

การจัดความคุ้นด้วยถึงตตะกอนสัมพันธ์แบบหมุนเวียนตะกอน



นางสาวพลอยไพลิน ร่มโพธิ์ภักดิ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

TURBIDITY REMOVAL BY SOLID CONTACT CLARIFIER
WITH SLUDGE RECIRCULATION

Miss Ploypailin Romphopak

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจัดความชุ่มชื้นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียน
ตะกอน

โดย

นางสาวพลอยไพลิน ร่มโพธิ์ภักดิ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.มรุพัชร จำนงค์วงศ์)

พลอยไพลิน ร่มโพธิ์ภักดิ์ : การกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียน ตะกอน. (TURBIDITY REMOVAL BY SOLID CONTACT CLARIFIER WITH SLUDGE RECIRCULATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 210 หน้า.

ถังตกตะกอนสัมผัสเป็นถังปฏิกรณ์ประเภทหนึ่งที่นิยมใช้ในระบบผลิตน้ำในปัจจุบัน สำหรับแยกของแข็งแขวนลอยและอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งเป็นสาเหตุของความขุ่นออกจากน้ำดิบ แม้ว่าถังตกตะกอนชนิดนี้จะเป็นที่นิยมใช้ แต่ยังคงมีประเด็นที่เกี่ยวข้องกับกลไกที่เกิดขึ้นและผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อประสิทธิภาพและการทำงานของถังตกตะกอน งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครร์ไฟเออร์ เพื่อศึกษากลไกภายในถังตกตะกอน และสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ รวมถึงนำเสนอเกณฑ์การออกแบบถังตกตะกอนชนิดนี้ โดยการทดลองจะใช้ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครร์ไฟเออร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตร สูง 0.8 เมตร และมีปริมาตรรวม 243 ลิตร ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ ชนิดของน้ำดิบ (น้ำดิบจริงและน้ำดิบสังเคราะห์) อัตราการไหล (40 – 180 ลิตรต่อชั่วโมง) ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบ (20 – 200 เอ็นทียู) ความสูงของชั้นตะกอน (10 – 25 เซนติเมตร) ระยะห่างระหว่างของสัดส่วนต่างๆ ภายในถังตกตะกอนและประสิทธิภาพของแผ่นขนานเอียงที่มีต่อถังตกตะกอน ผลการวิจัยพบว่าสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับน้ำดิบที่ใช้ศึกษา คือ สารส้มน้ำ และถังตกตะกอนสัมผัสมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมากกว่าร้อยละ 80 ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง (อัตราน้ำล้นผิว 0.2859 เมตรต่อชั่วโมง) ในสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม กล่าวคือ ความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (h) 6 เซนติเมตร และช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง (H) ที่ความสูง 30 เซนติเมตร โดยพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะสูงขึ้นตามความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบ นอกจากนี้ การติดตั้งแผ่นขนานเอียงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ในทุกอัตราการไหลที่สภาวะเดินระบบที่เหมาะสม ซึ่งถังตกตะกอนนี้อาจนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการแยกอื่นๆ เพื่อเป็นทางเลือกสำหรับการบำบัดน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น รวมถึงช่วยลดขนาด และค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการเดินระบบได้ในอนาคต

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5470296721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: TURBIDITY REMOVAL / SOLID CONTACT CLARIFIER / COAGULATION
PROCESS / FLOCCULATION PROCESS / SLUDGE BLANKET

PLOYPAILIN ROMPHOPHAK: TURBIDITY REMOVAL BY SOLID CONTACT
CLARIFIER WITH SLUDGE RECIRCULATION. ADVISOR: ASSOC. PROF.
DR.PISUT PAINMANAKUL, 210 pp.

Solid contact clarifiers have been widely applied in water treatment for separating undesirable particles such as colloidal particles or suspended solid from raw water. However, effects of key parameters and removal mechanisms had not been fully understood. Therefore, this study aimed to determine effects of parameters (i.e. operating conditions, coagulant type and dosage, liquid flow rate, raw water type, initial turbidity, sludge blanket height, spaces in the tank, and settling tube installation) on the separation performance. The separation mechanism was also investigated in order to obtain optimal operating condition and design criteria. The experiments were performed in a pilot scale jet clarifier with 0.7 m diameter, 0.8 m height, and total volume of 243 L. The system was operated as a continuous process. Alum was found as the optimal coagulant in this study. The turbidity removal efficiency higher than 80% can be achieved by the jet clarifier at the flow rate of 70 L/hr (surface loading rate of 0.2859 m/hr) under the optimal condition (i.e. 25 cm sludge height, 6 cm between the inner cone and the bottom of the tank, and 5 cm between the cylindrical partition and the top of sludge layer). The efficiencies were increased with the initial turbidity. In addition, the installation of settling tubes can enhance the removal efficiency at every flow rate at the optimal condition. The jet clarifier could be combined with other separation processes for more effective separation in a compact area with economical construction and operating costs.

Department: Environmental
Engineering

Student's Signature

Advisor's Signature

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยพระคุณของ รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ญมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และนายพรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ ผู้ให้โอกาสและเวลาให้คำแนะนำและคำปรึกษา อีกทั้งยังคอยถ่ายทอดวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบเพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากที่สุด รวมทั้งขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่กรุณาอบรมถ่ายทอดความรู้ และให้คำแนะนำที่มีคุณค่าอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณบุคลากรส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิต โรงงานผลิตน้ำสามเสน การประปานครหลวงทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำตลอดการทำวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งนาย อิศรา อินตรา และนายราเชนทร์ พงษ์จิวิกุล ที่ให้ความช่วยเหลือในการติดตั้งอุปกรณ์และให้คำปรึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด และขอบคุณโรงงานผลิตน้ำสามเสนที่อนุเคราะห์พื้นที่บริเวณส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำระบบผลิตในการทำวิจัยระดับทดลองครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการให้ความรู้ คำปรึกษา กำลังใจ รวมไปถึงความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ทุกท่าน

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา – มารดา และครอบครัวของผู้เขียนวิทยานิพนธ์ที่ดูแล สนับสนุน และเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดสำหรับผู้เขียนวิทยานิพนธ์ในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การผลิตน้ำประปา	5
2.1.1 ส่วนประกอบของระบบผลิตน้ำประปา	5
2.1.2 ระบบผลิตน้ำประปา.....	6
2.2 อนุภาคที่มีผลต่อความขุ่นของน้ำ	8
2.2.1 องค์ประกอบและลักษณะของน้ำขุ่น.....	9
2.2.2 พฤติกรรมคอลลอยด์.....	13
2.2.3 ทฤษฎีดับเบิลเลเยอร์ (The Double Layer Theory)	14
2.2.4 เสถียรภาพของคอลลอยด์.....	15
2.3 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation process).....	16
2.3.1 กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layers).....	16
2.3.2 กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization).....	18
2.3.3 กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation) ...	18

2.3.4	กลไกการใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging)....	19
2.4	กระบวนการฟล็อกคูเลชัน (Flocculation process)	20
2.4.1	เพอร์ไคเนติก ฟล็อกคูเลชัน (Perikinetic Flocculation).....	20
2.4.2	ออร์โธไคเนติก ฟล็อกคูเลชัน (Orthokinetic Flocculation).....	20
2.5	การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน.....	20
2.5.1	การควบคุมด้วยวิธีจาร์เทส.....	21
2.5.2	ความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient).....	21
2.6	กระบวนการตกตะกอน (Sedimentation).....	22
2.6.1	การตกตะกอนแบบโดด (Discrete Settling).....	22
2.6.2	การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculation Settling)	24
2.6.3	การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Zone Settling).....	25
2.6.4	แนวความคิดเรื่องการใช้ท่อหรือแผ่นตกตะกอน	26
2.7	ถังตกตะกอนสัมผัส (Solids Contact Clarifier).....	26
2.7.1	ถังโซลิดซ์คอนแทคท์แบบมีชั้นตะกอน (Sludge Blanket).....	27
2.7.2	ถังโซลิดซ์คอนแทคท์แบบหมุนเวียนตะกอน (Sludge Recirculation)	32
2.8	สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	36
2.8.1	สารประกอบอลูมิเนียม (Aluminium Compound)	37
2.8.2	เกลือของเหล็ก (Iron Salts).....	37
2.9	แนวคิดเกี่ยวกับถังตกตะกอนสัมผัส (Solid Contact Clarifier):.....	38
2.10	รูปแบบของการกระจายเวลากัก (Residence Time Distribution, RTD).....	39
2.11	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44
บทที่ 3	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	52
3.1	ส่วนประกอบและการติดตั้งอุปกรณ์ระดับทดลอง (Pilot Scale).....	52
3.1.1	ส่วนเตรียมน้ำดิบสังเคราะห์ (Synthetic Raw Water Preparation).....	52
3.1.2	ส่วนเตรียมสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant Preparation).....	53

3.1.3	ถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier Type)	53
3.2	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	54
3.2.1	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	54
3.2.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง	54
3.2.3	สารเคมี	54
3.3	วิธีวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ	55
3.3.1	ความขุ่น (Turbidity)	55
3.3.2	ค่าพีเอช (pH)	55
3.3.3	ความเป็นด่าง (Alkalinity)	55
3.4	วิธีเก็บตัวอย่างน้ำ	55
3.5	วิธีวิเคราะห์ประสิทธิภาพของถังตกตะกอน	56
3.5.1	ประสิทธิภาพในด้านการกำจัดความขุ่น	56
3.5.2	ประสิทธิภาพในด้านการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculants Settling Test) ภายในถังตกตะกอน	57
3.6	การดำเนินงานวิจัย	57
3.6.2	การทดลองที่ 2 การศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการโคแอกกูเลชันต่อการกำจัดความขุ่น	59
3.6.3	การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของความสูงชั้นตะกอน และอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อประสิทธิภาพของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)	60
3.6.4	การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของระยะห่างของช่องว่างต่างๆ ภายในถังตกตะกอนกับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น	61
3.6.5	การทดลองที่ 5 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยแผ่นขนานเอียง (Settling Tubes)	65
3.6.6	การทดลองที่ 6 ศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)	66

3.7	เกณฑ์การออกแบบถังตกตะกอนแบบสัมผัส และค่าพารามิเตอร์ของถังตกตะกอนสัมผัสที่ใช้ในงานทดลอง.....	69
3.8	สรุปตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง	70
3.9	สรุปจำนวนครั้งการทดลอง	71
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	72
4.1	ผลการศึกษาลักษณะของน้ำดิบสังเคราะห์และน้ำดิบจริง	72
4.1.1	ลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์	72
4.1.2	ลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบจริง	73
4.2	ผลการศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชันต่อการกำจัดความขุ่น.....	76
4.2.1	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด.....	76
4.2.2	ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	77
4.2.3	การศึกษาความเหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test).....	79
4.2.4	ศึกษาคุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงจากกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยวิธีจาร์เทส	81
4.3	ศึกษาผลของความสูงชั้นตะกอน และอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)	84
4.3.1	ผลของความสูงของชั้นตะกอนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน	84
4.3.2	ผลของอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)	86
4.3.3	ประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ของ ฟล็อกที่เกิดจากการทดลองในแต่ละอัตราการไหลและความสูงของชั้นตะกอน	87
4.3.4	ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นภายในระบบ	88
4.4	ศึกษาผลของระยะห่างของช่องว่างต่างๆ ภายในถังตกตะกอนกับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	90

4.4.1	ผลของระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) กับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	90
4.4.2	ประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ของ ฟล็อก ในการทดลองแต่ละสภาวะที่กำหนดระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน 3 6 และ 9 เซนติเมตร.....	91
4.4.3	ผลของระยะช่องว่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถังตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) กับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	97
4.4.4	ประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ของ ฟล็อก ในการทดลองแต่ละสภาวะที่กำหนดระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถังตกตะกอนกับพื้นถัง ที่ 20 25 และ 30 เซนติเมตร.....	99
4.4.5	ศึกษาคูณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงจากกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยระบบถังตกตะกอน.....	101
4.5	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่สภาวะการเดินระบบเหมาะสม โดยมีปริมาณความขุ่นของน้ำดิบเริ่มต้นในช่วงต่างๆ.....	102
4.5.1	ศึกษาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่สภาวะที่เหมาะสม.....	103
4.5.2	ศึกษาคูณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงจากกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยระบบถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้นในช่วงต่างๆ.....	104
4.5.3	ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยแผ่นขนานเอียง (Settling Tube).....	105
4.5.4	ศึกษาคูณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงจากกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยระบบถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้นในช่วงต่างๆ.....	108
4.5.5	ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของระบบกำจัดความขุ่นในการผลิตน้ำประปาทั่วไป (Conventional Water Treatment Process).....	109
4.6	รูปแบบการกระจายเวลากัก (Residence Time Distribution, RTD) ภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier).....	111

4.6.1	รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยไม่มีชั้นตะกอน	113
4.6.2	รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน ..	116
4.6.3	รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง (Settling Tube).....	119
4.6.4	รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้เม็ดพลาสติกแทนชั้นตะกอน	120
4.6.5	รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 40 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ที่มีชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตร.....	124
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	130
5.1	สรุปผลการวิจัย	130
5.2	ข้อเสนอแนะ	132
5.2.1	กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยวิธีจาร์เทส.....	132
5.2.2	การใช้ถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)	132
รายการอ้างอิง	134
ภาคผนวก	137
	ภาคผนวก ก เอกสารข้อมูลผลการทดลอง ของการศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการ โคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (Coagulation and Flocculation) โดยวิธีจาร์เทส.....	138
	ภาคผนวก ข เอกสารข้อมูลผลการทดลองของการใช้ถังตกตะกอนส้มฝัสด แบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier).....	155
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	210

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 แสดงวิฏภาคที่กระจาย (Disperse Phase) (Sakshat Virtual Labs).....	10
ตารางที่ 2-2 ค่าพีเอชที่เหมาะสมตามชนิดไอออนของสารโคแอกกูแลนต์ (มันซิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)	37
ตารางที่ 2-3 แสดงสภาวะที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด	48
ตารางที่ 3-1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1	58
ตารางที่ 3-2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2	59
ตารางที่ 3-3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.....	60
ตารางที่ 3-4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.1	62
ตารางที่ 3-5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.2	63
ตารางที่ 3-6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.3	64
ตารางที่ 3-7 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5	65
ตารางที่ 3-8 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6.1	66
ตารางที่ 3-9 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6.2	67
ตารางที่ 3-10 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6.3.....	68
ตารางที่ 3-11 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6.4.....	69
ตารางที่ 3-12 ตารางสรุปตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง	69
ตารางที่ 3-13 ตารางสรุปตัวแปรที่เกี่ยวข้อง.....	70
ตารางที่ 3-14 ตารางสรุปจำนวนครั้งการทดลอง	71
ตารางที่ 4-1 ลักษณะน้ำดิบสังเคราะห์	73
ตารางที่ 4-2 ลักษณะน้ำดิบจริง	74
ตารางที่ 4-3 ประสิทธิภาพและความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดที่ความขุ่น เริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู.....	76
ตารางที่ 4-4 คุณภาพน้ำก่อนและหลังการกำจัดความขุ่น	82
ตารางที่ 4-5 ตารางสรุปค่าความปั่นป่วน (G) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (t) ในการทดลอง ..	86
ตารางที่ 4-6 ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบ	89
ตารางที่ 4-7 แสดงผลการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ที่ความสูงของชั้น ตะกอน 10 เซนติเมตร ที่สภาวะการทดลองต่างๆ.....	93
ตารางที่ 4-8 แสดงผลการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ที่ความสูงของชั้น ตะกอน 25 เซนติเมตร ที่สภาวะการทดลองต่างๆ.....	95

ตารางที่ 4-9 แสดงผลการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ที่ความสูงของชั้น ตะกอน 25 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถึงตกตะกอน 6 เซนติเมตร ที่สภาวะ การทดลองต่างๆ	99
ตารางที่ 4-10 คุณภาพน้ำก่อนและหลังการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอน	102
ตารางที่ 4-11 คุณภาพน้ำก่อนและหลังการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียน ตะกอนที่ความขุ่นเริ่มต้นต่างๆ	105
ตารางที่ 4-12 คุณภาพน้ำก่อนและหลังการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียน ตะกอนที่ความขุ่นเริ่มต้นต่างๆ	108
ตารางที่ 4-13 ข้อมูลของส่วนกำจัดความขุ่นของโรงผลิตน้ำสามเสนและระบบถังตกตะกอนส้มฝัดชนิด เจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) (Samsen Water Treatment Plant Engineering Group, 2002).....	109
ตารางที่ 4-14 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของโรงงานผลิตน้ำสามเสน (Samsen Water Treatment Plant, 2009 – 2012).....	110
ตารางที่ 4-15 ตารางสรุปข้อมูลจากวิเคราะห์การกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบ หมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier).....	113
ตารางที่ 4-16 เกณฑ์การออกแบบและสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม	129

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1 การจำแนกขนาดของสารต่างๆ ในน้ำ (EPA United States Environmental Protection Agency, 1999).....	9
ภาพที่ 2-2 การเปรียบเทียบขนาดเม็ดดินตามระบบการจำแนกดินต่างๆ (Arthon Industry Limited).....	10
ภาพที่ 2-3 องค์ประกอบของแร่ดินเหนียว (Grim, 1986).....	11
ภาพที่ 2-4 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว (Grim, 1986).....	11
ภาพที่ 2-5 โครงสร้างของแร่ดินเหนียวแต่ละชนิด (Grim, 1986).....	12
ภาพที่ 2-6 ที่มาของประจุไฟฟ้าของอนุภาคดินเหนียว (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542).....	13
ภาพที่ 2-7 รูปแบบของคอลลอยด์ (Kopeliovich).....	14
ภาพที่ 2-8 แร่ระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ (Kopeliovich).....	16
ภาพที่ 2-9 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับอนุภาคคอลลอยด์ (ก) ก่อนเติมไอออน (ข) หลังจากการเติมไอออนแล้ว (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542).....	17
ภาพที่ 2-10 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพ ของคอลลอยด์ด้วย กลไกแบบต่างๆ	17
ภาพที่ 2-11 กลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบเชื่อมด้วยโพลีเมอร์ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)	19
ภาพที่ 2-12 การตกตะกอนแบบโดดในถังตกตะกอนแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542).....	23
ภาพที่ 2-13 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542).....	24
ภาพที่ 2-14 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกอนแขวนลอยที่เวลาและความลึกต่างๆ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)	25
ภาพที่ 2-15 วิธีหาราฟของการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)	25
ภาพที่ 2-16 ลักษณะโครงสร้างของถังตกตะกอนแบบ Pulsator Clarifier (Degremont, 1999) .	28
ภาพที่ 2-17 ลักษณะโครงสร้างของถังตกตะกอนแบบ Superpulsator clarifier (Degremont, 1999).....	30
ภาพที่ 2-18 ลักษณะโครงสร้างของถังตกตะกอนแบบ Pulsator Clarifier (Pressure Type) (พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ).....	31
ภาพที่ 2-19 ลักษณะโครงสร้างของถังตกตะกอนแบบ Turbocirculator Clarifier (Degremont, 1999).....	33

ภาพที่ 2-20 ลักษณะโครงสร้างของถังตกตะกอนแบบ Accelator Clarifier (Degremont, 1999)	33
ภาพที่ 2-21 ลักษณะโครงสร้างของถังตกตะกอนแบบ Jet clarifier (Degremont, 1999).....	35
ภาพที่ 2-22 แสดงลักษณะโครงสร้างของสารละลายอูมิเนียมไอออน (Letterman, Amirtharajah, & O'Melia, 1999)	36
ภาพที่ 2-23 ถังตกตะกอนสัณผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier Type) ที่ใช้ในงานวิจัย	39
ภาพที่ 2-24 กราฟแสดงการกระจายเวลากักในรูปของฟังก์ชันต่างๆ (Fogler, 2013).....	41
ภาพที่ 2-25 ลักษณะของรูปแบบการไหลจากการตรวจวัดของสารนำสัญญาณ (Tracer) (Levenspiel, 1972).....	42
ภาพที่ 2-26 แบบจำลองการไหลต่างๆ (Levenspiel, 1972).....	43
ภาพที่ 2-27 แสดงแผนผังระบบของการทดลอง (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009).	49
ภาพที่ 3-1 แผนผังและลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์	52
ภาพที่ 3-2 รูปแบบของถังตกตะกอนสัณผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์.....	53
ภาพที่ 3-3 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอน และบริเวณที่เก็บพารามิเตอร์ต่างๆ มาวิเคราะห์สำหรับคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดน้ำ.....	56
ภาพที่ 3-4 แสดงสัดส่วนภายในของถังตกตะกอนสัณผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3	60
ภาพที่ 3-5 แสดงสัดส่วนภายในของถังตกตะกอนสัณผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ที่ใช้ในการทดลองที่ 4	62
ภาพที่ 3-6 ถังตกตะกอนสัณผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่มีการติดตั้งแผ่นขนานเอียงในบริเวณตกตะกอน	66
ภาพที่ 4-1 ขนาดของอนุภาคของของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบสังเคราะห์.....	73
ภาพที่ 4-2 ขนาดของอนุภาคของของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบจริง	74
ภาพที่ 4-3 กราฟแสดงผลการตกตะกอนแบบโดด (Discrete Settling) ของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู และน้ำดิบจริงที่มีความขุ่นเริ่มต้น 20 และ 60 เอ็นทียู	75
ภาพที่ 4-4 แสดงสัดส่วนระหว่างโมลต่อลิตรของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดกับปริมาณความขุ่น. 78	
ภาพที่ 4-5 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด ที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ	80
ภาพที่ 4-6 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัณผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่ความสูงของชั้นตะกอนและอัตราการไหลที่แตกต่างกัน	84
ภาพที่ 4-7 แสดงทิศทางการเวียนกลับของตะกอน	85

ภาพที่ 4-8 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน ที่ความสูงชั้นตะกอน 10 และ 25 เซนติเมตร	88
ภาพที่ 4-9 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน ที่ความสูงของชั้นตะกอนที่สภาวะเดินระบบต่างๆ.....	91
ภาพที่ 4-10 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนที่ความสูงชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ.....	92
ภาพที่ 4-11 ลักษณะการหมุนเวียนตะกอนและรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอน ที่ความสูงชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร ในแต่ละสภาวะการทดลองของระบบ.....	93
ภาพที่ 4-12 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนที่ความสูงชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ.....	95
ภาพที่ 4-13 ลักษณะการหมุนเวียนตะกอนและรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอน ที่ความสูงชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ในแต่ละสภาวะการทดลองของระบบ.....	96
ภาพที่ 4-14 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่ความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ระยะห่างช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน 6 เซนติเมตร ที่สภาวะเดินระบบต่างๆ.....	97
ภาพที่ 4-15 ลักษณะการหมุนเวียนตะกอนและรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอน ที่ความสูงชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอนที่ 6 เซนติเมตร	98
ภาพที่ 4-16 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนที่ความสูงชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ.....	99
ภาพที่ 4-17 ระยะห่างของส่วนประกอบต่างๆ ของถังตกตะกอนที่เหมาะสม	101
ภาพที่ 4-18 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนที่สภาวะเหมาะสมที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู	103
ภาพที่ 4-19 แสดงผลประสิทธิภาพของระบบกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เอ็นทียู.....	106
ภาพที่ 4-20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนที่สภาวะเหมาะสม ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ระหว่างระบบที่มีและไม่มีแผ่นขนานเอียง	107
ภาพที่ 4-21 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแควร์รีไฟเออร์กับโรงงานผลิตน้ำสามเสน	110
ภาพที่ 4-22 แสดงจุดตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) ในการทดลอง	112
ภาพที่ 4-23 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยไม่มีชั้นตะกอน.....	114

ภาพที่ 4-24 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยไม่มีชั้นตะกอน.....	116
ภาพที่ 4-25 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตร.....	117
ภาพที่ 4-26 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยมีชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตร.....	118
ภาพที่ 4-27 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง.....	120
ภาพที่ 4-28 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้เม็ดพลาสติกเป็นตัวแทนของชั้นตะกอน.....	122
ภาพที่ 4-29 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้เม็ดพลาสติกเป็นตัวแทนของชั้นตะกอนและมีแผ่นขนานเอียง.....	123
ภาพที่ 4-30 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยมีเม็ดพลาสติกเป็นตัวแทนของชั้นตะกอน.....	124
ภาพที่ 4-31 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อชั่วโมง.....	125
ภาพที่ 4-32 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 180 ลิตรต่อชั่วโมง.....	126
ภาพที่ 4-33 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยมีชั้นตะกอน.....	128

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

น้ำสะอาดเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิต เพื่อใช้ในการอุปโภค - บริโภค ต้องเป็นน้ำที่ปราศจากสี กลิ่น รส ตลอดจนความเป็นพิษต่างๆ เพื่อความพึงพอใจและความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำ ดังนั้นแล้วระบบประปาจึงมีความสำคัญเพื่อที่จะปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ได้ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำ แหล่งน้ำผิวดินถูกเลือกเป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาเนื่องจากมีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้น้ำ แต่ปัญหาสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตน้ำคือเรื่องของปริมาณความขุ่นของน้ำดิบที่เกิดจากอนุภาคคอลลอยด์และสารแขวนลอยต่างๆ เป็นหลัก เพราะฉะนั้นวัตถุประสงค์ที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ คือ การกำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยออกจากน้ำ ซึ่งจากข้อมูลคุณภาพน้ำดิบของโรงงานผลิตน้ำสามเสน การประปานครหลวง พ.ศ.2554 พบว่าน้ำดิบมีค่าความขุ่นเฉลี่ย 50 เอ็นทียู โดยมีค่าความขุ่นสูงสุดอยู่ที่ 135 เอ็นทียูในช่วงเดือนมิถุนายนและค่าความขุ่นต่ำสุดอยู่ที่ 20 เอ็นทียูในช่วงเดือนเมษายน (โรงงานผลิตน้ำสามเสน การประปานครหลวง, 2555)

ระบบผลิตน้ำประปาโดยทั่วไปประกอบด้วยกระบวนการหลักดังต่อไปนี้ตามลำดับ เริ่มต้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation process) เพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์หรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่อยู่ในน้ำ โดยการทำลายเสถียรภาพจะเติมสารที่มีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ส่วนมากจะอยู่ในรูปของเกลือซัลเฟต (Sulfate) หรือคลอไรด์ (Chloride Salts) กับไอออนโลหะของ Al^{3+} หรือ Fe^{3+} (Letterman & Association, 1999; Li, Zhu, Wang, Yao, & Tang, 2007; Yang, Gao, & Yue, 2010) เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพเรียบร้อยแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการฟล็อกคูเลชัน (Flocculation process) ซึ่งเป็นกระบวนการรวมกลุ่มสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ผ่านการทำลายเสถียรภาพแล้วให้เป็นกลุ่มตะกอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือที่เรียกว่า ฟล็อก (Floc) จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการแยกฟล็อกออกจากน้ำโดยกระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) สำหรับน้ำใสที่ได้จากกระบวนการนี้จะเข้าสู่กระบวนการกรอง (Filtration) เพื่อกำจัดอนุภาคขนาดเล็กที่หลงเหลืออยู่ในน้ำออกอีกครั้ง และกระบวนการสุดท้ายของการผลิตน้ำประปาคือกระบวนการฆ่าเชื้อโรค จากขั้นตอนการผลิตน้ำดังกล่าวจะเห็นได้ว่าระบบผลิตน้ำประปาทั่วไปจะประกอบด้วยหลายขั้นตอน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกระบวนการกำจัดความขุ่นเป็นสำคัญ จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการกำจัดความขุ่นเพื่อลดขนาดและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบผลิตให้ดียิ่งขึ้น โดยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นมาได้มีการรวมหน่วยการผลิตต่างๆ ของกระบวนการกำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยจากหลายหน่วยจนเหลือเพียงหน่วยเดียว ที่เรียกว่าถังตกตะกอนสัมผัส (Solids Contact Clarifier) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยค่อนข้างสูง นอกจากนั้นแล้วยังประหยัดพื้นที่ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและการบำรุงรักษา

ถังตกตะกอนส้มฝัดเป็นถังตกตะกอนที่นิยมใช้ในปัจจุบันนี้มีหลายประเภท แต่ละประเภทจะมีกลไกที่แตกต่างกัน แต่กลไกหลักๆ ภายในถังตกตะกอนส้มฝัดคือ ทำหน้าที่ให้เกิดการผสมกันระหว่างน้ำดิบกับสารเคมีที่ใช้ในการสร้างตะกอนทำให้อนุภาคแขวนลอยมีขนาดใหญ่ขึ้นพร้อมที่จะแยกอนุภาคออกจากน้ำ โดยถังตกตะกอนส้มฝัดเป็นถังตกตะกอนที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน แต่กลับยังไม่ทราบถึงกลไกการทำงานของถังตกตะกอนและรวมไปถึงยังไม่ทราบสถานะที่เหมาะสมที่เกิดจากกระบวนการภายในถังปฏิกรณ์นี้ อีกทั้งยังไม่มีการศึกษาหรือวิเคราะห์ในรายละเอียดโดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ ซึ่งถ้าเข้าใจถึงกลไกในส่วนนี้จะทำให้การออกแบบและควบคุมระบบเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาถึงกลไกของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier Type) เนื่องจากเป็นถังตกตะกอนที่ใช้แรงทางชลศาสตร์ในการสร้างความปั่นป่วนของน้ำ เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคในขั้นตอนการกวนเร็วซึ่งจะสร้างความปั่นป่วนโดยใช้ความเร็วของน้ำผ่านการกวนในเส้นท่อ (Static Mixer) และหัวกระจายน้ำ (Inlet Diffuser) สำหรับในขั้นตอนการกวนช้าจะใช้พลังงานที่เหลืออยู่ เมื่อน้ำผ่านหัวกระจายน้ำในการสร้างความปั่นป่วนเพื่อให้เกิดการรวมตัวกันของสารแขวนลอยที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว หลังจากนั้นฟล็อกที่เกิดขึ้นจะถูกแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนต่อไป นอกจากนั้นแล้วตะกอนที่เกิดขึ้นจะถูกหมุนวนกลับเข้าสู่ระบบเพื่อเป็นเป่าส้มฝัดทำให้เกิดการรวมตัวและตกตะกอนได้ดีขึ้น

สำหรับอัตราเร็วของการจมตัวของฟล็อกมีความสำคัญกับการควบคุมและประสิทธิภาพของถังกำจัดความขุ่นแบบใช้ชั้นตะกอนในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ ฟล็อกที่มีอัตราเร็วของการจมตัวสูงจะส่งผลให้ระบบมีอัตราน้ำล้นผิวสูงเช่นกันซึ่งจะเป็นผลดีต่อระบบ และอัตราการระบายตะกอนส่วนเกินจากถังกำจัดความขุ่นจะแปรผันตามปริมาณสารแขวนลอยในน้ำและอัตราการใช้สารเคมี (โสภณ เอียดประพาล, 2545) นอกจากนั้นการหมุนเวียนตะกอนกลับของกระบวนการโคแอกกูเลชัน - ฟล็อกคูเลชัน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดความขุ่นให้สูงขึ้น โดยการกำหนดอัตราการไหลเวียนกลับเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากการเคลื่อนไหวจากการหมุนเวียนอาจส่งผลกระทบต่อสถานะความคงตัวของส่วนที่ตกตะกอน (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมายังไม่ทราบถึงกลไกที่แน่ชัดภายในถังตกตะกอนชนิดนี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ทั้งทางด้านคุณภาพน้ำดิบและการควบคุมระบบ เช่น ปริมาณความขุ่นและอัตราการไหลของน้ำดิบที่เปลี่ยนแปลง อัตราการหมุนเวียนตะกอน หรือแม้กระทั่งความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เลือกใช้ ซึ่งส่งผลต่อกลไกภายในถังตกตะกอน ถ้าเราเข้าใจถึงกลไกในส่วนนี้จะทำให้ออกแบบ ควบคุมหรือนำไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติได้อย่างเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier Type) โดยเป็นการนำกลไกของกระบวนการโคแอกกูเลชัน - ฟล็อกคูเลชัน และกระบวนการแยกตะกอน มารวมไว้ในถังปฏิกรณ์เดียวสำหรับการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำเพื่อศึกษากลไกภายในถังตกตะกอน สถานะที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ สถานะเงื่อนไขในการจมตัว

ของฟล็อกที่เกิดขึ้นภายในถังตกตะกอน การควบคุมความสูงของชั้นตะกอน อัตราการหมุนเวียน ตะกอนและการติดตั้งแผ่นขนานเอียงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ โคแอกกูเลชัน - ฟล็อกคูเลชัน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ปริมาณความขุ่น อัตราการไหลของน้ำดิบ สัณฐานวิทยา ระยะเวลาพัก (Retention time, t) ค่าความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient, G) และ ตัวแปร $G \cdot t$ ที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในถัง ตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของความสูงของชั้นตะกอนที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ

1.2.4 เพื่อศึกษาสัดส่วนโครงสร้างภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ท แคร์รีไฟเออร์

1.2.5 เพื่อศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด เจ็ทแคร์รีไฟเออร์ โดยติดตั้งแผ่นขนานเอียง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับทดลอง (Pilot Scale) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง ณ โรงงานผลิตน้ำสามเสน การประปานครหลวง และห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตในการวิจัย ได้แก่

1.3.1 น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำดิบสังเคราะห์จากน้ำประปาผสมอนุภาคเบนโทไนท์ ให้มีความขุ่นตามที่ต้องการ และใช้น้ำดิบจริงจากโรงงานผลิตน้ำสามเสน

1.3.2 สารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทดลองมี 4 ชนิด คือ สารส้มน้ำ (Aluminium Sulphate) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminum Chloride) เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) และ อลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (Aluminium Chlorohydrate)

1.3.3 ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ที่ใช้ในการทดลอง จะ ใช้ถังตกตะกอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร ปริมาตร 243 ลิตร ซึ่ง ออกแบบโดยใช้เกณฑ์การออกแบบถังตกตะกอนในการออกแบบ

1.3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ ความขุ่น ค่าพีเอช และความเป็นต่าง เพื่อนำไปคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดน้ำของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ท แคร์รีไฟเออร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชัน เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน

1.4.2 ทราบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแควร์รีไฟเออร์ กรณีที่ปริมาณความขุ่นและอัตราการไหลของน้ำดิบเปลี่ยนแปลง และทราบผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในถังตกตะกอน

1.4.3 ทราบความสูงของชั้นตะกอนที่เหมาะสมกับถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแควร์รีไฟเออร์

1.4.4 ทราบสัดส่วนที่เหมาะสมของการดำเนินการด้วยถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแควร์รีไฟเออร์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบจริงต่อไป

1.4.5 ทราบผลของการเพิ่มประสิทธิภาพถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแควร์รีไฟเออร์โดยการเพิ่มแผ่นขนานเอียง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตน้ำประปา

วัตถุประสงค์หลักในการทำงานของระบบผลิตน้ำประปา ได้แก่ การผลิตน้ำสะอาดที่เหมาะสมสำหรับการอุปโภค - บริโภค ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะต้องปราศจากจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคและสารพิษ รวมทั้งจะต้องไม่มีรส กลิ่น และสิ่งที่น่ารังเกียจ นอกจากนี้แล้วราคาของน้ำประปายังต้องมีความเหมาะสมต่อผู้บริโภค

2.1.1 ส่วนประกอบของระบบผลิตน้ำประปา

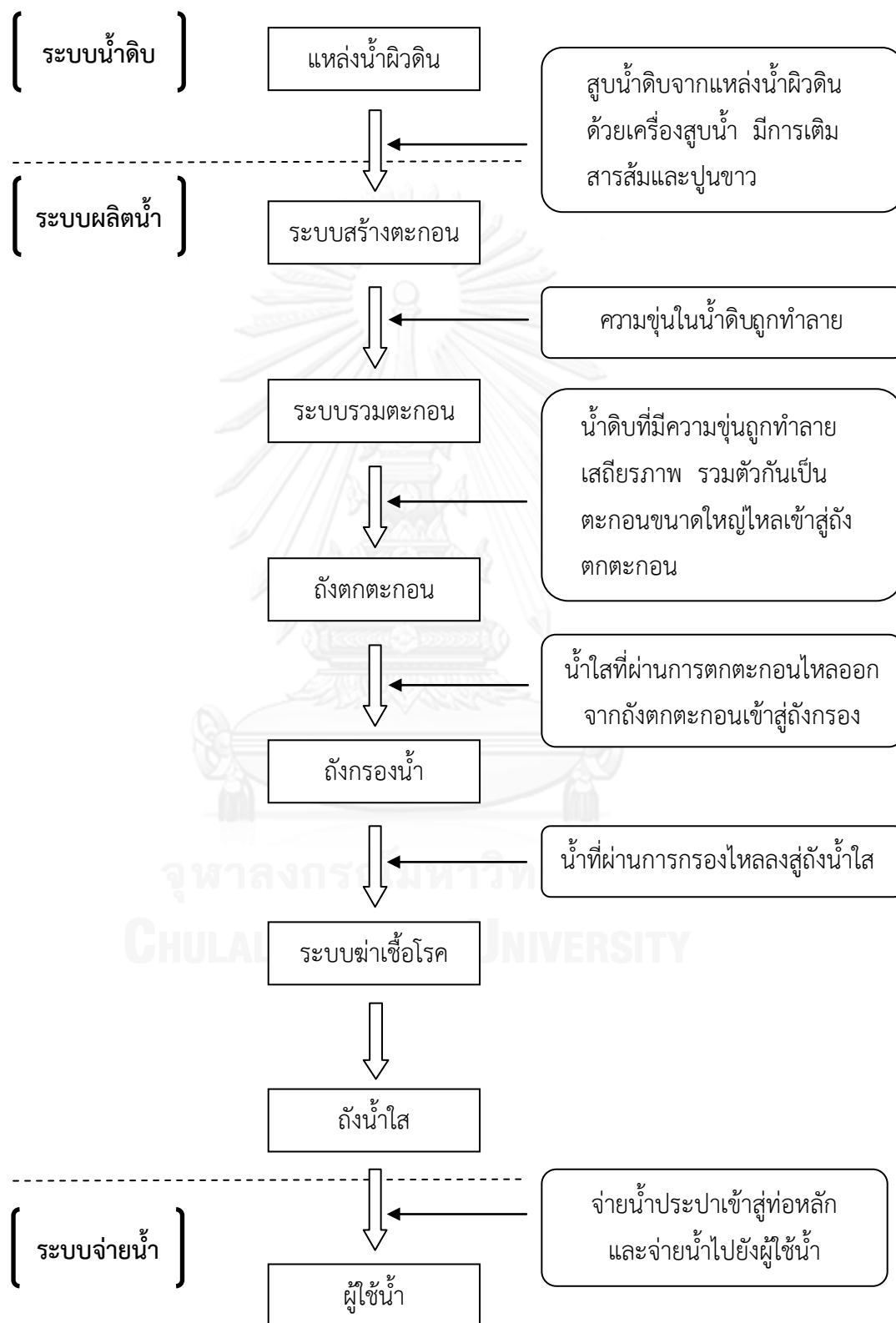
ระบบน้ำดิบ การเลือกแหล่งน้ำดิบเพื่อที่จะนำมาผลิตน้ำประปาจะต้องเลือกแหล่งน้ำดิบที่ปริมาณน้ำเพียงพอตามความต้องการของการผลิตตลอดปีและจะต้องมีคุณภาพน้ำที่ค่อนข้างสะอาดเหมาะสมที่จะนำมาผลิตน้ำประปา ไม่มีสารพิษหรือสิ่งอื่นใดที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพผู้ใช้น้ำ เจือปน นอกจากนี้แล้วยังควรเลือกแหล่งน้ำดิบที่อยู่ใกล้กับระบบผลิตน้ำประปามากที่สุดเพราะเป็นการลดระยะทางและค่าใช้จ่ายในการขนส่งน้ำ ซึ่งแหล่งน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปามี 2 ประเภท คือน้ำผิวดินและน้ำบาดาล แต่แหล่งน้ำดิบหลักที่นิยมนำมาผลิตน้ำประปาคือน้ำผิวดิน

ระบบผลิตน้ำประปา ซึ่งประกอบด้วยระบบทำความสะอาดน้ำและระบบฆ่าเชื้อโรค โดยระบบทำความสะอาดน้ำนั้นความจำเป็นของระบบจะขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำของแต่ละแหล่ง สำหรับกระบวนการทำความสะอาดน้ำประปาอาจแบ่งได้เป็นกระบวนการบำบัดทางกายภาพ กระบวนการบำบัดทางเคมี หรืออาจใช้ทั้งสองกระบวนการรวมกันได้

ระบบขนส่งและแจกจ่ายน้ำ จะมีหน้าที่นำน้ำจากแหล่งน้ำดิบมายังระบบทำความสะอาดและน้ำประปาที่ผลิตได้ไปแจกจ่ายยังผู้ใช้น้ำ โดยระบบขนส่งน้ำจะยาวหรือสั้นนั้นขึ้นอยู่กับระยะทางจากแหล่งน้ำดิบมายังระบบทำความสะอาดน้ำประปาและชุมชนที่ใช้บริการน้ำประปา วิธีการขนส่งน้ำอาจใช้วิธีการไหลตามธรรมชาติหรือไหลด้วยเครื่องสูบน้ำ สำหรับการขนส่งน้ำของน้ำดิบนิยมเป็นแบบรางเปิด (Open Channel) ส่วนท่อขนส่งน้ำประปานิยมใช้แบบท่อปิดภายใต้แรงดัน (Pressure Pipe) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศและปัจจัยอื่นๆ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

2.1.2 ระบบผลิตน้ำประปา

กระบวนการผลิตน้ำประปาผิวดิน



หน้าที่และองค์ประกอบในระบบประปาผิวดิน มีรายละเอียดดังนี้

2.1.2.1 ระบบน้ำดิบ

ระบบน้ำดิบเป็นระบบต้นทางการผลิตน้ำประปา ซึ่งจะประกอบไปด้วย

1) แหล่งน้ำผิวดิน ได้แก่ น้ำจากแม่น้ำ คลอง ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ หนอง และบึง เป็นแหล่งน้ำดิบที่สำคัญมากในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากมีปริมาณมากกว่าแหล่งน้ำดิบอื่นและสะดวกต่อการนำมาใช้ประโยชน์ แต่การไหลนองบนพื้นดินทำให้น้ำผิวดินได้รับความสกปรกจากสิ่งแวดล้อม โดยมักมีความขุ่นและสารอินทรีย์ในระดับสูง นอกจากนี้ยังมีสารพิษต่างๆ ได้แก่ โลหะหนัก ไนเตรต ฟอสฟอรัส ยาฆ่าแมลง เป็นต้น จากบริเวณเกษตรกรรมมารวมกับน้ำผิวดิน ซึ่งน้ำที่จะนำไปใช้ในการผลิตเป็นน้ำประปาต้องคำนึงถึงคุณภาพและปริมาณของแหล่งน้ำผิวดินให้เหมาะสมเพียงพอต่อการผลิตน้ำประปา

2) การสูบน้ำดิบ ใช้แหล่งน้ำผิวดินส่งไปผลิตเป็นน้ำประปา การผลิตน้ำประปาเริ่มจากโรงสูบน้ำทำการสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลำเลียงเข้าสู่กระบวนการผลิต น้ำดิบที่สามารถนำมาผลิตน้ำประปาได้นั้นต้องเป็นน้ำที่ไม่มีสี กลิ่น รส และสิ่งสกปรกโสโครกปนเปื้อนเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด หลังจากนั้นจะผ่านตะแกรงหยาบ (Trash Rack) และตะแกรงละเอียด (Fine Screen) เพื่อกำจัดสวะ เศษไม้ สาหร่าย ถุงพลาสติก และสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ที่ลอยมากับน้ำดิบ ดักเก็บและป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ที่ไม่ต้องการเหล่านี้ เข้าไปเป็นอันตรายหรืออุดตันเครื่องสูบน้ำและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตน้ำ

3) ท่อส่งน้ำดิบ ใช้สำหรับเป็นท่อส่งน้ำจากแหล่งน้ำดิบมายังระบบผลิตน้ำประปา

4) การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ ทำโดยการเติมสารเคมี เช่น สารส้มและปูนขาว เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ สารละลายสารส้มจะช่วยให้มีการตกตะกอนได้ดีขึ้น และสารละลายปูนขาวจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำ บางครั้งจะมีการเติมคลอรีนเพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนมากับน้ำในขั้นต้นนี้ก่อน

2.1.2.2 ระบบผลิตน้ำ

ระบบผลิตน้ำเป็นระบบที่ส่งต่อมาจากระบบน้ำดิบ ประกอบด้วยกลไกดังต่อไปนี้

1) ระบบสร้างตะกอน โดยการจ่ายสารสร้างตะกอนเข้าผสมกับน้ำดิบ จะมีการปั่นกววนอย่างรวดเร็วเพื่อให้ตะกอนน้ำดิบถูกทำลายเสถียรภาพ

2) ระบบรวมตะกอน เป็นการปั่นกววนของน้ำอย่างช้าๆ เพื่อให้ตะกอนของน้ำดิบมารวมตัวกันทำให้มีขนาดและน้ำหนักเพิ่มขึ้น

3) ถังตกตะกอน ทำหน้าที่ตกตะกอนในน้ำที่ผ่านระบบสร้างตะกอนและระบบรวมตะกอน โดยความเร็วของน้ำที่ไหลเข้าถังตกตะกอนจะลดลง จึงทำให้ตะกอนน้ำดิบที่มีน้ำหนักตกตะกอนลงก้นถังตกตะกอนเหลือแต่ตะกอนเบาที่มีขนาดเล็ก ถ้ามองด้วยตาเปล่า น้ำจะมีลักษณะค่อนข้างใส

4) ถังกรองน้ำ มีหน้าที่กรองตะกอนเบาที่มีขนาดเล็กที่หลุดออกมาจากถังตกตะกอน โดยน้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วยังคงมีตะกอนละเอียดแขวนลอยอยู่บางส่วน (ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู) จะไหลเข้าสู่ถังกรองทรายเพื่อกำจัดตะกอนที่ละเอียดอีกครั้งหนึ่ง น้ำที่ผ่านการกรองขั้นตอนนี้จะมีความใสมากโดยมีความขุ่นไม่เกิน 2 เอ็นทียู

5) ระบบฆ่าเชื้อโรค การฆ่าเชื้อโรคและควบคุมความเป็นกรด - ด่าง น้ำที่ออกจากถังกรองทรายก่อนที่จะนำไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำใสอาจยังมีแบคทีเรียหลงเหลืออยู่ จึงต้องมีการฆ่าเชื้อโรคเพื่อให้ความปลอดภัยสามารถอุปโภคและบริโภคได้ โดยจะใช้คลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อโรค และเติมน้ำปูนขาวเพื่อปรับสภาพสภาวะความเป็นกรด - ด่าง ให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก

6) การควบคุมคุณภาพน้ำประปา ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะน้ำประปาที่ทำการผลิตมาแล้วนั้นจะต้องนำมาวิเคราะห์ตรวจสอบอีกครั้ง ซึ่งต้องดำเนินการอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ได้น้ำประปาที่สะอาด ปลอดภัย สำหรับการอุปโภคบริโภค

7) ถังน้ำใส เป็นถังคอนกรีตหรือถังเหล็ก นิยมทำวางไว้บนพื้น เพื่อให้สามารถทำความสะอาดและซ่อมบำรุงได้สะดวก ทำหน้าที่เก็บกักน้ำที่ผ่านการกรองและฆ่าเชื้อโรคแล้วและเป็นบ่อปฏิบัติการให้กับระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน

2.1.2.3 ระบบจ่ายน้ำ

ระบบจ่ายน้ำจะเป็นระบบที่สูบน้ำผลิตไปยังผู้ใช้น้ำ โดยจะประกอบไปด้วย Surge Tower – หอคอยคุมแรงดันน้ำ ใช้ป้องกันแรงดันน้ำไหลกลับ กรณีเกิดไฟฟ้าดับปั้มน้ำจะหยุดทำงานทำให้แรงดันน้ำในเส้นท่ออุโมงค์ส่งน้ำไหลย้อนกลับมาด้วยกำลังมหาศาลจึงต้องมีหอคอยคุมแรงดันน้ำเพื่อชะลอแรงดันน้ำไหลกลับให้ลดลง

กรณีที่เป็นโรงงานผลิตน้ำประปาขนาดเล็กปั้มน้ำสะอาดจะสูบน้ำจากถังเก็บน้ำสะอาดขึ้นหอดังสูง (Elevation Tank) เพื่อสร้างแรงดันให้คงที่และพื้นที่การจ่ายน้ำไม่ไกลจากโรงงานผลิตน้ำประปา โดยติดตั้งลูกลอยไฟฟ้าหรือ Pressure Switch ไว้ที่หอดังสูงเพื่อส่งสัญญาณไปที่ปั้มน้ำสะอาดให้สูบน้ำขึ้นไปบนถังสูงหรือหยุดสูบน้ำกรณีน้ำเต็มหอดังสูง

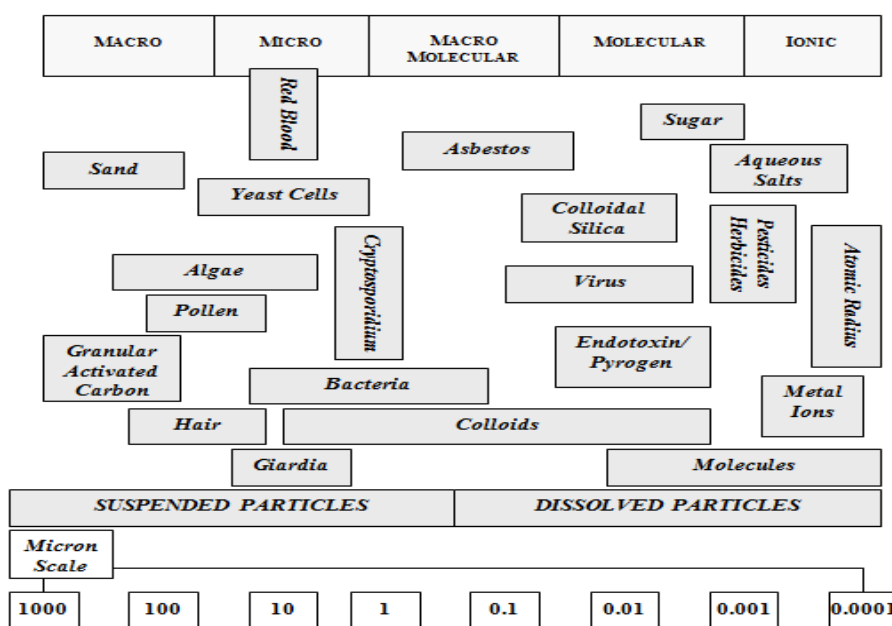
จากขั้นตอนการผลิตน้ำประปาดังที่ได้กล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า ระบบผลิตน้ำประปาทั่วไปประกอบด้วยหลากหลายขั้นตอนและกรรมวิธีในการผลิต ซึ่งจำเป็นต้องใช้ถังปฏิบัติการและพื้นที่เป็นจำนวนมาก จึงมีการนำถังตกตะกอนแบบสัมผัส (Solid Contact Clarifier) ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์ที่มีกระบวนการสร้างตะกอน รวมตะกอน และการตกตะกอนรวมอยู่ในถังปฏิกรณ์เดียวกันมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาจึงมีข้อดีคือสามารถลดขนาดของระบบลงได้

2.2 อนุภาคที่มีผลต่อความขุ่นของน้ำ

อนุภาคในน้ำดิบประกอบไปด้วยสารแขวนลอยต่างๆ เช่น สารอนินทรีย์ จุลินทรีย์ก่อโรค เป็นต้น ซึ่งอนุภาคเหล่านี้อาจจะดูดซับสารพิษ หรือโลหะหนักไว้ที่ผิวของอนุภาคทำให้ความเป็นพิษของน้ำเพิ่มขึ้น และนอกจากนั้นแล้วยังทำให้ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคโดยสารฆ่าเชื้อลดลง

เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้จะเป็นที่หลบซ่อนของจุลินทรีย์ ดังนั้นองค์ประกอบหลักในการทำน้ำประปา คือการกำจัดความขุ่น

อนุภาคคอลลอยด์หรือสารแขวนลอยเป็นสาเหตุของความขุ่นในน้ำ โดยความยากง่ายในการกำจัดความขุ่นในน้ำจะขึ้นกับขนาดของอนุภาค ความขุ่นที่เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่ย่อมสามารถกำจัดได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ดังนั้นความขุ่นที่สร้างปัญหาเกี่ยวกับการผลิตน้ำประปามักเกิดจากอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal Particle) โดยทั่วไปมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10^{-6} มิลลิเมตร (1 นาโนเมตร) จนถึง 10^{-3} มิลลิเมตร (1 ไมครอน) เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด และนอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุประจำตัวจึงทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันเกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค อนุภาคเหล่านี้จึงมีเสถียรภาพสูงไม่สามารถรวมเป็นฟล็อก (Floc) ได้โดยง่ายโดยพวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีประจุบวก เช่น สารอินทรีย์ สบู่ หรือสารจำพวก Detergent ส่วนพวกที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มักจะมีประจุเป็นลบ เช่น อนุภาคของดินเหนียว (มันลิน ตัณพลเวศม์, 2542)



ภาพที่ 2-1 การจำแนกขนาดของสารต่างๆ ในน้ำ (EPA United States Environmental Protection Agency, 1999)

2.2.1 องค์ประกอบและลักษณะของน้ำขุ่น

ความขุ่นที่พบทั่วไปในน้ำผิวดิน มักเกิดจากการมีสารแขวนลอยอันได้แก่อนุภาคดินที่ไหลมาตามกระแสน้ำ จากภาพที่ 2-2 การเปรียบเทียบขนาดเม็ดดินตามระบบการจำแนกดินต่างๆ จะพบว่าอนุภาคดินที่มีขนาดเล็ก สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้นาน และไม่สามารถตกตะกอนได้ในระยะเวลาที่จำกัด คือ อนุภาคดินเหนียว เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวจะมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาจนไม่

สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง มีเสถียรภาพสูงและมีประจุของไอออนเป็นลบ จึงทำให้ออนุภาคมีแรงผลักันสูงส่งผลให้ไม่เกิดการรวมตัวของอนุภาค เพราะฉะนั้นจึงเป็นปัญหากับระบบการผลิตน้ำประปา

		Grain Size (mm)									
		100	10	1	0.1	0.01	0.001	0.0001			
Classification System	Cobbles	[Visual representation of grain size distribution with vertical bars]									
		Gravel		Sand			Fines (silt and clay)				
Unified		75	4.75		.075						
AASHTO		75	2		.05		.002				
MIT			2		.06		.002				
ASTM			4.75		.075		.002				
USDA		75	2		.05		.002				

ภาพที่ 2-2 การเปรียบเทียบขนาดเม็ดดินตามระบบการจำแนกดินต่างๆ
(Arthon Industry Limited)

2.2.1.1 โครงสร้างของอนุภาคดินเหนียว

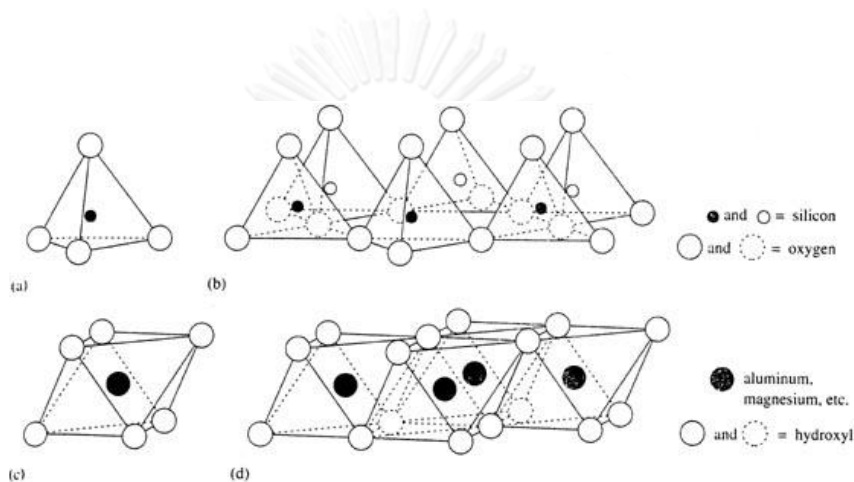
1) ระบบคอลลอยด์ (Colloidal System) หรือสถานะคอลลอยด์ (Colloid State) คือ สภาพหรือระบบที่ประกอบด้วย 2 วัฏภาค (Phase) คือ วัฏภาคที่กระจาย (Disperse Phase) ประกอบด้วยอนุภาคซึ่งเล็กมากและกระจาย วัฏภาคตัวกลางทำกระจาย (Dispersion Medium) เป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สก็ได้ (ยกเว้น ก๊าซจะไม่แขวนลอยในก๊าซ) ดังที่แสดงในตาราง 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงวัฏภาคที่กระจาย (Disperse Phase) (Sakshat Virtual Labs)

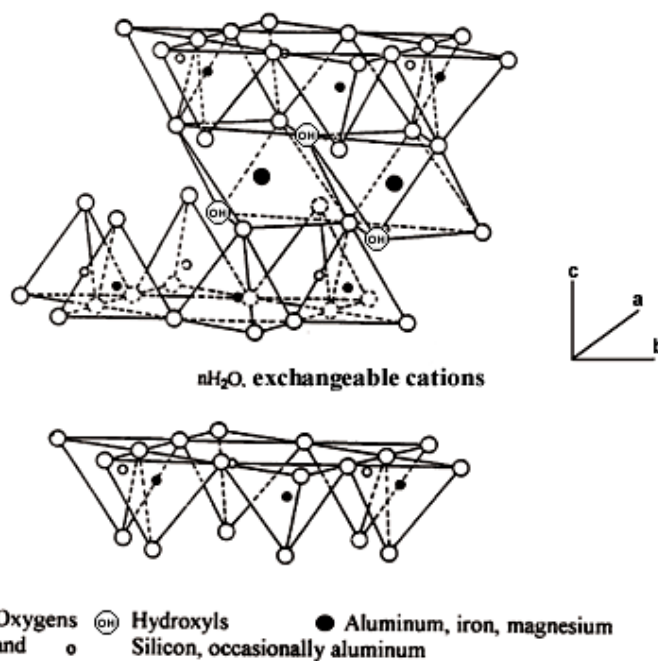
Medium / Phases		Dispersed phase		
		Gas	Liquid	Solid
Continuous medium	Gas	NONE (All gases are mutually miscible)	Liquid aerosol Examples: fog, mist, hair sprays	Solid aerosol Examples: smoke, cloud, air particulates
	Liquid	Foam Examples: whipped cream, Shaving cream	Emulsion Examples: milk, mayonnaise	Sol Examples: blood, pigmented
	Solid	Solid foam Examples: aerogel, Styofome, pumice	Gel Examples: agar, gelatin, jelly, opal	Solid sol Examples: cranberry glass

2) คอลลอยด์ดิน (Soil Colloids) หรือดิน จัดเป็นคอลลอยด์เพราะดินมีส่วนของแร่ต่างๆ และอินทรีย์วัตถุที่มีขนาดเล็กมากและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำและอากาศในดิน

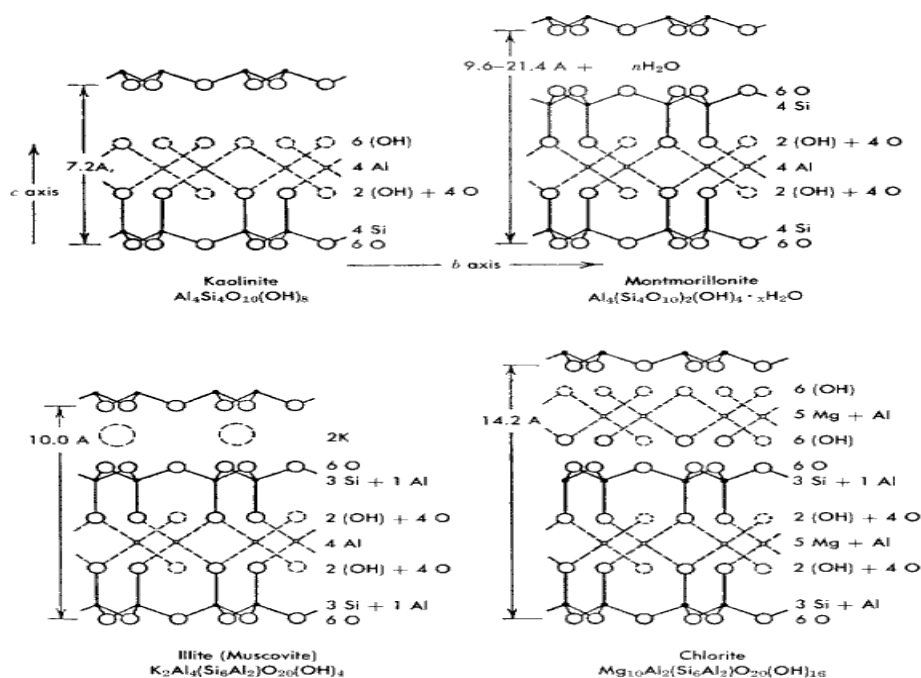
3) ขนาด ชนิด และโครงสร้างของอนุภาคคอลลอยด์ดิน อนุภาคของแข็งในดิน ที่สามารถแขวนลอยในน้ำได้อย่างถาวรส่วนใหญ่ต้องมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร โดยแร่ทุติยภูมิในดิน เช่น แร่ดินเหนียว (Clay Mineral) ส่วนใหญ่จะเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร โดยกลุ่มแร่ที่สำคัญ คือ กลุ่มแร่อะลูมิโนซิลิเกต (Alumino Silicate Minerals) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นซิลิกา (Silica Sheet) และแผ่นอะลูมินา (Alumina Sheet) ซ้อนกัน (นิวัติ อนงค์รักษ์)



ภาพที่ 2-3 องค์ประกอบของแร่ดินเหนียว (Grim, 1986)



ภาพที่ 2-4 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว (Grim, 1986)



ภาพที่ 2-5 โครงสร้างของแร่ดินเหนียวแต่ละชนิด (Grim, 1986)

สำหรับแร่ดินเหนียวที่พบในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะเป็นแร่ในกลุ่มของ Kaolinite Montmorillonite และ Illite สลายตัวปะปนกัน

2.2.1.2 ดินเบนโทไนท์ (Bentonite clay)

ดินเบนโทไนท์หรือแร่ซิลิคอนเคลย์ เป็นดินเหนียวชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างประกอบด้วยแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) เป็นองค์ประกอบหลัก ปะปนอยู่ร่วมกับแร่ธาตุต่างๆ เช่น เฟลด์สปาร์ (Feldspar) แคลไซต์ (Calcite) ซิลิกา (Silica) ยิปซัม (Gypsum) ฯลฯ แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) อยู่ในกลุ่มดินสเมคไทต์ (Smectite) ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ แร่มอนต์มอริลโลไนต์ คือมีลักษณะเป็นแผ่นหรือเกล็ด ขนาดเล็กๆ ซ้อนกัน 3 ชั้น ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่น ประกบกับแผ่นอะลูมินา 1 แผ่น (2:1 type clay) โดยที่อะตอมของอะลูมิเนียมบางส่วน จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของแมกนีเซียม หรืออะตอมของธาตุเหล็ก ซึ่งจะช่วยให้สร้างประจุลบ บนระนาบด้านฐานของโมเลกุลซิลิกา ซึ่งเป็นผลให้เกิดแรงผลักกันระหว่างโมเลกุล สมบัติแรงระหว่างผลึกเป็น oxygen-oxygen linkage ที่มีแรงเบาบาง โมเลกุลของน้ำและแคทไอออนต่างๆ สามารถแทรกซึมเข้าไปคูดซับอยู่ที่ผิวภายในได้ ทำให้เกิดการพองตัวเมื่อมีความชื้น และถ้าระเหยเอาน้ำออกจากผลึกแร่จะมีการหดตัว โครงสร้างทางกายภาพของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ คือ กลุ่มของเกล็ดหรือผลึก ที่มีระนาบฐานที่กว้าง แตกต่างกันไปในช่วงความยาวที่ 0.2 – 2.0 ไมครอน และความหนาที่ 6 – 10 ไมครอน ค่าพีเอช 5.5 มีความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 2.13 – 2.18 ซึ่งในความเป็นจริง ลักษณะและการก่อตัวของผลึกสามารถแตกต่างกันไปได้ตามการกำเนิด และลักษณะเฉพาะที่ของแหล่งแร่ (Means & Parcher, 1963)

อนุภาคดินเบนโทไนท์ที่มีประจุลบเหมือนกันเมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันจะเกิดแรงผลักระหว่างประจุ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้อนุภาคดินเบนโทไนท์แขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างมีเสถียรภาพ และนอกจากนั้นแล้วหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลดินเบนโทไนท์บางส่วนจะมีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบอยู่ โดยโมเลกุลที่เกาะอยู่จะเป็นสิ่งขวางกั้นไม่ให้อนุภาคเข้าใกล้กันโดยตรง จึงเป็นส่วนที่ทำให้อนุภาคสามารถแขวนลอยได้อย่างมีเสถียรภาพอีกด้วย

ดังนั้นการทดลองครั้งนี้จึงใช้ดินเบนโทไนท์ ในการเตรียมน้ำสังเคราะห์ความขุ่น เนื่องจากดินเบนโทไนท์ เป็นแร่ดินเหนียวที่พบในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่ มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.2 – 100 ไมครอน ซึ่งเป็นขนาดที่ครอบคลุมขนาดของอนุภาคที่มีอยู่ในน้ำผิวดิน โดยเป็นความขุ่นที่สร้างปัญหาในโรงงานผลิตน้ำประปา

2.2.2 พฤติกรรมคอลลอยด์

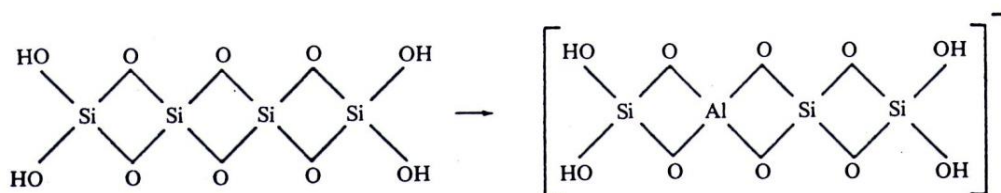
การที่อนุภาคคอลลอยด์สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานานๆ โดยไม่ตกตะกอน เรียกว่าระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูง ดังนั้นจึงต้องการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์โดยการทำให้อนุภาคสามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดและน้ำหนักมากขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้ คอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่าคอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) เนื่องจากคอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิก (ชอบน้ำ) มีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ จึงต้องใช้แรงมากในการบังคับให้อนุภาคต่างๆ เกาะจับกันเป็นกลุ่มก้อนเพราะโมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนสิ่งกีดขวางที่ป้องกันมิให้อนุภาคต่างๆ เข้าใกล้และจับตัวกัน

2.2.2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์

การที่อนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า ทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาคจึงเป็นสาเหตุให้อนุภาคต่างๆ กระจายอยู่ในน้ำโดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนซึ่งเรียกว่า ฟล็อก (Floc) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ

อนุภาคคอลลอยด์ได้ประจุไฟฟ้ามาจากหลายทาง ดังต่อไปนี้

1) ความไม่บริสุทธิ์ของผลึกสาร ประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์อาจได้มาจาก การเปลี่ยนแปลงอะตอมของผลึกอนุภาคก็บอะตอมจากภายนอกซึ่งมีประจุไม่เท่ากัน เช่น Al^{+3} ไปแลกที่กับ Si^{+4} ซึ่งอยู่ในโครงสร้างผลึกของดินเหนียว ทำให้อนุภาคดินเหนียวมีประจุลดลง จึงแสดงอำนาจของประจุลบ



ภาพที่ 2-6 ที่มาของประจุไฟฟ้าของอนุภาคดินเหนียว (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

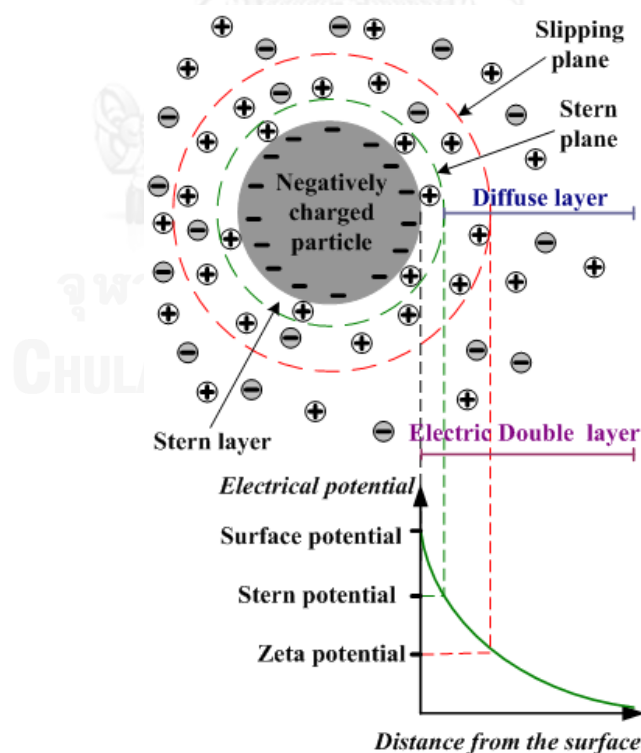
2) ประจุไฟฟ้าของไอออนที่ถูกดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ อนุภาคคอลลอยด์อีกหลายชนิดได้ประจุไฟฟ้าบนผิวเนื่องจากมันสามารถเลือกดูดไอออนบางชนิดมาติดบนผิวได้ อนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในผิวน้ำมักชอบดูดไอออนลบมากกว่าไอออนบวก เพราะไอออนบวกจะมีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบอยู่ เช่น $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ หรือ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ ทำให้ไอออนบวกไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้แน่ชัดเท่าไอออนลบ โมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนสิ่งกีดขวางการจับตัวระหว่างไอออนบวกและอนุภาคคอลลอยด์ ด้วยเหตุดังกล่าวอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำจึงมีประจุลบมากกว่าประจุบวก

3) การละลายตัวของไอออน (Ion Dissolution) คอลลอยด์บางชนิดมีประจุไฟฟ้าจากไอออนต่างชนิดที่ประกอบกันเป็นอนุภาคละลายน้ำได้ไม่เท่ากัน

4) การแตกตัวเป็นไอออนของ Functional Group บนผิวอนุภาค เช่น โพรตีน ได้ประจุไฟฟ้ามาจากการแตกตัวเป็นไอออนของหมู่อะมิโน (Amino Group) หรือหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ เป็นต้น

2.2.3 ทฤษฎีดับเบิลเลเยอร์ (The Double Layer Theory)

รูปแบบดับเบิลเลเยอร์ได้อธิบายสภาพแวดล้อมโดยรอบของไอออนที่มีประจุไฟฟ้าของประจุคอลลอยด์ และอธิบายถึงแรงผลักรังที่มีรอบๆ อนุภาคคอลลอยด์ ดังที่แสดงในภาพที่ 2-7 ที่ได้แสดงให้เห็นถึงสภาวะของคอลลอยด์



ภาพที่ 2-7 รูปแบบของคอลลอยด์ (Kopeliovich)

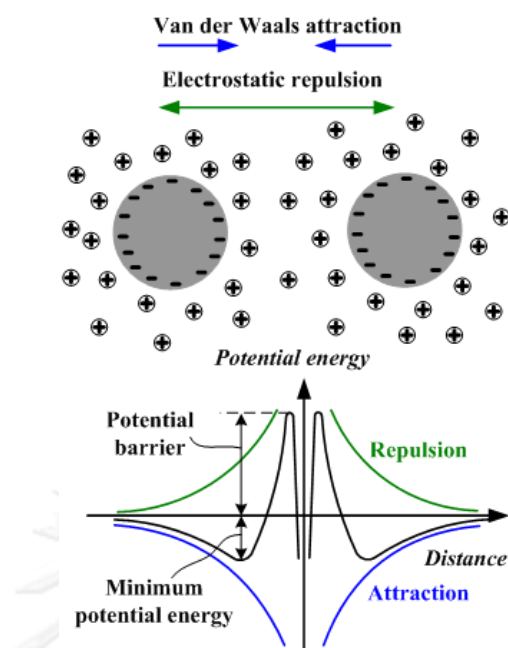
อนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุลบ หมายถึง อนุภาคคอลลอยด์ที่มีชั้นไอออนที่ผิวของอนุภาคชั้นแรกเป็นประจุลบ ซึ่งค่าที่เป็นลบจะไปดึงดูดไอออนประจุบวกบริเวณรอบๆ หรือที่นิยมเรียกว่า Counter-ions มาเกาะติดอย่างหนาแน่น ซึ่งในชั้นของไอออนบวกที่มารวมตัวกันอย่างหนาแน่นนี้จะเรียกว่า ชั้นสเติร์น (Stern layer) ไอออนประจุบวกที่อยู่ถัดจากชั้นสเติร์นจะพยายามใกล้ชิดกับไอออนลบของอนุภาคคอลลอยด์แต่การที่มีการดูดติดที่คงที่ของประจุบวกในชั้นแรก จะทำให้มีผลกับการผลึกของไอออนบวกบริเวณผิว ทำให้เกิดชั้นกระจายของไอออนประจุบวกรอบๆ ชั้นสเติร์น ชั้นประจุบวกที่ห่างออกมา อยู่อย่างกระจายไม่หนาแน่นนี้ เรียกว่า ชั้นกระจาย (Diffuse layer) นอกจากนี้แล้วความหนาแน่นของไอออนประจุบวกจะสูงที่สุดในบริเวณที่อยู่ติดกับอนุภาคคอลลอยด์ และจะค่อยๆ ลดน้อยลงไปตามระยะห่างจากพื้นผิวอนุภาค และความหนาของชั้นกระจายจะขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารละลาย

ทั้งนี้ยังเป็นไปตามศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว (Nernst Potential) และน้อยลงเมื่อห่างออกไป (ดูภาพที่ 2-7) ณ ตำแหน่งที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ แสดงว่าไม่ได้อยู่ภายใต้อำนาจไฟฟ้าของคอลลอยด์ ทำให้การกระจายตัวของไอออนเป็นไปตามปกติ และในชั้นสเติร์นศักย์ไฟฟ้าที่เปลือกจะมีค่าเท่ากับสเติร์นโพเทนเชียล (Stern Potential) ส่วนชั้นกระจายจะครอบคลุมจากเปลือกชั้นในไปถึงตำแหน่งที่อนุภาคคอลลอยด์หมดอำนาจไฟฟ้าพอดี (ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์)

2.2.4 เสถียรภาพของคอลลอยด์

ระบบคอลลอยด์อาจมีเสถียรภาพหรือไม่ก็ได้ อนุภาคคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพจะสามารถดำรงสถานะแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนภายในระยะเวลาจำกัด เมื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์ตกตะกอนและแยกตัวออกจากรู้น้ำก็ถือว่า เสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกทำลายและไม่มีเสถียรภาพอีกต่อไป

เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงขึ้นอยู่กับแรงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงผลักระหว่างอนุภาคที่แรงกว่าแรงดูดจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดูดมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ จะสามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อกได้ แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า Van Der Waals Force เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิด ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค ดังภาพที่ 2-8 จะเห็นได้ว่าแรงดึงดูดมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากๆ โดยปกติแล้วแรงผลักระหว่างอนุภาคที่เกิดจากซีตาโพเทนเชียลไม่เปิดโอกาสให้อนุภาคต่างๆ เข้ามาใกล้จนเกิดการดูดเข้าหากัน



ภาพที่ 2-8 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ (Kopeliovich)

2.3 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation process)

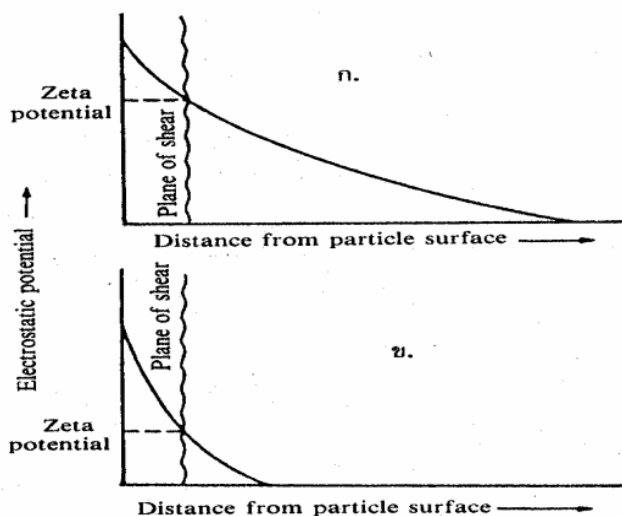
กระบวนการโคแอกกูเลชัน คือ กระบวนการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (Destabilization) โดยการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถทำได้โดยใช้กลไก 4 แบบ คือ

2.3.1 กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layers)

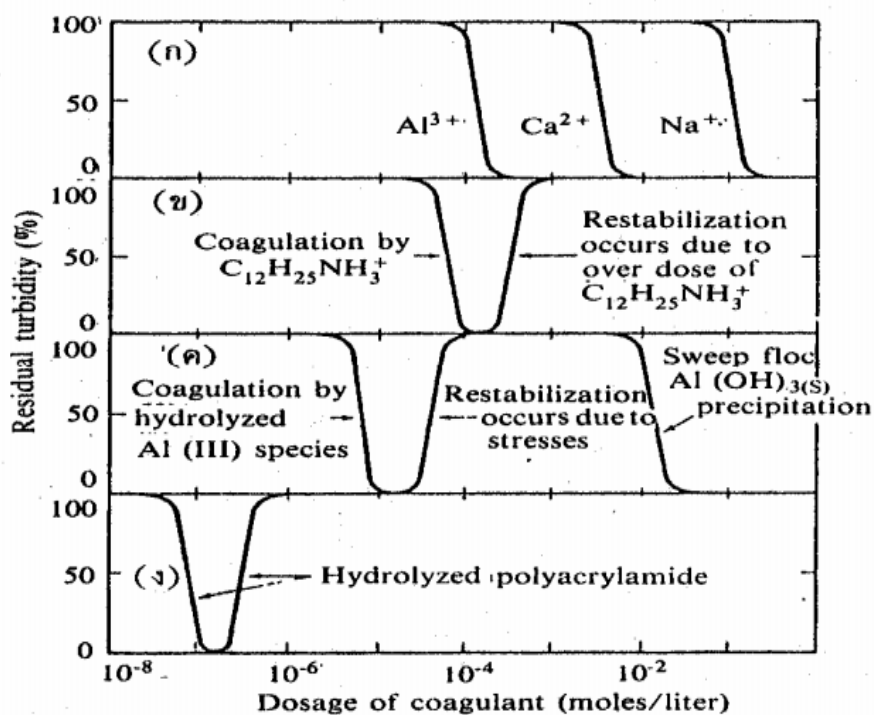
กลไกลดความหนาของชั้นกระจายสามารถทำได้โดยการเพิ่มประจุไอออนที่ตรงข้ามกับประจุของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งจะทำให้ความหนาของชั้นกระจายลดลงเท่ากับเป็นการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าโพเทนเชียลที่ผิวของอนุภาคตามไปด้วย เนื่องจากประจุตรงข้ามที่เข้าไปจะอยู่หนาแน่นบริเวณผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้ประจุที่ผิวของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม ไอออนต่างๆ มีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจายไม่เท่ากัน พบว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ (Valence) 1 2 และ 3 มีอำนาจดังกล่าวเป็นสัดส่วน 1 : 10 : 1000 ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วยังมีข้อน่าสนใจดังนี้ คือ

1) ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้า (ที่มีไอออนประจุบวก) ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยวิธีลดความหนาของชั้นกระจาย ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของคอลลอยด์

2) ไม่ว่าจะเติมไอออนบวกมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้คอลลอยด์เปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวก (Charge Reversal) เพราะว่าจำนวนไอออนต่างชนิดในชั้นกระจายถูกกำจัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์เสมอ โคแอกกูแลนต์ที่เติมมากเกินไปจะอยู่นอกชั้นกระจาย ดังนั้นไม่อาจเติมโคแอกกูแลนต์มากเท่าใดการเปลี่ยนประจุของคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้าม จะไม่สามารถเกิดขึ้น ถ้าโคแอกกูแลนต์ไม่สามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับอนุภาคคอลลอยด์ (ก) ก่อนเติมไอออน (ข) หลังจากการเติมไอออนแล้ว (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2542)



ภาพที่ 2-10 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ

จากภาพที่ 2-10 จะเห็นว่าแบบ (ก) เป็นการลดความหนาของชั้นกระจายด้วย Al^{3+} , Ca^{+2} และ Na^{+} ต้องการสารเคมีมากที่สุด ส่วนแบบ (ง) เป็นการใช้โพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมโยงให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมตัวกันมีความต้องการสารเคมีโคแอกกูแลนต์น้อยที่สุด (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2542)

2.3.2 กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization)

สารเคมีบางหมู่สามารถดูดติด (Adsorbed) บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ถ้าสารเหล่านั้นมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ การดูดติดผิวจะมีผลในทางการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กลไกแบบดูดติดผิวนี้นี้แตกต่างจากกลไกแบบแรก 3 ประการ ดังนี้

1) กลไกแบบดูดติดผิวต้องการไอออนต่างชนิดน้อยกว่ากลไกแบบแรก เนื่องจากไอออนต่างประจุสามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ การทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์จึงได้ผลดีกว่า ไอออนต่างประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้

2) การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดติดผิว เป็นแบบสโตยชิโอเมตริก (Stoichiometric) กล่าวคือ ปริมาณของโคแอกกูแลนต์ที่ใช้เพิ่มหรือลดตามการเพิ่มหรือลดของพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ แต่การทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่เป็นสโตยชิโอเมตริก

3) กลไกแบบดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามกับของเดิม (Charge Reversal) ถ้ามีการใช้สารโคแอกกูแลนต์มากเกินไป เสถียรภาพของคอลลอยด์จะฟื้นขึ้นมาใหม่เนื่องจากมีการเปลี่ยนประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น ข้อที่ควรสังเกตเกี่ยวกับ Charge Reversal ของกลไกแบบดูดติดผิวคือ การที่ไอออนต่างประจุสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์จนประจุเปลี่ยนเป็นตรงกันข้าม แสดงว่ามีปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนต่างประจุกับอนุภาคคอลลอยด์จนสามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกันได้

2.3.3 กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation)

