การประเมินวัฏจักรชีวิตของการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน กรณีศึกษาโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

นายสราวิทย์ อาภรณ์รัตน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Life cycle assessment of enhancing turbidity removal efficiency in solid contact clarifier sludge recirculation type : A case study at Bangkhen water supply plant

Mr. Sarawit Arpornrat

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินวัฏจักรชีวิตของการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน กรณีศึกษาโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน
โดย	นายสราวิทย์ อาภรณ์รัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป ผาริโน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.นฤเทพ เล็กศิวิไล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สราวิทย์ อาภรณ์รัตน์ : การประเมินวัฏจักรชีวิตของการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน กรณีศึกษาโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน. (Life cycle assessment of enhancing turbidity removal efficiency in solid contact clarifier sludge recirculation type : A case study at Bangkhen water supply plant) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล

งานวิจัยนี้วิเคราะห์แนวทางการดำเนินงานควบคุมและเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน ของโรงงานผลิตน้ำบางเขน โดยวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมถังตกตะกอน โดยทดสอบกับสภาวะการทำงานจริงของโรงงานผลิตน้ำบางเขน ผลการวิจัยพบว่าที่ช่วงความขุ่นน้ำดิบ 15-30 เอ็นทียู ซึ่งเป็นความขุ่นน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบผลิตโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีปริมาณการใช้ที่น้อยกว่าสารส้มน้ำในการสร้างตะกอนโดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นใกล้เคียงกัน การสร้างตะกอนในถังตะกอนสัมผัสที่เหมาะสมคืออัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถัง 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันและควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 รอบต่อนาที สามารถสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาให้มีปริมาณร้อยละ 10-15 ได้ด้วยสารเคมีทั้ง 2 ชนิด จากนั้นประเมินวัฏจักรชีวิตการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา ในงานวิจัยนี้มีหน้าที่การใช้ (Functional unit) คือการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร จากการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ของน้ำประปามีศักยภาพในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนเท่ากับ 0.121 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดเท่ากับ 0.931 กรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่า ผลกระทบต่อการสิ้นเปลืองทรัพยากรน้ำเท่ากับ 1.050 ลูกบาศก์เมตร และผลกระทบต่อการสิ้นเปลืองทรัพยากรเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.704 เมกะจูล ผลการวิเคราะห์การควบคุมถังตกตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสามารถลดปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์ และลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา ซึ่งช่วยลดค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการประเมินวัฏจักรชีวิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2561 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6070415021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Coagulation – Flocculation, Global warming potential, Water supply system

Sarawit Arpornrat : Life cycle assessment of enhancing turbidity removal efficiency in solid contact clarifier sludge recirculation type : A case study at Bangkhen water supply plant. Advisor: Assoc. Prof. Sirima Panyametheekul, Ph.D.

This research investigated the operational guidelines for controlling and to enhance the efficiency of turbidity removal in solid contact clarifier, sludge recirculation. The results indicated that the raw water turbidity was 15-30 NTU and this turbidity was mostly found in water treatment plant system. The utilization of polyaluminium chloride concentration in the sedimentation was lower than that of aluminium sulphate but their efficiencies in the turbidity removal were similar. An analysis revealed that the flow rate of raw water was 200,000 cubic meters per day and the motor turbine speed drive was 500 rpm. This speed made the sludge in reaction area around 10-15 percent by the two coagulants. This study investigated the life cycle assessment of enhancing turbidity removal efficiency in solid contact clarifier. The results show that impact on global warming is equal 0.121 kg of carbon dioxide equivalent. Impact on acidification is equal 0.931 g of sulfer dioxide equivalent. Impact on water depletion is equal 1.050 cubic meters and impact on fossil depletion is equal 1.704 megajoule. From the results of increase turbidity removal efficiency can reduce the amount of coagulant and energy consumption in production process of tap water which reduces the environment impact.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature .....

Academic Year: 2018 Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล และ ดร.นฤเทพ เล็กศิวิไล ที่เอื้อเฟื้อกรุณาให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการทำงานวิจัย ตลอดจนช่วยในการแก้ไขและสนับสนุนในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้เกียรติและสละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงข้อคิดเห็นและคำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้ และให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ นายสมศักดิ์ ปัสนานนท์ ผู้เชี่ยวชาญการประปานครหลวงระดับ 8 ที่ให้คำปรึกษา และเจ้าหน้าที่ประจำสถานีตกตะกอนและการกรอง ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง สำหรับความร่วมมือและอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ นางสาวปาจรีย์ อาภรณ์รัตน์ ผู้เป็นพี่สาว และเพื่อนๆ น้องๆ ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้กำลังใจเป็นอย่างดีทั้งในขณะศึกษา และดำเนินงานวิจัย

สราวิทย์ อาภรณ์รัตน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง
กิตติกรรมประกาศ ..... จ
สารบัญ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญภาพ ..... ฑ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 โรงงานผลิตน้ำบางเขน (Bangkhen water treatment plant) 5
2.2 กระบวนการผลิตน้ำประปา (Water treatment process) 5
2.2.1 ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเบื้องต้น (Pre-treatment process) 5
2.2.2 ระบบสูบน้ำดิบ (Raw water system) 5
2.2.3 ระบบการจ่ายสารเคมี (Chemical feeding) 5
2.2.4 ระบบการตกตะกอน (Clarification system) 6
2.2.5 ระบบการกรอง (Filtration) 6
2.2.6 ระบบการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) 7
2.2.7 ระบบสูบส่งและสูบจ่ายน้ำประปา (Transmission and Distribution System) 7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3 กระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน 7
2.3.1 ระบบสูบน้ำดิบ 7
2.3.2 ระบบจ่ายสารเคมี 7
2.3.3 ระบบการตกตะกอน 10
2.3.4 ระบบการกรอง 11
2.3.5 ระบบการฆ่าเชื้อโรค 11
2.3.6 ระบบสูบส่งและสูบจ่ายน้ำประปา 12
2.4 การติดตามตรวจสอบและควบคุมคุณภาพน้ำประปา 12
2.4.1 ค่าความขุ่น (Turbidity) 12
2.4.2 ค่าพีเอช (pH) 12
2.4.3 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) 13
2.4.4 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) 13
2.5 กระบวนการโคแอกกูเลชัน 13
2.5.1 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ 14
2.5.2 การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด 17
2.5.3 กลไกการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม 17
2.6 กระบวนการตกตะกอน 18
2.6.1 การตกตะกอนแบบโดด 19
2.6.2 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม 19
2.6.3 การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น 19
2.6.4 การตกตะกอนแบบอัดตัว 19
2.6.5 การวิเคราะห์ผลการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Solids flux theory) 20
2.7 ถังตกตะกอนสัมผัส 21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7.1 ถังตกตะกอนของแข็งสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน 22
2.7.2 ถังตกตะกอนของแข็งสัมผัสแบบมีชั้นตะกอน (Sludge blanket) 22
2.8 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment) 22
2.8.1 หลักการสำคัญของการประเมินวัฏจักรชีวิต 23
2.8.2 วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ 24
2.8.3 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต 25
2.8.4 การจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Life cycle inventory) 26
2.8.5 การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life cycle impact assessment) 29
2.8.6 การแปลผล (Interpretation) 31
2.9 โปรแกรมประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ 33
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 34
2.10 ตัวอย่างข้อมูลการดำเนินงานควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสของโรงงานผลิตน้ำบางเขน 40
2.11 เปรียบเทียบแนวทางวิธีดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพกับปัญหาการดำเนินการในปัจจุบัน 41
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 42
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี 42
3.1.1 ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน 42
3.1.2 ข้อมูลถังตกตะกอน 43
3.1.3 น้ำดิบ 44
3.1.4 การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน 44
3.1.5 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน 44
3.1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง 44
3.2 วิธีการเก็บตัวอย่างตะกอนและตัวอย่างน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอน 44
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนแบบสัมผัส 45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4 การวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอน 45
3.5 การดำเนินงานวิจัย 46
3.5.1 วิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอน 48
3.5.2 การวิเคราะห์ผลของความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้าและอัตราการไหลของ น้ำดิบ ในถังตกตะกอน..... 49
3.5.3 การวิเคราะห์ผลของปริมาณตะกอนในถังตกตะกอน..... 52
3.5.4 วิเคราะห์การดำเนินงานควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน 55
3.6 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการของการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน 57
3.6.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and scope definition)..... 58
3.6.2 การจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Inventory analysis)..... 59
3.6.4 การแปลผลและรายงานผลกระทบ (Life cycle interpretation)..... 61
3.7 การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับกระบวนการดำเนินงานควบคุมการตกตะกอนของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น..... 61
3.8 การนำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในระบบผลิตน้ำประปาที่เหมาะสมที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยและให้มีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ 62
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล..... 63
4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนแบบสัมผัส 63
4.1.1 คุณภาพน้ำดิบ 63
4.1.2 ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ 65
4.1.3 ความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้า 66
4.1.4 อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน..... 67
4.2 การวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอน 68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอน 68
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ผลของความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดสำหรับการกวนช้าและอัตราการไหลของน้ำดิบในถังตกตะกอน 78
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของตะกอนในถังตกตะกอน 98
4.2.4 ผลการวิเคราะห์การดำเนินงานควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน 102
4.3 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment) 106
4.3.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and scope definition) 106
4.3.2 การจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Inventory analysis) 106
4.3.3 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Impact Assessment) 110
4.3.4 การแปลผล (Interpretation) 121
4.4 การประเมินต้นทุนและการดำเนินงานควบคุมการตกตะกอนของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น 122
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 124
5.1 สรุปผลการวิจัย 124
5.2 ประโยชน์ที่การประปานครหลวงที่ได้รับจากงานวิจัย 127
5.3 ข้อเสนอแนะ 128
รายการอ้างอิง 129
ภาคผนวก 134
ภาคผนวก ก 135
ภาคผนวก ข 139
ภาคผนวก ค 170
ภาคผนวก ง 188
ภาคผนวก จ 209
ภาคผนวก ฉ 213

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม.....223

ประวัติผู้เขียน.....225

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบโปรแกรมสำเร็จรูปในการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ 33

ตารางที่ 2-2 ตารางเปรียบเทียบปัญหาจากการดำเนินงานในปัจจุบันกับแนวทางจากวิธีดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น 41

