังตกตะกอนรูปแบบหนึ่ง ซึ่งรวมเอาการรวมตะกอน (Flocculation) และการตกตะกอน (Sedimentation) ไว้ด้วยกัน และอาศัยการใช้ฟล๊อคที่เกิดจากการรวมตะกอน มาใช้ในการดักจับตะกอนที่เข้ามาใหม่ เมื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียกับถังตกตะกอนแบบทั่วไป (Plain sedimentation tank) พบว่าถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนจะมีขนาดเล็กกว่าถังตกตะกอนแบบทั่วไป ทำให้ประหยัดพื้นที่ แต่การควบคุมการทำงานของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน จะต้องใช้ทักษะของเจ้าหน้าที่ควบคุมที่สูงกว่า เนื่องจากต้องปรับตั้งและควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนต์ของการรวมตะกอนให้เหมาะสมกับคุณภาพน้ำดิบ

การรวมตะกอนหรือการกวนช้าเป็นการกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้ตะกอนในน้ำดิบที่ผสมกับสารตกตะกอนแล้วเกิดการไหลเวียนและชนกัน จนตะกอนในน้ำดิบเกิดการรวมตัวกันจนเป็นฟล๊อคขนาดใหญ่ ในการกวนเพื่อรวมตะกอน ควรมีค่าความเร็วเกรเดียนต์ในการกวนประมาณ 20–70 วินาที$^{-1}$ [1]

การตกตะกอน เป็นการควบคุมความเร็วของน้ำที่ผ่านการรวมตะกอนให้ไหลผ่านอย่างช้าๆ และอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกในการดึงดูดฟล๊อคในน้ำให้เกิดการแยกชั้นกับน้ำส่วนที่ใส ควรมีระยะเวลาในการกักเก็บน้ำในถังตกตะกอนประมาณ 2–4 ชั่วโมง [1]

หลักการทำงานของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนดังแสดงใน**รูปที่ 1** จะเริ่มจากน้ำดิบที่ผ่านการผสมกับสารตกตะกอนแล้ว จะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนทางท่อทางเข้า หมายเลข 1 เข้าสู่บริเวณกวนช้าหมายเลข 2 จากนั้นน้ำดิบจะถูกใบกวนตะกอนหมายเลข 3 บังคับให้เกิดการไหลเวียนอยู่ภายในบริเวณกวนช้า ทำให้อนุภาคของตะกอนเกิดการชนกันและรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น และตกลงสู่ก้นถังตกตะกอน จากนั้นตะกอนบริเวณก้นถังตกตะกอนจะถูกใบกวาดตะกอนหมายเลข 4 กวาดอย่างช้าๆ ช่วยทำให้ตะกอนสามารถรวมตัวกันและมีขนาดที่เพิ่มขึ้น โดยจะต้องทำการระบายตะกอนออกเป็นระยะโดยท่อหมายเลข 5 ไม่ให้มากหรือน้อยจนเกินไป เพื่อรักษาระดับความเข้มข้นของชั้นตะกอนให้มีความเหมาะสม และน้ำส่วนที่ใสจะไหลผ่านขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบนและไหลลงสู่รางรับน้ำหมายเลข 6 ไหลไปยังขั้นตอนต่อไป

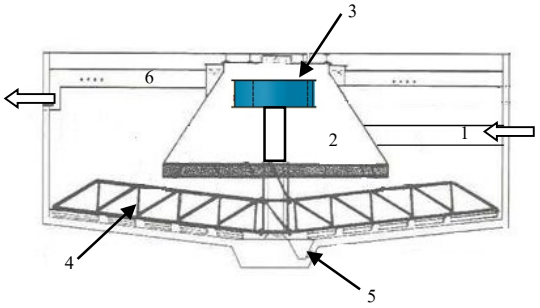
การควบคุมการทำงานของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน ประกอบไปด้วย 1.การพิจารณาเลือกใช้สารตกตะกอนหรือสารช่วยตกตะกอน ให้มีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของน้ำดิบในแต่ละแหล่งน้ำดิบ บางแหล่งอาจจะเติมสารตกตะกอนเพียงชนิดเดียว แต่บางแหล่งอาจจะต้องเติมสารตกตะกอนหรือสารช่วย

ตกตะกอนมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป ขึ้นอยู่กับค่า pH, ความเป็นด่าง (Alkalinity) ของน้ำดิบ [2–4] 2.อัตราการเติมสารตกตะกอนที่มีความเหมาะสมกับน้ำดิบในแต่ละแหล่ง ถ้าอัตราการเติมสารตกตะกอนน้อยเกินไปจะไม่เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นต่ำ ถ้าอัตราการเติมสารตกตะกอนมาก ทำให้ความขุ่นกลับมามีค่าสูงขึ้น [5–7] 3.การควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนต์หรืออัตราการกวนให้มีความเหมาะสม อัตราการกวนที่น้อยเกินไปจะไม่เพียงพอต่อการรวมตะกอน ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าต่ำ อัตราการกวนที่มากเกินไปจะส่งผลให้ตะกอนที่จับตัวกันแล้วเกิดการแตกตัวออก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นกลับมีค่าน้อยลง [8–9]