เป็นกลไกที่ใช้สารโคแอกกูแลนต์เติมลงไปเพื่อไปเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์ให้มีน้ำหนักและขนาดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้มีการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์และสามารถตกตะกอนได้ การกำจัดคอลลอยด์โดยกลไกแบบนี้มักเรียกว่าเป็น Sweep Floc Coagulation

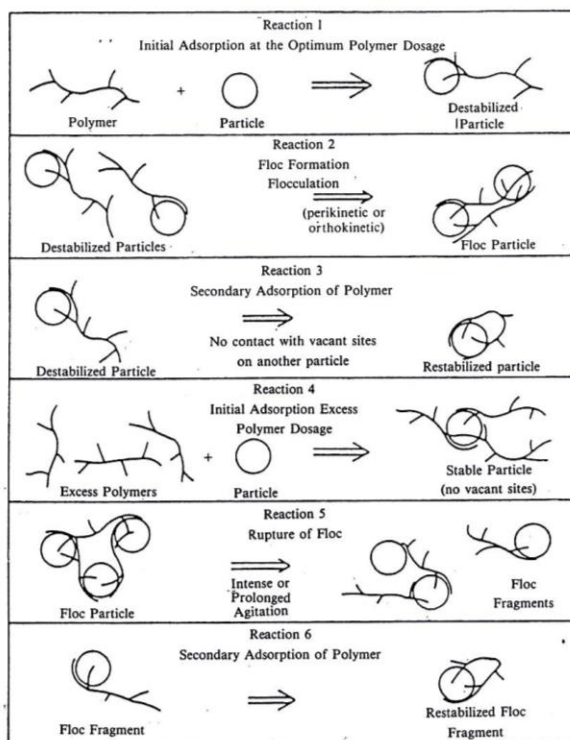
กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับมีข้อแตกต่างจากสองกลไกแรกคือ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจะแปรผกผันกับปริมาณของอนุภาคคอลลอยด์ กล่าวคือ ในน้ำที่มีความขุ่นสูงจะต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ต่ำ ในขณะที่ถ้าน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์สูง เนื่องจากว่าถ้าน้ำมีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสการสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย แม้ว่าจะเกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แล้วก็ตาม แต่การรวมตัวจะไม่เกิดได้ดีเท่าที่ควรจึงใช้สารโคแอกกูแลนต์สูงเพื่อสร้างผลึกจำนวนมาก สำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ถ้าน้ำที่มีความขุ่นสูงโอกาสที่อนุภาคคอลลอยด์จะเคลื่อนมาสัมผัสกันก็มีโอกาสมากขึ้น จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมากเท่าที่น้ำที่มีความขุ่นต่ำ

เนื่องจากกลไกนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ จึงไม่จำเป็นที่จะเกิดปฏิกิริยาที่ซีตาโพเทนเชียลมีค่าต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามค่าพีเอชมีบทบาทสำคัญมากต่อกลไก

แบบนี้ เนื่องจากมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและความสามารถในการตกผลึกของสารต่างๆ โดยสารโคแอกกูแลนต์แต่ละตัวจะมีระดับค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตกตะกอนแตกต่างกัน

2.3.4 กลไกการใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging)

กลไกนี้เป็นการใช้สารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มาเป็นสารโคแอกกูแลนต์ในการกำจัดคอลลอยด์ โดยสารโพลีเมอร์นี้อาจมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ลบ หรือไม่มีเลยก็ได้ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยโมเดลที่เรียกว่า Polymer Bridge ดังภาพที่ 2-11 ตามทฤษฎีนี้ โมเลกุลของสารโพลีเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดอาจเป็นผลจากประจุที่ต่างกันของสารโพลีเมอร์และคอลลอยด์ หรืออาจเป็นแรงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะอยู่ถือว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (Destabilized Particle) อนุภาคสามารถรวมตัวกับอนุภาคอื่นได้โดยใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม แต่ถ้าปลายอิสระของโพลีเมอร์ไม่มีที่จับบนอนุภาคอื่นปลายอิสระจะม้วนตัวมาจับกับอนุภาคเดิม ทำให้ไม่มีปลายอิสระจับอนุภาคอื่นและตำแหน่งว่างบนพื้นผิวลดลง เรียกว่า อนุภาคมีเสถียรภาพกลับคืน (Restabilized Particle) กรณีใช้สารโพลีเมอร์มากเกินไปจะเกิดผลเสียเพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์จนกระทั่งไม่มีตำแหน่งว่างบนพื้นผิวอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่นๆ นอกจากนี้การกวนน้ำที่แรงหรือนานเกินไปจะทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วกลับแตกออกเป็นส่วนๆ และทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับบนอนุภาคเดิม อนุภาคคอลลอยด์จึงคืนเสถียรภาพอีกครั้ง



ภาพที่ 2-11 กลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบเชื่อมด้วยโพลีเมอร์ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.4 กระบวนการฟล็อกคูเลชัน (Flocculation process)

กระบวนการฟล็อกคูเลชัน เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคหรือกลุ่มฟล็อกต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชันเคลื่อนมาสัมผัสหรือกระทบกัน ทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาค ซึ่งจะเป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักของกลุ่มฟล็อก และง่ายต่อการกำจัดอนุภาคออกจากน้ำต่อไป โดยกระบวนการสร้างสัมผัสให้กับอนุภาคต่างๆ มีดังนี้

2.4.1 เพอริไคเนติก ฟล็อกคูเลชัน (Perikinetic Flocculation)

เป็นการสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ โดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian Motion) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เกิดขึ้นเองโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำขึ้นกับอุณหภูมิ จึงกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่แบบนี้เป็นการเคลื่อนที่ที่อาศัยความต่างของอุณหภูมิของน้ำ ในทางปฏิบัติฟล็อกคูเลชันแบบเพอริไคเนติกไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการผลิตน้ำประปาเนื่องจากต้องใช้เวลาานานมาก และการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลดังที่กล่าวมาข้างต้นจะสามารถสร้างสัมผัสให้กับคอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า 0.1 – 1 ไมครอนเท่านั้น

2.4.2 ออโธไคเนติก ฟล็อกคูเลชัน (Orthokinetic Flocculation)

ออโธไคเนติก ฟล็อกคูเลชัน คือ การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่ในน้ำจนมีการสัมผัสเกิดขึ้น วิธีปฏิบัติที่นิยมที่สุดคือ การกวนน้ำในลักษณะต่างๆ ให้มีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกัน เพราะจะทำให้เกิดการสัมผัสเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่เร็วจนเกินไปเพื่อป้องกันการแตกของกลุ่มฟล็อกที่รวมตัวกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมปฏิบัติมากที่สุด โดยขนาดของอนุภาคที่เหมาะสมกับวิธีนี้ควรอยู่ระหว่าง 0.1 – 1 ไมครอนและมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งการทำให้น้ำปั่นป่วนจะสามารถวัดค่าความปั่นป่วนได้ด้วยพารามิเตอร์ที่เรียกว่า ความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient : G) อย่างไรก็ตาม ถ้าอนุภาคมีขนาด 1 ไมครอน จะมีอัตราการรวมกลุ่มเป็นฟล็อกขนาดเล็กสูงกว่าหรือเท่ากับในฟล็อกคูเลชันแบบออโธไคเนติก เมื่อค่าความเร็วเกรเดียนท์มากกว่าหรือเท่ากับ 10 ต่อวินาที ดังนั้นกระบวนการฟล็อกคูเลชันในงานวิจัยนี้จึงควรเป็นแบบออโธไคเนติก

2.5 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันให้ได้ผลดี จะต้องควบคุมสภาวะต่างๆ ให้เหมาะสม โดยปัจจัยที่ต้องควบคุม ได้แก่ ปริมาณและชนิดของสารโคแอกกูแลนท์ ค่าพีเอชของน้ำ ความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาการกวนน้ำ ซึ่งค่าความเร็วเกรเดียนท์และระยะเวลาการกวนน้ำมักจะกำหนดในขั้นตอนการออกแบบตั้งแต่ครั้งแรกและจะเปลี่ยนแปลงได้ค่อนข้างยาก จึงทำให้การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันเพื่อให้เกิดการรวมตัวของกลุ่มอนุภาคให้ได้ผลดีที่สุดมักจะควบคุมที่ปัจจัยของปริมาณและชนิดของสารเคมีที่ใช้ วิธีการที่ใช้ คือ วิธีจาร์เทส (Jar Test) ซึ่งเป็นวิธีที่ทดสอบในบีกเกอร์ (Beaker) และเครื่องมือที่ทดสอบจะเป็น

เครื่องกวนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ ในการทดลองจาร์เทสจะสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยได้ โดยจะขึ้นอยู่กับจุดมุ่งหมายของการทำจาร์เทส

2.5.1 การควบคุมด้วยวิธีจาร์เทส

จาร์เทสเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้อย่างกว้างขวาง โดยวิธีจาร์เทสเป็นวิธีการทดสอบอย่างง่าย ๆ สามารถทำได้โดยใช้การทดลองด้วยบีกเกอร์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองสามารถปรับความเร็วรอบได้ส่วนใหญ่มีกมีใบพัดกวนน้ำ 6 ใบ ในการทดลองแต่ละครั้งจะเลือกชนิดของสารโคแอกกูแลนต์และกำหนดสภาวะต่างๆ ได้แก่ ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง ความเร็วรอบ ระยะเวลาการกวนน้ำ ระยะเวลาในการตกตะกอน และค่าพีเอชของน้ำไว้ค่าหนึ่ง และจะทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ ตามแต่วัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.5.2 ความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient)

ความเร็วเกรเดียนท์ (G) หมายถึง ความปั่นป่วนของน้ำ ซึ่งเกิดจากการที่แต่ละอนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เท่ากัน เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกระบวนการโคแอกกูแลชันและฟล็อกคูเลชันซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในถังกวนเร็วและถังกวนช้าตามลำดับ โดยน้ำในถังกวนเร็วจะต้องมีระดับความปั่นป่วนสูง (G มักไม่ต่ำกว่า 300 ต่อวินาที) เพื่อให้เกิดการผสมระหว่างสารเคมีกับน้ำอย่างรวดเร็ว และพร้อมๆ กันทุกจุด ส่วนน้ำในถังกวนช้าจะมีระดับความปั่นป่วนต่ำกว่ามาก (G มักไม่เกิน 60-100 ต่อวินาที) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟล็อกที่เกิดขึ้นแตกออก

2.5.2.1 การควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนท์ในถังกวนเร็ว

ถังกวนเร็วต้องการความปั่นป่วน หรือความเร็วเกรเดียนท์ (G) สูง และต้องการเวลาในการผสมน้อย พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำเพื่อสร้างความปั่นป่วน G อาจคำนวณได้จากสมการของแคมท์และสไตน์ ดังนี้

$$G = \left(\frac{P}{\mu V} \right)^{0.5} \quad (2.1)$$

G = ความเร็วเกรเดียนท์หรือระดับความปั่นป่วน (S^{-1})

P = พลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน ($N \cdot m/s$)

μ = ความหนืดของน้ำ ($N \cdot s/m^2$)

V = ปริมาตรของน้ำในถังกวนเร็ว (m^3)

2.5.2.2 การควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนท์ในถังกวนช้า

ถังกวนช้าต้องการความปั่นป่วน หรือความเร็วเกรเดียนท์ (G) ต่ำ แต่ต้องการระยะเวลาในการสัมผัสหรือเวลารวมตะกอน (t) ซึ่งตรงกันข้ามกับถังกวนเร็ว โดยระยะเวลาดังกล่าว

ควรมีค่าประมาณ 20–30 นาที ระดับที่เหมาะสมที่สุดของความเร็วเกรเดียนท์ขึ้นอยู่กับค่าของ t ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$(G)^{2.8} t = K \quad (2.2)$$

G	=	ระดับความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสมที่สุด (S^{-1})
t	=	เวลารวมตะกอน ซึ่งเท่ากับเวลากักน้ำของถังกวนช้า (S)
K	=	ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนต์ที่ใช้

ในกรณีที่ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ในปริมาณที่ต่ำกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้สมการดังนี้

$$(G)^{2.8} t = \frac{44 \times 10^5}{C} \quad (2.3)$$

C	=	ความเข้มข้นของสารส้มซึ่งอยู่ในช่วง 0 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
G	=	ระดับความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสมที่สุดที่ส่งผลให้ภายหลังกระบวนการฟล็อกคูเลชันแล้วมีความขุ่นเหลือน้อยที่สุด หน่วยต่อวินาที โดยควรมีค่า 20 – 50 ต่อวินาที

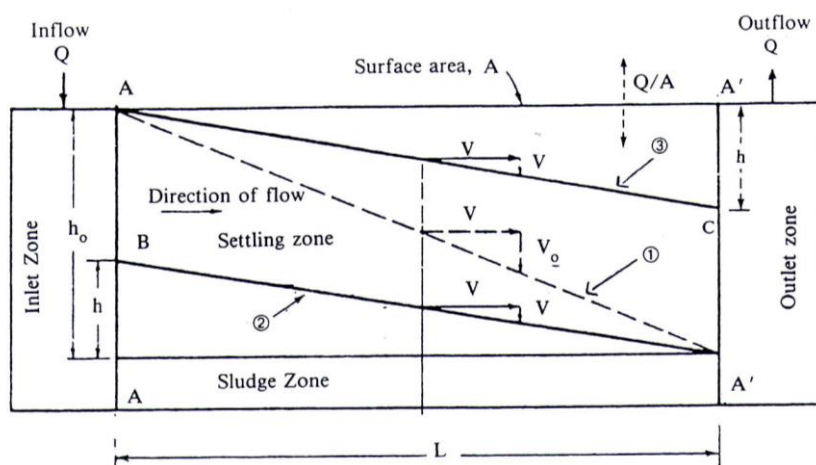
สำหรับงานวิจัยนี้ จะควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูแลชันและฟล็อกคูเลชัน โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์

2.6 กระบวนการตกตะกอน (Sedimentation)

การตกตะกอน เป็นวิธีการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวด้วยแรงดึงดูดของโลก ผลจากการตกตะกอนทำให้ได้ส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ น้ำใสและตะกอนเหลวหรือสลัดจ์ (Sludge) โดยการตกตะกอนแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ตามแต่ระดับความเข้มข้นและลักษณะของอนุภาคที่อยู่ในน้ำ ดังนี้

2.6.1 การตกตะกอนแบบโดด (Discrete Settling)

ภาพที่ 2-12 แสดงให้เห็นถึงถังตกตะกอนแบบอุดมคติ ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญ ได้แก่ บริเวณทางน้ำเข้า บริเวณที่ใช้ตะกอน และบริเวณทางน้ำออก ในกรณีถังอุดมคติจะถือว่าแต่ละอนุภาคน้ำเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณตกตะกอนในลักษณะที่เป็นระนาบแนวตั้ง โดยมีความเข้มข้นของตะกอนคงที่ทั้งระนาบ และอนุภาคน้ำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากับ v และไปถึงระนาบ $A' - A'$ โดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งความเร็ว v นี้เท่ากับอัตราไหลของน้ำ (Q)หารด้วยพื้นที่หน้าตัดในแนวตั้งของถัง หรือ h_0W โดยที่ h_0 และ W เป็นความลึกและความกว้างตามลำดับ



ภาพที่ 2-12 การตกตะกอนแบบโดตในถังตกตะกอนแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า
(มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

สมมติว่าอนุภาคทั้งหมดตกตะกอนอย่างอิสระและอนุภาคที่ตกลงสู่กันถึงถือว่าถูกกำจัดออก ระยะเวลาเพียงในแนว ① แสดงถึงวิถีทางเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดเล็กที่สุดที่สามารถถูกกำจัดออกไปได้ทั้งหมด ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดนี้จะมีความเร็วของการตกตะกอนเท่ากับ V_0 เพราะฉะนั้นอนุภาคใดที่มีความเร็วของการตกตะกอนมากกว่าหรือเท่ากับ V_0 จะถูกกำจัดออกจากถังตกตะกอนโดยที่อนุภาคที่จะเคลื่อนที่ตามแนวระนาบ ① คือ อนุภาคที่เคลื่อนที่มาจากผิวน้ำ แต่ถ้าในกรณีที่อนุภาคเริ่มต้นจากระดับอื่นวิธีการตกตะกอนจะอยู่ในระนาบอื่นที่ขนานกับระนาบ ①

อนุภาคที่มีความเร็วในการตกตะกอนน้อยกว่า V_0 (V) จะมีวิธีการตกตะกอนในระนาบ ② หรือ ③ จะเห็นได้ว่าอนุภาคจะถูกกำจัดออกจากถังตกตะกอนได้ถ้าอนุภาคเข้าสู่ถังตกตะกอน ณ จุดที่ต่ำกว่าจุด B จากการวิเคราะห์พบว่าอนุภาคที่มีอัตราการตกตะกอนน้อยกว่า V_0 แต่สามารถกำจัดได้มีปริมาณเท่ากับ $\frac{h}{h_0}$ หรือ $\frac{V}{V_0}$ โดยที่ h เท่ากับความลึกจากกันถึงจนถึงจุด B ส่วน h_0 เท่ากับความลึกทั้งหมดของระดับน้ำ

ถ้าให้ t = เวลาที่ใช้ในการตกตะกอน

$$\text{จะได้} \quad t = \frac{L}{V} \quad \text{หรือ} \quad \frac{h_0}{V_0}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad V_0 = \frac{h_0}{t} = \frac{h_0 \times V}{L}$$

$$\text{จาก} \quad V = \frac{Q}{h_0 \times W}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } V_0 = \frac{h_0 \times Q}{L \times h_0 \times W} = \frac{Q}{L \times W} ; WL = \text{พื้นที่ผิวหน้าของถัง} = A$$

$$\text{ดังนั้น } V_0 = \frac{Q}{A}$$

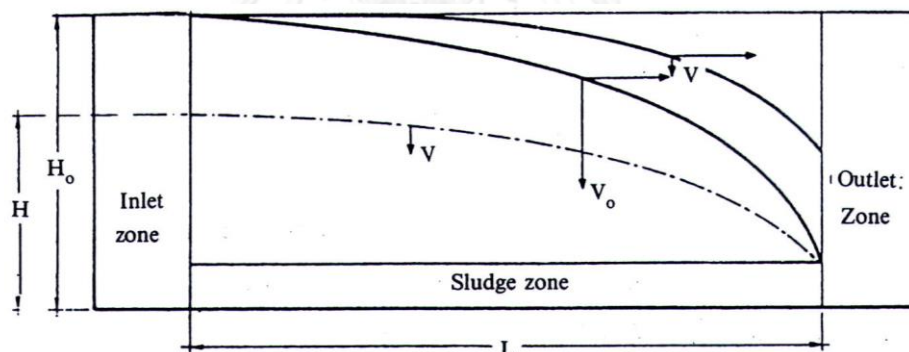
โดยเทอมของ $\frac{Q}{A}$ มีความสำคัญในการออกแบบและการควบคุมการตกตะกอน ซึ่งมีชื่อ

เรียกได้หลากหลาย เช่น Surface Loading Rate, Surface Overflow Rate เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะขอแปลเป็นไทยภาษาไทยว่า อัตราน้ำล้นผิว

2.6.2 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculation Settling)

สำหรับในกรณีที่มีการตกตะกอนของอนุภาคต่างๆ มีโอกาสรวมกลุ่มกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดหรือน้ำหนักที่มากขึ้นจะส่งผลให้ความเร็วในการตกตะกอนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งทำให้วิธีของการตกตะกอนเป็นเส้นโค้ง (ดูภาพที่ 2-13)

การตกตะกอนที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันจัดว่าเป็นการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม ซึ่งประสิทธิภาพการตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับอัตราน้ำล้นผิวและระยะเวลาที่กักน้ำ

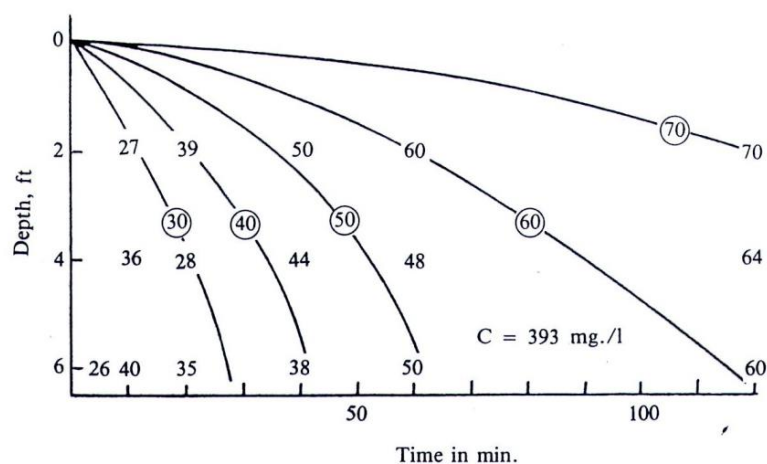


ภาพที่ 2-13 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542)

การวิเคราะห์ผลการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มกระทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากขนาดของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา การเก็บข้อมูลสามารถทำได้โดยการเก็บข้อมูลจากกระบอกใสเพื่อหาความเข้มข้นของอนุภาค โดยจะเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งและระยะเวลาต่างๆ ปริมาณความเข้มข้นที่ลดลง ณ เวลา = t และที่ระดับความลึก = d หมายถึงปริมาณความขุ่นที่มีอัตราเร็วในการตกตะกอนมากกว่าหรือเท่ากับ $\frac{d}{t}$ และเท่ากับปริมาณความขุ่นที่ถูกกำจัด ณ เวลาและความลึก

ดังกล่าว เมื่อการทดลองเสร็จสิ้นจะได้ข้อมูลเปอร์เซ็นต์กำจัดความขุ่น หรือตะกอนแขวนลอยที่ความลึกและเวลาต่างๆ เมื่อเชื่อมจุดที่มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากันจะทำให้ทราบถึงวิธีการตกตะกอนของอนุภาคต่างๆ ที่มีจำนวนของอนุภาคตั้งตัวเลขกำกับ (ภาพที่ 2-14) เช่น เส้นกราฟที่ 50% ทำให้ทราบ

ว่า 50% ของอนุภาคเคลื่อนไปอยู่ที่ความลึกเท่าใดที่เวลาต่างๆ หรือที่เวลาต่างๆ จะตกตะกอนได้เท่าใด และยังบอกถึงอัตราเร็วในการตกตะกอน เนื่องจากตำแหน่งของจุดต่างๆ กำหนดได้ด้วยระดับความลึกและเวลา ซึ่งเมื่อหารกันจะได้อัตราเร็วของการตกตะกอน

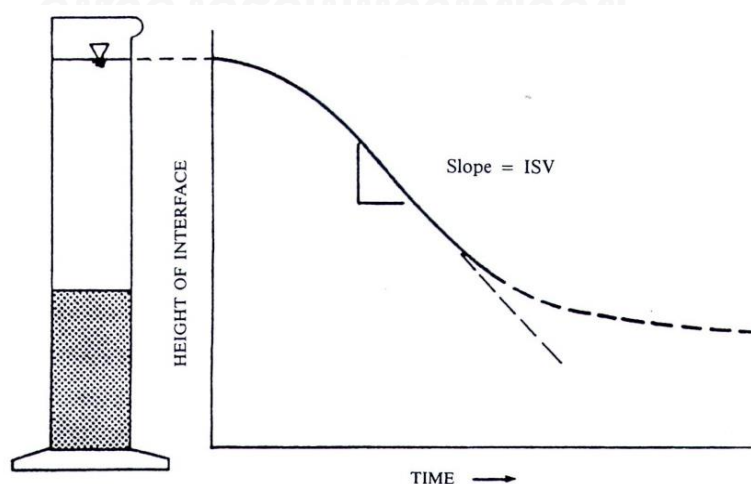


ภาพที่ 2-14 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกอนแขวนลอยที่เวลาและความลึกต่างๆ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.6.3 การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Zone Settling)

การตกตะกอนแบบแบ่งชั้นเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคต่างๆ จับตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่เสมือนเป็นวัตถุก้อนเดียวที่ตกตะกอนด้วยอัตราเดียวกัน เมื่อมีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นจะเห็นการแยกตัวระหว่างชั้นสลัดจ์และน้ำอย่างเด่นชัด (รูปที่ 2-15) การตกตะกอนเช่นนี้ เกิดขึ้นได้เฉพาะกับน้ำที่มีตะกอนแขวนลอยเข้มข้นสูงมาก เช่น ประมาณ 500 มก./ล. หรือมากกว่า เป็นต้น

เมื่อปล่อยให้มีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นในกระบอกตวงหรือกระบอกใสและวัดระดับของชั้นสลัดจ์ที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อนำความสูงของชั้นมาพล็อตเทียบกับเวลา จะได้กราฟที่มีลักษณะดังภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 วิธีหากราฟของการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

ชั้นสลัดจ์จะตกตะกอนด้วยอัตราคงที่และสูงสุดในระยะแรก หลังจากนั้นจะตกตะกอนช้าลงเรื่อยๆ จนในที่สุดเกือบไม่มีการตกตะกอนเกิดขึ้น ระยะแรกอนุภาคต่างๆ แขนวลอยอยู่ในน้ำอย่างหลวม ดังนั้นถึงแม้ว่าการตกตะกอนจะเป็นแบบมีอุปสรรค (Hindered Settling) แต่ก็ยังมีช่องว่างในการตกตะกอนได้อีก ซึ่งการตกตะกอนแรกจะมีค่าคงที่และเรียกว่า อัตราเร็วในการตกตะกอนเริ่มต้น (Initial Settling Velocity ; ISV) อัตราเร็วคงที่นี้มักอยู่ได้ไม่เกิน 20 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย สำหรับการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นนี้ อัตราเร็วเริ่มต้นซึ่งคงที่นี้มีความหมายมาก และใช้เป็นตรรกษที่บอกถึงความสามารถในการตกตะกอนของสลัดจ์ สลัดจ์ที่ตกตะกอนได้ดีย่อมมี ISV สูง และสลัดจ์ที่ตกตะกอนได้ไม่ดีจะมี ISV ต่ำ เมื่อการตกตะกอนผ่านไปช่องว่างในน้ำนั้นจะเหลือน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อถึงจุดหนึ่งอัตราเร็วเริ่มต้น (ISV) จะมีค่าลดลง กล่าวได้ว่าสลัดจ์เริ่มเข้าไปอยู่ในระยะเปลี่ยนแปลง (Transition Zone) ซึ่งเป็นระยะที่อนุภาคบางส่วนเคลื่อนเข้ามาใกล้จนสัมผัสกันพอดี อัตราการตกตะกอนจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งอนุภาคทั้งหมดสัมผัสกันพอดี ต่อจากนี้สลัดจ์จะอยู่ในระยะอัดตัว (Compression Zone) ซึ่งมีการทับถมเพื่อบีบน้ำออกจากชั้นสลัดจ์เป็นครั้งสุดท้าย ระยะอัดตัวนี้มีการเคลื่อนที่ช้ามาก

การตกตะกอนแบบแบ่งชั้นอาจเกิดขึ้นในถังตกตะกอนแบบโซลิตคอนแทคท์ (Solids Contact Clarifier) เนื่องจากการสะสมสลัดจ์ไว้ในถัง

2.6.4 แนวความคิดเรื่องการใช้ท่อหรือแผ่นตกตะกอน

ถ้าให้พิจารณาวิธีการตกตะกอนของอนุภาคต่างๆ ในถังตกตะกอนแบบอุดมคติจากภาพที่ 2-14 ดังที่กล่าวมาแล้วว่า อนุภาคที่ตกตะกอนด้วยอัตราเร็วเท่ากับหรือสูงกว่า V_0 จะถูกกำจัดออกหมด แต่อนุภาคที่ตกตะกอนด้วยอัตราเร็ว V_i ซึ่งน้อยกว่า V_0 จะถูกกำจัดออกในปริมาณที่น้อย นอกจากนี้ยังพบได้อีกว่า การตกตะกอนของอนุภาคขึ้นอยู่กับอัตราน้ำล้นผิว ความลึกและเวลากักน้ำของถังตกตะกอน เพราะทั้งสามตัวแปรมีความสัมพันธ์กันโดยตรง

การลดความลึกของถังตกตะกอนไม่ทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความลึกของถังลดลง พื้นที่หน้าตัดจึงลดลงตามไปด้วย ซึ่งย่อมเป็นผลให้อัตราเร็วการไหลของน้ำมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นถ้าเพิ่มพื้นราบเข้าไปในถังตกตะกอนโดยไม่เปลี่ยนแปลงความลึกของถัง อนุภาคที่มีความเร็วในการตกตะกอนต่ำกว่า V_0 จะถูกกำจัดได้เพิ่มขึ้น เพราะไม่จำเป็นต้องตกตะกอนถึงพื้นกันถึงที่แท้จริง ซึ่งวิธีการทำเช่นนี้ไม่ได้เป็นการลดความลึกของถังตกตะกอนเพียงแต่เป็นการลดความลึกของการตกตะกอนของอนุภาคต่างๆ แนวคิดดังกล่าว ทำให้มีการพัฒนาถังตกตะกอนแบบแผ่น (Plate Setter) และถังตกตะกอนแบบท่อ (Tube Setter) ขึ้นมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.7 ถังตกตะกอนสัมผัส (Solids Contact Clarifier)

ถังตกตะกอนแบบโซลิตคอนแทคท์แครีไฟเออร์ (Solids Contact Clarifier) หรือถังตกตะกอนสัมผัส หมายถึงถังตกตะกอนที่มีกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันรวมอยู่ภายในถังเดียวกัน ถังชนิดนี้อาจมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปหลายอย่าง เช่น Sludge Blanket Clarifier, Pulsator เป็นต้น

ถังโซลิดซ์คอนแทคท์ อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่ 1 แบบมีชั้นตะกอน (Sludge Blanket) ซึ่งถังโซลิดซ์คอนแทคท์แบบมีชั้นตะกอน จะต้องรักษาให้มีชั้นตะกอนคงอยู่ตลอดเวลาในถัง ตกตะกอนโดยไม่แตกกระจาย และไม่อัดตัวเกาะกันแน่นในถังถึง น้ำที่ผสมกับสารเคมีจะเกิด Destabilization แล้วจะถูกบังคับให้ไหลผ่านชั้นตะกอนทำให้เกิดฟล็อกคูลูเลชันขึ้นมาภายในชั้น ตะกอนนั้น น้ำที่ผ่านออกมาจากชั้นตะกอนจะมีแต่น้ำใสเท่านั้น และชนิดที่ 2 แบบหมุนเวียนตะกอน (Sludge Recirculation) เป็นแบบที่มีการหมุนเวียนตะกอนจากบริเวณที่ตกตะกอน ไปยังเขตทวน น้ำซึ่งเป็นทางเข้าของน้ำดิบและสารเคมีและเป็นที่เกิดโคแอกกูเลชัน การสร้างความปั่นป่วนของน้ำ อาจทำได้โดยใช้ใบพัด (วิธีกล) หรือใช้วิธีทางชลศาสตร์ก็ได้

2.7.1 ถังโซลิดซ์คอนแทคท์แบบมีชั้นตะกอน (Sludge Blanket)

ถังตกตะกอนประเภทนี้ตะกอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นตะกอนภายในถังซึ่งทำให้กลุ่ม ตะกอนขนาดเล็กถูกรองด้วยชั้นของตะกอนภายในถังและน้ำใสจะผ่านชั้นตะกอนขึ้นสู่ด้านบน ถ้าน้ำถูกป้อนเข้าระบบอย่างต่อเนื่องตะกอนจะเกิดขึ้นและลอยอยู่ในชั้นของเหลวและจะค่อยๆ จมตัวลงสู่ด้านล่าง แต่ถ้าน้ำมีอัตราการไหลที่มากเกินไปก็จะทำให้ชั้นตะกอนกระจาย หรืออาจจะ ไม่เกิดชั้นตะกอนบริเวณก้นถัง ในทางกลับกันถ้ามีอัตราการไหลของน้ำที่สูงแต่เพิ่มระยะเวลาในการ ตกตะกอนก็จะทำให้เกิดชั้นตะกอนขึ้นได้ สำหรับถังตกตะกอนประเภทนี้ ได้แก่ The Pulsator Clarifier

การทดสอบการเกิดและตกตะกอนโดยวิธีการทำจาร์เทสมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อหา ประสิทธิภาพสูงสุดในการตกตะกอนในระบบซึ่งขึ้นกับคุณภาพน้ำ ชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ เป็นต้น

2.7.1.1 The Pulsator Clarifier

Pulsator Clarifier เป็นชนิดของถังโซลิดซ์คอนแทคท์แบบมีชั้นตะกอนรูปแบบหนึ่ง ที่เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง เป็นบ่อตกตะกอนอย่างง่ายมีประสิทธิภาพสูง สามารถดัดแปลง รูปแบบและติดตั้งได้ง่ายซึ่งขึ้นอยู่กับการต้องการของการดำเนินระบบ ชนิดของ Pulsator Clarifier สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดสุญญากาศ (Vacuum Type) กับชนิดใช้แรงดัน (Pressure Type) (พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ)

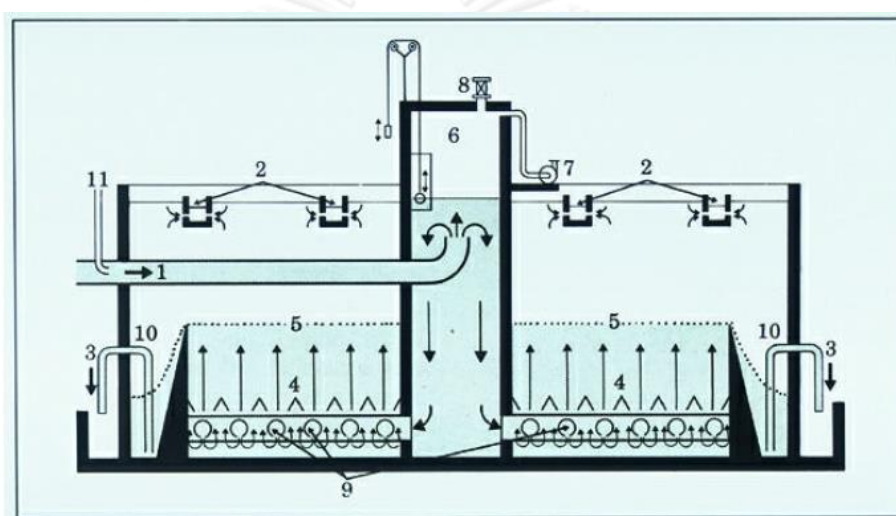
โดยทั่วไป The Pulsator Clarifier จะใช้ในอัตราการผลิตน้ำซึ่งควบคุมด้วยอัตรา น้ำล้นผิวอยู่ที่ 2 – 4 เมตร/ชั่วโมง หรืออาจมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการตกตะกอน

1) Pulsator Clarifier ชนิดสุญญากาศ (Vacuum Type)

ถังตกตะกอนรูปแบบนี้ประกอบไปด้วยถังตกตะกอนที่ด้านล่างมีลักษณะแบน มีชุด ท่อพุน (9) (ดูภาพที่ 2-16) อยู่ที่ฐานของถัง น้ำดิบจะถูกฉีดเข้าระบบจากท่อนี้ ทางด้านบนของถัง จะมีชุดท่อหรือรางรับน้ำใส (2) เพื่อเก็บรวบรวมน้ำใสที่ผ่านการตกตะกอนแล้ว โดยท่อจะมีการเจาะรู เพื่อให้เข้ามาสู่รางรับน้ำ ทำให้ น้ำที่ไหลล้นค่อนข้างนิ่งเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของชั้นตะกอน น้ำดิบเมื่อถูกจ่ายสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ (1) แล้วจะไหลเข้าบริเวณ ตอนกลางถังซึ่งเป็นบริเวณที่สร้างสุญญากาศ “Vacuum Chamber” (6) เพื่อสร้างระดับน้ำขึ้น – ลง

แล้วไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนทางด้านล่างด้วยแรงดันซึ่งจะเกิดกระบวนการกวนเร็ว (Flash Mixing) ขึ้นในบริเวณนี้ น้ำจะไหลลงด้านล่างผ่านช่องเปิดของท่อกระจายน้ำดิบ เริ่มเกิดกระบวนการกวนช้า (Slow Mixing) ขึ้นในบริเวณนี้โดยผ่านท่อกระจายน้ำ (Manifold Pipe) กระจายผ่านท่อข้างปลา (Lateral Pipe) (9) เพื่อให้มั่นใจว่าน้ำดิบจะกระจายเข้าสู่ถังตกตะกอนทั่วทั้งพื้นที่ของถัง น้ำดิบจะไหลผ่านชั้นตะกอนเก่าขึ้นไปด้านบน โดยส่วนที่เป็นน้ำใสจะไหลขึ้นด้านบนและเข้าสู่ท่อรับน้ำซึ่งจะเป็น รูรับน้ำและไหลเข้าสู่ถังกรองต่อไป

วัตถุประสงค์เพื่อให้อนุภาคสารแขวนลอยในน้ำ ซึ่งได้ทำปฏิกิริยากับสารเคมีแล้วมีการรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและตกลงสู่ข้างล่างหรือส่วนที่เป็นชั้นตะกอนของถังทำให้ส่วนที่เป็นน้ำใสแยกออกจากตะกอนเพื่อไหลไปยังถังกรองต่อไป



- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 - Raw water inlet. | 7 - Vacuum pump. |
| 2 - Clarified water outlet, | 8 - Air release valve. |
| 3 - Sludge removal. | 9 - Raw water distribution system. |
| 4 - Stilling baffles. | 10 - Sludge concentrators. |
| 5 - Upper level of sludge blanket. | 11 - Reagent feed |
| 6 - Vacuum chamber. | |

ภาพที่ 2-16 ลักษณะโครงสร้างของถังตกตะกอนแบบ Pulsator Clarifier (Degremont, 1999)

หลักการทำงานของถังตกตะกอนชนิดนี้ คือ เมื่อน้ำดิบที่ผสมกับสารเคมีในท่อน้ำดิบก่อนเข้าสู่ถังตกตะกอน (1) น้ำดิบจะไหลเข้าสู่ถังสุญญากาศ "Vacuum Chamber" ซึ่งเปรียบเสมือนศูนย์ควบคุมกลางเพื่อสร้างระดับน้ำขึ้น - ลงแล้วไหลเข้าสู่บริเวณตกตะกอนทางด้านล่างถัง โดยไหลออกจากท่อที่วางตามแนวพื้นด้านล่างและเจาะเป็นรูเล็กๆ ทำหน้าที่กระจายน้ำให้ไหลขึ้นไปทั่วพื้นที่ของถัง

น้ำใหม่ที่ไหลเข้ามาซึ่งมีการจับรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์กับสารเคมีกลายเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค เมื่อไหลผ่านชั้นตะกอนซึ่งมีการเลี้ยงชั้นตะกอนไว้ในส่วนล่างของถังมีลักษณะเป็นชั้นตะกอนเข้มข้นจะเกิดการชนสัมผัสกันของตะกอนใหม่กับตะกอนเดิม มีผลทำให้เกิดการเร่งให้มีการรวมตัวกันของตะกอนเนื่องจากมีเป้าสัมผัสในปริมาณมากและอนุภาคคอลลอยด์ได้ผ่านการทำลายเสถียรภาพแล้ว เพื่อให้ตะกอนตกลงด้านล่างและมีแรงเกาะกันกลายเป็นกลุ่มตะกอนที่มี

ขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้แล้วชั้นตะกอนยังทำหน้าที่เป็นตัวกรองอีกด้วยโดยชั้นตะกอนจะดักจับตะกอนที่เข้ามาใหม่ไว้ไม่ให้ผ่านขึ้นไปได้ และยังช่วยลดความเร็วของน้ำตะกอนขึ้นด้านบนอีกด้วย (ทิศทางการไหลตรงกันข้าม) จากกระบวนการทั้งหมดดังกล่าวทำให้กระบวนการเกิดน้ำใสสามารถทำได้เร็วขึ้นและทำให้อุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นได้มากขึ้นมีการเกาะรวมตัวกลายเป็นกลุ่มก้อนตะกอนได้มากขึ้นถึงแม้ว่าในน้ำดิบจะมีอนุภาคแขวนลอยในปริมาณน้อย ทำให้สามารถรับอัตราน้ำไหลสูงกว่าถึงตกตะกอนโดยทั่วไป

ห้องสุญญากาศ “Vacuum Chamber” ทำงานโดยมีปั๊มลมเพื่อดูดลมออกจากห้องทำให้ระดับน้ำในห้องสุญญากาศสูงขึ้นมากกว่าระดับน้ำในถังตกตะกอนด้านนอกห้อง ประมาณ 60 – 100 เซนติเมตร (Degremont, 1999) อัตราการดูดอากาศของปั๊มลมจะต้องมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของอัตราการไหลของน้ำเข้าถัง Pulsator Clarifier เมื่อระดับน้ำในห้องสุญญากาศนี้สูงถึงระดับที่กำหนด วาล์วควบคุมจะเปิดออกเพื่อให้อากาศจากบรรยากาศด้านนอกไหลเข้าทำให้ระดับน้ำถูกผลักให้ลดต่ำลงน้ำจะไหลเข้าสู่ท่อด้านล่าง เมื่อระดับน้ำในถังสุญญากาศลดลงเหลือที่ระดับประมาณ 20 เซนติเมตรเหนือระดับน้ำภายนอก วาล์วควบคุมอากาศจากภายนอกจะปิด ปั๊มลมดูดอากาศจะเริ่มทำงานเพื่อดูดอากาศในถังใหม่อีกครั้ง ซึ่งจะทำงานเช่นนี้สลับกันไปเรื่อยๆ

ระยะเวลาที่ใช้ดูดอากาศออกจากถัง ประมาณ 20 – 40 วินาที (Degremont, 1999) และการปรับเวลาสามารถทำได้โดยปรับแต่งประตुरะบายอากาศบนถังสุญญากาศและระยะเวลาที่อากาศจากภายนอกไหลเข้าถังประมาณ 5 – 20 วินาที (Degremont, 1999) ซึ่งจะเป็นเวลาที่ประตुरะบายน้ำอัตโนมัติแบบผีเสื้อ (Solenoid Butterfly Valve) เปิด ระยะเวลาการทำงานนี้สามารถกำหนดได้โดยการปรับอัตราการไหลเข้า – ออกของอากาศที่ประตุน้ำแบบลิ้นซึ่งอยู่ติดกับประตุน้ำอัตโนมัติแบบผีเสื้อ

วัตถุประสงค์ของระบบ Vacuum Chamber ที่ทำให้เกิดการดึงน้ำขึ้นและปล่อยลงสลับกันไปเพื่อให้ น้ำที่ไหลต่อไปเข้าทางด้านล่างของถังตกตะกอนมีแรงที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของชั้นตะกอนในถังทำให้ตะกอนมีการเคลื่อนและหมุนตัวตลอดเวลา เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของตะกอนเก่า ซึ่งอาจทำให้เกิดการเน่าเสียในชั้นตะกอนได้ และทำให้ชั้นตะกอนเข้มข้นใกล้เคียงกันตลอดทั้งชั้น

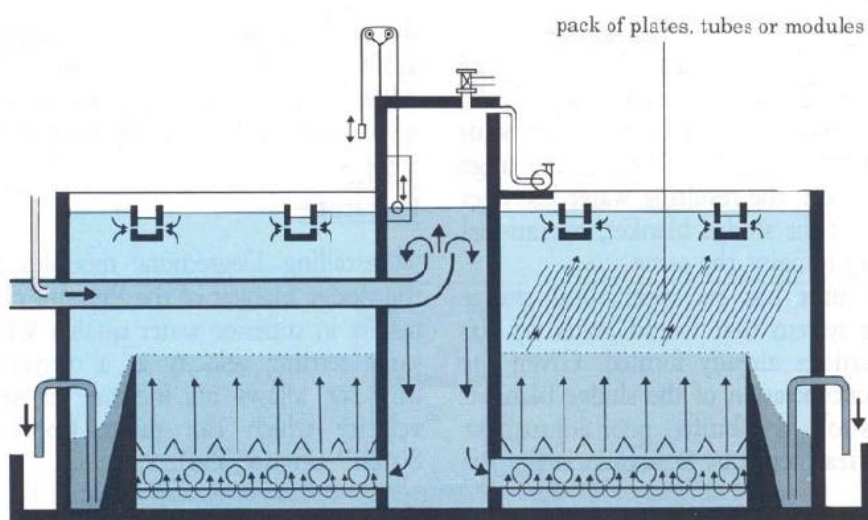
การเริ่มใช้งานถังตกตะกอน จำเป็นต้องมีการสร้างชั้นตะกอนขึ้นมาก่อน ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้อัตราการผลิตไม่เกิน 50% ของอัตราการผลิตสูงสุด ถ้าใช้อัตราการผลิตสูงกว่านี้จะทำให้ตะกอนไม่มีการรวมตัวกันอยู่ในถังจะหลุดลอยไปกับน้ำ ระยะเวลาการสร้างชั้นตะกอนขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบและปริมาณสารเคมีที่ใช้ อาจใช้เวลาตั้งแต่ 3 ชั่วโมงขึ้นไปแต่โดยทั่วไปไม่เกิน 24 ชั่วโมง

ในกรณีที่ต้องหยุดเดินระบบผลิตเกิน 3 วัน จำเป็นต้องระบายตะกอนในถังทิ้งให้หมด เพื่อป้องกันตะกอนเกิดการเน่าเสีย ตะกอนจะไหลไปบ่อตกตะกอนและเก็บตะกอนเพื่อรอการกำจัดต่อไป

เกณฑ์การควบคุมและออกแบบสำหรับถังตกตะกอนประเภทนี้ คือ

- ระยะเวลาที่น้ำดิบอยู่บริเวณตรงกลางถัง (Flocculation Zone) ประมาณ 20 – 40 นาที โดยทั่วไปใช้ค่า 20 นาที (Kawamura, 2000)
- ระยะเวลาของน้ำที่อยู่บริเวณ Sedimentation Zone ประมาณ 1 – 2 ชั่วโมง (Degremont, 1999)
- ค่า Surface Loading ระหว่าง 2 – 4 เมตร/ชั่วโมง (Degremont, 1999)

แต่ถ้าต้องการอัตราการผลิตน้ำให้เพิ่มขึ้นโดยใช้ขนาดถังเท่าเดิมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยการใส่แผ่นขนานเอียง (tube หรือ lamellae module) ลงไปในถัง Pulsator จึงเรียกชื่อใหม่ว่า “Superpulsator” ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มค่า Surface loading ได้เป็น 4 – 8 เมตร/ชั่วโมง (Degremont, 1999) เนื่องจากแผ่นหรือท่อที่ใส่เพิ่มเข้าไปจะทำหน้าที่ให้กลุ่มอนุภาคมีโอกาสที่จะสัมผัสและรวมตัวกันมากขึ้น นอกจากนั้นแล้วแผ่นหรือท่อที่ใส่เพิ่มเข้าไปยังต้องมีช่องว่างระหว่างแผ่นที่กว้างเพียงพอเพื่อป้องกันการอุดตันของกลุ่มตะกอนด้วย



ภาพที่ 2-17 ลักษณะโครงสร้างของถังตกตะกอนแบบ Superpulsator clarifier (Degremont, 1999)

2) Pulsator clarifier ชนิดใช้แรงดัน (Pressure Type)

Pulsator clarifier ชนิดใช้แรงดันจะมีกลไกการทำงานคล้ายกับแบบ Pulsator Clarifier ชนิดสุญญากาศ (Vacuum Type) แต่จะแตกต่างตรงที่ใช้แรงดันในการผลักดันน้ำเพื่อให้เกิดการกวนเร็ว โดยจะมีหอสร้างแรงดัน Pressure Chamber ทำงาน ซึ่งจะอาศัยระดับความสูงของน้ำบริเวณถังวงกลมด้านนอกของหอสร้างแรงดันน้ำ Service Water จะดันอากาศในท่อน้ำบริเวณวงกลมด้านในของหอสร้างแรงดัน เมื่อระดับน้ำในท่อน้ำวงกลมด้านนอกสูงขึ้นมาถึงระดับแรงดันที่ตั้งไว้แล้วก็จะเกิดแรงดันผลักดันน้ำด้านในให้ไหลออกไปทำให้ระดับน้ำถูกผลักให้ลดต่ำลง น้ำก็จะไหลเข้าสู่ท่อด้านล่าง เมื่อระดับน้ำในหอสร้างแรงดันต่ำลงจนถึงระดับที่ตั้งไว้ (บริเวณปลายท่อน้ำเข้า) ก็จะเกิดการกวนในรอบใหม่อีกครั้ง

ระยะเวลาที่น้ำดิบไหลเข้าสู่หอสร้างแรงดัน จนกระทั่งถึงระดับที่จะเริ่มกระบวนการสร้างแรงดันประมาณ 20 วินาที และระยะเวลาที่น้ำเกิดกระบวนการสร้างแรงดัน ประมาณ 5 – 10 วินาที ระยะเวลาดังกล่าวนี้สามารถกำหนดได้โดยการปรับวาล์ว และระดับช่องระบายน้ำตรงกลางถึง Pulsator

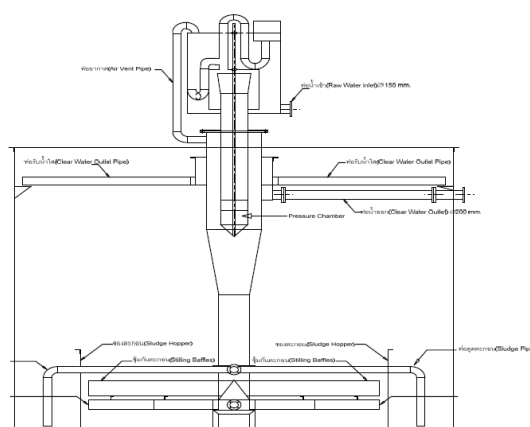
วัตถุประสงค์ของระบบ Pressure Chamber ที่ทำให้เกิดแรงดันที่ความสูงระดับหนึ่งและปล่อยลงด้านล่าง เพื่อให้ น้ำไหลต่อไปยังด้านล่างของถังตกตะกอน มีแรงที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของชั้นตะกอนในถังทำให้ตะกอนมีการเคลื่อนไหวและมีการระบายตะกอนเก่าออกเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของตะกอนเก่าอันอาจทำให้เกิดการเน่าเสียในชั้นตะกอนได้และทำให้ชั้นตะกอนเข้มข้นใกล้เคียงกันตลอดทั้งชั้น

การเริ่มใช้งานถังตกตะกอน จำเป็นต้องมีการสร้างชั้นตะกอนขึ้นมาก่อน ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้อัตราการผลิตไม่เกิน 50% ของอัตราการผลิตสูงสุด ถ้าใช้กำลังการผลิตสูงกว่านี้จะทำให้ตะกอนไม่มีการรวมตัวกันอยู่ในถังจะหลุดลอยออกไปกับน้ำ ระยะเวลาการสร้างชั้นตะกอนขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบและปริมาณสารเคมีที่ใช้ อาจใช้เวลาตั้งแต่ 3 ชั่วโมงขึ้นไป แต่โดยทั่วไปแล้วมักไม่เกิน 24 ชั่วโมง ในกรณีที่ต้องหยุดเดินระบบผลิตเกิน 3 วัน จำเป็นต้องระบายตะกอนในถังทิ้งให้หมด เพื่อป้องกันตะกอนเกิดการเน่าเสีย

เกณฑ์การควบคุมและออกแบบสำหรับถังตกตะกอนประเภทนี้ คือ

- ระยะเวลาที่น้ำดิบอยู่บริเวณตรงกลางถึง (Flocculation Zone) ประมาณ 20 – 40 นาที โดยทั่วไปใช้ค่า 20 นาที (Kawamura, 2000)
- ระยะเวลาของน้ำที่อยู่บริเวณ Sedimentation Zone ประมาณ 1 – 2 ชั่วโมง
- ค่า Surface Loading ระหว่าง 2 – 4 เมตร/ชั่วโมง

แต่ถ้าต้องการอัตราการผลิตน้ำให้เพิ่มขึ้นโดยใช้ขนาดถังเท่าเดิมสามารถใส่ tubes หรือ Lamellae Module ลงไปในถัง Pulsator จึงเรียกชื่อใหม่ว่า Superpulsator สามารถเพิ่มค่า Surface Loading ได้เป็น 4 – 8 เมตร/ชั่วโมง (Degremont, 1999)



ภาพที่ 2-18 ลักษณะโครงสร้างของถังตกตะกอนแบบ Pulsator Clarifier (Pressure Type)
(พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ)

2.7.2 ถังโซลิดซ์คอนแทคท์แบบหมุนเวียนตะกอน (Sludge Recirculation)

ถังตกตะกอนแบบ Solid Contact Clarifier Tank ประเภท Sludge Recirculation เป็นถังกลม แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนบริเวณตรงกลางถังเป็นส่วนที่ใช้สมานตะกอน (วงกลมด้านใน) และส่วนวงกลมด้านนอก (รัศมีด้านนอกถัง) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับตกตะกอน หลักการคือท่อกระจายน้ำดิบเข้าสู่บริเวณกลางถังซึ่งมีการปั่นกววนโดยอาจใช้ใบพัดประเภท Turbine Blade (วิธีกลศาสตร์) หรือใช้แรง Hydraulics (วิธีทางชลศาสตร์) อยู่บริเวณด้านล่างหรือด้านบนท่อน้ำดิบเพื่อทำหน้าที่ให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน และนอกจากนั้นแล้วยังมีการหมุนเวียนตะกอนจากบริเวณตกตะกอนไปยังเขตกวนน้ำซึ่งเป็นทางเข้าของน้ำดิบและสารเคมี ซึ่งบริเวณเขตหมุนเวียนตะกอนนี้เองจะช่วยให้ตะกอนใหม่เกิดขึ้นได้เร็ว ตะกอนจะอยู่ในสภาวะแขวนลอยและอยู่เป็นกลุ่มก้อนมากน้อยตามความถ่วงจำเพาะของมันหรืออัตราเร็วของการไหลขึ้นของน้ำ นอกจากนั้นแล้วไม่ควรที่จะปล่อยให้มีการอัดตัวของตะกอน ซึ่งตะกอนในบริเวณดังกล่าวจะไม่ถูกระบายทิ้งแต่จะใช้สำหรับหมุนเวียนน้ำจะเคลื่อนตัวลงด้านล่างถัง

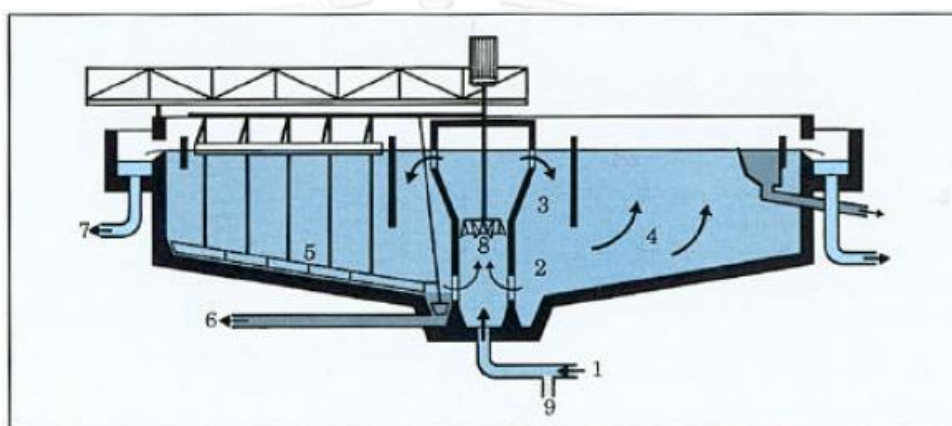
อัตราการผลิตน้ำหน่วยลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับการออกแบบ ยังไม่มีเอกสารยืนยันว่าค่าสูงสุดที่สามารถรับได้ต่อ 1 หน่วยถังสามารถรับได้เท่าไร แต่จะพิจารณาจากค่าอัตราน้ำล้นผิว (Surface Loading) ประมาณ 2 – 4 เมตร/ชั่วโมง

ถังโซลิดซ์คอนแทคท์แบบหมุนเวียนตะกอน (Sludge Recirculation) อาจแบ่งอย่างกว้างๆ ได้ 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้พลังงานกลโดยมีการใส่พลังงานเพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อให้เกิดการปั่นป่วนของน้ำและทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูแลนต์ (Turbine Blade หรือแบบ Paddle Type) และประเภทที่ไม่มีการใส่พลังงานเพิ่ม แต่ทำให้เกิดการปั่นป่วนของน้ำโดยพลังงานน้ำเอง (Hydraulic Type) ซึ่งสามารถทำได้โดยให้ปลายท่อน้ำดิบก่อนส่งเข้าระบบบีบแคบลง ทำให้อัตราการไหลของน้ำบริเวณนี้สูงและไปเกิดการปั่นกววนในท่อ

2.7.2.1 Sludge Recirculation Paddle Type หรือ Turbine Blade

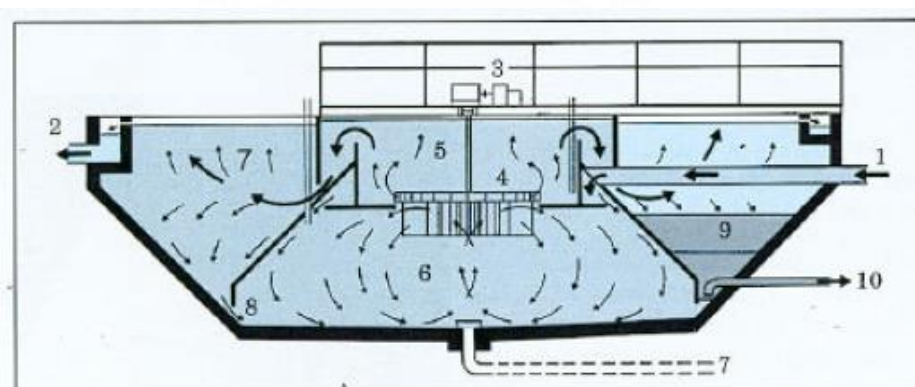
หลักการทำงานของถังตกตะกอนชนิดนี้ คือ เมื่อน้ำดิบผสมกับสารเคมีในท่อน้ำดิบก่อนเข้าสู่บริเวณกลางถังตกตะกอน (ช่องตรงกลางถัง) บริเวณส่วนด้านบนจะมีอุปกรณ์สำหรับสร้างพลังงาน เรียกว่า Drive Unit ประกอบด้วยชุดมอเตอร์ (Motor Drive) และชุดเกียร์ (Gear) เพื่อทดความเร็วรอบของมอเตอร์ และชุดมอเตอร์จะมีแกนเพลาประกอบติดกับใบพัดกวนประเภท Turbine Blade หรือแบบ Paddle อยู่บริเวณด้านล่างท่อน้ำดิบหรือสูงกว่าเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของน้ำให้ขึ้นข้างบนหรือตกลงด้านล่างถังเพื่อสร้างสภาพความปั่นป่วนให้เกิดพลังงานระดับหนึ่งทำให้เกิดการสมานตะกอนเกิดการรวมตัวกันของตะกอนและหลังจากนั้นอนุภาคคอลลอยด์ที่ทำปฏิกิริยากับสารสร้างตะกอนจะเคลื่อนตัวโดยกระจายออกจากบริเวณโซนตรงกลางถังผ่านลงด้านล่างเพื่อเข้าสู่บริเวณตกตะกอน (วงกลมรัศมีด้านนอก) การกระจายตัวของน้ำจะเป็นตามแนวรัศมีของถัง ตะกอนจะเคลื่อนตัวด้วยความเร็วระดับหนึ่งจากบริเวณด้านล่างถังจนขึ้นมาที่ความสูงของถังระดับหนึ่งแล้วความเร็วของตะกอนจะค่อยๆ ลดลงเป็นศูนย์และตกลงไปบริเวณด้านล่างถังกลายเป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ด้วยน้ำหนักของตะกอนและแรงโน้มถ่วงของโลก ตะกอนที่ตกลงมานี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ต้องกำจัดออกจากถัง (Sludge Disposal) และส่วนที่นำมา

หมุนเวียนใหม่ (Slurry Circulation) ส่วนที่ต้องกำจัดออกจากถังจะตกลงไปในช่องรับตะกอน (Sludge Hopper) หลังจากนั้นจะเกิดกลไกการอัดตัวกันของตะกอนซึ่งจะใช้ระยะเวลาหนึ่งจนได้ความเข้มข้นที่ต้องการแล้วจะถูกระบายออกจากถังต่อไป และในบางระบบยังอาจมีตัวกวาดตะกอนบริเวณด้านล่างถังตกตะกอน (Sludge Scraper) เพื่อกำจัดตะกอนบริเวณด้านล่างถังออกไป ตะกอนส่วนที่นำมาหมุนเวียนใหม่ (Slurry Circulation) จะเคลื่อนตัวลงมาบริเวณด้านล่างถังและกลับเข้าไปบริเวณตรงกลางถังทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาทำให้ตะกอนใหม่เกิดได้เร็ว โดยมีค่า Design Criteria ของตะกอนที่นำมาหมุนเวียนใหม่เท่ากับ 3 – 5 เท่าของอัตราการไหลน้ำเข้าถัง (Kawamura, 2000) น้ำส่วนใสเท่านั้นที่สามารถผ่านขึ้นไปบริเวณด้านบนของถังสู่อรับน้ำสะอาด (Trough or Launder) เพื่อไปสู่ถังกรองต่อไป ตัวอย่างถังตกตะกอนที่จัดอยู่ในประเภทนี้ เช่น Turbocirculator Clarifier และ Acclerator Clarifier โดยแสดงในภาพที่ 2-19 และ 2-20



1 - Raw water inlet. 2 - Sludge recycling. 3 - Floc maturation. 4 - Settling zone. 5 - Scrapers. 6 - Excess sludge. 7 - Treated water outlet. 8 - Impeller for mixing raw water and recycled sludge. 9 - Reagent feed.

ภาพที่ 2-19 ลักษณะโครงสร้างของถังตกตะกอนแบบ Turbocirculator Clarifier (Degremont, 1999)



1 - Raw water inlet. 2 - Treated water outlet. 3 - Drive unit. 4 - Turbine. 5 - Primary mixing zone. 6 - Secondary mixing zone. 7 - Clarified water. 8 - Sludge recirculation. 9 - Sludge concentrator. 10 - Excess sludge. 11 - Drain.

ภาพที่ 2-20 ลักษณะโครงสร้างของถังตกตะกอนแบบ Acclerator Clarifier (Degremont, 1999)

จากกระบวนการทั้งหมดดังกล่าวทำให้กระบวนการเกิดน้ำใสสามารถทำได้เร็วขึ้น ทำให้อนุภาคชนสัมผัสกันได้มากขึ้น มีการเกาะรวมตัวกลายเป็นกลุ่มก้อนตะกอนได้มากขึ้น ถึงแม้ว่าในน้ำดิบจะมีอนุภาคในปริมาณน้อยทำให้สามารถรับอัตราการไหลของน้ำได้สูงกว่าถังตกตะกอนโดยทั่วๆ ไป

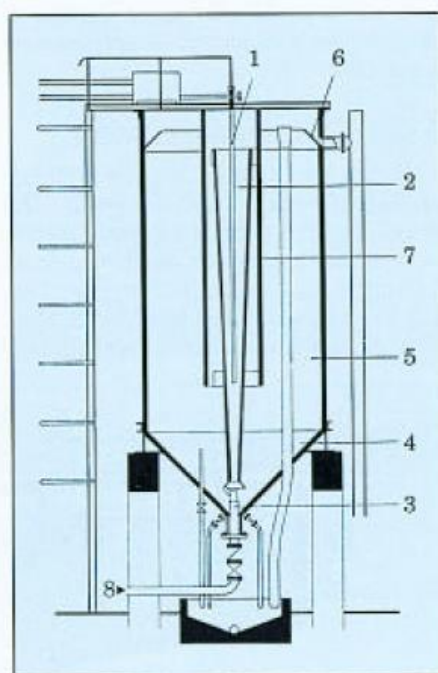
การเริ่มใช้งานถังตกตะกอน จำเป็นต้องมีการสร้างชั้นตะกอนขึ้นมาก่อน ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้อัตราการผลิตไม่เกิน 50% ของอัตราการผลิตสูงสุด ถ้าใช้กำลังการผลิตสูงกว่านี้จะทำให้ตะกอนไม่มีการรวมตัวกันอยู่ในถังจะหลุดลอยออกไปกับน้ำ ระยะเวลาการสร้างชั้นตะกอนขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบและปริมาณสารเคมีที่ใช้ อาจใช้เวลาตั้งแต่ 3 ชั่วโมงขึ้นไปแต่โดยทั่วไปแล้วมักไม่เกิน 24 ชั่วโมง ในกรณีที่ต้องหยุดเดินระบบผลิตเกิน 3 วัน จำเป็นต้องระบายตะกอนในถังทิ้งทั้งหมด เพื่อป้องกันตะกอนเกิดการเน่าเสีย ตะกอนจะไหลไปบ่อตกตะกอนและเก็บตะกอน

เกณฑ์การควบคุมและออกแบบสำหรับถังตกตะกอนประเภทนี้ คือ

- ระยะเวลาที่น้ำดิบอยู่บริเวณตรงกลางถัง (Flocculation Zone) ประมาณ 20 - 40 นาที โดยทั่วไปใช้ค่า 20 นาที (Kawamura, 2000)
- ระยะเวลาของน้ำที่อยู่บริเวณ Sedimentation Zone ประมาณ 1 - 2 ชั่วโมง (Degremont, 1999)
- ค่า Surface loading น้อยกว่า 2.5 เมตร/ชั่วโมง กรณีที่ต้องการตกตะกอนความกระด้าง(Softening) Surface Loading ระหว่าง 5 - 7 เมตร/ชั่วโมง (Degremont, 1999)

2.7.2.2 Sludge Recirculation Hydraulic Type

หลักการทำงานของถังตกตะกอนชนิดนี้จะคล้ายกับ Sludge Recirculation Paddle Type หรือ Turbine Blade คือ ภายในถังปฏิบัติการจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนกลางถังจะเป็นส่วนที่เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน และส่วนรอบนอกของถังจะเป็นส่วนที่เกิดการตกตะกอน จะมีข้อที่แตกต่างกันตรงที่ถังตกตะกอนประเภทนี้จะไม่ใช่แรงเพื่อทำให้เกิดการปั่นป่วนของน้ำ แต่จะใช้แรงของน้ำขณะเข้าระบบให้ปลายท่อมีขนาดเล็กทำให้น้ำที่เข้าถังปฏิบัติการมีความเร็วสูงซึ่งจะเกิดการปั่นป่วนของน้ำภายในส่วนกลางของถังตกตะกอน จึงทำให้เกิดการสมานตะกอนขึ้นในบริเวณนี้ หลังจากนั้นน้ำก็จะไหลเข้าสู่บริเวณของการตกตะกอนซึ่งอยู่บริเวณรอบนอกของถังตกตะกอน การกระจายตัวของน้ำจะเป็นตามแนวรัศมีของถัง ตะกอนจะเคลื่อนตัวด้วยความเร็วระดับหนึ่งจากบริเวณด้านล่างถังจนขึ้นมาที่ความสูงของถังระดับหนึ่ง ความเร็วของตะกอนจะค่อยๆ ลดลงเป็นศูนย์และตกลงไปบริเวณด้านล่างถังกลายเป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยน้ำหนักของตะกอนและแรงโน้มถ่วงของโลกเช่นเดียวกับแบบแรก และนอกจากนั้นยังมีลักษณะการเวียนตะกอนที่เหมือนกัน คือ ตะกอนส่วนที่นำมาหมุนเวียนใหม่ (Slurry circulation) จะหมุนเวียนกลับเข้าไปบริเวณตรงกลางถังทำหน้าที่ในการเร่งปฏิบัติการทำให้ตะกอนใหม่เกิดได้เร็ว โดยมีค่า Design Criteria ของตะกอนที่นำมาหมุนเวียนใหม่เท่ากับ 3 - 5 เท่าของอัตราการไหลของน้ำเข้าถัง (Kawamura, 2000) น้ำส่วนใสเท่านั้นที่สามารถผ่านขึ้นไปบริเวณด้านบนของถังที่อรับน้ำสะอาด (Trough or Launder) เพื่อไปสู่ถังกรองต่อไป ตัวอย่างถังตกตะกอนประเภทนี้ได้แก่ Jet Clarifier



1 - Reagents. 2 - Reaction zone. 3 - Ejector.
4 - Sludge concentration. 5 - Settling zone.
6 - Settled water collector. 7 - Skirt. 8 - Raw water inlet.

ภาพที่ 2-21 ลักษณะโครงสร้างของถังตกตะกอนแบบ Jet clarifier (Degremont, 1999)

สำหรับการเริ่มใช้งานถังตกตะกอนประเภทนี้ ต้องมีการสร้างชั้นตะกอนขึ้นมาก่อน ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้อัตราการผลิตไม่เกิน 50% ของอัตราการผลิตสูงสุด ถ้าใช้กำลังการผลิตสูงกว่านี้จะทำให้ตะกอนไม่มีการรวมตัวกันอยู่ในถังจะหลุดลอยออกไปกับน้ำ ระยะเวลาการสร้างชั้นตะกอนขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบและปริมาณสารเคมีที่ใช้ อาจใช้เวลาตั้งแต่ 3 ชั่วโมงขึ้นไปแต่โดยทั่วไปแล้วมักไม่เกิน 24 ชั่วโมง ในกรณีที่ต้องหยุดเดินระบบผลิตเกิน 3 วัน จำเป็นต้องระบายตะกอนในถังทิ้งให้หมด เพื่อป้องกันตะกอนเกิดการเน่าเสีย ตะกอนจะไหลไปบ่อตากตะกอนและเก็บตะกอน

เกณฑ์การควบคุมและออกแบบสำหรับถังตกตะกอนประเภทนี้ คือ

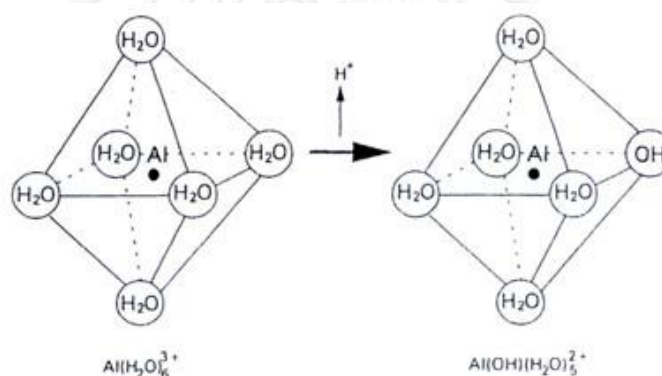
- ระยะเวลาที่น้ำดิบอยู่บริเวณตรงกลางถัง (Flocculation Zone) ประมาณ 20 – 40 นาที โดยทั่วไปใช้ค่า 20 นาที (Kawamura, 2000)
- ระยะเวลาของน้ำที่อยู่บริเวณ Sedimentation Zone ประมาณ 1 – 2 ชั่วโมง (Degremont, 1999)
- ค่า Surface Loading น้อยกว่า 2.5 เมตร/ชั่วโมง (Degremont, 1999)

สรุปข้อแตกต่างระหว่างถังโซลิดซ์คอนแทคต์แบบมีชั้นตะกอน (Sludge Blanket) กับถังโซลิดซ์คอนแทคต์แบบหมุนเวียนตะกอน (Sludge Recirculation) แม้ว่าถังโซลิดซ์คอนแทคต์ทั้งสองชนิดมีชั้นตะกอนบริเวณกันถังทั้งสองชนิดแต่ข้อแตกต่างของถังตกตะกอน คือถังโซลิดซ์คอนแทคต์แบบมีชั้นตะกอน (Sludge Blanket) จะมีชั้นตะกอนทำหน้าที่กรองตะกอน แต่ถัง

โซลิดซ์คอนแทคท์แบบหมุนเวียนตะกอน (Sludge Recirculation) ชั้นตะกอนไม่ได้ทำหน้าที่กรองตะกอนเพียงแต่รอไว้หมุนเวียนและระบายออก

2.8 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

สารโคแอกกูแลนต์ คือ สารที่มีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งสารที่เลือกใช้นั้นควรจะเป็นสารที่หาง่าย ราคาถูก และไม่เป็นพิษหลงเหลือในน้ำ ซึ่งสารโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง คือ สารประกอบเกลือของโลหะ (Hydrolyzing Metal Salt ; HMS) โดยมากจะอยู่ในรูปของเกลือซัลเฟต (Sulfate) หรือคลอไรด์ (Chloride Salts) กับไอออนโลหะของ Al^{3+} หรือ Fe^{3+} เมื่อละลายน้ำสารจะอยู่ในรูปประจุบวกซึ่งสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงมากกับออกซิเจนอะตอมจากโมเลกุลน้ำที่มาล้อมรอบได้ถึง 6 โมเลกุล และเนื่องจากพันธะระหว่างออกซิเจนอะตอมและไฮโดรเจนอะตอมของโมเลกุลน้ำเป็นพันธะที่อ่อน ส่งผลให้ไฮโดรเจนอะตอมสามารถแตกตัวหลุดออกมาในสารละลายได้ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ซึ่งจะทำให้เกิด Aluminium และ Ferric Hydroxide ขึ้นในสารละลาย



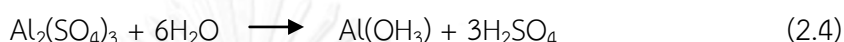
ภาพที่ 2-22 แสดงลักษณะโครงสร้างของสารละลายอลูมิเนียมไอออน (Letterman, Amirtharajah, & O'Melia, 1999)

กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีหลายกลไกดังที่กล่าวมาแล้ว แต่กลไกหลักๆ ที่เกิดขึ้นมี 2 กลไก คือ กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization) และกลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation) เพื่อเพิ่มขนาดและน้ำหนักของอนุภาคทำให้เกิดการตกตะกอนได้ง่ายขึ้น

ลักษณะจำเพาะของกลไกที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสองชนิด คือ ค่าความขุ่น และค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ของน้ำก่อนการบำบัด ในปฏิกิริยาดูดติดผิวและทำลายประจุจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 0.1 – 1 วินาที ส่วนกลไกการสร้างผลึกจะเกิดขึ้นช้ากว่าโดยจะเกิดขึ้นในระยะเวลา 3 – 17 วินาที ซึ่งความแตกต่างของกลไกทั้งสองชนิดนี้ในขั้นตอนการกวนผสมอย่างรวดเร็วยังไม่มี การวิเคราะห์ เพราะฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการกวนผสมระหว่างสารเคมีกับน้ำดิบอย่างรวดเร็วที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ (≤ 1 วินาที) เพื่อให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

2.8.1 สารประกอบอลูมิเนียม (Aluminium Compound)

เกลือของสารประกอบอลูมิเนียมโดยปกติที่ใช้ คือ อลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium Sulphate ; Alum) หรือสารส้ม ซึ่งลักษณะที่สามารถพบได้โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของของแข็ง เกล็ดผง หรือน้ำ สูตรโครงสร้างโมเลกุล คือ $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ โดย n ที่พบจะขึ้นอยู่กับการผลิต โดยมากจะพบอยู่ในระหว่าง 12 ถึง 16 เมื่อเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ผลผลิตของการแตกตัวของสารส้มจะเป็นกรดซัลฟิวริกและน้ำ ตัวอย่างเช่น ในรูปของอะลูมิเนียมอย่างง่าย คือ $Al(OH)_3$ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถอธิบายได้ดังสมการ 2.4



จากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ คือ เกลือกรดและน้ำ เพราะฉะนั้นน้ำจะต้องมีความเป็นด่างมากพอ (ตามธรรมชาติหรือเติม) เพื่อที่จะเพียงพอกับการสะเทินกับกรดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเพื่อที่จะรักษาระดับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูแลนต์และฟล็อกกูแลนต์ เนื่องจากค่าพีเอชของน้ำเป็นปัจจัยกำหนดความเข้มข้นและชนิดของไอออนคอมเพล็กซ์ต่างๆ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งโดยทั่วไปสามารถกล่าวได้ว่า สารส้มปริมาณ 1 มล./ล. ต้องการค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ในรูปของ $CaCO_3$ ที่ใช้ในการสะเทินเพื่อรักษาค่าพีเอช 0.5 มก./ล. โดยสารที่เติมไปในปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มค่าความเป็นด่างของน้ำที่นิยมใช้คือ ปูนขาว (Lime)

2.8.2 เกลือของเหล็ก (Iron Salts)

เฟอร์ริกไอออน (Ferric Ions) สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเกิดการตกตะกอนในรูปของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide) ที่ค่าพีเอชมากกว่าหรือเท่ากับ 4.5 เฟอร์ริกไอออนมีสมบัติคล้ายกับอะลูมิเนียมไอออน คือ เมื่อเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ผลผลิตของการแตกตัวจะได้กรดและน้ำ นอกจากนั้นยังต้องการค่าความเป็นด่างในน้ำเพื่อทำการสะเทินกับกรดที่เกิดขึ้น เพื่อรักษาค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาโคแอกกูแลนต์เพราะถ้าค่าพีเอชไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์จะไม่สามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์เพื่อให้เกิดการรวมกลุ่มกันได้ นอกจากนั้นแล้วตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์มักจะหนักกว่าตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการตกตะกอนที่ดีกว่า

เกลือของเฟอร์ริกที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำ คือ เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) ซึ่งมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนค่อนข้างสูงเพราะฉะนั้นในการขนส่งหรือการเก็บรักษาต้องทำอย่างระมัดระวังและต้องบรรจุไว้ในภาชนะแก้ว

ตารางที่ 2-2 ค่าพีเอชที่เหมาะสมตามชนิดไอออนของสารโคแอกกูแลนต์ (มันสัน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

ชนิดของไอออน	ค่าพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการโคแอกกูแลนต์และฟล็อกกูแลนต์
Al^{3+}	6.0 – 7.4
Fe^{3+}	>5

สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารโคแอกกูแลนต์ทั้งหมด 4 ชนิด โดยเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมจำนวน 3 ชนิด คือ สารส้มน้ำ (Aluminium Sulphate) อลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (Aluminium Chlorohydrate) โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminum Chloride) และเกลือของเหล็ก (Iron Salts) จำนวน 1 ชนิด คือ เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride)

2.9 แนวคิดเกี่ยวกับถังตกตะกอนสัมผัส (Solid Contact Clarifier):

ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier Type) ที่ใช้แรงทางกลศาสตร์ในการสร้างความปั่นป่วนของน้ำ โดยเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนด้วยการใช้แผ่นขนานเอียง (Settling Tubes)

ในปัจจุบันถังตกตะกอนสัมผัส (Solid Contact Clarifier) เป็นถังตกตะกอนที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการผลิตน้ำประปา เนื่องจากเป็นถังตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพในการแยกส่วนน้ำใสกับฟล็อกออกจากกันได้ดี ใช้พื้นที่น้อยเพราะเป็นถังตกตะกอนที่รวมกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการตกตะกอนไว้ด้วยกัน โดยถังตกตะกอนชนิดนี้สามารถใช้ร่วมกับสารโคแอกกูแลนต์ได้หลายชนิด และใช้เวลาในการเดินระบบค่อนข้างน้อย แต่เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่ทราบถึงกลไกที่แน่ชัดภายในถังตกตะกอนประเภทนี้ เช่น อัตราการหมุนเวียนตะกอน จึงอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้งานของถังตกตะกอนประเภทนี้ยังไม่เต็มที่ หรือประสิทธิภาพของการบำบัดลดลงจนกระทั่งอาจเกิดปัญหาในการเดินระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่เข้าระบบ เช่น การเพิ่มอัตราการผลิตน้ำประปาอย่างรวดเร็วจึงส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำที่เข้าระบบเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และนอกจากนั้นแล้วยังอาจมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำเข้าระบบอย่างฉับพลันโดยเฉพาะความขุ่นของน้ำ ซึ่งเป็นปัญหาการปนเปื้อนกระบวนการผลิตน้ำประปาอย่างมาก

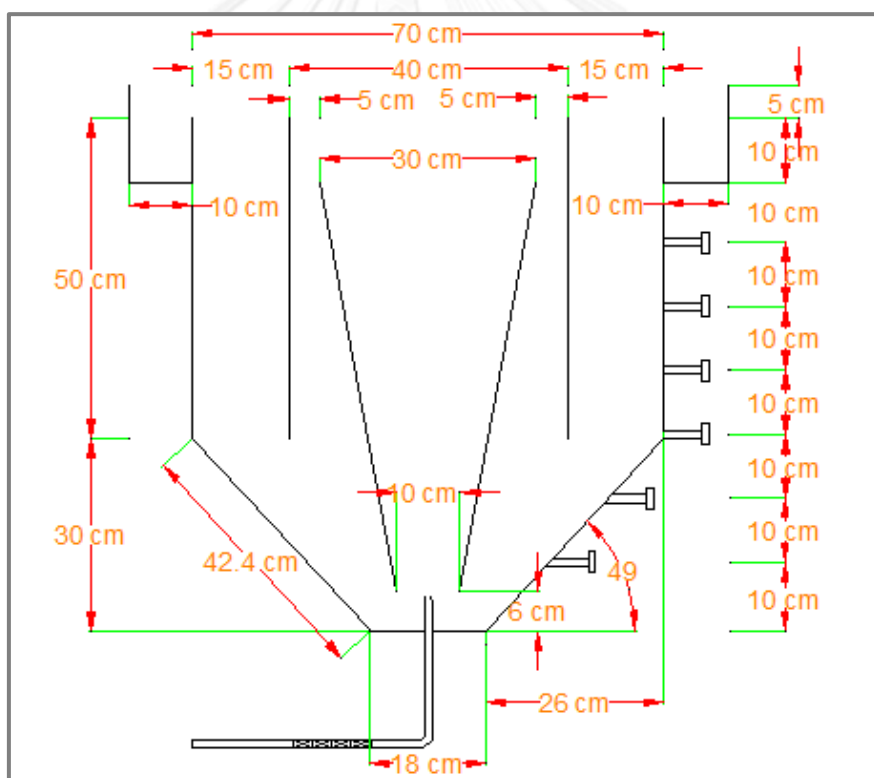
ดังเช่นในกรณีเหตุการณ์อุทกภัยของประเทศไทยที่ผ่านมาในช่วงเดือนตุลาคม ปี พ.ศ. 2554 ส่งผลให้คุณภาพน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบผลิตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าความขุ่นเพิ่มสูงขึ้นตลอดจนความต้องการของน้ำที่เพิ่มมากขึ้นแต่กระบวนการผลิตสามารถผลิตได้ลดลงเนื่องจากปัญหาคุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลง เป็นผลให้เกิดปัญหาในเรื่องคุณภาพน้ำที่ผลิตได้