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลถังตกตะกอน 43

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอน 48

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้าและอัตราการไหลของน้ำดิบ 49

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณตะกอนในถังตกตะกอน 52

ตารางที่ 3-5 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์การดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน 55

ตารางที่ 3-6 ตัวอย่างตารางการเก็บข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม 59

ตารางที่ 4-1 ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น 69

ตารางที่ 4-2 ความเข้มข้นของสารส้มน้ำกับโพลิอิเล็กโทรไลต์ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น 70

ตารางที่ 4-3 เปรียบเทียบค่าสารเคมีในการผลิตน้ำประปา 73

ตารางที่ 4-4 คุณภาพน้ำก่อนและหลังกำจัดความขุ่น 75

ตารางที่ 4-5 ร้อยละของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาที่อัตราการไหลและความเร็วรอบมอเตอร์ต่างๆ 96

ตารางที่ 4-6 ตารางสรุปค่าความเร็วแกรเดียนท์ (Gradient Velocity) 97

ตารางที่ 4-7 ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์การดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน 102

ตารางที่ 4-8 ศักยภาพค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้จากการลดความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนต์ 105

Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-9 ตัวอย่างข้อมูลสารขาเข้า พลังงาน และสารขาออกจากกระบวนการผลิตน้ำประปา ปี พ.ศ. 2561 107

ตารางที่ 4-10 ตัวอย่างข้อมูลสารขาเข้า พลังงาน และสารขาออกจากกระบวนการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร ปี พ.ศ. 2561 108

ตารางที่ 4- 11 ข้อมูลสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ที่ความเข้มข้นต่างๆ 109

ตารางที่ 4-12 ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ใบพัดต่างๆ 109

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-2 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ 15

ภาพที่ 2-3 กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แบบต่อเชื่อมด้วยโพลิเมอร์ 16

ภาพที่ 2-4 แบบจำลองการสร้างฟล็อค 18

ภาพที่ 2-5 การเคลื่อนที่ของตะกอนสลัดจ์ในถังตกตะกอน 20

ภาพที่ 2-6 โซลิดซ์ฟลัก G_s และ G_b ของถังตกตะกอนที่ระดับความเข้มข้นของตะกอนต่างๆ..... 21

ภาพที่ 2-7 กรอบการดำเนินงาน LCA จากอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040..... 25

ภาพที่ 2-8 ตัวอย่างสารขาเข้าและขาออกของกระบวนการผลิตแก้ว 27

ภาพที่ 2-9 ขั้นตอนโดยทั่วไปของการวิเคราะห์บัญชีรายการ..... 28

ภาพที่ 2-10 ขั้นตอนการจัดทำ LCIA ตามมาตรฐาน ISO 14042..... 29

ภาพที่ 2-11 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ LCI กับผลกระทบขั้นกลางและผลกระทบปลายทาง 31

ภาพที่ 2-12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความขุ่นน้ำดิบกับสารส้มที่ใช้ 40

ภาพที่ 3-1 ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน 43

ภาพที่ 3-2 พารามิเตอร์ในการควบคุมถังตกตะกอนที่นำมาวิเคราะห์..... 45

ภาพที่ 3-3 แผนทดลองงานวิจัย 47

ภาพที่ 3-4 แผนผังการวิเคราะห์ผลของการควบคุมความเร็วรอบของใบพัดสำหรับการกวนช้า 51

ภาพที่ 3-5 แผนผังการวิเคราะห์ผลของปริมาณของตะกอน..... 54

ภาพที่ 3-6 แผนผังการวิเคราะห์การดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน.. 56

ภาพที่ 3-7 แผนผังการประเมินวัฏจักรชีวิตของการดำเนินการควบคุมถังตกตะกอน 57

ภาพที่ 3-8 กระบวนการผลิตน้ำประปา..... 58

ภาพที่ 3-9 แผนผังขั้นตอนการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต..... 61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4-1 ความขุ่นของน้ำดิบที่เข้าระบบผลิตน้ำประปา 64

ภาพที่ 4-2 เปรียบเทียบความขุ่นน้ำดิบกับสารส้มที่ใช้ในการตกตะกอน 65

ภาพที่ 4-3 ปริมาณน้ำดิบที่นำมาผลิตน้ำประปา 67

ภาพที่ 4-4 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยสารส้มน้ำ 71

ภาพที่ 4-5 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 71

ภาพที่ 4-6 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยสารส้มน้ำร่วมกับโพลิเมอร์ 72

ภาพที่ 4-7 เปรียบเทียบความขุ่นคงเหลือจากการใช้สารส้มน้ำ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และสารส้มน้ำร่วมกับโพลิอิเล็กโทรไลต์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ 73

ภาพที่ 4-8 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 400 รอบ/นาที และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน 79

ภาพที่ 4-9 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน 80

ภาพที่ 4-10 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน 80

ภาพที่ 4-11 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน 81

ภาพที่ 4-12 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 400 รอบ/นาที และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน 82

ภาพที่ 4-13 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน 83

ภาพที่ 4-14 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน 84

ภาพที่ 4-15 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน 84

ภาพที่ 4-16 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และอัตราการไหล 210,000 ลบ.ม./วัน 85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4-17 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที และอัตราการไหล 210,000 ลบ.ม./วัน 86

ภาพที่ 4-18 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการไหล 210,000 ลบ.ม./วัน 86

ภาพที่ 4-19 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน 88

ภาพที่ 4-20 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน 88

ภาพที่ 4-21 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน 90

ภาพที่ 4-22 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน 90

ภาพที่ 4-23 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และอัตราการไหล 210,000 ลบ.ม./วัน 91

ภาพที่ 4-24 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที และอัตราการไหล 210,000 ลบ.ม./วัน 92

ภาพที่ 4-25 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน 93

ภาพที่ 4-26 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน 94

ภาพที่ 4-27 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการไหล 210,000 ลบ.ม./วัน 94

ภาพที่ 4-28 ความขุ่นคงเหลือของน้ำใสออกจากถังตกตะกอนที่ตะกอนร้อยละ 1-10 โดยใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์ 99

ภาพที่ 4-29 ความขุ่นคงเหลือของน้ำใสออกจากถังตกตะกอนที่ตะกอนร้อยละ 10-15 โดยใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์ 99

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4-30 ความขุ่นคงเหลือของน้ำใสออกจากถังตกตะกอนที่ตะกอนร้อยละ 10-15 โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ 100

ภาพที่ 4-31 ความขุ่นคงเหลือของน้ำใสออกจากถังตกตะกอนที่ตะกอนร้อยละ 15-20 โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ 101

ภาพที่ 4-32 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารส้มน้ำ ที่ความเข้มข้น 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 103

ภาพที่ 4-33 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 6 และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร 104

ภาพที่ 4-34 ปริมาณผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร 111

ภาพที่ 4-35 ปริมาณผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนต่อปริมาณและชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ 113

ภาพที่ 4-36 ปริมาณผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนจากพลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ต่างๆ . 113

ภาพที่ 4-37 ปริมาณผลกระทบต่อความเป็นกรดจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร 114

ภาพที่ 4-38 ปริมาณผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดต่อปริมาณและชนิดของ สารโคแอกกูแลนต์ 116

ภาพที่ 4-39 ผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร 117

ภาพที่ 4-40 ปริมาณผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำต่อปริมาณ และชนิดของ สารโคแอกกูแลนต์ 118

ภาพที่ 4-41 ปริมาณผลกระทบต่อการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร 119

ภาพที่ 4-42 ปริมาณผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงต่อปริมาณ และชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ 120

ภาพที่ 4-43 ปริมาณผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงจากพลังงานไฟฟ้า 120

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำประปามีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และการดำเนินการกิจกรรมต่างๆ ในสถานที่ที่สำคัญ เช่น โรงพยาบาล สถานศึกษา สนามบิน ห้างสรรพสินค้า และรวมไปถึงภาคอุตสาหกรรม ซึ่งสถานที่เหล่านี้มีความสำคัญในการขับเคลื่อนประเทศเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งในปัจจุบันการประปานครหลวงผลิตน้ำประปาจาก 4 โรงงานผลิตน้ำ รวมกำลังการผลิตเฉลี่ยวันละ 5.92 ล้านลูกบาศก์เมตร เพื่อรองรับประชาชนในพื้นที่ 3 จังหวัดได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ ซึ่งมีจำนวนประชากรผู้ใช้น้ำ 2.28 ล้านคน โดยโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวงมีกำลังการผลิต 4.40 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน (สมศักดิ์ ปัสนานนท์, 2558) ซึ่งคิดเป็นกำลังการผลิตที่ให้บริการประชาชนมากกว่าร้อยละ 70 ของพื้นที่ให้บริการทั้งหมดของการประปานครหลวง (ประมาณร้อยละ 30 มาจากโรงงานผลิตน้ำสามเสน โรงงานผลิตน้ำธนบุรีและมหาสวัสดิ์)

โรงงานผลิตน้ำบางเขนดำเนินการผลิตน้ำประปามาตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2522 ใช้ระบบการผลิตน้ำประปาแบบทั่วไป ซึ่งเป็นระบบพื้นฐานที่ได้รับการออกแบบตามหลักวิศวกรรมการประปา (สมศักดิ์ ปัสนานนท์, 2558) แต่มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำดิบที่เข้าสู่กระบวนการตกตะกอน ในอดีตคุณภาพน้ำดิบที่นำมาใช้ผลิตน้ำประปามีคุณภาพที่ดี แต่ในปัจจุบันคุณภาพน้ำดิบที่น้ำมาใช้ผลิตน้ำประปามีแนวโน้มที่จะแย่ลงมากขึ้นทุกวัน ในทางตรงกันข้ามความต้องการของผู้ใช้น้ำประปาที่ต้องการน้ำประปาที่มีคุณภาพสูงกว่าในอดีตมากขึ้น โดยเฉพาะในส่วนของภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการน้ำประปาที่มีคุณภาพดีและสม่ำเสมอตลอดเวลา ทำให้การผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขนในปัจจุบันมีความซับซ้อนในการดำเนินการผลิตมากขึ้นตามไปด้วย จึงต้องมีการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการทำงานเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการใช้น้ำได้อย่างต่อเนื่องและทั่วถึง