วิจารณ์ เสนอแนะว่า ผลของความเร็วรอบใบกวนตะกอนและอัตราน้ำล้นผิว ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยความเร็วรอบใบกวนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง ในช่วงความเร็วรอบใบกวน 5–20 รอบ/นาที และอัตราน้ำล้นผิวที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง ในช่วงอัตราน้ำล้นผิว 30–60 เซนติเมตร/นาที [10]

ลัดดา เสนอแนะว่า ผลของความเร็วรอบใบกวนตะกอนและเวลาในการตกตะกอน ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยความเร็วรอบใบกวนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง ในช่วงความเร็วรอบใบกวน 5–20 รอบ/นาที และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นไม่เพิ่มขึ้นอีก และรูปร่างของใบกวนตะกอนส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น [11]

ศุภวิช เสนอแนะว่า ความขุ่นน้ำออกจากการตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับ การควบคุมความเร็วเกรเดียนต์และระยะเวลาการกวนของใบกวนตะกอนของการตกตะกอน และการรวมตะกอนแบบลดหลั่น (Tapered flocculation) จะสามารถกำจัดความขุ่นได้ดีกว่าการรวมตะกอนแบบขั้นตอนเดียว โดยการรวมตะกอนแบบ 3 ขั้นตอนจะมีแนวโน้มสามารถกำจัดความขุ่นได้ดีการกว่าแบบ 2 ขั้นตอน [12]



1. ท่อน้ำเข้า	4. ใบกวาดตะกอน
2. ส่วนกวนช้า	5. ท่อระบายตะกอน
3. ใบกวนตะกอน	6. รางรับน้ำใส

รูปที่ 1 แสดงถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน

จากข้อมูลข้างต้นพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน จะขึ้นอยู่กับอัตราการกวน เวลาการกวน และอัตราน้ำล้นผิว ถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน จะเป็นการรวมตะกอนแบบ 2 ขั้นตอน โดยมีใบกวนตะกอนเป็นการรวมตะกอนขั้นแรก และใบกวาดตะกอนเป็นการรวมตะกอนในขั้นที่ 2 และจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะให้ความสนใจเฉพาะการรวมตะกอนในขั้นแรกมากกว่า บทความนี้จะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนทั้งในส่วนของการรวมตะกอนขั้นแรกและขั้นที่ 2 ในการทดลองนี้จะพิจารณาความเร็วรอบของใบกวนตะกอน ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน รวมไปถึงผลร่วมของทั้ง 2 ปัจจัย

2. วัสดุอุปกรณ์

2.1.ถังตกตะกอน

ถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน เป็นถังตกตะกอนทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถังตกตะกอน 58 เมตร ความสูง 5 เมตร มีบริเวณกวนช้า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 เมตร ประกอบไปด้วยใบกวนตะกอนชนิด Backward Blade ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เมตร สูง 1.27 เมตร ขนาด 37 kW และบริเวณก้นถังตกตะกอนมีใบกวาดตะกอน ชนิด Rack ขนาด 3.7 kW และมีท่อน้ำเข้าขนาด 1.5 เมตร มีอัตราการผลิตสูงสุด 210,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน หรือ อัตราผิวน้ำล้น 3.2 เมตร/ชั่วโมง

2.2.น้ำดิบ

น้ำดิบที่ใช้ในการทดลอง เป็นน้ำดิบจากแหล่งน้ำผิวดิน โดยดัชนีที่ใช้บ่งชี้คุณสมบัติของน้ำดิบใช้ในการวิจัย คือค่าความขุ่น ในหน่วย Nephelometric Turbidity Unit (NTU)

ความขุ่น เกิดจากจากการที่มีสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ปะปนอยู่ในน้ำ สารแขวนลอยดังกล่าวเมื่อมีอยู่ในปริมาณมากจะหักเหแสงที่มาตกกระทบทำให้มองเห็นลักษณะของน้ำมีลักษณะขุ่น โดยน้ำดิบจากแหล่งน้ำที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าความขุ่นน้ำดิบอยู่ในช่วง 25–35 NTU มีความเป็นด่างอ่อนๆ รายละเอียดดังแสดงใน**ตารางที่ 1**

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำดิบที่ใช้ในการวิจัย

ดัชนีคุณภาพน้ำดิบ	ช่วงใช้งาน
ความขุ่น (NTU)	25–35
pH	8.0–8.2
อุณหภูมิ (°C)	26–28
Total Organic Carbon (มก./ลิตร)	1.8–2.0
Alkalinity (มก./ลิตร)	90–100