นอกจากนั้นแล้วปัจจุบันยังมีการพัฒนาประสิทธิภาพของสารโคแอกกูแลนต์เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์และการรวมตัวของกลุ่มอนุภาคสูงขึ้น ในขณะเดียวกันในระบบการผลิตยังคงใช้ระบบเดิมในการผลิตน้ำ ทำให้มีแนวคิดที่ว่าถ้าเข้าใจถึงกลไกระบบ อาจจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้มากขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอนแบบสัมผัสนอกเหนือจากการเพิ่มประสิทธิภาพจากสารเคมี

จึงเป็นสาเหตุให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาถึงกลไกของถังตกตะกอนประเภทนี้ โดยเลือกชนิดถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier Type) ที่ใช้แรงทางกลศาสตร์ในการสร้างความปั่นป่วนของน้ำ เนื่องจากเป็นถังตกตะกอนที่ไม่ใช้พลังงานในการสร้างความปั่นป่วนของน้ำเพิ่มเติมนอกเหนือจากการสูบน้ำเข้าระบบ การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคในขั้นตอนการกวนเร็วจะสร้างความปั่นป่วนโดยใช้ความเร็วของน้ำผ่านการ

กวนในเส้นท่อ (Static Mixer) และหัวกระจายน้ำ (Inlet Diffuser) ที่มีช่องเปิดแคบบริเวณทางเข้าของน้ำในถังตกตะกอนดังกล่าว และการกวนผสมเพื่อให้เกิดการรวมตัวกันของกลุ่มอนุภาคในขั้นตอนการกวนจะใช้พลังงานที่เหลืออยู่เมื่อน้ำผ่านหัวกระจายน้ำ (Inlet Diffuser) ในการสร้างความปั่นป่วนและนอกจากนั้นแล้วยังจะศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอนชนิดนี้ด้วยการปรับอัตราหมุนเวียนตะกอนเพื่อเพิ่มเป่าสัมผัสของกลุ่มตะกอนซึ่งอาจทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคได้ดียิ่งขึ้น รวมไปถึงการใส่แผ่นขนานเอียงเพื่อลดระยะเวลาในการตกตะกอนและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษาลักษณะกลไกของระบบ คือ เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกและลักษณะของกระบวนการภายในถังตกตะกอน รวมไปถึงการพัฒนาการควบคุมและดำเนินการของระบบเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และอาจเกิดการพัฒนาของระบบถังตกตะกอนชนิดนี้ในอนาคตทำให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของน้ำดิบที่เข้าระบบได้ดียิ่งขึ้นทั้งทางด้านปริมาณการผลิตและคุณภาพน้ำดิบเข้าระบบ



ภาพที่ 2-23 ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier Type) ที่ใช้ในงานวิจัย

2.10 รูปแบบของการกระจายเวลากัก (Residence Time Distribution, RTD)

การออกแบบและเดินระบบของถังปฏิกรณ์ต่างๆ ในทางทฤษฎีสามารถคำนวณสถานะที่เหมาะสมสำหรับถังปฏิกรณ์นั้นๆ ได้จากสมการที่เกี่ยวข้อง เช่น อัตราการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ อัตราการผลิตที่ระบบสามารถรับได้ ตลอดจนประสิทธิภาพที่สมควรจะได้รับ โดย

การคำนวณนี้มักใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ ที่มีการสันนิษฐานว่ากลไกภายในระบบที่ออกแบบจะเป็นไปอย่างสมบูรณ์ (Ideal Reactor) เช่น รูปแบบการไหลของน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นรูปแบบการไหลตามกัน (Plug Flow Reactor) หรือรูปแบบของการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (Mixed Flow) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีของกฎอนุรักษ์มวลและพลังงาน ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความถูกต้องและแม่นยำเป็นที่ยอมรับได้ก็ต่อเมื่อระบบมีกลไกตามหลักการออกแบบอย่างสมบูรณ์ เพราะฉะนั้นการคำนวณในลักษณะเช่นนี้จึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์และคาดการณ์ประสิทธิภาพการดำเนินงานของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีรูปแบบการไหลและกลไกภายในระบบเป็นไปอย่างสมบูรณ์ (Ideal Reactor) แต่สำหรับกรณีที่เกี่ยวข้องกับปฏิกริยาที่มีการเบี่ยงเบนพฤติกรรมภายในเครื่องปฏิกรณ์ผลการจากวิเคราะห์และการคำนวณจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้น โดยการเบี่ยงเบนจากพฤติกรรมภายในถึงปฏิกรณ์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัยและขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องปฏิกรณ์และรูปแบบของการดำเนินงาน

วัตถุประสงค์ของการทดลองการกระจายเวลากัก คือ การวิเคราะห์ถึงสาเหตุของการเบี่ยงเบนพฤติกรรมจากถึงปฏิกรณ์ตามแต่ละกรณี ตลอดจนการตรวจสอบรูปแบบของถึงปฏิกรณ์ที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติ (Nonideal Reactors) ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งเครื่องปฏิกรณ์จริง หรือแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์สำหรับตรวจสอบการเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นของระบบ เพื่อนำข้อมูลไปประกอบการพิจารณาถึงประสิทธิภาพการทำงานหรือแม้กระทั่งการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการสร้างแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติ (Nonideal Reactors) เป็นเรื่องที่ซับซ้อนและยังไม่มีวิธีการพิสูจน์ที่แน่นอน โดยวิธีการทดลองและวิเคราะห์ที่นำมาใช้ ในการจำลองกลไกของเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติ (Nonideal Reactors) สามารถวิเคราะห์รูปแบบการไหลและการกระจายเวลากักได้โดยการวิเคราะห์ (Residence Time Distribution, RTD) (Hayes & Mmbaga, 2012)

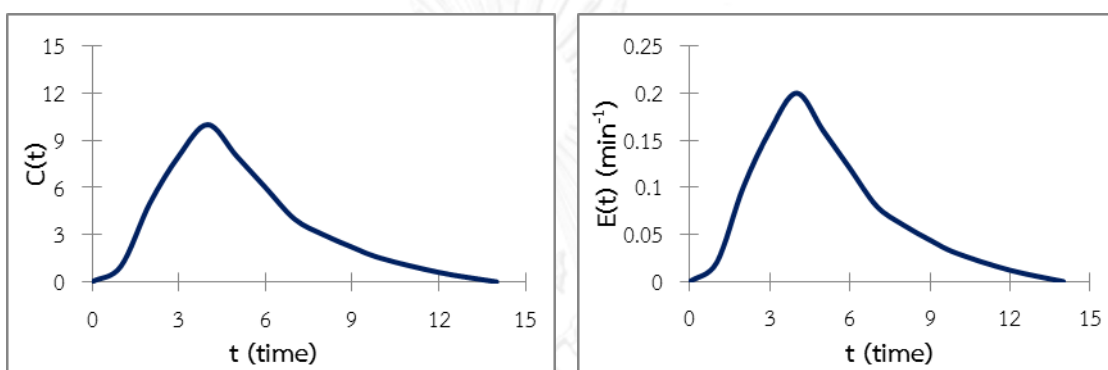
การวิเคราะห์ RTD มักจะใช้วิธีการตรวจติดตามสารนำสัญญาณ (Tracer) ที่มีคุณสมบัติเป็นสารเฉื่อยไม่มีการเกิดปฏิกริยาภายในถึงปฏิกรณ์ คุณสมบัติเฉพาะตัวตลอดระยะเวลาที่อยู่ภายในถึงปฏิกรณ์ และเป็นสารที่สามารถตรวจวัดได้ง่าย เช่น การย้อมสีและทำการตรวจวัดด้วยเครื่องมือสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) เป็นต้น สำหรับการพิจารณาถึงกลไกที่เกิดขึ้นภายในระบบสามารถทำได้ด้วยการพิจารณาถึงความคงที่ของปริมาณสาร กล่าวคือเมื่อจ่ายเข้าระบบไปที่ปริมาณเท่าใดย่อมออกจากระบบด้วยปริมาณที่เท่ากับปริมาณสารที่จ่ายไป โดยทำการติดตามโมเลกุลของสารที่ไหลผ่านระบบและออกจากระบบ ในแต่ละช่วงเวลาจนกระทั่งในที่สุด เมื่อโมเลกุลของสารนำสัญญาณ (Tracer) ออกจากระบบทั้งหมด ทั้งนี้ผลการทดลองจะขึ้นอยู่กับ รูปแบบการไหลและการกระจายของสาร ซึ่งสามารถทำการติดตามการทิศทางการไหลได้โดยการตรวจวัดสารนำสัญญาณ (Tracer) โดยการเคลื่อนที่ของสารจะส่งผลกระทบต่อกลไกและระยะเวลาของเครื่องปฏิกรณ์ และสามารถทำการวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการของการกระจายเวลากัก (Residence Time Distribution, RTD)

รูปแบบการทดลองและการวิเคราะห์ของสารนำสัญญาณ (Tracer) ในงานวิจัยนี้เลือกการทดลองในลักษณะของ Pulse Input Experiment โดยการจ่ายสารนำสัญญาณเข้าสู่ระบบในระยะเวลาที่สั้นที่สุดเพียงครั้งเดียว ผลที่ได้จากการทดลองนี้จะอยู่ในรูปความเข้มข้นของสารที่

เปลี่ยนไปตามเวลา โดยอัตราการไหลแต่ละค่าจะให้รูปแบบการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ค่าสัญญาณที่ได้จะถูกแปรผลกลับมาเป็นค่าความเข้มข้นของสาร ซึ่งเมื่อนำเทียบกับเวลาจะได้กราฟในรูปของ C-curve ดังภาพที่ 2-24ก. หลังจากนั้น จึงคำนวณผลการทดลองให้อยู่ในรูปของการกระจายเวลากัก (Residence time distribution, E(t)) จากสมการที่ 2.5

$$\text{Resident Time Distribution; } E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (2.5)$$

โดยที่ $C(t)$ = ความเข้มข้นของสาร ณ เวลา t (mg/L)



ก. C-curve

ข. E-curve

ภาพที่ 2-24 กราฟแสดงการกระจายเวลากักในรูปของฟังก์ชันต่างๆ (Fogler, 2013)

เมื่อสร้างกราฟการเปลี่ยนแปลงของ E(t) เทียบกับเวลาหรือ E-curve ดังภาพที่ 2-24ข. จะสามารถคำนวณหาค่ากลางของการกระจายเวลากัก (Mean Residence time, t_m) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานได้จากสมการที่ 2.6 และสมการที่ 2.7 ตามลำดับ

$$\text{Mean Residence time; } t_m = \frac{\int_0^{\infty} t E(t) dt}{\int_0^{\infty} E(t) dt} = \int_0^{\infty} t E(t) dt \quad (2.6)$$

$$\text{Variance; } \sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - t_m)^2 E(t) dt \quad (2.7)$$

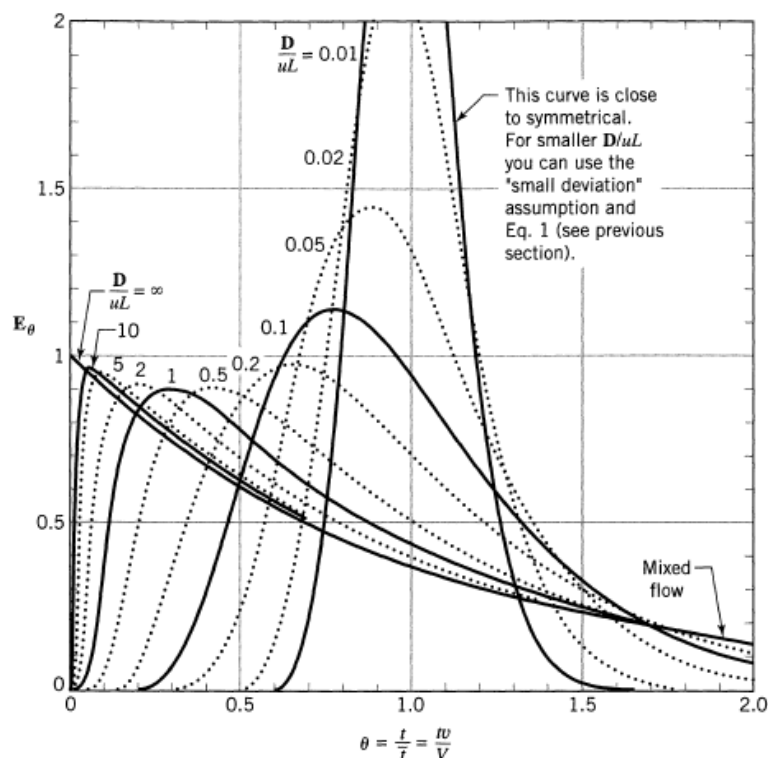
สำหรับรูปแบบการกระจายเวลากักภายในระบบ สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง Dispersion Model โดยใช้ค่าตัวแปร Vessel Dispersion Number $\left(\frac{D}{uL}\right)$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่

2.8

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{t_m^2} = 2\left(\frac{D}{uL}\right) - 2\left(\frac{D}{uL}\right)^2 \left[1 - e^{-uL/D}\right] \quad (2.8)$$

D = สัมประสิทธิ์การกระจายของสารในทิศทางเดียวกับการไหล, (m^2/s)
 u = ความเร็วของสารที่จ่ายเข้าไปในระบบโดยมีทิศเดียวกับการไหล, (m/s)
 L = ระยะทางการไหล, (m)

โดยที่ค่า Vessel Dispersion Number นี้สามารถใช้อธิบายถึงรูปแบบของปฏิกิริยาภายในถังปฏิกรณ์ได้ดังภาพที่ 2-25

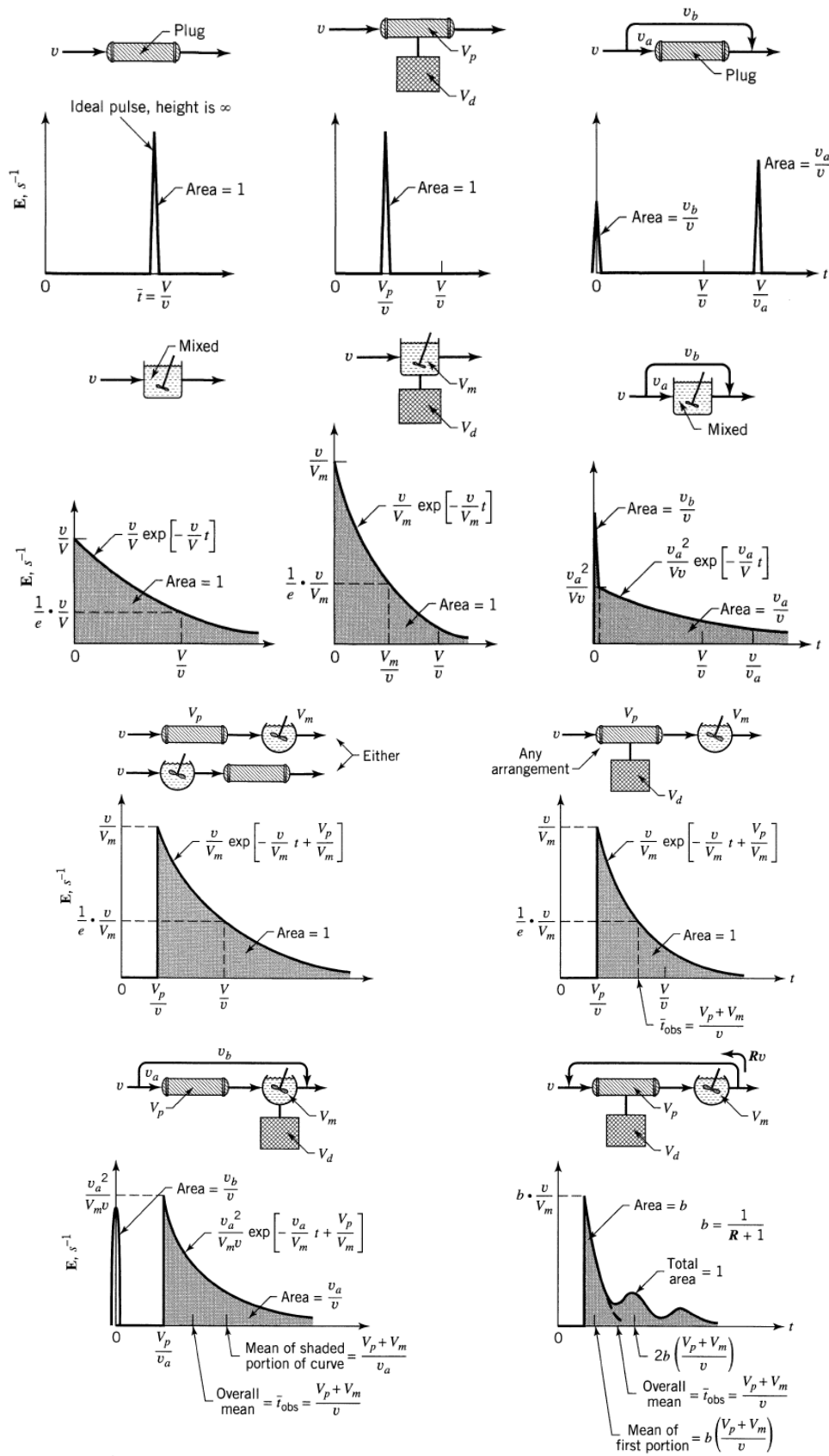


ภาพที่ 2-25 ลักษณะของรูปแบบการไหลจากการตรวจวัดของสารนำสัญญาณ (Tracer)
 (Levenspiel, 1972)

$\frac{D}{uL} \rightarrow 0$ หมายถึง มีการกระจายตัวภายในระบบน้อย ระบบจึงเข้าใกล้รูปแบบถังปฏิกรณ์ที่มีรูปแบบการไหลตามกัน (Plug Flow Reactor)

$\frac{D}{uL} \rightarrow \infty$ หมายถึง มีการกระจายตัวในระบบมาก ระบบจึงเข้าใกล้รูปแบบถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (Mixed Flow)

นอกจากนั้น กราฟ E-curve ยังสามารถบ่งบอกถึงรูปแบบการไหล (Compartment Model) ที่เกิดขึ้นภายในระบบได้ โดยการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟ E-curve ที่ได้กับรูปแบบกราฟในทางทฤษฎี ดังแสดงในภาพ 2-26 โดยผลจากการเปรียบเทียบรูปแบบของ E-curve นี้จะสามารถบ่งบอกถึงรูปแบบการไหลจริงที่เกิดขึ้นในระบบได้



ภาพที่ 2-26 แบบจำลองการไหลต่างๆ (Levenspiel, 1972)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(วีระ อินทรกุล, 2524) ได้ทำการศึกษาถึงตกตะกอนแบบโซลิดคอนแทคแครีไฟเออร์ที่ใช้แผ่นขนานเอียง วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ทำขึ้นมาเพื่อหาลักษณะที่เหมาะสมของการวางแผ่นขนานเอียง การติดตั้งดีฟลอคเตอร์บนแผ่นขนานเอียงและปริมาณอัตราน้ำล้นที่เหมาะสม การทดลองใช้ถึงตกตะกอนแบบโซลิดคอนแทคที่ใช้แผ่นขนานเอียงชนิดต้นแบบทำด้วยเหล็กชนิดแผ่นเรียบ กว้าง 0.7 เมตร ยาว 2 เมตร สูง 2 เมตร โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราน้ำล้น มุมติดตั้งของแผ่นขนาน ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน ขนาดของดีฟลอคเตอร์ ประสิทธิภาพของระบบการทำงานของถังโดยวัดจากการกำจัดความขุ่นและอนุภาคแขวนลอย

ผลการวิจัยพบว่า ระยะห่างระหว่างแผ่นขนานเอียงลดน้อยลงประสิทธิภาพการทำงานของถังจะสูงขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองจะเป็นส่วนกลับกันและไม่สามารถกำหนดจุดวิกฤติได้ ดังนั้นการกำหนดระยะห่างระหว่างแผ่นขนานเอียงที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงส่วนประกอบอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าประสิทธิภาพของถังที่ต้องการ ราคาค่าก่อสร้าง ความสะดวกในการทำ ความสะอาดถัง ผลกระทบของขนาดมุมเอียงของแผ่นขนานเอียงต่อประสิทธิภาพการทำงานของถัง ตกตะกอนในการกำจัดความขุ่นของอนุภาคแขวนลอย ที่มุมเอียง 60° เป็นขนาดมุมเอียงที่เหมาะสม และการติดตั้งดีฟลอคเตอร์บนแผ่นขนานเอียงจะขึ้นอยู่กับระยะห่างและขนาดของแผ่นขนานเอียง ซึ่งดีฟลอคเตอร์ขนาด 9 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างดีฟลอคเตอร์ 40 เซนติเมตร จะเป็นลักษณะการติดตั้งดีฟลอคเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำการติดตั้งบนแผ่นขนานเอียงที่มีระยะห่างระหว่างแผ่น 20 เซนติเมตรภายใต้ถึงตกตะกอนแบบโซลิดคอนแทคแครีไฟเออร์ที่ใช้แผ่นขนานเอียง

(กัลยา สุนีย์สุขวัฒนา, 2536) ได้ศึกษาการใช้ตัวกลางในถังโซลิดคอนแทคแครีไฟเออร์ (Solid Contact Clarifier) โดยการใช้ตัวกลางกรวดมาบรรจุลงในถัง Solid Contact Clarifier ในส่วนที่เป็นน้ำใส เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

ทำการทดลองโดยใช้ถัง Solid Contact Clarifier ขนาดต้นแบบ ซึ่งมีลักษณะเป็นพลาสติก รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 300 เซนติเมตร โดยใช้น้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่น 50 เอ็นทียู สารโคแอกกูแลนต์ คือ สารส้ม ใช้โพลีเมอร์ประจุลบเป็นสารช่วยในการตกตะกอนที่ความเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของถัง Solid Contact Clarifier จากแนวคิดที่ว่า การใช้ตัวกลางใส่ลงไปในถัง Solid Contact Clarifier บริเวณน้ำใส จะช่วยให้ได้น้ำผลิตที่ใสยิ่งขึ้น เนื่องจากตัวกลางที่ใส่ลงไปจะช่วยกันและกรองอนุภาคแขวนลอย โดยเมื่อน้ำไหลผ่านตัวกลางกรวดก็จะทำให้อนุภาคแขวนลอยที่หลุดออกมานั้นตกตะกอนในช่องว่างเหล่านี้ โดยทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม ความสูงของชั้นตะกอน และความเร็วน้ำไหลขึ้น ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อความขุ่นโดยผลการทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ มีดังนี้

1) ผลของปริมาณความเข้มข้นของสารส้มที่มีต่อความขุ่นของน้ำผลิตและประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่น ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้มมากขึ้นจะทำให้

มีประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้มเป็นการเพิ่มการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคมากขึ้นทำให้ความขุ่นของน้ำที่ผลิตได้มีค่าลดลง

2) ผลของความสูงชั้นตะกอนที่มีต่อความขุ่นน้ำผลิต และประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่น จากการทดลองพบว่าที่ความสูงของชั้นตะกอนมีค่ามากจะได้อัตราความขุ่นของน้ำผลิตมีค่าต่ำกว่า และมีประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่นสูงกว่าที่ความสูงของชั้นตะกอนมีค่าน้อย เพราะการเพิ่มความสูงของชั้นตะกอนจะทำให้ระบบมีช่วงความยาวในการกำจัดความขุ่นมากขึ้นทำให้น้ำที่ผลิตออกจากระบบมีค่าความขุ่นต่ำลง

3) ผลของความเร็วน้ำไหลขึ้นที่มีต่อความขุ่นน้ำผลิตและประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่น จากการทดลองพบว่าที่ความเร็วน้ำไหลขึ้นมีค่าต่ำจะได้อัตราความขุ่นของน้ำผลิตต่ำกว่าและมีประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่นสูงกว่าที่ความเร็วน้ำไหลขึ้นมีค่าสูง เพราะที่ความเร็วน้ำไหลขึ้นมีค่าสูงจะมีเวลากักน้ำ (Detention Time) น้อยกว่าระบบที่มีความเร็วน้ำไหลขึ้นต่ำ เป็นผลให้อุณหภูมิความขุ่นหลุดออกไปกับกระแสได้ออกได้มากกว่า นอกจากนี้ความเร็วน้ำไหลขึ้นที่สูงจนเกินไปยังทำให้กลุ่มอนุภาคที่อยู่ในระบบถูกแรงเฉือน ซึ่งเกิดจากความปั่นป่วนของน้ำที่มีค่าสูงทำให้กลุ่มอนุภาคเกิดแตกออกได้ และหลุดออกไปกับกระแสได้ออกทำให้น้ำผลิตที่ออกจากระบบมีค่าสูงขึ้น

- สรุปผลของความเร็วน้ำไหลขึ้นที่มีต่อปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ระดับต่างๆ ภายในชั้นตะกอน จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในชั้นตะกอนจะมีความเข้มข้นลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วน้ำไหลขึ้น และความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยจะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดความสูงของระดับชั้นตะกอน

- สรุปผลของปริมาณความเข้มข้นของสารส้มที่มีต่อปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ระดับต่างๆ ภายในชั้นตะกอน ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในชั้นตะกอนจะมีความเข้มข้นลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม เนื่องจากฟล็อกที่ได้อาจใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารส้มมากจะมีลักษณะเป็นปุ๋ยไม่แน่นจึงได้ปริมาณของของแข็งแขวนลอยในชั้นตะกอนน้อยกว่าเมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารส้มต่ำ

ส่วนที่ 2 การเปรียบเทียบระบบที่ใช้ตัวกลางและไม่ใช้ตัวกลาง

ศึกษาโดยเลือกค่าตัวแปรศึกษาที่เหมาะสมจากการทดลองในส่วนที่ 1 มาเพื่อนำมาทดลองเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้ตัวกลางและไม่ใช้ตัวกลางต่อไป เพื่อที่จะได้ทราบถึงประสิทธิภาพของตัวกลางกรวดที่ใช้ ผลจากการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีความเหมาะสม คือ ค่าความเร็วน้ำไหลขึ้น 15 20 25 และ 30 ซม./นาที่ ปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม 15 มก./ล และความสูงของชั้นตะกอน 1.35 ม. มาทำการทดลองเปรียบเทียบต่อไป

ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อนำกรวดมาใช้บรรจุในถัง Solid Contact Clarifier ในส่วนที่เป็นน้ำใส ตัวกลางกรวดดังกล่าวจะช่วยให้การกั้นและกรองอนุภาคแขวนลอยซึ่งหลุดออกมา โดยเมื่อน้ำไหลผ่านกรวดก็จะทำให้อนุภาคแขวนลอยที่หลุดลอดออกมานั้นตกตะกอนในช่องว่างเหล่านี้ทำให้ความขุ่นของน้ำที่ผลิตได้ลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ความเร็วน้ำไหลขึ้นสูงๆ จะพบว่ากรวด

มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของกรวดมีค่าประมาณ 13.33 – 25.93 %

สรุปข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้

1. การเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม ความสูงของชั้นตะกอน ความเร็วน้ำไหลขึ้น ไม่มีผลกระทบต่อความเร็วในการเข้าสู่ภาวะคงตัวของระบบ
2. ความขุ่นของน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารส้มมีค่าสูงขึ้น และความขุ่นของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วน้ำไหลขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น
3. การใช้กรวดมาบรรจุในส่วนที่เป็นน้ำใสของ Solid Contact Clarifier จะช่วยในการกั้นและกรองอนุภาคแขวนลอยที่หลุดออกมาได้ โดยเมื่อน้ำไหลผ่านกรวดก็จะทำให้อนุภาคแขวนลอยที่หลุดออกมานั้นตกตะกอนในช่องว่างเหล่านี้ ทำให้ความขุ่นน้ำผลิตลดลงได้
4. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้นสูงๆ ตัวกลางกรวดจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงกว่าที่ความเร็วน้ำไหลขึ้นมีค่าต่ำ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของกรวดมีค่าประมาณ 13.33 – 25.93 % เมื่อเทียบกับไม่มีชั้นกรวด และประสิทธิภาพรวมของระบบที่มีกรวดเทียบกับประสิทธิภาพรวมของระบบที่ไม่มีกรวด พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น 0.2 – 1.4 %
5. การเพิ่มความเร็วน้ำไหลขึ้น ทำให้ได้เม็ดตะกอนที่มีความเร็วในการตกลง และการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของสารส้ม ไม่มีผลต่อความเร็วในการตกตะกอนของกลุ่มอนุภาค

(วิจารณ์ ตันติธรรม, 2537) ศึกษาการกำจัดความขุ่นโดยถังน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอนกระทำโดยใช้แบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 300 ซม. โดยวัตถุประสงค์ของการวิจัยคือ ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อกรวดกำจัดความขุ่นของถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน ซึ่งการทดลองใช้น้ำขุ่นสังเคราะห์ที่เตรียมจากดินคาโอลินผสมกับน้ำประปาให้มีความขุ่น 50 เอ็นทียู ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์และใช้โพลีเมอร์ประจุลบความเข้มข้น 0.3 มก./ล. เป็นโคแอกกูแลนต์เอ็ด ตัวแปรที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารส้มในช่วง 10 – 30 มก./ล. ความเร็วรอบใบกวนในช่วง 5 – 20 รอบ/นาที และอัตราน้ำล้นผิวในช่วง 30 – 60 ซม./นาที

ผลการวิจัยพบว่า ค่าความขุ่นของน้ำผลิตขึ้นอยู่กับทั้งอัตราน้ำล้นผิวและความเข้มข้นของสารส้ม ในช่วงอัตราน้ำล้นผิว 30 – 45 ซม./นาที ค่าความขุ่นของน้ำผลิตจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารส้มเพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราน้ำล้นผิว และ/หรือการเพิ่มความเร็วรอบใบกวนนอกจากจะทำให้ค่าความขุ่นของน้ำผลิตเพิ่มขึ้น ยังจะทำให้ความเข้มข้นโดยปริมาตรของตะกอนและความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในถังทำน้ำใสลดลง

สรุปข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้

1. การกวนด้วยใบกวนทำให้เกิดความเร็วเกรเดียนท์ (G) ดังนั้นการแปรค่าความเร็วรอบใบกวนจึงทำให้ค่า G เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แต่ในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถวัดค่าความเร็ว

เกรเดียนที่ได้ จึงไม่แสดงผลการแปรค่าความเร็วเกรเดียนท์ แต่แสดงผลของการแปรค่าความเร็วรอบใบกวนแทน

2. การเพิ่มความเข้มข้นของสารส้ม นอกจากจะทำให้การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่นเกิดอย่างสมบูรณ์มากขึ้นแล้ว ยังเป็นผลทำให้เกิดฟล็อกที่มีความหนาแน่นลดลงด้วย ซึ่งในกรณีของถังน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอนที่ทำการทดลอง จะพบว่าถ้าอัตราน้ำล้นผิวที่เพิ่มมากขึ้นและใช้ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ที่สูงจะส่งผลให้น้ำผลิตมีค่าความขุ่นสูงเพิ่มขึ้นเนื่องจาก ฟล็อกที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นต่ำและหลุดออกไปกับน้ำผลิต

3. ประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่นของน้ำโดยใช้ถังน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำผลิตกับความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ ซึ่งขึ้นกับอัตราน้ำล้นผิว เนื่องจากอัตราน้ำล้นผิวจะเป็นการเพิ่มระดับความปั่นป่วนในถังซึ่งทำให้ฟล็อกหลุดออกไปกับน้ำผลิตได้มากขึ้น

(โสภณ เอียดประพาล, 2545) ศึกษาเกณฑ์การควบคุมและประสิทธิภาพของถังกำจัดความขุ่นแบบใช้ชั้นตะกอนในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ โรงงานผลิตน้ำประปาแพงพวย จังหวัดราชบุรี ซึ่งในการวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการเพื่อหาชนิดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดความขุ่น โดยใช้สารเคมี 3 ชนิด คือ สารส้ม โพลีเมอร์ชนิดประจุลบ และปูนขาว ส่วนที่สองทำการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพ อัตราน้ำล้นผิวสูงสุดและอัตราการระบายตะกอนที่เหมาะสมของถังกำจัดความขุ่นแบบใช้ชั้นตะกอน (Sludge Blanket Clarifier ชนิด Superpulsator) ที่ทำให้ปริมาณความขุ่นที่ออกจากถังกำจัดความขุ่นไม่เกิน 5 NTU โดยใช้ชนิดและสารเคมีที่เหมาะสมจากการทดลองส่วนแรก

จากการทดลองพบว่าการใช้สารส้มร่วมกับการใช้โพลีเมอร์ประจุลบมีความเหมาะสมสำหรับการกำจัดความขุ่น เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้ดีโดยมีค่าความขุ่นหลังการทดลองต่ำกว่า 2 NTU และค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีต่ำสุด และการใช้ปริมาณโพลีเมอร์ที่มากขึ้นทำให้มีค่า Sludge Cohesion Coefficient “K” สูงขึ้น ทำให้ปริมาณสารแขวนลอยในชั้นตะกอนเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงกับอัตราน้ำล้นผิวที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการระบายตะกอนส่วนเกินจากถังกำจัดความขุ่นส่งผลโดยตรงกับปริมาณสารแขวนลอยในน้ำดิบและปริมาณสารเคมีที่ใช้เมื่อค่าสารแขวนลอยในน้ำดิบและอัตราการใช้สารเคมีเพิ่มขึ้นอัตราการระบายตะกอนก็จะเพิ่มขึ้นตาม

(Rossini, Garrido, & Galluzzo, 1999) ศึกษาสภาวะการกวนที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการสร้างและรวมกลุ่มของฟล็อก พบว่า ระยะเวลาของการกวนเร็วมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของการสร้างและรวมกลุ่มของฟล็อกถึงแม้ช่วงระยะเวลาการกวนเร็วเป็นระยะเวลาที่สั้นแต่ยังคงมีความสำคัญต่อกระบวนการอย่างมาก และถ้าระยะเวลาของการกวนเร็วสูงจะพบความขุ่นที่หลงเหลือสูงตามไปด้วย โดยระยะเวลาในการกวนเร็วที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 60 – 90 วินาที

(Kan, Huang, & Pan, 2002) ได้ทำการศึกษากลไกของการรวมตะกอนระหว่างตะกอนของดินเหนียวกับสารโคแอกกูแลนต์ โดยการศึกษาเลือกใช้สารโคแอกกูแลนต์ 2 ชนิด คือ สารส้ม (Aluminium Sulphate) และโพลลิอูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminum Chloride) สำหรับวิธีการทดลองนั้นได้ทำการทดลองโดยใช้น้ำดิบสังเคราะห์ที่ค่าความขุ่น 38 เอ็นทียูโดยใช้ดินเหนียวเป็นสารสร้างความขุ่น ทำการทดลองในอุปกรณ์จาร์เทสและตรวจวัดค่าความขุ่นหลงเหลือกับค่าประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์นั้นจะมีกลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation) เป็นกลไกหลักในการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงกว่ากลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization) แต่ที่ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่มากกว่าเล็กน้อย

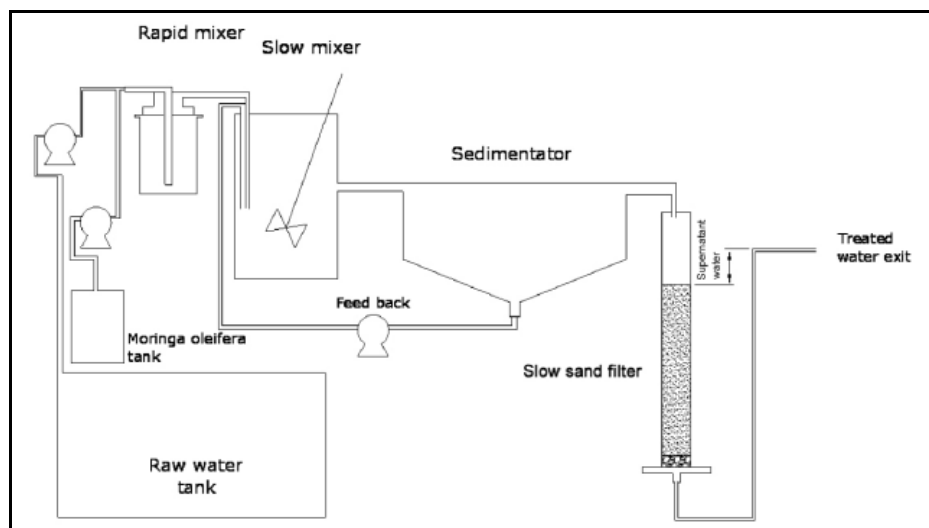
สำหรับการทดลองโดยใช้สารโพลลิอูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์พบว่า ค่าซีตาโพเทนเชียลจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารที่เพิ่มขึ้นแต่ก็ไม่ได้ทำให้ความขุ่นหลงเหลือเพิ่มสูงขึ้น ถึงแม้ว่าสารโพลลิอูมิเนียมคลอไรด์จะแตกตัวแล้วให้ชนิดของประจุบวกที่สูงกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์มีความสามารถที่จะเกาะจับกับ Al ที่แตกตัวสูงจึงทำให้ไม่มีการคืนเสถียรภาพอีกครั้ง (Restabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการโคแอกกูเลชันของสารโพลลิอูมิเนียมคลอไรด์จะเป็นกลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์และกลไกการใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นและจมลงด้วยแรงโน้มถ่วง

(Koohestanian, Hosseini, & Abbasian, 2008) ได้ศึกษาถึงการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้ คือ การพัฒนาและปรับปรุงระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำดิบในกระบวนการโคแอกกูเลชันที่สามารถลดค่าใช้จ่ายของการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของค่าพีเอช อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์และโพลีเมอร์ ที่มีต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ที่เลือกศึกษา คือ สารส้ม (Aluminum sulphate; alum) และเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) และเลือกสารโพลีเมอร์ชนิดประจุลบ (Anionic Polymer) เป็นสารที่ใช้ในกระบวนการเพิ่มขนาดของอนุภาคให้มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมพบว่าการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบที่เลือกใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์และสภาวะที่เหมาะสม สามารถลดปริมาณความขุ่นได้ถึง 85 – 95 % ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 แสดงสภาวะที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด

	Optimum Dose	Optimum pH	Optimum Temp
Aluminum Sulphate (alum)	10 ppm.	8.5	24°C
Ferric Chloride	8 ppm.	9.2	20°C

(Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009) ได้ศึกษาและพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำขนาดต้นแบบที่ใช้สารสกัดจากใบมะรุมเป็นสารรวมตะกอน ระบบที่ทำการทดลองจะแยกหน่วยของการทดลองออกจากกันอย่างชัดเจน คือ มีระบบของการกวนเร็ว การกวนช้า ตกตะกอน และการกรองช้าในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำขนาดทดลอง ดังภาพที่ 2-27



ภาพที่ 2-27 แสดงแผนผังระบบของการทดลอง (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009)

การทดลองได้ศึกษาถึงการหมุนเวียนตะกอนกลับซึ่งการทดลองแสดงให้เห็นว่าการหมุนเวียนตะกอนกลับช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น โดยการกำหนดอัตราการไหลเวียนกลับเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากการเคลื่อนไหวหมุนเวียนอาจส่งผลกระทบต่อสภาวะความคงตัวของส่วนที่ตกตะกอน ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดการไหลเวียนกลับที่ 15% ซึ่งเป็นอัตราการไหลเวียนที่เพิ่มประสิทธิภาพของระบบแต่ไม่ได้ประสบความสำเร็จในความขุ่นสุดท้าย เพราะยังคงมีประสิทธิภาพคล้ายกับระบบที่ไม่หมุนเวียนตะกอน และมีความขุ่นในเครื่องผสมเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นฟล็อกที่สะสมในถังตกตะกอนแต่กลับมาสะสมในระบบกวนช้าแทน ซึ่งค่าความขุ่นที่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้ไม่เป็นที่ต้องการในการประเมินประสิทธิภาพ

(Gladman, Rudman, & Scales, 2010) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแรงเฉือนที่มีต่อเครื่องทำชั้น (Thickening) โดยใช้เครื่องทำชั้นขนาดต้นแบบในการทดลองและทดลองในลักษณะการเดินระบบแบบกะ เพราะสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ได้มากกว่าเครื่องทำชั้นที่ใช้โดยทั่วไปทำให้หาค่าได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาพบว่า การกำจัดน้ำออกจากฟล็อกขึ้นอยู่กับความเร็วของตัวกวาดตะกอนและความลาดเอียงของฐานเครื่องทำชั้นซึ่งทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของฟล็อกโดยที่ฐานของเครื่องทำชั้นที่มีความลาดเอียงสูง มีอัตราการรวบรวมฟล็อกที่เร็วกว่าพื้นที่ที่มีความลาดเอียงน้อยหรือเป็นระนาบเดียวกัน และจากการตรวจสอบผลของแรงเฉือนต่อการกำจัดน้ำออกจากฟล็อกพบว่า ที่แรงเฉือนต่ำสามารถกำจัดน้ำออกจากฟล็อกได้ด้วยแรงโน้มถ่วงได้ดีกว่าแรงเฉือนสูง

(Tse, Swetland, Weber-Shirk, & Lion, 2011) ได้ศึกษาผลของแรงเฉือน (G) ของของเหลวที่มีผลต่อระบบการรวมตะกอนโดยใช้แรงน้ำโดยทำการศึกษาในท่อตกตะกอน ซึ่งปัจจัยที่ทำให้มีอัตราตกตะกอนที่เหมาะสมคือ ค่าแรงเฉือน (G) และระยะเวลาการรวมตะกอน (t) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ค่า $G \times t$ สำหรับการไหลแบบการไหลราบเรียบ (laminar flow) ในการออกแบบท่อตกตะกอนที่ใช้ในการทดลอง จากการศึกษาพบว่า ระดับของแรงเฉือนของของไหลมีผลต่อคุณสมบัติเกี่ยวกับการตกตะกอนของความขุ่น ซึ่งความเร็วของการตกตะกอนจะมีความสัมพันธ์กับค่าความขุ่นหลงเหลือในน้ำ โดยถ้ากลุ่มตะกอนมีความเร็วของการตกตะกอนสูงจะส่งผลให้มีค่าความขุ่นหลงเหลือต่ำ และผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าระบบการรวมตะกอนโดยใช้แรงน้ำภายใต้สภาวะการไหลแบบราบเรียบในเส้นท่อที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นออกจากรูน้ำที่ดีที่สุดคือ ค่าความเร็วเฉือนต่ำและระยะเวลาการกวนสูง ในทุกช่วงค่า $G \times t$ ที่ทำการศึกษา

(Yu, Gregory, Campos, & Li, 2011) ได้ศึกษาสภาวะการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยของน้ำที่มีความขุ่นสูงด้วยค่าแรงเฉือน (G) แตกต่างกันในขั้นตอนของการกวนเร็ว พบว่า ค่าแรงเฉือนที่ดีที่สุดในการกำจัดความขุ่นของน้ำที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร คือ $G = 350 \text{ S}^{-1}$

จากหลายๆ งานวิจัยดังกล่าวจะพบว่า ปัจจัยที่มีความสำคัญในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์เพื่อที่จะให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกันและแยกออกจากน้ำได้ จะประกอบไปด้วยลักษณะน้ำดิบ ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพและรวมตะกอน (coagulant and Polymer) ค่าความเร็วเฉือน (Velocity Gradient) ระยะเวลาที่ใช้ในการกวนผสม ลักษณะและวิธีการกวนผสม ตลอดจนระยะเวลาของการตกตะกอนของฟล็อกซึ่งขึ้นกับขนาดและความเร็วในการตกตะกอน โดยกระบวนการที่เลือกใช้และปัจจัยอื่นๆ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคออกจากน้ำ ขั้นตอนของกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูลชันและการตกตะกอนที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางค่อนข้างจะมีระบบปฏิบัติการหลายขั้นตอนจึงต้องการถึงปฏิกริยาหลายขั้นตอนจนต่อมาจึงได้มีการพัฒนาถึงระบบที่จะลดปริมาณของถึงปฏิกริยาเป็นถึงตกตะกอนสัมผัส (Solid Contact Clarifier) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมายังไม่ทราบถึงกลไกที่แน่ชัดภายในถึงตกตะกอนชนิดนี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ทั้งทางด้านคุณภาพน้ำดิบและการควบคุมระบบ เช่น ปริมาณความขุ่นและอัตราการไหลของน้ำดิบที่เปลี่ยนแปลง อัตราการหมุนเวียนตะกอน หรือแม้กระทั่งความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เลือกใช้ ที่ส่งผลต่อกลไกภายในถึงตกตะกอน

ถึงตกตะกอนสัมผัส (Solid Contact Clarifier) ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีกลไกที่แตกต่างกัน โดยผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาถึงกลไกของถึงตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier Type) เนื่องจากเป็นถึงตกตะกอนที่ใช้แรงทางชลศาสตร์ในการสร้างความปั่นป่วนของน้ำ ทำให้ไม่ต้องใช้พลังงานในการสร้างความปั่นป่วนของน้ำเพิ่มเติมนอกเหนือจากการสูบน้ำเข้าระบบ การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคในขั้นตอนการกวนเร็วจะสร้างความปั่นป่วนโดยใช้ความเร็วของน้ำผ่านการกวนในเส้นท่อ (Static Mixer) และหัวกระจายน้ำ (Inlet Nozzle) ที่มีช่องเปิดแคบบริเวณทางเข้าของน้ำในถึงตกตะกอนดังกล่าว และการกวนผสมเพื่อให้เกิดการรวมตัวกันของกลุ่มอนุภาคในขั้นตอน

การกวนข้าวจะใช้พลังงานที่เหลืออยู่เมื่อน้ำผ่านหัวกระจายน้ำในการสร้างความปั่นป่วน จึงเป็นถึง ตกตะกอนที่น่าสนใจที่จะศึกษาการพัฒนาระบบ อีกทั้งสถานะที่เหมาะสมที่เกิดจากกระบวนการ ภายในถึงปฏิกริยานี้ยังไม่มีการศึกษาหรือวิเคราะห์ในรายละเอียด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับ สถานะที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ สถานะเงื่อนไขในการจมตัวของฟลอคที่เกิดขึ้นภายใน ถึงตกตะกอน การควบคุมความสูงของชั้นตะกอน อัตราการหมุนเวียนตะกอนกลับเข้าระบบเพื่อ เพิ่มเป้าสัมผัสของกลุ่มตะกอนซึ่งอาจทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคได้ดียิ่งขึ้น และการใส่ แผ่นขนานเอียงซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ดังนั้นถ้าเราเข้าใจถึงกลไกในส่วนนี้จะทำให้ สามารถออกแบบ ควบคุมหรือนำไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติได้อย่างเหมาะสม จากที่กล่าวมา ข้างต้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดงานวิจัยการศึกษากลไกการกำจัดความปั่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบ หมุนเวียนตะกอนนี้ขึ้น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

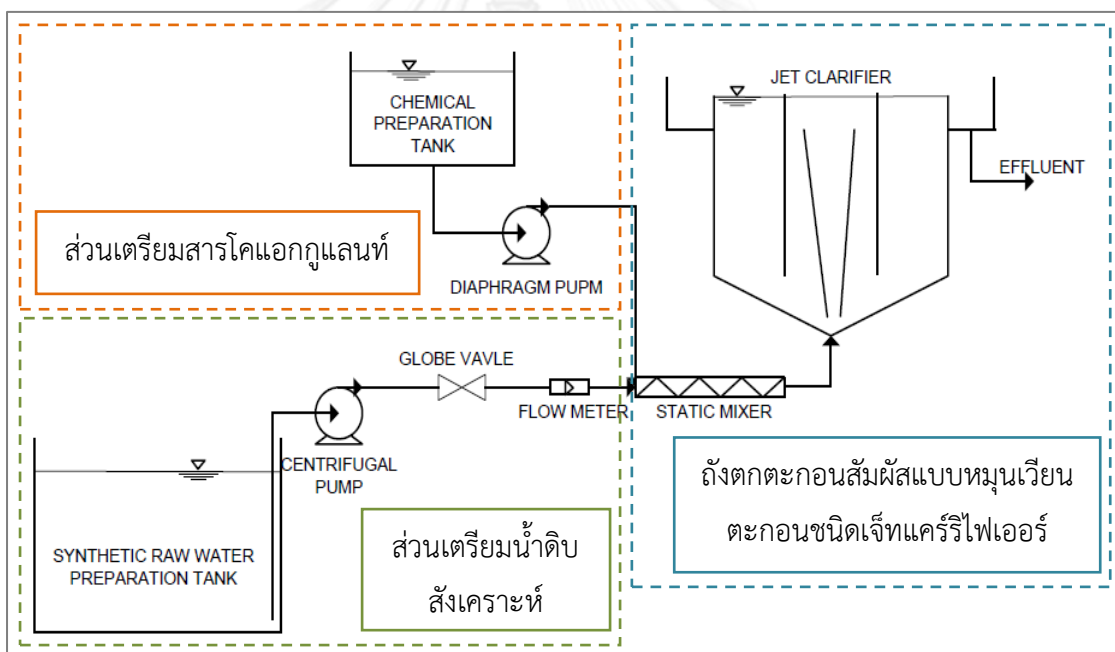
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ส่วนประกอบและการติดตั้งอุปกรณ์ระดับทดลอง (Pilot Scale)

แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

1. ส่วนเตรียมน้ำดิบสังเคราะห์ (Synthetic Raw Water Preparation)
2. ส่วนเตรียมสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant Preparation)
3. ถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier Type)

โดยรายละเอียดแต่ละขั้นตอนและลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ ดังภาพที่ 3-1 โดยจะกล่าวรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3-1 แผนผังและลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์

3.1.1 ส่วนเตรียมน้ำดิบสังเคราะห์ (Synthetic Raw Water Preparation)

น้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ประเภท คือ น้ำดิบสังเคราะห์ซึ่งสามารถเตรียมได้โดยนำน้ำประปาผสมกับอนุภาคเป็นโหนดเพื่อใช้เป็นตัวแทนของอนุภาคคอลลอยด์ และกวนผสมด้วยใบพัดอย่างสมบูรณ์ และน้ำดิบจากโรงงานผลิตน้ำสามเสน โดยจะเตรียมน้ำที่ใช้ในการทดลองไว้ในถังเก็บน้ำดิบ ทำการจ่ายน้ำโดยเครื่องสูบน้ำ ปรับอัตราการไหลด้วยวาล์วและควบคุมอัตราการไหลจากถังเตรียมน้ำเข้าสู่ระบบด้วยมาตรวัดอัตราการไหล

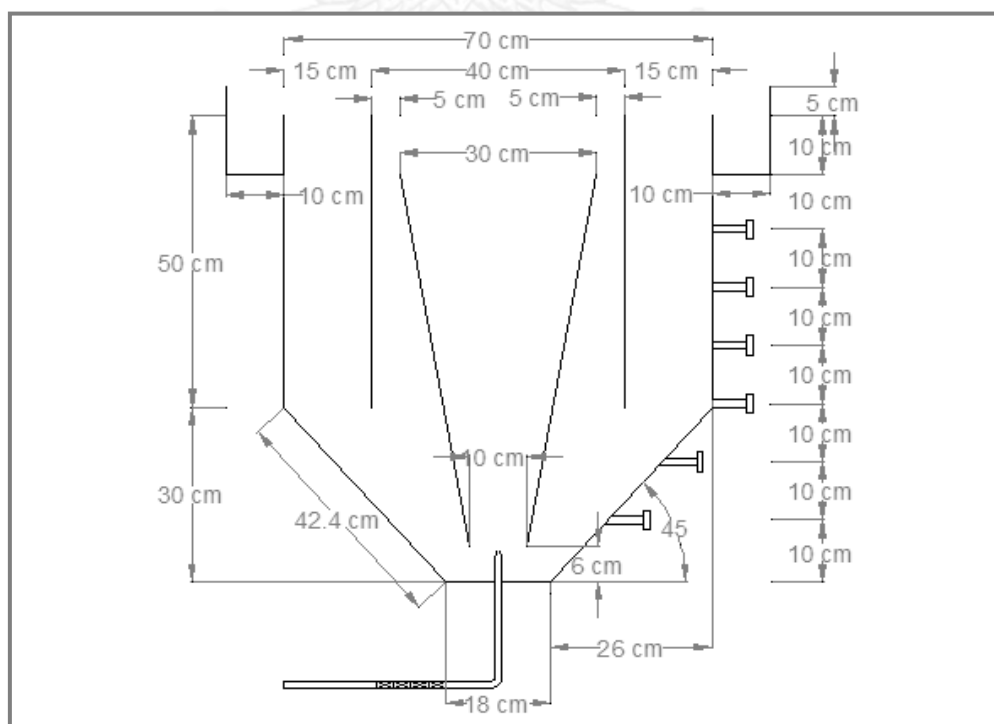
3.1.2 ส่วนเตรียมสารโคแอกกูแลนท์ (Coagulant Preparation)

โคแอกกูแลนท์ที่ใช้ได้แก่ สารส้มน้ำ (Aluminium Sulphate) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminium Chloride) เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) อลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (Aluminium Chlorohydrate) โดยทราบชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมจากการทำจาร์เทส (Jar Test) สารโคแอกกูแลนท์ดังกล่าวจะถูกเตรียมให้มีความเข้มข้นตามที่ต้องการไว้ในถังเตรียมสารเคมี และจะจ่ายสารโคแอกกูแลนท์เข้าสู่เส้นท่อนอกก่อนถึงจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์กวนในเส้นท่อนอก (Static Mixer) เพื่อให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันนอกถังตกตะกอนสัมผัส โดยสามารถปรับอัตราการจ่ายสารในอัตราการไหลที่ต้องการด้วยเครื่องจ่ายสารเคมี

3.1.3 ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier Type)

ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier Type) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากวัสดุอะคริลิกใส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร ปริมาตร 243 ลิตร และมีสัดส่วนดังที่แสดงในภาพที่ 3-2 ซึ่งเป็นขนาดที่ออกแบบจากเกณฑ์การออกแบบถังตกตะกอนสัมผัส โดยในส่วนนี้จะมีการติดตั้งอุปกรณ์กวนในเส้นท่อนอก (Static Mixer) เพื่อให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันภายในเส้นท่อนอกถังตกตะกอน

สำหรับทางน้ำเข้าจะอยู่บริเวณส่วนล่างของถังตกตะกอน และบริเวณด้านข้างของถังตกตะกอนจะมีจุดระบายตะกอน เพื่อควบคุมชั้นตะกอน บริเวณส่วนบนของถังตกตะกอนมีการแยกเก็บน้ำใสที่ผ่านการตกตะกอนของอนุภาคแล้วโดยใช้รางรับน้ำใส



ภาพที่ 3-2 รูปแบบของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์
- 2) ถังเตรียมและเก็บน้ำดิบ
- 3) ถังรองรับน้ำล้น
- 4) ถังเตรียมและเก็บสารโคแอกกูแลนท
- 5) เครื่องสูบน้ำ
- 6) อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow Meter)
- 7) อุปกรณ์กวนในเส้นท่อ (Static Mixer) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 มิลลิเมตร ยาว 0.30 เมตร จำนวน Element ภายในอุปกรณ์ 6 Element
- 8) เครื่องกวนผสมสำหรับเตรียมน้ำดิบสังเคราะห์
- 9) ปิ๊มจ่ายสารเคมี
- 10) วาล์วปรับอัตราการไหล

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

- 1) กรวยอิมฮอฟ
- 2) ชุดอุปกรณ์จาร์เทส (Jar Test)
- 3) เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter)
- 4) เครื่องวัดค่าพีเอช (pH Meter)
- 5) คอลัมน์สำหรับการทดลองหาอัตราการตกตะกอน (Setting Column Test) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 เมตร สูง 1.8 เมตร
- 6) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity Meter)
- 7) ชุดอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์หาค่าของแข็งแขวนลอย

3.2.3 สารเคมี

- 1) เบนโทไนท์
- 2) สารส้มน้ำ (Aluminium Sulphate)
- 3) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminum Chloride)
- 4) เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride)
- 5) อลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (Aluminium Chlorohydrate)

3.3 วิธีวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ

พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ความขุ่น ค่าพีเอช (pH) และความเป็นต่างรายละเอียดดังนี้

3.3.1 ความขุ่น (Turbidity)

การตรวจวัดความขุ่นนั้นจะทำการตรวจวัดด้วยเครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) ใช้วิธีเนฟเฟโลเมตริก (Nephelometric Method) ซึ่งเป็นวิธีวัดความขุ่นของน้ำ โดยเปรียบเทียบความเข้มของแสงที่กระจัดกระจายของตัวอย่างน้ำกับสารละลายมาตรฐานภายใต้สภาวะที่เหมือนกัน ความเข้มของแสงที่กระจัดกระจายมากขึ้นเท่าไรก็就会有ความขุ่นเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น วิธีนี้แสงจะถูกปล่อยให้กระทบตัวอย่างน้ำเป็นมุมฉากกับตาผู้สังเกตหรือโฟโตอิเล็กทริกเซลล์ (Photoelectric Cell) ของเครื่องมือ แสงซึ่งสะท้อนโดยสารห้อยแขวนในตัวอย่างน้ำจะถูกรวบรวมโดยรีเฟลคเตอร์ (Reflector)

3.3.2 ค่าพีเอช (pH)

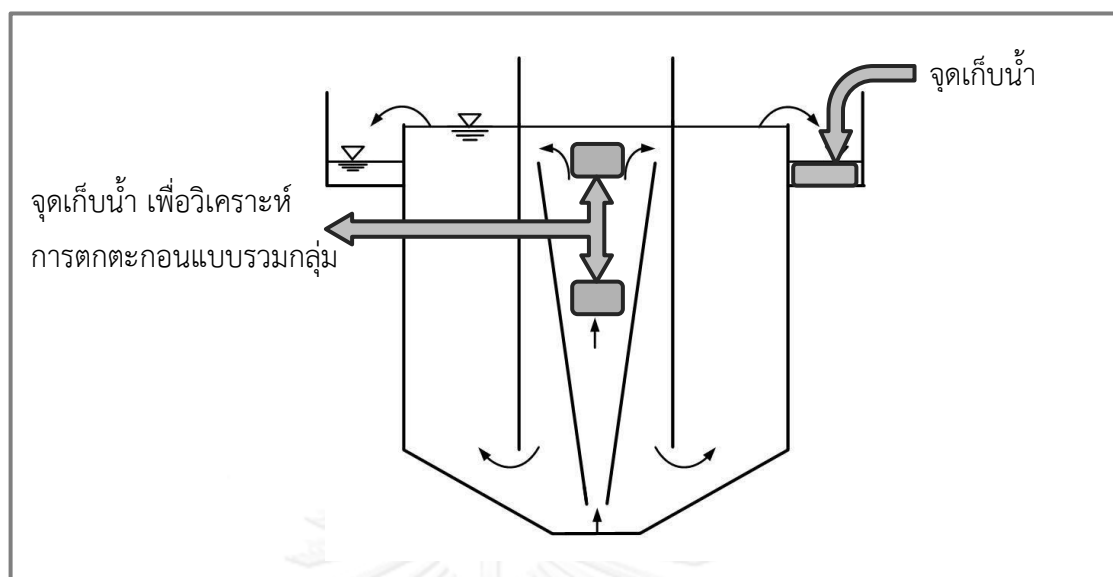
ในงานวิจัยนี้จะตรวจวัดค่าพีเอช (pH) ด้วยเครื่องวัดพีเอช (pH Meter) ซึ่งใช้หลักการของ Potentiometry โดยวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electronic Potential) ของไอออนในสารละลายระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) กับอิเล็กโทรดตรวจวัด (Sensing Electrode) ความต่างศักย์ที่เกิดจากจำนวนของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ซึ่งความต่างศักย์ที่เกิดจากไอออน (Ionic Potential) จะถูกเปลี่ยนให้เป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (Electronic Potential)

3.3.3 ความเป็นต่าง (Alkalinity)

จะวิเคราะห์ตามวิธี 2320 B. (Eaton, Franson, Association, Association, & Federation, 2005) ซึ่งเป็นวิธีไตเตรท (Titration Method) โดยการไตเตรทน้ำตัวอย่างด้วยกรดแตรที่แตกตัวให้โปรตอนสูง จนกระทั่งถึงจุดสมมูลของไบคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และกรดคาร์บอเนต (HCO_3^-) ซึ่งสามารถบอกจุดสมมูลนี้ได้โดยใช้อินดิเคเตอร์เพื่อดูสีที่เปลี่ยนแปลง

3.4 วิธีเก็บตัวอย่างน้ำ

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ทำโดยการดำเนินระบบตามสภาวะดำเนินการอย่างต่อเนื่องให้มีเวลานานกว่าเวลาพักเก็บภายในถังปฏิกิริยา เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว โดยจะทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาทีเพื่อวัดปริมาณความขุ่นสุดท้ายที่ออกจากระบบจนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจึงเก็บตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยจะเก็บตัวอย่างน้ำในขณะที่ระบบยังดำเนินการอยู่ และจุดเก็บตัวอย่างของน้ำใสอยู่บริเวณรางรับน้ำล้นผิว



ภาพที่ 3-3 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอน และบริเวณที่เก็บพารามิเตอร์ต่างๆ มาวิเคราะห์สำหรับคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดน้ำ

3.5 วิธีวิเคราะห์ประสิทธิภาพของถังตกตะกอน

วิธีวิเคราะห์ประสิทธิภาพของถังตกตะกอนในงานวิจัยนี้ จะวิเคราะห์ในการทดลองส่วนที่ 2 และ 3 คือ การทดลองแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow) เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอน และศึกษาถึงกลไกภายในถังตกตะกอน โดยการทดลองแบบไหลต่อเนื่องจะทำโดยเดินระบบตามสภาวะดำเนินการอย่างต่อเนื่องให้มีเวลานานกว่าเวลาที่เก็บภายในถังปฏิกิริยา เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวและทำการเก็บตัวอย่างน้ำในขณะที่ระบบยังดำเนินการอยู่อย่างต่อเนื่อง วิธีวิเคราะห์ประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมพัทธ์มี 2 วิธี ดังนี้

3.5.1 ประสิทธิภาพในด้านการกำจัดความขุ่น

พิจารณาประสิทธิภาพในด้านการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำ โดยการคำนวณความแตกต่างระหว่างความขุ่นของน้ำดิบส่งเคราะห์เริ่มต้น กับความขุ่นของน้ำใสที่ผ่านการกำจัดความขุ่นแล้ว บริเวณรางรับน้ำล้น เพื่อนำมาคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์กำจัดความขุ่น ดังสมการที่ (3.1)

$$\text{Turbidity Removal Efficiency (\%)} = \left(\frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

T_{in} = ความขุ่นของน้ำดิบส่งเคราะห์เริ่มต้น

T_{out} = ความขุ่นของน้ำใสที่ผ่านการบำบัดแล้วบริเวณรางรับน้ำล้น

3.5.2 ประสิทธิภาพในการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculants Settling Test) ภายในถังตกตะกอน

พิจารณาประสิทธิภาพในการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มภายในถังตกตะกอน ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการออกแบบถังตกตะกอน คือ อัตราน้ำล้นผิว (Overflow Rate, OFR) และระยะเวลาพัก (Retention Time, t) ดังนั้นในการพิจารณาถึงประสิทธิภาพในส่วนนี้จะกระทำโดยเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชัน ภายในบริเวณฟล็อกคูเลชันภายในถังตกตะกอน มาทดสอบด้วยคอลัมน์ทรงกระบอกสูง 1.8 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 เมตร โดยเก็บตัวอย่างน้ำที่มีความลึก 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 เมตร จากระดับน้ำ ทุกๆ 1 นาทีเป็นระยะเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะเก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาทีเป็นระยะเวลา 80 นาที เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการตกตะกอนในทุกๆ สภาวะทดลอง

3.6 การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (Coagulation and Flocculation) สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง คือ

การทดลองที่ 1 ศึกษาลักษณะของน้ำดิบ

การทดลองที่ 2 ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยวิธีจาร์เทส

ส่วนที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ท แครร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow) ซึ่งทำการทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง คือ

การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของความสูงชั้นตะกอน และอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ท แครร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)

การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของระยะห่างของช่องว่างต่างๆ ภายในถังตกตะกอน กับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

- **การทดลองที่ 4.1** ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) และอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

- **การทดลองที่ 4.2** ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถังตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) กับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

- **การทดลองที่ 4.3** ศึกษาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่สภาวะที่เหมาะสม

การทดลองที่ 5 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยแผ่นขนานเอียง

ส่วนที่ 3 ศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากัก (Residence Time Distribution, RTD) ของถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน

การทดลองที่ 6 ศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน

- การทดลองที่ 6.1 ศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน โดยที่ไม่มีชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอน

- การทดลองที่ 6.2 ศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน โดยที่มีชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอน

- การทดลองที่ 6.3 ศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน โดยใช้เม็ดพลาสติกเป็นตัวกลางแทนชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอน

- การทดลองที่ 6.4 ศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนที่ปรับอัตราการไหล โดยที่มีชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอน

3.6.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาลักษณะของน้ำดิบ

การทดลองนี้จะใช้น้ำดิบสังเคราะห์จากเบนโทไนต์ที่ความขุ่น 20 50 และ 200 เอ็นทียู โดยไม่ปรับค่าพีเอชเริ่มต้น จากนั้นทำการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำดิบสังเคราะห์ โดยพารามิเตอร์ที่จะตรวจวัดมีดังต่อไปนี้

- 1) ค่าพีเอช (pH)
- 2) ความเป็นด่าง (Alkalinity)
- 3) ขนาดของอนุภาคในน้ำดิบ
- 4) ความสามารถในการตกตะกอน (Discrete Settling Tests)

ตารางที่ 3-1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1

การทดลอง	ศึกษาลักษณะของน้ำดิบ
ตัวแปรอิสระ	1. น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู 2. น้ำดิบจริง
ตัวแปรควบคุม	1. ความลึกของจุดเก็บตัวอย่างน้ำ 0.6 และ 1.2 เมตร 2. ความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 3 นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจะเก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาที เป็นระยะเวลา 60 นาที
ตัวแปรตาม	1. ค่าความขุ่น 2. ปริมาณสารแขวนลอย 3. ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของน้ำดิบและน้ำดิบสังเคราะห์

ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ ทราบถึงลักษณะของน้ำดิบสังเคราะห์ ขนาดของอนุภาคในน้ำดิบ และอัตราการตกตะกอนของความขุ่นที่มีค่าความขุ่นแตกต่างกัน

3.6.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการโคแอกกูเลชันต่อการกำจัดความขุ่น

การทดลองนี้ทดลองด้วยน้ำดิบสังเคราะห์จากเบนโทไนต์ที่ความขุ่น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ไม่ปรับค่าพีเอชเริ่มต้น จากนั้นทำการทดลองด้วยวิธีการดังนี้

1) เตรียมน้ำดิบสังเคราะห์จากเบนโทไนต์ที่มีความขุ่น 20 เอ็นทียู ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ

2) เติมสารโคแอกกูแลนต์ เช่น สารส้มน้ำ (Aluminium Sulphate) ความเข้มข้น 20 30 40 50 60 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในแต่ละบีกเกอร์

3) กวนเร็วด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 1 นาที

4) กวนช้าด้วยความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 20 นาที

5) ทิ้งให้ตกตะกอน เป็นระยะเวลา 10 นาที

6) นำน้ำใสส่วนบนมาวิเคราะห์ค่าความขุ่น

7) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 1 – 6 โดยทำการปรับเปลี่ยนความขุ่นของน้ำสังเคราะห์ เป็น 50 และ 200 เอ็นทียู ตามลำดับ

8) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 1 – 7 โดยทำการปรับเปลี่ยนชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ เป็น เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminium Chloride) และ อลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (Aluminium Chlorohydrate) ตามลำดับ

9) ทำการทดลองหาประสิทธิภาพการตกตะกอน (Flocculent settling test) ของฟล็อกที่เกิดจากปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมของแต่ละชนิด

10) นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2

การทดลอง	ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยวิธีจาร์เทส
ตัวแปรอิสระ	1. ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ คือ <ul style="list-style-type: none"> - สารส้มน้ำ (Aluminium Sulphate) - เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) - โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminium Chloride) - อลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (Aluminium Chlorohydrate) 2. ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์
ตัวแปรควบคุม	1. ความเร็วในการกวนเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 1 นาที 2. ความเร็วในการกวนช้า 60 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 20 นาที

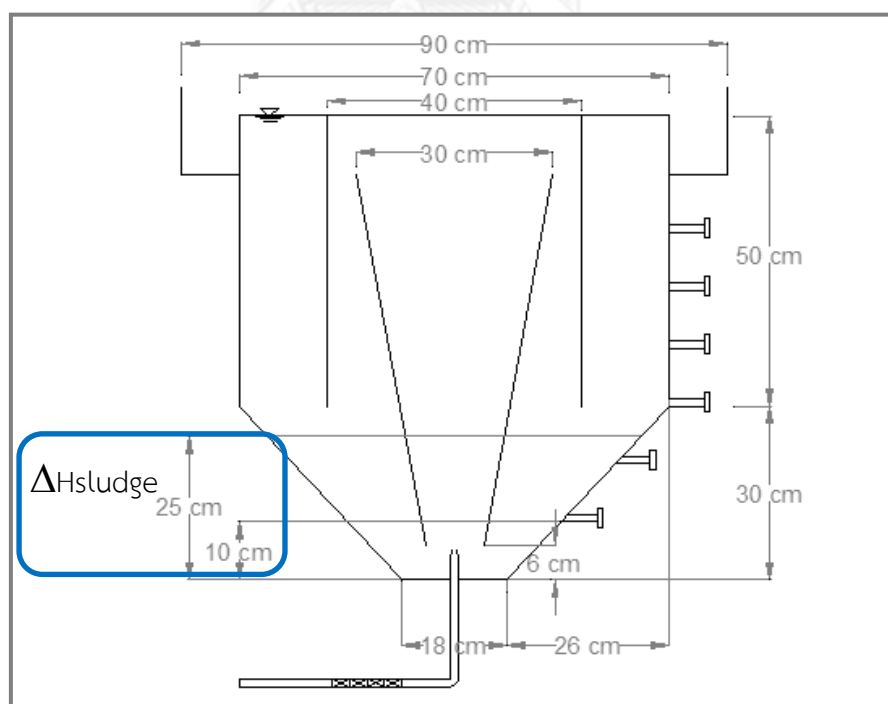
ตารางที่ 3-2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2 (ต่อ)

ตัวแปรควบคุม	3. ระยะเวลาในการตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 10 นาที
ตัวแปรตาม	1. ค่าความขุ่น โดยกำหนดค่าความขุ่นไว้ที่ต่ำกว่า 5 เอ็นทียู 2. ประสิทธิภาพการตกตะกอน (Flocculent Settling Test) 3. ค่าพีเอช 4. ค่าความเป็นด่าง

ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ ทราบชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน - ฟล็อกคูเลชันเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.6.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของความสูงชั้นตะกอน และอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ ที่มีต่อประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier)

ในการทดลองนี้ใช้ถังตกตะกอนชนิด Jet Clarifier ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร ซึ่งการติดตั้งถังตกตะกอนเป็นแบบที่สามารถถอดออกได้สะดวก โดยทำการทดลองที่ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 50 เอ็นทียูและอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ที่จ่ายเข้าถังตกตะกอนอยู่ที่ 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการทดลองด้วยการควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3-3 โดยการทดลองจะเดินระบบอย่างต่อเนื่อง (Continuous Flow) จนถึงระบบมีสภาวะคงตัวแล้วจึงวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบ



ภาพที่ 3-4 แสดงสัดส่วนภายในของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ที่ใช้ในการทดลองที่ 3

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3

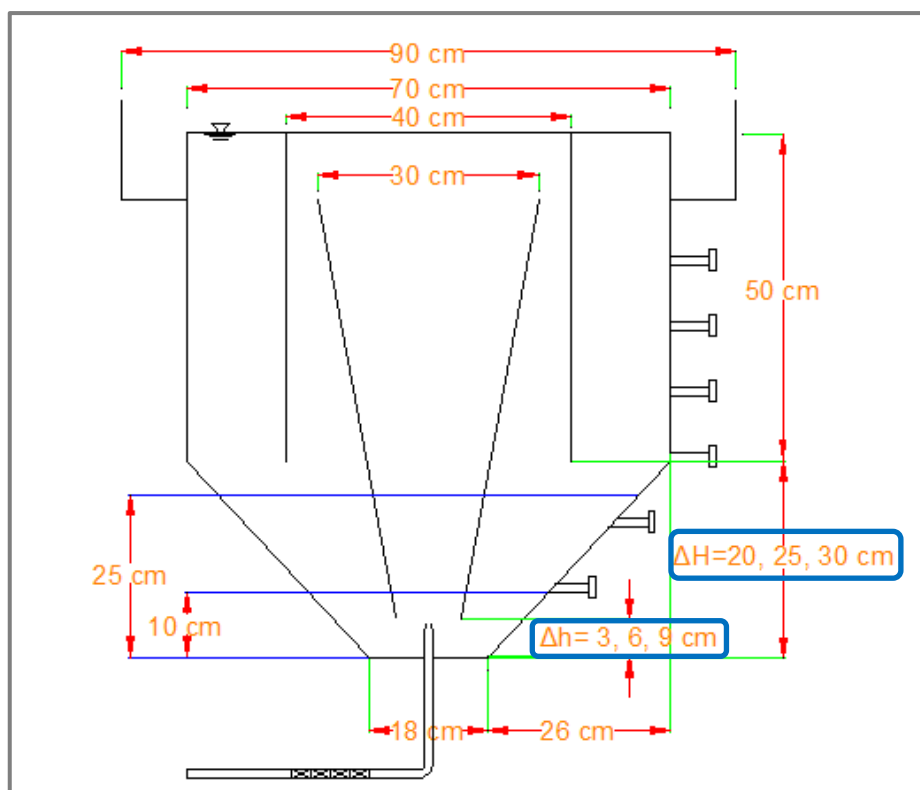
การทดลอง	ศึกษาผลของความสูงชั้นตะกอน และอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)
ตัวแปรอิสระ	1. อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบที่ 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง 2. ความสูงชั้นตะกอนที่ 10 และ 25 เซนติเมตร
ตัวแปรควบคุม	1. ชนิดสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 2. ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 3. ความขุ่นเริ่มต้นน้ำดิบสังเคราะห์ที่ 50 เอ็นทียู 4. ช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่ 6 เซนติเมตร 5. ช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง (ΔH) ที่ความสูง 30 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	1. ค่าความขุ่น 2. ค่าพีเอช 3. สภาพความเป็นต่าง 4. ประสิทธิภาพการตกตะกอน (Flocculent Settling Test) 5. ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ

หมายเหตุ ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำ

ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ ทราบความสูงของชั้นตะกอนที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ในแต่ละอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ ซึ่งอัตราการไหลของน้ำดิบดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient) ที่เกิดขึ้นบริเวณการกวนในเส้นท่อ (Static Mixer) และเวลากักของถังตกตะกอน

3.6.4 การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของระยะห่างของช่องว่างต่างๆ ภายในถังตกตะกอนกับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ในการทดลองนี้ใช้ถังตกตะกอนชนิด Jet Clarifier ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร ซึ่งการติดตั้งถังตกตะกอนเป็นแบบที่สามารถถอดออกได้สะดวกและจะทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนต่างๆ ภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนดังแสดงในภาพที่ 3-5 โดยทำการทดลองที่ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้น 50 เอ็นทียูและอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ที่จ่ายเข้าถังตกตะกอนอยู่ที่ 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 3-5 แสดงสัดส่วนภายในของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ที่ใช้ในการทดลองที่ 4

- การทดลองที่ 4.1 ศึกษาผลของสัดส่วนระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) กับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ในการทดลองนี้ใช้ถังตกตะกอนชนิด Jet Clarifier ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร ซึ่งการติดตั้งถังตกตะกอนเป็นแบบที่สามารถถอดออกได้สะดวก โดยทำการทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียูและควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3-4 เติมน้ำดิบอย่างต่อเนื่อง (Continuous Flow) และจะตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.1

การทดลอง	ศึกษาผลของสัดส่วนระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) กับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น
ตัวแปรอิสระ	ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่ 3 6 และ 9 เซนติเมตร
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ความขุ่นเริ่มต้นน้ำดิบสังเคราะห์ที่ 50 เอ็นทียู ชั้นความสูงของตะกอน 10 และ 25 เซนติเมตร ช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง (ΔH) ที่ความสูง 30 เซนติเมตร

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.1 (ต่อ)

ตัวแปรตาม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าความขุ่น 2. ค่าพีเอช 3. สภาพความเป็นต่าง 4. ประสิทธิภาพการตกตะกอน (Flocculent Settling Test) 5. ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ
-----------	--

หมายเหตุ - ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำ

ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ ทราบระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow)

- การทดลองที่ 4.2 ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) กับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

โดยในการทดลองนี้เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้วจะทำการทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงงานผลิตน้ำสามเสน ในส่วนการทดลองนี้จะควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3-5 เดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow) และจะหยุดระบบเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

ตารางที่ 3-5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.2

การทดลอง	ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) กับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น
ตัวแปรอิสระ	ระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) ที่ 20 และ 25 เซนติเมตร
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 2. อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 40 70 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง 3. ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ 50 เอ็นทียู 4. ชั้นความสูงของตะกอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 5. ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.1
ตัวแปรตาม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าความขุ่น 2. ค่าพีเอช 3. สภาพความเป็นต่าง 4. ประสิทธิภาพการตกตะกอน (Flocculent Settling Test) 5. ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ

หมายเหตุ - ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำ

ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ ทราบถึงระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) ที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของระบบที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู

- การทดลองที่ 4.3 ศึกษาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่สภาวะที่เหมาะสม

โดยในการทดลองนี้จะทดลองหาประสิทธิภาพของระบบที่สภาวะที่เหมาะสม ในส่วนการทดลองนี้จะควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3-6 เตินระบบแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow) และจะหยุดระบบเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.3

การทดลอง	ศึกษาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่สภาวะที่เหมาะสม
ตัวแปรอิสระ	ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 20 และ 200 เอ็นทียู และน้ำดิบจริง
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 อัตราการไหลที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 ชั้นความสูงของตะกอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.1 ระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2
ตัวแปรตาม	<ol style="list-style-type: none"> ค่าความขุ่น ค่าพีเอช สภาพความเป็นต่าง ประสิทธิภาพการตกตะกอน (Flocculent Settling Test) ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ

หมายเหตุ - ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำ

- น้ำดิบจริงจากโรงงานผลิตน้ำสามเสน ต้องทำการทดลองจาร์เทสเพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมกับคุณภาพน้ำก่อนทำการทดลอง

ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ในแต่ละค่าความขุ่นและน้ำดิบจริงจากโรงงานผลิตน้ำสามเสน

3.6.5 การทดลองที่ 5 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยแผ่นขนานเอียง (Settling Tubes)

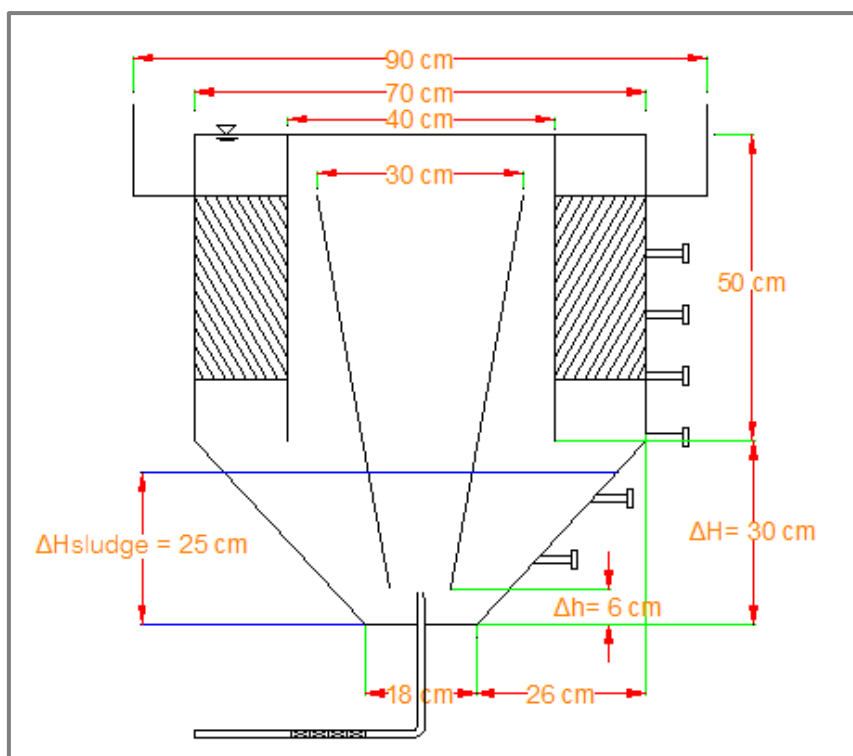
ในการทดลองนี้ใช้ถังตกตะกอนชนิด Jet Clarifier ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร การติดตั้งถังตกตะกอนเป็นแบบที่สามารถถอดออกได้สะดวก โดยทดลองที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ 20 50 และ 200 เอ็นทียู และน้ำดิบจริง ซึ่งจะทดลองที่สภาวะการเดินระบบที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 4 และมีการติดตั้งแผ่นขนานเอียงในบริเวณตกตะกอนของถังตกตะกอนส้มฝัด ดังที่แสดงในรูปที่ 3-6 โดยแผ่นขนานเอียงที่ใช้ในการทดลองจะมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร วางเรียงชิดติดกันเป็นแผ่น สำหรับการติดตั้งแผ่นขนานเอียงจะทำการติดตั้งที่มุมเอียง 60 องศาซึ่งเป็นขนาดมุมเอียงที่เหมาะสม (วีระ อินทรกุล, 2524) ซึ่งการทดลองจะเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow) ทำการควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ใน ตารางที่ 3-7 และจะหยุดระบบเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

ตารางที่ 3-7 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5

การทดลอง	ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยแผ่นขนานเอียง
ตัวแปรอิสระ	1. แผ่นขนานเอียง 2. ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 20 และ 200 เอ็นทียู และน้ำดิบจริง
ตัวแปรควบคุม	1. ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 2. อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบ 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง 3. ชั้นความสูงของตะกอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 4. ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.1 5. ระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2
ตัวแปรตาม	1. ค่าความขุ่น 2. ค่าพีเอช 3. สภาพความเป็นต่าง 4. ประสิทธิภาพการตกตะกอน (Flocculent Settling Test) 5. ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ

หมายเหตุ - ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำ

ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ ทราบประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่มีการเพิ่มแผ่นขนานเอียงและการหมุนเวียนตะกอนกลับ



ภาพที่ 3-6 ถังตกตะกอนสัมพันธ์แบบหมุนเวียนตะกอนที่มีการติดตั้งแผ่นขนานเอียงในบริเวณ
ตกตะกอน