ในปัจจุบันการประปานครหลวงมุ่งเน้นในการผลิตน้ำประปาที่มีความสะอาดและปลอดภัย เพื่อให้น้ำประปาไปถึงผู้ใช้น้ำอย่างมีคุณภาพเป็นไปตามข้อแนะนำองค์การอนามัยโลก (WHO) โดยดำเนินการตามแผนงานของโครงการน้ำประปาปลอดภัย (Water safety plan) ภายใต้กรอบยุทธศาสตร์การบริหาร กปน. ฉบับที่ 4 (สถาบันส่งเสริมการบริหารกิจการบ้านเมืองที่ดี, 2559) การที่

จะผลิตน้ำประปาให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานสากลจำเป็นที่จะต้องมีการบริหารจัดการกระบวนการผลิตที่ดีและมีประสิทธิภาพ ตั้งแต่การนำน้ำดิบมาใช้ในกระบวนการผลิต กระบวนการตกตะกอน กระบวนการกรอง การจัดการน้ำหลังกระบวนการผลิต การสูบส่งและสูบจ่ายน้ำประปา โดยกระบวนการที่มีความสำคัญที่สุดต่อกระบวนการผลิตน้ำประปาคือกระบวนการตกตะกอนซึ่งเป็นกระกระบวนการที่สามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำได้มากที่สุดในการผลิตน้ำประปา การที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน นั้นมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นทั้งการควบคุมการใช้สารเคมีต่างๆ ในกระบวนการตกตะกอน วิธีการดำเนินระบบการตกตะกอนซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีความสำคัญต่อการตกตะกอนเป็นอย่างมาก เนื่องจากโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีความสำคัญต่อการให้บริการจ่ายน้ำประปาแก่ประชาชนมากกว่าร้อยละ 70 ของพื้นที่ให้บริการทั้งหมด และต้องดำเนินการผลิตตลอดเวลา 24 ชั่วโมงทำให้ยากต่อการปรับปรุงแก้ไขระบบการผลิตน้ำประปา ซึ่งในปัจจุบันคุณภาพน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปามีแนวโน้มที่จะมีคุณภาพแย่ลงมากยิ่งขึ้นทุกวัน ทำให้การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำดิบมีผลต่อกระบวนการผลิตเป็นอย่างมาก ซึ่งหากขาดการดำเนินการที่มีประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตน้ำประปาก็จะทำให้ได้น้ำประปาที่มีคุณภาพต่ำลงไม่เป็นไปตามมาตรฐานสากลตามที่กำหนด หรือหากรุนแรงกว่านั้นอาจส่งผลให้น้ำประปามีคุณภาพไม่ปลอดภัยต่อการอุปโภคบริโภคทำให้มีความเสี่ยงต่อประชาชนผู้ใช้น้ำประปามากขึ้น

เพื่อให้การดำเนินการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวงสามารถผลิตน้ำประปาได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกสถานการณ์ของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำดิบจึงจำเป็นต้องมีการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตโดยมุ่งเน้นที่กระบวนการตกตะกอนซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญที่สุดของการผลิตน้ำประปา เนื่องจากกระบวนการตกตะกอนสามารถที่จะกำจัดอนุภาคต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำดิบที่นำมาผลิตน้ำประปาได้ง่ายและมากที่สุด การที่ได้มาถึงแนวทางการปฏิบัติที่เหมาะสมและการเพิ่มประสิทธิภาพทำให้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาสามารถที่จะผลิตน้ำประปาที่มีคุณภาพตามมาตรฐานสะอาดและปลอดภัยเพื่อรองรับความต้องการใช้น้ำได้ตลอดเวลา และอีกทั้งยังเป็นการช่วยองค์กรให้สามารถดำเนินการผลิตโดยใช้ทรัพยากรและงบประมาณได้อย่างคุ้มค่า

จากที่กล่าวมาข้างต้นการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการตกตะกอนของระบบผลิตน้ำประปานั้นย่อมส่งผลดีในเชิงของการพัฒนาคุณภาพน้ำประปาให้ดีขึ้น แต่ในทางตรงข้ามนั้นทุกการเปลี่ยนแปลงให้ดียิ่งขึ้นย่อมมีผลกระทบตามมา เช่น การเพิ่มขึ้นของต้นทุนในการผลิตทั้งในเรื่องของ

ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า อีกทั้งในเรื่องของผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมเช่น ปัญหาสภาวะโลกร้อน การลดลงของทรัพยากรธรรมชาติ ที่กำลังส่งผลกระทบต่อโลกในปัจจุบันเป็นอย่างมาก ทำให้ทุกคนต้องตระหนักความสำคัญของปัญหาเหล่านี้ ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์แนวทางการปฏิบัติที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินการผลิตน้ำประปาโดยคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตจะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการประกอบการตัดสินใจในการดำเนินกระบวนการผลิตต่างๆ ที่เหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์แนวทางการดำเนินงานควบคุมการตกตะกอนสำหรับถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน (Solid contact clarifier sludge recirculation) ในโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง

1.2.2 เพื่อคัดเลือกแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในระบบผลิตน้ำประปาที่เหมาะสมที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยและให้มีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการ ณ โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1.3.1 งานวิจัยนี้รวบรวมข้อมูลการดำเนินงานควบคุมการตกตะกอนของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนย้อนหลังเป็นเวลา 5 ปี ระหว่าง พ.ศ.2557 ถึง พ.ศ. 2561

1.3.2 งานวิจัยนี้นำข้อมูลที่รวบรวมมาวิเคราะห์หาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

1.3.3 งานวิจัยนี้วิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนโดยทดลองหาความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสมโดยการปรับปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีในห้องปฏิบัติการ และนำผลการทดลองที่เหมาะสมไปใช้ในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

1.3.4 งานวิจัยนี้วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี ค่าความเร็วรอบของใบพัดในการกวนช้า ค่าระยะเวลาการพักน้ำ และค่าปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.3.5 งานวิจัยนี้ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตน้ำประปาโดยกำหนดให้หน่วยการทำงาน (Function unit) คือ น้ำประปาปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร และประเมินค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพ เพื่อสรุปแนวทางที่เหมาะสมของการเพิ่มประสิทธิภาพถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงแนวทางการดำเนินการควบคุมการตกตะกอนของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถดำเนินการผลิตน้ำประปาได้อย่างประสิทธิภาพ สามารถควบคุมงบประมาณและทรัพยากรในกระบวนการผลิตน้ำประปา

1.4.2 ทราบถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตน้ำประปาจากการประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อนำมาปรับปรุงแก้ไขสำหรับลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม

1.4.3 ในปัจจุบันนี้โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง มีความต้องการที่จะจัดทำคู่มือการควบคุมถังตกตะกอน ตลอดจนถึงอุปกรณ์ควบคุมถังตะกอนอัตโนมัติซึ่งข้อมูลที่ได้จากการรวบรวม การทดลองต่างๆ รวมถึงการประเมินวัฏจักรชีวิตของงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการจัดทำคู่มือ และการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมถังตกตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โรงงานผลิตน้ำบางเขน (Bangkhen water treatment plant)

โรงงานผลิตน้ำบางเขนเป็นโรงงานผลิตน้ำประปาแห่งที่ 3 ของการประปานครหลวง ตั้งอยู่ที่ 400 แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร สามารถผลิตน้ำได้วันละประมาณ 4,400,000 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นประมาณร้อยละ 70 ของกำลังการผลิตทั้งหมดของการประปานครหลวง (สมศักดิ์ ปัสนานนท์, 2558) โดยใช้น้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยา ส่งผ่านคลองประปาตะวันออกจนถึงโรงงานผลิตน้ำ ระยะทางประมาณ 18 กิโลเมตร โรงงานผลิตน้ำบางเขนดำเนินการผลิตน้ำประปามาตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2522 ใช้ระบบการผลิตน้ำประปาแบบทั่วไป ซึ่งเป็นระบบพื้นฐานที่ได้รับการออกแบบตามหลักวิศวกรรมการประปา

2.2 กระบวนการผลิตน้ำประปา (Water treatment process)

2.2.1 ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำเบื้องต้น (Pre-treatment process)

การปรับปรุงคุณภาพน้ำเบื้องต้นทั้งทางด้านกายภาพและด้านเคมี ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาซึ่งมีหลากหลายวิธี เช่น การตกตะกอนเบื้องต้นในระบบส่งน้ำดิบ (คลองประปา) การดักขยะด้วยตะแกรงดักขยะ (ตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียด) ระบบการเติมอากาศ เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ ลดสารปนเปื้อนในน้ำดิบที่จะมีผลกระบทต่อกระบวนการผลิตน้ำประปา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.2 ระบบสูบน้ำดิบ (Raw water system)

การสูบน้ำดิบส่งเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาเพื่อเป็นการควบคุมปริมาณน้ำที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิตให้ได้ตามที่กำหนดอย่างสม่ำเสมอโดยเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่

2.2.3 ระบบการจ่ายสารเคมี (Chemical feeding)

การจ่ายสารเคมีเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อปรับสภาพและคุณสมบัติของน้ำประปา เช่น ค่าพีเอช (pH) ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) สี กลิ่น ความขุ่น เหล็ก แมงกานีส เชื้อโรค เป็นต้น โดยสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปามีหลากหลายชนิด เช่น สารส้ม ปูนขาว คลอรีน โพลิเมอร์ ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น ซึ่งการใช้สารเคมีแต่ละชนิดต้องมีการตรวจสอบชนิดและปริมาณของสารเคมีที่จะใช้ให้มีความเหมาะสมกับคุณภาพของน้ำดิบ

2.2.4 ระบบการตกตะกอน (Clarification system)

การตกตะกอนเพื่อกำจัดอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว รวมถึงกลุ่มจุลินทรีย์ต่างๆ บางส่วน ซึ่งกระบวนการตกตะกอนจะใช้กระบวนการทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยมีการใช้สารเคมีที่ทำให้เกิดการสร้างตะกอนและรวมตะกอน เช่น สารส้ม (alum) โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride, PACl) เป็นต้น และมีสารเคมีที่เป็นตัวช่วยในการตะกอน เช่น สารอินทรีย์โพลิเมอร์ โดยระบบการตกตะกอนจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ กระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการฟล็อคคูเลชัน และกระบวนการตกตะกอน (Zhang และคณะ, 2017)

2.2.4.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation)

กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นขั้นตอนการทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์ เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาคเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมกันกันเป็นกลุ่มของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นต้น

2.2.4.2 กระบวนการฟล็อคคูเลชัน (Flocculation)

กระบวนการฟล็อคคูเลชันเป็นขั้นตอนการรวมอนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพ โดยทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันให้มากที่สุดและรวมตัวกันเป็นฟล็อค ควรเกาะติดกันแน่นและหลุดจากกันน้อยที่สุด

2.2.4.3 กระบวนการตกตะกอน (Sedimentation)

กระบวนการตกตะกอนเป็นกระบวนการแยกอนุภาคที่เกิดการรวมตัวจนมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะสามารถตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกโดยการลดความเร็วการไหลให้ต่ำลงจนถึงจุดที่สารแขวนลอยนั้นสามารถจมตัวลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.5 ระบบการกรอง (Filtration)

การกรองเป็นกระบวนการทางกายภาพในการแยกอนุภาคแขวนลอยหรือสิ่งสกปรกขนาดเล็กออกจากน้ำโดยผ่านน้ำเข้าไปยังชั้นสารกรองที่มีรูพรุน ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้เป็นสารกรองที่นิยมใช้ ได้แก่ ทรายแม่น้ำ แอนทราไซท์ โดยกระบวนการกรองสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้ เช่น ความขุ่น สี สารอินทรีย์ เป็นต้น

2.2.6 ระบบการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection)

การฆ่าเชื้อโรคเพื่อการทำลายแบคทีเรีย ไวรัส และจุลินทรีย์ต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำ เพื่อทำให้น้ำประปาที่ผลิตมีความปลอดภัยสำหรับการอุปโภค บริโภคของมนุษย์ โดยสารที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคเรียกว่า Disinfectant เช่น ก๊าซคลอรีน สารประกอบคลอรีนต่างๆ โอโซน และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) เป็นต้น รวมถึงการฆ่าเชื้อโรคด้วยความร้อนและแสงอัลตราไวโอเลต (UV)

2.2.7 ระบบสูบส่งและสูบจ่ายน้ำประปา (Transmission and Distribution System)

การสูบส่งและสูบจ่ายน้ำประปาจากโรงงานผลิตน้ำไปยังบ้านเรือนของประชาชน ผ่านทางอุโมงค์และท่อน้ำพร้อมกับการควบคุมแรงดันน้ำในเส้นท่อให้เหมาะสมสอดคล้องกับปริมาณการใช้น้ำ โดยระบบการสูบส่งเป็นการจ่ายน้ำประปาไปยังสถานีสูบจ่ายน้ำในแต่ละพื้นที่ซึ่งมีระยะทางไกลจากโรงงานผลิตน้ำเพื่อที่เพิ่มแรงดันน้ำสำหรับสูบจ่ายน้ำไปยังบ้านเรือนประชาชนต่อไป

2.3 กระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

2.3.1 ระบบสูบน้ำดิบ

โรงงานผลิตน้ำบางเขนรับน้ำดิบจากสถานีสูบน้ำดิบสำแลซึ่งสูบน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาลำเลียงผ่านทางคลองประปาซึ่งจะเกิดกระบวนการตกตะกอนตามธรรมชาติ มีกระบวนการเติมอากาศ การดักขยะด้วยตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียดเพื่อกำจัดเศษขยะ พืชน้ำ ซากพืชซากสัตว์ที่อยู่ในน้ำดิบก่อนเข้าสู่ระบบสูบน้ำดิบ โรงงานผลิตน้ำบางเขนมีโรงสูบน้ำดิบจำนวน 2 โรงสูบ ได้แก่ โรงสูบน้ำดิบ 1 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำดิบจำนวน 6 ตัว กำลังสูบตัวละ 500,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และโรงสูบน้ำดิบ 2 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำดิบจำนวน 4 ตัว กำลังสูบตัวละ 500,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (สมศักดิ์ ปัสนานนท์, 2558)

2.3.2 ระบบจ่ายสารเคมี

เมื่อน้ำดิบถูกส่งเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาต้องมีการจ่ายสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำตามความเหมาะสมกับคุณภาพน้ำดิบโดยสารเคมีที่โรงงานผลิตน้ำบางเขนจ่ายในปัจจุบันมีหลายชนิด

2.3.2.1 สารส้มน้ำ (Aluminium Sulphate)

สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ ใช้เพื่อกำจัดสารแขวนลอยที่ทำให้เกิดความขุ่น รวมถึงสาหร่ายขนาดเล็กและจุลินทรีย์บางส่วน สารส้มน้ำเป็นสารละลายของสารส้มกับน้ำในอัตราส่วนที่เท่ากันโดยน้ำหนัก เป็นของเหลว ใส ไม่เป็นเจล ไม่มีกลิ่น ไม่มีสีหรือมีสีน้ำตาล ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้ มีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ มอก.165-2554 “สารส้ม” ประเภทอุตสาหกรรม ชนิดที่ 1 ชั้นคุณภาพ 1 และต้องได้รับใบอนุญาตแสดงเครื่องหมายมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมดังกล่าวด้วย (ธวัชชัย ลิจุติภูมิ, 2559)

คุณลักษณะทางเคมีของสารส้มน้ำ

1. สารที่ไม่ละลายน้ำ ไม่เกินร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก
2. ค่าพีเอช ไม่น้อยกว่า 2.8
3. อะลูมินา (คำนวณเป็น Al_2O_3) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 8.0 โดยน้ำหนัก
4. เกลือแอมโมเนียม (คำนวณเป็น NH_3) ไม่เกินร้อยละ 0.015 โดยน้ำหนัก
5. โลหะหนัก (คำนวณเป็น Pb) ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
6. เหล็ก (Fe) ไม่เกินร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก
7. แมงกานีส (Mn) ไม่เกิน 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
8. สารหนู (คำนวณเป็น As_2O_3) ไม่เกิน 2.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2.3.2.2 โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนท์ เช่นเดียวกันกับสารส้มใช้เพื่อกำจัดสารแขวนลอยที่ทำให้เกิดความขุ่น รวมถึงสาหร่ายขนาดเล็กและจุลินทรีย์บางส่วน โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลวเป็นของเหลวใส ไม่มีสีหรือสีน้ำตาลอ่อน มีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ 2150 - 2546 “โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเหลว” และต้องได้รับใบอนุญาตแสดงเครื่องหมายมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมดังกล่าวด้วย (ธวัชชัย ลิจุติภูมิ, 2559)
คุณลักษณะทางเคมีของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

1. ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ไม่น้อยกว่า 1.19 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) อยู่ในช่วงร้อยละ 10.0-11.0 โดยน้ำหนัก
3. เบสิกซิตี (Basicity) อยู่ในช่วงร้อยละ 45-65 โดยน้ำหนัก

4. สารไม่ละลายน้ำ ไม่เกินร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก

5. ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ไม่เกินร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก

6. เหล็ก (Fe) ไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

7. ค่าพีเอช เมื่อทำเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร อยู่ในช่วง 3.5-5.0

8. เกลือแอมโมเนีย (คำนวณเป็น N) ไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

9. แคดเมียม (Cd) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

10. ตะกั่ว (Pb) ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

11. ปรอท (Hg) ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

12. โครเมียม (Cr) ไม่เกิน 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

13. สารหนู (As) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

14. แมงกานีส (Mn) ไม่เกิน 15 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

2.3.2.3 โพลิอิเล็กโทรไลต์

โพลิอิเล็กโทรไลต์ใช้เป็นสารช่วยในการตกตะกอน เพื่อช่วยสารโคแอกกูแลนท์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนในกรณีที่น้ำดิบมีความขุ่นสูงหรือมีสิ่งปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดออกเป็นพิเศษ โพลิอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นชนิดประจุลบ ซึ่งเป็นชนิดที่ใช้กับน้ำดื่มเท่านั้นและได้รับการรับรองมาตรฐาน NSF/ANSI Standard 60 เป็นชนิดเกล็ด ลักษณะแห้ง ร่วนไม่จับตัวเป็นก้อน สามารถใช้ร่วมกับสารส้มน้ำ ซึ่งจะมีผลทำให้การรวมตัวของฟล็อคมีขนาดใหญ่ขึ้นไม่ฟุ้งกระจายได้ง่าย (ธวัชชัย ลิจุติภูมิ, 2559)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คุณลักษณะทางเคมีของโพลิอิเล็กโทรไลต์

1. โพลิอิเล็กโทรไลต์เป็นสารเคมีที่อยู่ในกลุ่มของ Polyacrylamides (PAM) หรือ Poly (Diallyldimethyl-ammonium chloride)(pDADMAC) หรือ Polyamine Products ในกรณีที่มาจากกลุ่ม Polyacrylamides (PAM) จะต้องมี Residual acrylamide monomer ไม่เกินร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักของ Active polymer content

2. ค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 6-8 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (w/v) ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

3. ความหนืด (Viscosity) ไม่เกิน 300 centipoises ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (w/v) ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

4. ความหนาแน่น (Bulk density) ระหว่าง 0.6 – 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2.3.2.4 คลอรีน (Chlorine)

คลอรีนนิยมใช้เพื่อฆ่าเชื้อโรคในระบบผลิตน้ำ ทั้งน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และน้ำในสระว่ายน้ำ โดยเฉพาะกระบวนการผลิตน้ำประปา ซึ่งอาศัยคุณสมบัติการเป็นสารฆ่าเชื้อโรคในกลุ่มออกซิไดส์ (Oxidizing biocide) ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายในปริมาณการใช้ที่ต่ำ การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนมีชื่อเรียกเฉพาะว่า คลอริเนชัน (Chlorination) คลอรีนในสภาวะอุณหภูมิและความดันปกติจะอยู่ในรูปก๊าซสีเขียวตองอ่อน ในสภาวะภายใต้ความดันจะเปลี่ยนเป็นของเหลวสีอำพัน ในสภาพแห้งคลอรีนจะไม่กัดกร่อนโลหะแต่ถ้าเกิดความชื้นอยู่ด้วยจะกัดกร่อนรุนแรง ไม่ระเบิดและติดไฟแต่ช่วยให้ไฟติดได้เหมือนก๊าซออกซิเจน (White, 1999)