2.3.สารตกตะกอน

สารตกตะกอน ที่ใช้ คือ สารส้ม เนื่องจากสารส้มเป็นสารตกตะกอนได้รับความนิยมมากที่สุด หาได้ง่ายในทุกพื้นที่ มีความง่ายต่อการใช้งานและการขนส่ง [13] การเติมสารส้มเป็นสารตกตะกอน จะต้องควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และ ค่าความกระด้างของน้ำ (Alkalinity) ให้มีความเหมาะสมกับน้ำดิบ เนื่องจากสารส้มเป็นสารที่มีความเป็นกรดเมื่อเติมลงในน้ำ จะส่งผลให้ค่า pH และ Alkalinity ของน้ำลดน้อยลง โดยที่ ค่า pH เหมาะสมสำหรับการใช้สารส้ม คือ 6.0–7.5 และ ค่า Alkalinity มีค่าไม่น้อยกว่า 60 มิลลิกรัม/ลิตร [1],[14]

3. วิธีการวิจัย

3.1.การเก็บข้อมูล

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. วัดค่าความขุ่นน้ำดิบจากแหล่งน้ำดิบ โดยใช้เครื่องวัดความขุ่นชนิด Nephelometric
2. ปรับอัตราการผลิตที่ 210,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน คิดเป็นอัตราน้ำล้นผิว 3.2 เมตร/ชั่วโมง ซึ่งเป็นการเดินถังตกตะกอนที่จุดออกแบบ
3. เลือกสัดส่วนการเติมสารส้มต่อปริมาณน้ำดิบ พิจารณาเลือกจากผลการทดสอบด้วยวิธี Jar Test ดังแสดงใน**ตารางที่ 2** โดยการทดสอบที่ความขุ่นน้ำดิบ 30.9 NTU คัดเลือกพิจารณาควบคุมความขุ่นน้ำไม่เกิน 4 NTU[15] จะได้สัดส่วนการเติมสารส้มต่อปริมาณน้ำดิบ14 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นอัตราการเติมสารส้มที่อัตราการเติม 360 ลิตร/ชั่วโมง
4. ปรับความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100, 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง ตามลำดับ และความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65, 0.75, 0.85 และ 0.95 รอบ/ชั่วโมง ตามลำดับ ทำการทดลอง จำนวน 5 ครั้ง/การทดลอง
5. วัดค่าความขุ่นน้ำออกจากถังตกตะกอน โดยใช้เครื่องวัดความขุ่นชนิด Nephelometric
6. คำนวณค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนและค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอน

3.2.การวิเคราะห์ผลการวิจัย

ความสามารถในการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสามารถชี้วัดได้จากปริมาณความขุ่นที่ถังตกตะกอนสามารถกำจัดออกจากน้ำดิบได้ เรียกว่า “ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น” คำนวณได้จาก อัตราส่วนระหว่างค่าความขุ่นที่ถังตกตะกอนสามารถกำจัดออกไปต่อค่าความขุ่นน้ำดิบจากแหล่งน้ำดิบ ดังสมการ (1)

$$\%Eff = \frac{T_{rw}-T_{cw}}{T_{rw}} x100\% \qquad (1)$$

โดยที่ %Eff คือ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (%)

T_{rw} คือ ความขุ่นน้ำดิบ (NTU)

T_{cw} คือ ความขุ่นน้ำหลังตกตะกอน (NTU)

ค่าความเร็ว เกรเดียนต์ คือ ระดับของความปั่นป่วนของ

น้ำภายในถังกวน เป็นดัชนีใช้สำหรับบ่งชี้ อัตราการกวนผสมกันระหว่างสารเคมีและน้ำ ดังสมการที่ (2) ของ Camp and Stein [1]

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \qquad (2)$$

โดยที่ G คือ ค่าความเร็วเกรเดียนต์ (วินาที$^{-1}$)

P คือ กำลังของใบกวน (W)

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ (Pa.s)

V คือ ปริมาตรของถังกวน (ลบ.ม.)

4. ผลการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน ในการทดลองนี้จะควบคุมอัตราการเติมสารส้ม 14 มิลลิกรัม/ลิตรและอัตราน้ำล้นผิว 3.2 เมตร/ชั่วโมง ในการทดลองจะศึกษาความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100, 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง และความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65, 0.75, 0.85 และ 0.95 รอบ/ชั่วโมง และผลร่วมของทั้ง 2 ตัวแปร ผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA แบบ 2 ตัวแปร ดังแสดงใน **ตารางที่ 3** จะพบว่า ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน, ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนและผลร่วมของความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% (p-value ≤ 0.05)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาอัตราการเติมสารส้มด้วยวิธีJar Test

ดัชนีคุณภาพ	น้ำดิบ	อัตราการเติมสารส้ม			
		10	12	14	16
ความขุ่น (NTU)	30.9	7.1	4	2.7	1.7
pH	8.0	7.8	7.7	7.6	7.6
Alkalinity (มก./ลิตร)	102	100	98	96	95

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ผลของความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วย ANOVA

ตัวแปร	p-value
ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน	0.000
ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน	0.003
Interaction	0.000