3.6.6 การทดลองที่ 6 ศึกษาแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมพันธ์แบบ หมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)

- การทดลองที่ 6.1 ศึกษาแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมพันธ์แบบ
หมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยที่ไม่มีชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอน

การทดลองนี้เป็นการทดลองหาเวลากักภายในถังตกตะกอน ซึ่งจะทดลองกับสภาวะที่
เหมาะสมของถังตกตะกอน โดยทดลองกับระบบที่มีและไม่มี การติดตั้งแผ่นขนานเอียง และควบคุม
ค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3-8 และเลือกสารนำสัญญาณ (Traces) ที่
เลือกใช้ คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ตารางที่ 3-8 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6.1

การทดลอง	ศึกษาแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมพันธ์แบบหมุนเวียน ตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยที่ไม่มีชั้นตะกอนภายในถัง ตกตะกอน
ตัวแปรอิสระ	แผ่นขนานเอียง

ตารางที่ 3-8 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6.1 (ต่อ)

ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> 1. อัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 2. ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถึงตตะกอน (Δh) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.1 3. ระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตตะกอนกับพื้นถึง (ΔH) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 4. ใช้สารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 300 มิลลิลิตร 5. บันทึกค่าความนำไฟฟ้าทุก 3 นาที จนกว่าสัญญาณของค่านำไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบจะลดลงจนมีค่าเท่ากับก่อนจ่ายสารเข้าระบบ
ตัวแปรตาม	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ

หมายเหตุ - ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำ

ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ ทราบรูปแบบการไหลและการกระจายเวลากักของน้ำภายในถังตตะกอนสามชั้นแบบหมุนเวียนตตะกอน ทั้งแบบมีแผ่นขนานเอียงและไม่มีแผ่นขนานเอียงโดยที่ถังตตะกอนไม่มีชั้นตตะกอน

- การทดลองที่ 6.2 ศึกษาแบบการกระจายเวลากักภายในถังตตะกอนสามชั้นแบบหมุนเวียนตตะกอน โดยมีชั้นตตะกอน

การทดลองนี้เป็นการทดลองหาเวลากักภายในถังตตะกอน ซึ่งจะทดลองกับสภาวะที่เหมาะสมของถังตตะกอน โดยทดลองกับระบบที่ไม่มีและมีการติดตั้งแผ่นขนานเอียง และควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3-9 และเลือกสารนำสัญญาณ (Traces) ที่เลือกใช้ คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ตารางที่ 3-9 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6.2

การทดลอง	ศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตตะกอนสามชั้นแบบหมุนเวียนตตะกอน โดยมีความสูงของชั้นตตะกอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3
ตัวแปรอิสระ	แผ่นขนานเอียง
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> 1. อัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 2. ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถึงตตะกอน (Δh) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.1 3. ระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตตะกอนกับพื้นถึง (ΔH) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 4. ใช้สารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 300 มิลลิลิตร 5. ความสูงของชั้นตตะกอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 6. บันทึกค่าความนำไฟฟ้าทุก 3 นาที จนกว่าสัญญาณของค่านำไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบจะลดลงจนมีค่าเท่ากับก่อนจ่ายสารเข้าระบบ
ตัวแปรตาม	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ

หมายเหตุ - ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำ

ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ ทราบรูปแบบการไหลและการกระจายเวลากักของน้ำภายในถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน ทั้งแบบมีแผ่นขนานเอียงและไม่มีแผ่นขนานเอียงโดยที่มีความสูงของชั้นตะกอนที่เหมาะสม

- การทดลองที่ 6.3 ศึกษาแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน โดยใช้เม็ดพลาสติกเป็นตัวกลางที่ระดับความสูงที่เหมาะสมแทนชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอน

การทดลองนี้เป็นการทดลองหาเวลากักภายในถังตกตะกอน ซึ่งจะทดลองกับสภาวะที่เหมาะสมของถังตกตะกอน โดยทดลองกับระบบที่ไม่มีและมีการติดตั้งแผ่นขนานเอียง และควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3-10 และเลือกสารนำสัญญาณ (Traces) คือ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ตารางที่ 3-10 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6.3

การทดลอง	ศึกษาแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน โดยใช้เม็ดพลาสติกเป็นตัวกลางที่ระดับความสูงที่เหมาะสมแทนชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอน
ตัวแปรอิสระ	แผ่นขนานเอียง
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> อัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.1 ระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงถังตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 ใช้สารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ความสูงของเม็ดพลาสติกที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 บันทึกค่าความนำไฟฟ้าทุก 3 นาที จนกว่าสัญญาณของค่านำไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบจะ ลดลงจนมีค่าเท่ากับก่อนจ่ายสารเข้าระบบ
ตัวแปรตาม	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ

หมายเหตุ - ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำ

ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ ทราบรูปแบบการไหลและการกระจายเวลากักของน้ำภายในถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน ทั้งแบบมีแผ่นขนานเอียงและไม่มีแผ่นขนานเอียงโดยที่ความสูงของเม็ดพลาสติกที่เหมาะสม เพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 6.2

- การทดลองที่ 6.4 ศึกษาแบบการกระจายของเวลากักภายในถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนที่ปรับอัตราการไหล โดยที่มีชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอน

การทดลองนี้เป็นการทดลองหาเวลากักภายในถังตกตะกอน ซึ่งการทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำดิบ โดยทดลองกับระบบที่มีการติดตั้งแผ่นขนานเอียง และควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3-11

ตารางที่ 3-11 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6.4

การทดลอง	ศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักภายในถังตกตะกอนสัณฆัสมแบบหมุนเวียนตะกอนที่ปรับอัตราการไหล โดยที่มีชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอน
ตัวแปรอิสระ	อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบที่ 40 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.1 2. ระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงถังตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.2 3. ใช้สารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 300 มิลลิลิตร 4. ความสูงของชั้นตะกอนที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 5. บันทึกค่าความนำไฟฟ้าทุก 3 นาที จนกว่าสัญญาณของค่านำไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบจะ ลดลงจนมีค่าเท่ากับก่อนจ่ายสารเข้าระบบ
ตัวแปรตาม	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ

3.7 เกณฑ์การออกแบบถังตกตะกอนแบบสัณฆัสม และค่าพารามิเตอร์ของถังตกตะกอนสัณฆัสมที่ใช้ในงานทดลอง

ตารางที่ 3-12 ตารางสรุปตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

ประเภท	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	ระยะเวลาของ	ระยะเวลาของ	ระยะเวลา ตกตะกอน (นาที)	ระยะเวลากัก (นาที)
		กระบวนการ โคแอกกูเลชัน (นาที)	กระบวนการ ฟลอคคูเลชัน (นาที)		
Design criteria*	-	$1 < t < 5$	20 – 40	60 – 180	-
Jet clarifier	40	3.31	50	280	330
	50	2.65	40	223	263
	70	1.89	30	167	197
	110	1.20	20	112	132
	180	0.74	13.16	75	88

หมายเหตุ – * อ้างอิงเกณฑ์การออกแบบจาก (Bouyer, Coufort, Liné, & Do-Quang, 2005; Degremont, 1999; Kawamura, 2000; Reynolds & Richards, 1996)

3.8 สรุปรูปตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

ตารางที่ 3-13 ตารางสรุปรูปตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

ระบบ	พารามิเตอร์	สมการ	ลำดับสมการ	อ้างอิง
Jar test	G	$G = \sqrt{\frac{p}{\mu v}}$	(3.2)	(Chamnanmor, Painmanakul, & Puprasert, 2012;
	$P_{\text{turbulent}}$	$P = K_T N^3 D^5 \rho$	(3.3)	Kawamura, 2000; Reynolds & Richards,
	P_{laminar}	$P = K_L N^2 D^3 \mu$	(3.4)	1996; Rushton, 1952)
Jet clarifier	$G_{\text{static mixer}}$	$G = \sqrt{\frac{h_f \times g \times \rho}{\mu \times t}}$	(3.5)	(The designing of static mixer (noritake) in rapid mix for water treatment)
	$t_{\text{static mixer}}$	$t = \frac{\text{Static mixer length (m)}}{V \left(\frac{m}{s}\right)}$	(3.6)	
	$G_{\text{Fluidized bed}}$	$G = \sqrt{\frac{g(\rho_s - \rho)Cv}{\mu}}$	(3.7)	(Hughes, 2000)
	t	$t = \frac{V}{Q}$	(3.9)	(Kawamura, 2000; Reynolds & Richards, 1996)

เมื่อ	P	=	Power (N-m/s)
	K_T	=	Impeller constant for turbulent flow
	N	=	Rotational speed (rps)
	D	=	Impeller diameter (m)
	ρ	=	Liquid density (kg/m^3)
	K_L	=	Impeller constant for laminar flow
	ρ_s	=	Particle or floc density (kg/m^3)
	C	=	Floc volume concentration
	μ	=	Dynamic viscosity of liquid ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$)
	v	=	Velocity of liquid being stirred, or flowing in flocculator (m/s)
	h_f	=	Head loss (m)

3.9 สรุปจำนวนครั้งการทดลอง

ตารางที่ 3-14 ตารางสรุปจำนวนครั้งการทดลอง

อันดับที่	การทดลอง	จำนวนการทดลอง (ครั้ง)
1	ศึกษาลักษณะน้ำดิบ	5
2	ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยวิธีจาร์เทส	48
3	ศึกษาผลของความสูงชั้นตะกอน และอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)	10
4	ศึกษาผลของสัดส่วนระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นที่ถังตกตะกอน (Δh) กับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น	26
5	ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงถังตกตะกอนกับพื้นที่ถัง (ΔH) กับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น	6
6	ศึกษาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่สถานะที่เหมาะสม	4
7	ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยแผ่นขนานเอียง	8
8	ศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยที่ไม่มีชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอน	2
9	ศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยที่มีชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอน	10
10	ศึกษารูปแบบการกระจายของเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยใช้เม็ดพลาสติกเป็นตัวกลางแทนชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอน	2

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้จะนำเสนอผลการศึกษาของประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคแขวนลอยถึงตกตะกอน สัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier Type) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้แรงทางชลศาสตร์ในการสร้างความปั่นป่วนของน้ำ โดยระบบจะประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ คือ

1) กระบวนการกวนเร็วด้วยอุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อ (Static Mixer) เพื่อกวนผสมสารเคมีและทำลายเสถียรภาพของอนุภาคแขวนลอย

2) กระบวนการกวนช้า กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นภายในถังในส่วนของส่วนสัมผัส (Contact Zone) โดยตะกอนที่เข้ามาในถังจะถูกกระจายให้ทั่วพื้นที่หน้าตัดส่วนสัมผัสด้วยหัวกระจายน้ำ (Inlet Diffuser) จากนั้นจะถูกสัมผัสและรวมกับตะกอนเดิมที่ถูกแยกออกจากกระแสน้ำออก (Effluent Flow) แล้วจึงออกไปยังส่วนแยก (Clarification Zone)

3) กระบวนการแยกตะกอนออกจากกระแส น้ำ ตะกอนที่ผ่านการกวนช้ามาแล้วจะถูกแยกออกจากกระแสการไหลด้วยการตกตะกอนหรือกระบวนการแยกด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity Separation) กระแสน้ำที่ผ่านการกำจัดตะกอนจะไหลขึ้นพื้นที่หน้าตัดของถังออกไป ในขณะที่ตะกอนที่ถูกแยกจะค้างอยู่ภายในถังและจะถูกหมุนเวียนกลับมายังส่วนสัมผัสต่อไป

สำหรับงานวิจัยนี้ จะเริ่มต้นการศึกษาจากลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบและน้ำดิบสังเคราะห์ จากนั้นจะทำการศึกษานิตและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชัน และนำผลการศึกษาดังกล่าวมาศึกษากระบวนการตกตะกอนด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน ผลการศึกษาและการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาลักษณะของน้ำดิบสังเคราะห์และน้ำดิบจริง

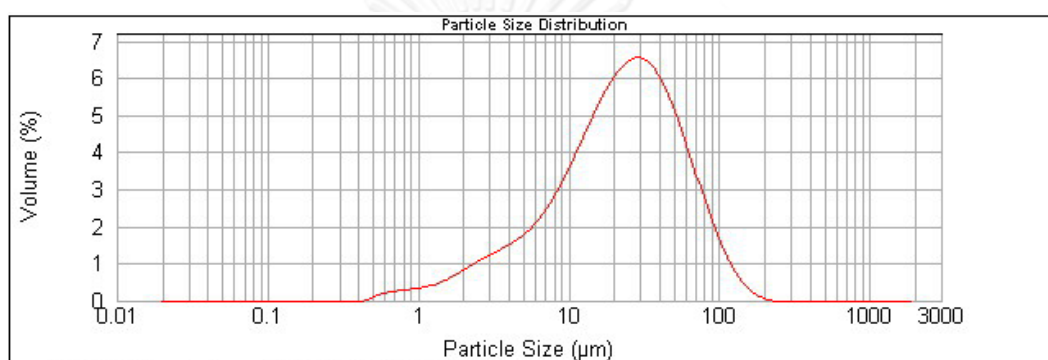
การศึกษาลักษณะของน้ำดิบสังเคราะห์และน้ำดิบจริงทำการศึกษาเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ และความสามารถในการตกตะกอนหรือกระบวนการแยกด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity Separation) ของอนุภาคของแข็งแขวนลอยในน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบ โดยผลการศึกษาสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์

น้ำดิบสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากการผสมระหว่างอนุภาคเบนโทไนท์กับน้ำประปา ให้มีความขุ่นที่ 20 50 และ 200 เอ็นทียู (ไม่มีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้น) โดยอนุภาคเบนโทไนท์ที่ใช้จะเป็นตัวแทนของอนุภาคแขวนลอยในน้ำดิบจริงตามธรรมชาติ ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์และขนาดของอนุภาคเบนโทไนท์ด้วยเครื่องวิเคราะห์อนุภาค (Particle Size Analyzer) แสดงดังตารางที่ 4-1 และภาพที่ 4-1 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-1 ลักษณะน้ำดิบสังเคราะห์

ความขุ่น (เอ็นทียู)	ปริมาณของแข็ง แขวนลอย (กรัมต่อลิตร)	ขนาดของอนุภาค D ₅₀ (ไมครอน)	ค่าพีเอช (pH)	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร ใน รูปของ CaCO ₃)
20	0.125	23.027	7 – 8	56 – 100
50	0.345			
200	1.118			



ภาพที่ 4-1 ขนาดของอนุภาคของของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบสังเคราะห์

จากภาพที่ 4-1 พบว่าเบนโทไนท์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 23.027 ไมครอน และเมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยวิธีการตกตะกอนแบบโดด (Discrete Settling Test) ด้วยคอลัมน์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 เมตร สูง 1.8 เมตร โดยเก็บตัวอย่างที่ระดับความสูง 0.6 เมตร และ 1.2 เมตร จากระดับผิวน้ำมาวิเคราะห์ค่าความขุ่นทุกๆ 3 นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และหลังจากนั้นจะเก็บตัวอย่างทุกๆ 5 นาที เป็นระยะเวลา 60 นาที ผลการวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง เท่ากับร้อยละ 18.60 24.90 และ 32.69 ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4-3 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการตกตะกอนที่ต่ำของน้ำดิบสังเคราะห์ซึ่งเป็นผลมาจากความมีเสถียรภาพของอนุภาคแขวนลอย กล่าวคือ อนุภาคเบนโทไนท์ที่มีประจุลบเหมือนกันเมื่อเข้าใกล้กันจะเกิดแรงผลักระหว่างประจุ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้อนุภาคเบนโทไนท์แขวนลอยอยู่ในน้ำได้ (Baik & Lee, 2010) นอกจากนี้ หมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลเบนโทไนท์บางส่วนจะมีโมเลกุลของน้ำเกาะอยู่โดยรอบ ซึ่งจะขวางกั้นไม่ให้อนุภาคเข้าใกล้กัน จึงทำให้อนุภาคเบนโทไนท์สามารถแขวนลอยได้อย่างมีเสถียรภาพ (Means & Parcher, 1963)

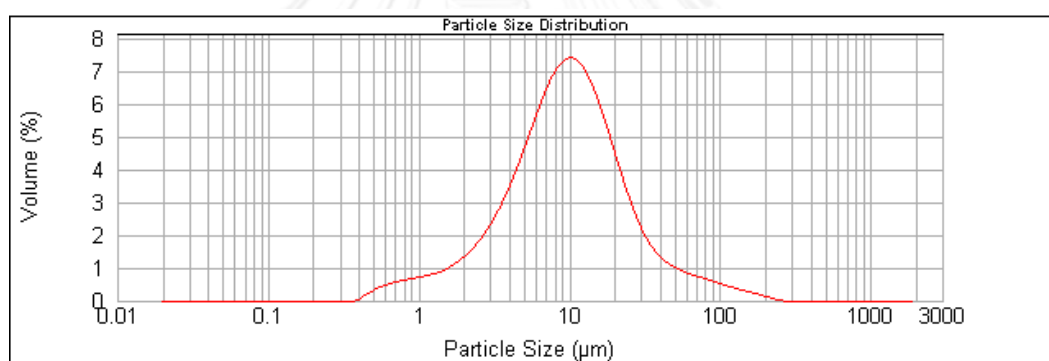
4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบจริง

น้ำดิบจริงที่นำมาใช้ในการศึกษาขั้นนี้ เป็นน้ำดิบแหล่งเดียวกับน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำสามเสน การประปานครหลวง ที่ได้จากการเก็บตัวอย่างและนำมาวิเคราะห์ทันที ในวันที่ 17 กันยายน 2556 และวันที่ 6 – 7 กุมภาพันธ์ 2557 และมีผลการวิเคราะห์ค่าความขุ่นอยู่ที่

60 และ 20 เอ็นทียู ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบและขนาดของอนุภาคในน้ำดิบด้วยเครื่องวิเคราะห์อนุภาค (Particle Size Analyzer) แสดงดังตารางที่ 4-2 และภาพที่ 4-2 ตามลำดับ หลังจากนั้นน้ำดิบจริงดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยวิธีจาร์เทสและประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยจะทำการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในส่วนของ การศึกษาชนิดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน - ฟล็อกคูเลชันโดยวิธีจาร์เทส และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนต่อไป

ตารางที่ 4-2 ลักษณะน้ำดิบจริง

ความขุ่น (เอ็นทียู)	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (กรัมต่อลิตร)	ขนาดของอนุภาค D ₅₀ (ไมครอน)	ค่าพีเอช (pH)	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของ CaCO ₃)
60	0.0563	9.639	7.16	80.2
20	0.0423		7.71	126



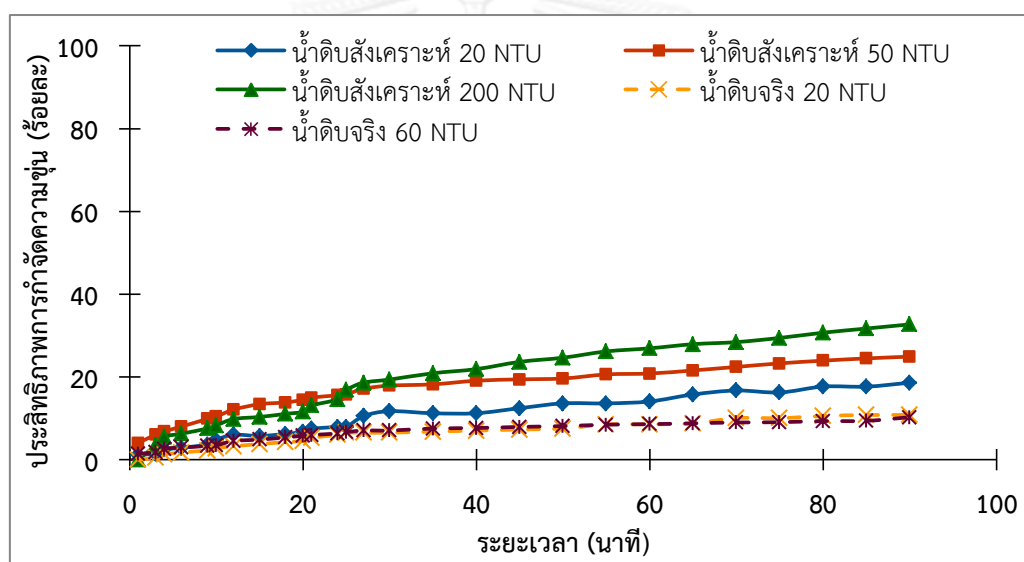
ภาพที่ 4-2 ขนาดของอนุภาคของของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบจริง

จากภาพที่ 4-2 พบว่าอนุภาคแขวนลอยในน้ำดิบมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 9.639 ไมครอน และเมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยวิธีการตกตะกอนแบบโดด (Discrete Settling Test) เช่นเดียวกับน้ำดิบสังเคราะห์ ผลการวิเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคแขวนลอย เท่ากับร้อยละ 10.80 และ 10.86 ที่ความขุ่นเริ่มต้น 60 และ 20 เอ็นทียู ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4-3 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการตกตะกอนที่ต่ำของน้ำซึ่งเป็นผลมาจากความมีเสถียรภาพของอนุภาคแขวนลอย และความสามารถในการตกตะกอนที่ต่ำกว่าน้ำดิบสังเคราะห์ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคโดยรวมที่มีขนาดเล็กกว่า กล่าวคือ ความสามารถในการตกตะกอนหรือกระบวนการแยกด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity Separation) มีค่าแปรผันตรงกับความเร็วการตกตะกอน (Settling Velocity) และความเร็วการตกตะกอนดังกล่าวมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับขนาดอนุภาคยกกำลัง 2 ดังที่แสดงในสมการ 4.1 (Reynolds & Richards, 1996)

$$U_T = \frac{g(\rho_p - \rho)D_p^2}{18\mu} \quad (4.1)$$

เมื่อ ,

- U_T = ความเร็วสุดท้ายของอนุภาค, m/s
- g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก, m/s^2
- ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาค, kg/m^3
- ρ = ความหนาแน่นของเฟสของเหลว, kg/m^3
- D_p^2 = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค, m
- μ = ความหนืดของของไหล, $N\cdot s/m^2$ โดยที่ $N = kg\cdot m/s^2$



ภาพที่ 4-3 กราฟแสดงผลการตกตะกอนแบบไดคอต (Discrete Settling) ของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู และน้ำดิบจริงที่มีความขุ่นเริ่มต้น 20 และ 60 เอ็นทียู

จากผลการศึกษาในการทดลองนี้สรุปได้ว่า อนุภาคแขวนลอยของเบนโทไนท์ในน้ำดิบสังเคราะห์และอนุภาคแขวนลอยที่อยู่ในน้ำดิบจริงสามารถกำจัดได้โดยวิธีทางกายภาพ (Physical Treatment) ด้วยกระบวนการตกตะกอน แต่มีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของอนุภาคแขวนลอย กล่าวคือ มีขนาดอนุภาคเล็กและมีเสถียรภาพในระบบ ในการนี้จึงมีความจำเป็นต้องใช้กระบวนการทางเคมี (Chemical Treatment) หรือกระบวนการโคแอกูแลชัน – ฟล็อกคูเลชัน ร่วมกับกระบวนการทางกายภาพหรือที่เรียกว่า “กระบวนการทางเคมีกายภาพ (Physicochemical)” เพื่อทำลายเสถียรภาพและเพิ่มขนาดของอนุภาคแขวนลอย ซึ่งในการศึกษาขั้นต่อไปจะทำการศึกษากระบวนการโคแอกูแลชัน – ฟล็อกคูเลชันด้วยวิธีจาร์เทส (Jar Test) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอนุภาคแขวนลอยและศึกษาหาชนิดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมต่อกระบวนการดังกล่าว

4.2 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชันต่อการกำจัดความขุ่น

การศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชันต่อการกำจัดความขุ่นในการทดลองนี้ทำเพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพและความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดต่อน้ำดิบสังเคราะห์โดยวิธีจาร์เทส ซึ่งสารโคแอกกูแลนต์ที่นำมาทดลองในขั้นตอนนี้มีทั้งหมด 4 ชนิด ประกอบไปด้วย สารส้มน้ำ (Aluminium Sulphate หรือ Alum, $Al_2(SO_4)_3$) เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric Chloride, $FeCl_3$) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminum Chloride, PACl) และอลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (Aluminium Chlorohydrate, ACH) และช่วงความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบที่ศึกษาได้แก่ 20 50 และ 200 เอ็นทียู ผลการทดลองพบว่าสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด

ผลการศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชันต่อการกำจัดความขุ่นโดยวิธีจาร์เทสในขั้นตอนแรกจะศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด ซึ่งพบว่าสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบโดยประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ค่าความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู สามารถสรุปข้อมูลได้ดังที่แสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ประสิทธิภาพและความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู

ความขุ่นเริ่มต้น (เอ็นทียู)	ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (ร้อยละ)	ความเข้มข้นที่เหมาะสม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าพีเอช	
				เริ่มต้น	สุดท้าย
20	สารส้มน้ำ	97.78	25	7.23	7.21
	เฟอร์ริกคลอไรด์	97.66	20	7.14	7.12
	โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์	98.61	2	7.11	6.90
	อลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต	95.99	1.5	7.13	7.13
50	สารส้มน้ำ	98.76	20	7.28	7.17
	เฟอร์ริกคลอไรด์	98.23	20	7.42	7.23
	โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์	99.34	2	7.35	7.32
	อลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต	96.12	2	7.23	7.14

ตารางที่ 4-3 ประสิทธิภาพและความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู (ต่อ)

ความขุ่นเริ่มต้น (เอ็นทียู)	ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (ร้อยละ)	ความเข้มข้นที่เหมาะสม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าพีเอช	
				เริ่มต้น	สุดท้าย
200	สารส้มน้ำ	98.34	60	7.22	7.03
	เพอร์ริคคโลไรด์	99.46	65	7.18	6.55
	โพลิลูมิเนียมคลอไรด์	99.54	6	7.27	7.23
	อลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต	94.21	6	7.22	7.21

ผลการศึกษาในขั้นตอนนี้พบว่าสารโคแอกกูแลนต์ทั้ง 4 ชนิด สามารถใช้ทำลายเสถียรภาพและกำจัดความขุ่นในน้ำดิบสังเคราะห์ได้ โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดสามารถอธิบายได้ดังนี้

ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของสารส้มน้ำ เพอร์ริคคโลไรด์ โพลิลูมิเนียมคลอไรด์ และอลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต เท่ากับร้อยละ 97.78 97.66 98.61 และ 95.99 ตามลำดับ สำหรับที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 และ 200 เอ็นทียู ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของสารทั้ง 4 ชนิดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้มีโอกาสที่อนุภาคจะรวมตัวกันเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของสารส้มน้ำ เพอร์ริคคโลไรด์ โพลิลูมิเนียมคลอไรด์ และอลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต เท่ากับร้อยละ 98.76 98.23 99.34 และ 96.12 สำหรับที่ความขุ่นเริ่มต้น 200 เอ็นทียูจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 98.34 99.46 99.54 และ 94.21 ตามลำดับ โดยค่าพีเอชของน้ำดิบหลังการกำจัดความขุ่นประมาณ 6.55 – 7.32

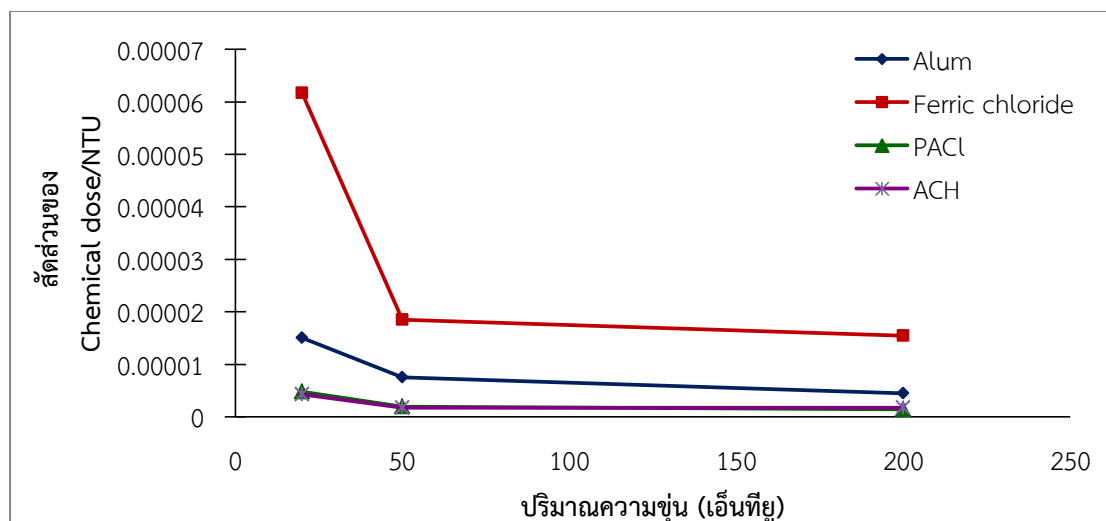
จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่า กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันมีความจำเป็นต่อกระบวนการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำ โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำขึ้นกับชนิดสารโคแอกกูแลนต์และปริมาณความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบ ดังนั้นจึงนำไปสู่การศึกษาในขั้นตอนถัดไป คือ การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดที่มีต่อปริมาณความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบที่แตกต่างกัน

4.2.2 ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

จากผลการทดลองพบว่าสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดมีความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการกำจัดความขุ่นในปริมาณที่แตกต่างกันดังที่แสดงในตารางที่ 4-4 เมื่อพิจารณาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดโดยการเปรียบเทียบเป็นสัดส่วนโมลของสารที่ใช้กับปริมาณความขุ่นดังสมการที่ 4.1 พบว่าอัตราส่วนการใช้สารโคแอกกูแลนต์ในรูปของสัดส่วนระหว่างโมลต่อลิตรของสารโคแอกกูแลนต์จะแปรผกผันกับปริมาณความขุ่น กล่าวคือ น้ำดิบที่มีปริมาณความขุ่นสูงอัตราส่วน

การใช้สารโคแอกกูแลนต์ในรูปแบบของสัดส่วนระหว่างโมลต่อลิตรของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดจะมีปริมาณต่ำ ในขณะที่น้ำดิบที่มีปริมาณความขุ่นต่ำจะต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4-4 สำหรับผลการทดลองอย่างละเอียดได้แสดงในภาคผนวก ก-4

$$\text{ratio} = \frac{\text{Chemical dose (mol/L)}}{\text{NTU}} \quad (4.1)$$



ภาพที่ 4-4 แสดงสัดส่วนระหว่างโมลต่อลิตรของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดกับปริมาณความขุ่น

จากภาพที่ 4-4 สามารถอธิบายได้ว่า สารโคแอกกูแลนต์ชนิดโพลีลูมิเนียมคลอไรด์และอลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต มีการใช้ปริมาณที่ใกล้เคียงกัน คือ 4.73×10^{-6} 1.89×10^{-6} และ 1.42×10^{-6} โมลต่อลิตร ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ตามลำดับ สำหรับสารโคแอกกูแลนต์ชนิดโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ และ 4.30×10^{-6} โมลต่อลิตร ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู และ 1.72×10^{-6} โมลต่อลิตร ที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 และ 200 เอ็นทียู สำหรับสารโคแอกกูแลนต์ชนิดอลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต ในขณะที่ปริมาณสารส้มน้ำที่เหมาะสมเท่ากับ 1.50×10^{-5} 7.50×10^{-6} และ 4.50×10^{-6} โมลต่อลิตร ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ตามลำดับ ส่วนปริมาณที่เหมาะสมของเฟอร์ริกคลอไรด์ คือ 6.17×10^{-5} 1.85×10^{-5} และ 1.54×10^{-5} โมลต่อลิตร ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์และอลูมิเนียมคลอโรไฮเดรตกับสารส้มน้ำและเฟอร์ริกคลอไรด์ จะพบว่าการใช้สารโคแอกกูแลนต์ในปริมาณที่ต่ำกว่ามาก ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกหลักของการทำลายเสถียรภาพและการรวมตะกอนของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด กล่าวคือ สารส้มน้ำและเฟอร์ริกคลอไรด์มีกลไกหลักเป็นการห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น (Sweep Flocculation) ซึ่งต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์สูงเพื่อสร้างผลึกสำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาค และเนื่องจากกลไกนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของอนุภาค การตกตะกอนจึงไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นในขณะที่ค่าซีตาโพเทนเชียลมีค่าต่ำสุด โดยที่ค่าพีเอชจะมีบทบาทสำคัญ (Kan et al., 2002) เนื่องจากจะส่งผลต่อความสามารถ

ในการตกผลึกของสาร โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมในการใช้สารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน และส่งผลต่อกลไกการดูดติดผิว การทำลายประจุไฟฟ้า รวมถึงกลไกการห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึกสารประกอบอีกด้วย โดยค่าพีเอชของน้ำดิบที่ทดลองในช่วง 7 – 8 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมของสารส้ม น้ำ นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสารส้มน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกลไกการตกตะกอนแบบห่อหุ้มอนุภาคจะอยู่ในช่วง 20 – 60 มิลลิกรัมต่อลิตร (Tchobanoglous, Burton, Stensel, Metcalf, & Eddy, 2003) ซึ่งเป็นช่วงความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการกำจัดความขุ่นจากการทดลอง ในขณะที่ เฟอร์ริคคลอไรด์จะมีประสิทธิภาพดีในช่วงค่าพีเอช 5 – 7 จึงเป็นสาเหตุให้ต้องการปริมาณสารเฟอร์ริคคลอไรด์มากกว่าสารส้มน้ำสำหรับการกำจัดความขุ่น

สำหรับสารโคแอกกูแลนต์ชนิดโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ และลูมิเนียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์จะทำลายเสถียรภาพของอนุภาคด้วยกลไกการดูดติดผิว (Adsorption Coagulation)(Kan et al., 2002) ดังนั้น การรวมตะกอนด้วยวิธีการนี้จึงไม่ต้องการสารโคแอกกูแลนต์ในปริมาณมากดังเช่นกลไกแรก นอกจากนั้น กลไกแบบดูดติดผิวนี้สามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์เป็นประจุตรงกันข้าม (Charge Reversal) ได้หากเติมสารในปริมาณมากเกินไป และจะทำให้เสถียรภาพของอนุภาคจะฟื้นคืนขึ้นมาใหม่ จึงมีความจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ทางทฤษฎี Stoichiometric ระหว่างปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์กับปริมาณความขุ่นเพื่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ดี (Ching, Tanaka, & Elimelech, 1994; Wu, Ge, Wang, & Tang, 2007)

ผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า สารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดมีกลไกหลักในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคและกำจัดความขุ่นออกจากน้ำที่แตกต่างกัน โดยกลไกหลักของสารแต่ละชนิดจะส่งผลถึงความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ และประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดด้วยวิธีการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test)

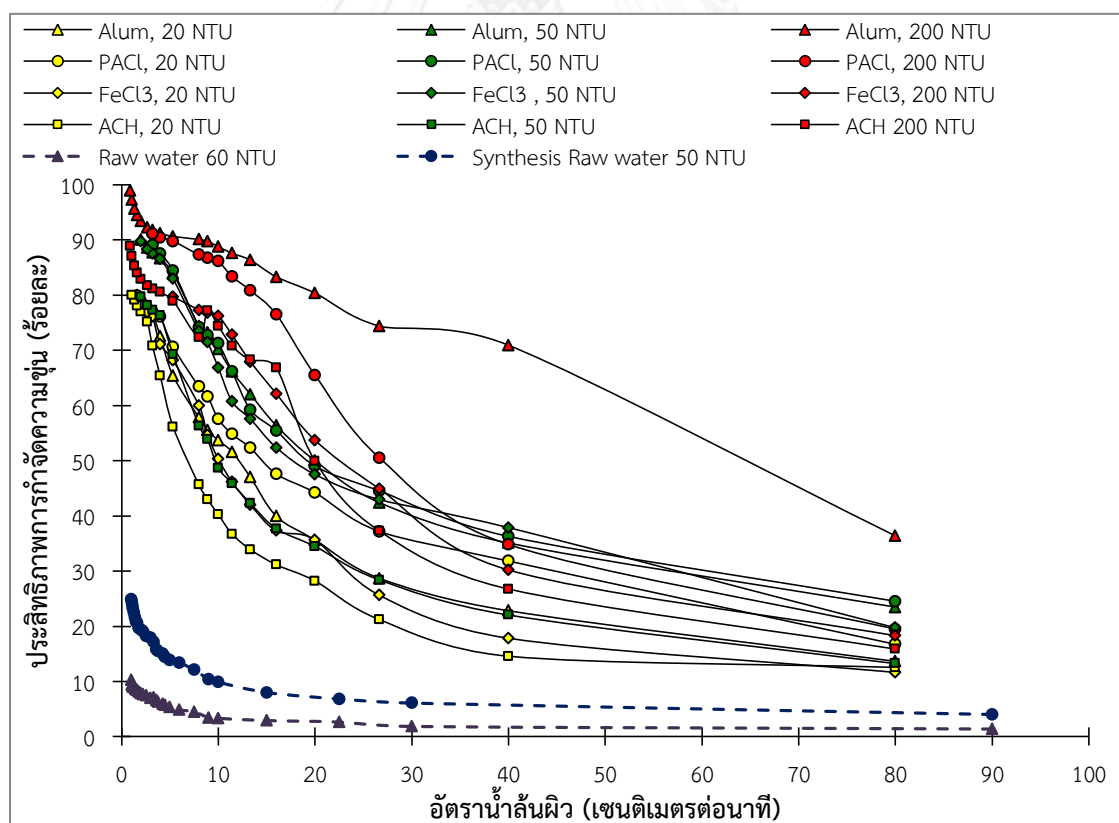
4.2.3 การศึกษาความเหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์ด้วยวิธีการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test)

การศึกษากการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มของฟล็อกที่เกิดจากปริมาณสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดในปริมาณที่เหมาะสม ทำได้โดยการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูแลชัน – ฟล็อกคูเลชัน ด้วยวิธีการจาร์เทศมาทดสอบการตกตะกอนด้วยคอลัมน์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 เมตร สูง 1.8 เมตร ที่ระดับความสูง 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 เมตร จากระดับผิวน้ำ โดยเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าความขุ่นทุก 1 นาที เป็นระยะเวลา 10 นาที และหลังจากนั้นจะเก็บตัวอย่างทุก 5 นาที เป็นระยะเวลา 80 นาที ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) แสดงดังภาพที่ 4-5 และแสดงผลการทดลองโดยละเอียดที่ภาคผนวก ก-5

จากการทดลองพบว่า ที่ความขุ่น 20 เอ็นทียู ประสิทธิภาพการตกตะกอนของฟล็อกที่เกิดจากโพลีลูมิเนียมคลอไรด์จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ฟล็อกที่เกิดจากสารส้มน้ำและเฟอร์ริคคลอไรด์จะมีประสิทธิภาพรองลงมา ตามลำดับ ในขณะที่ ที่ความขุ่น 200 เอ็นทียูประสิทธิภาพการตกตะกอนของฟล็อกที่เกิดจากสารส้มน้ำ จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด และฟล็อกที่เกิดจาก

โพลีลูมิเนียมคลอไรด์จะมีประสิทธิภาพรองลงมา ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กล่าวคือ กลไกหลักของการตกตะกอนด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์เกิดจากกลไกดูดติดผิว ในขณะที่กลไกหลักของสารส้มน้ำและเฟอร์ริกคลอไรด์จะใช้การห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารที่สร้างขึ้น ซึ่งความขุ่นของน้ำดิบจะแปรผันตามปริมาณของแข็งแขวนลอย ดังนั้น โอกาสในการรวมตัวของอนุภาคกับผลึกของสารโคแอกกูแลนต์จะแปรผันตามกับปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบ เพราะฉะนั้น กลไกการห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารที่สร้างขึ้นจึงมีประสิทธิภาพสูงเมื่อน้ำดิบมีความขุ่นที่เพิ่มสูงขึ้น และมีประสิทธิภาพต่ำกว่ากลไกการดูดติดผิวของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์เมื่อน้ำดิบมีค่าความขุ่นเริ่มต้นต่ำ

สำหรับประสิทธิภาพการตกตะกอนของสารส้มน้ำกับเฟอร์ริกคลอไรด์ที่แตกต่างกันสามารถอธิบายได้ว่า ในกลไกของการสร้างผลึกมาห่อหุ้มอนุภาคนั้น ค่าพีเอชจะมีบทบาทสำคัญเนื่องจากความสามารถในการตกผลึกของสารต่างๆ จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช โดยสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดจะมีระดับพีเอชที่เหมาะสมที่สุดต่างกัน ซึ่งสำหรับช่วงพีเอชของน้ำดิบที่ทำการศึกษาอยู่ในช่วง 7 – 8 ซึ่งสารส้มน้ำตกตะกอนผลึกได้ดีกว่าเฟอร์ริกคลอไรด์ในช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม จึงทำให้การทำลายเสถียรภาพด้วยการห่อหุ้มด้วยผลึกได้ดีกว่า และมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนสูงกว่า (Tchobanoglous et al., 2003)



ภาพที่ 4-5 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดที่อัตราน้ำล้นผิวต่างๆ

ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของสารส้มน้ำ เฟอร์ริคคลอไรด์ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ และอลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต ที่อัตราน้ำล้นผิว 3 เซนติเมตรต่อนาที เท่ากับร้อยละ 76.70 76.11 76.85 และ 70.75 ตามลำดับ สำหรับที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 และ 200 เอ็นทียู ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของสารทั้ง 4 ชนิด เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณความขุ่นในน้ำดิบจะแปรผันตรงกับปริมาณของอนุภาคแขวนลอยในน้ำ จึงทำให้มีโอกาสที่อนุภาคจะรวมตัวกันเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของสารส้มน้ำ เฟอร์ริคคลอไรด์ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ และอลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต เท่ากับร้อยละ 87.69 87.47 89.08 และ 77.23 และที่ความขุ่นเริ่มต้น 200 เอ็นทียูจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 91.72 80.99 91.03 และ 81.09 ตามลำดับ

จากการทดลองหาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมของสารแต่ละชนิด พบว่าปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบและกลไกหลักของการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคแขวนลอยเพื่อกำจัดความขุ่นออกจากน้ำ โดยกลไกหลักที่เกิดขึ้นจะถูกควบคุมด้วยคุณภาพน้ำดิบซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น นอกจากนี้ การเติมสารโคแอกกูแลนต์เพื่อกำจัดความขุ่นออกจากน้ำอาจส่งผลต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้ สำหรับพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกระบวนการกำจัดความขุ่นขึ้นกับค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และค่าพีเอช (pH) ซึ่งมีความสำคัญต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารโคแอกกูแลนต์และยังเป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องควบคุมเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำ เพราะฉะนั้น จึงต้องศึกษาคุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน - ฟล็อกคูเลชัน โดยมีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ในปริมาณที่เหมาะสมต่อไป

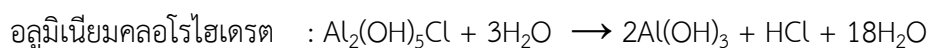
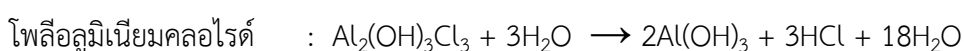
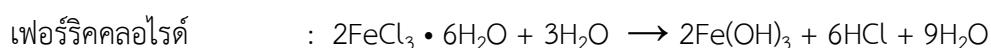
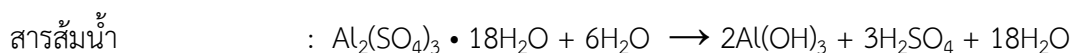
4.2.4 ศึกษาคุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงจากกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยวิธีจาร์เทส

การควบคุมคุณภาพน้ำหลังกระบวนการผลิตที่มีการเติมสารเคมีในกระบวนการผลิตน้ำประปานั้นถือว่ามีสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากคุณภาพของน้ำที่ผลิตต้องมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้น้ำ สำหรับคุณภาพน้ำที่ต้องควบคุมในขั้นการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำในระบบการผลิตนั้น นอกจากจะพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำแล้ว ยังต้องให้ความสำคัญกับพารามิเตอร์หลักอีกสองอย่าง ได้แก่ ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และค่าพีเอช (pH) โดยพารามิเตอร์ทั้งสองชนิดนั้นนอกจากจะเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำแล้วยังเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารโคแอกกูแลนต์ และกลไกในการบำบัดน้ำในขั้นตอนอื่นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปา (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542) ดังนั้น ในการทดลองเพื่อหาชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกำจัดความขุ่นจึงให้ความสำคัญกับพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ โดยในการทดลองจะทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำทั้งก่อนและหลังการกำจัดความขุ่นด้วยสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 คุณภาพน้ำก่อนและหลังการกำจัดความขุ่น

ชนิดของสาร โคแอกกูแลนต์	ปริมาณ สารที่ใช้ (mol/L)	พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด					
		ก่อนการทดลองกำจัดความขุ่น			หลังการทดลองกำจัดความขุ่น		
		ความขุ่น (NTU)	พีเอช	ความเป็นต่าง (mg/L)	ความขุ่น (NTU)	พีเอช	ความเป็นต่าง (mg/L)
Alum	1.50×10^{-5}	20	7.23	80.8	0.455	7.21	73.7
FeCl ₃	6.17×10^{-5}		7.14	77.6	0.473	6.09	67.0
PACL	4.73×10^{-6}		7.35	80.0	0.272	7.31	79.6
ACH	4.30×10^{-6}		7.13	75.8	0.806	7.12	74.8
Alum	7.50×10^{-6}	50	7.28	94.2	0.631	7.17	85.2
FeCl ₃	1.85×10^{-5}		7.42	76.4	0.885	7.23	58.8
PACL	1.89×10^{-6}		7.35	78.9	0.330	7.30	77.9
ACH	1.72×10^{-6}		7.13	74.8	1.950	7.13	74.0
Alum	4.50×10^{-6}	200	7.22	72.0	3.33	7.03	47.4
FeCl ₃	1.54×10^{-5}		7.18	77.4	1.09	6.55	27.8
PACL	1.42×10^{-6}		7.27	74.0	0.93	7.23	62.2
ACH	1.72×10^{-6}		7.22	72.0	11.7	7.21	69.8

จากตารางที่ 4-4 พบว่าการเติมสารโคแอกกูแลนต์ส่งผลให้ค่าพีเอชและค่าความเป็นต่างลดลง โดยค่าพีเอชและค่าความเป็นต่างในระบบจะมีค่าแปรผันตามกันเนื่องจากค่าความเป็นต่างจะเป็นตัวช่วยสะเทินความเป็นกรดที่เกิดขึ้น ดังนั้น ค่าความเป็นต่างที่ลดลงย่อมแสดงให้เห็นถึงสภาพความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้นในระบบ และมีโอกาสที่ค่าพีเอชจะลดลง และจากการทดลองยังพบว่าสารโคแอกกูแลนต์ที่ส่งผลต่อค่าพีเอชและค่าความเป็นต่างเรียงลำดับจากน้อยไปมาก ได้แก่ อลูมิเนียมคลอไรด์ไฮเดรต โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ สารส้มน้ำ และเฟอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงและกลไกที่เกิดขึ้นได้จากสมการเคมีต่อไปนี้



โดยการพิจารณาจากสมการเคมีเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของค่าพีเอชและความเป็นต่าง พบว่าปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl₃) 2 โมล จะทำให้เกิดกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในระบบมากถึง 6 โมล ในขณะที่สารส้มน้ำ (Al₂(SO₄)₃) 1 โมล จะทำให้เกิดกรดซัลฟิวริก

(H₂SO₄) 3 โมล ซึ่งปริมาณกรดแก่ที่เกิดขึ้นในระบบนั้นมีค่าเท่ากับเมื่อเปรียบเทียบกับเป็นสัดส่วนต่อโมล แต่เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ จะพบว่าสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดต้องการปริมาณสารเคมีในรูปของโมลต่อลิตรที่แต่ละค่าความความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน ซึ่งจากการทดลองพบว่า สารเพอร์ริคโคลไรด์ต้องการความเข้มข้นมากกว่าสารส้มน้ำอย่างมีนัยสำคัญ (จากภาพที่ 4-4) จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างที่แตกต่างกันตามสัดส่วนของปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในรูปของโมลต่อลิตรที่แต่ละความเข้มข้นของน้ำดิบเริ่มต้น การเติมเพอร์ริคโคลไรด์จึงทำให้ค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างของน้ำลดลงมากกว่าสารโคแอกกูแลนต์ชนิดอื่น

จากการทดลองนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า กระบวนการโคแอกกูแลชัน - ฟล็อกคูเลชันมีความสำคัญกับการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำ โดยที่สารโคแอกกูแลนต์ชนิดสารส้มน้ำมีความเหมาะสมสำหรับการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำได้ดีที่สุด เนื่องจาก สารส้มน้ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ดี โดยมีความขุ่นสุดท้ายต่ำกว่า 5 เอ็นทียู ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การควบคุมคุณภาพน้ำออกจากถังตกตะกอน (Samsen Water Treatment Plant, 2009 – 2012) มีประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มที่ดีที่สุด (Flocculent Settling Test) โดยเฉพาะช่วงความเข้มข้นของน้ำดิบที่มีค่าความขุ่นสูง สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของสารส้มน้ำเท่ากับร้อยละ 87.69 ที่อัตราน้ำล้นผิว 3 เซนติเมตรต่ออนาที ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เอ็นทียู และความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และการเติมสารโคแอกกูแลนต์ชนิดสารส้มน้ำในกระบวนการกำจัดความขุ่นส่งผลต่อคุณภาพน้ำผลิตเพียงเล็กน้อย โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญนอกเหนือจากค่าความขุ่น ได้แก่ ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และค่าพีเอช (pH) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำแล้วยังเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารโคแอกกูแลนต์ และกลไกในการบำบัดน้ำในขั้นตอนอื่นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปา (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) นอกจากนั้นการเลือกสารโคแอกกูแลนต์มาใช้ในกระบวนการกำจัดความขุ่นนั้นควรจะเป็นสารที่หาง่าย ราคาถูก และไม่มีความเป็นพิษหลงเหลือในน้ำ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของสารโคแอกกูแลนต์ที่เป็นสารประกอบของอลูมิเนียม เนื่องจากเพอร์ริคโคลไรด์ เป็นสารที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนค่อนข้างสูง จึงทำให้ค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างของน้ำลดลง และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแล้วจะทำให้มีเหล็กหลงเหลืออยู่ในน้ำซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้น้ำ (Letterman & Association, 1999) เพอร์ริคโคลไรด์จึงไม่เป็นที่นิยมในการใช้กำจัดความขุ่นเท่าใดนัก จากการทดลองยังพบว่าการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มของเพอร์ริคโคลไรด์ยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มของฟล็อกที่เกิดจากสารส้มน้ำและโพลัลูมิเนียมคลอไรด์

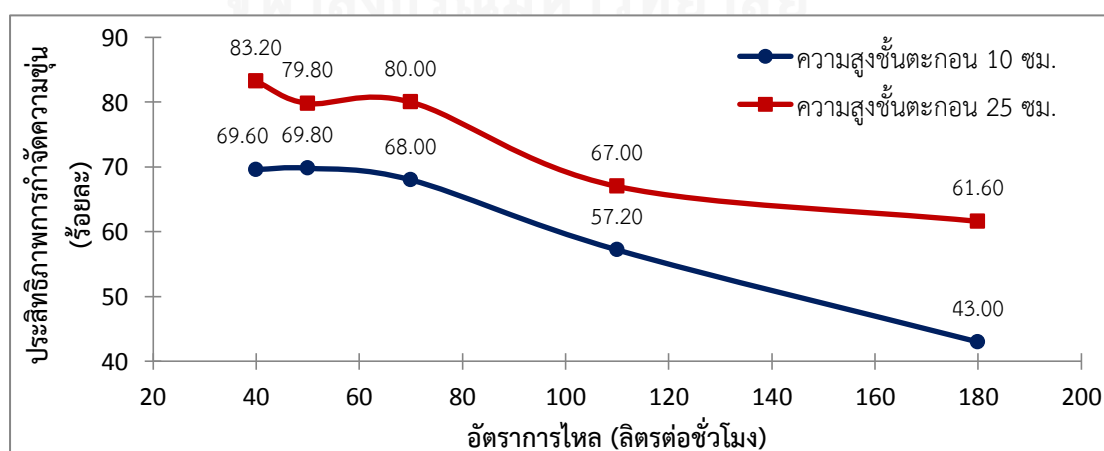
เพราะฉะนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกสารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่จะนำไปใช้ในการทดลองกับถังตกตะกอนสามชั้นแบบหมุนเวียนตะกอน เนื่องจากกระบวนการโคแอกกูแลชัน - ฟล็อกคูเลชันโดยวิธีจาร์เทสสามารถกำจัดความขุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในกระบวนการจาร์เทสนั้นยังต้องการกลไกการทำงานถึง 3 ขั้นตอน ซึ่งเทียบเท่ากับระบบผลิต 3 ถึงปฏิกิริยา แต่ถ้าสามารถใช้สารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับถังตกตะกอนสามชั้นเป็นการรวมทั้ง 3 ถึงปฏิกิริยาไว้ในภายในถังเดียวได้ จะทำให้ระบบการผลิตน้ำมีขนาดที่เล็กลง และประหยัดค่าใช้จ่ายทั้งทางด้านการก่อสร้างและการบำรุงรักษา

4.3 ศึกษาผลของความสูงชั้นตะกอน และอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier)

การศึกษากำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet clarifier) ใช้ถังตกตะกอนดังกล่าวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 เซนติเมตรสูง 80 เซนติเมตร การติดตั้งถังตกตะกอนเป็นแบบที่สามารถถอดออกได้สะดวก โดยกำหนดช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่ 6 เซนติเมตร และช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง (ΔH) ที่ความสูง 30 เซนติเมตร ทำการทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ควบคุมความสูงของชั้นตะกอนที่ 10 และ 25 เซนติเมตร และทดลองกับอัตราการไหลที่ 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง สำหรับผลการทดลองสามารถอธิบายโดยละเอียดได้ดังต่อไปนี้

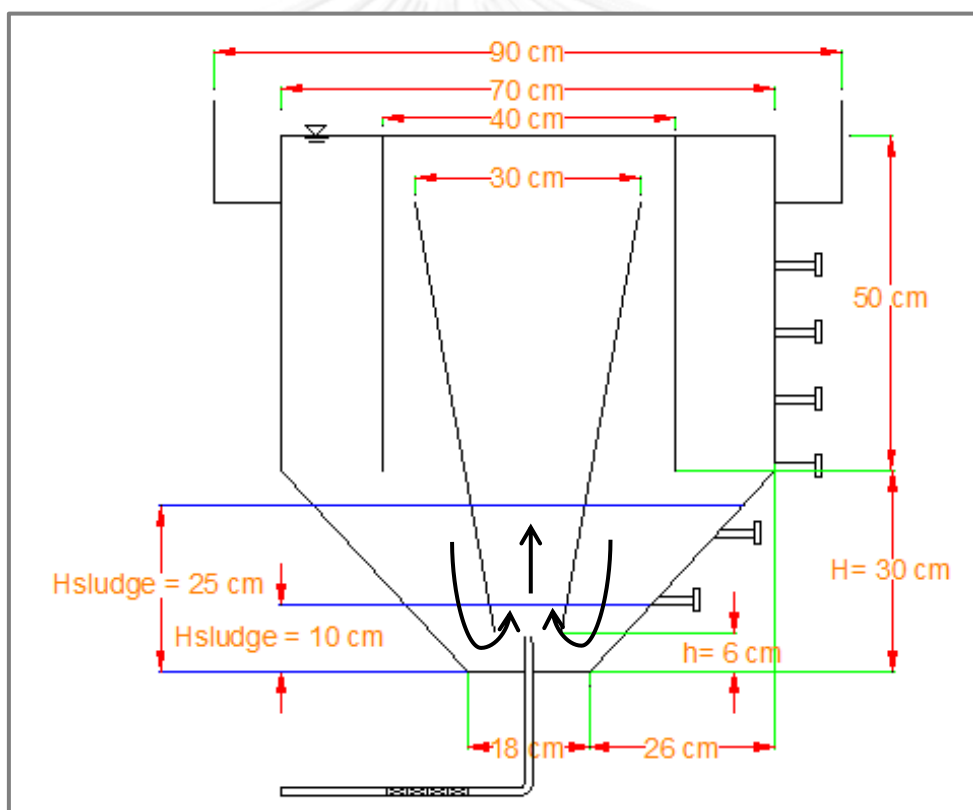
4.3.1 ผลของความสูงของชั้นตะกอนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอน

จากการศึกษาผลของความสูงของชั้นตะกอนที่ 10 และ 25 เซนติเมตร พบว่าความสูงของชั้นตะกอนมีผลต่อประสิทธิภาพของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสูงกว่าความสูงของชั้นตะกอนที่ 10 เซนติเมตร ในทุกอัตราการไหล ดังแสดงในภาพที่ 4-6 เนื่องจากความสูงของชั้นตะกอนในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์มีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนกลับเข้าไปในระบบ ซึ่งตะกอนที่หมุนเวียนเข้าไปในระบบจะเป็นตัวเพิ่มเป่าส้มฝัดระหว่างอนุภาคที่ผ่านการทำลายเสถียรภาพ (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009; Degremont, 1999) นอกจากนี้ ถังตกตะกอนที่ใช้ทดลองจะมีความสูงของหัวกระจายน้ำ (Inlet Nozzle) จากพื้นถังสูง 6 เซนติเมตร เพราะฉะนั้นที่ชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตร จะมีโอกาสการหมุนเวียนตะกอนกลับเข้าไปในระบบส่วนของฟล็อกคูลชันมากกว่าที่ชั้นตะกอนสูง 10 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4-7



ภาพที่ 4-6 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนที่ความสูงของชั้นตะกอนและอัตราการไหลที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองพบว่า ที่ความสูงของชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 69.60 69.80 68.00 57.20 และ 43.00 ที่อัตราการไหล 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่ความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตรจะให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากมีการหมุนเวียนตะกอนเข้าสู่บริเวณฟล็อกคูเลชันมากขึ้น จึงทำให้อนุภาคมีโอกาสรวมตัวกันมากขึ้นและสามารถตกตะกอนได้ดีกว่าที่ความสูงของชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร โดยที่ความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 83.20 79.80 80.00 67.00 และ 61.60 ที่อัตราการไหล 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับปริมาณการหมุนเวียนตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อผลการทดลองที่ 4.3.3 นอกจากนี้ ยังพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของระบบจะแปรผกผันกับอัตราการไหลที่ใช้ทดลองในช่วงอัตราการไหล 70 – 180 ลิตรต่อชั่วโมง และเริ่มคงที่ในช่วงอัตราการไหล 40 – 70 ลิตรต่อชั่วโมง



ภาพที่ 4-7 แสดงทิศทางการเวียนกลับของตะกอน

จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณความสูงของชั้นตะกอนและอัตราการไหลที่ใช้ทดลอง โดยความสูงของชั้นตะกอนที่ส่งผลให้ระบบกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนดังกล่าวมีประสิทธิภาพที่ดี คือ ความสูงของชั้นตะกอนที่ 25 เซนติเมตร ดังนั้น การศึกษาขั้นถัดไปจึงสนใจศึกษาถึงอัตราการไหลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier)

4.3.2 ผลของอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)

การทดลองในหัวข้อนี้จะทดลองโดยใช้ถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง โดยอัตราการไหลที่ใช้จะมีผลต่อเวลากัก (t) ภายในระบบและค่าความปั่นป่วนของน้ำ (G) ดังสรุปในตารางที่ 4-5 และแสดงรายละเอียดการคำนวณที่ภาคผนวก ข-2 โดยผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหล 70 และ 110 ลิตรต่อชั่วโมง ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าอยู่ในเกณฑ์การออกแบบและควบคุมระบบ ส่วนที่อัตราการไหล 40 และ 50 ลิตรต่อชั่วโมงนั้น ค่า G ในกระบวนการโคแอกกูเลชันมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนที่อัตราการไหล 180 ลิตรต่อชั่วโมง ค่า t จะต่ำกว่าเกณฑ์การออกแบบทั้งในส่วนกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

ตารางที่ 4-5 ตารางสรุปค่าความปั่นป่วน (G) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (t) ในการทดลอง

Method	Liquid flow rate (L/hr)	Mechanism	G (s^{-1})	t (s)	(G•t)	θ_{sed}^a (hr)	θ_{Jet}^b (hr)
Design criteria *	-	coagulation	> 350	1 < t < 5	< 1700 ^c	1-3	-
	-	flocculation	< 5 ^d	1200-2400	10 ⁴ -10 ⁵		
Jar test	-	coagulation	403.98	60	24,238	0.167	-
	-	flocculation	13.08	1200	15696		
Pilot plant	40	coagulation	243.76	3.31	807.68	4.66	5.49
		flocculation	0.562	3000	1686		
	50	coagulation	340.67	2.65	903.02	3.72	4.39
		flocculation	0.630	2400	1512		
	70	coagulation	564.32	1.89	1068.47	2.79	3.29
		flocculation	0.743	1800	1337.40		
	110	coagulation	1111.7	1.20	1339.4	1.86	2.19
		flocculation	0.931	1200	1117.20		
180	coagulation	2327	0.74	1713.37	1.25	1.47	
	flocculation	0.937	789.6	739.86			

หมายเหตุ – * อ้างอิงเกณฑ์การออกแบบจาก (Bouyer et al., 2005; Degremont, 1999; Hughes, 2000; Reynolds & Richards, 1996)

- a) หมายถึง ระยะเวลาในส่วนของถังตกตะกอน
- b) หมายถึง ระยะเวลาทั้งหมดของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนเจ็ทแคร์รีไฟเออร์
- c) หมายถึง เกณฑ์การออกแบบของ Static Mixer ประเภท Noritake
- d) หมายถึง เกณฑ์การออกแบบสำหรับถังตกตะกอนประเภท Fluidized Bed (Floc Blanket Clarifier)

จากการทดลองหาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ท แครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) พบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมของระบบ คือ 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงถึงร้อยละ 80.00 ถึงแม้ว่าที่อัตราการไหลที่ 40 ลิตรต่อชั่วโมงจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงกว่าเล็กน้อย คือ ร้อยละ 83.20 โดยที่ต้องลดอัตราการไหลลงถึงร้อยละ 42.86 ดังที่แสดงในภาพที่ 4-6 ดังนั้นจึงส่งผลให้ผลิตน้ำใสได้น้อยกว่าในระยะเวลาเดินระบบที่เท่ากัน แต่กลับมีประสิทธิภาพที่เพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมงกับอัตราการไหลที่ 110 ลิตรต่อชั่วโมง จะพบว่าที่อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพียงร้อยละ 67.00 ดังนั้น อัตราการไหลที่เหมาะสมกับระบบกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนที่ใช้ในการทดลองนี้จึงอยู่ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของเกณฑ์การออกแบบ ดังแสดงในตารางที่ 4-5

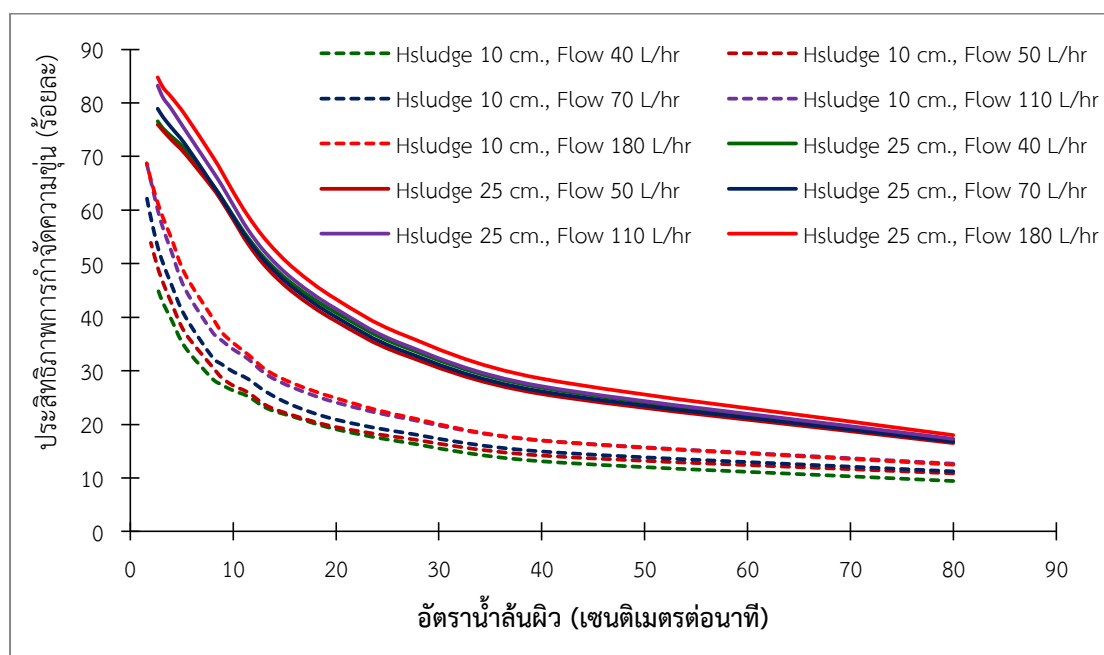
สำหรับผลของความสูงของชั้นตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนกลับเข้าไปในระบบเพื่อเพิ่มเป้าสัมผัสระหว่างอนุภาคที่ผ่านการทำลายเสถียรภาพแล้วสามารถศึกษาได้โดยการทดลองหาประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ของฟล็อกที่เกิดขึ้นในระบบ ดังแสดงหัวข้อการทดลองถัดไป

4.3.3 ประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ของฟล็อกที่เกิดจากการทดลองในแต่ละอัตราการไหลและความสูงของชั้นตะกอน

ในขั้นตอนนี้ จะทำการศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ของฟล็อกที่เกิดขึ้นภายในระบบ โดยทำการทดลองในคอลัมน์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 เมตร สูง 1.8 เมตร และเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความสูง 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 เมตร จากระดับผิวน้ำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพ การเก็บตัวอย่างจะทำทุก 1 นาที เป็นระยะเวลา 10 นาที และหลังจากนั้นจะเก็บตัวอย่างทุก 5 นาที เป็นระยะเวลา 80 นาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4-8

ผลการทดลองพบว่า ที่ความสูงชั้นตะกอน 25 เซนติเมตรจะมีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่สูงกว่าชั้นตะกอนที่ความสูง 10 เซนติเมตร สำหรับทุกอัตราการไหล ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้เป็นไปตามประสิทธิภาพของระบบดังที่กล่าวในหัวข้อผลการทดลองที่ 4.3.1 จึงเป็นการยืนยันได้ว่าความสูงของชั้นตะกอนมีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนในระบบ และส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น แต่ในการทดลองนี้พบว่าที่อัตราการไหลของน้ำสูงจะทำให้มีประสิทธิภาพในการตกตะกอนบริเวณฟล็อกเคลือบของระบบสูงขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลสูงจะสามารถพาตะกอนบริเวณก้นถังตกตะกอนกลับเข้าสู่ระบบได้มากกว่า จึงทำให้มีเป้าสัมผัสเข้าสู่ระบบมากกว่า แต่ที่อัตราการไหลสูงนั้น ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบจะต่ำกว่าที่อัตราการไหลต่ำ เนื่องจากเวลากักของระบบที่ลดลง ทำให้เวลากักบริเวณตกตะกอนภายในถังลดลง จึงส่งผลให้เวลาตกตะกอนของอนุภาคในระบบลดลง ประสิทธิภาพของระบบจึงลดลง โดยประสิทธิภาพการ

ตกตะกอนแบบรวมกลุ่มที่ความสูงของชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร เท่ากับร้อยละ 45.62 49.28 53.14 60.01 และ 61.38 ที่อัตราการน้ำล้นผิว 2.67 เซนติเมตรต่อนาที่ สำหรับอัตราการไหล 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อนาที่ ตามลำดับ ในขณะที่ การตกตะกอนแบบรวมกลุ่มที่ความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพร้อยละ 76.57 75.95 78.91 83.22 และ 84.77 ที่อัตราการน้ำล้นผิว และ สำหรับอัตราการไหลเท่ากัน



ภาพที่ 4-8 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน ที่ความสูงชั้นตะกอน 10 และ 25 เซนติเมตร

ดังนั้น จากผลการทดลองจะพบว่าประสิทธิภาพของการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ขึ้นกับปริมาณความสูงของชั้นตะกอน เนื่องจากความสูงของชั้นตะกอนในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์มีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนกลับเข้าไปในระบบ ซึ่งตะกอนที่หมุนเวียนเข้าไปในระบบจะเป็นตัวเพิ่มเป้าสัมผัสระหว่างอนุภาคที่ผ่านการทำลายเสถียรภาพ (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009; Degremont, 1999) นอกจากนั้นแล้วระบบกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนยังมีตะกอนใหม่ที่เกิดขึ้นจากการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำ เพราะฉะนั้น นอกจากต้องควบคุมอัตราการไหลของน้ำดิบที่เหมาะสม และต้องควบคุมความสูงของชั้นตะกอนให้คงที่ เพื่อรักษาอัตราการหมุนเวียนของตะกอนภายในระบบ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงปริมาณของตะกอนที่เกิดขึ้นใหม่ภายในระบบเพื่อควบคุมความสูงของชั้นตะกอน ในการศึกษาถัดไป

4.3.4 ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นภายในระบบ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์มีทั้งหมด 2 ส่วน คือ ส่วนน้ำใสและส่วนตะกอน โดยส่วนน้ำใสเป็นผลิตภัณฑ์ที่

ต้องการเพื่อนำน้ำไปใช้ประโยชน์ แต่ส่วนตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบถือว่าเป็นของเสียที่ต้องทำการรวบรวมและนำไปจัดการต่อไป และจากผลการทดลองที่ 4.3.1 ซึ่งพบว่ามีความจำเป็นต้องรักษา ระดับความสูงของชั้นตะกอน ดังนั้น ผู้ควบคุมระบบจึงต้องทราบถึงปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น เพื่อกำหนดดำเนินการควบคุมความสูงของชั้นตะกอนให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมตลอดระยะเวลาการเดินระบบ โดยปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบสามารถคำนวณได้จากปริมาณสารเคมีที่ใช้และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดภายใต้เงื่อนไขของอัตราการไหลที่กำหนด (Qasim, Motley, & Zhu, 2000) ดังที่แสดงรายการคำนวณจากภาคผนวก ข-1 ผลจากการคำนวณพบว่าปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ทดลองการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบการทดลองแต่ละสภาวะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจริงจากการทดลอง เพราะฉะนั้น ตะกอนที่เกิดขึ้นใหม่ภายในระยะเวลาทดลองจึงไม่มีผลกระทบต่อความสูงของชั้นตะกอนที่ควบคุมในการทดลอง

ตารางที่ 4-6 ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบ

ความขุ่นเริ่มต้น (เอ็นทียู)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ระยะเวลาเดินระบบต่อวัน (ชั่วโมง)	ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบ (ลิตรต่อวัน)	ความสูงของชั้นตะกอนที่เพิ่มขึ้น (เซนติเมตร)
20	70	8	1.713	0.26
50	40	8	2.235	0.39
	50	8	2.794	0.54
	70	8	3.911	0.84
	110	8	6.146	1.12
	180	8	10.057	1.64
200	70	8	15.469	2.11

ผลการทดลองในส่วนนี้ สามารถสรุปได้ว่าความสูงของชั้นตะกอนในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์ไฟเออร์ (Jet Clarifier) มีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนกลับเข้าไปในระบบ ดังนั้น จึงเกิดแนวคิดเรื่องการปรับอัตราการหมุนเวียนของตะกอนกลับเข้าภายในระบบโดยการปรับระยะห่างระหว่างกรวยขึ้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ภายในถังตกตะกอน และระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) ภายในถังตกตะกอน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับถังตกตะกอนชนิดนี้ต่อไป

4.4 ศึกษาผลของระยะห่างของช่องว่างต่างๆ ภายในถังตกตะกอนกับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

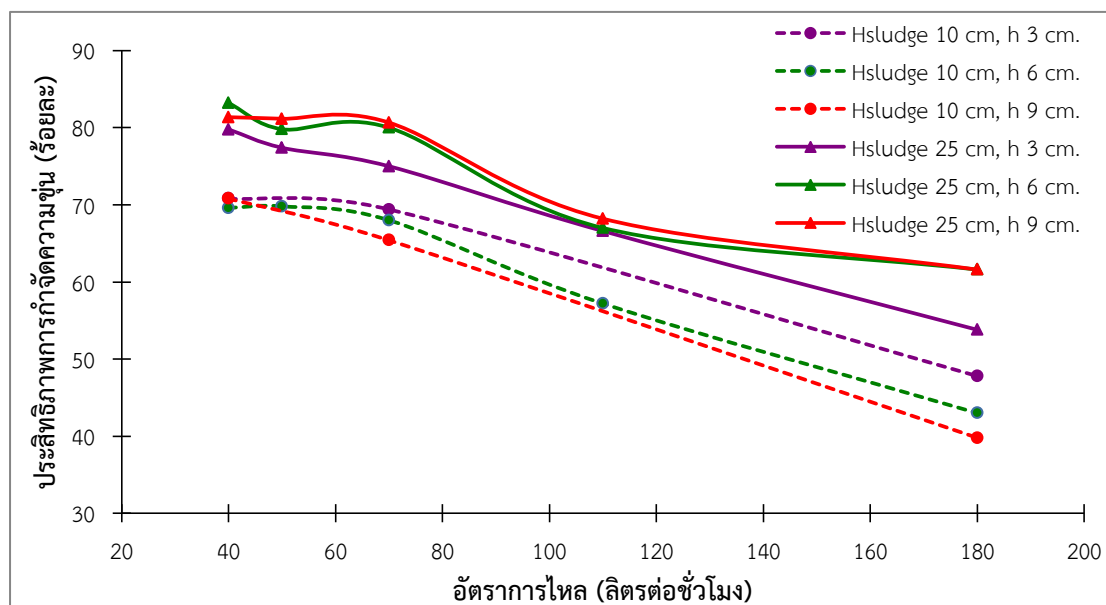
การทดลองนี้ใช้ถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร การติดตั้งถังตกตะกอนเป็นแบบที่สามารถถอดออกได้สะดวก โดยมีการปรับเปลี่ยนช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ตามที่กำหนด คือ 3 6 และ 9 เซนติเมตร และปรับเปลี่ยนช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง (ΔH) ที่ความสูง 20 25 และ 30 เซนติเมตร ทำการทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู โดยการทดลองนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 การทดลองย่อย ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลของระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) กับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

การทดลองนี้ได้ทำการทดลองที่ความสูงของชั้นตะกอน 10 และ 25 เซนติเมตรโดยกำหนดช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่ 3 6 และ 9 เซนติเมตร ช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง (ΔH) ที่ความสูง 30 เซนติเมตร และอัตราการไหลของน้ำดิบ 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองพบว่าความสูงของชั้นตะกอน 10 เซนติเมตรจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของระบบต่ำกว่าการทดลองที่ความสูง 25 เซนติเมตร ในทุกสภาวะการทดลองที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) และอัตราการไหล ภาพที่ 4-9 แสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) มีผลต่อปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนเข้าระบบ โดยที่ความสูงชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอนที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ดี คือ 6 และ 9 เซนติเมตร โดยที่ $\Delta h = 6$ เซนติเมตร ระบบจะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 83.20 79.80 80.00 67.00 และ 61.60 ที่อัตราการไหล 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อ $h = 9$ เซนติเมตร ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเท่ากับ ร้อยละ 81.36 81.16 80.66 68.20 และ 61.60 ที่อัตราการไหล 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4-9 และภาคผนวก ข-2.1 ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่ 6 และ 9 เซนติเมตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ ระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอนที่ 3 เซนติเมตร จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นลดลง

ดังนั้น จากการทดลองนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าความสูงของชั้นตะกอนมีผลต่อการหมุนเวียนตะกอนในระบบซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยความสูงของชั้นตะกอนที่เหมาะสมจากการทดลองนี้ คือ 25 เซนติเมตร ซึ่งเป็นความระยะความสูงเดียวกับการทดลองหาความสูงชั้นตะกอน

ที่เหมาะสมในการทดลองที่ 3 และระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่เหมาะสมจากการทดลองนี้ คือ 6 และ 9 เซนติเมตร



ภาพที่ 4-9 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน ที่ความสูงของชั้นตะกอนที่สภาวะเดินระบบต่างๆ

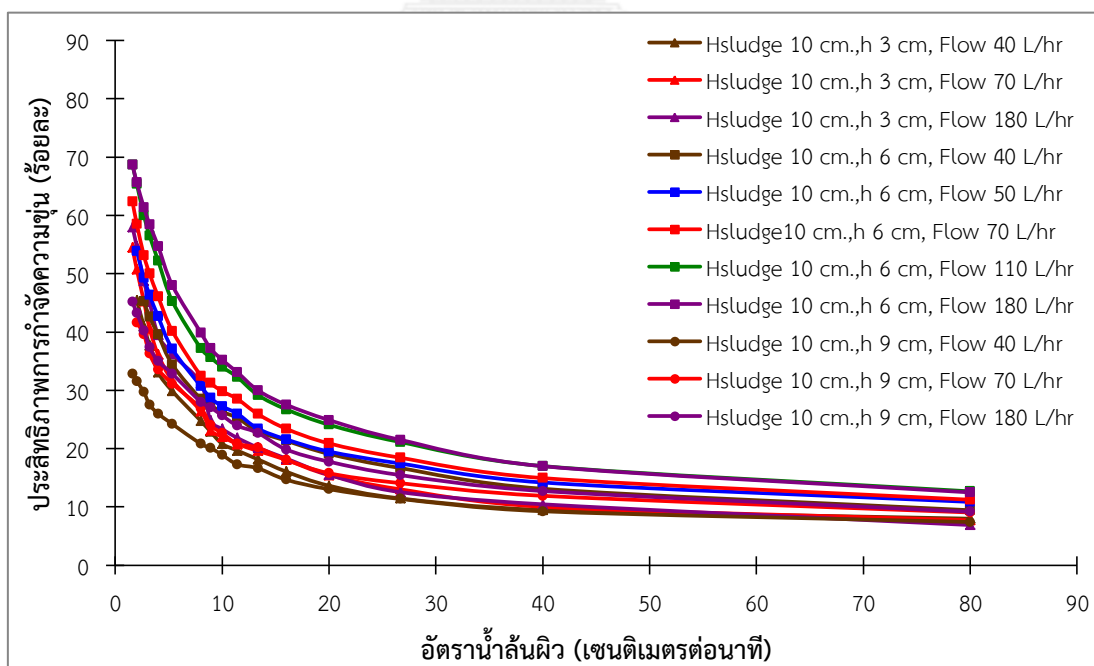
เนื่องจากความสูงของชั้นตะกอน และ ระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครฟไฟเออร์มีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนกลับเข้าไปในระบบ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ของฟล็อกที่เกิดขึ้นภายในระบบ ซึ่งได้แสดงผลการทดลองในหัวข้อการทดลองถัดไป

4.4.2 ประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ของฟล็อกในการทดลองแต่ละสภาวะที่กำหนดระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน 3 6 และ 9 เซนติเมตร

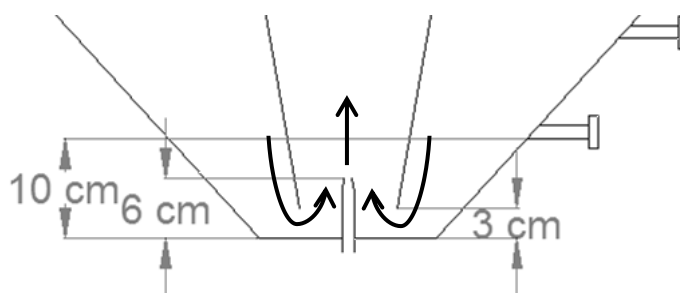
การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากระบบทดลองจากจุดเก็บน้ำที่กำหนดเพื่อมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) เช่นเดียวกับการทดลองหาประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มจากการทดลองของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลของชั้นตะกอน ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองได้ในภาพที่ 4-10 และภาพที่ 4-11 โดยแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข-2 พบว่าที่ความสูงชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอนที่สูงกว่าชั้นตะกอนที่ความสูง 10 เซนติเมตรที่ทุกอัตราการไหลและทุกระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการทดลองหาความสูงของชั้นตะกอนที่เหมาะสมและการทดลองหาประสิทธิภาพของระบบที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ หรือผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.1 และ 4.4.1 ตามลำดับ จึงเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าความสูงของชั้นตะกอนและระยะห่างระหว่างกรวย

ชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) มีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนในระบบ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

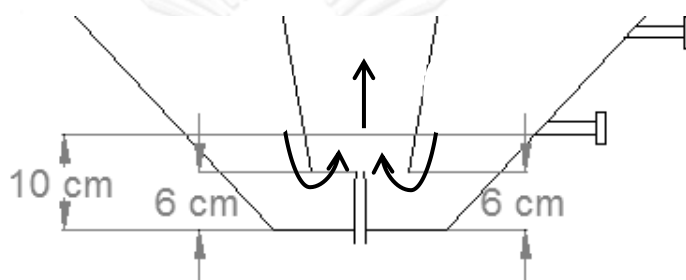
ภาพที่ 4-10 แสดงประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มในสภาวะการทดลองที่ควบคุมความสูงของชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร และทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่ 3 6 และ 9 เซนติเมตร โดยเดินระบบด้วยอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าที่ระยะ $h = 6$ เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มดีที่สุด และที่ระยะ $h = 9$ เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มต่ำที่สุด ซึ่งผลการทดลองในส่วนนี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.4.1 ดังแสดงในภาพที่ 4-9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลของระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) มีผลต่อการควบคุมปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนเข้าระบบ เนื่องจากการติดตั้งระบบถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่ใช้ในการทดลองได้ติดตั้งระยะหัวกระจายน้ำ (Inlet Nozzle) ที่ความสูง 6 เซนติเมตรจากพื้นถัง ซึ่งถ้าระยะ $\Delta h = 9$ เซนติเมตร จะทำให้เกิดการไหลลัดวงจรของน้ำภายในระบบ ส่งผลให้การพาตะกอนหมุนเวียนเข้าระบบมีประสิทธิภาพต่ำ ในขณะที่ที่ระยะ $\Delta h = 3$ เซนติเมตร จะทำให้ปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนในระบบได้ต่ำ แต่จะลดปริมาณการไหลลัดวงจรของน้ำภายในระบบ และที่ระยะ $\Delta h = 6$ เซนติเมตรซึ่งเป็นความสูงที่อยู่ในระดับเดียวกับหัวกระจายน้ำ (Inlet Nozzle) จะทำให้เป็นระดับที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนเข้าระบบได้มากขึ้นและลดการไหลลัดวงจรของน้ำภายในระบบ ลักษณะการไหลของน้ำในแต่ละสภาวะการทดลองของระบบรวมถึงรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอนแสดงได้ดังภาพที่ 4-11 และสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4-7