คุณลักษณะทางเคมีของคลอรีน

1. สภาพก๊าซมีสีเขียวตองอ่อน สภาพของเหลว สีเหลืองอำพัน
2. กลิ่นฉุนแสบจมูก
3. จุดหลอมเหลว -101 องศาเซลเซียส
4. จุดเดือด -34.6 องศาเซลเซียส
5. เปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นก๊าซปริมาตรเพิ่มขึ้น 460 เท่า
6. หนักกว่าอากาศ 2.5 เท่า
7. ละลายน้ำได้เล็กน้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.3 ระบบการตกตะกอน

โรงงานผลิตน้ำบางเขนรับน้ำดิบเข้าสู่ถังตกตะกอนผ่านทางอุโมงค์ส่งน้ำขนาดใหญ่ โดยในปัจจุบันมีการใช้งานถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนทั้งหมด 22 ถัง ในแต่ละถังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 เมตร ความสูง 4.74 เมตร ปริมาตรน้ำ 15,194 ลูกบาศก์เมตร มีกำลังการผลิต 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันต่อถัง โดยจะมีการรับน้ำดิบผ่านทางท่อน้ำขนาด 1,500 มิลลิเมตร และมีจุดจ่ายสารเคมีเข้าที่ท่อรับน้ำดิบเพื่อให้เกิดการกวนเร็วผสมระหว่างสารเคมีที่ใช้สำหรับการตกตะกอนและน้ำดิบในเส้นท่อโดยใช้การกวนในเส้นท่อ (Inline blender) และน้ำกระโดด

(Hydraulic jump) (ทีมคอนซัลติ้งเอนจิเนียริ่งแอนด์แมเนจเมนท์, 2552) เพื่อให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันอย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการฟล็อคคูเลชันที่บริเวณบริเวณทำปฏิกิริยา ในกรณีที่น้ำดิบมีความขุ่นสูงจะมีการจ่ายสารช่วยตกตะกอนที่บริเวณทำปฏิกิริยา และการควบคุมปริมาณตะกอนในถังตกตะกอนจะมีการควบคุมผ่านวาล์วระบายน้ำตะกอนที่ก้นถังผ่านท่อขนาด 300 มิลลิเมตรจำนวน 2 ท่อ โดยจะมีท่อเก็บตัวอย่างน้ำในถังตกตะกอน 4 จุด คือ

1. บริเวณก้นถังตกตะกอน (Bottom zone)
2. บริเวณกลางถังตกตะกอน (Middle zone)
3. บริเวณน้ำใสด้านบน (Top zone)
4. บริเวณทำปฏิกิริยา (Reaction zone)

2.3.4 ระบบการกรอง

โรงงานผลิตน้ำบางเขนใช้การกรองทั้งหมดเป็นระบบทรายกรองเร็ว (Rapid sand filtration) เพื่อที่จะกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่เหลือจากกระบวนการตกตะกอน โดยในปัจจุบันมีบ่อกรองทั้งหมด 56 บ่อกรอง ในแต่ละบ่อกรองมีกำลังการผลิต 100,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันต่อถัง (สมศักดิ์ ปัสนานนท์, 2558) โดยสารกรองที่ใช้ในการกรองมีทั้งหมด 2 ชนิด คือ แอนทราไซท์และทรายกรอง โดยมีหัวกรองน้ำ (Nozzle) อยู่ในชั้นล่างสุดเพื่อรองรับสารกรอง เมื่อมีการดำเนินการใช้งานบ่อกรองซึ่งจะมีสิ่งสกปรกติดค้างที่ชั้นสารกรองจะทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดลงจะต้องทำการล้างย้อนทำความสะอาดบ่อกรอง เมื่อบ่อกรองมีระยะเวลาการกรอง (Filter runtime) 72 ชั่วโมง หรือแรงดันสูญเสีย (Head loss) 2.5 เมตรน้ำ โดยการทำความสะอาดล้างย้อนบ่อกรอง (Backwashing) มี 2 ขั้นตอนคือ การใช้ลมทำความสะอาดและการใช้น้ำล้างย้อน

Chulalongkorn University

2.3.5 ระบบการฆ่าเชื้อโรค

น้ำที่ผ่านกระบวนกรองและไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำใส จะต้องมีการกำจัดเชื้อโรคที่อยู่ในน้ำโดยใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค จุดจ่ายคลอรีนจ่ายที่จุดรับน้ำใสจากกระบวนการกรองเข้าสู่ถังเก็บน้ำใส เพื่อที่จะให้น้ำประปาที่ได้มีความสะอาดและปลอดภัยจากโรงงานผลิตน้ำถึงบ้านเรือนผู้ใช้น้ำ โดยการเติมคลอรีนลงในน้ำจะต้องมีการคำนวณปริมาณการใช้ให้มีปริมาณมากกว่าความต้องการคลอรีน (Chlorine demand) เพื่อทำให้เหลือคลอรีนในรูปของคลอรีนคงเหลืออิสระ (Free residual chlorine) ตามเกณฑ์มาตรฐานองค์การอนามัยโลก (Blokker, Vreeburg และ Speight, 2014)

2.3.6 ระบบสูบส่งและสูบจ่ายน้ำประปา

น้ำดิบหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดจนได้น้ำประปาที่มีความสะอาดและปลอดภัยเก็บไว้ในถังเก็บน้ำใสจะถูกสูบผ่านทางสถานีสูบส่งน้ำประปาผ่านทางระบบอุโมงค์และท่อจ่ายน้ำไปให้สถานีสูบจ่ายน้ำปลายทางที่กระจายอยู่ทั่วเขตให้บริการต่างๆ เพื่อที่จะสูบจ่ายน้ำประปาไปยังบ้านเรือนผู้ใช้น้ำต่อไป และโรงงานงานผลิตน้ำบางเขนมีสถานีสูบจ่ายน้ำให้กับผู้ใช้น้ำที่อยู่บริเวณใกล้เคียงโรงงานผลิตน้ำบางเขน

2.4 การติดตามตรวจสอบและควบคุมคุณภาพน้ำประปา

การผลิตน้ำประปาให้ได้มาตรฐานอย่างต่อเนื่องนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการติดตามตรวจสอบและควบคุมคุณภาพน้ำประปาในทุกๆขั้นตอนของกระบวนการผลิตน้ำประปา เพื่อให้มีความสามารถในการเตรียมการที่ดีสามารถวางแผนดำเนินการได้อย่างเหมาะสม และสามารถแก้ไขหากเกิดปัญหาขึ้นได้อย่างรวดเร็วและส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตน้อยที่สุด ซึ่งข้อมูลที่สำคัญคือข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลกับคุณภาพน้ำประปา ได้แก่ คุณภาพน้ำดิบ คุณภาพน้ำระหว่างกระบวนการผลิต และคุณภาพน้ำประปาหลังกระบวนการผลิตซึ่งมีการตรวจสอบอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ออกจากโรงงานผลิตน้ำจนถึงบ้านเรือนของผู้ใช้น้ำประปา โดยคุณภาพน้ำระหว่างการผลิตที่มีการตรวจสอบอยู่ตรวจเวลาทุก 4 ชั่วโมงโดยห้องปฏิบัติการของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีดังนี้

2.4.1 ค่าความขุ่น (Turbidity)

การวัดค่าความขุ่นจะตรวจวัดด้วยเครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) ที่สามารถวัดความขุ่นของน้ำได้ตั้งแต่ 0-4,000 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้เปรียบเทียบความเข้มแสงที่กระเจิงออกมาของตัวอย่างน้ำที่ต้องการวิเคราะห์เทียบกับสารมาตรฐานภายใต้สภาวะที่กำหนดโดยถ้าความเข้มของแสงกระเจิงออกมามากขึ้นคือความขุ่นน้ำมีมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4.2 ค่าพีเอช (pH)

pH ย่อมาจาก Potential of hydrogen ion เป็นค่าที่แสดงความเป็นกรดด่างของสารเคมีจากปฏิกิริยาของไฮโดรเจนไอออน (H^+) สำหรับตัวเลขที่แสดงค่าพีเอชเท่ากับ 7 แสดงว่าสารนั้นเป็นกลางไม่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือด่าง เช่น น้ำบริสุทธิ์ ถ้ามีค่าน้อยกว่า 7 แสดงว่าเป็นกรดและถ้ามากกว่า 7 แสดงว่าเป็นด่าง (Eaton และคณะ, 1996)

2.4.3 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)

การวัดค่าการนำไฟฟ้าวิธีวัดความสามารถของน้ำในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าซึ่งเกิดจากมีอยู่ของสารประกอบอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น ไอออนลบของคลอไรด์ ไนเตรต ซัลเฟต และฟอสเฟต หรือไอออนบวกของโซเดียม แมกนีเซียม เหล็ก และอะลูมิเนียม หน่วยพื้นฐานที่ใช้วัดการนำไฟฟ้า คือ โมห์ (mho) หรือซีเมนส์ (siemens) ค่าการนำไฟฟ้าวัดเป็นไมโครโมห์ต่อเซนติเมตร (μmhos/cm) หรือไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (μS/cm) (Eaton และคณะ, 1996)

2.4.4 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

การวัดค่าความเป็นด่างเป็นการวัดความสามารถของสารละลายในการเปลี่ยนสภาพกรดให้เข้าสู่จุดสะเทินของคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) หรือไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) โดยวิธีการวิเคราะห์จะไตเตรทน้ำตัวอย่างด้วยกรดแก่จนกระทั่งถึงจุดสะเทินของคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) หรือไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) โดยใช้การเปลี่ยนแปลงของสีอินดิเคเตอร์เพื่อบอกจุดสะเทิน

2.5 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

อนุภาคขนาดเล็กซึ่งเรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์โดยทั่วไปมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10^{-6} จนถึง 10^{-3} มิลลิเมตร เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด นอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุประจำตัว โดยพวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีประจุบวกเช่น สารอินทรีย์ หรือสารจำพวกดีเทอเจนต์ ส่วนพวกที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มักจะมีประจุเป็นลบ เช่น อนุภาคของดินเหนียว เนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีประจุทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันเกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคทำให้อนุภาคเหล่านั้นมีเสถียรภาพสูง (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ดังนั้นการทำให้อนุภาคต่างๆรวมตัวกันและจับกันเป็นก้อนจะมีขั้นตอน 2 ขั้นตอนคือ

1. การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของคอลลอยด์

2. การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ ที่หมดเสถียรภาพเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด (Transport of colloidal partical)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.5.1 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

สามารถกระทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

2.5.1.1 การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layers)

กลไกการลดความหนาของชั้นกระจายสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนประจุตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ ในชั้นกระจายให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้ความหนาของชั้นกระจายลดลงและทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta potential) ลดลงตามไปด้วย เนื่องจากมีประจุบวกเข้ากันไปสะสมอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้นทำให้อำนาจของประจุลบของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม การทำลายเสถียรภาพโดยการลดความหนาของชั้นกระจายด้วยการเติมสารละลายของเกลือต่างๆ มีข้อที่น่าสนใจดังนี้

1. ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้าที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยวิธีลดความหนาของชั้นกระจายไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์

2. การที่เติมไอออนบวกเข้าไปมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้คอลลอยด์เปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวกได้ (Charge reversal) เนื่องจากจำนวนประจุต่างชนิดในชั้นกระจายถูกจำกัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์เสมอ

2.5.1.2 การดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and charge neutralization)

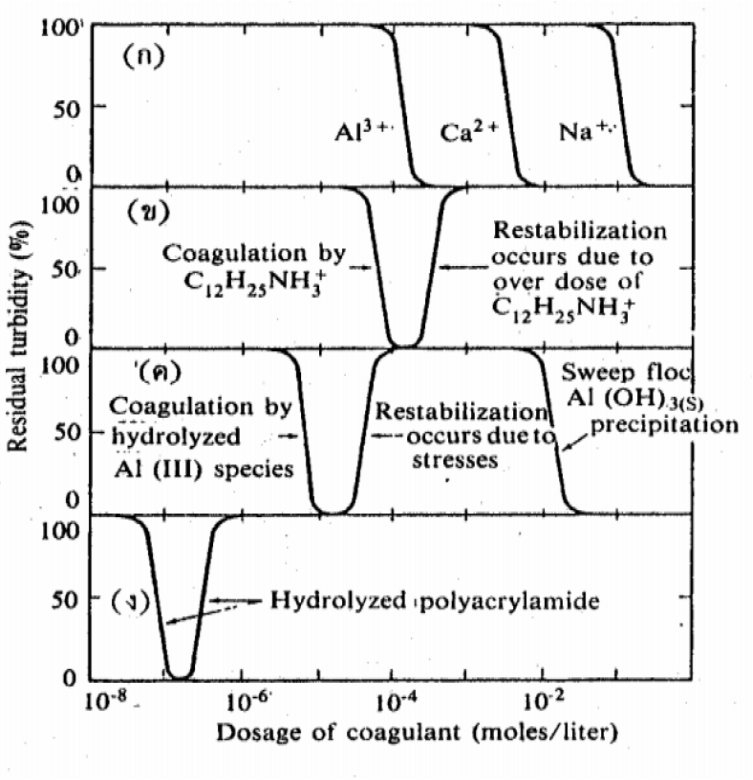
การเติมสารเคมีที่มีประจุตรงจุข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์และสามารถดูดติด บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ซึ่งการดูดติดจะมีผลทำให้สามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งเป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ กลไกการดูดติดผิวนี้แตกต่างจากกลไกแบบแรก 3 ประการ ดังนี้

1. กลไกแบบดูดติดผิวต้องการไอออนต่างชนิดน้อยกว่ากลไกแบบแรก เนื่องจากไอออนต่างประจุสามารถเข้าถึงผิวอนุภาคของอนุภาคคอลลอยด์ การทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์จึงได้ผลดีกว่าไอออนต่างประจุที่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้

2. การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดติดผิว เป็นแบบสตอยชิโอเมตริค (Stoichiometric) กล่าวคือ ปริมาณของโคแอกกูแลนท์ที่ใช้เพิ่มหรือลดตามการเพิ่มหรือลดของอนุภาคคอลลอยด์ แต่การทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่เป็นสตอยซิโอเมตริค

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3. กลไกแบบดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุของคอลลอยด์ให้เป็นตรงข้ามกับของเดิม (Charge reversal) การใช้โคแอกกูแลนท์ที่มากเกินกว่าระดับที่เหมาะสม เสถียรภาพคอลลอยด์จะกลับขึ้นมาใหม่เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น กลไกแบบลดความหนาชั้นกระจายไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุเป็นตรงข้าม เนื่องจากจำนวนไอออนต่างชนิดในชั้นกระจายถูกจำกัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์



CHULALONGKORN UNIVERSITY

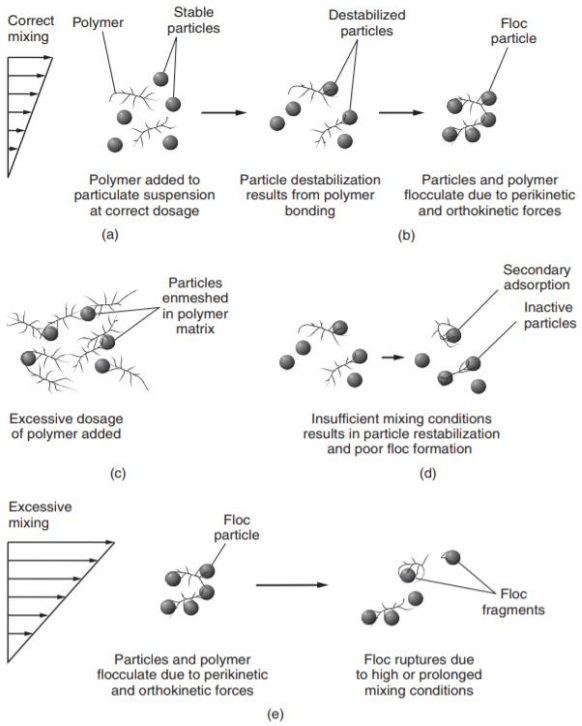
ภาพที่ 2-1 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.5.1.3 การสร้างผลึกอนินทรีย์เพื่อเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์

การเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดเช่น สารส้ม ลงไปในน้ำในปริมาณที่เพียงพอที่จะสร้างผลึก เพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและมาเกาะรวมตัวกันเป็นฟล็อคที่มีขนาดใหญ่เพียงพอต่อการที่จะตกตะกอน กลไกที่ใช้ผลึกสารอนินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะกลไกที่ใช้ คือมีการใช้ปริมาณโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมแปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ หากความขุ่นน้อยต้องใช้สารโคแอกกูแลนท์ปริมาณมากจึงจะเกิดโคแอกกูเลชันได้ดี แต่ถ้าหากน้ำมีความขุ่นที่สูงอาจจะใช้สารโคแอกกูแลนท์ที่น้อยกว่า (Zhang และคณะ, 2017)

2.5.1.4 การใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์

การเติมสารอินทรีย์โพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีประจุไฟฟ้าลงไปในน้ำทำให้เกิดประจุจำนวนมากเพื่อเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์และอีกทั้งโครงสร้างของโพลิเมอร์ยังมีสายยาวอีกจำนวนมากเพื่อเกาะจับอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง โดยอนุภาคคอลลอยด์ที่มีสายโพลิเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายสายอีกด้านที่อิสระอยู่สำหรับเกาะรวมกับอนุภาคอื่นจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์นั้นสูญเสียเสถียรภาพ



ภาพที่ 2-2 กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แบบต่อเชื่อมด้วยโพลิเมอร์ (Crittenden และคณะ, 2012)

2.5.2 การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด

การสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคเพื่อให้เกิดการเกาะติดกันจนเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อคซึ่งวิธีการสร้างสัมผัสให้กับอนุภาคต่างๆ มีหลายวิธีดังนี้

2.5.2.1 ฟล็อคคูเลชันแบบออร์โธไคเนติค (Orthokinetic flocculation)

การทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสเกิดขึ้น วิธีที่นิยมปฏิบัติกันมากที่สุดคือ การกวนน้ำให้เคลื่อนที่ด้วยอัตราไหลที่แตกต่างกันทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ที่ไม่เท่ากันจึงเกิดการสัมผัสกัน โดยที่การเคลื่อนที่ของน้ำต้องเหมาะสมไม่เร็วจนเกินไปจนเป็นเหตุให้ฟล็อคที่เกิดขึ้นหลุดออกจากกัน

2.5.2.2 การเคลื่อนที่แบบบราวเนียนหรืออาศัยความร้อน (Perikinetic flocculation)

การสร้างสัมผัสที่เกิดขึ้นเองของอนุภาคคอลลอยด์โดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) ซึ่งการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำ ในทางปฏิบัติวิธีนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาเนื่องจากต้องใช้เวลานาน

2.5.3 กลไกการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

สารส้มเป็นสารเคมีที่นิยมใช้เป็นโคแอกกูแลนท์อย่างมาก เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่างๆ และสามารถหาซื้อได้ง่ายและราคาที่ไม่แพง สารส้มมีสูตรโมเลกุล $Al_2(SO_4)_3 \times {}^*H_2O$ เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำจะละลายมีการแตกตัวของอิออนบวกและลบเกิดขึ้นดังนี้

$$Al_2(SO_4)_3 \rightarrow 2Al^{3+} + 3SO_4^{2-} \qquad (2\text{-}1)$$

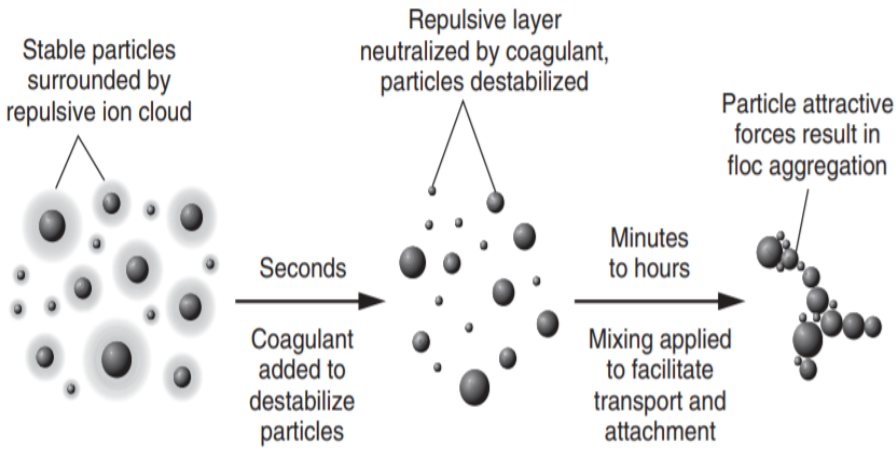
แต่เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำอิออนบวกของอะลูมินัมจะรวมอยู่กับน้ำ 6 โมเลกุลหรือ Al^{3+} เกิดการไฮโดรไลซ์(Hydrolysis) ให้เป็นอิออนต่างๆของอะลูมินัม โดยสารส้มสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จนเกิดโคแอกกูเลชันได้ด้วย 2 กลไกหลักคือ กลไกการดูดติดและทำลายประจุและกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วย (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.5.3.1 กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุ

เกิดจากการแตกตัวของสารส้มเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวกซึ่งสามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งเป็นการทำลายเสถียรภาพและทำให้อนุภาคคอลลอยด์สามารถรวมกันเกิดเป็นฟล็อคที่มีขนาดใหญ่จนสามารถตกตะกอนได้ โดยกลไกนี้จะเกิดในช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมซึ่งทำให้ควบคุมการทำงานได้ยาก

2.5.3.2 กลไกโคแอกกูเลชันแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก

เกิดโดยการสร้างผลึก $Al(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะเป็นปุย การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นจากการเติมสารส้มที่มากเกินพอทำให้ผลึกอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และสามารถสัมผัสกับอนุภาคคอลลอยด์ได้เพิ่มมากขึ้นเป็นฟล็อคที่มีขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย และค่าพีเอชควร อยู่ในช่วง 6.0-7.5



ภาพที่ 2-3 แบบจำลองการสร้างฟล็อค (Crittenden และคณะ, 2012)

2.6 กระบวนการตกตะกอน

กระบวนการตกตะกอนเป็นการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวด้วยแรงดึงดูดของโลกซึ่งจะทำให้ได้ส่วนประกอบออกมาเป็น 2 ส่วน คือ น้ำใสและสลัดจ์ (Sludge) ซึ่งในระบบการผลิตน้ำประปามุ่งเน้นที่จะแยกตะกอนออกจากน้ำเพื่อให้ได้น้ำส่วนที่ใส (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

การตกตะกอนแยกได้เป็น 4 ประเภท ตามลำดับความเข้มข้นของตะกอน ดังนี้

1. การตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling)
2. การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculant settling)

3. การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Zone settling)
4. การตกตะกอนแบบอัดตัว (Compression settling)

2.6.1 การตกตะกอนแบบโดด

การตกตะกอนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคลงแบบอิสระที่ต่างแยกกันตก โดยส่วนมากจะเกิดขึ้นในอนุภาคที่เป็นของแข็งไม่สามารถรวมตัวกันได้เช่น กรวด ทราย หิน เป็นต้น ความเร็วในการตกตะกอนจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

2.6.2 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม

การตกตะกอนที่เกิดจากตะกอนของอนุภาคต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกัน มีโอกาสมารวมตัวกันเป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมากขึ้นและความเร็วในการตกตะกอนเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดวิถีการตกตะกอนเป็นเส้นโค้ง การตกตะกอนของสารส้มหรือตะกอนที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันจัดเป็นการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม ประสิทธิภาพของการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มจะขึ้นอยู่กับอัตราน้ำล้นผิวและระยะเวลากักน้ำ

2.6.3 การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น

การตกตะกอนแบบแบ่งชั้นเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคต่างๆ มารวมตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จนเหมือนเป็นวัตถุก้อนเดียวกันที่ตกตะกอนด้วยอัตราเดียวกันเมื่อมีการตกตะกอนจะมีการแบ่งชั้นและจะเห็นการแยกตัวระหว่างน้ำใสและชั้นสลัดจ์อย่างชัดเจน การตกตะกอนเช่นนี้เกิดขึ้นได้เฉพาะกับน้ำที่มีตะกอนแขวนลอยเข้มข้นสูงมาก ประมาณ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือมากกว่า

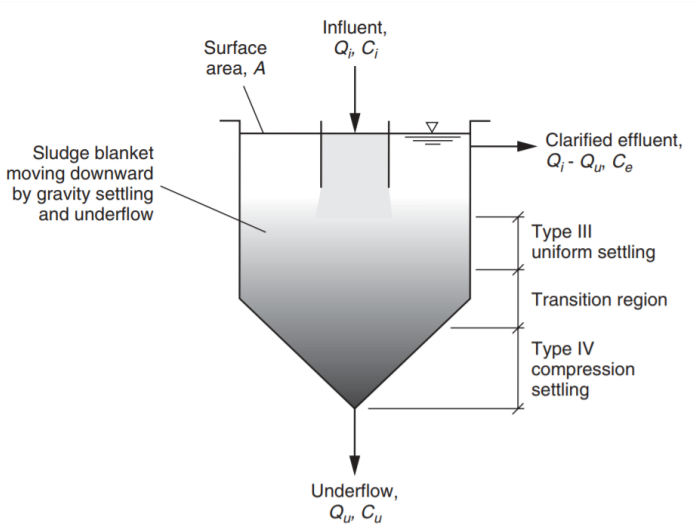
การตกตะกอนแบบแบ่งชั้นมักไม่เกิดในถังตกตะกอนแบบธรรมดาของโรงงานผลิตน้ำประปาทั่วไป แต่จะอาจจะมีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นเกิดขึ้นในถังตกตะกอนแบบสัมผัส เนื่องจากมีการสะสมตะกอนไว้ในถังตกตะกอน

2.6.4 การตกตะกอนแบบอัดตัว

การตกตะกอนแบบอัดตัวเกิดจากการอัดตัวของชั้นตะกอน โดยความสูงของชั้นตะกอนจะลดลงจากการอัดตัวเพิ่มขึ้นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First order kinetic) โดยขึ้นอยู่กับความสูงของชั้นตะกอน เนื่องจากตะกอนที่เกิดการตกตะกอนมีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ระยะเปลี่ยนแปลง (Transition zone) ซึ่งเป็นระยะที่อนุภาคบางส่วนเคลื่อนที่เข้ามาใกล้จนสัมผัสกันพอดีและทำให้อัตราการตกตะกอนลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งอนุภาคทั้งหมดสัมผัสกันพอดี จากนั้นตะกอนจะอยู่ระยะอัดตัว (Compression zone) โดยระยะนี้จะมีการเคลื่อนที่ช้ามาก

2.6.5 การวิเคราะห์ผลการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Solids flux theory)

ถังตกตะกอนแบบสัมผัสเมื่อมีการสะสมของตะกอนที่ก้นถังจนมีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นเกิดขึ้นในกรณีนี้ต้องมีการระบายตะกอนออกจากก้นถังตกตะกอนให้เหมาะสมสอดคล้องกับอัตราการเกิดตะกอน (ภาพที่ 2-4) การเคลื่อนที่ของชั้นตะกอนในถังตกตะกอนจึงเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก และแรงที่เกิดจากการระบายตะกอนออกจากถังตกตะกอน



ภาพที่ 2-4 การเคลื่อนที่ของตะกอนสลัดจ์ในถังตกตะกอน (Degremont, 2007)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ให้ V = อัตราเร็วในการตกตะกอนของตะกอนที่มีความเข้มข้น (C)

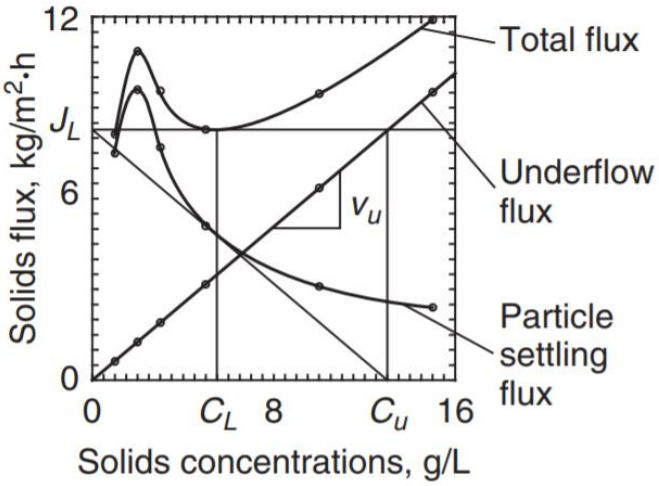
และ u = อัตราเร็วในการระบายตะกอนออกจากถังตกตะกอน

การเคลื่อนที่ของชั้นตะกอนผ่านถังตกตะกอนซึ่งทำให้ทราบปริมาณตะกอนที่ผ่านต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลาซึ่งก็คือ โซลิดฟลักซ์ (Solids flux) หรือ G_s มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ตะกอนที่มีความเข้มข้น (C) และมีการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว (V) จะมีโซลิดฟลักซ์ หรือ G_s ซึ่งคำนวณได้จาก

$$G_s = CV \qquad (2\text{-}2)$$

และค่าฟลักซ์ที่เกิดจากการระบายตะกอนออกจากถังตกตะกอนคือ Bluk flux (G_b) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของชั้นตะกอนในถังตกตะกอนเกิดขึ้นด้วยอัตราเร็ว 2 อย่าง คือ V และ u โซลิดฟลักซ์ทั้งหมดของถังตกตะกอน (G_T) จึงมีค่าดังนี้

$$G_T = G_s + G_b \qquad (2\text{-}3)$$



ภาพที่ 2-5 โซลิดซ์ฟลัก G_s และ G_b ของถังตกตะกอนที่ระดับความเข้มข้นของตะกอนต่างๆ (Degremont, 2007)

กราฟของโซลิดฟลักซ์ทั้งหมดเกิดจากผลรวมของโซลิดฟลักซ์และ Bluk flux เมื่อนำมาสร้างกราฟจะพบว่าจะมีจุดที่มีค่าความเข้มข้นของตะกอน (C_L) จะมีค่าของโซลิดฟลักซ์ทั้งหมดต่ำที่สุดที่เรียกว่า Limitting flux (G_L) หมายความว่าถังตกตะกอนที่มีอัตราการระบายตะกอนเข้มข้นออกจากถังที่อัตราเร็ว u จะมีความสามารถจำกัดในการรับตะกอนที่เคลื่อนที่ผ่านถังตกตะกอนได้ไม่เกินค่า Limitting flux ถ้าน้ำพาตะกอนเข้าไปมากกว่า Limitting flux จะทำให้มีการสะสมของตะกอนในถังตกตะกอนมากขึ้นซึ่งอาจจะทำให้ชั้นตะกอนมีระดับสูงขึ้นจนท่วมทางน้ำออก