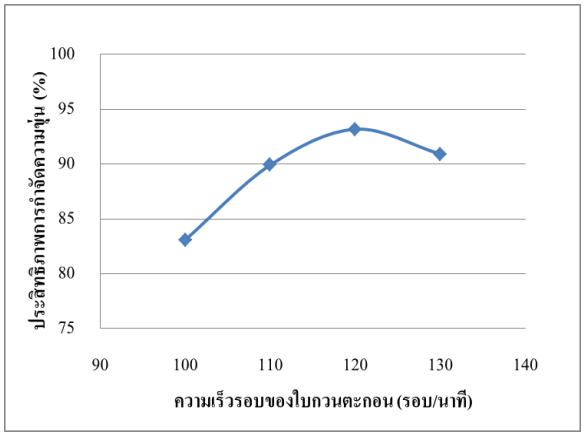
จากการทดลองผลของความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ผลการทดลอง ดังแสดงใน**รูปที่ 2,3** และ **ตารางที่ 4** พบว่า กรณีความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65 รอบ/ชั่วโมง เมื่อความเร็วรอบของใบกวนตะกอนเพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น ดังแสดง**รูปที่ 2(ก)** โดยกรณีความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100 รอบ/ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 83.09 ± 1.67% เนื่องจากความเร็วเกรเดียนต์ในการกวนทั้งของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนมีค่าไม่เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่น และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของใบกวนตะกอนเพิ่มขึ้น เป็น 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง จะทำให้ความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนเพิ่มขึ้นดังแสดงใน**ตารางที่ 5** ทำให้อนุภาคตะกอนสามารถรวมตัวกันได้และส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มสูงขึ้น

กรณีความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.75 รอบ/ชั่วโมง จะพบว่ากรณีความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100 รอบ/ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 92.38 ± 1.09% เนื่องจากความเร็วเกรเดียนต์ในการกวนทั้งใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนเพียงพอต่อการกำจัดตะกอน และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของใบกวนตะกอนเพิ่มขึ้น เป็น 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง จะทำให้ความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนเพิ่มขึ้นดังแสดงใน**ตารางที่ 5** ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดต่ำลง ดังแสดงใน**รูป 2(ข)** เนื่องจากอนุภาคตะกอนที่ได้การรวมตัวกันจากใบกวน

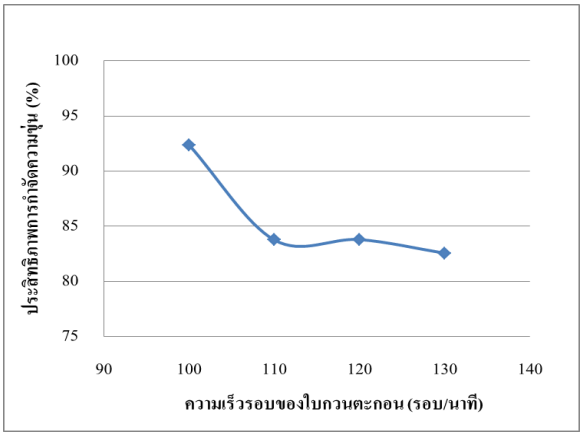
ตะกอน เกิดการแตกตัวออกเนื่องจากความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอนมีค่าสูงเกินไป แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นกับกรณีความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65 รอบ/ชั่วโมง จะพบว่า เมื่อความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอน มีค่าไม่เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้โดยการเพิ่มความเร็วรอบของใบกวนตะกอนหรือใบกวาดตะกอนอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อให้สามารถรวมตะกอนได้มากขึ้น แต่ถ้าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าที่ดี มีการรวมตะกอนที่ดีอยู่แล้ว เกิดการเพิ่มความเร็วรอบของใบกวนตะกอนหรือใบกวาดตะกอนอย่างใดอย่างหนึ่ง จะทำให้อนุภาคตะกอนที่รวมตัวกันดีแล้วเกิดการแตกตัวออกจากกันทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดต่ำลง

กรณีความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.85 รอบ/ชั่วโมง จะพบว่ากรณีความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100 และ 110 รอบ/ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 92.35 ± 1.30 และ 91.02 ± 1.03% ตามลำดับ แต่เมื่อความเร็วรอบของใบกวนตะกอนเพิ่มขึ้นอีก กลับมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ลดต่ำลง ดังแสดง**รูปที่ 2(ค)** เนื่องจากความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอนที่สูง ทำให้อนุภาคตะกอนที่รวมตัวกันแล้ว เกิดการแตกตัวทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดต่ำลง แต่กรณีความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.95 รอบ/ชั่วโมงจะพบว่ากรณีความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100, 110 และ 120 รอบ/ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 88.02 ± 1.59, 90.52 ± 0.68 และ 88.28 ± 1.10% ตามลำดับ ดังแสดงใน**รูปที่ 2(ง)** ค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าสูงขึ้น โดยเกิดจากการที่อนุภาคตะกอนที่เกิดการแตกตัวไปแล้วจากความเร็วเกรเดียนต์ที่สูงเกินสามารถรวมตัวกันได้อีกครั้ง จากการเพิ่มความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอนให้สูงขึ้นไปอีก จนสามารถทำให้อนุภาคตะกอนที่แตกตัวไปแล้วสามารถรวมตัวกันได้ใหม่