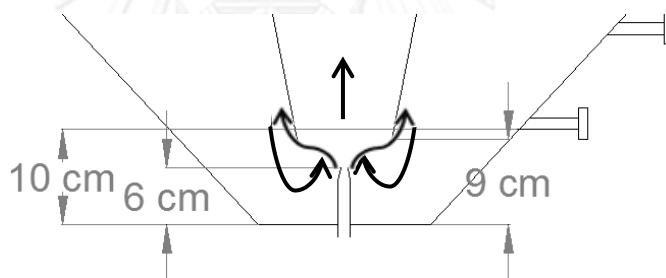
ภาพที่ 4-10 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนที่มีความสูงชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ



ก. ช่องว่างระหว่างกรวยขึ้นในกับพื้นถึงตกตะกอนที่ 3 เซนติเมตร



ข. ช่องว่างระหว่างกรวยขึ้นในกับพื้นถึงตกตะกอนที่ 6 เซนติเมตร



ค. ช่องว่างระหว่างกรวยขึ้นในกับพื้นถึงตกตะกอนที่ 9 เซนติเมตร

ภาพที่ 4-11 ลักษณะการหมุนเวียนตะกอนและรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอน ที่ความสูงชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร ในแต่ละสภาวะการทดลองของระบบ

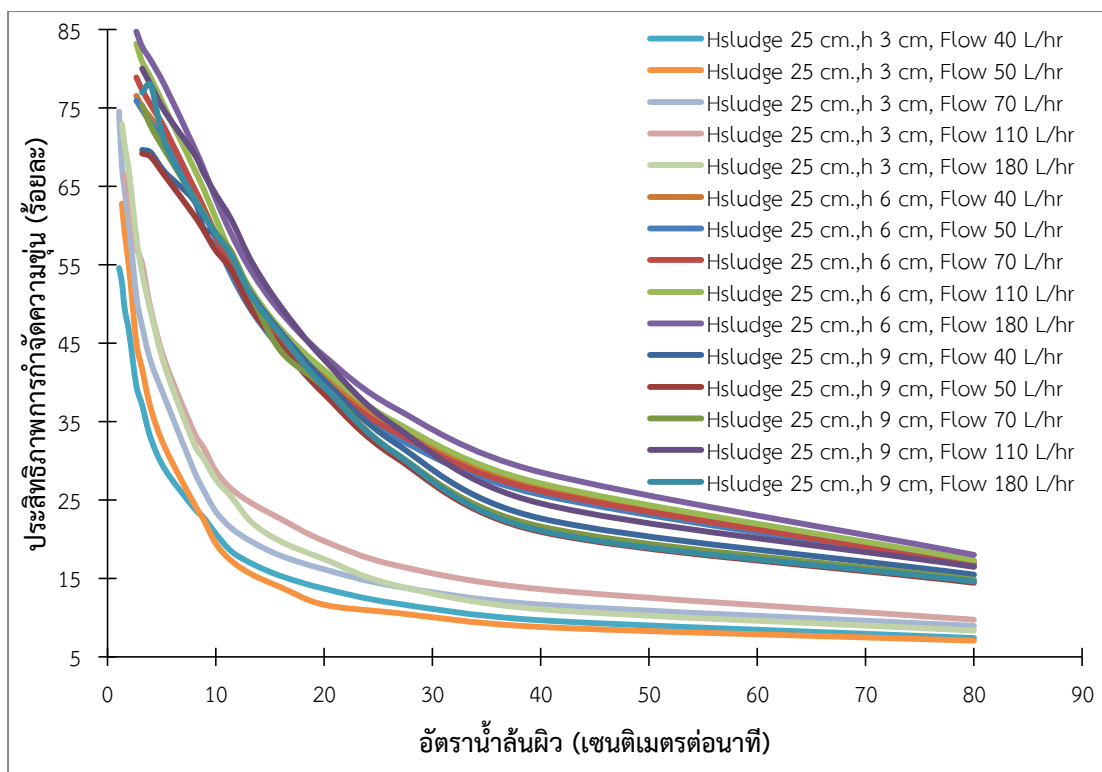
ตารางที่ 4-7 แสดงผลการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ที่ความสูงของชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร ที่สภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลองที่ควบคุม		ประสิทธิภาพการตกตะกอน แบบรวมกลุ่มที่อัตราน้ำล้นผิว 2.63 เซนติเมตรต่อนาที
ระยะห่างระหว่างกรวยขึ้นในกับ พื้นถึงตกตะกอน (Δh) (เซนติเมตร)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	
3	40	41.01
	70	45.30
	180	48.71

ตารางที่ 4-7 แสดงผลการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ที่ความสูงของชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร ที่สภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

สภาวะการทดลองที่ควบคุม		ประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มที่อัตราน้ำล้นผิว 2.63 เซนติเมตรต่อนาที
ระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) (เซนติเมตร)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	
6	40	45.62
	50	49.28
	70	53.14
	110	60.01
	180	61.38
9	40	29.68
	70	39.58
	180	40.23

สำหรับความสูงของชั้นตะกอนที่ 25 เซนติเมตร ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4-12 และสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4-8 โดยผลการทดลองเป็นไปในแนวทางเดียวกับผลการทดลองของความสูงชั้นตะกอนที่ 10 เซนติเมตร กล่าวคือ ระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) มีผลต่อการควบคุมปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนเข้าระบบ โดยผลการทดลองพบว่า ระยะ $\Delta h = 6$ เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มดีที่สุด และที่ระยะ $\Delta h = 3$ เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มต่ำที่สุด ซึ่งผลการทดลองในส่วนนี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.4.1 (ภาพที่ 4-9) โดยสามารถอธิบายถึงกลไกภายในระบบได้ในลักษณะเดียวกับความสูงชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร คือ ระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) มีผลต่อการควบคุมปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนเข้าระบบ โดยที่ความสูงของชั้นตะกอน 10 และ 25 เซนติเมตร ที่ระยะ $\Delta h = 3$ เซนติเมตร ทำให้มีปริมาณตะกอนที่เวียนเข้าระบบได้ต่ำ จึงทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มต่ำเพราะปริมาณเป่าสัมผัสที่เวียนเข้าระบบมีปริมาณต่ำ โอกาสการรวมตัวกันของกลุ่มฟล็อกจึงเกิดยากขึ้น ในขณะที่ระยะ $\Delta h = 6$ และ 9 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มภายในระบบมากกว่าที่ความสูง $\Delta h = 3$ เซนติเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณตะกอนที่เวียนเข้าระบบมีความแตกต่างกัน และข้อแตกต่างระหว่างผลการทดลองที่ความสูงของชั้นตะกอน 10 และ 25 เซนติเมตร คือ ชั้นตะกอนที่สูงถึง 25 เซนติเมตร น้ำหนักของตะกอนที่มากจะเป็นตัวบังคับทิศทางไหลของน้ำภายในระบบ เพราะฉะนั้นที่ระยะ $\Delta h = 9$ เซนติเมตร จึงไม่เกิดปัญหาการไหลลัดวงจรดังเช่นที่เกิดขึ้นกับความสูงชั้นตะกอนที่ 10 เซนติเมตร ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของระบบที่ $\Delta h = 9$ จึงใกล้เคียงกับที่ระยะ $\Delta h = 6$ เซนติเมตร โดยลักษณะการไหลของน้ำในแต่ละสภาวะการทดลองของระบบ รวมถึงรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอนแสดงได้ดังภาพที่ 4-13



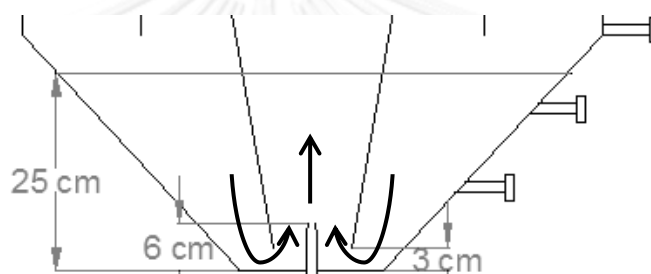
ภาพที่ 4-12 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนที่ความสูงชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ

ตารางที่ 4-8 แสดงผลการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ที่ความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ที่สภาวะการทดลองต่างๆ

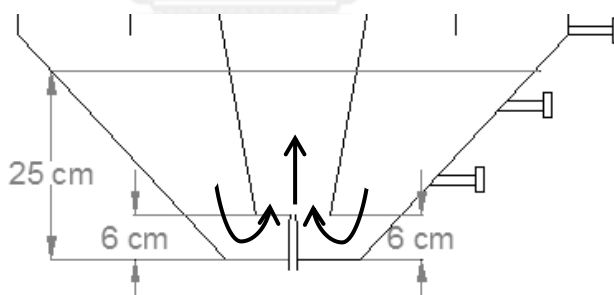
สภาวะการทดลองที่ควบคุม		ประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มที่อัตราน้ำล้นผิว 2.63 เซนติเมตรต่อนาที
ระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) (เซนติเมตร)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	
3	40	39.55
	50	45.08
	70	50.98
	110	57.43
	180	58.51
6	40	76.57
	50	75.95
	70	78.91
	110	83.22
	180	84.77

ตารางที่ 4-8 แสดงผลการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ที่ความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ที่สภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

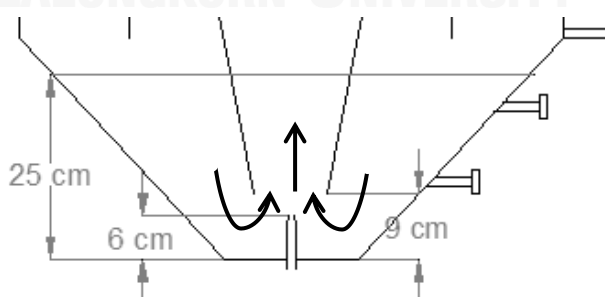
สภาวะการทดลองที่ควบคุม		ประสิทธิภาพการตกตะกอน แบบรวมกลุ่มที่อัตราน้ำล้นผิว 2.63 เซนติเมตรต่อนาที	
ระยะห่างระหว่างกรวยขึ้นในกับ พื้นถึงตกตะกอน (Δh) (เซนติเมตร)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)		
9		40	72.93
		50	72.77
		70	77.08
		110	81.38
		180	82.67



ก. ช่องว่างระหว่างกรวยขึ้นในกับพื้นถึงตกตะกอนที่ 3 เซนติเมตร



ข. ช่องว่างระหว่างกรวยขึ้นในกับพื้นถึงตกตะกอนที่ 6 เซนติเมตร



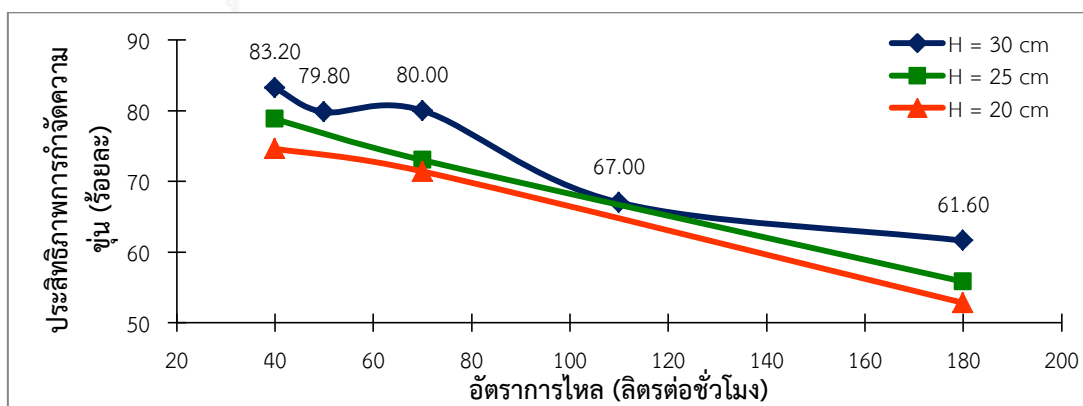
ค. ช่องว่างระหว่างกรวยขึ้นในกับพื้นถึงตกตะกอนที่ 9 เซนติเมตร

ภาพที่ 4-13 ลักษณะการหมุนเวียนตะกอนและรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอนที่ความสูงชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ในแต่ละสภาวะการทดลองของระบบ

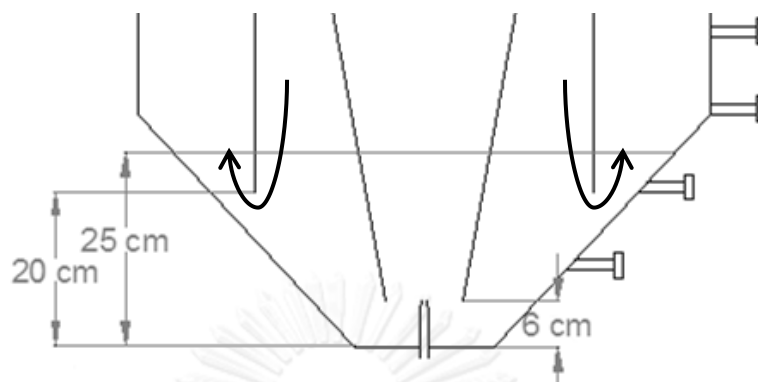
จากผลการทดลองจึงได้ความสูงของชั้นตะกอนที่เหมาะสม คือ 25 เซนติเมตร ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถึงตกตะกอน (Δh) ที่เหมาะสม คือ ความสูงที่อยู่ในระดับเดียวกับหัวกระจายน้ำ (Inlet Nozzle) สำหรับถังตกตะกอนที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ 6 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระดับที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนเข้าระบบได้ดีและลดการไหลลัดวงจรของน้ำภายในระบบ และอัตราการไหลที่เหมาะสม คือ 70 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองนี้จะนำไปใช้กับการทดลองถัดไป เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมกับถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยจะทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) ต่อไป

4.4.3 ผลของระยะช่องว่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) กับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

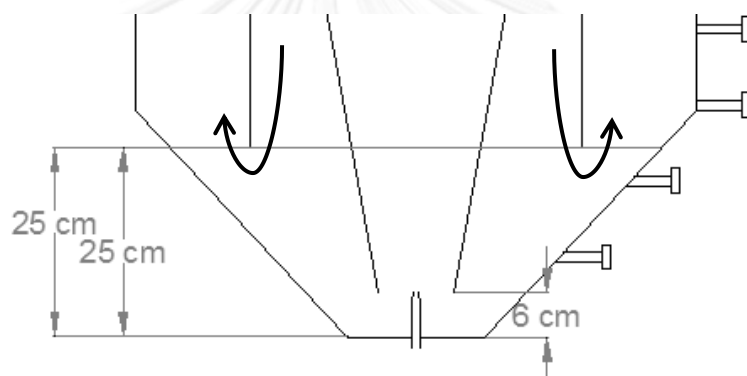
การทดลองนี้ได้ทำการทดลองที่ความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร โดยกำหนดระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถึงตกตะกอน (Δh) ที่ 6 เซนติเมตร สภาวะที่ทำการทดลอง คือ ปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) ที่ 20 และ 25 30 เซนติเมตร และอัตราการไหลของน้ำดิบที่ใช้ทดลองที่ 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองพบว่า ระยะห่างระหว่างส่วนทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) ที่ 30 เซนติเมตรให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุด ที่ร้อยละ 83.20 79.80 80.00 67.00 และ 61.60 ที่อัตราการไหล 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ และเมื่อลดระยะห่างระหว่างส่วนทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถังลงมา พบว่าที่ระยะห่างที่ลดลง ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนจะลดลง เนื่องจากเมื่อลดระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถังจะทำให้ไม่ต้องไหลผ่านชั้นตะกอนกันถึงสูง 25 เซนติเมตร จึงทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของชั้นตะกอน ตะกอนในส่วนนี้จึงหลุดออกมาเป็นส่วนหนึ่งของน้ำใสดังแสดงในภาพที่ 4-14 และแสดงรายละเอียดของผลการทดลองที่ภาคผนวก ข-2.2 ทั้งนี้ลักษณะการหมุนเวียนตะกอนภายในระบบในแต่ละสภาวะการทดลองของระบบรวมถึงรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอนได้ดังภาพที่ 4-15



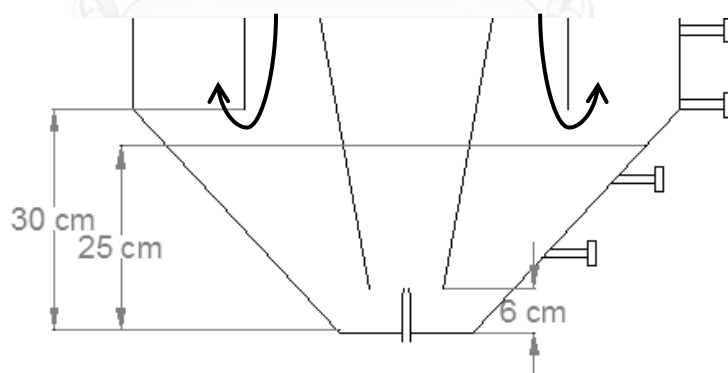
ภาพที่ 4-14 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่ความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ระยะห่างช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถึงตกตะกอน 6 เซนติเมตร ที่สภาวะเดินระบบต่างๆ



ก. ระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตตะกอนกับพื้นถึงที่ 20 เซนติเมตร



ข. ระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตตะกอนกับพื้นถึงที่ 25 เซนติเมตร

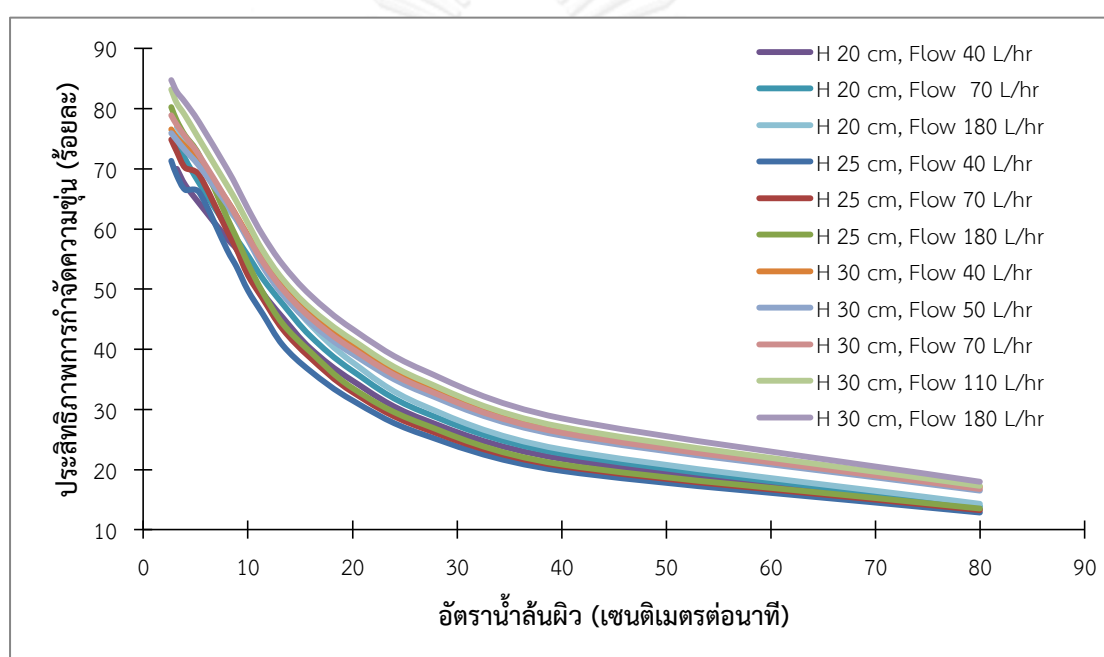


ค. ระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตตะกอนกับพื้นถึงที่ 30 เซนติเมตร

ภาพที่ 4-15 ลักษณะการหมุนเวียนตะกอนและรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอน ที่ความสูงชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถึงตตะกอนที่ 6 เซนติเมตร

4.4.4 ประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ของฟล็อกในการทดลองแต่ละสภาวะที่กำหนดระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถึง ที่ 20 25 และ 30 เซนติเมตร

ผลการทดลองในขั้นตอนนี้สามารถแสดงดังภาพที่ 4-16 โดยพบว่าระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถึงที่ 20 25 และ 30 เซนติเมตร ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มในส่วนฟล็อกคูเลชันอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะห่าง 30 เซนติเมตรให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มภายในระบบดีที่สุด และมีประสิทธิภาพลดลงที่ระยะห่าง 20 และ 25 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-9



ภาพที่ 4-16 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนที่ความสูงชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ

ตารางที่ 4-9 แสดงผลการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ที่ความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถึงตกตะกอน 6 เซนติเมตร ที่สภาวะการทดลองต่างๆ

สภาวะการทดลองที่ควบคุม		ประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มที่อัตราน้ำล้นผิว 2.63 เซนติเมตรต่ออนาที
ระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถึง (ΔH) (เซนติเมตร)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	
20	40	71.92
	70	74.86
	180	78.88

ตารางที่ 4-9 แสดงผลการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ที่ความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถึงตกตะกอน 6 เซนติเมตร ที่สภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

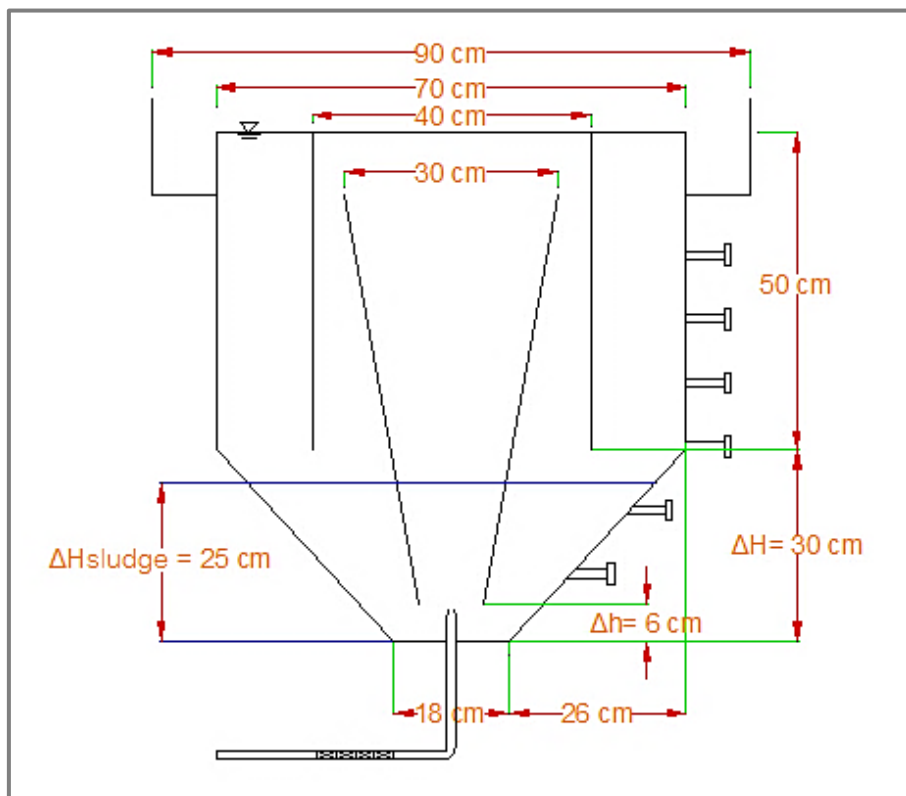
สภาวะการทดลองที่ควบคุม		ประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มที่อัตราน้ำล้นผิว 2.63 เซนติเมตรต่อนาที
ระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถึง (ΔH) (เซนติเมตร)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	
25	40	71.34
	70	74.88
	180	80.02
30	40	76.57
	50	75.95
	70	78.91
	110	83.22
	180	84.77

เพราะฉะนั้น ผลการทดลองจึงเป็นสิ่งบ่งชี้ว่าระยะห่างระหว่างขอบทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถึง (ΔH) จะส่งผลประสิทธิภาพในบริเวณการตกตะกอนภายในระบบแต่ไม่ส่งผลถึงกลไกการหมุนเวียนตะกอนกลับเข้าระบบ ดังนั้น จากการทดลองนี้จึงได้ช่องว่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถึงตกตะกอนที่เหมาะสม คือ 30 เซนติเมตร

จากผลการทดลองศึกษาผลของระยะห่างของช่องว่างต่างๆ ภายในถังตกตะกอนกับอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น พบว่าสภาวะที่เหมาะสมกับถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดนี้ คือ ระยะระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถึงตกตะกอน (Δh) ที่ 6 เซนติเมตร และระยะระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถึง (ΔH) 30 เซนติเมตร สำหรับความสูงของชั้นตะกอนที่เหมาะสม คือ 25 เซนติเมตร ดังที่แสดงในภาพที่ 4-17 และอัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับระบบคือ 70 ลิตรต่อชั่วโมง

สำหรับการควบคุมคุณภาพน้ำหลังกระบวนการผลิตที่มีการเติมสารเคมีในกระบวนการผลิตน้ำประปานั้นถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากคุณภาพของน้ำที่ผลิตต้องมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้น้ำ สำหรับคุณภาพน้ำที่ต้องควบคุมในขั้นการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำในระบบการผลิตนั้น นอกจากจะพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำแล้วยังต้องให้ความสำคัญกับพารามิเตอร์หลักอีกสองอย่าง ได้แก่ ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และค่าพีเอช (pH) โดยพารามิเตอร์ทั้งสองชนิดนี้ นอกจากจะเป็นพารามิเตอร์ที่ต้องควบคุมเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำแล้วยังเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารโคแอกกูแลนต์และกลไกใน

การบำบัดน้ำในขั้นตอนอื่นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปา จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาคุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงจากการเติมสารโคแอกกูแลนต์ในการทดลองถัดไป



ภาพที่ 4-17 ระยะห่างของส่วนประกอบต่างๆ ของถังตกตะกอนที่เหมาะสม

4.4.5 ศึกษาคุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงจากกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยระบบถังตกตะกอน

การกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนโดยใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่มีความจำเป็นต้องควบคุมคุณภาพน้ำทั้งเข้าและออกจากระบบ เพื่อประสิทธิภาพที่ดีของกลไกโคแอกกูแลชัน - ฟล็อกคูเลชัน และเพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้น้ำ (มันสิน ตัญกุลเวศม์, 2542) สำหรับคุณภาพน้ำที่ต้องควบคุมในขั้นการกำจัดความขุ่นออกจากระบบการผลิตนั้นจะให้ความสำคัญกับพารามิเตอร์หลักในขั้นตอนนี้ คือ ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และค่าพีเอช (pH) ดังนั้น การทดลองนี้จะทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำทั้งก่อนและหลังการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์สามารถสรุปและแสดงได้ดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 คุณภาพน้ำก่อนและหลังการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอน

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำ	
	ก่อนการกำจัดความขุ่น	หลังการกำจัดความขุ่น
ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	56.03 – 100.07	51.47 – 94.47
ค่าพีเอช (pH)	7.02 – 7.49	6.97 – 7.36

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความเป็นต่างและค่าพีเอชของน้ำทั้งก่อนเข้าและออกจากระบบอยู่ในช่วงที่ควบคุม คือ ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7 – 8.5 (Chamnanmor et al., 2012; Kawamura, 2000; Qasim et al., 2000) เพราะฉะนั้นจึงไม่ต้องเติมสารเคมีเพิ่มเติมเพื่อปรับค่าพีเอชและค่าความเป็นต่างก่อนที่น้ำใสจะเข้าสู่ระบบถัดไป

อย่างไรก็ตาม การทดลองข้างต้นได้ทำการทดลองเฉพาะที่ความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เอ็นทียู ซึ่งเป็นค่าความขุ่นเฉลี่ยของน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา ของการประปานครหลวง ดังนั้น การทดลองถัดไปจึงสนใจศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนดังกล่าวในสภาวะที่เหมาะสมกับน้ำดิบที่มีค่าความขุ่นเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงไป โดยสนใจในช่วงของความขุ่นเริ่มต้น 20 และ 200 เอ็นทียู เนื่องจากเป็นค่าความขุ่นที่ครอบคลุมความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบการผลิตน้ำประปา ของโรงงานผลิตน้ำสามเสน การประปานครหลวงในช่วงเดือนเมษายน ซึ่งมีค่าความขุ่นต่ำที่สุด 20 เอ็นทียู และมีค่าความขุ่นสูงสุด 135 เอ็นทียูในช่วงเดือนมิถุนายน (โรงงานผลิตน้ำสามเสน การประปานครหลวง, 2555)

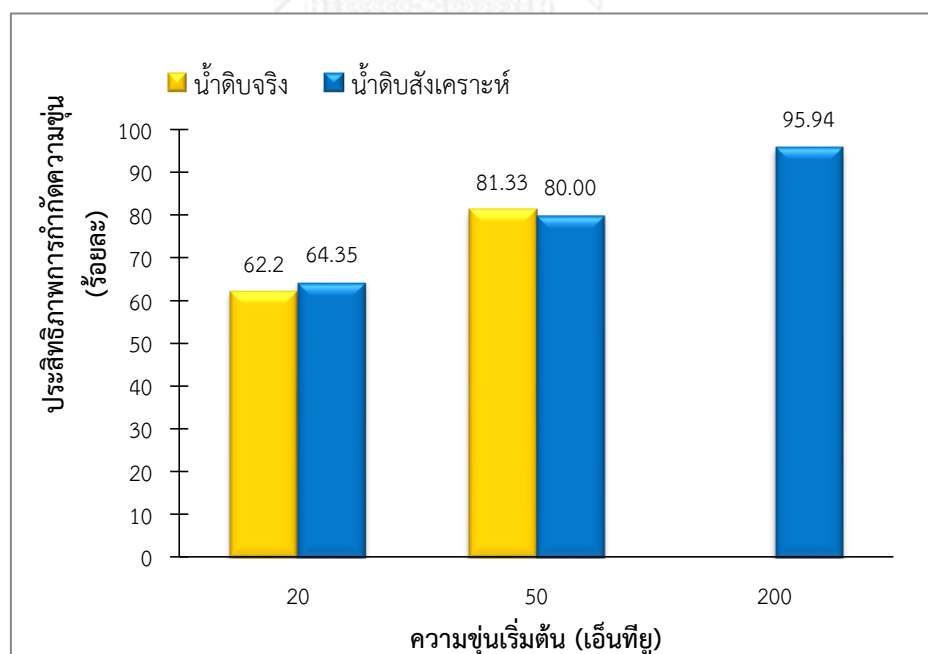
4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนที่สภาวะการเดินระบบเหมาะสม โดยมีปริมาณความขุ่นของน้ำดิบเริ่มต้นในช่วงต่างๆ

ในส่วนนี้จะศึกษาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ในสภาวะที่เหมาะสม เมื่อค่าความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบมีการเปลี่ยนแปลง และศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนดังกล่าวเมื่อประยุกต์ใช้กับน้ำดิบจริง โดยน้ำดิบจริงที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นน้ำดิบแหล่งเดียวกับที่ใช้ผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำสามเสน การประปานครหลวง ที่ได้จากการเก็บตัวอย่างและนำมาวิเคราะห์ทันทีในวันที่ 17 กันยายน 2556 และวันที่ 6 – 7 กุมภาพันธ์ 2557 โดยมีผลการวิเคราะห์ค่าความขุ่นอยู่ที่ 60 และ 20 เอ็นทียู ตามลำดับ ซึ่งเป็นน้ำดิบเดียวกับน้ำดิบที่วิเคราะห์คุณภาพน้ำและการศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยวิธีจาร์เทสจากการทดลองข้างต้น ผลการทดลองพบว่า ถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบได้ในทุกช่วงความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบที่ทำการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.5.1 ศึกษาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่สภาวะที่เหมาะสม

การทดลองนี้จะศึกษาประสิทธิภาพของระบบที่สภาวะที่เหมาะสม ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาได้ทดลองที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู แต่สำหรับการทดลองนี้จะทดลองที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 และ 200 เอ็นทียู เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์สำหรับน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีค่าความขุ่นเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงและทดลองหาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนกับน้ำดิบจริง โดยทำการติดตั้งระยะห่างของส่วนประกอบต่างๆ ของถังตกตะกอนด้วยระยะที่เหมาะสมจากผลการทดลองที่ผ่านมา คือ ระยะระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่ 6 เซนติเมตร และระยะระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง (ΔH) ที่ 30 เซนติเมตร ความสูงของชั้นตะกอนที่ 25 เซนติเมตร เลือกใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์ และเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง และจะหยุดระบบเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

ผลการทดลองการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 และ 200 เอ็นทียู พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 64.35 และ 95.94 ตามลำดับ สำหรับน้ำดิบจริงที่มีค่าความขุ่นเริ่มต้น 20 และ 60 เอ็นทียู ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ร้อยละ 62.20 และ 81.33ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนที่สภาวะเหมาะสมในช่วงความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ดังภาพที่ 4-17 และได้แสดงรายละเอียดผลการทดลองที่ภาคผนวก ข-2.3



ภาพที่ 4-18 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนที่สภาวะเหมาะสมที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู

จากผลการทดลองพบว่า ถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์มากกว่าประสิทธิภาพการกำจัด

ความขุ่นของน้ำดิบจริงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลจากขนาดของอนุภาคในน้ำดิบสังเคราะห์มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคในน้ำดิบจริง จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการตกตะกอนแบบโตนของน้ำดิบแต่ละชนิด (น้ำดิบสังเคราะห์มีขนาดของอนุภาค $d_{50} = 23.027$ ไมครอน และน้ำดิบจริงมีขนาดของอนุภาค $d_{50} = 9.639$ ไมครอน) นอกจากนี้ ยังพบว่าที่น้ำดิบที่มีความขุ่นเริ่มต้นต่ำจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นต่ำกว่าน้ำดิบที่มีความขุ่นสูงกว่า เนื่องมาจากน้ำดิบที่มีความขุ่นสูงจะมีอนุภาคแขวนลอยอยู่ในน้ำมากกว่าน้ำดิบที่มีความขุ่นเริ่มต้นต่ำ จึงทำให้มีโอกาสการชนกันและการรวมตัวของอนุภาคมากกว่าน้ำดิบที่มีความขุ่นเริ่มต้นต่ำ (Koohestanian et al., 2008) ระบบจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ดีกว่า

ดังนั้น การทดลองนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าที่สภาวะที่เหมาะสมของระบบกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) สามารถกำจัดความขุ่นออกจากน้ำได้ในทุกช่วงความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบที่ทำการศึกษา (20 – 200 เอ็นทียู) ซึ่งเป็นระบบการกำจัดความขุ่นที่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของความขุ่นในน้ำดิบในช่วงที่สูงกว่าถังตกตะกอนโดยทั่วไป เนื่องจากการมีเป่าสัมผัสตะกอนอยู่ตลอดเวลาและถังตกตะกอนดังกล่าวสามารถกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบจริงได้โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ใกล้เคียงกับน้ำดิบสังเคราะห์ในช่วงความขุ่นเริ่มต้นเท่ากัน สำหรับการเลือกใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่มีความจำเป็นต้องควบคุมคุณภาพน้ำเพื่อประสิทธิภาพที่ดีของกลไกการกำจัดความขุ่น และเพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้น้ำ ดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 4.2.4 และ 4.4.5 จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาคุณภาพน้ำก่อนเข้าระบบและคุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชันภายในถังตกตะกอน

4.5.2 ศึกษาคุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงจากกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยระบบถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้นในช่วงต่างๆ

คุณภาพน้ำที่ต้องควบคุมในขั้นการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำระบบการผลิตนั้นจะให้ความสำคัญกับพารามิเตอร์หลัก คือ ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และค่าพีเอช (pH) ดังนั้นในการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสชนิดหมุนเวียนตะกอน จึงให้ความสำคัญในพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ โดยการทดลองนี้จะทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำทั้งก่อนและหลังการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน ซึ่งผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำสามารถสรุปและแสดงได้ดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 คุณภาพน้ำก่อนและหลังการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียน ตะกอนที่ความขุ่นเริ่มต้นต่างๆ

ชนิดของน้ำดิบ	ความขุ่นเริ่มต้น (เอ็นทียู)	พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำ	
			ก่อนการกำจัด ความขุ่น	หลังการกำจัด ความขุ่น
น้ำดิบจริง	20	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	126	118
		ค่าพีเอช	7.71	7.44
	60	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	80.02	68.00
		ค่าพีเอช	7.16	7.03
น้ำดิบ สังเคราะห์	20	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	96.40	88.67
		ค่าพีเอช	7.18	7.14
	50	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	75.87	67.07
		ค่าพีเอช	7.08	7.07
	200	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	100.07	76.80
		ค่าพีเอช	7.35	7.11

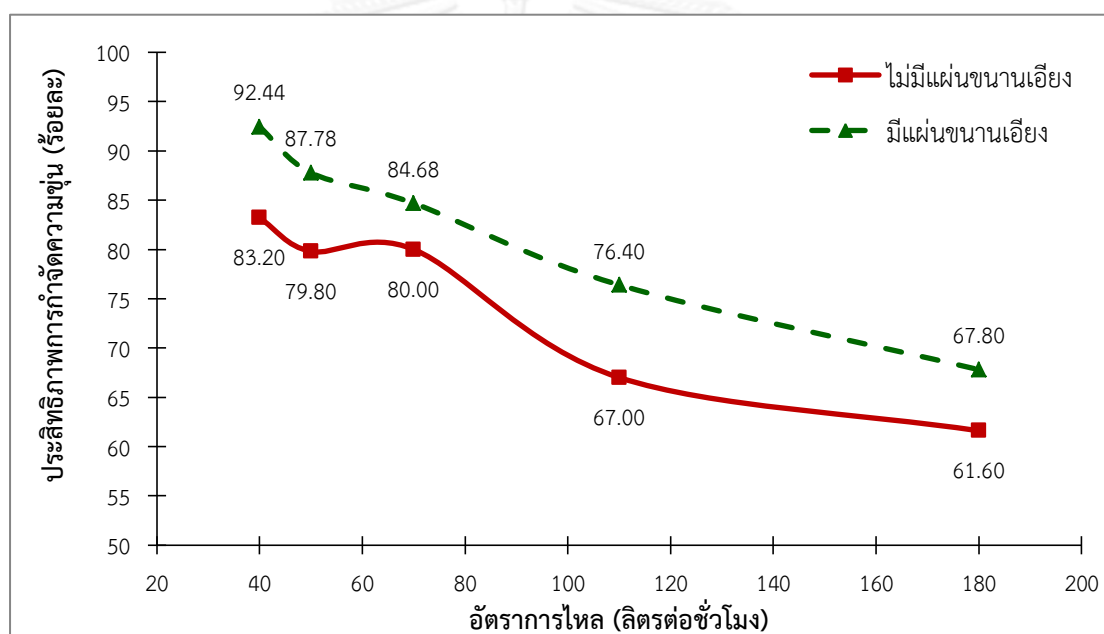
จากผลการทดลองพบว่า ค่าความเป็นต่างและค่าพีเอชของน้ำทั้งก่อนเข้าระบบและออกจากระบบอยู่ในช่วงที่ควบคุม คือ ค่าพีเอชในช่วง 7 – 8.5 (Chamnanmor et al., 2012; Kawamura, 2000; Qasim et al., 2000) เพราะฉะนั้นจึงไม่ต้องเติมสารเคมีเพิ่มเติมเพื่อปรับค่าพีเอชและค่าความเป็นต่างก่อนที่น้ำใสจะเข้าสู่ระบบถัดไป

4.5.3 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ท แครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยแผ่นขนานเอียง (Settling Tube)

จากการทดลองหาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่สภาวะที่เหมาะสมพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของถังตกตะกอนดังกล่าวเป็นระบบการกำจัดความขุ่นที่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของความขุ่นในน้ำดิบในช่วงที่สูงกว่า (20 – 200 เอ็นทียู) และระบบดังกล่าวสามารถนำมาใช้กำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบจริงได้โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ใกล้เคียงกับน้ำดิบสังเคราะห์ จึงมีแนวคิดพัฒนาประสิทธิภาพของระบบกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนโดยการเพิ่มแผ่นขนานเอียง โดยทำการทดลองที่อัตราการไหล 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เอ็นทียูเพื่อพิจารณาผลกระทบของแผ่นขนานเอียงที่มีต่ออัตราการไหลของน้ำดิบ หลังจากนั้นจึงทำการทดลองที่สภาวะ

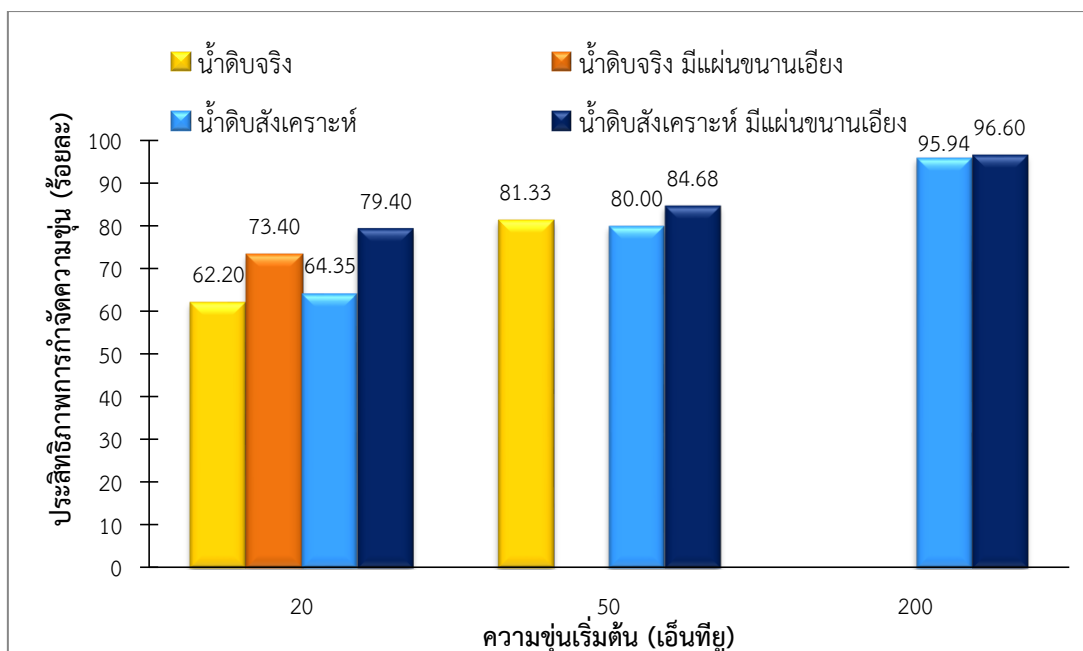
เดินระบบที่เหมาะสม เพื่อศึกษาผลของแผ่นขนานเอียงต่อประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแควร์รีไฟเออร์สำหรับน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีค่าความขุ่นเริ่มต้น 20 และ 200 เอ็นทียู และน้ำดิบจริง โดยการติดตั้งแผ่นขนานเอียง (Settling Tubes) เพิ่มเติมในบริเวณของส่วนตกตะกอน

ผลการทดลองการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ในทุกอัตราการไหลที่ทดลองพบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นในทุกอัตราการไหลโดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 92.44 87.78 84.68 76.40 และ 67.80 ที่อัตราการไหล 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เอ็นทียู สำหรับระบบที่มีแผ่นขนานเอียง (Settling Tube) และไม่มีแผ่นขนานเอียง แสดงได้ดังภาพที่ 4-18



ภาพที่ 4-19 แสดงผลประสิทธิภาพของระบบกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เอ็นทียู

สำหรับประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีค่าความขุ่นเริ่มต้น 20 และ 200 เอ็นทียู พบว่าระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 79.40 และ 96.60 ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมที่มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพียงร้อยละ 64.35 และ 95.94 ตามลำดับ สำหรับน้ำดิบจริงที่ทำการทดลองในช่วงความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเท่ากับร้อยละ 73.40 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมที่มีประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 62.20 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนที่สภาวะเหมาะสมสำหรับระบบทดลองที่มีแผ่นขนานเอียงและไม่มีแผ่นขนานเอียงในช่วงความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู แสดงดังภาพที่ 4-19



ภาพที่ 4-20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนที่สภาวะเหมาะสม ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ระหว่างระบบที่มีและไม่มีแผ่นขนานเอียง

จากการทดลอง สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าแผ่นขนานเอียง (Settling Tubes) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ได้ในทุกอัตราการไหล ซึ่งการเพิ่มแผ่นขนานเอียงในระบบจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ความขุ่นเริ่มต้นต่ำ สำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นเริ่มต้นสูงจะมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นรวมของระบบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากที่ความขุ่นเริ่มต้นต่ำโอกาสการรวมตัวของอนุภาคจะน้อยกว่าที่ความขุ่นเริ่มต้นสูงจึงทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นต่ำกว่าที่ความขุ่นสูง แต่เมื่อเพิ่มแผ่นขนานเอียงจะทำให้เพิ่มโอกาสการรวมตัวของอนุภาค นอกจากนี้แผ่นขนานเอียงยังช่วยลดระยะทางของการตกตะกอน (Degremont, 1999; Kawamura, 2000) สำหรับการควบคุมคุณภาพน้ำที่ต้องให้ความสำคัญในพารามิเตอร์ของ ค่าพีเอช (pH) และค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) เนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการควบคุมกลไกการกำจัดความขุ่นและความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำดั่งที่กล่าวข้างต้น จึงต้องทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่นำมาใช้ทดลองการกำจัดความขุ่นและคุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงหลังการกำจัดความขุ่นด้วยวิธีการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชัน ในการทดลองถัดไป

การทดลองในส่วนต่อไป จะพิจารณาถึงค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นจะต้องควบคุมในกระบวนการผลิตน้ำประปา

4.5.4 ศึกษาคุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงจากกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยระบบถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่ความขุ่นน้ำดิบเริ่มต้นในช่วงต่างๆ

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำก่อนและหลังเข้าสู่กระบวนการกำจัดความขุ่นโดยระบบถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่มีการติดตั้งแผ่นขนานเอียง สามารถสรุปและแสดงได้ดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 คุณภาพน้ำก่อนและหลังการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนที่ความขุ่นเริ่มต้นต่างๆ

ชนิดของน้ำดิบ	ความขุ่นเริ่มต้น (เอ็นทียู)	พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำ	
			ก่อนการกำจัด ความขุ่น	หลังการกำจัด ความขุ่น
น้ำดิบจริง	20	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	95.40	87.07
		ค่าพีเอช	7.21	7.17
น้ำดิบ สังเคราะห์	20	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	96.13	89.27
		ค่าพีเอช	7.38	7.31
	50	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	86.27	82.33
		ค่าพีเอช	7.41	7.36
	200	ความเป็นต่าง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	97.40	81.60
		ค่าพีเอช	7.34	7.19

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความเป็นต่างและค่าพีเอชของน้ำทั้งก่อนเข้าระบบและออกจากระบบอยู่ในช่วงที่ควบคุมคือ ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7 – 8.5 (Chamnanmor et al., 2012; Kawamura, 2000; Qasim et al., 2000) เพราะฉะนั้นน้ำที่ผ่านกระบวนการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่ความขุ่นเริ่มต้นต่างๆ สำหรับการทดลองนี้ จึงไม่ต้องเติมสารเคมีเพิ่มเติมเพื่อปรับค่าพีเอชและค่าความเป็นต่างก่อนที่น้ำใสจะเข้าสู่ระบบถัดไป

4.5.5 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของระบบกำจัดความขุ่นในการผลิตน้ำประปาทั่วไป (Conventional Water Treatment Process)

การศึกษาเพื่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นระหว่างระบบถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์กับระบบผลิตน้ำทั่วไปในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบกับระบบผลิตน้ำสามเสน การประปานครหลวง โดยในระบบผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำสามเสนได้เป็นออกเป็น 4 เขตการผลิต และในแต่ละเขตการผลิตจะใช้กลไกโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชันในการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำ แต่สิ่งที่แตกต่างกันของแต่ละเขตคือระบบการผลิต ซึ่งสามารถอธิบายโดยสรุปได้ดังตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-13 ข้อมูลของส่วนกำจัดความขุ่นของโรงผลิตน้ำสามเสนและระบบถังตกตะกอนส้มฝัดชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) (Samsen Water Treatment Plant Engineering Group, 2002)

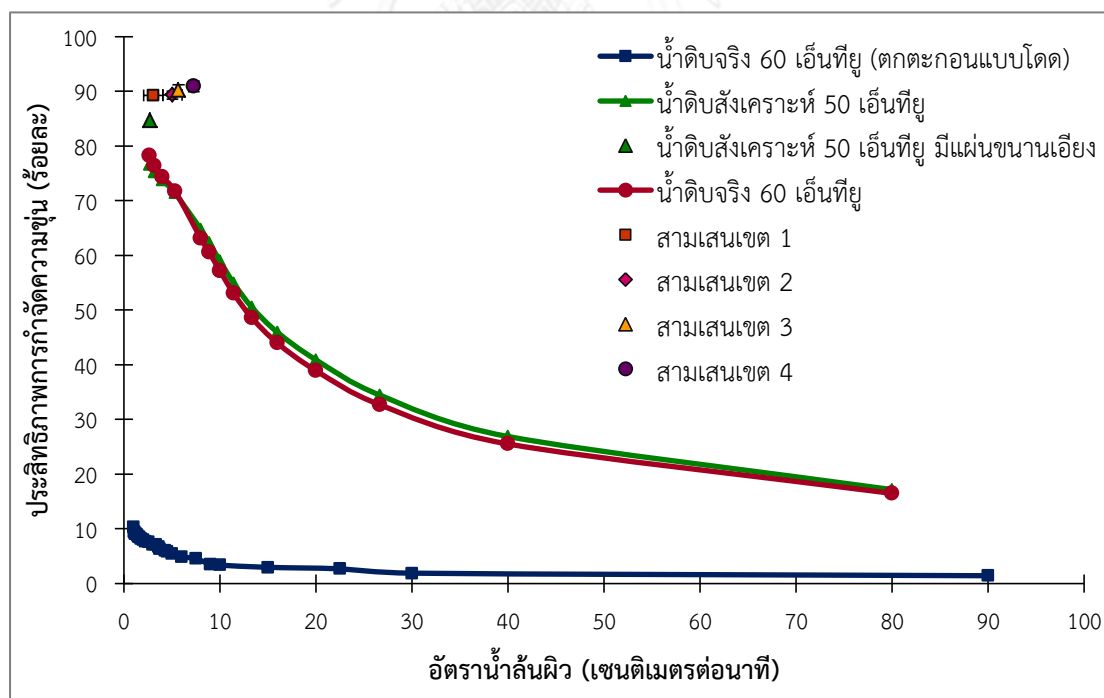
ส่วนการผลิต	ระบบ	เวลากัก (ชั่วโมง)	อัตราน้ำล้นผิว (เซนติเมตรต่อนาที)	เกณฑ์การออกแบบ
สามเสน เขต 1	Rectangular Sedimentation Tank	6.14	3.06	TCWD
สามเสน เขต 2	Turbocircular Clarifier	1.75	5.06	PATERSON
สามเสน เขต 3	Turbocircular Clarifier	1.81	5.69	DEGERMANT
สามเสน เขต 4	Super Pulsator	1.14	7.28	DEGERMANT
Jet Clarifier	Circular Clarifier	3.29	2.67	DEGERMANT

สำหรับข้อมูลของประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของแต่ละระบบได้รวบรวมข้อมูลของหน่วยการผลิตทั้ง 4 เขต ตั้งแต่ปี พุทธศักราช 2552 – 2555 รวมเป็นระยะเวลา 4 ปีย้อนหลัง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของโรงงานผลิตน้ำสามเสน (Samsen Water Treatment Plant, 2009 – 2012)

ปีพุทธศักราช	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น			
	สามเสนเขต 1	สามเสนเขต 2	สามเสนเขต 3	สามเสนเขต 4
2552	88.99	89.29	89.88	90.54
2553	89.50	88.80	88.78	91.15
2554	89.56	90.46	91.67	91.95
2555	88.78	88.66	90.44	89.94
ประสิทธิภาพเฉลี่ย	89.21	89.30	90.19	90.89
ประสิทธิภาพสูงสุด	89.56	90.46	91.67	91.95
ประสิทธิภาพต่ำสุด	89.78	88.66	88.78	89.94
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.38	0.82	1.20	0.86

จากผลการทดลองหาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เอ็นทียู และที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบจริง 60 เอ็นทียู และจากข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของโรงงานผลิตน้ำสามเสน สามารถนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้ดังภาพที่ 4-20



ภาพที่ 4-21 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์กับโรงงานผลิตน้ำสามเสน

จากภาพที่ 4-20 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบจริงที่ความขุ่นเริ่มต้น 60 เอ็นทียู ร้อยละ 78.18 และน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ร้อยละ 78.91 ที่อัตราการน้ำล้นผิว 2.67 เซนติเมตรต่ออนาที และมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ร้อยละ 84.68 เมื่อมีการเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอนด้วยแผ่นขนานเอียง (Settling Tubes)

จากการทดลองยังพบว่าระบบถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบกำจัดความขุ่นในระบบผลิตน้ำทั่วไป แต่ถ้าวัดประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเปรียบเทียบกับระบบการกำจัดความขุ่นของโรงงานผลิตน้ำสามเสนเขต 1 ที่มีกลไกการทำงานที่คล้ายคลึงกันพบว่า โรงงานผลิตน้ำสามเสนเขต 1 มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น เท่ากับร้อยละ 89.21 ที่อัตราการน้ำล้นผิว 3.06 เซนติเมตรต่ออนาที ซึ่งประสิทธิภาพของระบบถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ไม่ได้ต่ำกว่าระบบของโรงงานผลิตน้ำสามเสนเขต 1 มากเท่าใดนัก แต่ระยะเวลาพักของระบบกำจัดความขุ่นของโรงงานผลิตน้ำสามเสนเขต 1 ใช้เวลาก็กถึง 6.14 ชั่วโมงในขณะที่ระบบถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ใช้เวลาก็กเพียง 3.29 ชั่วโมง ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลให้มีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าสำหรับการกำจัดความขุ่นถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์

จากการทดลองจะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) นอกจากจะขึ้นกับประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชัน แล้วยังขึ้นกับรูปแบบและกลไกของถังปฏิกรณ์แต่ละชนิด ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องศึกษากลไกและรูปแบบการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอน เพื่อให้เข้าใจถึงรูปแบบการไหลและกลไกที่เกิดขึ้น และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นต่อไป โดยการศึกษาถึงกลไกและรูปแบบการไหลภายในระบบสามารถทำได้โดยวิธีการศึกษารูปแบบของการกระจายเวลากัก (Residence Time Distribution, RTD) ดังแสดงในการทดลองขั้นตอนถัดไป

4.6 รูปแบบการกระจายเวลากัก (Residence Time Distribution, RTD) ภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier)

การศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักจะทำการทดลองภายใต้สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น กล่าวคือ ระยะระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) 6 เซนติเมตร และช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง (ΔH) 30 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuous Flow) 40 70 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง โดยทำการทดลองในถังที่ไม่มีชั้นตะกอน และมีชั้นตะกอนความสูง 25 เซนติเมตร เพื่อดูผลกระทบของชั้นตะกอนต่อรูปแบบการไหล การทดลองศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักเลือกใช้สารนำสัญญาณ (Tracer) เป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งจะวัดการส่งสัญญาณด้วยการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบ

การไหลและการกระจายเวลากักที่มีต่อถังตกตะกอนสัมพันธ์แบบหมุนเวียนตะกอน โดยจะหยุดระบบเมื่อสัญญาณจากสารนำสัญญาณลดลงจนเทียบเท่ากับค่าก่อนจ่ายสารเข้าสู่ระบบ

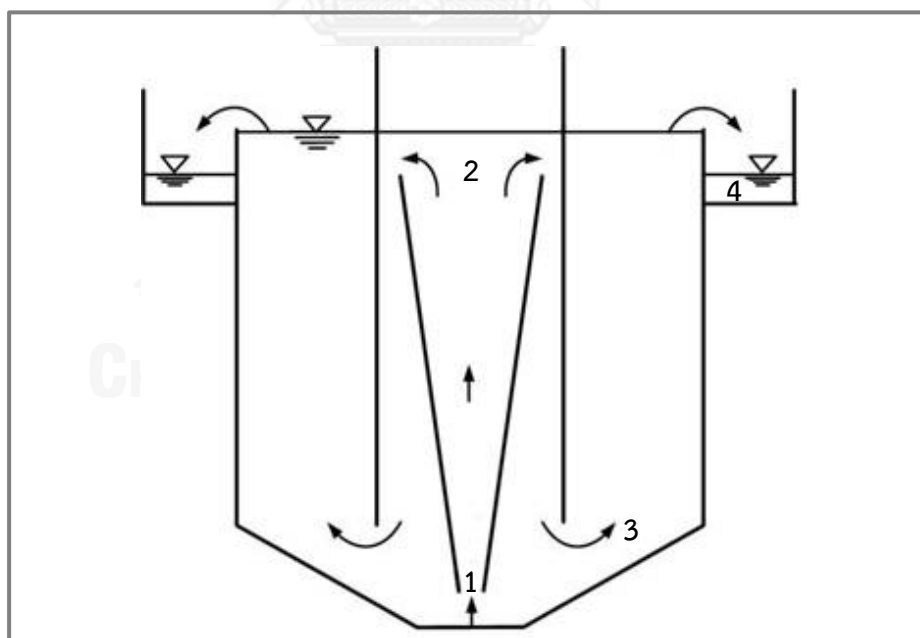
สำหรับการทดลองนี้ได้กำหนดจุดตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) ทั้งหมด 4 จุดตามทิศทางการไหลของน้ำภายในระบบ ได้แก่

จุดที่ 1 เป็นจุดที่ทำการติดตั้ง Probe วัดค่าความนำไฟฟ้าบริเวณหัวกระจายน้ำ (Inlet Nozzle) ซึ่งเป็นจุดแรกของของสารที่ผ่านเข้าระบบ เพราะฉะนั้นจุดที่ 1 จึงเป็นจุดอ้างอิงของปริมาณสารนำสัญญาณ (Tracer) ที่ถูกจ่ายเข้าระบบทั้งหมด

จุดที่ 2 จะทำการติดตั้ง Probe วัดค่าความนำไฟฟ้าบริเวณปลายทรงกรวยภายในถังตกตะกอนซึ่งเป็นบริเวณของการเกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชัน

จุดที่ 3 จะทำการติดตั้ง Probe วัดค่าความนำไฟฟ้าบริเวณของส่วนการตกตะกอนซึ่งจะเป็นจุดที่รับน้ำต่อจากจุดที่ 2 แต่ถ้าเกิดการไหลลัดวงจร (Bypass) ภายในระบบ จะสามารถตรวจพบได้ ณ จุดนี้

และจุดตรวจวัดที่ 4 จะติดตั้ง Probe บริเวณทางน้ำออก เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงสำหรับปริมาณสารที่ออกจากระบบ เนื่องจากการพิจารณาถึงกลไกที่เกิดขึ้นภายในระบบสามารถทำได้ด้วยการพิจารณาถึงความคงที่ของปริมาณสาร โดยตรวจสอบได้จากกฎทรงมวล กล่าวคือ ปริมาณสารที่จ่ายเข้าระบบย่อมเท่ากับปริมาณที่ออก เพราะฉะนั้นเมื่อสัญญาณจากสารนำสัญญาณ (Tracer) ลดลงจนเทียบเท่ากับค่าก่อนจ่ายสารเข้าสู่ระบบ จะถือว่าสิ้นสุดการทดลอง โดยจุดตรวจวัดทั้ง 4 แสดงได้ดังภาพที่ 4-21



ภาพที่ 4-22 แสดงจุดตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) ในการทดลอง

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ค่ารูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมพันธ์แบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-15

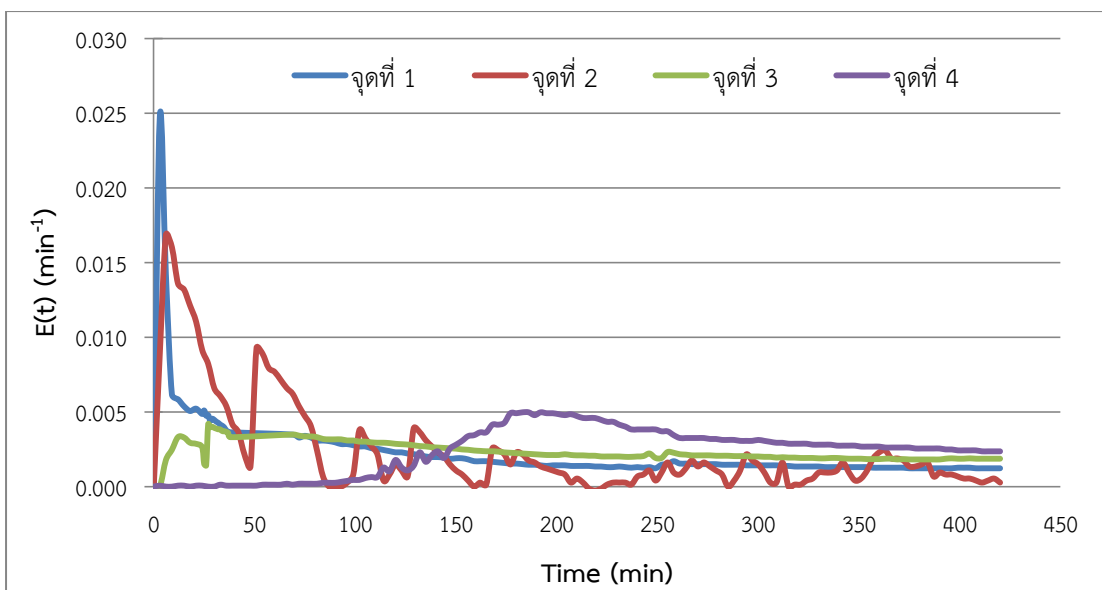
ตารางที่ 4-15 ตารางสรุปข้อมูลจากวิเคราะห์การกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier)

สภาวะทดลอง			ผลการวิเคราะห์
อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ชั้นตะกอน	แผ่นขนานเอียง	$\frac{D}{uL}$
40	/	-	0.1120
70	-	-	0.9000
	เม็ดพลาสติก	-	0.1548
	เม็ดพลาสติก	/	0.1183
	/	-	0.0990
	/	/	0.1628
180	/	-	0.4745

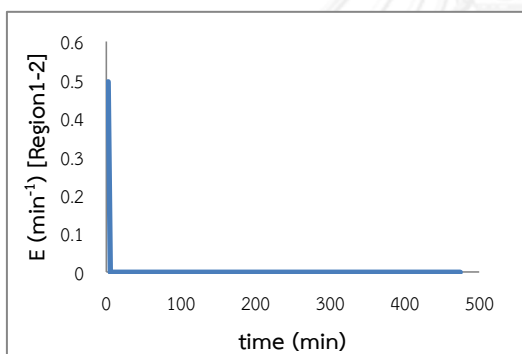
จากผลการวิเคราะห์พบว่าที่อัตราการไหล 40 - 180 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่า $\frac{D}{uL}$ อยู่ในช่วง 0.1 - 0.9 ซึ่งเป็นลักษณะของถังปฏิกรณ์แบบการไหลตามกัน (Plug Flow Reactor) ผสมกับรูปแบบของถังกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (Mixed Flow) โดยเป็นไปตามกลไกในทางทฤษฎีของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) และจากสารนำสัญญาณ (Tracer) สามารถวิเคราะห์ได้ว่าที่จุด 1 และ 2 จะมีรูปแบบการไหลตามกัน (Plug Flow Reactor) และมีการหมุนเวียนตะกอนกลับ สำหรับจุดที่ 3 และ 4 จะมีลักษณะของรูปแบบกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (Mixed Flow) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

4.6.1 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยไม่มีชั้นตะกอน

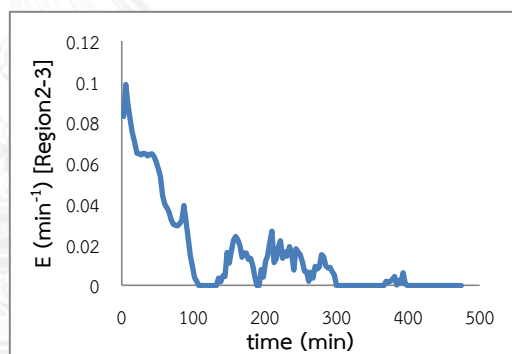
การศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักในการทดลองครั้งนี้ได้เลือกใช้สารนำสัญญาณ (Tracer) เป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งจะวัดการส่งสัญญาณด้วยการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการไหลและการกระจายเวลากักที่มีต่อถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนเมื่อมีสภาวะการทดลองที่เปลี่ยนแปลง สำหรับการทดลองที่ทำการศึกษาในขั้นตอนแรกจะศึกษาการกระจายเวลากักของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์โดยไม่มีชั้นตะกอน เนื่องจากมีความสนใจถึงผลกระทบของชั้นตะกอนภายในถังตกตะกอนชนิดดังกล่าวที่ส่งผลถึงรูปแบบการไหลภายในระบบ ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4-22 และสามารถอธิบายได้โดยละเอียดดังต่อไปนี้



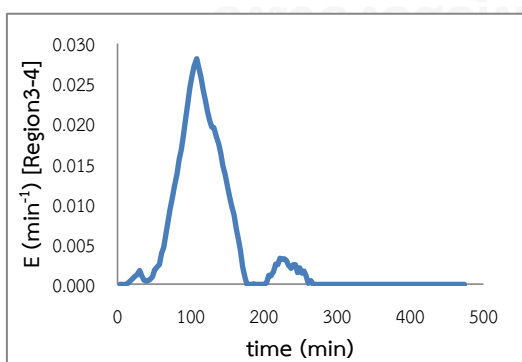
ก. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ E(t) กับ t ในทุกจุดของการทดลอง



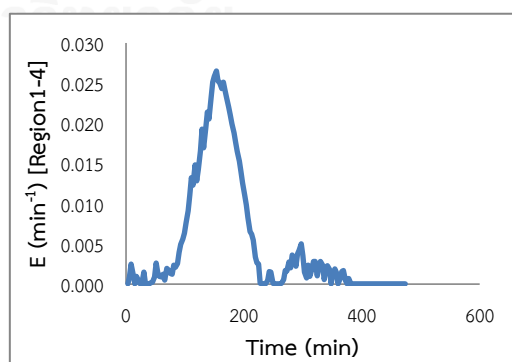
ข. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ E(t) กับ t สำหรับจุด 1 ไป 2



ค. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ E(t) กับ t สำหรับจุด 2 ไป จุด 3



ง. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ E(t) กับ t สำหรับจุด 3 ไป จุด 4



จ. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ E(t) กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 4

ภาพที่ 4-23 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ E(t) กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยไม่มีชั้นตะกอน

ภาพที่ 4-22 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับเวลาที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมงโดยไม่มีชั้นตะกอน ซึ่งพบว่าที่จุดตรวจวัดที่ 1 – 3 จะตรวจพบสารนำสัญญาณ (Tracer) ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากไม่มีชั้นตะกอนช่วยบังคับทิศทางการไหลของน้ำ จึงทำให้เกิดการไหลลัดวงจรซึ่งสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ ดังนี้

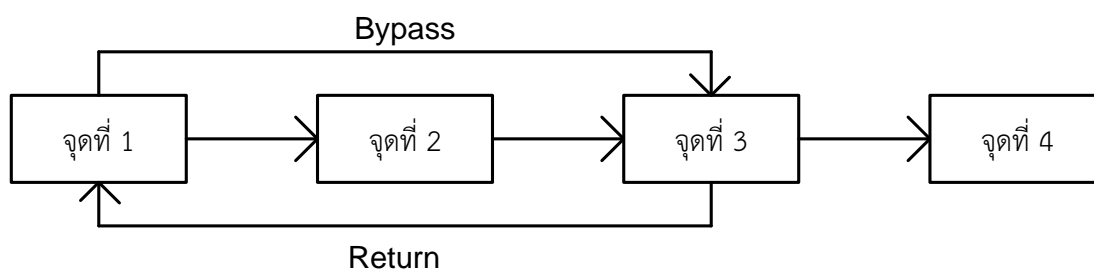
จุดที่ 1 เมื่อมีสารนำสัญญาณ (Tracer) เข้าระบบ จะสามารถตรวจพบได้เป็นจุดแรก หลังจากนั้นสารจะกระจายตัวแยกเป็น 2 ทาง คือ ไปที่จุดที่ 2 ตามที่ได้ออกแบบไว้ และไปยังจุดที่ 3 เนื่องจากการไหลลัดวงจร (Bypass) ทั้งนี้ การไหล ณ จุดที่ 1 จะมีรูปแบบของการไหลแบบการไหลตามกัน (Plug Flow Reactor)

จุดที่ 2 ซึ่งจะเห็นจากภาพที่ 4-22ก. ได้ว่าเกิดจุดสูงสุดของกราฟ (Peak) ความเข้มข้นของสารนำสัญญาณหลายจุด ซึ่งจุดแรกจะมีค่าสูงที่สุดและลดลงตามลำดับ โดยมีระยะห่างของจุดสูงสุดแต่ละจุดเท่ากัน การเกิดกราฟสัญญาณลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่าเกิดการหมุนเวียนของการไหล (Recirculation) บริเวณด้านล่างของกรวย (จุดที่ 1) ซึ่งจะผ่านจุดที่ 2 อีกครั้ง โดยเมื่อพิจารณาพร้อมกับภาพที่ 4-22ค. ก็จะเห็นว่ามีความลักษณะของกราฟคล้ายคลึงกัน

จุดที่ 3 จากภาพที่ 4-22ก. จะพบว่ามีจุดสูงสุดของกราฟ (Peak) 2 จุด โดยจุดแรกเป็นสัญญาณที่มาจาก การไหลลัดวงจรจากจุดที่ 1 และค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งสัญญาณที่ส่งมาจากจุดที่ 2 เดินทางมาถึงจึงเกิด Peak ของกราฟขึ้นอีกครั้งและค่อยๆ ลดลง ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับภาพที่ 4-22ง. นอกจากนี้ ยังเกิดจุดอับ (Death Zone) ขึ้นในบริเวณนี้ แต่เป็นจุดอับ (Death Zone) แบบไม่สมบูรณ์ เนื่องจากเกิดการแพร่ออกมาของสารนำสัญญาณ (Tracer) ซึ่งเห็นได้จากกราฟที่ลดลงอย่างช้าๆ

จุดที่ 4 ซึ่งสารนำสัญญาณ (Tracer) จะมาถึงช้าที่สุดเนื่องจากต้องไหลผ่านจุดที่ 1 – 3 ก่อนมาถึงจุดนี้ โดยจากกราฟจะสังเกตได้ว่าเกิด Peak เล็กๆ ขึ้นก่อนที่จะเกิด Peak ขนาดใหญ่ตามมา เนื่องจากจุดที่ 4 นี้เป็นจุดที่รับสารส่งสัญญาณ (Tracer) จากจุดที่ 3 จึงได้รับผลกระทบจากสัญญาณที่ส่งมาจากจุดที่ 3 โดยตรง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน

จากข้อมูลข้างต้นทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบการไหลของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนโดยไม่มีชั้นตะกอนนี้มีรูปแบบการไหลแบบการไหลตามกัน (Plug Flow Reactor) ในส่วนแรกและต่อด้วยรูปแบบการผสมอย่างสมบูรณ์ (Mixed Flow) ซึ่งในส่วนแรกที่เกิดรูปแบบการไหลตามกัน (Plug Flow Reactor) จะเกิดขึ้นในบริเวณของฟล็อกคูเลชัน สำหรับรูปแบบการผสมอย่างสมบูรณ์ (Mixed Flow) จะเกิดในส่วนของการตกตะกอน นอกจากนั้นแล้วในส่วนของฟล็อกคูเลชันยังมีลักษณะของการหมุนเวียนของสาร (Recirculation) และสำหรับกรณีที่เกิดตกตะกอนไม่มีชั้นตะกอนจะเกิดการไหลลัดวงจร (Bypass) ดังสรุปในภาพที่ 4-23

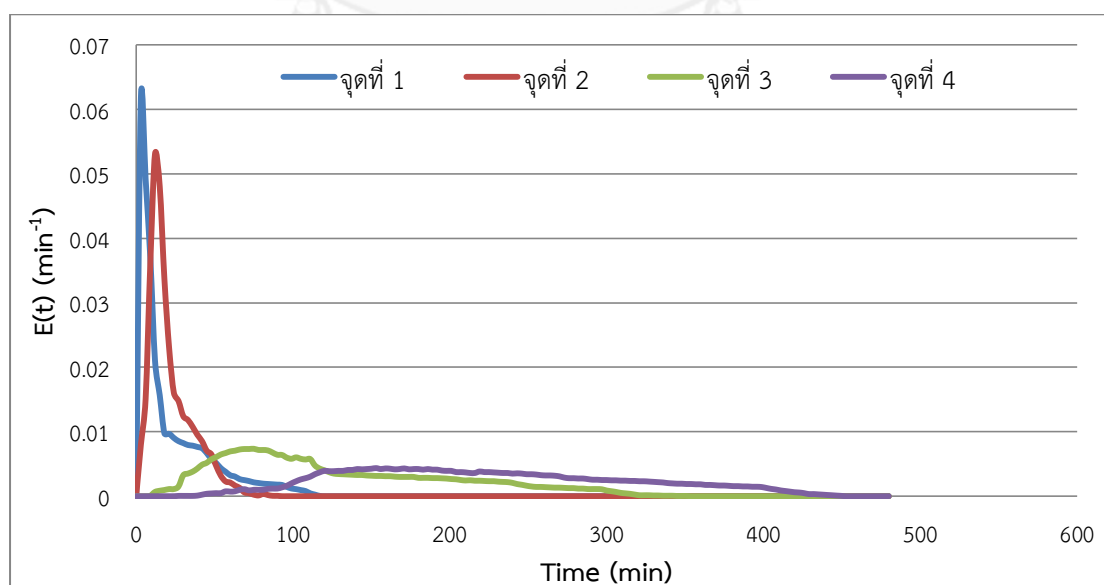


ภาพที่ 4-24 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยไม่มีชั้นตะกอน

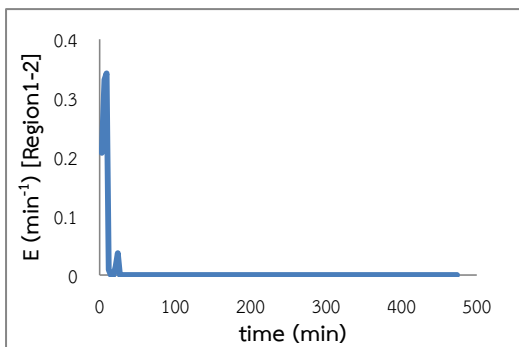
จากการศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยไม่มีชั้นตะกอน พบว่ามีการไหลลัดวงจร (Bypass) ภายในระบบ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของถังตกตะกอนชนิดดังกล่าวนี้ ดังนั้นจึงทำการศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของชั้นตะกอนที่อาจส่งผลต่อการศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนดังกล่าว ในการทดลองถัดไป

4.6.2 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน

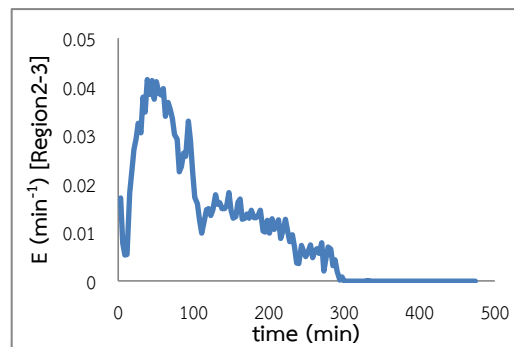
การศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) จะทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสม โดยกำหนดความสูงของชั้นตะกอนที่ 25 เซนติเมตร และทำการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) โดยเลือกใช้สารนำสัญญาณ (Tracer) เป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เช่นเดียวกับวิธีการทดลองที่ 4.6.1 ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4-24 และสามารถอธิบายได้โดยละเอียดดังต่อไปนี้



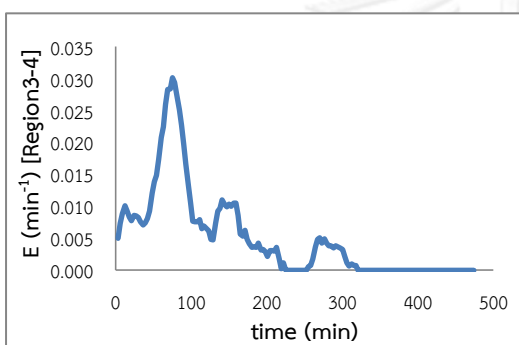
ก. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ในทุกจุดของการทดลอง



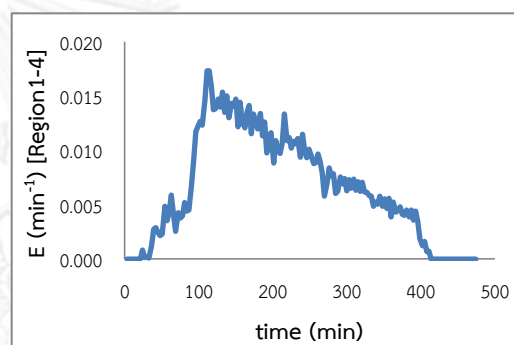
ข. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 2



ค. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 2 ไป จุด 3



ง. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 3 ไป จุด 4



จ. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 4

ภาพที่ 4-25 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตร

ภาพที่ 4-24 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตร ซึ่งสามารถตรวจสอบสารนำสัญญาณ (Tracer) ที่จุด 1 - 4 ได้ตามลำดับเวลา เนื่องจากชั้นตะกอนจะช่วยบังคับทิศทางการไหลของน้ำทำให้การไหลภายในระบบเป็นไปตามทิศทางการไหลที่ออกแบบไว้โดยสามารถอธิบายอย่างละเอียดในแต่ละจุดได้ดังนี้

จุดที่ 1 เมื่อมีสารนำสัญญาณ (Tracer) เข้าระบบ จะสามารถตรวจพบได้เป็นจุดแรก หลังจากนั้นสารแพร่กระจายไปจุดที่ 2 โดยการไหล ณ จุดที่ 1 จะเป็นในรูปแบบของรูปแบบการไหลตามกัน (Plug Flow Reactor)

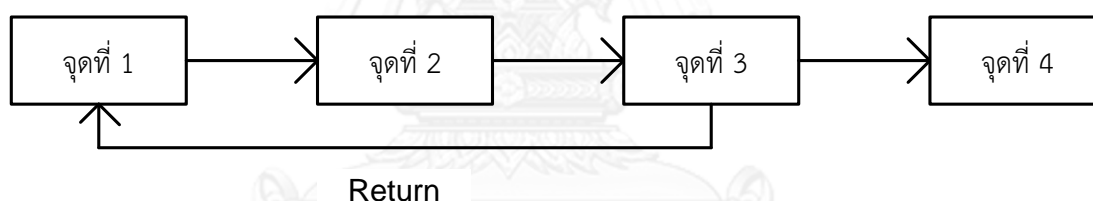
จุดที่ 2 เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4-24ก. จะพบว่าจุด Peak ของกราฟมีเพียงจุดเดียว ซึ่งต่างกับระบบที่ไม่มีชั้นตะกอน เนื่องจากชั้นตะกอนจะช่วยบังคับทิศทางการไหลของน้ำภายในถังให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบ และจากภาพที่ 4-24ค. จะพบว่าในจุดที่ 2 - 3 จะมีการหมุนเวียนสารนำสัญญาณ (Tracer)

ในส่วนของฟลอคคูเลชันซึ่งเป็นส่วนที่กำหนดให้เกิดการหมุนเวียนตะกอนของระบบกำจัดความขุ่น เพื่อเพิ่มเป้าสัมผัสของฟลอค

จุดที่ 3 จากภาพที่ 4-24ก. จะพบ Peak เกิดขึ้น 1 จุด และค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งเป็นไปแนวทางเดียวกับภาพที่ 4-24ง. โดยอธิบายได้ว่าที่จุดนี้จะเกิดจุดอับ (Death Zone) และได้รับสารที่ผ่านการหมุนเวียนกลับจากจุดที่ 2 ซึ่งเส้นกราฟที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าเกิดการแพร่ของสารนำสัญญาณ (Tracer) ออกจากจุดอับ รวมถึงได้รับสัญญาณจากสารที่หมุนเวียนในระบบ ทำให้กราฟสัญญาณเกิดขึ้นเป็นช่วงเวลานานและค่อยๆ ลดลงตามเวลา

จุดที่ 4 เป็นจุดที่สารนำสัญญาณ (Tracer) มาถึงช้าที่สุด เนื่องจากจะต้องผ่านจุดที่ 1 – 3 ก่อนเดินทางมาถึงจุดที่ 4 นี้ จึงเป็นจุดที่สารนำสัญญาณ (Tracer) หมดยุติที่สุดด้วย จุดที่ 4 นี้จะเป็นจุดที่รับสารส่งสัญญาณ (Tracer) จากจุดที่ 3 จึงเกิดกราฟที่มีลักษณะเป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน

จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบการไหลของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่มีชั้นตะกอนจะมีรูปแบบของการไหลแบบตามกัน (Plug Flow Reactor) ในบริเวณฟลอคคูเลชัน ตามด้วยรูปแบบกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (Mixed Flow) ในส่วนของการตกตะกอน และยังมีการไหลแบบหมุนเวียน (Recirculation) ในส่วนฟลอคคูเลชันอีกด้วย รูปแบบการไหลทั้งหมดที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 4-25