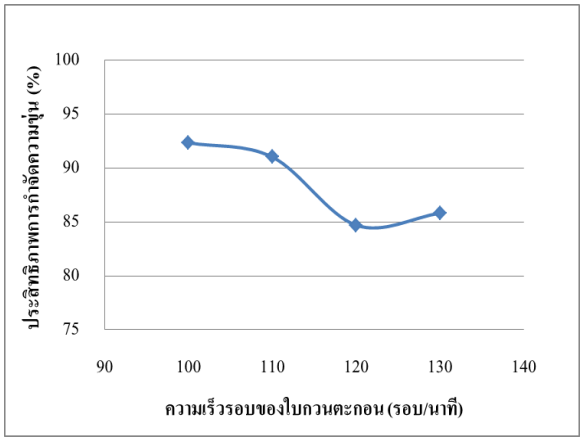
กรณีความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100 รอบ/ชั่วโมง จะพบว่า เมื่อความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อความเร็วรอบของใบกวนตะกอนเพิ่มสูงเกินไปจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นกลับมีค่าลดต่ำลง ดังแสดงใน**รูปที่ 3(ก)** เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนมีค่าต่ำเกินไป จะไม่เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่น ต่อมาเมื่อความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนเพิ่มสูงขึ้นทำให้สามารถรวมตะกอนและกำจัดตะกอนได้ดีขึ้น แต่เมื่อความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนเพิ่มสูงขึ้นไปอีก จะส่งผลให้อนุภาคตะกอนที่รวมตัวกันแล้ว เกิดการแตกตัวทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นกลับมามีค่าน้อยลง



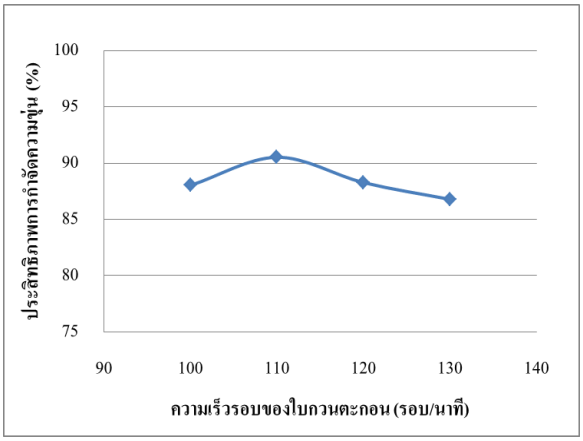
(ก)



(ข)



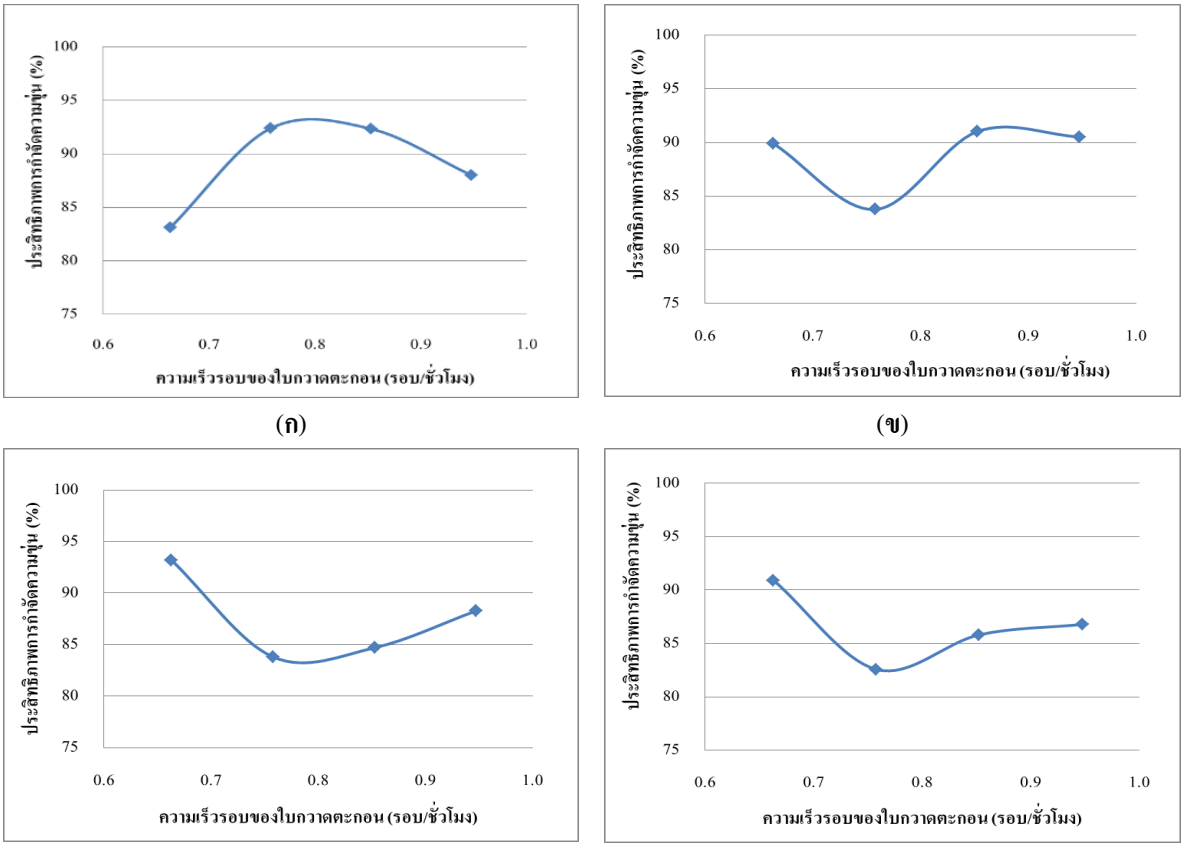
(ค)