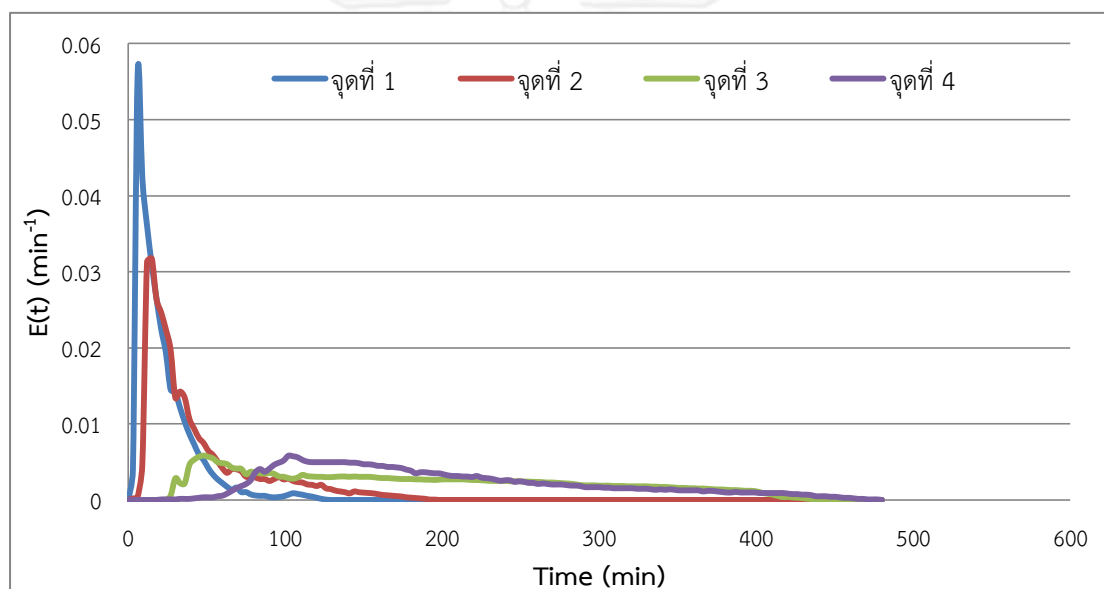


ภาพที่ 4-26 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยมีชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตร

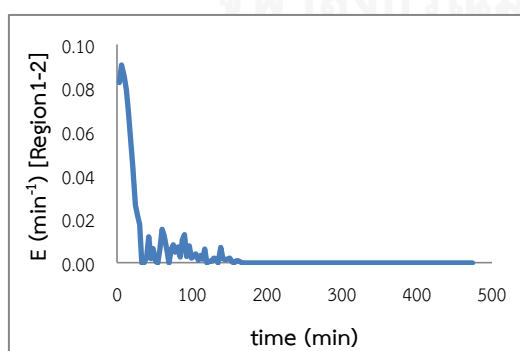
จากการศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) โดยมีชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตร พบว่าไม่มีการไหลลัดวงจร (Bypass) ดังที่เกิเกิดขึ้นกับระบบที่ไม่มีชั้นตะกอน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของถังตกตะกอนชนิดดังกล่าวนี้ นอกจากนี้จากผลการทดลองที่ 4.5.3 ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของถังตะกอนดังกล่าวด้วยแผ่นขนานเอียง (Settling Tube) ซึ่งพบว่าแผ่นขนานเอียงส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนดังกล่าว ดังนั้นจึงสนใจศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่มีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของแผ่นขนานเอียงที่อาจส่งผลต่อรูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนดังกล่าว ในการทดลองถัดไป

4.6.3 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง (Settling Tube)

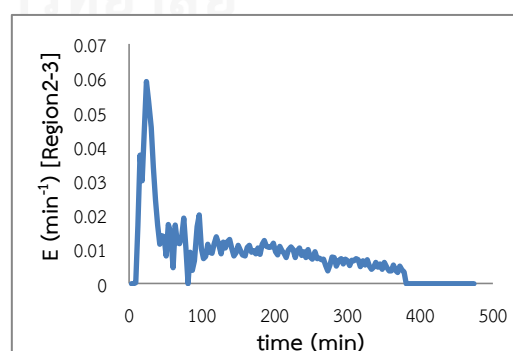
การศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) จะทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสม โดยกำหนดความสูงของชั้นตะกอนที่ 25 เซนติเมตร และเพิ่มแผ่นขนานเอียงในระบบในบริเวณของส่วนตกตะกอน โดยจะทำการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) โดยเลือกใช้สารนำสัญญาณ (Tracer) เป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เช่นเดียวกับวิธีการทดลองที่ 4.6.1 ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4-26 และสามารถอธิบายได้โดยละเอียดดังต่อไปนี้



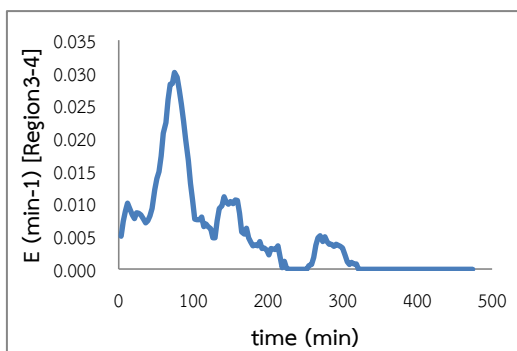
ก. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ในทุกจุดของการทดลอง



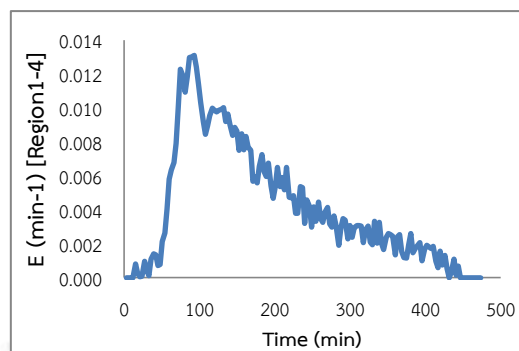
ข. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 2



ค. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 2 ไป จุด 3



ง. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 3 ไป จุด 4



จ. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 4

ภาพที่ 4-27 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง

จากกราฟวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียงพบว่า ลักษณะของกราฟที่เกิดจากระบบที่มีชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตรและมีแผ่นขนานเอียง มีลักษณะคล้ายกับผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมงที่มีเพียงชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตรเพียงอย่างเดียว ดังนั้น รูปแบบการไหลและกลไกภายในระบบจึงเป็นเช่นเดียวกับถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ที่มีชั้นตะกอน 25 เซนติเมตรที่ไม่มีแผ่นขนานเอียงที่ได้อธิบายไปข้างต้น

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าแผ่นขนานเอียงที่ติดตั้งในส่วนของตกตะกอนในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนไม่มีผลต่อรูปแบบการไหลโดยรวมของน้ำภายในระบบ

จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าตะกอนภายในถังตกตะกอนมีผลต่อค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อรูปแบบการกระจายเวลากักภายในระบบที่แปรค่าความนำไฟฟ้าเป็นค่าความเข้มข้นของสารนำสัญญาณ (Tracer) จึงมีการใช้เม็ดพลาสติกแทนชั้นตะกอน เพื่อทดสอบว่าค่าความนำไฟฟ้าจากชั้นตะกอนจะมีผลกับการทดลองของการกระจายเวลากักหรือไม่ในการทดลองถัดไป

4.6.4 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้เม็ดพลาสติกแทนชั้นตะกอน

การทดลองนี้ใช้เม็ดพลาสติกแทนชั้นตะกอนเพื่อทดสอบว่าชั้นตะกอนที่ใช้ในการทดลองมีผลต่อค่าการกระจายเวลากักที่ตรวจวัดได้หรือไม่ เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้าของชั้นตะกอนอาจส่งผลกระทบต่อค่าความเข้มข้นของสารนำสัญญาณ (Tracer) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ผลการทดลองพบว่าชั้นตะกอนไม่มีผลต่อรูปแบบของการกระจายเวลากัก ดังแสดงในภาพที่ 4-27 และ 4-28 ซึ่งรูปแบบ

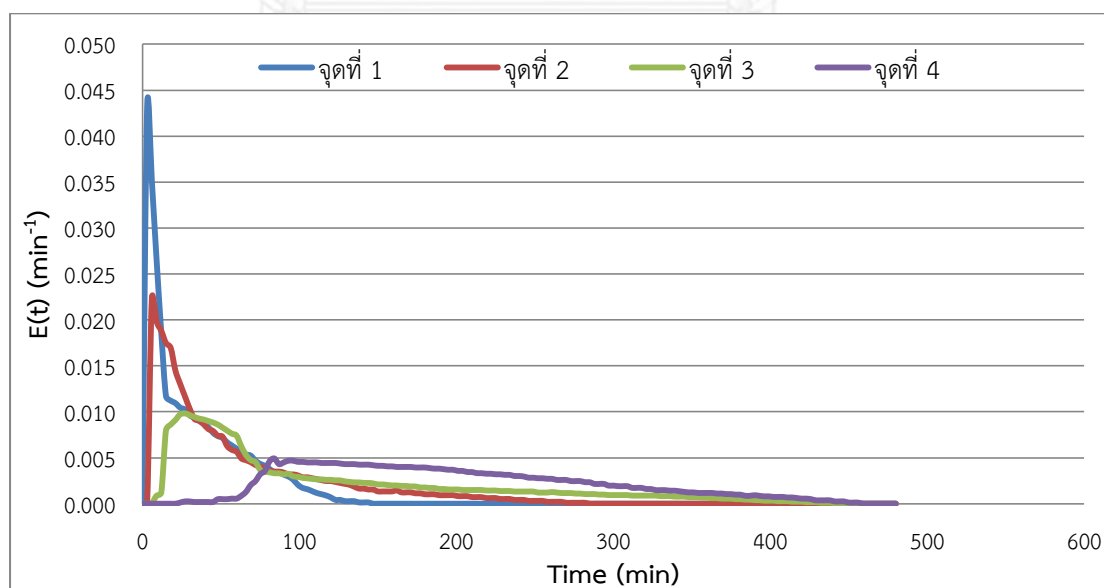
การตรวจพบสารนำสัญญาณ (Tracer) มีลักษณะเดียวกันกับการใช้ชั้นตะกอนจริง ทั้งกรณีที่มีแผ่นขนานเอียงและไม่มีแผ่นขนานเอียงซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้

จุดที่ 1 เมื่อมีสารนำสัญญาณ (Tracer) เข้าระบบ จะสามารถตรวจพบได้เป็นจุดแรก หลังจากนั้นสารแพร่กระจายไปจุดที่ 2 โดยการไหล ณ จุดที่ 1 จะเป็นในรูปแบบของรูปแบบการไหลตามกัน (Plug Flow Reactor)

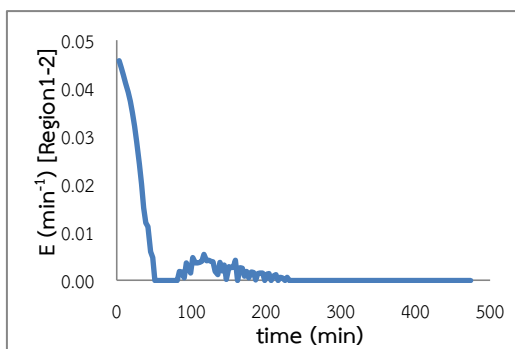
จุดที่ 2 เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4-27ก. และ 4-28ก. จะพบว่าจุด Peak ของกราฟมีเพียงจุดเดียว เช่นเดียวกับระบบที่มีชั้นตะกอนเนื่องจากเม็ดพลาสติกจะทำหน้าที่เสมือนชั้นตะกอนภายในระบบซึ่งจะทำหน้าที่เป็นชั้นตัวบังคับทิศทางของน้ำภายในถังให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบ และจากภาพที่ 4-27ค. และ 4-28ค. จะพบว่าในจุดที่ 2 – 3 จะมีการหมุนเวียนสารนำสัญญาณ (Tracer) ในส่วนของฟล็อกคูลชันซึ่งเป็นส่วนที่กำหนดให้เกิดการหมุนเวียนตะกอนของระบบกำจัดความขุ่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฟล็อก โดยกลไกที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับกลไกที่เกิดขึ้นภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่มีชั้นตะกอน

จุดที่ 3 จากภาพที่ 4-27ก. และ 4-28ก. จะพบ Peak เกิดขึ้น 1 จุด และค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งเป็นไปแนวทางเดียวกับภาพที่ 4-27ง. และ 4-28ง. โดยสามารถอธิบายได้ว่าที่จุดนี้จะเกิดจุดอับ (Death Zone) และได้รับสารที่ผ่านการหมุนเวียนกลับจากจุดที่ 2 ซึ่งเส้นกราฟที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าการแพร่ของสารนำสัญญาณ (Tracer) ออกจากจุดอับ รวมถึงได้รับสัญญาณจากสารที่หมุนเวียนในระบบ ทำให้กราฟสัญญาณเกิดขึ้นเป็นช่วงเวลานานและค่อยๆ ลดลงตามเวลา

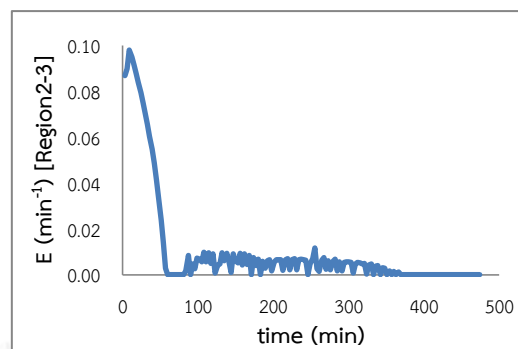
จุดที่ 4 เป็นจุดที่สารนำสัญญาณ (Tracer) มาถึงช้าที่สุด เนื่องจากจะต้องผ่านจุดที่ 1 – 3 ก่อนเดินทางมาถึงจุดที่ 4 นี้ จึงเป็นจุดที่สารนำสัญญาณ (Tracer) หมดลงท้ายที่สุดด้วย จุดที่ 4 นี้จะเป็นจุดที่รับสารส่งสัญญาณ (Tracer) จากจุดที่ 3 จึงเกิดกราฟที่มีลักษณะเป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน



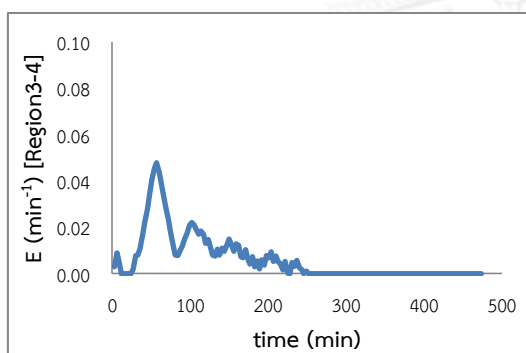
ก. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ในทุกจุดของการทดลอง



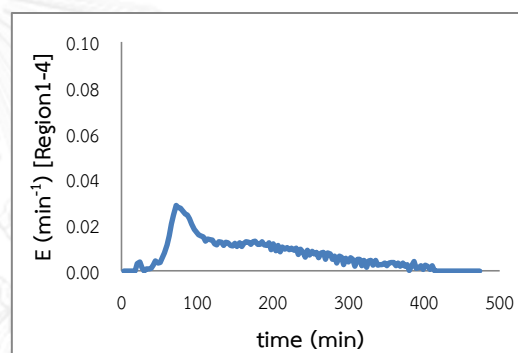
ข. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 2



ค. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 2 ไป จุด 3

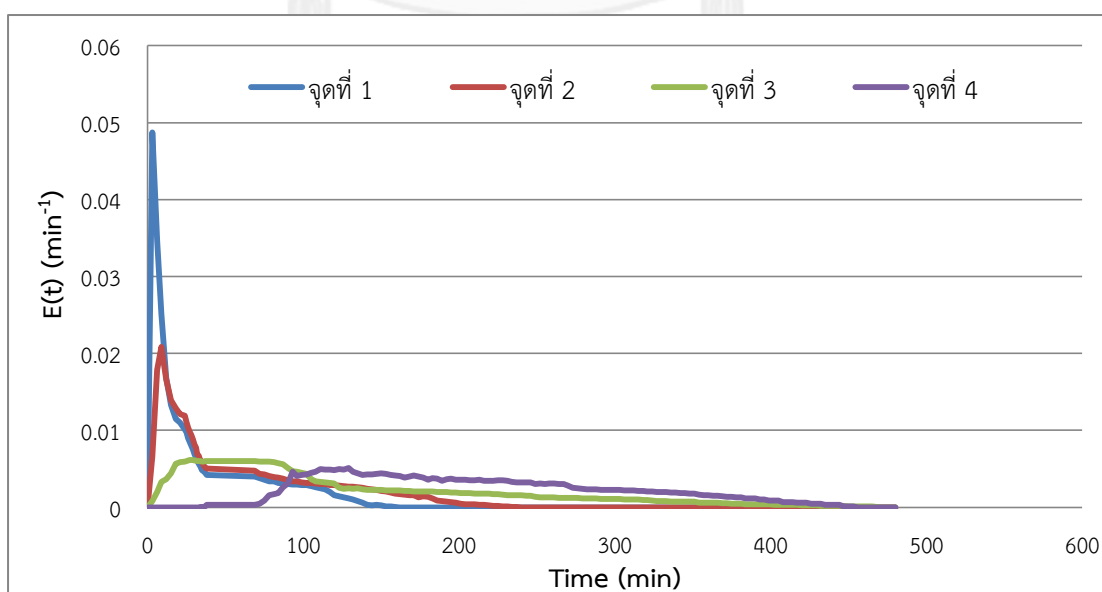


ง. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 3 ไป จุด 4

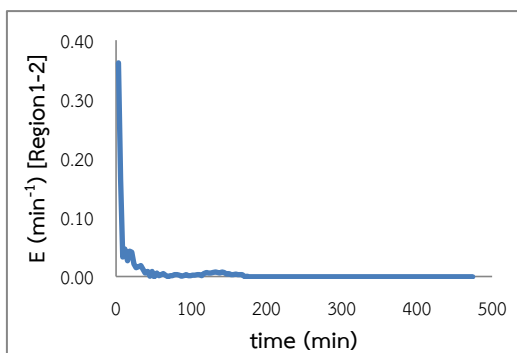


จ. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 4

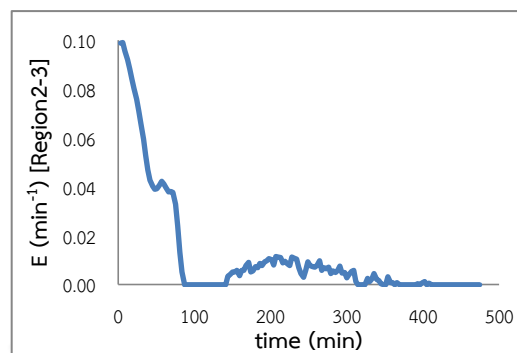
ภาพที่ 4-28 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้เม็ดพลาสติกเป็นตัวแทนของชั้นตะกอน



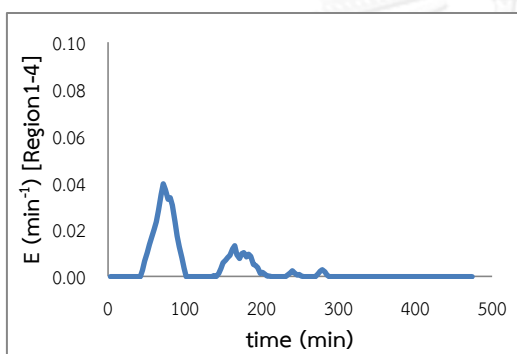
ก. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ในทุกจุดของการทดลอง



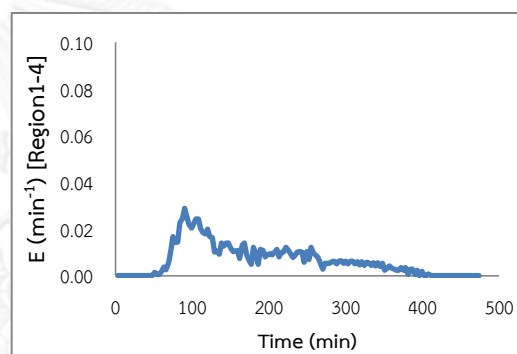
ข. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 2



ค. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 2 ไป จุด 3



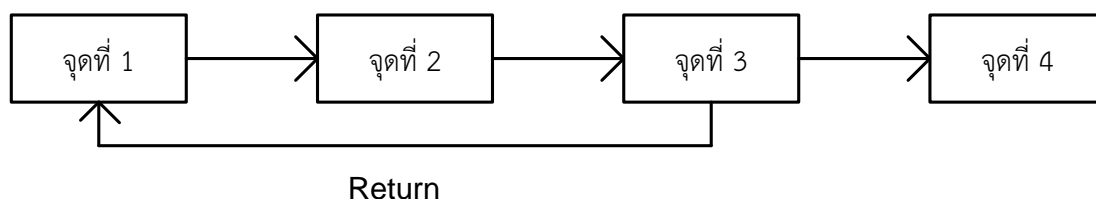
ง. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 3 ไป จุด 4



จ. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 4

ภาพที่ 4-29 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้เม็ดพลาสติกเป็นตัวแทนของชั้นตะกอนและมีแผ่นขนานเอียง

จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการใช้เม็ดพลาสติกแทนชั้นตะกอนจะมีรูปแบบการไหลในลักษณะเช่นเดียวกับการใช้ชั้นตะกอน และรูปแบบการไหลของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียน ตะกอนที่ใช้เม็ดพลาสติกแทนชั้นตะกอนจะมีรูปแบบของการไหลแบบตามกัน (Plug Flow Reactor) ในบริเวณฟล็อกคูเลชัน ตามด้วยรูปแบบกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (Mixed Flow) ในส่วนของการตกตะกอน และยังมีการไหลแบบหมุนเวียน (Recirculation) ในส่วนฟล็อกคูเลชันอีกด้วย รูปแบบการไหลทั้งหมดที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 4-29

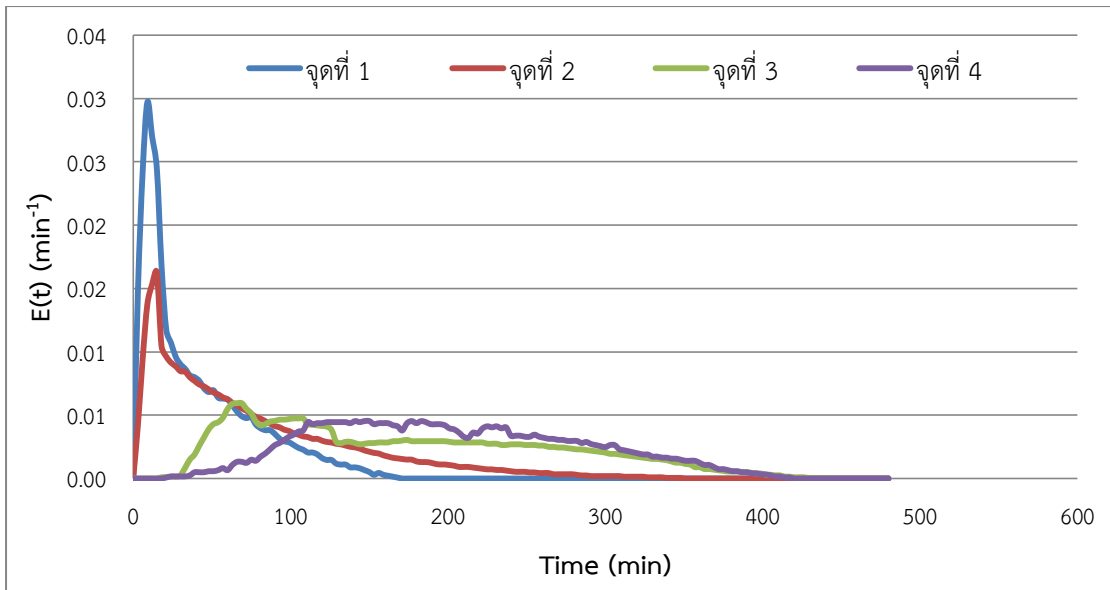


ภาพที่ 4-30 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยมีเม็ดพลาสติกเป็นตัวแทนของชั้นตะกอน

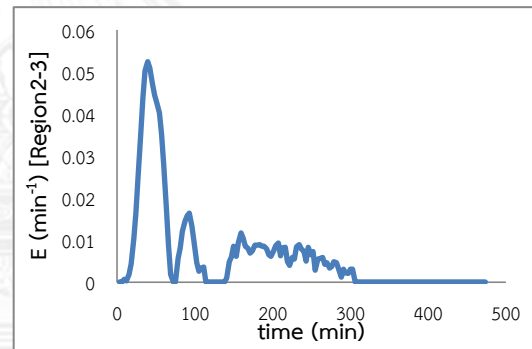
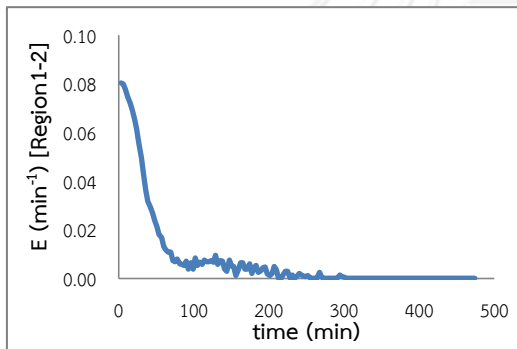
จากผลการทดลองพบว่าชั้นตะกอนไม่มีผลต่อรูปแบบของการกระจายเวลากัก เพราะฉะนั้นสำหรับการทดลองถัดไปจะทำการศึกษารูปแบบของการกระจายเวลากักที่มีอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้ตะกอนจริง เนื่องจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.2 พบว่าผลของอัตราการไหลของน้ำดิบมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักที่อัตราการไหลต่างๆ เพื่อศึกษาถึงรูปแบบการกระจายเวลากักที่อัตราการไหลต่างๆ สำหรับใช้เป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนดังกล่าวต่อไป

4.6.5 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 40 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ที่มีชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตร

การทดลองนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลจาก 70 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมจากการทดลองไปเป็น 40 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการไหลต่ำที่สุดและสูงที่สุดที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน เพื่อวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่อการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอน ภาพที่ 4-30 และ ภาพที่ 4-31 แสดงการกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 40 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

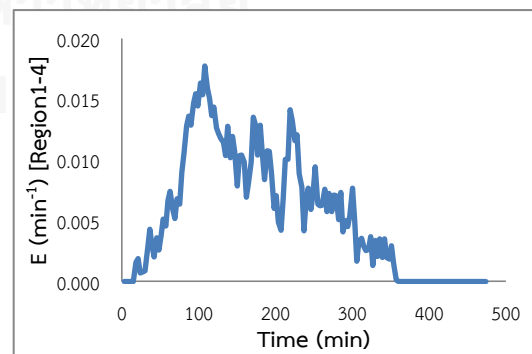
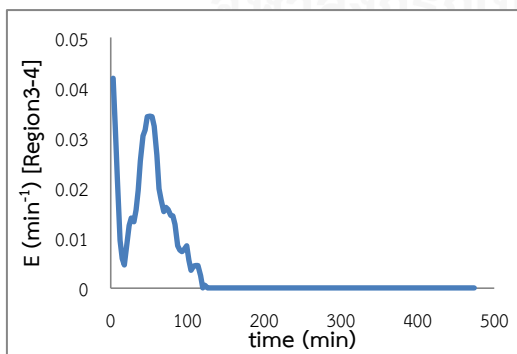


ก. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ในทุกจุดของการทดลอง



ข. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 2

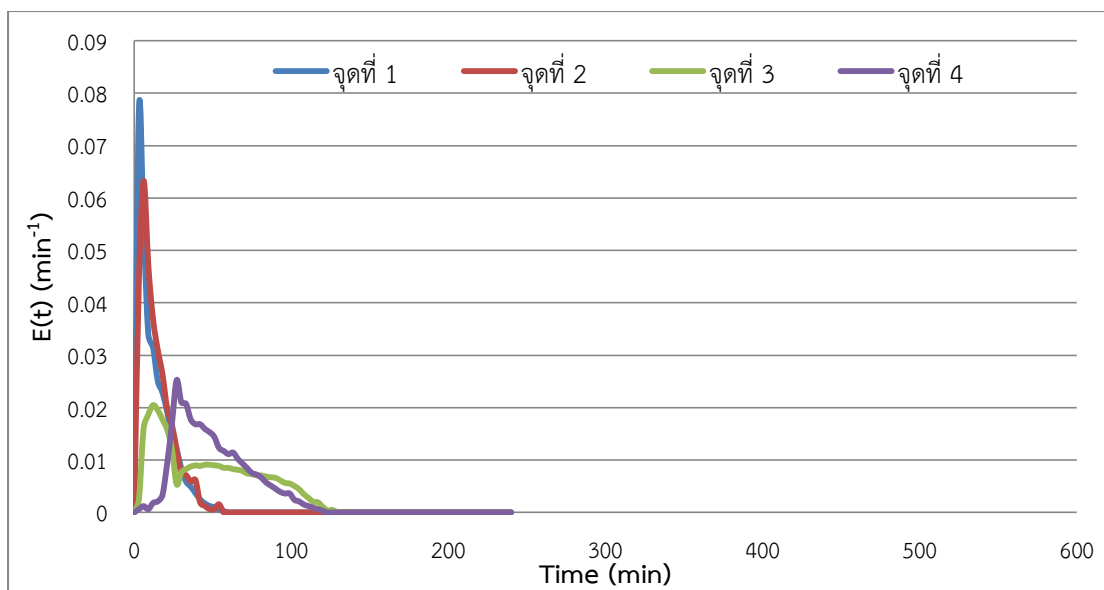
ค. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 2 ไป จุด 3



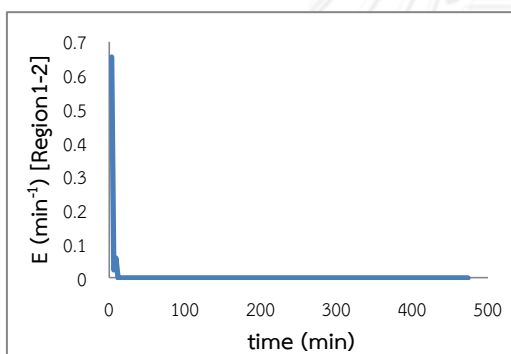
ง. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 3 ไป จุด 4

จ. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 4

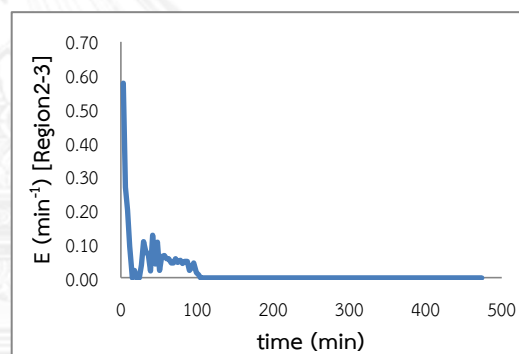
ภาพที่ 4-31 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 40 ลิตรต่อชั่วโมง



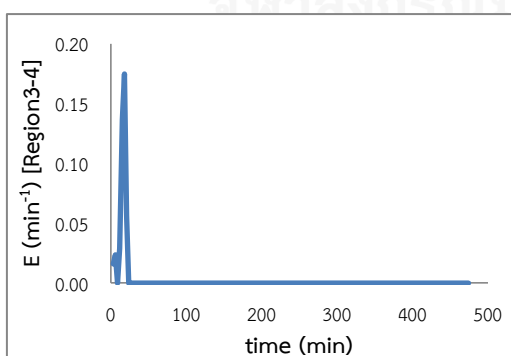
ก. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ในทุกจุดของการทดลอง



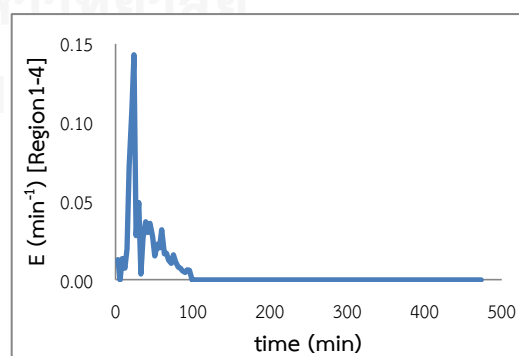
ข. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 2



ค. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 2 ไป จุด 3



ง. การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 3 ไป จุด 4



จ. กระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t สำหรับจุด 1 ไป จุด 4

ภาพที่ 4-32 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 180 ลิตรต่อชั่วโมง

จากการทดลองพบว่า อัตราการไหลที่แตกต่างกันส่งผลต่อการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแควร์ไฟเออร์ ซึ่งสามารถอธิบายโดยละเอียดได้ดังนี้

จุดที่ 1 เมื่อมีสารนำสัญญาณ (Tracer) เข้าระบบ จะสามารถตรวจพบได้เป็นจุดแรก หลังจากนั้นสารแพร่กระจายไปจุดที่ 2 โดยอัตราเร็วของการแพร่กระจายของสารนำสัญญาณ (Tracer) ของจุดที่ 1 นี้จะขึ้นกับอัตราการไหลของน้ำในลักษณะที่แปรผันตามกัน กล่าวคือ กรณีที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการแพร่ของสารนำสัญญาณเร็วขึ้น และสัญญาณของสารจะหมดจากจุดที่ 1 เร็วขึ้นตามลำดับ ในจุดนี้จะมีรูปแบบการไหลเป็นการไหลตามกัน (Plug Flow Reactor) ในทุกอัตราการไหล

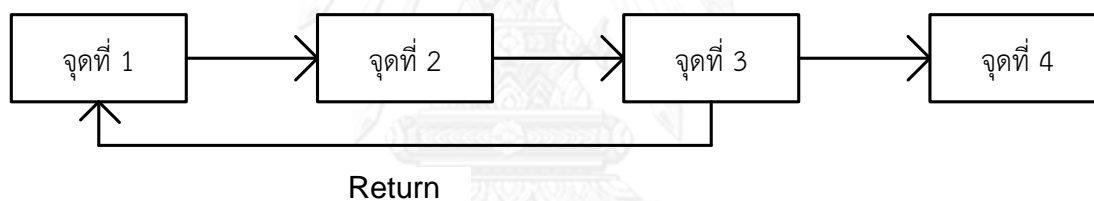
จุดที่ 2 เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4-30ก. และ ภาพที่ 4-31ก. พบว่ามีลักษณะของกราฟคล้ายกับผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมงที่มีเพียงชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตรที่อธิบายไปข้างต้น แต่พบว่าอัตราการหมุนเวียนของสารจะแปรผันตามอัตราการไหลของน้ำ กล่าวคือ ในระบบที่มีอัตราการไหลสูงอัตราการหมุนเวียนของสารนำสัญญาณ (Tracer) จะมีปริมาณสูง และถ้าระบบมีอัตราการไหลต่ำอัตราการหมุนเวียนของสารนำสัญญาณ (Tracer) ในระบบจะมีปริมาณต่ำ

กรณีที่เกิดจุดอับ (Death Zone) ของจุดที่ 3 เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4-30ก. และภาพที่ 4-31ก. จะพบ Peak เกิดขึ้น 1 จุด และค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งเป็นไปแนวทางเดียวกับภาพที่ 4-30ก. และภาพที่ 4-31ก. อธิบายได้ว่าที่จุดนี้จะเกิดจุดอับ (Death Zone) และได้รับสารที่ผ่านการหมุนเวียนกลับจากจุดที่ 2 ซึ่งเส้นกราฟที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าเกิดการแพร่ของสารนำสัญญาณ (Tracer) ออกจากจุดอับ รวมถึงได้รับสัญญาณจากสารที่หมุนเวียนในระบบ ทำให้กราฟสัญญาณเกิดขึ้นเป็นช่วงเวลานานและค่อยๆ ลดลงตามเวลา โดยพบว่าการเกิดจุดอับขึ้นจะมีลักษณะแปรผันกับอัตราการไหล กล่าวคือเมื่ออัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดจุดอับลดลง ซึ่งจะสังเกตได้จากพื้นที่ใต้กราฟของจุดที่ 3 จะมีขนาดลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น

จุดที่ 4 พบว่ามีลักษณะของกราฟคล้ายกับผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักในฟังก์ชันของ $E(t)$ กับ t ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมงที่มีเพียงชั้นตะกอนสูง 25 เซนติเมตรที่อธิบายไปข้างต้น คือ เป็นจุดที่ได้รับผลกระทบจากจุดที่ 3 ส่วนอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงยังคงส่งผลต่อรูปแบบการไหล โดยที่อัตราการไหลสูง จะทำให้สัญญาณจากสารนำสัญญาณ (Tracer) ลดลงจนถึงระดับเริ่มต้นของระบบเร็วขึ้น

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่ารูปแบบการไหลของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่มีชั้นตะกอนจะมีรูปแบบของการไหลแบบตามกัน (Plug Flow Reactor) ในบริเวณฟลิวคูลูชัน ตามด้วยรูปแบบกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (Mixed Flow) ในส่วนของการตกตะกอน และยังมีกรไหลแบบหมุนเวียน (Recirculation) ในส่วนฟลิวคูลูชัน โดยอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อรูปแบบการไหลภายในของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน กล่าวคือ กรณีที่อัตราการไหลสูงจะมีปริมาณหมุนเวียนตะกอน (Recirculation) สูงและทำให้เกิดจุดอับ (Death Zone) ลดลงในขณะที่เวลากัก (Hydraulic Retention Time) ของระบบต่ำ ในขณะที่อัตราการไหลของระบบลดลงจะทำให้การหมุนเวียนตะกอน (Recirculation) ต่ำลง แต่จะเกิดจุดอับ (Death Zone) ภายในระบบเพิ่มขึ้น โดยที่มีเวลากัก (Hydraulic Retention Time) ของระบบสูง

จากผลการทดลองที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมงจึงเป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุด เพราะเป็นอัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงถึง 84.68% ที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู เมื่อดำเนินการในสถานะที่เหมาะสม โดยการติดตั้งระยะห่างของส่วนประกอบต่างๆ ของถังตกตะกอนเป็นดังต่อไปนี้ คือ ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่ 6 เซนติเมตร และช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง (ΔH) ที่ความสูง 30 เซนติเมตร ความสูงของชั้นตะกอนที่ 25 เซนติเมตร และติดตั้งแผ่นขนานเอียง (Settling Tube) ในระบบในบริเวณของส่วนตกตะกอน โดยเลือกใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์ และจากผลการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายเวลากักเก็บว่าที่สภาวะการดำเนินการดังกล่าวรูปแบบการไหลของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนจะมีรูปแบบของการไหลแบบตามกัน (Plug Flow Reactor) ในบริเวณฟลอคคูเลชัน ตามด้วยรูปแบบกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (Mixed Flow) ในส่วนของการตกตะกอน นอกจากนั้นยังมีการไหลแบบหมุนเวียน (Recirculation) ในส่วนฟลอคคูเลชันโดยมีชั้นตะกอนช่วยป้องกันการไหลลัดวงจร (Bypass) ภายในระบบ ซึ่งเป็นไปตามทิศทางการไหลภายในของถังตกตะกอนที่ออกแบบจึงทำให้ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ทำงานได้อย่างเต็มสมรรถนะ โดยสามารถสรุปรูปแบบการไหลภายในระบบได้ดังภาพที่ 4-32 และสามารถสรุปเกณฑ์การออกแบบและสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 4-16



ภาพที่ 4-33 แสดงลักษณะการไหลของน้ำภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยมีชั้นตะกอน

ตารางที่ 4-16 เกณฑ์การออกแบบและสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม

Method	Liquid flow rate (L/hr)	Mechanism	G (s ⁻¹)	t (s)	(G•t)	θ_{sed}^a (hr)	θ_{Jet}^b (hr)
Design criteria*	-	coagulation	> 350	1 < t < 5	< 1700 ^c	1-3	-
	-	flocculation	< 5 ^d	1200-2400	10 ⁴ -10 ⁵		
Operating condition	70	coagulation	564.32	1.89	1068.47	2.79	3.29
		flocculation	0.743	1800	1337.40		

หมายเหตุ – * อ้างอิงเกณฑ์การออกแบบจาก (Bouyer et al., 2005; Degremont, 1999; Hughes, 2000; Reynolds & Richards, 1996)

- a) หมายถึง ระยะเวลาพักในส่วนของการตกตะกอน
- b) หมายถึง ระยะเวลาพักทั้งหมดของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนเจ็ทแควร์ไฟเออร์
- c) หมายถึง เกณฑ์การออกแบบของ Static Mixer ประเภท Noritake
- d) หมายถึง เกณฑ์การออกแบบสำหรับถังตกตะกอนประเภท Fluidized Bed (Floc Blanket Clarifier)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาค้นคว้าผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแควร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) เพื่อศึกษากลไกภายในถังตกตะกอนและสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ รวมถึงนำเสนอเกณฑ์การออกแบบถังตกตะกอนชนิดนี้ โดยเริ่มต้นจากศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชันต่อการกำจัดความขุ่น โดยทำการศึกษานิตและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชัน ด้วยวิธีการจาร์เทส เพื่อเลือกใช้ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม โดยเมื่อทราบถึงชนิดและความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์ แล้วจึงนำไปใช้ในการทดลองกับถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน ซึ่งสารโคแอกกูแลนต์ที่นำมาทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยในขั้นตอนนี้มีทั้งหมด 4 ชนิด ประกอบไปด้วย สารส้มน้ำ (Aluminium Sulphate, Alum) เฟอร์ริคคลอไรด์ (Ferric Chloride, FeCl₃) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminum Chloride, PACl) และอลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต (Aluminium Chlorohydrate, ACH) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้า ได้แก่ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น คุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงจากกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยวิธีการจาร์เทส รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling Test) ของฟล็อกที่เกิดจากปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมของแต่ละชนิด จากนั้นจึงศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำด้วยกระบวนการทำโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชัน โดยมีรายละเอียด ดังนี้

- กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันมีความจำเป็นต่อกระบวนการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำ โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำขึ้นกับชนิดสารโคแอกกูแลนต์และปริมาณความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบ

- สารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดมีกลไกหลักในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคและกำจัดความขุ่นออกจากน้ำที่แตกต่างกัน โดยกลไกหลักของสารแต่ละชนิดจะส่งผลถึงความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ และประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น

- การทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มพบว่าสารส้มน้ำให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มของฟล็อกที่เกิดจากสารโคแอกกูแลนต์ชนิดอื่น โดยเฉพาะที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบมีค่าสูง โดยที่ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของสารส้มน้ำเท่ากับร้อยละ 76.70 87.69 และ 91.72 ที่อัตราการน้ำล้นผิว 3 เซนติเมตรต่อนาที และความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 25 20 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ตามลำดับ

- การศึกษาคุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงจากกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยวิธีการจาร์เทส พบว่าสารส้มน้ำส่งผลกับพารามิเตอร์หลักที่ต้องควบคุมเกี่ยวข้องกับคุณภาพด้วยวิธีการดังกล่าว ได้แก่ ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และค่าพีเอช (pH) เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำ และยังเป็น

พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารโคแอกกูแลนต์เพียงเล็กน้อยซึ่งอยู่ในช่วงที่ควบคุม คือ ค่าพีเอช (pH) อยู่ในช่วง 7 – 8.5 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสารส้มน้ำมีความเหมาะสมสำหรับการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำได้ดีที่สุด

- การศึกษาผลของความสูงของชั้นตะกอนที่ 10 และ 25 เซนติเมตร พบว่าความสูงของชั้นตะกอนมีผลต่อประสิทธิภาพของถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแควร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ซึ่งที่ความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสูงกว่าความสูงชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร เนื่องจากความสูงของชั้นตะกอนมีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนเข้าไปในระบบ ซึ่งตะกอนที่หมุนเวียนเข้าไปในระบบจะเป็นตัวเพิ่มปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคที่ผ่านการทำลายเสถียรภาพ

- การศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำดิบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน ซึ่งได้ทำการทดลองที่อัตราการไหล 40 50 70 110 และ 180 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าอัตราการไหลจะมีผลต่อเวลากัก (t) ภายในระบบและค่าความปั่นป่วนของน้ำ (G) สำหรับอัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนนี้อยู่ที่ 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพของระบบ อัตราการผลิตน้ำใส รวมไปถึงเกณฑ์การออกแบบและควบคุมระบบ

- การศึกษาปริมาณฟล็อกที่เกิดขึ้นภายในระบบของกระบวนการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน สามารถคำนวณปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นภายในระบบได้จากปริมาณสารเคมีที่ใช้และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดภายใต้เงื่อนไขของอัตราการไหลและระยะเวลาดำเนินการที่กำหนด โดยปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากการคำนวณในสภาวะทดลองสำหรับการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง ความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เอ็นทียู และเดินระบบอย่างต่อเนื่อง 8 ชั่วโมงต่อวัน พบว่าจะมีปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้น 3.911 ลิตรต่อวัน ซึ่งส่งผลให้ชั้นตะกอนสูงเพิ่มขึ้นเพียง 0.84 เซนติเมตร จากชั้นความสูงเดิม 25 เซนติเมตร

- การศึกษาระยะของช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) พบว่าระยะห่างดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนภายในระบบ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน โดยระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่เหมาะสมคือ ความสูงที่อยู่ในระดับเดียวกับหัวกระจายน้ำ (Inlet Nozzle) สำหรับถังตกตะกอนที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ 6 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระดับที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนเข้าระบบได้ดีและลดการไหลลัดวงจรของน้ำภายในระบบ

- การศึกษาระยะห่างของช่องว่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถังตกตะกอนกับพื้นถังตกตะกอน (ΔH) พบว่าระยะห่างระหว่างส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถังตกตะกอนกับพื้นถัง (ΔH) จะต้องอยู่สูงกว่าชั้นตะกอนภายในระบบ โดยระยะห่างที่เหมาะสมสำหรับถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนที่ใช้สำหรับการทดลองนี้ คือ 30 เซนติเมตร เนื่องจากเมื่อลดระยะห่างระหว่าง

ส่วนของทรงกระบอกชั้นกลางถึงตกตะกอนกับพื้นถังจะทำให้น้ำต้องไหลผ่านชั้นตะกอนกันถึงที่สูง 25 เซนติเมตร จึงทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของชั้นตะกอน และตะกอนในส่วนนี้จึงหลุดออกมากับส่วนของน้ำใส

- การศึกษาประสิทธิภาพของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแควร์ไฟเออร์ ที่สภาวะที่เหมาะสม กล่าวคือ ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน (Δh) ที่ 6 เซนติเมตร และช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง (ΔH) ที่ความสูง 30 เซนติเมตร ความสูงของชั้นตะกอนที่ 25 เซนติเมตร และเลือกใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์ เตินระบบแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง สำหรับน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีค่าความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู และน้ำดิบจริงที่มีความขุ่นเริ่มต้น 60 เอ็นทียู พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 80.00 และ 81.33

- แผ่นขนานเอียงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของระบบในทุกอัตราการไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับน้ำดิบที่มีความขุ่นเริ่มต้นต่ำ เนื่องจากที่ความขุ่นเริ่มต้นต่ำโอกาสการรวมตัวของอนุภาคจะน้อยกว่าที่ความขุ่นเริ่มต้นสูงจึงทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นต่ำกว่าที่ความขุ่นสูง แต่เมื่อเพิ่มแผ่นขนานเอียงจะทำให้เพิ่มโอกาสการรวมตัวของอนุภาคและนอกจากนั้นแผ่นขนานเอียงยังช่วยลดระยะทางของการตกตะกอน

- การศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบการไหลของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนนี้เป็นในรูปแบบการไหลตามกัน (Plug Flow Reactor) ในส่วนฟล็อกคูเลชันและต่อด้วยรูปแบบกวนผสมอย่างสมบูรณ์ (Mixed Flow) ในส่วนตกตะกอน นอกจากนี้ในส่วนของฟล็อกคูเลชันยังมีลักษณะของการหมุนเวียนภายในระบบ (Internal Recirculation)

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลอง มีข้อเสนอแนะ ดังนี้

5.2.1 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยวิธีจาร์เทส

- ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะของฟล็อกที่เกิดขึ้น เช่น ความหนาแน่นและขนาดของฟล็อก ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าลักษณะดังกล่าวจะเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นในส่วน of ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

- ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการใช้โพลีเมอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่นให้สูงขึ้น

5.2.2 การใช้ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแควร์ไฟเออร์ (Jet Clarifier)

- ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วน of ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกระจายน้ำ (Inlet Nozzle) ที่ใช้สำหรับถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน เนื่องจากหัวกระจายน้ำ (Inlet

Nozzle) จะเป็นส่วนของการเกิดปฏิกิริยาโคแอกกูเลชัน ซึ่งประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าระบบ นอกจากนี้ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางยังส่งผลต่อความเร็วของน้ำดิบและรูปแบบการไหลของน้ำภายในส่วนของฟล็อกคูเลชันส่วนกรวยชั้นใน รวมไปถึงแรงดันน้ำที่ส่งผลต่อปริมาณการหมุนเวียนตะกอนกลับในระบบ

- ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะของฟล็อกที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น ความหนาแน่นและขนาดของฟล็อก ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าลักษณะดังกล่าวจะเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นในส่วนของถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน เนื่องจากความแตกต่างระหว่างกลไกของกระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกคูเลชันโดยวิธีจาร์เทสกับในระบบของถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนมีปัจจัยที่แตกต่างกัน เช่น ค่าความปั่นป่วน (G) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (t) นอกจากนี้ วิธีการทดลองจาร์เทสยังเป็นการทดลองแบบกะ (Batch) ในขณะที่ระบบกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนเป็นการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Flow)

- ควรเพิ่มระยะเวลาสำหรับการในการเดินระบบอย่างต่อเนื่องให้มากกว่า 8 ชั่วโมงต่อวัน เพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุลอย่างคงที่ และเพื่อนำข้อมูลเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดความขุ่นของระบบผลิตน้ำประปาต่อไป

- ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของความสูงชั้นตะกอน เนื่องจากถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดนี้สามารถประยุกต์ใช้เป็นถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอน (Sludge Recirculation) ควบคู่กับแบบใช้ชั้นตะกอน (Sludge Blanket) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าความสูงของชั้นตะกอนที่ทำหน้าที่เป็น Sludge Blanket ยังมีความสูงน้อยเกินไปจึงทำให้ตะกอนฟุ้งกระจายและให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดีเท่าที่ควร

- ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องความหนาแน่นของตะกอนในแต่ละความสูงของชั้นตะกอนที่ทำการศึกษา เนื่องจากความสูงของชั้นตะกอนที่เพิ่มสูงขึ้นอาจส่งผลให้ความหนาแน่นของชั้นตะกอนบริเวณด้านล่างมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อความเข้มข้นตะกอนที่หมุนเวียนกลับเข้าภายในระบบ

- ในการศึกษารูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสามฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครร์ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่มีการหมุนเวียนภายในระบบ (Internal Recirculation) ควรทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่มีกลไกภายในระบบลักษณะเดียวกัน แต่ไม่มีการหมุนเวียนภายในระบบ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบผลจากการหมุนเวียนภายในระบบ

รายการอ้างอิง

- Arthon Industry Limited. Solid classification & Grani size. Retrieved 2012, October 26
<http://www.arthon.com/library/soilclassification.html>
- Baik, M. H., & Lee, S. Y. (2010). Colloidal stability of bentonite clay considering surface charge properties as a function of pH and ionic strength. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16(5), 837-841.
- Beltrán-Heredia, J., & Sánchez-Martin, J. (2009). Improvement of water treatment pilot plant with Moringa oleifera extract as flocculant agent. *Environmental Technology*, 30(6), 525-534.
- Bouyer, D., Coufort, C., Liné, A., & Do-Quang, Z. (2005). Experimental analysis of floc size distributions in a 1-L jar under different hydrodynamics and physicochemical conditions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 292(2), 413-428.
- Chamnanmor, R., Painmanakul, P., & Puprasert, C. (2012). *Study of In-line Coagulation and Flocculation Processes for Turbidity Removal: Experimental Approaches*. Paper presented at the The 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Global Environment, Indonesia.
- Ching, H.-W., Tanaka, T. S., & Elimelech, M. (1994). Dynamics of coagulation of kaolin particles with ferric chloride. *Water Research*, 28(3), 559-569.
- Degremont. (1999). *Water Treatment Handbook* (6 ed. Vol. 1-2). France: Lavoisier Publishing Inc.
- Eaton, A. D., Franson, M. A. H., Association, A. P. H., Association, A. W. W., & Federation, W. E. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater: American Public Health Association*.
- EPA United States Environmental Protection Agency. (1999). Particles Contributing to Turbidity. Retrieved 2012, October 20
http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/mdbp/upload/chap_08.doc
- Fogler, H. S. (2013). *Elements of Chemical Reaction Engineering* (4 ed.): Prentice-Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences.
- Gladman, B. R., Rudman, M., & Scales, P. J. (2010). The effect of shear on gravity thickening: Pilot scale modelling. *Chemical Engineering Science*, 65(14), 4293-4301.
- Grim, R. (1986). Classification of common rocks. Retrieved 2012, October 25
<http://www.seafriends.org.nz/enviro/soil/rocktbl1.htm>
- Hayes, R. E., & Mmbaga, J. P. (2012). *Introduction to Chemical Reactor Analysis, Second Edition*: Taylor & Francis.

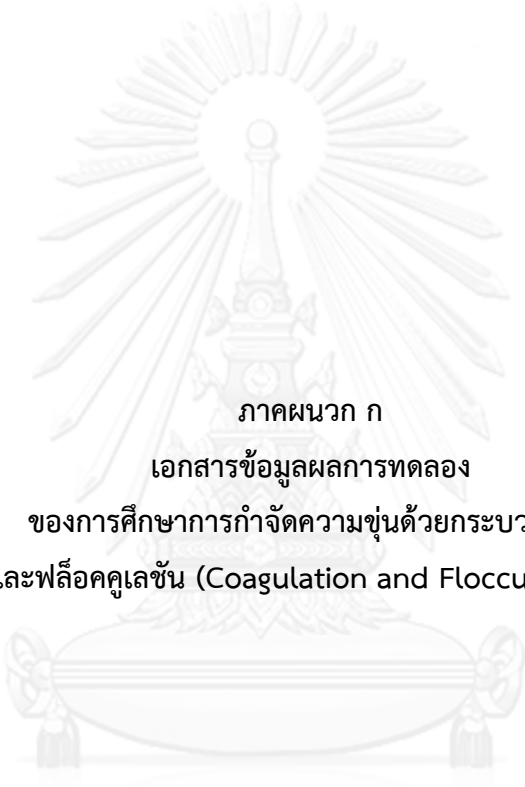
- Hughes, M. A. (2000). Coagulation and flocculation Part 1-2. In D. Ladislav Svarovsky (Ed.), *Solid-Liquid Separation* (4 ed., pp. 104 – 165). India: Integra Software Services Pvt LTd, Pondicherry.
- Kan, C., Huang, C., & Pan, J. R. (2002). Time requirement for rapid-mixing in coagulation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 203(1–3), 1-9.
- Kawamura, S. (2000). *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*: Wiley.
- Koohestanian, A., Hosseini, M., & Abbasian, Z. (2008). The Separation Method for Removing of Colloidal Particles from Raw Water. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 2(4), 266-273.
- Kopeliovich, D. Stabilization of colloids. Retrieved 2012, October 28
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=stabilization_of_colloids
- Letterman, R. D., Amirtharajah, A., & O'Melia, C. R. (1999). Coagulation and Flocculation *American Water Work Association. (ed.), Water Quality & Treatment A Handbook of Community Water Supplies 5th edition* (pp. 6.1 – 6.88). United State of America: R. R. Donnelley & Sons Co.
- Letterman, R. D., & Association, A. W. W. (1999). *Water quality and treatment: a handbook of community water supplies*: McGraw-Hill.
- Levenspiel, O. (1972). *Chemical reaction engineering*: Wiley.
- Li, T., Zhu, Z., Wang, D., Yao, C., & Tang, H. (2007). The strength and fractal dimension characteristics of alum–kaolin flocs. *International Journal of Mineral Processing*, 82(1), 23-29.
- Means, R. E., & Parcher, J. V. (1963). *Physical properties of soils*: C. E. Merrill Books.
- Qasim, S. R., Motley, E. M., & Zhu, G. (2000). *Water works engineering: planning, design, and operation*: Prentice Hall PTR.
- Reynolds, T. D., & Richards, P. A. (1996). *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*: PWS Publishing Company.
- Rossini, M., Garrido, J. G., & Galluzzo, M. (1999). Optimization of the coagulation–flocculation treatment: influence of rapid mix parameters. *Water Research*, 33(8), 1817-1826.
- Rushton, J. H. (1952). Mixing of Liquids in Chemical Processing. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44(12), 2931-2936.
- Sakshat Virtual Labs. Principles of Zeta potential. Retrieved 2012, October 28
<http://iiith.vlab.co.in/?sub=19&brch=209&sim=600&cnt=1059>
- Samsen Water Treatment Plant Engineering Group. (2002). Existing Design Capacities and Loadings Report of the Samsen Water Treatment Plant Engineering Group.

- Samsen Water Treatment Plant. (2009 – 2012). Water quality reports, Report of the water quality analysis system.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*: McGraw-Hill Education.
- The designing of static mixer (noritake) in rapid mix for water treatment. The designing of static mixer (noritake) in rapid mix for water treatment. Retrieved Jan, 2012 http://www.tumcivil.com/engfanatic/content/upload/File/mwa/sta_000e.pdf.
- Tse, I. C., Swetland, K., Weber-Shirk, M. L., & Lion, L. W. (2011). Fluid shear influences on the performance of hydraulic flocculation systems. *Water Research*, 45(17), 5412-5418.
- Wu, X., Ge, X., Wang, D., & Tang, H. (2007). Distinct coagulation mechanism and model between alum and high Al₁₃-PACl. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 305(1–3), 89-96.
- Yang, Z., Gao, B., & Yue, Q. (2010). Coagulation performance and residual aluminum speciation of Al₂(SO₄)₃ and polyaluminum chloride (PAC) in Yellow River water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 165, 122–132.
- Yu, W.-z., Gregory, J., Campos, L., & Li, G. (2011). The role of mixing conditions on floc growth, breakage and re-growth. *Chemical Engineering Journal*, 171(2), 425-430.
- กัลยา สุณีย์สุขวัฒนา. (2536). การใช้ตัวกลางในถังโซลิตส์คอนแทคต์แคลรีไฟเออร์. (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิวัติ อนงค์รักษ์. ปฐพีศาสตร์เบื้องต้น. Retrieved 28 ตุลาคม 2555 http://mis.agri.cmu.ac.th/course/course_lecture_download.asp?...CID..
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. ถังตกตะกอน Pulsator Clarifier. Retrieved 19 ธันวาคม 2555 http://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=571.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. (2542). วิศวกรรมการประปา เล่ม1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- วิจารณ์ ตันติธรรม. (2537). การกำจัดความขุ่นโดยถังน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน. (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วีระ อินทรกุล. (2524). การศึกษาถังตกตะกอนแบบโซลิตคอนแทคแคลรีไฟเออร์ที่ใช้แผ่นขนานเอียง. (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โสภณ เอียดประพาล. (2545). การศึกษาเกณฑ์การควบคุมและประสิทธิภาพของถังกำจัดความขุ่นแบบ ใช้ ชั้นตะกอนในระบบปรับคุณภาพน้ำ โรงงานผลิตน้ำประปาแพงพวย จังหวัดราชบุรี. (วิศวกรรม ศาสตร์มหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



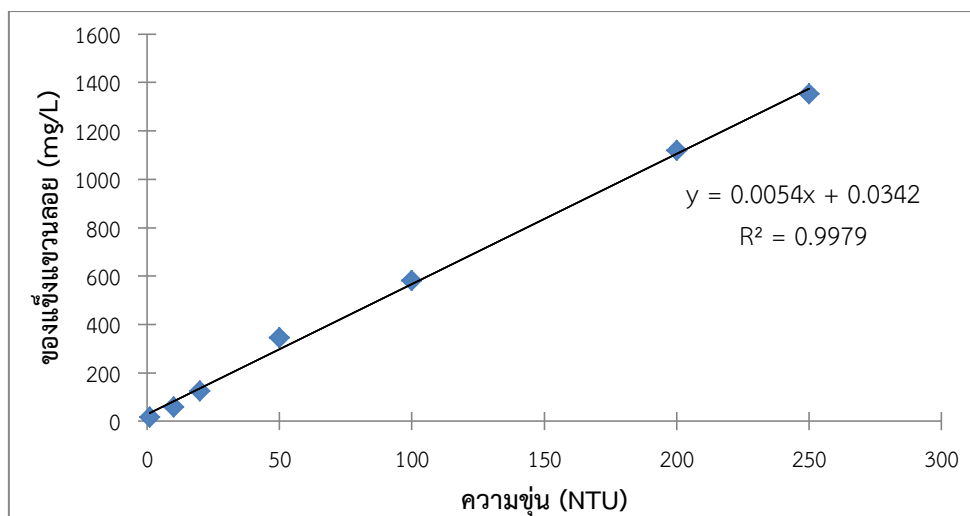
ภาคผนวก ก
เอกสารข้อมูลผลการทดลอง
ของการศึกษาการจัดความขุ่นด้วยกระบวนการ
โคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (Coagulation and Flocculation) โดยวีรจักร เทส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก-1 สารเคมีที่ใช้ในการทำการทดลองของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (Coagulation and Flocculation)

ตารางที่ ก-1 ผลของกราฟมาตรฐานความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของเบนโทไนท์ต่างๆ

ค่าความขุ่น (NTU)	ตัวอย่างที่	น้ำหนักของเบนโทไนท์ (g/L)	ปริมาณของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย (mg/L)
1	1	0.0075	16
	2	0.0086	
	3	0.0078	
10	1	0.0722	59
	2	0.0702	
	3	0.0715	
20	1	0.1483	125
	2	0.1427	
	3	0.1362	
50	1	0.3979	345
	2	0.3976	
	3	0.395	
100	1	0.6715	581
	2	0.6606	
	3	0.6626	
200	1	1.4383	1118
	2	1.3771	
	3	1.3002	
250	1	1.6214	1352
	2	1.6127	
	3	1.6106	



ภาพที่ ก-1 กราฟมาตรฐานความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์กับปริมาณของแข็งแขวนลอย

ภาคผนวก ก-2 ผลการศึกษาลักษณะของน้ำดิบด้วยวิธีการการตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling test)

ตารางที่ ก-2.1 ผลการทดลองการตกตะกอนแบบโดดของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู

ระยะเวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)		C/C ₀			ประสิทธิภาพ การกำจัด (ร้อยละ)
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 1	จุดที่ 2	ค่าเฉลี่ย	
0	21.3	20.3	1.00	1.00	1.0	0.00
1	21.0	20.1	0.99	0.99	0.99	1.20
3	21.1	19.9	0.99	0.98	0.99	1.45
4	21.0	19.6	0.99	0.97	0.98	2.43
6	20.8	19.6	0.98	0.97	0.97	2.90
9	20.7	19.4	0.97	0.96	0.96	3.63
10	20.4	19.2	0.96	0.95	0.95	4.82
12	20.3	19.0	0.94	0.94	0.94	6.02
15	20.4	19.4	0.93	0.96	0.94	5.74
18	20.1	19.2	0.93	0.95	0.94	6.23
20	19.8	19.0	0.93	0.94	0.93	6.72
21	19.8	18.7	0.93	0.92	0.93	7.46
24	19.5	18.8	0.92	0.93	0.92	7.92
25	19.5	18.8	0.92	0.93	0.92	7.92
27	19.6	18.5	0.88	0.91	0.89	10.54
30	19.2	18.4	0.86	0.91	0.88	11.72
35	18.7	18.7	0.85	0.92	0.89	11.22
40	18.3	18.6	0.86	0.92	0.89	11.23
45	18.2	18.2	0.85	0.90	0.88	12.45
50	17.6	18.3	0.83	0.90	0.86	13.61
55	17.5	18.4	0.82	0.91	0.86	13.60
60	17.3	18.4	0.81	0.91	0.86	14.07
65	17.0	18.0	0.80	0.89	0.84	15.76
70	16.8	17.8	0.79	0.88	0.83	16.72
75	16.9	17.9	0.79	0.88	0.84	16.24
80	16.5	17.7	0.77	0.87	0.82	17.67
85	16.3	17.9	0.77	0.88	0.82	17.65
90	16.0	17.8	0.75	0.88	0.81	18.60

หมายเหตุ – จุดที่ 1 คือ จุดเก็บน้ำจากคอลัมน์ที่ความลึกจากระดับน้ำ 60 เซนติเมตร

– จุดที่ 2 คือ จุดเก็บน้ำจากคอลัมน์ที่ความลึกจากระดับน้ำ 120 เซนติเมตร

ตารางที่ ก-2.2 ผลการทดลองการตกตะกอนแบบโคตของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู

ระยะเวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)		C/C ₀			ประสิทธิภาพ การกำจัด (ร้อยละ)
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 1	จุดที่ 2	ค่าเฉลี่ย	
0	47.4	45.6	1.00	1.00	1.0	0.00
1	44.1	45.1	0.93	0.99	0.96	4.03
3	43.5	43.8	0.92	0.96	0.94	6.09
4	42.9	43.7	0.91	0.96	0.93	6.83
6	42.4	43.1	0.89	0.95	0.92	8.02
9	42.3	41.5	0.89	0.91	0.90	9.88
10	42.1	41.2	0.89	0.90	0.90	10.42
12	40.9	40.8	0.86	0.89	0.88	12.12
15	40.3	40.2	0.85	0.88	0.87	13.41
18	40.0	40.1	0.84	0.88	0.86	13.84
20	39.5	40.0	0.83	0.88	0.86	14.47
21	39.4	39.6	0.83	0.87	0.85	15.02
24	39.0	39.5	0.82	0.87	0.84	15.55
25	38.9	39.4	0.82	0.86	0.84	15.76
27	37.9	39.1	0.80	0.86	0.83	17.15
30	37.3	39.0	0.79	0.86	0.82	17.89
35	37.1	38.9	0.78	0.85	0.82	18.21
40	37.0	38.2	0.78	0.84	0.81	19.08
45	36.8	38.1	0.78	0.84	0.81	19.41
50	36.7	38.0	0.77	0.83	0.80	19.62
55	36.6	37.2	0.77	0.82	0.79	20.60
60	36.6	37.0	0.77	0.81	0.79	20.82
65	36.0	36.9	0.76	0.81	0.78	21.56
70	35.5	36.6	0.75	0.80	0.78	22.42
75	35.0	36.3	0.74	0.80	0.77	23.28
80	34.9	35.8	0.74	0.79	0.76	23.93
85	34.7	35.5	0.73	0.78	0.76	24.47
90	34.5	35.3	0.73	0.77	0.75	24.90

หมายเหตุ - จุดที่ 1 คือ จุดเก็บน้ำจากคอลัมน์ที่ความลึกจากระดับน้ำ 60 เซนติเมตร

- จุดที่ 2 คือ จุดเก็บน้ำจากคอลัมน์ที่ความลึกจากระดับน้ำ 120 เซนติเมตร

ตารางที่ ก-2.3 ผลการทดลองการตกตะกอนแบบโดดของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความขุ่นเริ่มต้น 200 เอ็นทียู

ระยะเวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)		C/C ₀			ประสิทธิภาพ การกำจัด (ร้อยละ)
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 1	จุดที่ 2	ค่าเฉลี่ย	
0	202	195	1.00	1.00	1.0	0.00
1	202	195	1.00	1.00	1.00	0.00
3	195	188	0.97	0.96	0.96	3.53
4	190	185	0.94	0.95	0.94	5.53
6	189	183	0.94	0.94	0.94	6.29
9	187	180	0.93	0.92	0.92	7.56
10	185	179	0.92	0.92	0.92	8.31
12	183	175	0.91	0.90	0.90	9.83
15	181	175	0.90	0.90	0.90	10.33
18	179	174	0.89	0.89	0.89	11.08
20	178	173	0.88	0.89	0.88	11.58
21	176	169	0.87	0.87	0.87	13.10
24	173	166	0.86	0.85	0.85	14.61
25	165	165	0.82	0.85	0.83	16.85
27	161	162	0.80	0.83	0.81	18.61
30	160	160	0.79	0.82	0.81	19.37
35	158	156	0.78	0.80	0.79	20.89
40	155	155	0.77	0.79	0.78	21.89
45	150	153	0.74	0.78	0.76	23.64
50	148	151	0.73	0.77	0.75	24.65
55	145	148	0.72	0.76	0.74	26.16
60	143	147	0.71	0.75	0.73	26.91
65	140	146	0.69	0.75	0.72	27.91
70	139	145	0.69	0.74	0.72	28.41
75	137	143	0.68	0.73	0.71	29.42
80	135	140	0.67	0.72	0.69	30.69
85	133	138	0.66	0.71	0.68	31.69
90	130	137	0.64	0.70	0.67	32.69

หมายเหตุ - จุดที่ 1 คือ จุดเก็บน้ำจากคอลัมน์ที่ความลึกจากระดับน้ำ 60 เซนติเมตร

- จุดที่ 2 คือ จุดเก็บน้ำจากคอลัมน์ที่ความลึกจากระดับน้ำ 120 เซนติเมตร

ตารางที่ ก-2.4 ผลการทดลองการตกตะกอนแบบโตะของน้ำดิบจริงที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู

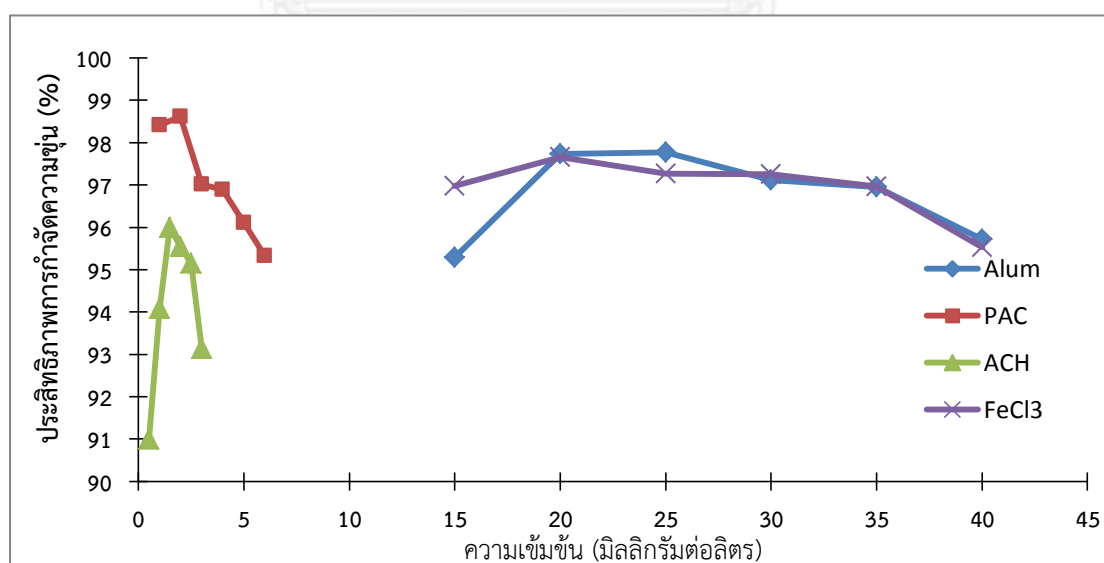
ระยะเวลา (นาที)	ความขุ่น (NTU)		C/C ₀			ประสิทธิภาพ การกำจัด (ร้อยละ)
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 1	จุดที่ 2	ค่าเฉลี่ย	
0	20.0	19.8	1.00	1.00	1.0	0.00
1	20.0	19.8	1.00	1.00	1.00	0.00
3	19.8	19.8	0.99	1.00	1.00	0.50
4	19.6	19.7	0.98	0.99	0.99	1.25
6	19.4	19.7	0.97	0.99	0.98	1.75
9	19.4	19.5	0.97	0.98	0.98	2.26
10	19.4	19.3	0.97	0.97	0.97	2.76
12	19.3	19.2	0.97	0.97	0.97	3.27
15	19.2	19.1	0.96	0.96	0.96	3.77
18	19.1	19.0	0.96	0.96	0.96	4.27
20	19.0	19.0	0.95	0.96	0.95	4.52
21	18.7	19.0	0.94	0.96	0.95	5.27
24	18.6	18.8	0.93	0.95	0.94	6.03
25	18.5	18.7	0.93	0.94	0.93	6.53
27	18.5	18.7	0.93	0.94	0.93	6.53
30	18.5	18.7	0.93	0.94	0.93	6.53
35	18.4	18.7	0.92	0.94	0.93	6.78
40	18.4	18.6	0.92	0.94	0.93	7.03
45	18.3	18.6	0.92	0.94	0.93	7.28
50	18.3	18.5	0.92	0.93	0.92	7.53
55	18.1	18.3	0.91	0.92	0.91	8.54
60	18.1	18.3	0.91	0.92	0.91	8.54
65	18.0	18.3	0.90	0.92	0.91	8.79
70	17.8	18.0	0.89	0.91	0.90	10.05
75	17.8	18.0	0.89	0.91	0.90	10.05
80	17.7	17.9	0.89	0.90	0.89	10.55
85	17.6	17.9	0.88	0.90	0.89	10.80
90	17.5	18.0	0.88	0.91	0.89	10.80

หมายเหตุ - จุดที่ 1 คือ จุดเก็บน้ำจากคอลัมน์ที่ความลึกจากระดับน้ำ 60 เซนติเมตร
 - จุดที่ 2 คือ จุดเก็บน้ำจากคอลัมน์ที่ความลึกจากระดับน้ำ 120 เซนติเมตร

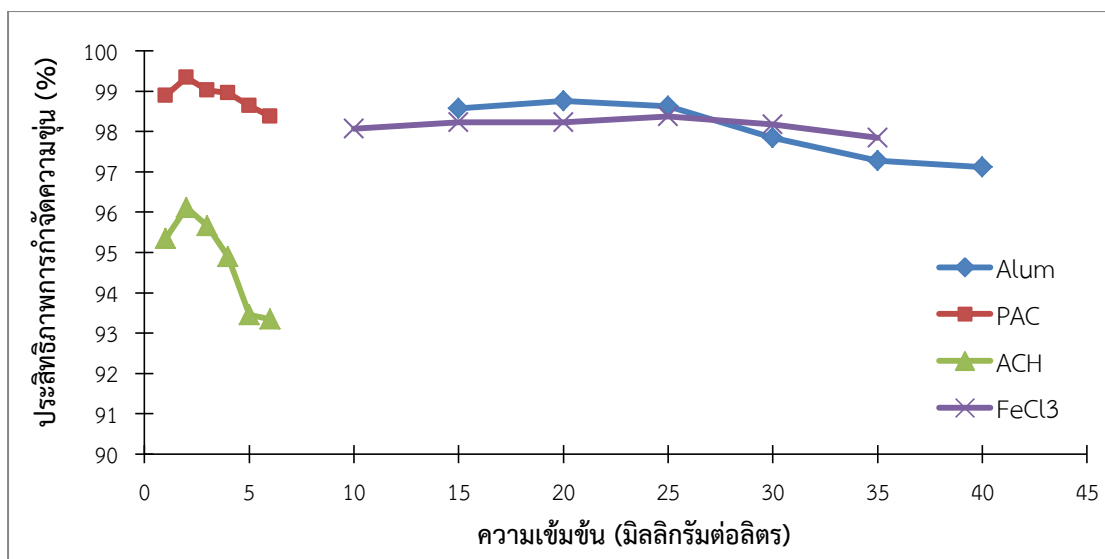
ภาคผนวก ก-4 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมต่อน้ำดิบสังเคราะห์โดยวิธีจาร์เทส

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองกำจัดความขุ่นด้วยสารโคแอกกูแลนต์ชนิดต่างๆ โดยวิธีจาร์เทส

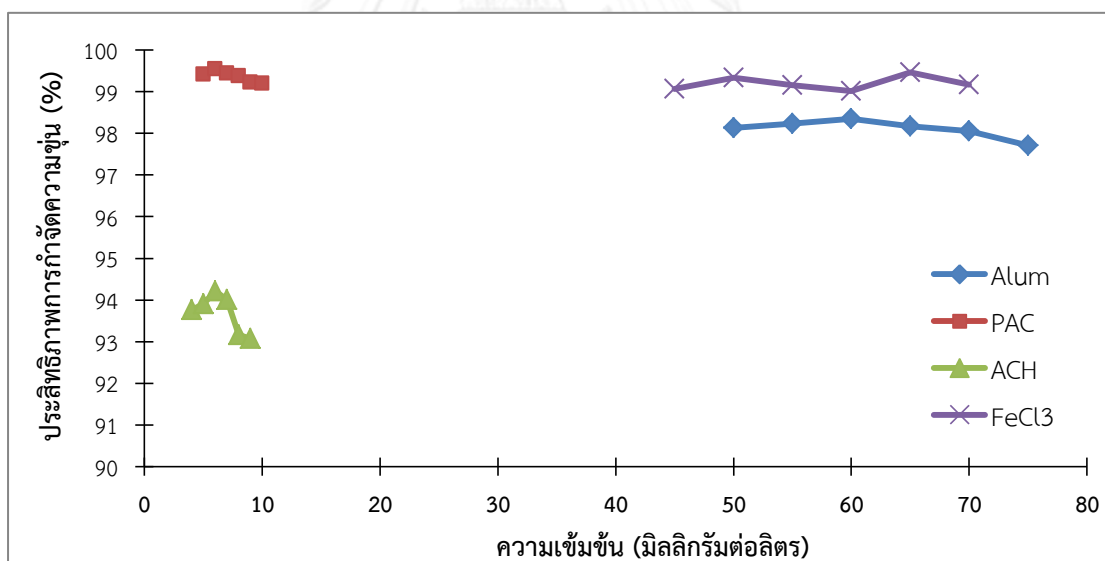
ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (ร้อยละ)	ความเข้มข้นที่เหมาะสม (mg/L)	ค่าพีเอช	
				เริ่มต้น	สุดท้าย
20	สารส้มน้ำ	97.78	25	7.23	7.21
	เพอร์ริคคลอไรด์	97.66	20	7.14	7.12
	โพลลิอูมิเนียมคลอไรด์	98.61	2	7.11	6.90
	อลูมิเนียมคลอไรด์ไฮเดรต	95.99	1.5	7.13	7.13
50	สารส้มน้ำ	98.76	20	7.28	7.17
	เพอร์ริคคลอไรด์	98.23	20	7.42	7.23
	โพลลิอูมิเนียมคลอไรด์	99.34	2	7.35	7.32
	อลูมิเนียมคลอไรด์ไฮเดรต	96.12	2	7.23	7.14
200	สารส้มน้ำ	98.34	60	7.22	7.03
	เพอร์ริคคลอไรด์	99.46	65	7.18	6.55
	โพลลิอูมิเนียมคลอไรด์	99.54	6	7.27	7.23
	อลูมิเนียมคลอไรด์ไฮเดรต	94.21	6	7.22	7.21



ภาพที่ ก-4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ค่าความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียูด้วยสารโคแอกกูแลนต์ชนิดต่างๆ โดยวิธีจาร์เทส



ภาพที่ ก-4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ค่าความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ด้วยสารโคแอกกูแลนซ์ชนิดต่างๆ โดยวิธีจาร์เทส

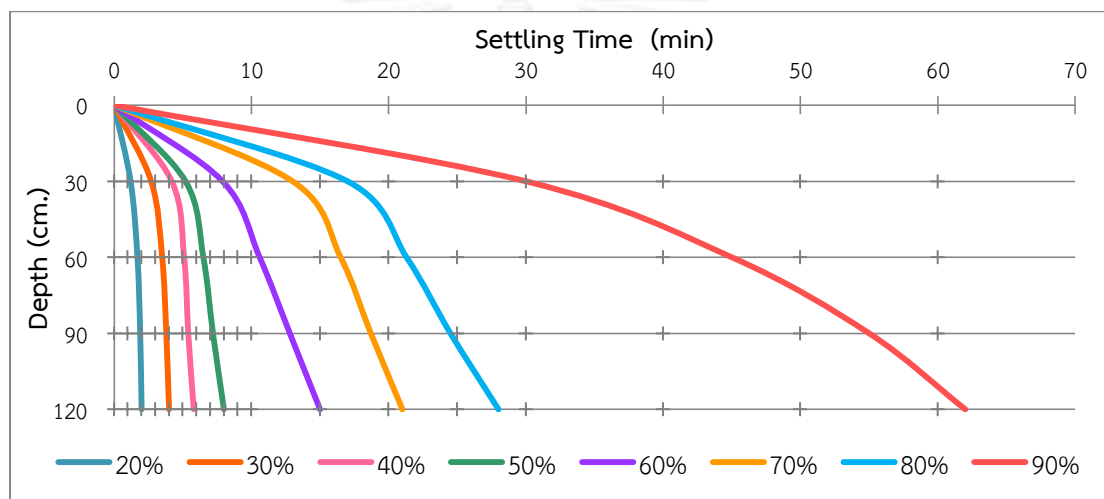


ภาพที่ ก-4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ค่าความขุ่นเริ่มต้น 200 เอ็นทียู ด้วยสารโคแอกกูแลนซ์ชนิดต่างๆ โดยวิธีจาร์เทส

ภาคผนวก ก-5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอน (Flocculent Settling Test) ของฟล็อกที่
เกิดจากปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมของแต่ละชนิด

ตารางที่ ก-5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารสัมน้ำที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์
20 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

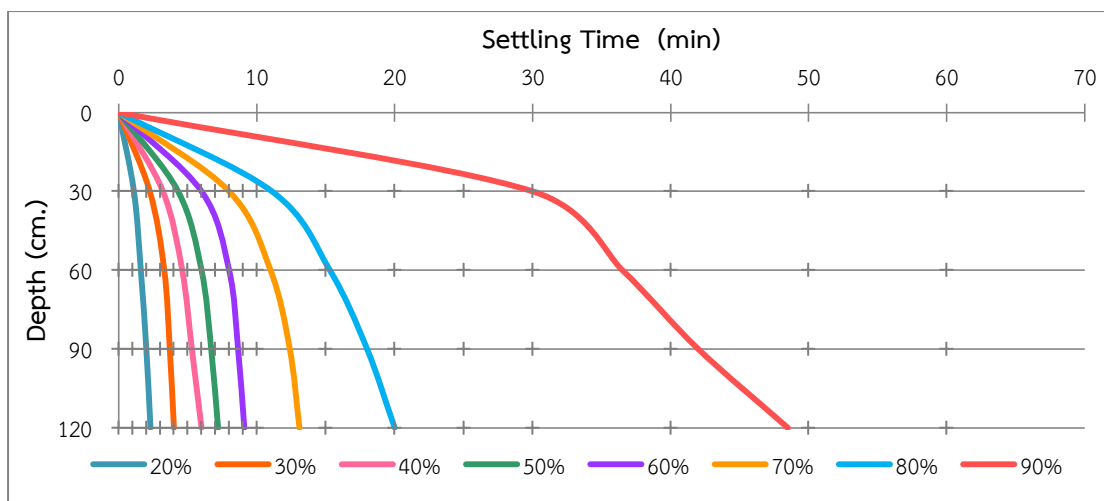
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	18	24	28	38	43	58	58	60	61	66	74	88	89	90	93	94	94	96	96
60	0	21	24	25	39	45	46	54	56	58	64	69	84	87	88	89	91	92	93	93
90	0	20	22	24	36	38	43	50	57	57	65	68	79	81	88	89	90	91	92	93
120	0	7	20	21	30	34	41	44	49	55	57	59	68	73	85	89	89	90	91	92



ภาพที่ ก-5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารสัมน้ำที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์
20 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ก-5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารสัมน้ำที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์
50 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

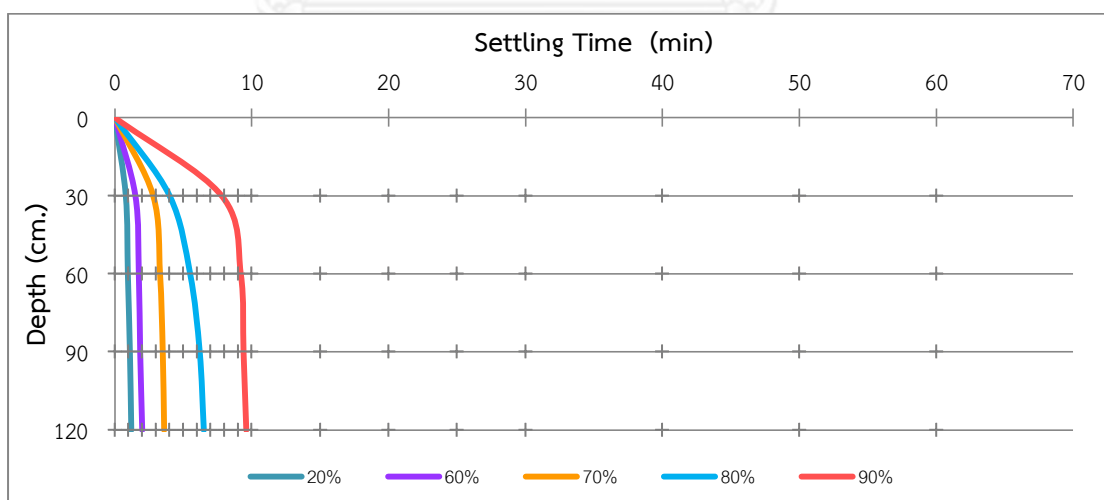
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	23	29	39	49	55	60	68	73	76	78	84	86	89	90	92	94	94	95	95
60	0	18	25	28	33	38	46	52	60	63	65	79	85	88	89	93	94	94	97	97
90	0	14	18	29	31	45	52	54	63	66	67	83	89	86	89	90	94	94	94	94
120	0	6	17	25	31	33	39	55	61	61	68	78	79	85	87	88	91	92	95	96



ภาพที่ ก-5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารสัมน้ำที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ก-5.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารสัมน้ำที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 200 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

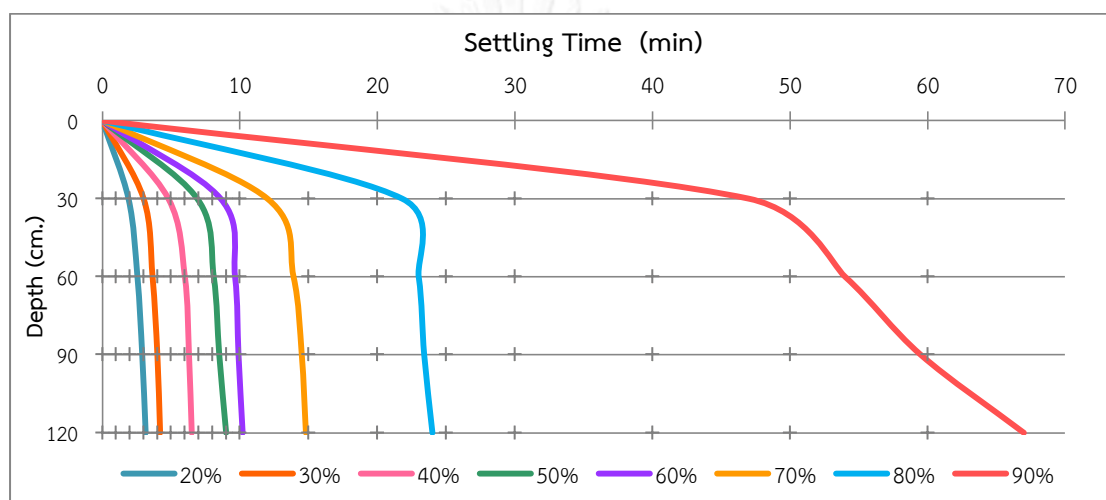
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	23	68	74	81	83	92	90	91	91	91	95	96	97	97	98	98	99	99	99
60	0	24	68	74	77	79	84	90	90	91	91	94	96	96	97	97	98	98	98	98
90	0	24	68	74	77	79	84	90	90	91	91	94	96	96	97	98	98	98	98	99
120	0	26	66	73	73	74	79	81	85	90	91	94	96	96	98	98	98	98	98	99



ภาพที่ ก-5.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารสัมน้ำที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 200 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ก-5.4 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของเฟอร์ริคคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

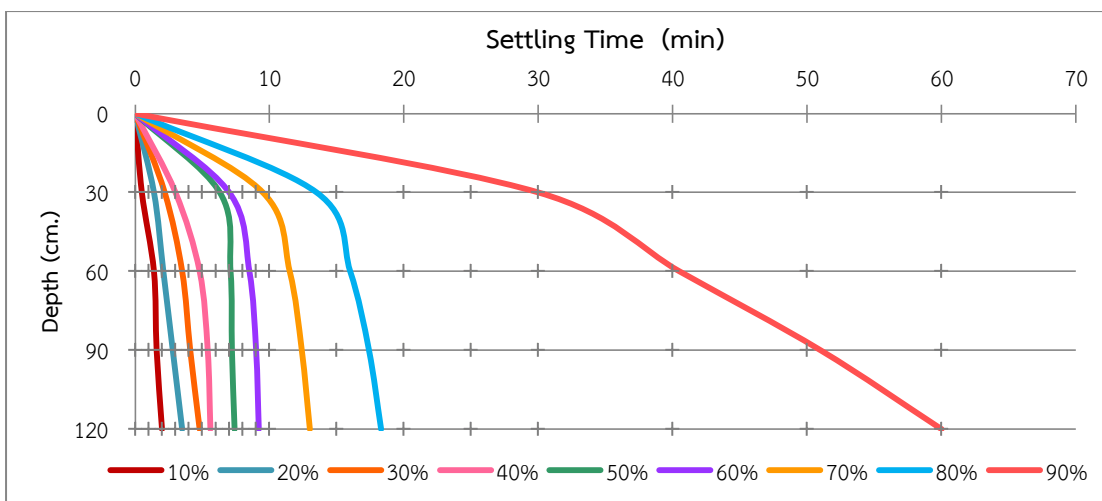
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	11	22	29	36	42	46	51	53	64	67	76	78	78	86	88	93	95	97	97
60	0	5	17	27	34	35	37	48	51	59	65	74	77	83	86	88	89	93	94	94
90	0	8	18	16	31	36	41	47	56	61	67	75	77	85	87	88	91	92	94	95
120	0	9	16	18	29	31	36	42	46	50	59	70	80	83	84	85	89	88	91	91



ภาพที่ ก-5.4 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของเฟอร์ริคคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ก-5.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของเฟอร์ริคคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

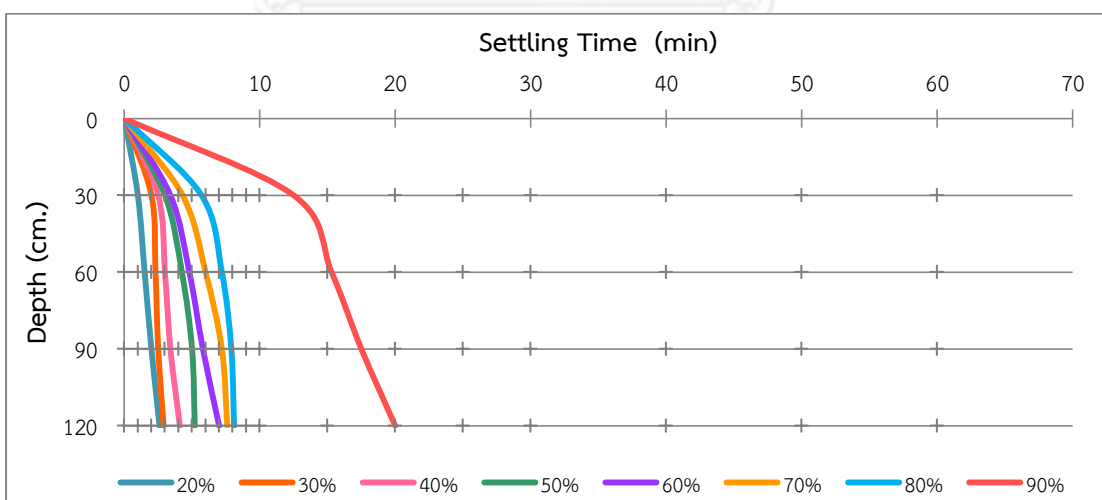
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	23	27	40	43	47	46	60	63	67	73	81	85	88	90	91	93	95	95	97
60	0	4	21	28	35	42	43	53	55	66	70	82	87	88	88	91	92	94	94	95
90	0	5	7	26	37	44	47	52	57	60	66	81	82	85	89	88	89	92	92	92
120	0	8	14	19	22	32	49	51	56	62	68	76	82	85	88	89	90	91	92	93



ภาพที่ ก-5.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของเฟอร์ริคคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ก-5.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของเฟอร์ริคคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 200 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

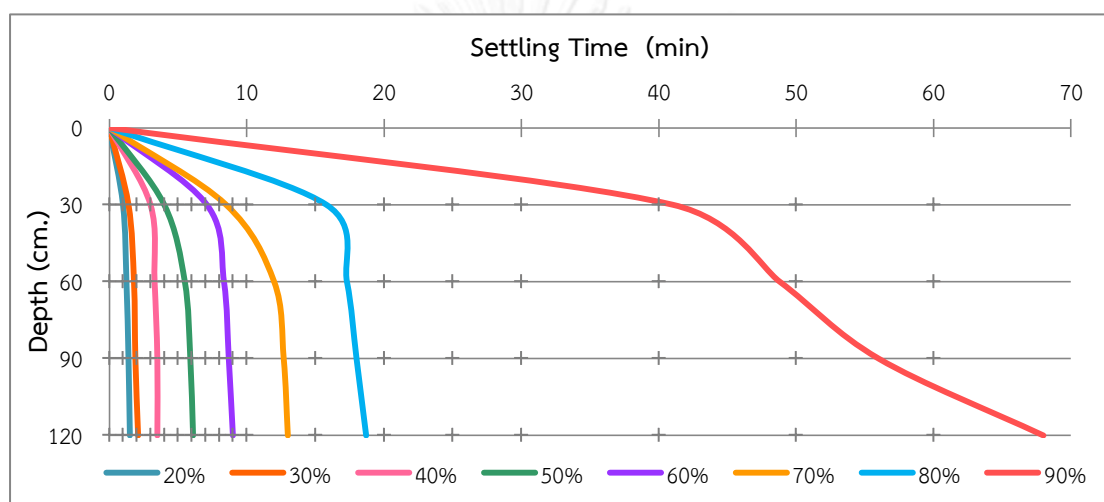
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	17	26	49	65	75	82	85	87	88	89	91	94	96	97	97	98	98	98	99
60	0	22	32	41	48	69	72	82	88	89	90	90	92	96	96	97	97	98	98	98
90	0	2	23	37	45	49	62	65	82	87	88	89	91	96	97	96	97	98	98	98
120	0	7	8	31	36	48	59	60	80	86	89	88	90	96	97	97	97	97	98	98



ภาพที่ ก-5.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของเฟอร์ริคคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 200 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ก-5.7 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

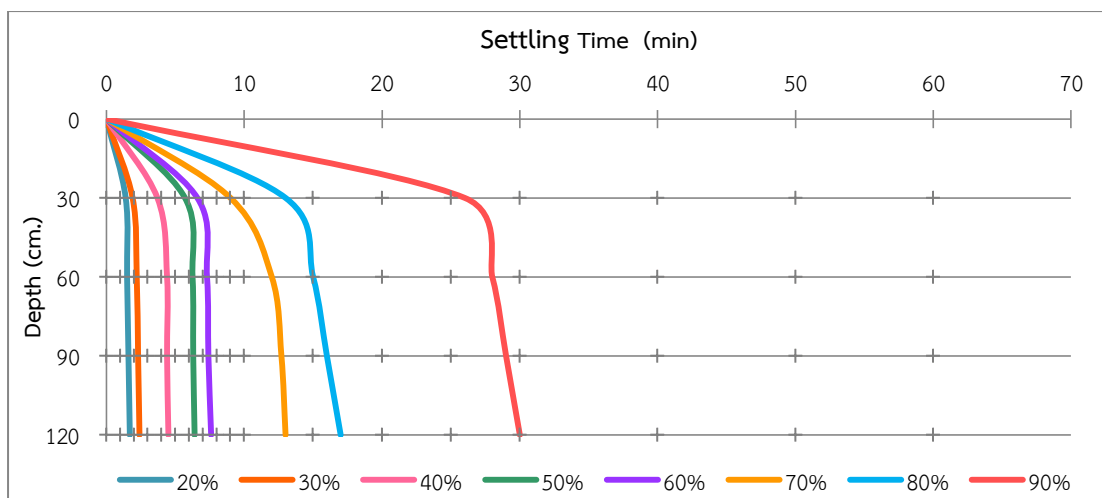
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	18	36	40	50	51	53	59	70	71	72	79	85	85	86	88	91	91	93	96
60	0	18	34	42	47	45	52	54	58	62	69	79	85	85	87	88	91	92	92	94
90	0	19	33	35	46	48	52	56	58	61	69	79	82	87	88	88	90	91	92	94
120	0	17	35	40	47	50	52	56	59	60	66	77	83	85	86	86	88	89	91	94



ภาพที่ ก-5.7 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ก-5.8 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

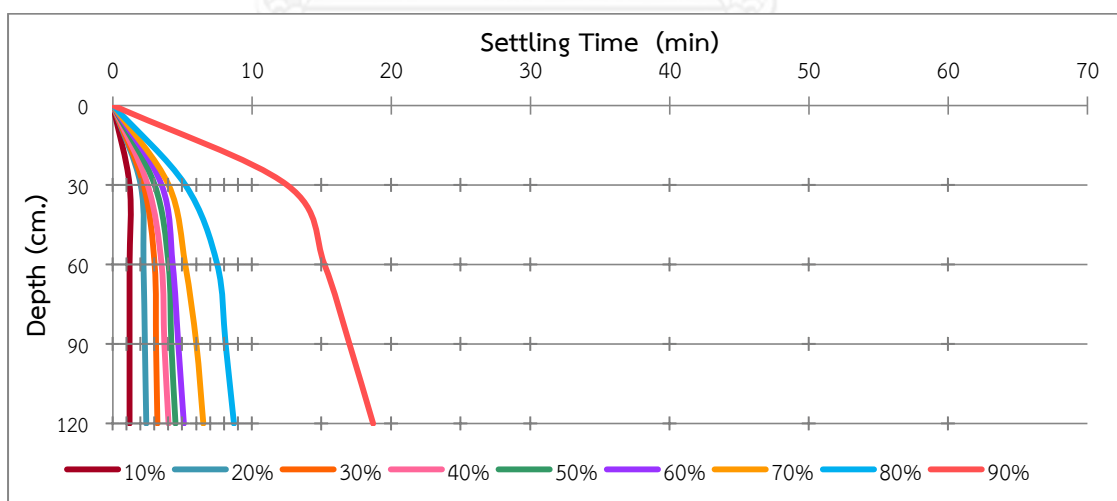
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	14	31	32	40	46	48	59	64	70	73	82	87	88	91	92	92	94	95	96
60	0	14	38	51	34	37	51	62	64	66	69	81	88	89	92	92	93	93	94	95
90	0	12	31	39	44	47	54	61	65	68	73	84	89	92	92	93	94	94	94	96
120	0	19	25	33	38	49	52	58	61	67	68	73	83	86	92	92	93	94	94	95



ภาพที่ ก-5.8 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ก-5.9 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 200 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

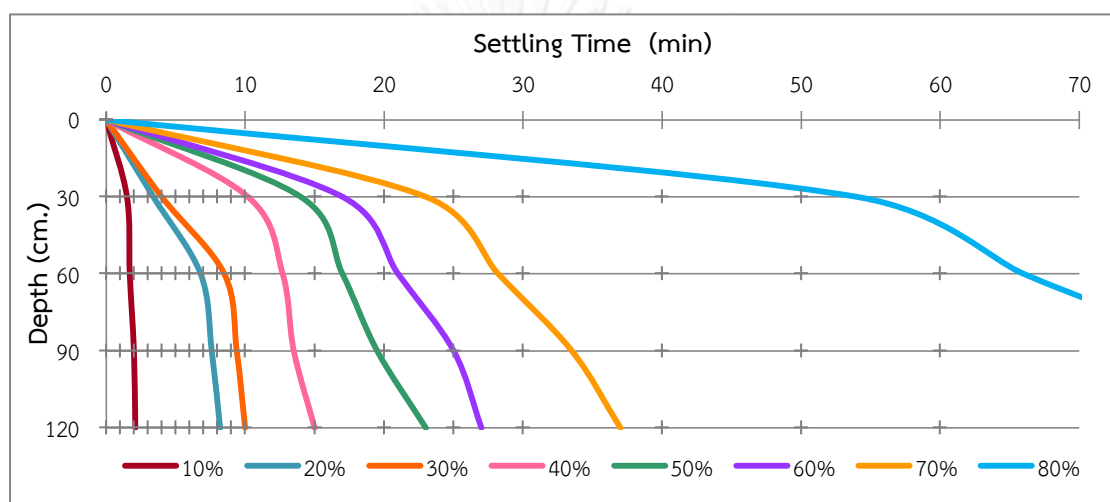
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	4	20	51	72	79	83	64	79	81	89	93	95	95	95	97	97	97	98	98
60	0	9	19	35	47	73	73	79	81	83	89	93	94	95	96	96	97	97	97	98
90	0	8	18	28	35	67	69	74	78	80	86	88	92	93	94	95	97	97	97	98
120	0	10	13	27	40	63	66	75	79	82	87	89	92	93	94	94	96	97	98	98



ภาพที่ ก-5.9 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 200 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ก-5.10 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของอลูมิเนียมคลอไรด์เรตที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

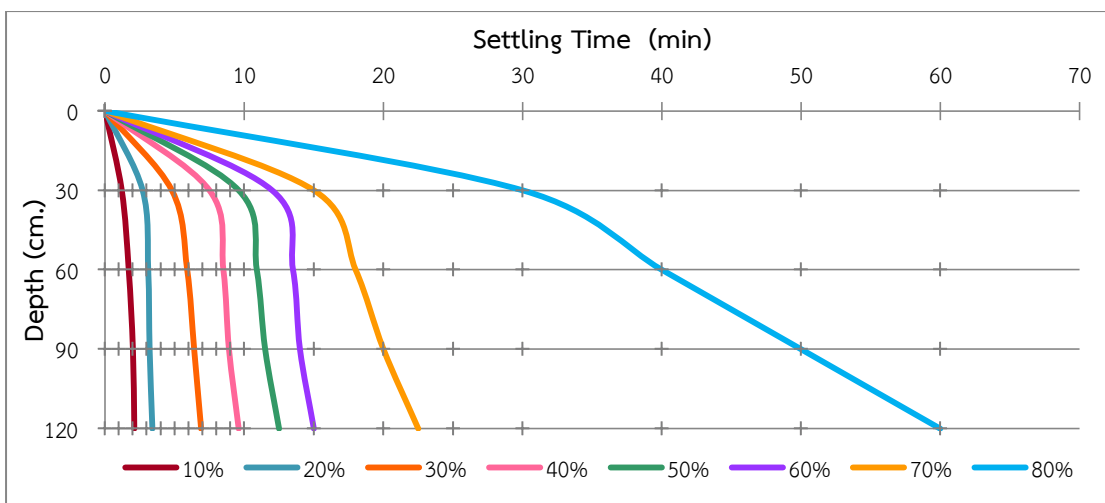
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	6	16	19	31	34	35	35	36	38	49	64	70	76	76	79	82	84	87	88
60	0	3	11	13	14	16	17	20	22	24	33	51	62	70	74	75	76	79	82	82
90	0	4	8	13	15	17	19	23	27	30	32	45	56	57	63	71	73	75	76	78
120	0	4	10	11	13	14	14	18	19	29	31	41	45	51	62	71	74	76	77	78



ภาพที่ ก-5.10 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของอลูมิเนียมคลอไรด์เรตที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ก-5.11 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของอลูมิเนียมคลอไรด์เรตที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

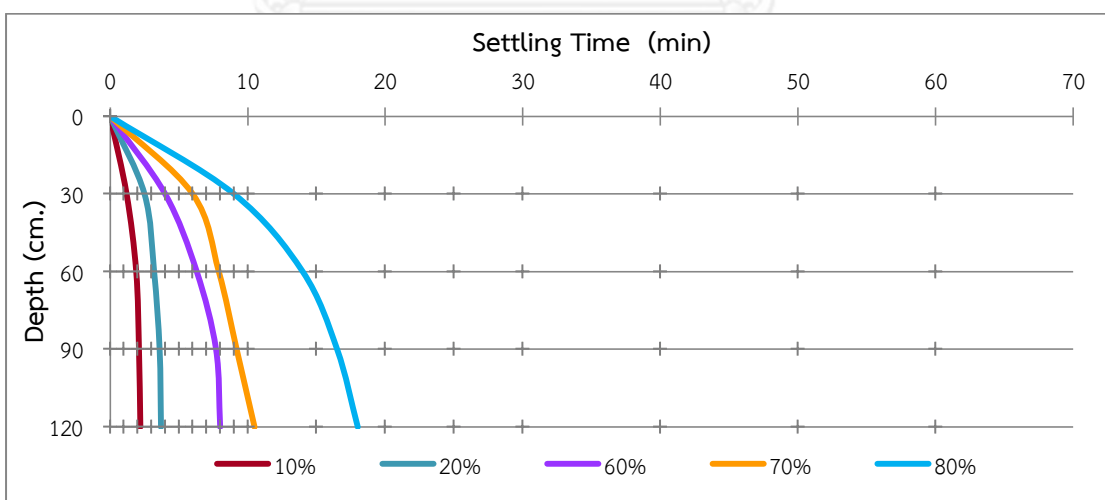
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	4	14	23	26	29	37	38	42	48	52	70	75	78	80	82	85	87	88	88
60	0	3	11	20	23	25	33	36	41	48	51	68	73	78	80	82	86	88	90	91
90	0	2	13	21	26	28	29	34	41	43	44	65	70	73	75	77	78	81	86	87
120	0	3	8	18	23	25	27	30	34	38	41	60	63	69	72	76	78	82	85	89



ภาพที่ ก-5.11 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของอลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ก-5.12 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของอลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 200 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	12	14	28	60	71	70	73	77	82	84	89	91	92	93	95	96	96	96	97
60	0	3	7	24	35	40	62	64	76	78	79	80	88	90	90	93	94	95	96	96
90	0	4	8	13	20	26	26	32	61	71	75	79	84	86	87	89	93	93	93	94
120	0	1	9	17	25	32	41	49	62	63	66	82	84	87	89	91	91	93	93	94



ภาพที่ ก-5.12 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของอลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 200 เอ็นทียู ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ภาคผนวก ข

เอกสารข้อมูลผลการทดลองของการใช้ถังตกตะกอนสามฝัสด
แบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข-1 การคำนวณปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบ (Qasim et al., 2000)

ข้อมูลทั่วไป

1. อัตราการไหล 70 ลิตร/ชั่วโมง
2. ระยะเวลาเดินระบบ 8 ชั่วโมง
3. ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ 50 เอ็นทียู
4. ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ สารส้มน้ำ
5. ปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม 20 มิลลิกรัม/ลิตร

วิธีการคำนวณ

1. ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากตะกอนของน้ำดิบ

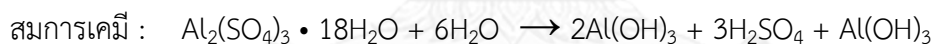
จากกฎของ thurmb อัตราส่วนของ TSS (mg/l) ต่อความขุ่น (NTU) (โดยปกติอยู่ในช่วง 0.5-2.0) กำหนดให้ค่าที่ใช้ในการคำนวณ คือ 2 TSS/NTU

$$Q_{\text{raw solid max}} = 50 \text{ NTU} \times 2 \frac{\text{mg.TSS}}{\text{NTU}} \times \frac{10^{-3} \text{ g}}{\text{mg}} \times 70 \frac{\text{L}}{\text{hr}} \times \frac{8 \text{ hr}}{\text{day}} = 56 \text{ g/day}$$

2. ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากสารโคแอกกูแลนต์

$$1 \text{ mole ของ } \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O} = 665.945 \text{ g}$$

$$1 \text{ mole ของ } \text{Al}(\text{OH})_3 = 155.959 \text{ g}$$



$$Q_{\text{coagulant}} = \frac{155.959 \text{ g/mole Al}(\text{OH})_3}{665.945 \text{ g/mole Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}} \times \frac{20 \text{ mg Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}}{\text{L}} \times \frac{70 \text{ L}}{\text{hr}} \times \frac{8 \text{ hr}}{\text{day}}$$

$$= 2,622.957 \text{ mg/day}$$

$$= 2.623 \text{ g/day}$$

3. เพราะฉะนั้นจะมีตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบ = 56 g/day + 2.623 g/day = 58.623 g/day
เนื่องจากความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพดิบน้ำปริมาณสารเคมีและปริมาณของน้ำที่เข้าระบบซึ่งจะทำให้ปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้นประมาณ 20 - 60 เปอร์เซ็นต์

ในการคำนวณครั้งนี้จึงกำหนดค่าไว้ที่ 50 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นปริมาณตะกอนที่จะเกิดขึ้นในระบบการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 87.394 g/day

4. ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบ โดยสมมติให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ 90%
เพราะฉะนั้นจะมีปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจริง = 79.141g/day × 0.9 = 68.598 g/day

5. ความถ่วงจำเพาะของตะกอนเปียก (wet sludge)

$$\frac{M_{ws}}{S_{g,ws}} = \frac{M_s}{S_{g,s}} + \frac{M_w}{S_{g,w}}$$

เมื่อ ; M_{ws} = mass of wet sludge, kg

$S_{g,ws}$ = specific gravity of wet sludge

M_s = mass of dry sludge, , kg

$S_{g,s}$ = specific gravity of sludge solids

M_w = mass of water, kg

$S_{g,w}$ = specific gravity of water

ปริมาณของแข็งของ Reiduals Coagulation มีค่าประมาณร้อยละ 0.1 - 4 โดยน้ำหนัก (w/w) โดยที่ความเข้มข้นของตะกอนกันถึงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2% ที่คาดว่าจะตกตะกอนในกันถึงตกตะกอนนี้ ดังนั้นจึงสมมติว่าความถ่วงจำเพาะของตะกอนแห้ง (Dry Solid) และน้ำคือ 2.4 และ 1 ตามลำดับ สำหรับ 1 กิโลกรัมของมวลตะกอนเปียก (Wet Sludge) จะเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ดังนั้นจึงสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\frac{1\text{kg}}{S_{g,ws}} = \frac{0.02\text{kg}}{2.4} + \frac{0.98\text{kg}}{1}$$

$$S_{g,ws} = 1.0118$$

6. ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น

$$V_{ws} = \frac{79.141 \frac{\text{g}}{\text{day}} \times \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}}}{0.02 \frac{\text{g}}{\text{g}} \times 1011.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 3.911 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{day}} = 3.911 \frac{\text{L}}{\text{day}}$$

ภาคผนวก ข-2 การคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ ระยะเวลากัก และตัวแปร $G \cdot t$

ภาคผนวก ข-2.1 การคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ ระยะเวลากัก และตัวแปร $G \cdot t$ ของการทำจาร์เทส

ตารางที่ ข-2.1 ตารางแสดงผลการคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ ระยะเวลากัก และตัวแปร $G \cdot t$ ของการทำจาร์เทส

กระบวนการการกวนเร็ว (Coagulation)			กระบวนการการกวนช้า (Flocculation)		
$G_{\text{rapid}} (S^{-1})$	$t_{\text{rapid}} (S)$	$(G \cdot t)_{\text{rapid}}$	$G_{\text{slow}} (S^{-1})$	$t_{\text{slow}} (S)$	$(G \cdot t)_{\text{slow}}$
403.978	60	24,238	13.08	1,200	15,696

วิธีการคำนวณค่า G (Hughes, 2000; Reynolds & Richards, 1996; Rushton, 1952)

ความเร็วเกรเดียนท์สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

- G = ความเร็วเกรเดียนท์หรือระดับความปั่นป่วน (S^{-1})
 P = พลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน ($N \cdot m/s$)
 μ = ความหนืดของน้ำ ($N \cdot s/m^2$)
 V = ปริมาตรของน้ำในถังกวนเร็ว (m^3)

โดย P คือ พลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน ในกรณีของการทำจาร์เทสจะทำการกวนผสมด้วยใบพัด ดังนั้นกำลังที่ใช้ในการกวนผสม จึงสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ในกรณีที่รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน } P_{\text{turbulent}} = K_T N^3 D^5 \rho \text{ (N} \cdot \text{m/s)}$$

$$\text{ในกรณีที่รูปแบบการไหลแบบราบเรียบ } P_{\text{laminar}} = K_L N^2 D^3 \mu \text{ (N} \cdot \text{m/s)}$$

- K_T = ค่าคงที่ของใบพัดชนิด Flat paddle (two blade)
 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน = 1.7
 N = ความเร็วรอบในการกวนผสม (rpm)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (m)
 ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
 μ = ความหนืดของน้ำ (ที่ $25^\circ C = 0.913 \times 10^{-3} N \cdot sec/m^2$)
 K_L = ค่าคงที่ของใบพัดชนิด Flat paddle (two blade)
 สำหรับการไหลแบบราบเรียบ = 36.5

รายการคำนวณ

1. ค่า P ของรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน

$$\begin{aligned}
 P_{\text{turbulent}} &= K_T N^3 D^5 \rho \\
 &= 1.7 \times \left(\frac{200}{60} \right)^3 \times (0.075)^5 \times 997.1 \\
 &= 0.149 \text{ N}\cdot\text{m/s}
 \end{aligned}$$

2. ค่า G ของรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน

$$\begin{aligned}
 G &= \sqrt{\frac{p}{\mu v}} \\
 &= \sqrt{\frac{0.149}{(0.913 \times 10^{-3}) \times 10^{-3}}} \\
 &= 403.978 \text{ S}^{-1}
 \end{aligned}$$

3. ค่า P ของรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ

$$\begin{aligned}
 P_{\text{laminar}} &= K_L N^2 D^3 \mu \\
 &= 36.5 \times \left(\frac{60}{60} \right)^2 \times (0.075)^3 \times 0.913 \times 10^{-3} \\
 &= 1.562 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m/s}
 \end{aligned}$$

4. ค่า G ของรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ

$$\begin{aligned}
 G &= \sqrt{\frac{p}{\mu v}} \\
 &= \sqrt{\frac{1.562 \times 10^{-4}}{(0.913 \times 10^{-3}) \times 10^{-3}}} \\
 &= 13.08 \text{ S}^{-1}
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข-2.2 การคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ ระยะเวลาพัก และตัวแปร $G \cdot t$ ของถังตกตะกอน สัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)

ตารางที่ ข-2.2 ตารางแสดงผลการคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ ระยะเวลาพัก และตัวแปร $G \cdot t$ ของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)

Method	Liquid flow rate (L/hr)	Mechanism	G (s^{-1})	t (s)	(G•t)	θ_{sed}^a (hr)	θ_{Jet}^b (hr)
Design criteria*	-	coagulation	> 350	1 < t < 5	< 1700 ^c	1-3	-
	-	flocculation	< 5 ^d	1200-2400	10 ⁴ -10 ⁵		
Pilot plant	40	coagulation	243.76	3.31	807.68	4.66	5.49
		flocculation	0.562	3000	1686		
	50	coagulation	340.67	2.65	903.02	3.72	4.39
		flocculation	0.630	2400	1512		
	70	coagulation	564.32	1.89	1068.47	2.79	3.29
		flocculation	0.743	1800	1337.40		
	110	coagulation	1111.7	1.20	1339.4	1.86	2.19
		flocculation	0.931	1200	1117.20		
	180	coagulation	2327	0.74	1713.37	1.25	1.47
		flocculation	0.937	789.6	739.86		

หมายเหตุ - * อ้างอิงเกณฑ์การออกแบบจาก (Bouyer et al., 2005; Degremont, 1999; Hughes, 2000; Reynolds & Richards, 1996)

- a) หมายถึง ระยะเวลาพักในส่วนของถังตกตะกอน
- b) หมายถึง ระยะเวลาพักทั้งหมดของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนเจ็ทแคร์รีไฟเออร์
- c) หมายถึง เกณฑ์การออกแบบของ Static Mixer ประเภท Noritake
- d) หมายถึง เกณฑ์การออกแบบสำหรับถังตกตะกอนประเภท Fluidized Bed (Floc Blanket Clarifier)

ตัวอย่างการคำนวณที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง

1. ความเร็วเกรเดียนท์ในช่วงการกวนเร็ว (Coagulation) ซึ่งการทดลองนี้ใช้ Static Mixer สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (The designing of static mixer (noritake) in rapid mix for water treatment)

$$G_{\text{static mixer}} = \sqrt{\frac{h_f \times g \times \rho}{\mu \times t}}$$

- G = ความเร็วเกรเดียนท์หรือระดับความปั่นป่วน (S^{-1})
 h_f = ค่าความดันสูญเสีย (Head loss, m)

$$\begin{aligned} \rho &= \text{ความหนาแน่นของเหลว (kg/m}^3\text{)} \\ \mu &= \text{ความหนืดของน้ำ (N}\cdot\text{s/m}^2\text{)} \\ t &= \text{ระยะเวลาที่ (S)} \end{aligned}$$

วิธีการคำนวณค่า G

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Static Mixer = 12.5 mm
- ความยาวของ Static Mixer = 0.3 m
- อัตราการไหลที่ใช้ทดลอง = 70 L/hr = 0.07 m³/hr = 1.94 × 10⁻⁵ m³/s

$$\begin{aligned} \text{- Acture Velocity} &= \frac{Q}{A} = \frac{1.94 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{\pi}{4} \left(12.5 \text{mm} \times \frac{1 \text{m}}{1000 \text{mm}}\right)^2} \\ &= 0.158 \text{ m/s} \\ &= 15.8447 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- Check Renolds Number (Re)} &= \frac{D_p \rho V}{\mu} \\ &= \frac{12.5 \text{mm} \times \frac{1 \text{m}}{1000 \text{mm}} \times 997.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.158 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.000895 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}} \\ &= 2206.538 \rightarrow \text{Turbulent Flow find } f_{\text{NSM}} \end{aligned}$$

- Number of Element = 6
- Check f_{NSM} from Graph = 1.2

$$\text{- Detention time (t)} = \frac{\text{Static mixer length (m)}}{V \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = \frac{0.3 \text{m}}{0.158 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1.893 \text{ s}$$

$$\text{- } h_f = \Delta P = 3.061 \times 10^{-6} \times f_{\text{NSM}} \times \rho \times V^2 \times \text{Number of Element}$$

$$\begin{aligned} \text{where ; } \Delta P &= \text{Pressure drop (kg/cm}^2\text{)} \\ f_{\text{NSM}} &= \text{Friction Coefficient of static mixer} \end{aligned}$$

V = water velocity (cm/s)

ρ = density of water (g/cm²)

แทนค่า

$$\begin{aligned}\therefore \Delta P &= 3.061 \times 10^{-6} \times 1.2 \times 0.9971 \frac{\text{g}}{\text{cm}} \times (15.844 \frac{\text{cm}}{\text{s}})^2 \times 6 \\ &= 5.517 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

โดยที่ $1 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ bar} = 10 \text{ m (head water)}$

$$\therefore h_f = 0.0517 \text{ m}$$

แทนค่าเพื่อคำนวณค่า G จากสมการ

$$\begin{aligned}G_{\text{static mixer}} &= \sqrt{\frac{h_f \times g \times \rho}{\mu \times t}} \\ &= \sqrt{\frac{0.05517 \text{ m} \times 9.81 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 997.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.000895 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \times 1.893 \text{ s}}} \\ &= 564.3226 \text{ s}^{-1}\end{aligned}$$

$$\therefore G \cdot t = 564.3226 \times 1.893 = 1068.427$$

2. ความเร็วเกรเดียนท์ในช่วงการกวนช้า (Flocculation) ภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียน ตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ซึ่งเป็นพลังงานไฮดรอลิก (Hydraulic) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (Hughes, 2000)

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} = \sqrt{\frac{g(\rho_s - \rho) C V}{\mu}}$$

ρ_s = Particle or floc density (kg/m³)

ρ = Liquid density (kg/m³)

C = Floc volume concentration (1.0 – 2.0)

μ = Dynamic viscosity of liquid (kg/m·s)

V = Velocity of liquid being stirred, or flowing in flocculator (m/s)

คำนวณ U

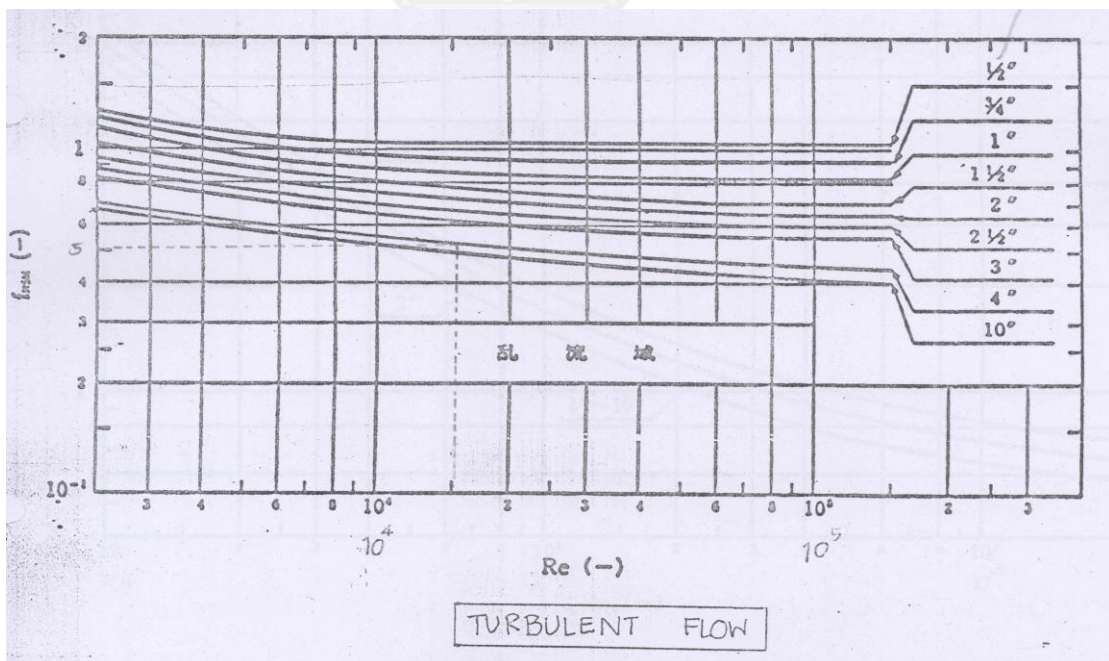
$$\begin{aligned}
 U = \text{Surface Loading Rate} &= \frac{Q}{A} = \frac{70\text{L}}{\text{hr}} \times \frac{1}{0.25918\text{m}^2} \\
 &= \frac{0.07\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1}{0.25918\text{m}^2} \times \frac{1\text{hr}}{60\text{min}} \times \frac{1\text{min}}{60\text{sec}} \\
 &= 7.502 \times 10^{-5} \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

$$\therefore G = \sqrt{\frac{g(\rho_s - \rho)CU}{\mu}} = \sqrt{\frac{9.81 \times (1005 - 1000) \times 0.15 \times 7.502 \times 10^{-5}}{10^{-3}}}$$

$$= 0.743$$

$$\therefore G \cdot t = 0.743 \times (1800) = 1337.4$$

ภาพที่ ข-2.2 กราฟสำหรับการหาค่า f_{NSM}



ภาคผนวก ข-3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)

ตารางที่ ข-3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู และความสูงของชั้นตะกอน 10 เซนติเมตร

สภาวะการเดินระบบ					ความขุ่นสุดท้าย (เอ็นทียู)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (%)
Δh (ซม.)	ΔH (ซม.)	Settling Tubes	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	เวลากักน้ำ (นาที)		
3	30	-	40	330	14.6	70.80
		-	70	197	15.3	69.40
		-	180	88	26.1	47.80
6	30	-	40	330	15.2	69.60
		-	50	263	15.1	69.80
		-	70	197	16.0	68.00
		-	110	132	21.4	57.20
		-	180	88	28.5	43.00
9	30	-	40	330	14.6	70.80
		-	70	197	17.3	65.40
		-	180	88	30.1	39.80

หมายเหตุ - Δh หมายถึง ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน

- ΔH หมายถึง ระยะช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง

ตารางที่ ข-3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู และความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร

สภาวะการเดินระบบ					ความขุ่นสุดท้าย (เอ็นทียู)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (%)
Δh (ซม.)	ΔH (ซม.)	Settling Tubes	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	เวลากักน้ำ (นาที)		
3	30	-	40	330	10.11	79.78
		-	50	263	11.3	77.40
		-	70	197	12.5	75.00
		-	110	132	16.7	66.60
		-	180	88	23.1	53.80

ตารางที่ ข-3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู และความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร (ต่อ)

สภาวะการเดินระบบ					ความขุ่นสุดท้าย (เอ็นทียู)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (%)
Δh (ซม.)	ΔH (ซม.)	Settling Tubes	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	เวลากักน้ำ (นาที)		
6	20	-	40	330	12.70	74.60
		-	70	197	14.30	71.40
		-	180	88	23.60	52.80
6	25	-	40	330	10.6	78.80
		-	70	197	13.5	73.00
		-	180	88	22.1	55.80
6	30	-	40	330	8.4	83.20
		-	50	263	10.1	79.80
		-	70	197	10.0	80.00
		-	110	132	16.5	67.00
		-	180	88	19.2	61.60
6	30	/	40	330	3.78	92.44
		/	50	263	6.11	87.78
		/	70	197	7.66	84.68
		/	110	132	11.8	76.40
		/	180	88	16.1	67.80
9	30	-	40	330	9.32	81.36
		-	50	263	9.42	81.16
		-	70	197	9.67	80.66
		-	110	132	15.9	68.20
		-	180	88	19.2	61.60

หมายเหตุ - Δh หมายถึง ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน

- ΔH หมายถึง ระยะช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง

ตารางที่ ข-3.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู และความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร

สภาวะการเดินระบบ					ความขุ่นสุดท้าย (เอ็นทียู)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (%)
Δh (ซม.)	ΔH (ซม.)	Settling Tubes	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	เวลากักน้ำ (นาที)		
6	30	-	70	197	7.13	64.35
		/	70	197	4.12	79.40

หมายเหตุ - Δh หมายถึง ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน

- ΔH หมายถึง ระยะช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง

ตารางที่ ข-3.4 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 200 เอ็นทียู และความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร

สภาวะการเดินระบบ					ความขุ่นสุดท้าย (เอ็นทียู)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (%)
Δh (ซม.)	ΔH (ซม.)	Settling Tubes	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	เวลากักน้ำ (นาที)		
6	30	-	70	197	8.12	95.94
		/	70	197	6.81	96.60

หมายเหตุ - Δh หมายถึง ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน

- ΔH หมายถึง ระยะช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง

ตารางที่ ข-3.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ของน้ำดิบจริง ที่มีความสูงของชั้นตะกอน 25 เซนติเมตร

สภาวะการเดินระบบ					ความขุ่นเริ่มต้น (เอ็นทียู)	ความขุ่นสุดท้าย (เอ็นทียู)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (%)
Δh (ซม.)	ΔH (ซม.)	Settling Tubes	อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	เวลากักน้ำ (นาที)			
6	30	-	70	197	60	11.2	81.33
		-	70	197	20	7.56	62.20
		/	70	197	20	5.32	73.40

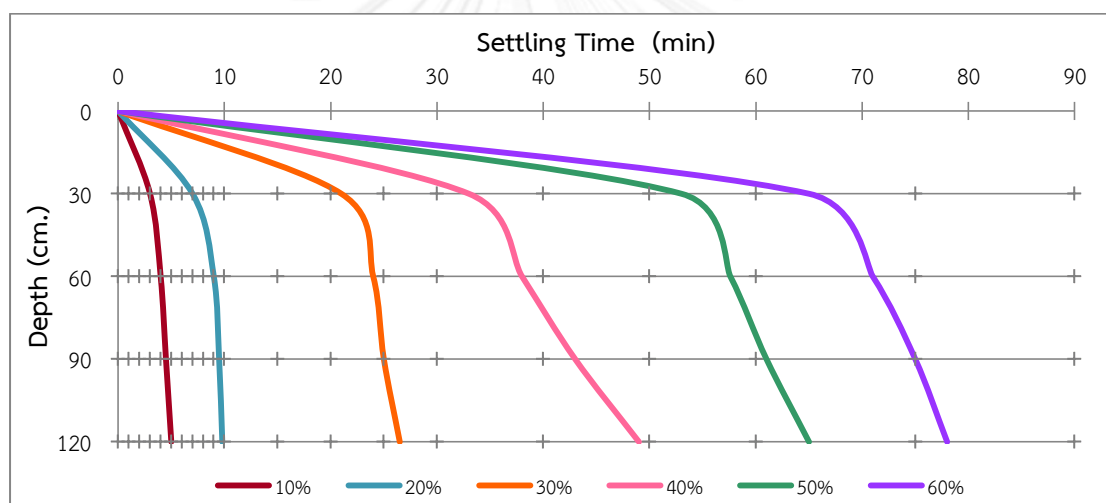
หมายเหตุ - Δh หมายถึง ระยะช่องว่างระหว่างกรวยชั้นในกับพื้นถังตกตะกอน

- ΔH หมายถึง ระยะช่องว่างระหว่างทรงกระบอกชั้นกลางกับพื้นถัง

ภาคผนวก ข-4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอน (Flocculent Settling Test) ภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม

ตารางที่ ข-4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1

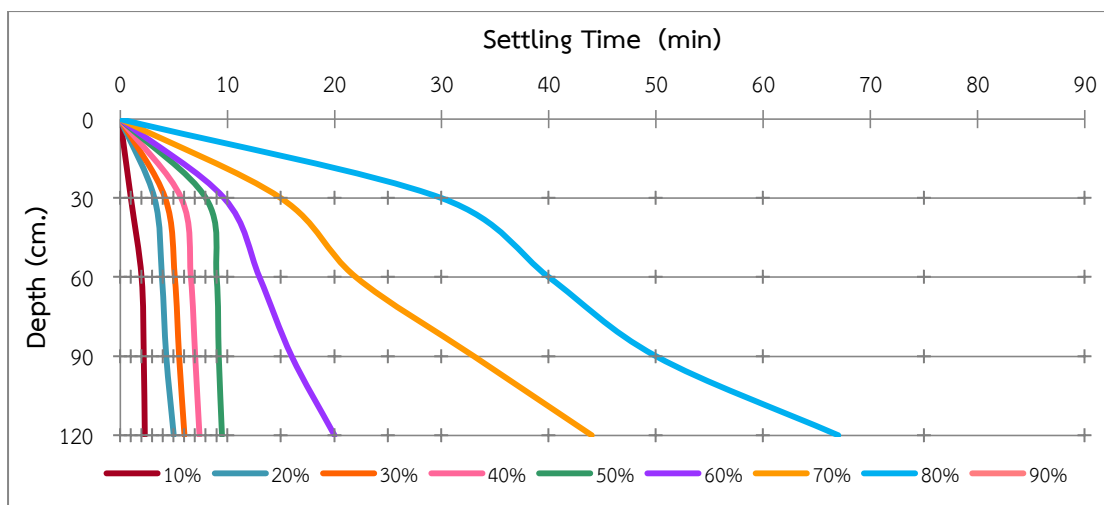
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	6	8	10	11	12	13	14	19	21	24	25	29	31	39	45	48	57	77	85
60	0	5	8	9	9	10	11	11	12	13	21	24	25	27	40	40	44	53	65	67
90	0	6	8	9	10	11	13	15	19	21	21	26	29	30	32	39	42	53	60	68
120	0	6	8	9	10	10	11	16	17	20	22	23	26	29	32	35	39	45	60	63



ภาพที่ ข-4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ข-4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2

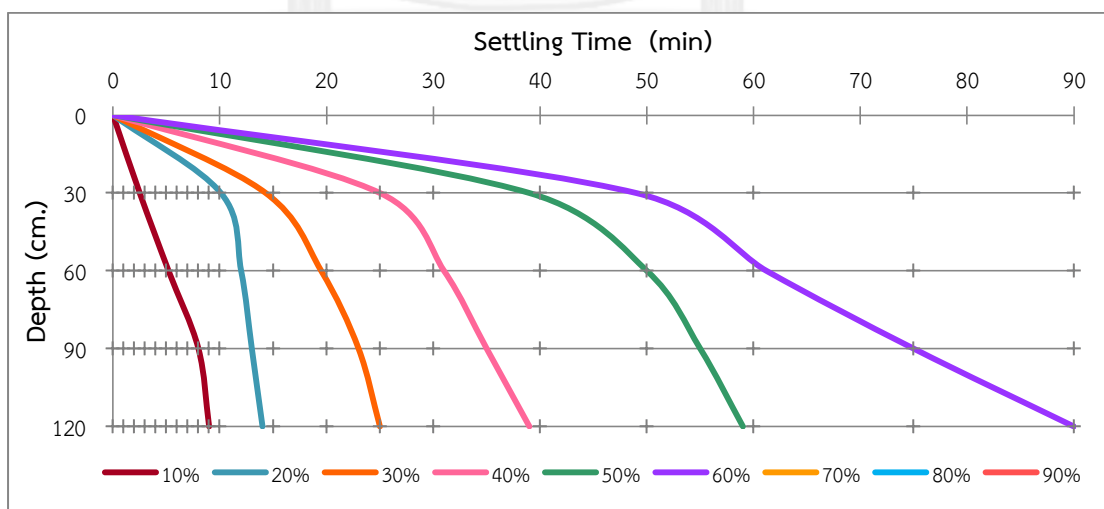
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	8	10	14	24	34	40	44	49	54	61	70	73	79	80	81	84	85	88	91
60	0	4	9	15	22	34	39	43	49	52	57	66	70	76	79	81	82	84	88	90
90	0	4	10	11	15	30	38	41	46	49	52	57	61	63	68	78	81	84	88	90
120	0	1	10	12	14	19	29	40	44	49	52	56	59	63	65	68	72	77	85	89



ภาพที่ ข-4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ข-4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Claricier) ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1

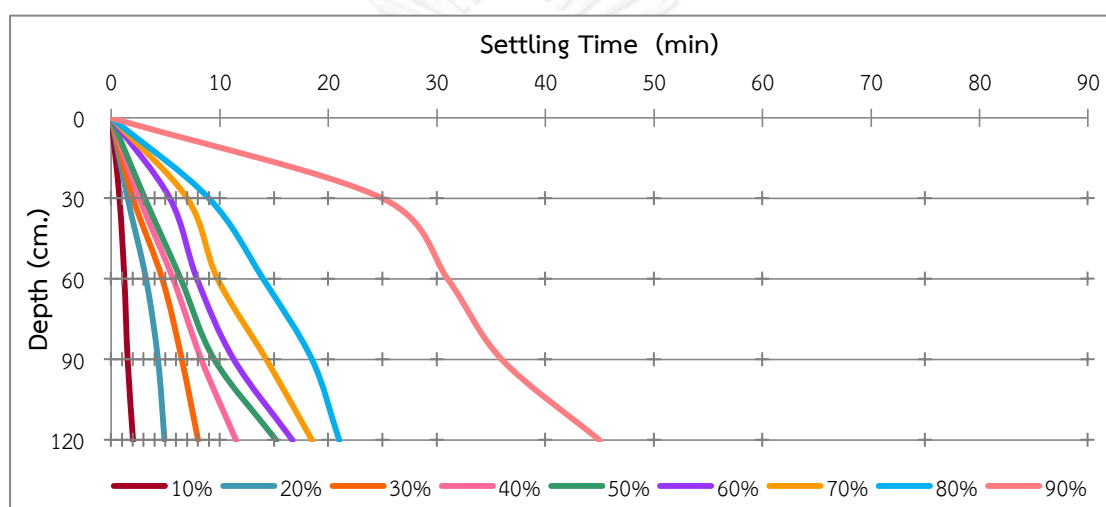
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	4	9	11	12	13	13	15	16	17	18	32	37	40	45	53	63	66	68	71
60	0	3	6	8	9	10	11	11	12	16	17	28	33	35	39	43	50	61	65	66
90	0	2	4	5	6	7	8	9	9	11	12	27	28	32	34	43	48	52	60	66
120	0	3	3	4	5	6	7	8	9	10	16	23	26	30	33	41	46	51	55	60



ภาพที่ ข-4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ข-4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2

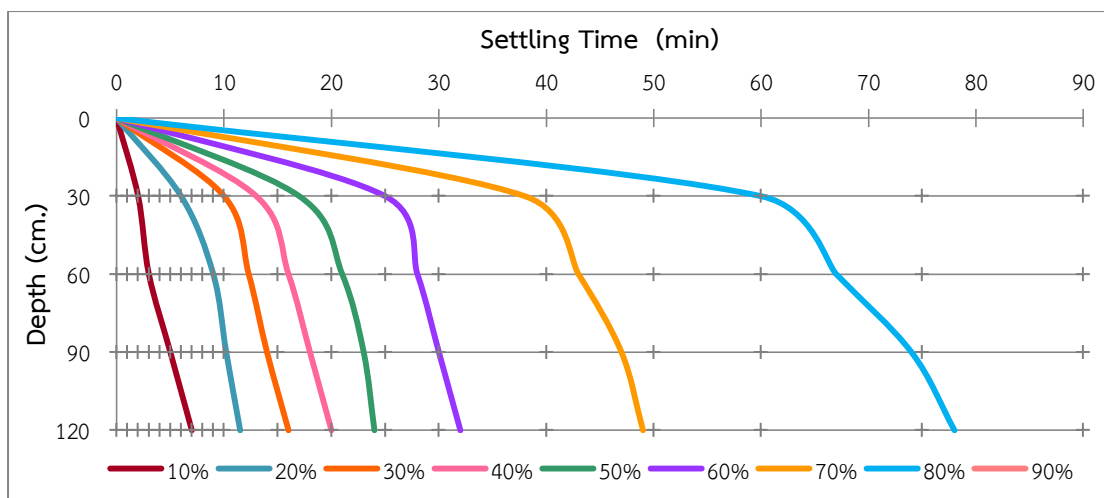
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	15	34	49	52	57	65	70	77	80	82	85	89	90	93	94	95	97	97	99
60	0	10	13	17	23	32	44	53	67	71	74	82	87	88	90	91	92	92	94	95
90	0	12	16	17	19	22	28	33	35	52	55	73	82	86	89	91	92	93	95	96
120	0	1	9	11	18	21	22	28	30	35	36	48	80	84	86	89	91	92	92	92



ภาพที่ ข-4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 ในฟังก์ชันของควมลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ข-4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 200 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1

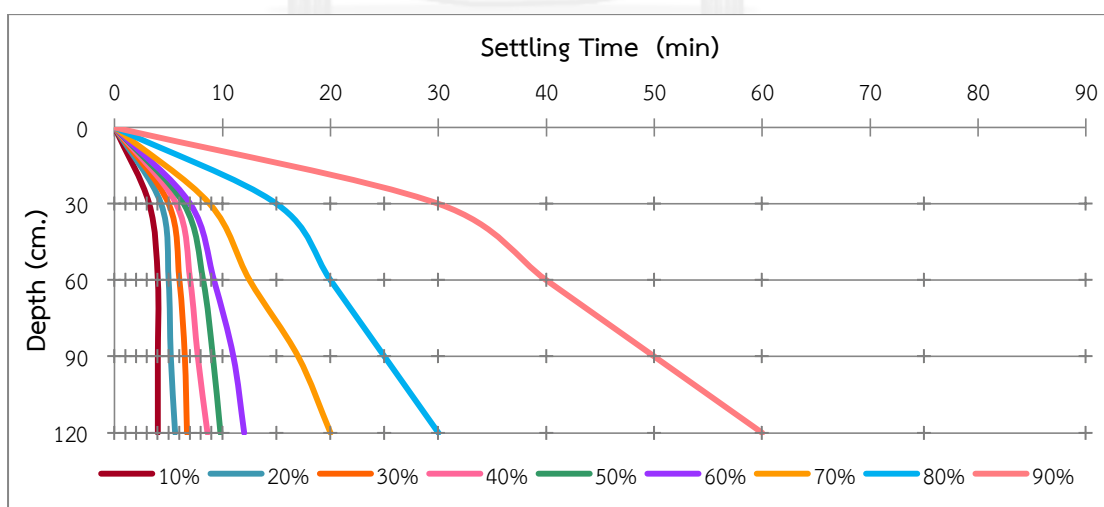
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	3	11	14	17	18	20	21	21	22	26	38	58	59	63	70	77	81	84	86
60	0	0	3	9	15	13	14	17	18	20	31	41	43	54	58	69	74	75	79	83
90	0	6	8	11	13	15	15	16	18	19	21	24	36	52	56	61	71	75	75	85
120	0	3	6	6	7	8	9	10	12	13	16	33	40	58	61	70	74	76	82	85



ภาพที่ ข-4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 200 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ข-4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 200 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2

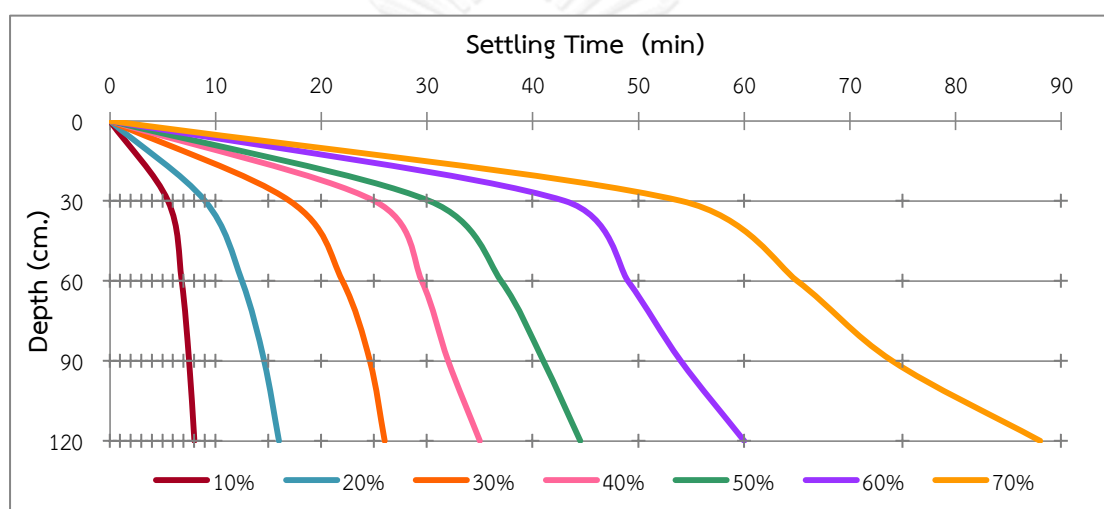
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	1	2	4	17	33	43	59	65	72	75	81	85	89	90	91	91	93	96	97
60	0	2	3	6	12	21	30	42	46	58	66	74	79	83	88	90	91	92	94	97
90	0	2	4	4	11	17	26	38	43	47	55	64	72	79	83	88	91	92	93	97
120	0	3	6	7	13	14	25	39	42	46	52	65	70	78	83	86	88	90	91	96



ภาพที่ ข-4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีความขุ่นเริ่มต้น 200 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ข-4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบจริงที่มีความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1

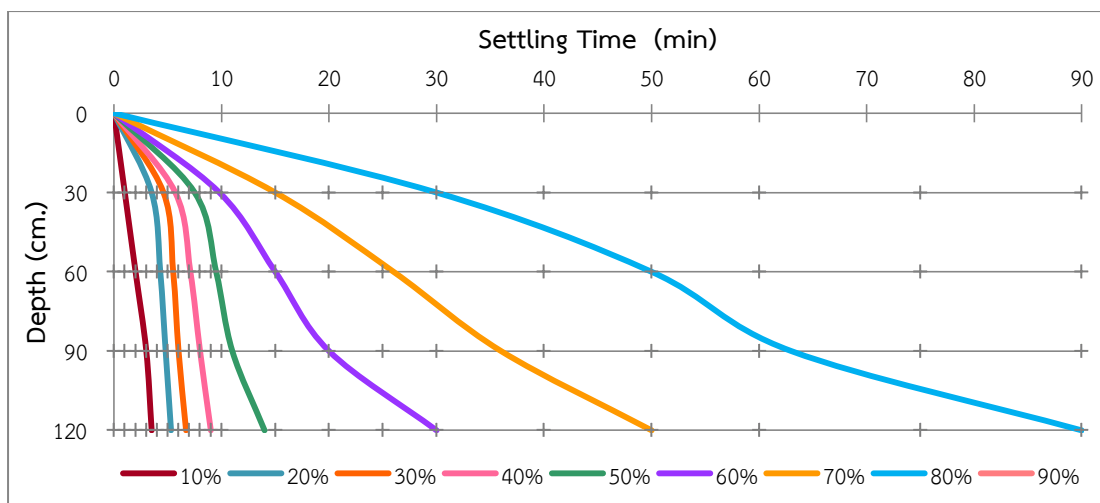
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	1	3	5	6	8	11	13	16	18	19	23	31	38	49	53	65	71	77	83
60	0	2	3	5	6	7	9	11	15	17	19	20	24	32	44	54	63	70	75	82
90	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10	12	21	29	35	48	52	58	64	73	76
120	0	1	1	3	4	6	7	8	10	13	15	24	28	31	35	46	56	61	66	72



ภาพที่ ข-4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบจริงที่มีความขุ่นเริ่มต้น 200 เอ็นทียูด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ข-4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบจริงที่มีความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2

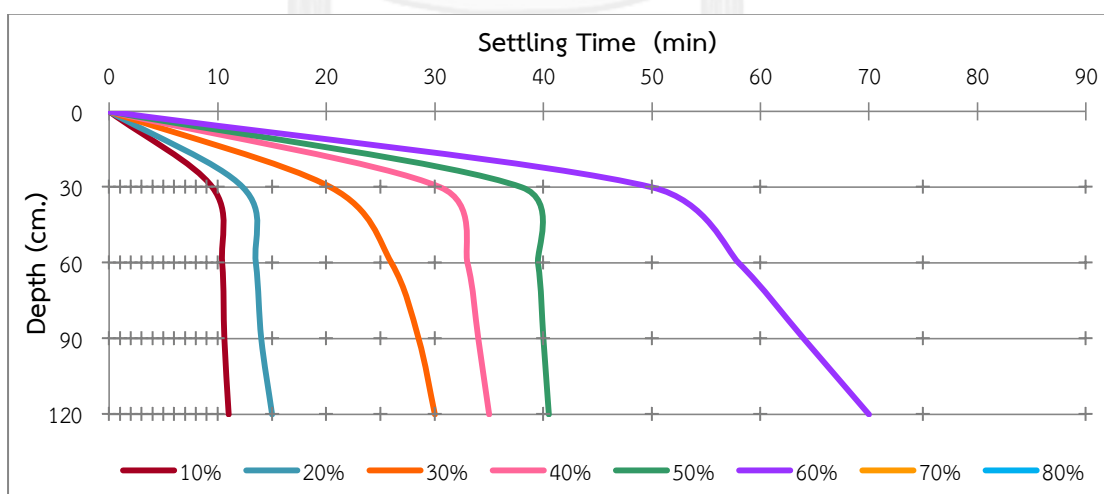
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	9	12	14	24	35	42	44	50	56	61	69	73	80	80	82	83	86	88	91
60	0	1	9	19	26	33	38	42	47	50	54	63	68	71	74	77	80	82	85	87
90	0	2	5	15	20	31	35	39	41	45	51	57	63	66	70	73	77	80	84	85
120	0	2	4	8	15	18	25	31	38	40	42	49	51	53	58	62	66	73	77	79



ภาพที่ ข-4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบจริงที่มีความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียูด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ตารางที่ ข-4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบจริงที่มีความขุ่นเริ่มต้น 60 เอ็นทียู ด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Claricier) ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1

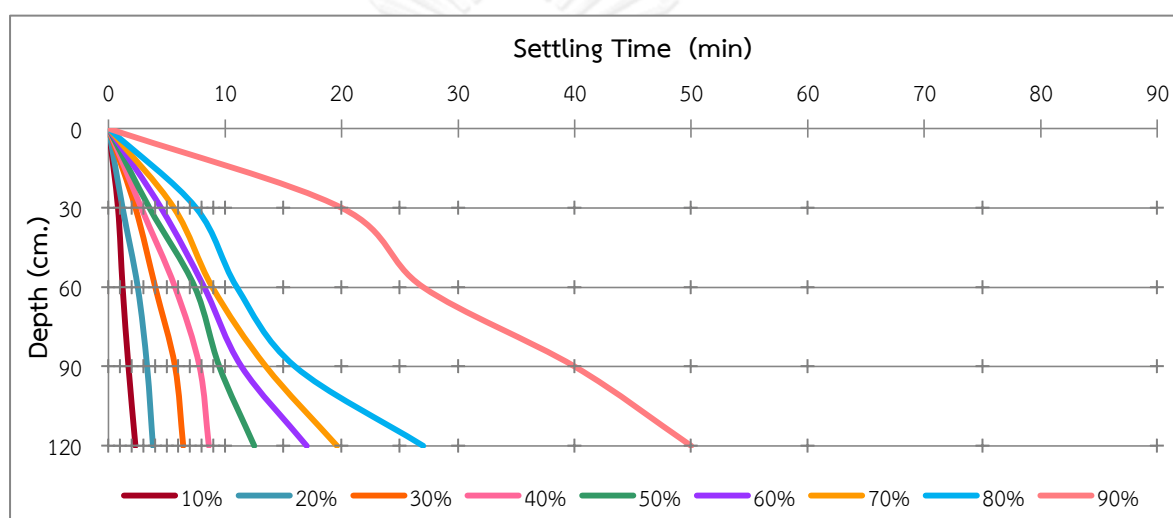
Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	2	3	4	4	5	6	7	8	9	11	24	29	35	39	51	60	67	73	74
60	0	1	3	4	5	5	6	6	7	9	10	23	27	28	38	50	57	61	64	71
90	0	3	4	5	5	6	7	7	8	8	12	24	26	33	36	49	56	58	61	68
120	0	0	2	2	2	3	4	5	6	8	9	19	27	28	30	50	55	59	62	65



ภาพที่ ข-4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบจริงที่มีความขุ่นเริ่มต้น 60 เอ็นทียูด้วยถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

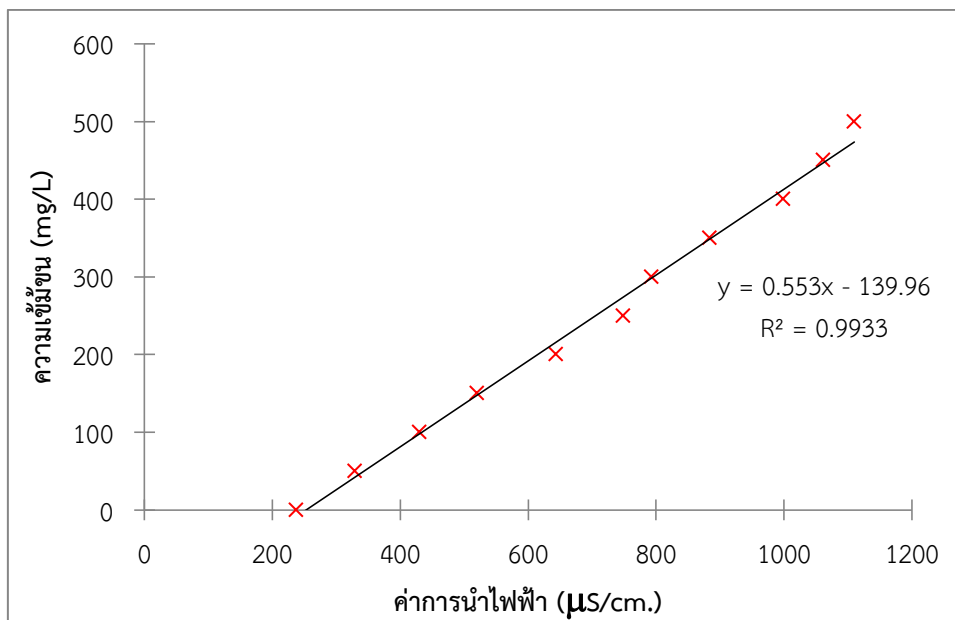
ตารางที่ ข-4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบจริงที่มีความขุ่นเริ่มต้น 60 เอ็นทียู ด้วย ถังตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำ ที่ 2

Depth (cm.) \ Time (min)	% Turbidity Remove at Indicated Depth and Time																			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90
30	0	13	26	46	53	65	75	77	82	84	86	89	90	92	94	95	96	97	98	99
60	0	11	17	24	31	35	43	46	57	71	79	87	90	91	93	94	95	96	97	98
90	0	7	9	18	22	27	31	36	41	47	52	76	84	85	87	90	94	96	96	96
120	0	3	8	15	21	26	29	33	38	42	47	52	72	78	83	86	90	92	93	95



ภาพที่ ข-4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบจริงที่มีความขุ่นเริ่มต้น 60 เอ็นทียูด้วยถัง ตกตะกอนส้มฝัสดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 ในฟังก์ชันของความลึกและระยะเวลา

ภาคผนวก ข-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)



ภาพที่ ข-5 กราฟมาตรฐานของค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ภาคผนวก ข-6 ผลการทดลองตารางการคำนวณรูปแบบการกระจายเวลากัก (Residence Time Distribution, RTD) ภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier)

ตารางที่ ข-6.1 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 1

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 1						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
0	0.00	0	0	0	-19.8028	0	0
3	684.06	0.061807	0.0206	0.18542	-16.8028	17.45023	0.556261
6	544.71	0.049216	0.016404	0.295293	-13.8028	9.376465	1.77176
9	409.77	0.037024	0.01234	0.333217	-10.8028	4.320759	2.998951
12	232.81	0.021035	0.007011	0.252423	-7.80284	1.280718	3.02908
15	173.64	0.015689	0.005229	0.235335	-4.80284	0.361903	3.530029
18	107.84	0.009743	0.003247	0.175377	-1.80284	0.031668	3.15679
21	107.28	0.009693	0.003231	0.203558	1.197162	0.013892	4.274708
24	100.09	0.009044	0.003014	0.217048	4.197162	0.159315	5.209154
27	94.56	0.008544	0.002848	0.2136	5.197162	0.230778	5.340012
30	91.25	0.008244	0.002748	0.21435	6.197162	0.316618	5.573099
33	87.93	0.007944	0.002648	0.2145	7.197162	0.411515	5.791496
36	86.82	0.007845	0.002615	0.219646	8.197162	0.5271	6.150095
39	84.61	0.007645	0.002548	0.221695	9.197162	0.646644	6.42915
42	82.40	0.007445	0.002481	0.223344	10.19716	0.774125	6.70031
45	74.10	0.006695	0.002232	0.207555	11.19716	0.839435	6.434196
48	63.60	0.005746	0.001915	0.183871	12.19716	0.854833	5.883881
51	56.96	0.005146	0.001715	0.169831	13.19716	0.896323	5.604427
54	48.11	0.004347	0.001449	0.147797	14.19716	0.87617	5.025082
57	42.03	0.003797	0.001266	0.132907	15.19716	0.87701	4.651744
60	35.95	0.003248	0.001082	0.116918	16.19716	0.852035	4.209054
63	33.73	0.003048	0.001016	0.112771	17.19716	0.901383	4.172529
66	29.31	0.002648	0.000883	0.10063	18.19716	0.876898	3.823923
69	27.65	0.002498	0.000833	0.172379	49.19716	6.046669	11.89417
72	25.99	0.002348	0.000783	0.169082	52.19716	6.398199	12.17388
75	23.78	0.002148	0.000716	0.161137	55.19716	6.54588	12.08529
78	22.67	0.002049	0.000683	0.159788	58.19716	6.938308	12.46348
81	21.57	0.001949	0.000649	0.15784	61.19716	7.297822	12.785
84	21.01	0.001899	0.000633	0.159488	64.19716	7.824946	13.39702
87	20.46	0.001849	0.000616	0.160837	67.19716	8.347755	13.99286
90	19.91	0.001799	0.0006	0.161887	70.19716	8.86355	14.5698
93	19.36	0.001749	0.000583	0.162636	73.19716	9.369634	15.12516
96	16.04	0.001449	0.000483	0.139103	76.19716	8.412822	13.35385
99	13.27	0.001199	0.0004	0.118717	79.19716	7.521364	11.75297
102	12.17	0.001099	0.000366	0.112122	82.19716	7.426812	11.43639

ตารางที่ ข-6.1 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 1 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 1						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
105	10.51	0.000949	0.000316	0.09968	85.19716	6.890805	10.46642
108	8.85	0.000799	0.000266	0.08634	88.19716	6.218638	9.324673
111	4.98	0.00045	0.00015	0.049915	91.19716	3.739997	5.540572
114	2.77	0.00025	8.33E-05	0.02848	94.19716	2.216725	3.246727
117	0.55	5E-05	1.67E-05	0.005846	97.19716	0.472034	0.683971
120	0.00	0	0	0	100.1972	0	0
123	0.00	0	0	0	103.1972	0	0
126	0.00	0	0	0	106.1972	0	0
129	0.00	0	0	0	109.1972	0	0
132	0.00	0	0	0	112.1972	0	0
135	0.00	0	0	0	115.1972	0	0
138	0.00	0	0	0	118.1972	0	0
141	0.00	0	0	0	121.1972	0	0
144	0.00	0	0	0	124.1972	0	0
147	0.00	0	0	0	127.1972	0	0
150	0.00	0	0	0	130.1972	0	0
153	0.00	0	0	0	133.1972	0	0
156	0.00	0	0	0	136.1972	0	0
159	0.00	0	0	0	139.1972	0	0
162	0.00	0	0	0	142.1972	0	0
165	0.00	0	0	0	145.1972	0	0
168	0.00	0	0	0	148.1972	0	0
171	0.00	0	0	0	151.1972	0	0
174	0.00	0	0	0	154.1972	0	0
177	0.00	0	0	0	157.1972	0	0
180	0.00	0	0	0	160.1972	0	0
183	0.00	0	0	0	163.1972	0	0
186	0.00	0	0	0	166.1972	0	0
189	0.00	0	0	0	169.1972	0	0
192	0.00	0	0	0	172.1972	0	0
195	0.00	0	0	0	175.1972	0	0
198	0.00	0	0	0	178.1972	0	0
201	0.00	0	0	0	181.1972	0	0
204	0.00	0	0	0	184.1972	0	0
207	0.00	0	0	0	187.1972	0	0
210	0.00	0	0	0	190.1972	0	0
213	0.00	0	0	0	193.1972	0	0
216	0.00	0	0	0	196.1972	0	0
219	0.00	0	0	0	199.1972	0	0
222	0.00	0	0	0	202.1972	0	0

ตารางที่ ข-6.1 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 1 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 1						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
225	0.00	0	0	0	205.1972	0	0
228	0.00	0	0	0	208.1972	0	0
231	0.00	0	0	0	211.1972	0	0
234	0.00	0	0	0	214.1972	0	0
237	0.00	0	0	0	217.1972	0	0
240	0.00	0	0	0	220.1972	0	0
243	0.00	0	0	0	223.1972	0	0
246	0.00	0	0	0	226.1972	0	0
249	0.00	0	0	0	229.1972	0	0
252	0.00	0	0	0	232.1972	0	0
255	0.00	0	0	0	235.1972	0	0
258	0.00	0	0	0	238.1972	0	0
261	0.00	0	0	0	241.1972	0	0
264	0.00	0	0	0	244.1972	0	0
267	0.00	0	0	0	247.1972	0	0
270	0.00	0	0	0	250.1972	0	0
273	0.00	0	0	0	253.1972	0	0
276	0.00	0	0	0	256.1972	0	0
279	0.00	0	0	0	259.1972	0	0
282	0.00	0	0	0	262.1972	0	0
285	0.00	0	0	0	265.1972	0	0
288	0.00	0	0	0	268.1972	0	0
291	0.00	0	0	0	271.1972	0	0
294	0.00	0	0	0	274.1972	0	0
297	0.00	0	0	0	277.1972	0	0
300	0.00	0	0	0	280.1972	0	0
303	0.00	0	0	0	283.1972	0	0
306	0.00	0	0	0	286.1972	0	0
309	0.00	0	0	0	289.1972	0	0
312	0.00	0	0	0	292.1972	0	0
315	0.00	0	0	0	295.1972	0	0
318	0.00	0	0	0	298.1972	0	0
321	0.00	0	0	0	301.1972	0	0
324	0.00	0	0	0	304.1972	0	0
327	0.00	0	0	0	307.1972	0	0
330	0.00	0	0	0	310.1972	0	0
333	0.00	0	0	0	313.1972	0	0
336	0.00	0	0	0	316.1972	0	0
339	0.00	0	0	0	319.1972	0	0
342	0.00	0	0	0	322.1972	0	0

ตารางที่ ข-6.1 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 1 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 1						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
345	0.00	0	0	0	325.1972	0	0
348	0.00	0	0	0	328.1972	0	0
351	0.00	0	0	0	331.1972	0	0
354	0.00	0	0	0	334.1972	0	0
357	0.00	0	0	0	337.1972	0	0
360	0.00	0	0	0	340.1972	0	0
363	0.00	0	0	0	343.1972	0	0
366	0.00	0	0	0	346.1972	0	0
369	0.00	0	0	0	349.1972	0	0
372	0.00	0	0	0	352.1972	0	0
375	0.00	0	0	0	355.1972	0	0
378	0.00	0	0	0	358.1972	0	0
381	0.00	0	0	0	361.1972	0	0
384	0.00	0	0	0	364.1972	0	0
387	0.00	0	0	0	367.1972	0	0
390	0.00	0	0	0	370.1972	0	0
393	0.00	0	0	0	373.1972	0	0
396	0.00	0	0	0	376.1972	0	0
399	0.00	0	0	0	379.1972	0	0
402	0.00	0	0	0	382.1972	0	0
405	0.00	0	0	0	385.1972	0	0
408	0.00	0	0	0	388.1972	0	0
411	0.00	0	0	0	391.1972	0	0
414	0.00	0	0	0	394.1972	0	0
417	0.00	0	0	0	397.1972	0	0
420	0.00	0	0	0	400.1972	0	0
423	0.00	0	0	0	403.1972	0	0
426	0.00	0	0	0	406.1972	0	0
429	0.00	0	0	0	409.1972	0	0
432	0.00	0	0	0	412.1972	0	0
435	0.00	0	0	0	415.1972	0	0
438	0.00	0	0	0	418.1972	0	0
441	0.00	0	0	0	421.1972	0	0
444	0.00	0	0	0	424.1972	0	0
447	0.00	0	0	0	427.1972	0	0
450	0.00	0	0	0	430.1972	0	0
453	0.00	0	0	0	433.1972	0	0
456	0.00	0	0	0	436.1972	0	0
459	0.00	0	0	0	439.1972	0	0
462	0.00	0	0	0	442.1972	0	0

ตารางที่ ข-6.1 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 1 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 1						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
465	0.00	0	0	0	445.1972	0	0
468	0.00	0	0	0	448.1972	0	0
471	0.00	0	0	0	451.1972	0	0
474	0.00	0	0	0	454.1972	0	0
477	0.00	0	0	0	457.1972	0	0
480	0.00	0	0	0	460.1972	0	0

ตารางที่ ข-6.2 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 2

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 2						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
0	0.00	0	0	0	-18.7336	0	0
3	75.21	0.008004	0.253761	0.024011	-15.7336	1.981312	0.072034
6	141.57	0.015066	0.477668	0.090395	-12.7336	2.442871	0.542373
9	338.99	0.036076	1.14379	0.324682	-9.73364	3.417956	2.92214
12	498.81	0.053084	1.683033	0.637006	-6.73364	2.40692	7.644068
15	451.80	0.048081	1.524432	0.721222	-3.73364	0.670258	10.81833
18	316.32	0.033663	1.067289	0.605932	-0.73364	0.018118	10.90678
21	216.22	0.023011	0.729563	0.483227	2.266361	0.118193	10.14778
24	150.97	0.016066	0.509388	0.385593	5.266361	0.445594	9.254237
27	138.80	0.014772	0.468338	0.369291	6.266361	0.580043	9.232286
30	116.68	0.012418	0.393703	0.322858	7.266361	0.65565	8.394303
33	111.15	0.011829	0.375044	0.319386	8.266361	0.808314	8.623411
36	101.20	0.01077	0.341458	0.301554	9.266361	0.924751	8.443503
39	89.59	0.009534	0.302274	0.276483	10.26636	1.004855	8.018008
42	80.19	0.008533	0.270554	0.256003	11.26636	1.083155	7.680085
45	66.36	0.007062	0.223907	0.218927	12.26636	1.062596	6.786723
48	60.83	0.006474	0.205248	0.207156	13.26636	1.139336	6.629002
51	44.24	0.004708	0.149271	0.155367	14.26636	0.958235	5.127119
54	29.86	0.003178	0.100758	0.108051	15.26636	0.740662	3.673729
57	21.57	0.002295	0.07277	0.080332	16.26636	0.607297	2.811617
60	19.91	0.002119	0.067172	0.076271	17.26636	0.631625	2.745763
63	15.48	0.001648	0.052245	0.06097	18.26636	0.549816	2.255885
66	12.17	0.001295	0.04105	0.0492	19.26636	0.480593	1.869586
69	5.53	0.000589	0.018659	0.040607	50.26636	1.486998	2.801907
72	4.42	0.000471	0.014927	0.033898	53.26636	1.335831	2.440678
75	2.21	0.000235	0.007464	0.017655	56.26636	0.745269	1.324153
78	1.11	0.000118	0.003732	0.009181	59.26636	0.41343	0.716102