(ง)

รูปที่ 2 ผลของความเร็วรอบของใบกวนตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น กรณี (**ก**) ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65 รอบ/ชั่วโมง (**ข**) ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.75 รอบ/ชั่วโมง (**ค**) ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.85 รอบ/ชั่วโมง (**ง**) ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.95 รอบ/ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอนใน**ตารางที่ 4** จะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วง คือ 1.ค่าความเร็วเกรเดียนต์ไม่เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่น จะเป็นช่วงที่ความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนเท่ากับ 100 และ 0.65 รอบ/ชั่วโมง มีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอน 27.1 และ 14.7 วินาที$^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5 และ 6 ซึ่งไม่เพียงพอต่อการรวมตะกอนส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าต่ำ 2.Floc Growth ค่าความเร็วเกรเดียนต์เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่น จะเป็นช่วงที่ความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนมีค่าเพียงพอต่อการรวมตะกอนส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าสูงขึ้น สามารถทำได้ โดยการเพิ่มความเร็วรอบของใบกวนตะกอนเป็น 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง จะมีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอน 29.5, 33.2 และ 35.2 วินาที$^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงใน**ตารางที่ 5** และใช้ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65 รอบ/ชั่วโมง มีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอน 14.7 วินาที$^{-1}$ หรือใช้ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100 รอบ/ชั่วโมง และเพิ่มความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.75, 0.85 และ 0.95 รอบ/ชั่วโมง จะมีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอน 27.1 วินาที$^{-1}$ และใบกวาดตะกอน 15.6, 16.5 และ 17.3 วินาที$^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงใน**ตารางที่ 6** ซึ่งค่าความเร็วเกรเดียนต์ที่เพิ่มขึ้นจากทางใดทางหนึ่ง สามารถไปชดเชยความเร็วเกรเดียนต์ที่ไม่เพียงพอของการรวมตะกอนได้ 3.Floc Breakage เป็นช่วงค่าความเร็วเกรเดียนต์สูงเกินไป ทำให้อนุภาคตะกอนที่รวมตัวกันแล้วเกิดการแตกตัวออก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดต่ำลง โดยความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 110, 120 และ 130 รอบ/ชั่วโมง จะมีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอน 29.5, 33.2 และ 35.2 วินาที$^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถรวมตะกอนได้แล้วและเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนจาก 0.65 เป็น 0.75 รอบ/ชั่วโมง และมีค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอนเพิ่มขึ้นจาก 14.7 เป็น 15.2 วินาที$^{-1}$ ทำให้ค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอนมีค่าสูงเกินไป ทำให้อนุภาคตะกอนที่รวมตัวกันแล้วเกิดการแตกตัวออก ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดต่ำลง 4.Floc Regrowth เป็นช่วงค่าความเร็วเกรเดียนต์ที่สูงกว่าช่วง Floc Breakage แต่สามารถที่จะรวมเอาอนุภาคตะกอนเกิดการแตกตัว สามารถกลับมารวมตัวกันได้อีกครั้ง โดยการเพิ่มความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนจาก 0.75 เป็น 0.85 และ 0.95 รอบ/ชั่วโมง ทำให้ค่าความเร็วเกรเดียนต์เพิ่มขึ้นจาก 15.2 เป็น 16.5 และ 17.3 วินาที$^{-1}$ ตามลำดับ



รูปที่ 3 ผลของความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น กรณี (**ก**) ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100 รอบ/ชั่วโมง (**ข**) ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 110 รอบ/ชั่วโมง (**ค**) ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 120 รอบ/ชั่วโมง (**ง**) ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 130 รอบ/ชั่วโมง

การทำงานของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนทำหน้าที่กวนเพื่อรวมอนุภาคตะกอนให้มีขนาดใหญ่ ในการกวนช้า ใบกวนตะกอน ทำหน้าที่ในการสร้างการไหลเวียนของอนุภาคตะกอนในน้ำดิบภายในบริเวณกวนช้า ทำให้เกิดการชนกันของอนุภาคตะกอน ความเร็วรอบของใบกวนตะกอนที่สูงขึ้นจะทำให้โอกาสในการรวมตะกอนเพิ่มสูงขึ้น แต่ความเร็วรอบใบกวนตะกอนที่มากเกินไป จะส่งผลให้อนุภาคตะกอนที่จับตัวกันแล้วเกิดการแตกตัวทำให้อนุภาคตะกอนเกิดการฟุ้งกระจายและทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดต่ำลง ใบกวาดตะกอนทำหน้าที่กวนเพื่อให้อนุภาคตะกอนที่จับตัวกันแล้วสามารถรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนที่เหมาะสม จะช่วยในการรวมอนุภาคให้อนุภาคของตะกอน ให้สามารถจับกันและรวมตัวกันเป็นอนุภาคตะกอนขนาดใหญ่ และไม่ลอยออกไปกับน้ำใส การควบคุมความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนจะต้องควบคุมให้สอดคล้องกัน โดยใช้หลักการรวมตะกอนแบบลดหลั่น ซึ่งความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนจะต้องมากกว่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอน [1] และความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนจะต้องมีความเหมาะสมและสอดคล้องกันเพื่อให้อนุภาคของตะกอนเกิดการไหลเวียนและชนกันจนสามารถจับตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ได้และไม่เกิดการแตกตัวของอนุภาคตะกอน อนุภาคของตะกอนที่เกิดการแตกตัวเนื่องจากความเร็วเกรเดียนต์มาก สามารถกลับมารวมตัวใหม่ได้อีกครั้งโดยเพิ่มความเร็วเกรเดียนต์ในส่วนของใบกวาดตะกอน เพื่อให้เกิดการรวมตะกอนใหม่อีกครั้งหนึ่ง [10],[11],[16]

ตารางที่ 4 ผลของความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 100–130 รอบ/ชั่วโมง และ ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65–0.95 รอบ/ชั่วโมง ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน (%)

ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน (รอบ/ชั่วโมง)	ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน (รอบ/ชั่วโมง)			
	100	110	120	130
0.65	83.09±1.67	89.93±0.81	93.19±1.51	90.92±0.56
0.75	92.38±1.09	83.77±0.93	83.81±0.78	82.57±1.60
0.85	92.35±1.30	91.02±1.03	84.70±1.49	85.81±1.21
0.95	88.02±1.59	90.52±0.68	88.28±1.10	86.78±1.28

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณหาค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอน

ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน (รอบ/ชั่วโมง)	ค่าความเร็วเกรเดียนต์ (วินาที$^{-1}$)
100	27.1
110	29.5
120	33.2
130	35.2

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณหาค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอน

ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน (รอบ/ชั่วโมง)	ค่าความเร็วเกรเดียนต์ (วินาที$^{-1}$)
0.65	14.7
0.75	15.6
0.85	16.5
0.95	17.3

นอกจากการควบคุมความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและใบกวาดตะกอนแล้ว การเลือกชนิดสารตกตะกอนหรือสารช่วยตกตะกอน ให้มีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของน้ำดิบ พร้อมทั้งควบคุมอัตราการเติมสารตกตะกอน [2] และการควบคุมอัตราน้ำล้นผิวให้มีความเหมาะสมด้วยเช่นกัน [17] จึงจะส่งผลให้สามารถควบคุมการทำงานของถังตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลที่ดีในการการกำจัดความขุ่นในถังตกตะกอน

5. สรุป

จากการศึกษาปัจจัยที่ผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน โดยการควบคุมความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน, ความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนและผลร่วมของทั้ง 2 ตัวแปรส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอย่างมีนัยสำคัญ

2. การควบคุมความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน จะควบคุมในลักษณะที่ค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวนตะกอนมีค่าสูงกว่า ค่าความเร็วเกรเดียนต์ของใบกวาดตะกอน และมีค่าความเร็วเกรเดียนต์ที่ลดหลั่นกันและสอดคล้องกัน เพื่อให้อนุภาคของตะกอนเกิดการรวมตัวกันและไม่เกิดการแตกตัว โดยความเร็วรอบของใบกวาดตะกอนเป็นตัวแปรที่สำคัญในการรวมตะกอนแบบลดหลั่นในขั้นตอนที่ 2 ทำให้อนุภาคตะกอนเกิดการรวมตัวกัน แตกตัว หรือสามารถรวมตัวกันใหม่

3. จุดที่มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นดีที่สุด คือ ความเร็วรอบของใบกวนตะกอน 120 รอบ/ชั่วโมง ค่าความเร็วเกรเดียนต์ 33.2 วินาที$^{-1}$ และความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน 0.65 รอบ/ชั่วโมง ค่าความเร็วเกรเดียนต์ 14.7 วินาที$^{-1}$ โดยมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น 93.19 ± 1.51%

4. การควบคุมถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน จะต้องควบคุมความเร็วรอบของใบกวนตะกอนและความเร็วรอบของใบกวาดตะกอน ให้มีความเหมาะสมและ

สอดคล้องกับคุณสมบัติของน้ำดิบ, ชนิดของสารตกตะกอน/สารช่วยตะกอน, อัตราการเติมสารตกตะกอน/สารช่วยตกตะกอน และอัตราน้ำล้นผิว โดยใช้การพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและประสิทธิผลในการกำจัดความขุ่น ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนชนิดหมุนเวียนตะกอน ถังตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ดี จะสามารถกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบได้อย่างมีประสิทธิผล และสามารถลดปริมาณการใช้สารตกตะกอนลงได้ ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีลงได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] American Water Work Association and American Society of Civil Engineers, “Mixing, Coagulation and Flocculation,” in *Water treatment plant design*, 4th ed., London, UK: McGraw-Hill, 1990, ch. 6, sec. 6.4-6.5, pp. 112–129.

[2] Y. Tantipalakul, K. Palawatwichai, T. Detchakan and J. Khaisan, “The study of optimal coagulants for water treatment process of Metropolitan Waterworks Authority,” *Burabha Journal of Science*, vol. 23, no.1, pp. 207–220, Jan., 2018.

[3] S. Eardprapan, “Investigation of Operating Criteria and Efficiency of Sludge Blanket Clarifier at Pangpuay Water Treatment Plant, Rachaburi Province,” M.E. thesis, Dept. Environ. Eng., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2002.

[4] S. Tasutin, “Turbidity Removal from Surface Water by Aluminum Chlorohydrate,” M.S. thesis, Dept. Environ. Sci., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2009.

[5] V. Poonsawatt and T. Ratpukdi, “Optimum Alum Dosage for High Turbidity Removal in Water Treatment Plant,” presented at The 20th National Graduate Research Conference, Khon Kaen, Thailand, Mar. 15, 2019 pp. 98–104.

[6] C. Ruenmai, “Factors Affect Quality of Water Supply of Four Communities in Nonthai District, Nakorn Ratchasrima,” M.E. thesis, Dept. Civ. Eng., Suranari Univ. Technol., Nakornratchasrima, Thailand, 2012.

[7] A. Baghvand, A. D. Zand, N. Mehrdadi and A. Karbassi, “Optimizing Coagulation Process for Low to High Turbidity Waters Using Aluminum and Iron Salts,” *American Journal of Environmental Science*, vol. 6, no. 5, pp. 442–448, 2010.

[8] Z. Zhang, D. Liu, D. Hu, D. Li, X. Ren, Y. Cheng and Z. Luan, “Effect of Slow-Mixing on the Coagulation Performance of Polyaluminum Chloride(PACl),” *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 318–323, 2013, doi: 10.1016/S1004-9541(13)60463-2.

[9] M.A. Yukselen and J. Gregory, “The Reversibility of Floc Breakage,” *International Journal of Mineral Processing* , vol. 73, no. 2–3, pp. 251–259, 2004, doi: 10.1016/S0301-7516(03)00077-2.

[10] V. Thunthithum, “Turbidity Removal by Solids Recirculation Clarifier,” M.E. thesis, Dept. Environ. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 1994.

[11] L. Thumkarun, “Effect of Paddle on Turbidity Removal by Solids Recirculation Clarifier,” M.E. thesis, Dept. Environ. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 1993.

[12] S. Cheyakul, “Control Parameter of Tapered Flocculation,” M.E. thesis, Dept. Sanit. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 1988.

[13] C. C. Dorea, “Coagulant-based emergency water treatment,” *Desalination*, vol. 248, no. 1–3, pp. 83–90, May, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.05.041.

[14] A. C. Twort, D. D. Ratnayaka and M. J. Brandt, “Storage, Clarification and Filtration of Water,” in

Water supply, 5th ed., Oxford, UK: Butterworth-Heinamann, 2006, ch. 7, sec. 7.13, pp. 267–369.

[15] Who Health Organization, "Acceptability Aspects: Taste, Odour and Apparence," in *Guidelines for Drinking-Water Quality*, 4th ed., Geneva, Switzerland: WHO press, 2011, ch. 10, sec. 10.1, pp. 219–230.

[16] P. T. Spicer, W. Keller and S. E. Pratsinis, "The Effect of Impeller Type on Floc Size and Structure during Shear-Induced Flocculation," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 184, no. 1, pp. 112–122, 1996, doi: 10.1006/jcis.1996.0601.

[17] S. Intrto, "Effect of pulsation rate, surface overflow rate and suction height on turbidity removal efficiency of pulsator clarifier," M.S. thesis, Dept. Sanit. Eng., Mahidol Univ., Nakorn Pathom, Thailand, 2005.