ตารางที่ ข-6.2 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 2 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 2						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
81	3.32	0.000353	0.011195	0.028602	62.26636	1.369032	2.316737
84	1.66	0.000177	0.005598	0.014831	65.26636	0.752065	1.245763
87	0.55	5.89E-05	0.001866	0.00512	68.26636	0.274264	0.445445
90	0.55	5.89E-05	0.001866	0.005297	71.26636	0.298899	0.476695
93	0.00	0	0	0	74.26636	0	0
96	0.00	0	0	0	77.26636	0	0
99	0.00	0	0	0	80.26636	0	0
102	0.00	0	0	0	83.26636	0	0
105	0.00	0	0	0	86.26636	0	0
108	0.00	0	0	0	89.26636	0	0
111	0.00	0	0	0	92.26636	0	0
114	0.00	0	0	0	95.26636	0	0
117	0.00	0	0	0	98.26636	0	0
120	0.00	0	0	0	101.2664	0	0
123	0.00	0	0	0	104.2664	0	0
126	0.00	0	0	0	107.2664	0	0
129	0.00	0	0	0	110.2664	0	0
132	0.00	0	0	0	113.2664	0	0
135	0.00	0	0	0	116.2664	0	0
138	0.00	0	0	0	119.2664	0	0
141	0.00	0	0	0	122.2664	0	0
144	0.00	0	0	0	125.2664	0	0
147	0.00	0	0	0	128.2664	0	0
150	0.00	0	0	0	131.2664	0	0
153	0.00	0	0	0	134.2664	0	0
156	0.00	0	0	0	137.2664	0	0
159	0.00	0	0	0	140.2664	0	0
162	0.00	0	0	0	143.2664	0	0
165	0.00	0	0	0	146.2664	0	0
168	0.00	0	0	0	149.2664	0	0
171	0.00	0	0	0	152.2664	0	0
174	0.00	0	0	0	155.2664	0	0
177	0.00	0	0	0	158.2664	0	0
180	0.00	0	0	0	161.2664	0	0
183	0.00	0	0	0	164.2664	0	0
186	0.00	0	0	0	167.2664	0	0
189	0.00	0	0	0	170.2664	0	0
192	0.00	0	0	0	173.2664	0	0
195	0.00	0	0	0	176.2664	0	0
198	0.00	0	0	0	179.2664	0	0

ตารางที่ ข-6.2 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 2 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 2						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
201	0.00	0	0	0	182.2664	0	0
204	0.00	0	0	0	185.2664	0	0
207	0.00	0	0	0	188.2664	0	0
210	0.00	0	0	0	191.2664	0	0
213	0.00	0	0	0	194.2664	0	0
216	0.00	0	0	0	197.2664	0	0
219	0.00	0	0	0	200.2664	0	0
222	0.00	0	0	0	203.2664	0	0
225	0.00	0	0	0	206.2664	0	0
228	0.00	0	0	0	209.2664	0	0
231	0.00	0	0	0	212.2664	0	0
234	0.00	0	0	0	215.2664	0	0
237	0.00	0	0	0	218.2664	0	0
240	0.00	0	0	0	221.2664	0	0
243	0.00	0	0	0	224.2664	0	0
246	0.00	0	0	0	227.2664	0	0
249	0.00	0	0	0	230.2664	0	0
252	0.00	0	0	0	233.2664	0	0
255	0.00	0	0	0	236.2664	0	0
258	0.00	0	0	0	239.2664	0	0
261	0.00	0	0	0	242.2664	0	0
264	0.00	0	0	0	245.2664	0	0
267	0.00	0	0	0	248.2664	0	0
270	0.00	0	0	0	251.2664	0	0
273	0.00	0	0	0	254.2664	0	0
276	0.00	0	0	0	257.2664	0	0
279	0.00	0	0	0	260.2664	0	0
282	0.00	0	0	0	263.2664	0	0
285	0.00	0	0	0	266.2664	0	0
288	0.00	0	0	0	269.2664	0	0
291	0.00	0	0	0	272.2664	0	0
294	0.00	0	0	0	275.2664	0	0
297	0.00	0	0	0	278.2664	0	0
300	0.00	0	0	0	281.2664	0	0
303	0.00	0	0	0	284.2664	0	0
306	0.00	0	0	0	287.2664	0	0
309	0.00	0	0	0	290.2664	0	0
312	0.00	0	0	0	293.2664	0	0
315	0.00	0	0	0	296.2664	0	0
318	0.00	0	0	0	299.2664	0	0

ตารางที่ ข-6.2 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 2 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 2						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
321	0.00	0	0	0	302.2664	0	0
324	0.00	0	0	0	305.2664	0	0
327	0.00	0	0	0	308.2664	0	0
330	0.00	0	0	0	311.2664	0	0
333	0.00	0	0	0	314.2664	0	0
336	0.00	0	0	0	317.2664	0	0
339	0.00	0	0	0	320.2664	0	0
342	0.00	0	0	0	323.2664	0	0
345	0.00	0	0	0	326.2664	0	0
348	0.00	0	0	0	329.2664	0	0
351	0.00	0	0	0	332.2664	0	0
354	0.00	0	0	0	335.2664	0	0
357	0.00	0	0	0	338.2664	0	0
360	0.00	0	0	0	341.2664	0	0
363	0.00	0	0	0	344.2664	0	0
366	0.00	0	0	0	347.2664	0	0
369	0.00	0	0	0	350.2664	0	0
372	0.00	0	0	0	353.2664	0	0
375	0.00	0	0	0	356.2664	0	0
378	0.00	0	0	0	359.2664	0	0
381	0.00	0	0	0	362.2664	0	0
384	0.00	0	0	0	365.2664	0	0
387	0.00	0	0	0	368.2664	0	0
390	0.00	0	0	0	371.2664	0	0
393	0.00	0	0	0	374.2664	0	0
396	0.00	0	0	0	377.2664	0	0
399	0.00	0	0	0	380.2664	0	0
402	0.00	0	0	0	383.2664	0	0
405	0.00	0	0	0	386.2664	0	0
408	0.00	0	0	0	389.2664	0	0
411	0.00	0	0	0	392.2664	0	0
414	0.00	0	0	0	395.2664	0	0
417	0.00	0	0	0	398.2664	0	0
420	0.00	0	0	0	401.2664	0	0
423	0.00	0	0	0	404.2664	0	0
426	0.00	0	0	0	407.2664	0	0
429	0.00	0	0	0	410.2664	0	0
432	0.00	0	0	0	413.2664	0	0
435	0.00	0	0	0	416.2664	0	0
438	0.00	0	0	0	419.2664	0	0

ตารางที่ ข-6.2 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 2 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 2						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
441	0.00	0	0	0	422.2664	0	0
444	0.00	0	0	0	425.2664	0	0
447	0.00	0	0	0	428.2664	0	0
450	0.00	0	0	0	431.2664	0	0
453	0.00	0	0	0	434.2664	0	0
456	0.00	0	0	0	437.2664	0	0
459	0.00	0	0	0	440.2664	0	0
462	0.00	0	0	0	443.2664	0	0
465	0.00	0	0	0	446.2664	0	0
468	0.00	0	0	0	449.2664	0	0
471	0.00	0	0	0	452.2664	0	0
474	0.00	0	0	0	455.2664	0	0
477	0.00	0	0	0	458.2664	0	0
480	0.00	0	0	0	461.2664	0	0

ตารางที่ ข-6.3 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 3

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 3						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
0	0.00	0	0	0	-128.12	0	0
3	0.00	0	0	0	-125.12	0	0
6	0.00	0	0	0	-122.12	0	0
9	1.11	7.4E-05	0.007194	0.000666	-119.12	1.049528	0.005991
12	9.95	0.000666	0.064743	0.007988	-116.12	8.975968	0.095858
15	12.72	0.000851	0.082727	0.012759	-113.12	10.88432	0.191383
18	14.38	0.000962	0.093517	0.017308	-110.12	11.66005	0.311538
21	16.59	0.001109	0.107904	0.023299	-107.12	12.73085	0.489275
24	16.59	0.001109	0.107904	0.026627	-104.12	12.02775	0.639053
27	22.67	0.001516	0.147469	0.040939	-101.12	15.50433	1.105362
30	48.66	0.003254	0.31652	0.097633	-98.1202	31.33234	2.928994
33	52.54	0.003513	0.341698	0.115939	-95.1202	31.78794	3.825999
36	56.96	0.003809	0.370472	0.13713	-92.1202	32.32512	4.936686
39	64.15	0.00429	0.417231	0.167308	-89.1202	34.07246	6.525
42	73.00	0.004882	0.47478	0.20503	-86.1202	36.20572	8.611243
45	77.42	0.005178	0.503554	0.232988	-83.1202	35.77128	10.48447
48	85.72	0.005732	0.557506	0.275148	-80.1202	36.79671	13.2071
51	90.69	0.006065	0.589878	0.30932	-77.1202	36.07226	15.7753
54	96.78	0.006472	0.629443	0.349482	-74.1202	35.55531	18.87204

ตารางที่ ข-6.3 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 3 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 3						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
57	100.09	0.006694	0.651024	0.381546	-71.1202	33.85772	21.74811
60	103.96	0.006953	0.676201	0.41716	-68.1202	32.26286	25.02959
63	105.62	0.007064	0.686992	0.445007	-65.1202	29.95422	28.03547
66	108.39	0.007249	0.704976	0.478402	-62.1202	27.97145	31.57456
69	109.49	0.007322	0.71217	0.505251	-59.1202	25.59353	34.86235
72	109.49	0.007322	0.71217	0.527219	-56.1202	23.06199	37.95976
75	110.05	0.007359	0.715766	0.55196	-53.1202	20.76661	41.397
78	107.28	0.007175	0.697782	0.559615	-50.1202	18.02273	43.65
81	107.28	0.007175	0.697782	0.581139	-47.1202	15.92976	47.07226
84	106.18	0.007101	0.690589	0.59645	-44.1202	13.82195	50.10178
87	101.20	0.006768	0.658217	0.588794	-41.1202	11.44339	51.22511
90	96.22	0.006435	0.625846	0.579142	-38.1202	9.350885	52.12278
93	95.67	0.006398	0.622249	0.595007	-35.1202	7.891384	55.33569
96	89.59	0.005991	0.582684	0.575148	-32.1202	6.181083	55.2142
99	86.82	0.005806	0.5647	0.574815	-29.1202	4.923585	56.90669
102	90.14	0.006028	0.586281	0.614867	-26.1202	4.112763	62.71642
105	86.82	0.005806	0.5647	0.609652	-23.1202	3.103672	64.0135
108	85.16	0.005695	0.55391	0.615089	-20.1202	2.30557	66.42959
111	86.27	0.005769	0.561103	0.640385	-17.1202	1.690967	71.08269
114	71.34	0.004771	0.463989	0.543861	-14.1202	0.951183	62.00015
117	64.15	0.00429	0.417231	0.501923	-11.1202	0.530488	58.725
120	60.28	0.004031	0.392053	0.483728	-8.12019	0.265798	58.04734
123	55.85	0.003735	0.363278	0.45943	-5.12019	0.097924	56.50995
126	52.54	0.003513	0.341698	0.442678	-2.12019	0.015793	55.77737
129	51.43	0.003439	0.334504	0.443676	0.879808	0.002662	57.23421
132	50.88	0.003402	0.330907	0.449112	3.879808	0.051216	59.28284
135	50.32	0.003365	0.32731	0.454327	6.879808	0.15929	61.33413
138	49.77	0.003328	0.323713	0.45932	9.879808	0.324887	63.38609
141	49.22	0.003291	0.320117	0.46409	12.87981	0.546012	65.43672
144	49.22	0.003291	0.320117	0.473964	15.87981	0.829992	68.25089
147	48.11	0.003217	0.312923	0.472966	18.87981	1.146853	69.526
150	47.56	0.00318	0.309326	0.477071	21.87981	1.522575	71.56065
153	47.01	0.003143	0.305729	0.480954	24.87981	1.945836	73.58598
156	47.01	0.003143	0.305729	0.490385	27.87981	2.443384	76.5
159	46.45	0.003107	0.302133	0.493935	30.87981	2.96225	78.53565
162	46.45	0.003107	0.302133	0.503254	33.87981	3.565779	81.52722
165	45.35	0.003033	0.294939	0.50037	36.87981	4.124625	82.56102
168	44.79	0.002996	0.291342	0.503254	39.87981	4.764139	84.54675
171	44.79	0.002996	0.291342	0.512241	42.87981	5.507874	87.59323
174	44.79	0.002996	0.291342	0.521228	45.87981	6.305529	90.69364

ตารางที่ ข-6.3 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 3 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 3						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m)) ² *E(t)	t ² *E(t)
177	44.79	0.002996	0.291342	0.530214	48.87981	7.157104	93.84797
180	42.58	0.002848	0.276955	0.512574	51.87981	7.664446	92.26331
183	42.58	0.002848	0.276955	0.521117	54.87981	8.576482	95.36439
186	42.58	0.002848	0.276955	0.52966	57.87981	9.539776	98.51672
189	42.03	0.002811	0.273358	0.531213	60.87981	10.41726	100.3993
192	42.03	0.002811	0.273358	0.539645	63.87981	11.46923	103.6118
195	41.48	0.002774	0.269761	0.540865	66.87981	12.40637	105.4688
198	40.92	0.002737	0.266164	0.541864	69.87981	13.36375	107.2891
201	39.82	0.002663	0.258971	0.535207	72.87981	14.14296	107.5766
204	39.26	0.002626	0.255374	0.535651	75.87981	15.11834	109.2728
207	37.60	0.002515	0.244583	0.520562	78.87981	15.6471	107.7564
210	36.50	0.002441	0.23739	0.512574	81.87981	16.36405	107.6405
213	37.05	0.002478	0.240987	0.527774	84.87981	17.85159	112.4158
216	35.95	0.002404	0.233793	0.519231	87.87981	18.56457	112.1538
219	35.95	0.002404	0.233793	0.526442	90.87981	19.8537	115.2909
222	35.39	0.002367	0.230196	0.525444	93.87981	20.86016	116.6485
225	34.84	0.00233	0.226599	0.524223	96.87981	21.86756	117.9503
228	34.84	0.00233	0.226599	0.531213	99.87981	23.24284	121.1166
231	33.73	0.002256	0.219406	0.521117	102.8798	23.8772	120.378
234	33.18	0.002219	0.215809	0.519231	105.8798	24.87544	121.5
237	32.63	0.002182	0.212212	0.517123	108.8798	25.86664	122.5581
240	30.97	0.002071	0.201422	0.497041	111.8798	25.92297	119.2899
243	28.20	0.001886	0.183438	0.458321	114.8798	24.89149	111.372
246	26.54	0.001775	0.172647	0.436686	117.8798	24.66683	107.4249
249	24.33	0.001627	0.15826	0.405178	120.8798	23.77681	100.8892
252	22.67	0.001516	0.147469	0.382101	123.8798	23.26903	96.28935
255	21.57	0.001442	0.140276	0.367788	126.8798	23.21897	93.78606
258	21.57	0.001442	0.140276	0.372115	129.8798	24.32995	96.00577
261	21.01	0.001405	0.136679	0.36679	132.8798	24.81389	95.73217
264	20.46	0.001368	0.133082	0.361243	135.8798	25.26416	95.36805
267	19.91	0.001331	0.129485	0.355473	138.8798	25.67876	94.91139
270	19.91	0.001331	0.129485	0.359467	141.8798	26.80014	97.05621
273	19.36	0.001294	0.125889	0.353365	144.8798	27.16921	96.46875
276	18.80	0.001257	0.122292	0.347041	147.8798	27.4973	95.78343
279	18.80	0.001257	0.122292	0.350814	150.8798	28.62427	97.877
282	17.70	0.001183	0.115098	0.333728	153.8798	28.02248	94.11124
285	17.70	0.001183	0.115098	0.337278	156.8798	29.12577	96.12426
288	16.59	0.001109	0.107904	0.319527	159.8798	28.35971	92.02367
291	16.59	0.001109	0.107904	0.322855	162.8798	29.43398	93.95081
294	16.59	0.001109	0.107904	0.326183	165.8798	30.52823	95.89793

ตารางที่ ข-6.3 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 3 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 3						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m)) ² *E(t)	t ² *E(t)
297	16.04	0.001072	0.104308	0.318528	168.8798	30.5877	94.60285
300	13.27	0.000888	0.086324	0.266272	171.8798	26.2213	79.88166
303	11.61	0.000777	0.075533	0.235318	174.8798	23.75155	71.30137
306	9.95	0.000666	0.064743	0.203698	177.8798	21.06295	62.33166
309	7.74	0.000518	0.050355	0.159985	180.8798	16.93954	49.43543
312	6.64	0.000444	0.043162	0.138462	183.8798	15.00523	43.2
315	5.53	0.00037	0.035968	0.116494	186.8798	12.9157	36.69564
318	3.87	0.000259	0.025178	0.082322	189.8798	9.333594	26.17855
321	2.21	0.000148	0.014387	0.047485	192.8798	5.503346	15.24275
324	2.21	0.000148	0.014387	0.047929	195.8798	5.675873	15.52899
327	2.21	0.000148	0.014387	0.048373	198.8798	5.851062	15.8179
330	1.66	0.000111	0.01079	0.036612	201.8798	4.521685	12.0821
333	1.66	0.000111	0.01079	0.036945	204.8798	4.657071	12.30277
336	1.11	7.4E-05	0.007194	0.024852	207.8798	3.196303	8.350296
339	1.11	7.4E-05	0.007194	0.025074	210.8798	3.289223	8.500074
342	1.11	7.4E-05	0.007194	0.025296	213.8798	3.383474	8.651183
345	0.55	3.7E-05	0.003597	0.012759	216.8798	1.739529	4.401812
348	0.55	3.7E-05	0.003597	0.01287	219.8798	1.787986	4.478698
351	0.55	3.7E-05	0.003597	0.012981	222.8798	1.837108	4.55625
354	0.00	0	0	0	225.8798	0	0
357	0.00	0	0	0	228.8798	0	0
360	0.00	0	0	0	231.8798	0	0
363	0.00	0	0	0	234.8798	0	0
366	0.00	0	0	0	237.8798	0	0
369	0.00	0	0	0	240.8798	0	0
372	0.00	0	0	0	243.8798	0	0
375	0.00	0	0	0	246.8798	0	0
378	0.00	0	0	0	249.8798	0	0
381	0.00	0	0	0	252.8798	0	0
384	0.00	0	0	0	255.8798	0	0
387	0.00	0	0	0	258.8798	0	0
390	0.00	0	0	0	261.8798	0	0
393	0.00	0	0	0	264.8798	0	0
396	0.00	0	0	0	267.8798	0	0
399	0.00	0	0	0	270.8798	0	0
402	0.00	0	0	0	273.8798	0	0
405	0.00	0	0	0	276.8798	0	0
408	0.00	0	0	0	279.8798	0	0
411	0.00	0	0	0	282.8798	0	0
414	0.00	0	0	0	285.8798	0	0

ตารางที่ ข-6.3 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 3 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 3						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
417	0.00	0	0	0	288.8798	0	0
420	0.00	0	0	0	291.8798	0	0
423	0.00	0	0	0	294.8798	0	0
426	0.00	0	0	0	297.8798	0	0
429	0.00	0	0	0	300.8798	0	0
432	0.00	0	0	0	303.8798	0	0
435	0.00	0	0	0	306.8798	0	0
438	0.00	0	0	0	309.8798	0	0
441	0.00	0	0	0	312.8798	0	0
444	0.00	0	0	0	315.8798	0	0
447	0.00	0	0	0	318.8798	0	0
450	0.00	0	0	0	321.8798	0	0
453	0.00	0	0	0	324.8798	0	0
456	0.00	0	0	0	327.8798	0	0
459	0.00	0	0	0	330.8798	0	0
462	0.00	0	0	0	333.8798	0	0
465	0.00	0	0	0	336.8798	0	0
468	0.00	0	0	0	339.8798	0	0
471	0.00	0	0	0	342.8798	0	0
474	0.00	0	0	0	345.8798	0	0
477	0.00	0	0	0	348.8798	0	0
480	0.00	0	0	0	351.8798	0	0

ตารางที่ ข-6.4 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 4

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 4						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
0	0.00	0	0	0	-225.52	0	0
3	0.00	0	0	0	-222.52	0	0
6	0.00	0	0	0	-219.52	0	0
9	0.00	0	0	0	-216.52	0	0
12	0.00	0	0	0	-213.52	0	0
15	0.00	0	0	0	-210.52	0	0
18	0.00	0	0	0	-207.52	0	0
21	0.00	0	0	0	-204.52	0	0
24	0.00	0	0	0	-201.52	0	0
27	0.55	4.74E-05	0.009865	0.001279	-198.52	1.867077	0.034537
30	0.55	4.74E-05	0.009865	0.001421	-195.52	1.811074	0.042638

ตารางที่ ข-6.4 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 4 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 4						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
33	0.55	4.74E-05	0.009865	0.001563	-192.52	1.755923	0.051592
36	0.55	4.74E-05	0.009865	0.001706	-189.52	1.701625	0.061399
39	1.11	9.48E-05	0.01973	0.003695	-186.52	3.29636	0.144116
42	2.77	0.000237	0.049324	0.009949	-183.52	7.977937	0.417851
45	4.42	0.000379	0.078918	0.017055	-180.52	12.35078	0.767482
48	4.98	0.000426	0.088783	0.020466	-177.52	13.43665	0.982376
51	5.53	0.000474	0.098648	0.024161	-174.52	14.42927	1.232234
54	5.53	0.000474	0.098648	0.025583	-171.52	13.93745	1.381467
57	8.85	0.000758	0.157837	0.043206	-168.52	21.52666	2.462763
60	8.30	0.000711	0.147972	0.042638	-165.52	19.46911	2.558272
63	8.85	0.000758	0.157837	0.047754	-162.52	20.02108	3.008528
66	11.61	0.000995	0.207161	0.065662	-159.52	25.31649	4.333712
69	12.72	0.00109	0.22689	0.075185	-156.52	26.69448	5.187749
72	10.51	0.0009	0.187431	0.06481	-153.52	21.21473	4.666288
75	11.61	0.000995	0.207161	0.074616	-150.52	22.5404	5.596219
78	11.61	0.000995	0.207161	0.077601	-147.52	21.65086	6.052871
81	11.61	0.000995	0.207161	0.080586	-144.52	20.77922	6.52743
84	13.27	0.001137	0.236755	0.095509	-141.52	22.77199	8.02274
87	13.83	0.001184	0.24662	0.103042	-138.52	22.72579	8.964611
90	13.83	0.001184	0.24662	0.106595	-135.52	21.75208	9.593519
93	16.04	0.001374	0.286079	0.127771	-132.52	24.12765	11.88275
96	18.80	0.001611	0.335403	0.154633	-129.52	27.02133	14.8448
99	23.23	0.00199	0.414322	0.196987	-126.52	31.85091	19.50171
102	27.10	0.002321	0.483375	0.236782	-123.52	35.41807	24.15179
105	30.42	0.002606	0.542564	0.273593	-120.52	37.84732	28.72726
108	32.63	0.002795	0.582023	0.301876	-117.52	38.60378	32.60262
111	35.39	0.003032	0.631347	0.336555	-114.52	39.76463	37.35759
114	39.82	0.003411	0.710266	0.388857	-111.52	42.42212	44.32973
117	43.13	0.003695	0.769454	0.432348	-108.52	43.51796	50.58471
120	45.90	0.003932	0.818778	0.471859	-105.52	43.78265	56.62308
123	45.35	0.003885	0.808914	0.477828	-102.52	40.83058	58.77288
126	45.35	0.003885	0.808914	0.489483	-99.5202	38.47593	61.67482
129	45.90	0.003932	0.818778	0.507248	-96.5202	36.63256	65.43505
132	45.90	0.003932	0.818778	0.519045	-93.5202	34.39075	68.51393
135	47.56	0.004074	0.848373	0.550028	-90.5202	33.38429	74.25384
138	47.56	0.004074	0.848373	0.562251	-87.5202	31.20813	77.59068
141	49.22	0.004216	0.877967	0.594514	-84.5202	30.12061	83.82646
144	48.66	0.004169	0.868102	0.600341	-81.5202	27.70549	86.44912
147	49.22	0.004216	0.877967	0.619812	-78.5202	25.99594	91.11242
150	49.77	0.004264	0.887832	0.639568	-75.5202	24.31764	95.93519

ตารางที่ ข-6.4 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 4 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 4						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
153	50.88	0.004359	0.907562	0.666856	-72.5202	22.92232	102.029
156	49.22	0.004216	0.877967	0.65776	-69.5202	20.37815	102.6106
159	50.32	0.004311	0.897697	0.685475	-66.5202	19.07661	108.9905
162	49.77	0.004264	0.887832	0.690733	-63.5202	17.20358	111.8988
165	48.66	0.004169	0.868102	0.687891	-60.5202	15.26989	113.502
168	49.22	0.004216	0.877967	0.708357	-57.5202	13.9503	119.004
171	50.32	0.004311	0.897697	0.737209	-54.5202	12.81471	126.0627
174	48.66	0.004169	0.868102	0.725412	-51.5202	11.06599	126.2217
177	49.22	0.004216	0.877967	0.746305	-48.5202	9.926308	132.0959
180	49.22	0.004216	0.877967	0.758954	-45.5202	8.73677	136.6117
183	48.11	0.004122	0.858238	0.754264	-42.5202	7.451821	138.0303
186	49.22	0.004216	0.877967	0.784252	-39.5202	6.585379	145.8709
189	48.11	0.004122	0.858238	0.778994	-36.5202	5.497156	147.2298
192	48.11	0.004122	0.858238	0.791359	-33.5202	4.631108	151.9409
195	46.45	0.00398	0.828643	0.776009	-30.5202	3.706862	151.3218
198	45.90	0.003932	0.818778	0.778567	-27.5202	2.978061	154.1563
201	45.90	0.003932	0.818778	0.790364	-24.5202	2.364168	158.8631
204	43.69	0.003743	0.779319	0.763502	-21.5202	1.733293	155.7544
207	43.69	0.003743	0.779319	0.77473	-18.5202	1.283721	160.3691
210	43.13	0.003695	0.769454	0.776009	-15.5202	0.890105	162.9619
213	42.03	0.003601	0.749725	0.766913	-12.5202	0.564401	163.3525
216	42.03	0.003601	0.749725	0.777715	-9.52018	0.32633	167.9864
219	44.79	0.003837	0.799049	0.840392	-6.52018	0.163139	184.0459
222	43.69	0.003743	0.779319	0.83087	-3.52018	0.046378	184.4531
225	43.69	0.003743	0.779319	0.842098	-0.52018	0.001013	189.472
228	43.13	0.003695	0.769454	0.842524	2.479818	0.022724	192.0955
231	42.58	0.003648	0.75959	0.842666	5.479818	0.109541	194.6559
234	42.03	0.003601	0.749725	0.842524	8.479818	0.258904	197.1507
237	42.03	0.003601	0.749725	0.853326	11.47982	0.4745	202.2382
240	40.92	0.003506	0.729995	0.841387	14.47982	0.73504	201.9329
243	41.48	0.003553	0.73986	0.863417	17.47982	1.085645	209.8103
246	40.92	0.003506	0.729995	0.862422	20.47982	1.470405	212.1558
249	39.82	0.003411	0.710266	0.849346	23.47982	1.880507	211.4872
252	39.82	0.003411	0.710266	0.859579	26.47982	2.391748	216.614
255	39.26	0.003364	0.700401	0.857732	29.47982	2.923216	218.7216
258	38.16	0.003269	0.680671	0.843377	32.47982	3.448492	217.5912
261	37.60	0.003222	0.670806	0.840819	35.47982	4.055315	219.4537
264	37.60	0.003222	0.670806	0.850483	38.47982	4.770104	224.5276
267	37.05	0.003174	0.660942	0.847499	41.47982	5.461368	226.2821
270	35.95	0.003079	0.641212	0.831438	44.47982	6.092454	224.4883

ตารางที่ ข-6.4 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 4 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 4						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m)) ² *E(t)	t ² *E(t)
273	33.73	0.00289	0.601753	0.788943	47.47982	6.514796	215.3813
276	32.63	0.002795	0.582023	0.771461	50.47982	7.122632	212.9233
279	32.63	0.002795	0.582023	0.779847	53.47982	7.99438	217.5772
282	32.07	0.002748	0.572158	0.774872	56.47982	8.765314	218.5139
285	32.07	0.002748	0.572158	0.783115	59.47982	9.721207	223.1879
288	30.97	0.002653	0.552429	0.76407	62.47982	10.35668	220.0523
291	29.86	0.002558	0.532699	0.744457	65.47982	10.96886	216.637
294	29.86	0.002558	0.532699	0.752132	68.47982	11.99698	221.1268
297	29.31	0.002511	0.522834	0.745736	71.47982	12.82908	221.4837
300	29.31	0.002511	0.522834	0.753269	74.47982	13.92855	225.9807
303	28.76	0.002464	0.51297	0.746447	77.47982	14.78882	226.1734
306	28.76	0.002464	0.51297	0.753837	80.47982	15.95623	230.6742
309	28.20	0.002416	0.503105	0.746589	83.47982	16.83783	230.696
312	28.20	0.002416	0.503105	0.753837	86.47982	18.06977	235.1973
315	27.65	0.002369	0.49324	0.746163	89.47982	18.96588	235.0412
318	27.65	0.002369	0.49324	0.753269	92.47982	20.25895	239.5395
321	27.10	0.002321	0.483375	0.745168	95.47982	21.16275	239.1988
324	27.10	0.002321	0.483375	0.752132	98.47982	22.51352	243.6907
327	26.54	0.002274	0.47351	0.743604	101.4798	23.4182	243.1586
330	25.99	0.002227	0.463646	0.734792	104.4798	24.30612	242.4815
333	25.44	0.002179	0.453781	0.725696	107.4798	25.17472	241.6569
336	24.89	0.002132	0.443916	0.716316	110.4798	26.02144	240.6822
339	23.78	0.002037	0.424186	0.690591	113.4798	26.23364	234.1104
342	23.23	0.00199	0.414322	0.6805	116.4798	26.99626	232.7311
345	22.67	0.001942	0.404457	0.670125	119.4798	27.72847	231.1931
348	22.67	0.001942	0.404457	0.675952	122.4798	29.13841	235.2314
351	22.12	0.001895	0.394592	0.665151	125.4798	29.83738	233.4679
354	22.12	0.001895	0.394592	0.670836	128.4798	31.28115	237.4758
357	21.57	0.001848	0.384727	0.659608	131.4798	31.94006	235.48
360	21.57	0.001848	0.384727	0.665151	134.4798	33.41425	239.4542
363	20.46	0.001753	0.364998	0.636299	137.4798	33.13085	230.9765
366	20.46	0.001753	0.364998	0.641558	140.4798	34.59254	234.8101
369	19.91	0.001706	0.355133	0.629335	143.4798	35.1105	232.2246
372	19.36	0.001658	0.345268	0.616828	146.4798	35.57759	229.4599
375	19.36	0.001658	0.345268	0.621802	149.4798	37.04982	233.1758
378	18.80	0.001611	0.335403	0.608869	152.4798	37.45041	230.1524
381	18.25	0.001563	0.325538	0.595651	155.4798	37.79331	226.943
384	18.25	0.001563	0.325538	0.600341	158.4798	39.26583	230.531
387	17.70	0.001516	0.315674	0.586697	161.4798	39.53115	227.0517
390	17.70	0.001516	0.315674	0.591245	164.4798	41.01362	230.5856

ตารางที่ ข-6.4 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอน จุดวัดที่ 4 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 4						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m)) ² *E(t)	t ² *E(t)
393	17.14	0.001469	0.305809	0.577175	167.4798	41.19453	226.8296
396	17.14	0.001469	0.305809	0.58158	170.4798	42.68355	230.3059
399	16.59	0.001421	0.295944	0.567084	173.4798	42.77323	226.2663
402	14.93	0.001279	0.26635	0.514213	176.4798	39.83885	206.7135
405	13.27	0.001137	0.236755	0.460489	179.4798	36.6265	186.498
408	12.17	0.001042	0.217026	0.425242	182.4798	34.70606	173.4986
411	10.51	0.0009	0.187431	0.369955	185.4798	30.96705	152.0513
414	9.40	0.000805	0.167702	0.333428	188.4798	28.6109	138.0392
417	8.30	0.000711	0.147972	0.296333	191.4798	26.05495	123.5709
420	7.19	0.000616	0.128242	0.25867	194.4798	23.29407	108.6413
423	6.64	0.000569	0.118378	0.240478	197.4798	22.17071	101.722
426	5.53	0.000474	0.098648	0.201819	200.4798	19.0412	85.97499
429	3.87	0.000332	0.069054	0.142268	203.4798	13.73073	61.03312
432	3.87	0.000332	0.069054	0.143263	206.4798	14.13859	61.88971
435	3.32	0.000284	0.059189	0.12365	209.4798	12.47351	53.78766
438	2.77	0.000237	0.049324	0.103752	212.4798	10.69445	45.44343
441	2.21	0.00019	0.039459	0.08357	215.4798	8.798854	36.85446
444	1.66	0.000142	0.029594	0.063104	218.4798	6.784172	28.01819
447	1.11	9.48E-05	0.01973	0.042354	221.4798	4.647841	18.93206
450	0.55	4.74E-05	0.009865	0.021319	224.4798	2.387303	9.593519
453	0.00	0	0	0	227.4798	0	0
456	0.00	0	0	0	230.4798	0	0
459	0.00	0	0	0	233.4798	0	0
462	0.00	0	0	0	236.4798	0	0
465	0.00	0	0	0	239.4798	0	0
468	0.00	0	0	0	242.4798	0	0
471	0.00	0	0	0	245.4798	0	0
474	0.00	0	0	0	248.4798	0	0
477	0.00	0	0	0	251.4798	0	0
480	0.00	0	0	0	254.4798	0	0

ตารางที่ ข-6.5 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและ
แผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 1

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 1						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
0	0.00	0	0	0	-23.2163	0	0
3	44.79	0.003982	0.001327	0.011946	-20.2163	1.627402	0.035837
6	628.76	0.055894	0.01863	0.335365	-17.2163	16.5671	2.012192
9	476.13	0.042326	0.014107	0.380936	-14.2163	8.554266	3.428424
12	405.90	0.036083	0.012026	0.432996	-11.2163	4.539434	5.195949
15	347.84	0.030921	0.010306	0.463819	-8.2163	2.087419	6.957281
18	298.07	0.026497	0.008831	0.476944	-5.2163	0.720975	8.584997
21	252.72	0.022466	0.007488	0.471783	-2.2163	0.110352	9.907433
24	217.88	0.019369	0.006456	0.464851	0.783699	0.011896	11.15643
27	163.14	0.014502	0.004834	0.391554	3.783699	0.207616	10.57197
30	159.82	0.014207	0.004735	0.426212	6.783699	0.653789	12.78635
33	136.59	0.012142	0.004047	0.400698	9.783699	1.162276	13.22304
36	115.58	0.010274	0.003424	0.369875	12.7837	1.679058	13.3155
39	97.33	0.008652	0.002884	0.33743	15.7837	2.155443	13.15977
42	82.40	0.007325	0.002441	0.307639	18.7837	2.584371	12.92085
45	67.47	0.005997	0.001999	0.269885	21.7837	2.845964	12.14482
48	59.17	0.00526	0.001753	0.252483	24.7837	3.230891	12.11916
51	47.01	0.004179	0.001393	0.213106	27.7837	3.225562	10.8684
54	37.60	0.003343	0.001114	0.180513	30.7837	3.167794	9.747714
57	30.42	0.002704	0.000901	0.154115	33.7837	3.085911	8.784534
60	24.89	0.002212	0.000737	0.13273	36.7837	2.993158	7.963819
63	19.36	0.001721	0.000573	0.108396	39.7837	2.723232	6.828975
66	14.93	0.001327	0.000442	0.087602	42.7837	2.429555	5.781732
69	18.25	0.001622	0.000541	0.111936	45.7837	3.400494	7.723577
72	11.61	0.001032	0.000344	0.074329	48.7837	2.45683	5.351686
75	11.61	0.001032	0.000344	0.077426	51.7837	2.768291	5.806951
78	8.30	0.000737	0.000246	0.057516	54.7837	2.213096	4.486285
81	6.64	0.00059	0.000197	0.047783	57.7837	1.969692	3.870416
84	6.08	0.000541	0.00018	0.045423	60.7837	1.997898	3.815554
87	6.08	0.000541	0.00018	0.047046	63.7837	2.199978	4.09296
90	4.42	0.000393	0.000131	0.035395	66.7837	1.754031	3.185527
93	3.87	0.000344	0.000115	0.032003	69.7837	1.675762	2.976256
96	4.42	0.000393	0.000131	0.037754	72.7837	2.083361	3.624422
99	5.53	0.000492	0.000164	0.048668	75.7837	2.823306	4.81811
102	7.74	0.000688	0.000229	0.0702	78.7837	4.271763	7.160358
105	9.95	0.000885	0.000295	0.092911	81.7837	5.91851	9.755678
108	8.85	0.000787	0.000262	0.084947	84.7837	5.653938	9.174319
111	7.74	0.000688	0.000229	0.076394	87.7837	5.303495	8.479697
114	6.08	0.000541	0.00018	0.061646	90.7837	4.456714	7.027628

ตารางที่ ข-6.5 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 1 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 1						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
117	4.98	0.000442	0.000147	0.051765	93.7837	3.891379	6.056484
120	3.32	0.000295	9.83E-05	0.035395	96.7837	2.76288	4.24737
123	1.66	0.000147	4.92E-05	0.01814	99.7837	1.468408	2.231197
126	0.55	4.92E-05	1.64E-05	0.006194	102.7837	0.519344	0.780454
129	0.00	0	0	0	105.7837	0	0
132	0.00	0	0	0	108.7837	0	0
135	0.00	0	0	0	111.7837	0	0
138	0.00	0	0	0	114.7837	0	0
141	0.00	0	0	0	117.7837	0	0
144	0.00	0	0	0	120.7837	0	0
147	0.00	0	0	0	123.7837	0	0
150	0.00	0	0	0	126.7837	0	0
153	0.00	0	0	0	129.7837	0	0
156	0.00	0	0	0	132.7837	0	0
159	0.00	0	0	0	135.7837	0	0
162	0.00	0	0	0	138.7837	0	0
165	0.00	0	0	0	141.7837	0	0
168	0.00	0	0	0	144.7837	0	0
171	0.00	0	0	0	147.7837	0	0
174	0.00	0	0	0	150.7837	0	0
177	0.00	0	0	0	153.7837	0	0
180	0.00	0	0	0	156.7837	0	0
183	0.00	0	0	0	159.7837	0	0
186	0.00	0	0	0	162.7837	0	0
189	0.00	0	0	0	165.7837	0	0
192	0.00	0	0	0	168.7837	0	0
195	0.00	0	0	0	171.7837	0	0
198	0.00	0	0	0	174.7837	0	0
201	0.00	0	0	0	177.7837	0	0
204	0.00	0	0	0	180.7837	0	0
207	0.00	0	0	0	183.7837	0	0
210	0.00	0	0	0	186.7837	0	0
213	0.00	0	0	0	189.7837	0	0
216	0.00	0	0	0	192.7837	0	0
219	0.00	0	0	0	195.7837	0	0
222	0.00	0	0	0	198.7837	0	0
225	0.00	0	0	0	201.7837	0	0
228	0.00	0	0	0	204.7837	0	0
231	0.00	0	0	0	207.7837	0	0

ตารางที่ ข-6.5 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 1 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 1						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
234	0.00	0	0	0	210.7837	0	0
237	0.00	0	0	0	213.7837	0	0
240	0.00	0	0	0	216.7837	0	0
243	0.00	0	0	0	219.7837	0	0
246	0.00	0	0	0	222.7837	0	0
249	0.00	0	0	0	225.7837	0	0
252	0.00	0	0	0	228.7837	0	0
255	0.00	0	0	0	231.7837	0	0
258	0.00	0	0	0	234.7837	0	0
261	0.00	0	0	0	237.7837	0	0
264	0.00	0	0	0	240.7837	0	0
267	0.00	0	0	0	243.7837	0	0
270	0.00	0	0	0	246.7837	0	0
273	0.00	0	0	0	249.7837	0	0
276	0.00	0	0	0	252.7837	0	0
279	0.00	0	0	0	255.7837	0	0
282	0.00	0	0	0	258.7837	0	0
285	0.00	0	0	0	261.7837	0	0
288	0.00	0	0	0	264.7837	0	0
291	0.00	0	0	0	267.7837	0	0
294	0.00	0	0	0	270.7837	0	0
297	0.00	0	0	0	273.7837	0	0
300	0.00	0	0	0	276.7837	0	0
303	0.00	0	0	0	279.7837	0	0
306	0.00	0	0	0	282.7837	0	0
309	0.00	0	0	0	285.7837	0	0
312	0.00	0	0	0	288.7837	0	0
315	0.00	0	0	0	291.7837	0	0
318	0.00	0	0	0	294.7837	0	0
321	0.00	0	0	0	297.7837	0	0
324	0.00	0	0	0	300.7837	0	0
327	0.00	0	0	0	303.7837	0	0
330	0.00	0	0	0	306.7837	0	0
333	0.00	0	0	0	309.7837	0	0
336	0.00	0	0	0	312.7837	0	0
339	0.00	0	0	0	315.7837	0	0
342	0.00	0	0	0	318.7837	0	0
345	0.00	0	0	0	321.7837	0	0
348	0.00	0	0	0	324.7837	0	0

ตารางที่ ข-6.5 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 1 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 1						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
351	0.00	0	0	0	327.7837	0	0
354	0.00	0	0	0	330.7837	0	0
357	0.00	0	0	0	333.7837	0	0
360	0.00	0	0	0	336.7837	0	0
363	0.00	0	0	0	339.7837	0	0
366	0.00	0	0	0	342.7837	0	0
369	0.00	0	0	0	345.7837	0	0
372	0.00	0	0	0	348.7837	0	0
375	0.00	0	0	0	351.7837	0	0
378	0.00	0	0	0	354.7837	0	0
381	0.00	0	0	0	357.7837	0	0
384	0.00	0	0	0	360.7837	0	0
387	0.00	0	0	0	363.7837	0	0
390	0.00	0	0	0	366.7837	0	0
393	0.00	0	0	0	369.7837	0	0
396	0.00	0	0	0	372.7837	0	0
399	0.00	0	0	0	375.7837	0	0
402	0.00	0	0	0	378.7837	0	0
405	0.00	0	0	0	381.7837	0	0
408	0.00	0	0	0	384.7837	0	0
411	0.00	0	0	0	387.7837	0	0
414	0.00	0	0	0	390.7837	0	0
417	0.00	0	0	0	393.7837	0	0
420	0.00	0	0	0	396.7837	0	0
423	0.00	0	0	0	399.7837	0	0
426	0.00	0	0	0	402.7837	0	0
429	0.00	0	0	0	405.7837	0	0
432	0.00	0	0	0	408.7837	0	0
435	0.00	0	0	0	411.7837	0	0
438	0.00	0	0	0	414.7837	0	0
441	0.00	0	0	0	417.7837	0	0
444	0.00	0	0	0	420.7837	0	0
447	0.00	0	0	0	423.7837	0	0
450	0.00	0	0	0	426.7837	0	0
453	0.00	0	0	0	429.7837	0	0
456	0.00	0	0	0	432.7837	0	0
459	0.00	0	0	0	435.7837	0	0
462	0.00	0	0	0	438.7837	0	0
465	0.00	0	0	0	441.7837	0	0

ตารางที่ ข-6.5 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 1 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 1						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
468	0.00	0	0	0	444.7837	0	0
471	0.00	0	0	0	447.7837	0	0
474	0.00	0	0	0	450.7837	0	0
477	0.00	0	0	0	453.7837	0	0
480	0.00	0	0	0	456.7837	0	0

ตารางที่ ข-6.6 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 2

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 2						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
0	0.00	0	0	0	-44.629	0	0
3	2.21	0.000204	0.006459	0.000611	-41.629	0.353056	0.001834
6	4.42	0.000407	0.012918	0.002445	-38.629	0.608007	0.014668
9	50.88	0.004686	0.148563	0.042172	-35.629	5.948214	0.379546
12	339.54	0.031272	0.991494	0.375267	-32.629	33.29411	4.503209
15	345.07	0.031782	1.007642	0.476724	-29.629	27.90038	7.150861
18	287.01	0.026434	0.838087	0.475807	-26.629	18.74427	8.564531
21	267.65	0.024651	0.781569	0.517673	-23.629	13.76346	10.87114
24	243.32	0.02241	0.710517	0.537843	-20.629	9.536757	12.90822
27	214.56	0.019762	0.626547	0.533564	-17.629	6.141562	14.40623
30	145.99	0.013446	0.42631	0.403382	-14.629	2.877565	12.10146
33	154.84	0.014261	0.452147	0.470612	-11.629	1.928567	15.5302
36	145.99	0.013446	0.42631	0.484058	-8.62901	1.001192	17.4261
39	115.58	0.010645	0.337496	0.415147	-5.62901	0.337289	16.19074
42	101.75	0.009371	0.297125	0.393603	-2.62901	0.064773	16.53132
45	88.48	0.008149	0.25837	0.366711	0.370989	0.001122	16.50199
48	81.29	0.007487	0.237377	0.359377	3.370989	0.085079	17.25008
51	70.23	0.006468	0.205081	0.329887	6.370989	0.262548	16.82423
54	64.15	0.005908	0.187318	0.319038	9.370989	0.518824	17.22807
57	54.75	0.005042	0.159866	0.28741	12.37099	0.771676	16.38235
60	45.35	0.004176	0.132415	0.250586	15.37099	0.986754	15.03514
63	38.71	0.003565	0.113037	0.22461	18.37099	1.203246	14.15045
66	44.24	0.004075	0.129185	0.268921	21.37099	1.860932	17.7488
69	43.69	0.004024	0.12757	0.277631	24.37099	2.389817	19.15651
72	40.92	0.003769	0.119496	0.271366	27.37099	2.823605	19.53835

ตารางที่ ข-6.6 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและ
แผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 2 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 2						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
75	33.18	0.003056	0.096889	0.229194	30.37099	2.818775	17.18957
78	33.18	0.003056	0.096889	0.238362	33.37099	3.403146	18.59224
81	32.07	0.002954	0.093659	0.239279	36.37099	3.907774	19.38158
84	29.86	0.00275	0.0872	0.231028	39.37099	4.263219	19.40634
87	29.86	0.00275	0.0872	0.239279	42.37099	4.937671	20.81726
90	27.10	0.002496	0.079126	0.22461	45.37099	5.137405	20.21493
93	29.86	0.00275	0.0872	0.255781	48.37099	6.435094	23.78761
96	32.63	0.003005	0.095274	0.288479	51.37099	7.930108	27.694
99	29.31	0.002699	0.085585	0.267241	54.37099	7.979975	26.45681
102	30.42	0.002801	0.088815	0.285729	57.37099	9.220163	29.14434
105	27.10	0.002496	0.079126	0.262045	60.37099	9.095862	27.51477
108	25.44	0.002343	0.074281	0.25303	63.37099	9.408709	27.32729
111	24.89	0.002292	0.072666	0.254406	66.37099	10.09625	28.23902
114	22.12	0.002037	0.064592	0.23225	69.37099	9.804083	26.47652
117	21.57	0.001986	0.062978	0.232403	72.37099	10.40363	27.19115
120	19.91	0.001834	0.058133	0.220026	75.37099	10.41603	26.40318
123	21.57	0.001986	0.062978	0.244321	78.37099	12.20019	30.05149
126	16.59	0.001528	0.048444	0.192523	81.37099	10.117	24.25792
129	15.48	0.001426	0.045215	0.183967	84.37099	10.15162	23.73169
132	13.27	0.001222	0.038755	0.161353	87.37099	9.331188	21.29856
135	12.17	0.001121	0.035526	0.151268	90.37099	9.151072	20.42121
138	11.06	0.001019	0.032296	0.140572	93.37099	8.880658	19.399
141	9.40	0.000866	0.027452	0.122084	96.37099	8.04142	17.21386
144	12.17	0.001121	0.035526	0.161353	99.37099	11.06453	23.2348
147	11.06	0.001019	0.032296	0.14974	102.371	10.67518	22.01182
150	10.51	0.000968	0.030681	0.145156	105.371	10.74452	21.77345
153	9.95	0.000917	0.029067	0.140267	108.371	10.76688	21.46083
156	9.40	0.000866	0.027452	0.135072	111.371	10.73951	21.0712
159	8.30	0.000764	0.024222	0.121473	114.371	9.993422	19.3142
162	7.19	0.000662	0.020993	0.107263	117.371	9.121286	17.37659
165	6.64	0.000611	0.019378	0.100845	120.371	8.855562	16.6395
168	6.08	0.00056	0.017763	0.094122	123.371	8.52727	15.81257
171	5.53	0.000509	0.016148	0.087094	126.371	8.133659	14.89304
174	4.98	0.000458	0.014533	0.07976	129.371	7.671981	13.87817
177	3.87	0.000357	0.011304	0.063105	132.371	6.247049	11.16955
180	3.32	0.000306	0.009689	0.055007	135.371	5.600073	9.901192
183	2.76	0.000255	0.008074	0.046603	138.371	4.875861	8.528318
186	2.21	0.000204	0.006459	0.037893	141.371	4.071663	7.048182

ตารางที่ ข-6.6 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและ
แผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 2 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 2						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
189	1.66	0.000153	0.004844	0.028878	144.371	3.184728	5.458032
192	0.55	5.09E-05	0.001615	0.009779	147.371	1.106153	1.877559
195	0.55	5.09E-05	0.001615	0.009932	150.371	1.151647	1.936691
198	0.00	0	0	0	153.371	0	0
201	0.00	0	0	0	156.371	0	0
204	0.00	0	0	0	159.371	0	0
207	0.00	0	0	0	162.371	0	0
210	0.00	0	0	0	165.371	0	0
213	0.00	0	0	0	168.371	0	0
216	0.00	0	0	0	171.371	0	0
219	0.00	0	0	0	174.371	0	0
222	0.00	0	0	0	177.371	0	0
225	0.00	0	0	0	180.371	0	0
228	0.00	0	0	0	183.371	0	0
231	0.00	0	0	0	186.371	0	0
234	0.00	0	0	0	189.371	0	0
237	0.00	0	0	0	192.371	0	0
240	0.00	0	0	0	195.371	0	0
243	0.00	0	0	0	198.371	0	0
246	0.00	0	0	0	201.371	0	0
249	0.00	0	0	0	204.371	0	0
252	0.00	0	0	0	207.371	0	0
255	0.00	0	0	0	210.371	0	0
258	0.00	0	0	0	213.371	0	0
261	0.00	0	0	0	216.371	0	0
264	0.00	0	0	0	219.371	0	0
267	0.00	0	0	0	222.371	0	0
270	0.00	0	0	0	225.371	0	0
273	0.00	0	0	0	228.371	0	0
276	0.00	0	0	0	231.371	0	0
279	0.00	0	0	0	234.371	0	0
282	0.00	0	0	0	237.371	0	0
285	0.00	0	0	0	240.371	0	0
288	0.00	0	0	0	243.371	0	0
291	0.00	0	0	0	246.371	0	0
294	0.00	0	0	0	249.371	0	0
297	0.00	0	0	0	252.371	0	0
300	0.00	0	0	0	255.371	0	0

ตารางที่ ข-6.6 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและ
แผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 2 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 2						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
303	0.00	0	0	0	0	258.371	0
306	0.00	0	0	0	0	261.371	0
309	0.00	0	0	0	0	264.371	0
312	0.00	0	0	0	0	267.371	0
315	0.00	0	0	0	0	270.371	0
318	0.00	0	0	0	0	273.371	0
321	0.00	0	0	0	0	276.371	0
324	0.00	0	0	0	0	279.371	0
327	0.00	0	0	0	0	282.371	0
330	0.00	0	0	0	0	285.371	0
333	0.00	0	0	0	0	288.371	0
336	0.00	0	0	0	0	291.371	0
339	0.00	0	0	0	0	294.371	0
342	0.00	0	0	0	0	297.371	0
345	0.00	0	0	0	0	300.371	0
348	0.00	0	0	0	0	303.371	0
351	0.00	0	0	0	0	306.371	0
354	0.00	0	0	0	0	309.371	0
357	0.00	0	0	0	0	312.371	0
360	0.00	0	0	0	0	315.371	0
363	0.00	0	0	0	0	318.371	0
366	0.00	0	0	0	0	321.371	0
369	0.00	0	0	0	0	324.371	0
372	0.00	0	0	0	0	327.371	0
375	0.00	0	0	0	0	330.371	0
378	0.00	0	0	0	0	333.371	0
381	0.00	0	0	0	0	336.371	0
384	0.00	0	0	0	0	339.371	0
387	0.00	0	0	0	0	342.371	0
390	0.00	0	0	0	0	345.371	0
393	0.00	0	0	0	0	348.371	0
396	0.00	0	0	0	0	351.371	0
399	0.00	0	0	0	0	354.371	0
402	0.00	0	0	0	0	357.371	0
405	0.00	0	0	0	0	360.371	0
408	0.00	0	0	0	0	363.371	0
411	0.00	0	0	0	0	366.371	0
414	0.00	0	0	0	0	369.371	0

ตารางที่ ข-6.6 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 2 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 2						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m)) ² *E(t)	t ² *E(t)
417	0.00	0	0	0	372.371	0	0
420	0.00	0	0	0	375.371	0	0
423	0.00	0	0	0	378.371	0	0
426	0.00	0	0	0	381.371	0	0
429	0.00	0	0	0	384.371	0	0
432	0.00	0	0	0	387.371	0	0
435	0.00	0	0	0	390.371	0	0
438	0.00	0	0	0	393.371	0	0
441	0.00	0	0	0	396.371	0	0
444	0.00	0	0	0	399.371	0	0
447	0.00	0	0	0	402.371	0	0
450	0.00	0	0	0	405.371	0	0
453	0.00	0	0	0	408.371	0	0
456	0.00	0	0	0	411.371	0	0
459	0.00	0	0	0	414.371	0	0
462	0.00	0	0	0	417.371	0	0
465	0.00	0	0	0	420.371	0	0
468	0.00	0	0	0	423.371	0	0
471	0.00	0	0	0	426.371	0	0
474	0.00	0	0	0	429.371	0	0
477	0.00	0	0	0	432.371	0	0
480	0.00	0	0	0	435.371	0	0

ตารางที่ ข-6.7 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 3

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 3						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m)) ² *E(t)	t ² *E(t)
0	0.00	0	0	0	-184.889	0	0
3	0.00	0	0	0	-181.889	0	0
6	0.00	0	0	0	-178.889	0	0
9	0.00	0	0	0	-175.889	0	0
12	0.00	0	0	0	-172.889	0	0
15	0.00	0	0	0	-169.889	0	0
18	0.00	0	0	0	-166.889	0	0
21	0.00	0	0	0	-163.889	0	0

ตารางที่ ข-6.7 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและ
แผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 3 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 3						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
24	0.55	4.17E-05	0.004056	0.001001	-160.889	1.079546	0.024022
27	7.19	0.000542	0.05273	0.014638	-157.889	13.5156	0.395237
30	37.60	0.002836	0.275817	0.085078	-154.889	68.03594	2.55234
33	29.31	0.00221	0.214975	0.072942	-151.889	50.99374	2.407081
36	28.76	0.002169	0.210919	0.078072	-148.889	48.07474	2.810576
39	61.38	0.004629	0.45023	0.18054	-145.889	98.52728	7.041079
42	70.23	0.005297	0.515129	0.222454	-142.889	108.1408	9.343064
45	75.21	0.005672	0.551634	0.255234	-139.889	110.9927	11.48553
48	77.42	0.005839	0.567858	0.280257	-136.889	109.4092	13.45233
51	75.21	0.005672	0.551634	0.289265	-133.889	101.6757	14.75252
54	72.44	0.005463	0.531353	0.29502	-130.889	93.59792	15.9311
57	65.81	0.004963	0.48268	0.282884	-127.889	81.1712	16.12441
60	64.15	0.004838	0.470511	0.290266	-124.889	75.45622	17.41596
63	62.49	0.004713	0.458343	0.296897	-121.889	70.01582	18.70452
66	56.41	0.004254	0.413725	0.280757	-118.889	60.12738	18.52999
69	54.75	0.004129	0.401557	0.284886	-115.889	55.45088	19.65714
72	54.19	0.004087	0.397501	0.29427	-112.889	52.08566	21.18742
75	44.79	0.003378	0.328547	0.253357	-109.889	40.79269	19.00179
78	49.22	0.003712	0.360996	0.289515	-106.889	42.40772	22.5822
81	47.56	0.003587	0.348827	0.290516	-103.889	38.7103	23.53182
84	46.45	0.003503	0.340715	0.29427	-100.889	35.65792	24.71866
87	45.90	0.003462	0.336659	0.301151	-97.8892	33.1692	26.20014
90	47.01	0.003545	0.344771	0.319042	-94.8892	31.91831	28.71382
93	45.35	0.00342	0.332603	0.318042	-91.8892	28.87554	29.57786
96	40.92	0.003086	0.300154	0.296272	-88.8892	24.38468	28.44207
99	40.37	0.003044	0.296098	0.301401	-85.8892	22.45884	29.83873
102	38.16	0.002878	0.279873	0.293519	-82.8892	19.77117	29.93894
105	37.05	0.002794	0.271761	0.293394	-79.8892	17.83357	30.80636
108	39.26	0.002961	0.287985	0.319793	-76.8892	17.50558	34.53766
111	43.69	0.003295	0.320434	0.36571	-73.8892	17.98773	40.59384
114	41.48	0.003128	0.30421	0.356577	-70.8892	15.71842	40.64976
117	40.92	0.003086	0.300154	0.361081	-67.8892	14.22396	42.24648
120	40.37	0.003044	0.296098	0.365335	-64.8892	12.81903	43.84019
123	40.37	0.003044	0.296098	0.374468	-61.8892	11.66112	46.0596
126	39.82	0.003003	0.292041	0.378347	-58.8892	10.41337	47.6717
129	39.82	0.003003	0.292041	0.387355	-55.8892	9.379416	49.9688
132	40.37	0.003044	0.296098	0.401868	-52.8892	8.516172	53.04663
135	40.92	0.003086	0.300154	0.416632	-49.8892	7.681259	56.24531

ตารางที่ ข-6.7 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและ
ผ่านขนานเอียง จุดวัดที่ 3 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 3						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m)) ² *E(t)	t ² *E(t)
138	40.92	0.003086	0.300154	0.42589	-46.8892	6.785237	58.77288
141	40.37	0.003044	0.296098	0.429268	-43.8892	5.864431	60.52686
144	40.92	0.003086	0.300154	0.444407	-40.8892	5.159845	63.99466
147	40.37	0.003044	0.296098	0.447535	-37.8892	4.370604	65.78768
150	40.37	0.003044	0.296098	0.456669	-34.8892	3.705892	68.50029
153	40.37	0.003044	0.296098	0.465802	-31.8892	3.095979	71.2677
156	39.82	0.003003	0.292041	0.468429	-28.8892	2.50606	73.07499
159	38.71	0.002919	0.283929	0.464175	-25.8892	1.956696	73.8039
162	38.16	0.002878	0.279873	0.466177	-22.8892	1.507643	75.52073
165	38.16	0.002878	0.279873	0.47481	-19.8892	1.13834	78.34369
168	37.60	0.002836	0.275817	0.476437	-16.8892	0.808939	80.04137
171	37.05	0.002794	0.271761	0.477813	-13.8892	0.539037	81.70602
174	36.50	0.002753	0.267705	0.478939	-10.8892	0.326381	83.33539
177	36.50	0.002753	0.267705	0.487197	-7.88923	0.171317	86.2338
180	36.50	0.002753	0.267705	0.495454	-4.88923	0.065798	89.18175
183	35.95	0.002711	0.263648	0.49608	-1.88923	0.009675	90.78259
186	35.95	0.002711	0.263648	0.504212	1.110768	0.003345	93.78347
189	35.39	0.002669	0.259592	0.504462	4.110768	0.045104	95.3434
192	35.39	0.002669	0.259592	0.51247	7.110768	0.134958	98.39419
195	34.84	0.002627	0.255536	0.512345	10.11077	0.268594	99.90721
198	35.39	0.002669	0.259592	0.528484	13.11077	0.4588	104.6399
201	35.95	0.002711	0.263648	0.544874	16.11077	0.703611	109.5198
204	35.95	0.002711	0.263648	0.553007	19.11077	0.990049	112.8134
207	35.95	0.002711	0.263648	0.561139	22.11077	1.325281	116.1559
210	35.95	0.002711	0.263648	0.569272	25.11077	1.709308	119.5471
213	35.95	0.002711	0.263648	0.577404	28.11077	2.14213	122.9871
216	35.39	0.002669	0.259592	0.576528	31.11077	2.583381	124.5302
219	34.84	0.002627	0.255536	0.575402	34.11077	3.057107	126.0131
222	34.84	0.002627	0.255536	0.583285	37.11077	3.618491	129.4892
225	34.29	0.002586	0.25148	0.581783	40.11077	4.160071	130.9012
228	33.73	0.002544	0.247424	0.580032	43.11077	4.728119	132.2472
231	33.18	0.002502	0.243368	0.57803	46.11077	5.320384	133.5249
234	33.18	0.002502	0.243368	0.585537	49.11077	6.035201	137.0156
237	33.18	0.002502	0.243368	0.593044	52.11077	6.795059	140.5513
240	33.18	0.002502	0.243368	0.600551	55.11077	7.599959	144.1321
243	32.63	0.002461	0.239312	0.597923	58.11077	8.309068	145.2953
246	32.63	0.002461	0.239312	0.605305	61.11077	9.189133	148.905
249	32.63	0.002461	0.239312	0.612687	64.11077	10.11349	152.559

ตารางที่ ข-6.7 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและ
แผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 3 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 3						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
252	32.07	0.002419	0.235256	0.609559	67.11077	10.8943	153.6088
255	32.07	0.002419	0.235256	0.616815	70.11077	11.89007	157.2879
258	31.52	0.002377	0.231199	0.613312	73.11077	12.70646	158.2345
261	31.52	0.002377	0.231199	0.620444	76.11077	13.77064	161.9358
264	30.97	0.002335	0.227143	0.616565	79.11077	14.6166	162.7732
267	30.42	0.002294	0.223087	0.612436	82.11077	15.465	163.5205
270	30.42	0.002294	0.223087	0.619318	85.11077	16.6157	167.2158
273	29.86	0.002252	0.219031	0.614814	88.11077	17.48392	167.8441
276	29.31	0.00221	0.214975	0.610059	91.11077	18.34857	168.3763
279	28.76	0.002169	0.210919	0.605055	94.11077	19.20742	168.8102
282	28.20	0.002127	0.206863	0.5998	97.11077	20.0582	169.1435
285	27.10	0.002044	0.19875	0.582409	100.1108	20.4807	165.9865
288	25.99	0.00196	0.190638	0.564517	103.1108	20.83977	162.581
291	25.44	0.001918	0.186582	0.558262	106.1108	21.6005	162.4542
294	25.44	0.001918	0.186582	0.564017	109.1108	22.83916	165.821
297	25.44	0.001918	0.186582	0.569772	112.1108	24.11235	169.2224
300	24.89	0.001877	0.182526	0.563016	115.1108	24.86746	168.9048
303	24.89	0.001877	0.182526	0.568646	118.1108	26.18054	172.2998
306	24.89	0.001877	0.182526	0.574276	121.1108	27.52739	175.7286
309	24.33	0.001835	0.17847	0.56702	124.1108	28.26563	175.2091
312	24.33	0.001835	0.17847	0.572525	127.1108	29.64861	178.6277
315	24.33	0.001835	0.17847	0.57803	130.1108	31.06463	182.0794
318	23.78	0.001793	0.174414	0.570273	133.1108	31.77473	181.3467
321	23.78	0.001793	0.174414	0.575653	136.1108	33.22312	184.7845
324	23.78	0.001793	0.174414	0.581033	139.1108	34.7038	188.2546
327	23.78	0.001793	0.174414	0.586413	142.1108	36.21675	191.7569
330	23.78	0.001793	0.174414	0.591792	145.1108	37.76198	195.2915
333	23.23	0.001752	0.170357	0.583285	148.1108	38.42462	194.2338
336	23.23	0.001752	0.170357	0.588539	151.1108	39.99698	197.7493
339	22.67	0.00171	0.166301	0.579656	154.1108	40.61036	196.5035
342	22.67	0.00171	0.166301	0.584786	157.1108	42.20684	199.9968
345	22.12	0.001668	0.162245	0.575528	160.1108	42.76496	198.557
348	21.57	0.001626	0.158189	0.566019	163.1108	43.27299	196.9746
351	21.01	0.001585	0.154133	0.55626	166.1108	43.72866	195.2472
354	21.01	0.001585	0.154133	0.561014	169.1108	45.32243	198.599
357	20.46	0.001543	0.150077	0.55088	172.1108	45.70933	196.6642
360	20.46	0.001543	0.150077	0.555509	175.1108	47.3167	199.9833
363	19.91	0.001501	0.146021	0.545	178.1108	47.62883	197.8348

ตารางที่ ข-6.7 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและ
แผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 3 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 3						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m)) ² *E(t)	t ² *E(t)
366	19.91	0.001501	0.146021	0.549504	181.1108	49.24681	201.1184
369	19.36	0.00146	0.141965	0.538619	184.1108	49.47815	198.7503
372	18.80	0.001418	0.137908	0.527484	187.1108	49.64363	196.2239
375	18.25	0.001376	0.133852	0.516098	190.1108	49.74099	193.5368
378	18.25	0.001376	0.133852	0.520227	193.1108	51.32323	196.6458
381	17.70	0.001335	0.129796	0.508466	196.1108	51.32629	193.7256
384	17.14	0.001293	0.12574	0.496455	199.1108	51.25524	190.6388
387	17.14	0.001293	0.12574	0.500334	202.1108	52.8114	193.6291
390	16.59	0.001251	0.121684	0.487947	205.1108	52.63628	190.2994
393	16.04	0.001209	0.117628	0.475311	208.1108	52.38104	186.7971
396	16.04	0.001209	0.117628	0.478939	211.1108	53.90212	189.6599
399	15.48	0.001168	0.113572	0.465927	214.1108	53.53306	185.9049
402	13.83	0.001043	0.101403	0.419134	217.1108	49.14618	168.492
405	11.61	0.000876	0.085179	0.3547	220.1108	42.43155	143.6536
408	10.51	0.000792	0.077066	0.323296	223.1108	39.44407	131.9049
411	8.85	0.000667	0.064898	0.274251	226.1108	34.11533	112.7173
414	6.64	0.0005	0.048674	0.20719	229.1108	26.26995	85.77663
417	4.98	0.000375	0.036505	0.156518	232.1108	20.22181	65.2682
420	5.53	0.000417	0.040561	0.175161	235.1108	23.05325	73.56744
423	4.42	0.000334	0.032449	0.141129	238.1108	18.91625	59.69772
426	3.87	0.000292	0.028393	0.124364	241.1108	16.97142	52.97906
429	3.32	0.00025	0.024337	0.107348	244.1108	14.91119	46.05246
432	2.21	0.000167	0.016225	0.072066	247.1108	10.18663	31.13254
435	1.66	0.000125	0.012168	0.054425	250.1108	7.826599	23.67483
438	1.11	8.34E-05	0.008112	0.036533	253.1108	5.343653	16.00167
441	1.11	8.34E-05	0.008112	0.036784	256.1108	5.471076	16.22162
444	0.55	4.17E-05	0.004056	0.018517	259.1108	2.8	8.221536
447	0.55	4.17E-05	0.004056	0.018642	262.1108	2.865212	8.333014
450	0.55	4.17E-05	0.004056	0.018767	265.1108	2.931175	8.445241
453	0.55	4.17E-05	0.004056	0.018892	268.1108	2.997889	8.55822
456	0.00	0	0	0	271.1108	0	0
459	0.00	0	0	0	274.1108	0	0
462	0.00	0	0	0	277.1108	0	0
465	0.00	0	0	0	280.1108	0	0
468	0.00	0	0	0	283.1108	0	0
471	0.00	0	0	0	286.1108	0	0
474	0.00	0	0	0	289.1108	0	0
477	0.00	0	0	0	292.1108	0	0

ตารางที่ ข-6.7 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 3 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 3						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
480	0.00	0	0	0	295.1108	0	0

ตารางที่ ข-6.8 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 4

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 4						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
0	0.00	0	0	0	-200.581	0	0
3	0.00	0	0	0	-197.581	0	0
6	0.00	0	0	0	-194.581	0	0
9	0.00	0	0	0	-191.581	0	0
12	0.00	0	0	0	-188.581	0	0
15	0.00	0	0	0	-185.581	0	0
18	0.00	0	0	0	-182.581	0	0
21	0.55	7E-05	0.014578	0.00147	-179.581	2.25773	0.030874
24	0.55	7E-05	0.014578	0.00168	-176.581	2.182927	0.040325
27	0.55	7E-05	0.014578	0.00189	-173.581	2.109384	0.051036
30	0.55	7E-05	0.014578	0.0021	-170.581	2.037101	0.063008
33	1.11	0.00014	0.029155	0.004621	-167.581	3.932157	0.152478
36	1.11	0.00014	0.029155	0.005041	-164.581	3.792632	0.181462
39	1.11	0.00014	0.029155	0.005461	-161.581	3.655627	0.212966
42	1.66	0.00021	0.043733	0.008821	-158.581	5.281714	0.370484
45	2.21	0.00028	0.05831	0.012602	-155.581	6.778357	0.567068
48	2.76	0.00035	0.072888	0.016802	-152.581	8.149337	0.806497
51	2.76	0.00035	0.072888	0.017852	-149.581	7.832028	0.910459
54	2.76	0.00035	0.072888	0.018902	-146.581	7.52102	1.020722
57	3.87	0.00049	0.102043	0.027933	-143.581	10.10284	1.592201
60	4.42	0.00056	0.116621	0.033604	-140.581	11.06865	2.016242
63	6.64	0.00084	0.174931	0.052926	-137.581	15.90192	3.33436
66	9.40	0.00119	0.247819	0.078549	-134.581	21.55599	5.184262
69	12.17	0.00154	0.320707	0.106273	-131.581	26.66617	7.33282
72	14.38	0.00182	0.379017	0.131056	-128.581	30.0939	9.436012
75	16.59	0.0021	0.437327	0.157519	-125.581	33.12232	11.81392
78	20.46	0.00259	0.539371	0.202044	-122.581	38.92241	15.75945
81	28.76	0.00364	0.758034	0.294875	-119.581	52.05703	23.88491

ตารางที่ ข-6.8 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและ
แผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 4 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 4						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
84	32.07	0.00406	0.8455	0.341081	-116.581	55.18681	28.6508
87	29.31	0.00371	0.772612	0.322809	-113.581	47.86731	28.08436
90	32.63	0.00413	0.860077	0.371745	-110.581	50.50854	33.45701
93	36.50	0.004621	0.96212	0.429712	-107.581	53.47699	39.96318
96	38.71	0.004901	1.020431	0.470456	-104.581	53.59886	45.16382
99	40.92	0.005181	1.078741	0.512882	-101.581	53.4575	50.77527
102	45.90	0.005811	1.209939	0.592691	-98.5812	56.46984	60.45449
105	45.35	0.005741	1.195362	0.602772	-95.5812	52.4456	63.29109
108	44.24	0.005601	1.166207	0.604873	-92.5812	48.00493	65.32624
111	41.48	0.005251	1.093319	0.58282	-89.5812	42.13522	64.69301
114	39.82	0.005041	1.049586	0.574629	-86.5812	37.78592	65.5077
117	39.26	0.004971	1.035008	0.58156	-83.5812	34.72369	68.0425
120	39.26	0.004971	1.035008	0.596472	-80.5812	32.27573	71.57659
123	39.26	0.004971	1.035008	0.611383	-77.5812	29.91725	75.20015
126	39.26	0.004971	1.035008	0.626295	-74.5812	27.64823	78.91319
129	39.26	0.004971	1.035008	0.641207	-71.5812	25.46869	82.7157
132	39.26	0.004971	1.035008	0.656119	-68.5812	23.37862	86.60767
135	39.26	0.004971	1.035008	0.671031	-65.5812	21.37801	90.58912
138	39.26	0.004971	1.035008	0.685942	-62.5812	19.46688	94.66004
141	38.71	0.004901	1.020431	0.690983	-59.5812	17.3967	97.42859
144	38.71	0.004901	1.020431	0.705685	-56.5812	15.68891	101.6186
147	38.16	0.004831	1.005853	0.710095	-53.5812	13.86833	104.384
150	37.05	0.004691	0.976698	0.703584	-50.5812	12.00061	105.5377
153	37.05	0.004691	0.976698	0.717656	-47.5812	10.6193	109.8014
156	36.50	0.004621	0.96212	0.720806	-44.5812	9.183279	112.4458
159	35.39	0.004481	0.932965	0.712405	-41.5812	7.746836	113.2725
162	35.39	0.004481	0.932965	0.725847	-38.5812	6.669324	117.5872
165	34.29	0.004341	0.90381	0.716186	-35.5812	5.495197	118.1707
168	34.29	0.004341	0.90381	0.729208	-32.5812	4.607616	122.5069
171	33.73	0.004271	0.889233	0.730258	-29.5812	3.736903	124.8741
174	33.18	0.004201	0.874655	0.730888	-26.5812	2.967911	127.1745
177	31.52	0.00399	0.830922	0.706315	-23.5812	2.218999	125.0177
180	30.42	0.00385	0.801767	0.693083	-20.5812	1.631003	124.755
183	27.65	0.0035	0.728879	0.640577	-17.5812	1.081976	117.2256
186	28.76	0.00364	0.758034	0.677121	-14.5812	0.773999	125.9446
189	28.76	0.00364	0.758034	0.688043	-11.5812	0.488271	130.04
192	28.20	0.00357	0.743457	0.685522	-8.58121	0.262916	131.6203
195	27.65	0.0035	0.728879	0.682582	-5.58121	0.109038	133.1035

ตารางที่ ข-6.8 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและ
แผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 4 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 4						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m))^2*E(t)	t^2*E(t)
198	27.65	0.0035	0.728879	0.693083	-2.58121	0.023322	137.2305
201	26.54	0.00336	0.699724	0.675441	0.41879	0.000589	135.7637
204	25.44	0.00322	0.670569	0.656959	3.41879	0.03764	134.0196
207	24.89	0.00315	0.655991	0.652128	6.41879	0.129798	134.9905
210	24.89	0.00315	0.655991	0.661579	9.41879	0.279481	138.9317
213	24.33	0.00308	0.641414	0.656119	12.41879	0.475074	139.7533
216	24.33	0.00308	0.641414	0.66536	15.41879	0.732324	143.7177
219	23.78	0.00301	0.626836	0.659269	18.41879	1.021271	144.3799
222	24.89	0.00315	0.655991	0.699384	21.41879	1.445282	155.2632
225	23.23	0.00294	0.612258	0.661579	24.41879	1.753266	148.8554
228	22.67	0.00287	0.597681	0.654439	27.41879	2.157896	149.212
231	22.12	0.0028	0.583103	0.646878	30.41879	2.591159	149.4287
234	21.01	0.00266	0.553948	0.622515	33.41879	2.971086	145.6684
237	19.91	0.00252	0.524793	0.597312	36.41879	3.342748	141.5629
240	20.46	0.00259	0.539371	0.621675	39.41879	4.024931	149.2019
243	20.46	0.00259	0.539371	0.629446	42.41879	4.660886	152.9553
246	18.80	0.00238	0.495638	0.58555	45.41879	4.910212	144.0454
249	19.36	0.00245	0.510215	0.610123	48.41879	5.744418	151.9207
252	18.80	0.00238	0.495638	0.599832	51.41879	6.293218	151.1577
255	17.70	0.00224	0.466483	0.571269	54.41879	6.634343	145.6735
258	17.70	0.00224	0.466483	0.577989	57.41879	7.385981	149.1213
261	16.59	0.0021	0.437327	0.548166	60.41879	7.666823	143.0713
264	17.14	0.00217	0.451905	0.572949	63.41879	8.728664	151.2585
267	16.59	0.0021	0.437327	0.560767	66.41879	9.265169	149.7249
270	16.04	0.00203	0.42275	0.548166	69.41879	9.78368	148.0048
273	16.04	0.00203	0.42275	0.554257	72.41879	10.64757	151.312
276	16.04	0.00203	0.42275	0.560347	75.41879	11.54801	154.6558
279	15.48	0.00196	0.408172	0.546906	78.41879	12.05448	152.5867
282	14.93	0.00189	0.393595	0.533044	81.41879	12.53035	150.3184
285	14.93	0.00189	0.393595	0.538715	84.41879	13.47076	153.5337
288	14.38	0.00182	0.379017	0.524223	87.41879	13.91019	150.9762
291	13.27	0.00168	0.349862	0.488939	90.41879	13.73659	142.2812
294	13.27	0.00168	0.349862	0.493979	93.41879	14.66324	145.2299
297	13.27	0.00168	0.349862	0.49902	96.41879	15.62013	148.2089
300	13.27	0.00168	0.349862	0.50406	99.41879	16.60727	151.2181
303	12.72	0.00161	0.335284	0.487889	102.4188	16.8903	147.8302
306	12.72	0.00161	0.335284	0.492719	105.4188	17.89427	150.7721
309	12.17	0.00154	0.320707	0.475917	108.4188	18.10431	147.0584

ตารางที่ ข-6.8 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนส้มฝัดแบบหมุนเวียนตะกอนชนิด
เจ็ทแครี่ไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและ
แผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 4 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 4						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m)) ² *E(t)	t ² *E(t)
312	12.17	0.00154	0.320707	0.480538	111.4188	19.12008	149.9278
315	12.17	0.00154	0.320707	0.485158	114.4188	20.16358	152.8248
318	12.17	0.00154	0.320707	0.489779	117.4188	21.23479	155.7496
321	12.17	0.00154	0.320707	0.494399	120.4188	22.33374	158.7022
324	11.61	0.00147	0.306129	0.476337	123.4188	22.39402	154.3332
327	11.61	0.00147	0.306129	0.480748	126.4188	23.49593	157.2045
330	11.61	0.00147	0.306129	0.485158	129.4188	24.62431	160.1022
333	11.06	0.0014	0.291552	0.466256	132.4188	24.55158	155.2632
336	10.51	0.00133	0.276974	0.446934	135.4188	24.3928	150.1697
339	11.06	0.0014	0.291552	0.474657	138.4188	26.82689	160.9087
342	10.51	0.00133	0.276974	0.454915	141.4188	26.60223	155.5808
345	11.06	0.0014	0.291552	0.483058	144.4188	29.20301	166.655
348	10.51	0.00133	0.276974	0.462896	147.4188	28.90743	161.0877
351	9.95	0.00126	0.262396	0.442313	150.4188	28.51195	155.2519
354	9.95	0.00126	0.262396	0.446094	153.4188	29.66059	157.9171
357	9.95	0.00126	0.262396	0.449874	156.4188	30.83192	160.605
360	9.95	0.00126	0.262396	0.453654	159.4188	32.02592	163.3156
363	9.95	0.00126	0.262396	0.457435	162.4188	33.24262	166.0489
366	8.85	0.00112	0.233241	0.409969	165.4188	30.65066	150.0487
369	9.40	0.00119	0.247819	0.439163	168.4188	33.75827	162.051
372	9.40	0.00119	0.247819	0.442733	171.4188	34.97163	164.6967
375	8.85	0.00112	0.233241	0.42005	174.4188	34.07663	157.5189
378	8.30	0.00105	0.218664	0.396948	177.4188	33.05527	150.0462
381	7.74	0.00098	0.204086	0.373425	180.4188	31.90375	142.2749
384	7.74	0.00098	0.204086	0.376365	183.4188	32.97356	144.5242
387	8.30	0.00105	0.218664	0.406399	186.4188	36.49394	157.2763
390	7.74	0.00098	0.204086	0.382246	189.4188	35.16611	149.0759
393	7.74	0.00098	0.204086	0.385186	192.4188	36.28885	151.3782
396	7.74	0.00098	0.204086	0.388127	195.4188	37.42923	153.6981
399	7.74	0.00098	0.204086	0.391067	198.4188	38.58725	156.0357
402	7.19	0.00091	0.189509	0.365864	201.4188	36.9227	147.0773
405	7.19	0.00091	0.189509	0.368594	204.4188	38.03077	149.2807
408	7.19	0.00091	0.189509	0.371325	207.4188	39.15522	151.5004
411	7.19	0.00091	0.189509	0.374055	210.4188	40.29606	153.7366
414	7.19	0.00091	0.189509	0.376785	213.4188	41.45327	155.9891
417	7.19	0.00091	0.189509	0.379516	216.4188	42.62687	158.258
420	6.64	0.00084	0.174931	0.352842	219.4188	40.44632	148.1938
423	6.08	0.00077	0.160353	0.325749	222.4188	38.09656	137.7919

ตารางที่ ข-6.8 รูปแบบการกระจายเวลากักภายในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแครรีไฟเออร์ (Jet Clarifier) ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง โดยมีชั้นตะกอนและแผ่นขนานเอียง จุดวัดที่ 4 (ต่อ)

Time(min)	จุดวัดสัญญาณ Tracer ที่ 4						
	Net Concentration (mg/L)	E(t) (min ⁻¹)	E(t)*(V/Q)	t*E(t)	t-t(m)	(t-t(m)) ² *E(t)	t ² *E(t)
426	6.08	0.00077	0.160353	0.328059	225.4188	39.13119	139.7533
429	5.53	0.0007	0.145776	0.300336	228.4188	36.52698	128.8442
432	5.53	0.0007	0.145776	0.302436	231.4188	37.49276	130.6525
435	4.98	0.00063	0.131198	0.274083	234.4188	34.62402	119.2261
438	3.87	0.00049	0.102043	0.214646	237.4188	27.62348	94.01484
441	3.87	0.00049	0.102043	0.216116	240.4188	28.32598	95.30713
444	3.87	0.00049	0.102043	0.217586	243.4188	29.03731	96.60823
447	3.32	0.00042	0.087465	0.187763	246.4188	25.50639	83.92985
450	3.32	0.00042	0.087465	0.189023	249.4188	26.13122	85.06021
453	2.76	0.00035	0.072888	0.158569	252.4188	22.30301	71.83177
456	2.21	0.00028	0.05831	0.127695	255.4188	18.26904	58.22907
459	2.21	0.00028	0.05831	0.128535	258.4188	18.70072	58.99776
462	1.66	0.00021	0.043733	0.097032	261.4188	14.35308	44.82862
465	1.11	0.00014	0.029155	0.065108	264.4188	9.789596	30.27513
468	1.11	0.00014	0.029155	0.065528	267.4188	10.01299	30.66704
471	0.55	7E-05	0.014578	0.032974	270.4188	5.119457	15.53073
474	0.55	7E-05	0.014578	0.033184	273.4188	5.233676	15.72921
477	0.55	7E-05	0.014578	0.033394	276.4188	5.349156	15.92894
480	0.00	0	0	0	279.4188	0	0

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพลอยไพลิน ร่มโพธิ์ภักดิ์ เกิดวันที่ 22 มีนาคม พ.ศ.2532 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัย จ.สุพรรณบุรี ระดับวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ The 6th ASEAN Civil Engineering Conference (ACEC) and the 6th ASEAN Environmental Engineering Conference (AEEC) จัดที่โรงแรมปทุมวัน ปริ๊นเซส กรุงเทพฯ ในหัวข้อ Study of Jet Clarifier for Turbidity Removal: Experimental Approaches วันที่ 21 – 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 และ

การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13 จัดที่โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รong เมือง กรุงเทพฯ ในหัวข้อ การกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน (Turbidity Removal by Solid Contact Clarifier with Sludge Recirculation) วันที่ 26 – 28 มีนาคม พ.ศ.2557