2.7 ถังตกตะกอนสัมผัส

ถังตกตะกอนสัมผัสคือ ถังตกตะกอนที่รวมกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการฟล็อคคูเลชันอยู่ภายในถังเดียวกัน ถังตกตะกอนสัมผัสอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. แบบหมุนเวียนตะกอน (Sludge recirculation) โดยจะต้องมีการหมุนเวียนตะกอนจากจุดที่มีการตกตะกอนซึ่งเป็นตะกอนเก่าไปยังบริเวณที่เกิดกระบวนการสร้างตะกอนใหม่เพื่อให้ตะกอนเก่าเป็นตัวช่วยในการจับตะกอนใหม่เพื่อให้เกิดการตะกอน

2. แบบมีชั้นตะกอน (Sludge blanket) โดยแบบนี้จะไม่มีการหมุนเวียนตะกอน แต่ต้องมีการรักษาชั้นตะกอนให้มีปริมาณคงที่อยู่ตลอดเวลาภายในถังตกตะกอนโดยไม่แตกกระจาย และมีปริมาณที่เหมาะสม

2.7.1 ถังตกตะกอนของแข็งสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

ถังตกตะกอนของแข็งสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน เป็นถังตกตะกอนที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน สำคัญที่ใช้ในการตกตะกอนคือบริเวณกลางถังตกตะกอนที่จะเป็นบริเวณที่มีการกวนช้าของตะกอนที่ผ่านมาจากกระบวนการกวนเร็ว ได้มีการสร้างโอกาสให้อนุภาคได้สัมผัสกันและสร้างตะกอนเป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากพอก็จะตกตะกอนลงสู่ก้นถังตกตะกอน จากนั้นจะมีการหมุนเวียนตะกอนจากก้นถังตกตะกอนโดยอาศัยหลักการคือ ท่อกระจายน้ำน้ำดิบเข้าบริเวณกลางถังตกตะกอนและมีการปั่นกวนโดยใช้ใบพัดประเภท Turbine blade ซึ่งเป็นวิธีทางกลศาสตร์ และใช้แรงไฮดรอลิคซึ่งเป็นวิธีทางชลศาสตร์ ในการทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการฟล็อคคูเลชัน และเกิดการดึงตะกอนจากก้นถังตกตะกอนหมุนเวียนกลับมาเพื่อที่จะเป็นตัวช่วยในการสร้างตะกอนใหม่ให้เกิดได้เร็วขึ้น (Kawamura, 2000)

2.7.2 ถังตกตะกอนของแข็งสัมผัสแบบมีชั้นตะกอน (Sludge blanket)

ถังตกตะกอนของแข็งสัมผัสแบบมีชั้นตะกอน เป็นถังตกตะกอนที่ไม่อาศัยการหมุนเวียนตะกอน แต่จะมีการรักษาตะกอนให้มีชั้นตะกอนคงอยู่ตลอดเวลาเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่แตกกระจายหรืออัดตัวเกาะกันแน่นบริเวณก้นถัง โดยเมื่อน้ำดิบผสมกับสารเคมีแล้วจะไหลเข้าสู่บริเวณตรงกลางด้านบนถังและไหลลงด้านล่างด้วยแรงดันจะเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Kawamura, 2000) น้ำดิบที่ผ่านกระบวนการกวนแล้วจะไหลผ่านชั้นตะกอนเก่าขึ้นสู่ด้านบนตะกอนที่อยู่ในน้ำดิบจะถูกกำจัดโดยชั้นตะกอนเก่า ส่วนที่เป็นน้ำใสจะไหลขึ้นสู่ด้านบนและเข้าสู่ท่อรับน้ำต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment)

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เป็นหนึ่งในวิธีการประเมินปัญหาและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวเนื่องกับผลิตภัณฑ์ทั้งวัฏจักรของชีวิต ตั้งแต่การออกแบบ การใช้พลังงาน การใช้วัตถุดิบ กระบวนการผลิต การขนส่ง การใช้งานผลิตภัณฑ์ รวมถึงการจัดการกับซากผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะเป็นการมองภาพรวมช่วยให้หลีกเลี่ยงปัญหาที่จะเกิดจากการแก้ไขปัญหาหนึ่งแต่กลับไปสร้างปัญหากับในอีกที่หนึ่งแทนที่จะช่วยแก้ไขปัญหาในระยะยาว โดยจะพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ครอบคลุมไปถึงระบบนิเวศ สุขอนามัย และปัญหาสิ่งแวดล้อมของโลก เพื่อที่จะนำผลการประเมินที่ได้

ไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิต หรือเพิ่มทางเลือกในการจัดการทรัพยากรต่างๆ ในกระบวนการผลิต เพื่อที่จะลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรวมถึงนำไปสู่การใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งการประเมินนี้จะทำตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์อย่างละเอียด เช่น กระบวนการผลิต การบรรจุ การคัดแยก การบำรุงรักษา และการแปรรูปใช้ใหม่ เป็นต้น รวมถึงกิจกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด โดยองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International organization for standardization: ISO) ได้นิยามความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ไว้ในอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ว่า “เป็นการเก็บรวบรวมและประเมินค่าของสารขาเข้าและสารขาออก รวมถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต”

2.8.1 หลักการสำคัญของการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก (กลุ่มเทคโนโลยีการป้องกันมลพิษ, 2556) ดังนี้

1. การบ่งชี้และระบุปริมาณของภาระทางสิ่งแวดล้อม (Environmental loads) ในทุกกิจกรรมที่เกี่ยวข้องที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เช่น พลังงาน วัตถุดิบที่ถูกใช้ การปล่อยของเสีย และการแพร่กระจายของมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม
2. การประเมินและการหาค่าของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environment impacts) ที่มีโอกาสเกิดขึ้น โดยพิจารณาจากปริมาณภาระทางสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่ถูกบ่งชี้มาในขั้นตอนแรก
3. การประเมินหาโอกาสในการปรับปรุงทางสิ่งแวดล้อม และใช้ข้อมูลที่มีการแสดงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกิจกรรมเหล่านี้เป็นองค์ประกอบในการตัดสินใจ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วัตถุประสงค์ของการประเมินวัฏจักรชีวิตคือ การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากผลิตภัณฑ์หรือหน้าที่การใช้งานของผลิตภัณฑ์ การประเมินวัฏจักรชีวิตจึงเป็นเพียงเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางสิ่งแวดล้อม ไม่ได้แทนที่เครื่องมือวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมชนิดอื่นๆ ซึ่งถูกกำหนดขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะอย่างเช่น การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environment impact assessment, EIA) ซึ่งการประเมินวัฏจักรชีวิตมีประโยชน์คือ จัดทำเพื่อเป็นข้อมูลในการประกอบการตัดสินใจให้แก่ผู้มีอำนาจทั้งในส่วนของภาครัฐหรือองค์กร รวมทั้งภาคอุตสาหกรรม เช่น การวางยุทธศาสตร์และนโยบาย การวางแผนลงทุน รวมถึงการนำผลการประเมินที่ได้ไปใช้ในการปรับปรุงการดำเนินการด้านสิ่งแวดล้อม การปรับปรุงกระบวนการผลิต และ

ยังสามารถช่วยสร้างภาพลักษณ์ด้านการตลาดเพื่อเป็นข้อมูลในการประกอบการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ให้แก่ผู้บริโภค

2.8.2 วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์

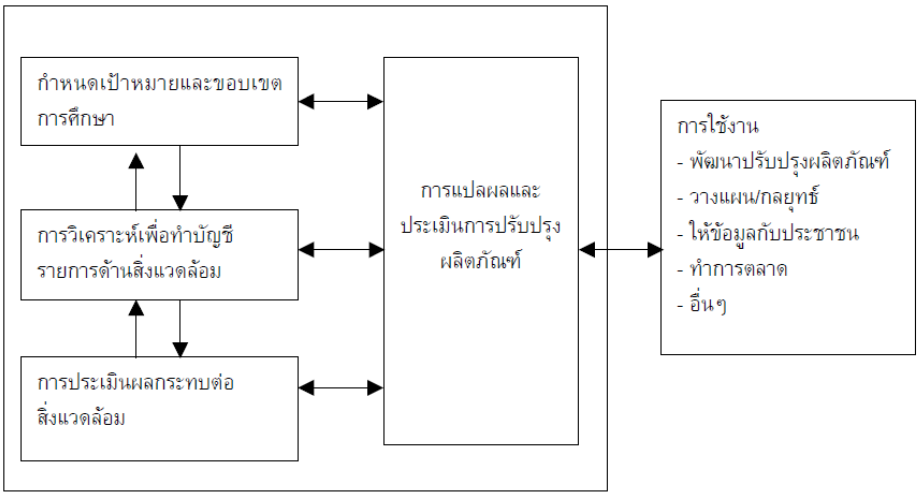
วิธีการทำการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์สามารถทำได้หลากหลายวิธี แต่ในปัจจุบันวิธีการหลักๆ ในการประเมินนิยมใช้วิธีการและขั้นตอนการศึกษาตามมาตรฐาน ISO 14040 ซึ่งการประเมินวัฏจักรชีวิตจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากในผลิตภัณฑ์หนึ่งๆ อาจจะต้องมีการพิจารณากระบวนการต่างๆ เป็นร้อยกระบวนการ และในแต่ละกระบวนการอาจมีข้อมูลที่ต้องเก็บมากมาย เช่น ปริมาณการใช้ไฟฟ้า ปริมาณการใช้สารเคมี ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ของเสียที่เกิดขึ้น โดยขั้นตอนการดำเนินงานของการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอนย่อยดังนี้ (พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์, 2547)

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของผลิตภัณฑ์ที่จะทำการประเมิน หน้าที่ของผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปใช้งาน และรายละเอียดอื่นๆ ตามที่ต้องการศึกษา

ขั้นตอนที่ 2 – ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วยการสร้างแผนผังการไหลของกระบวนการ การเก็บข้อมูล การกำหนดขอบเขตระบบ การระบุชนิด ปริมาณของการใช้วัตถุดิบ น้ำ พลังงาน การปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อม และการใช้พื้นที่ในแต่ละกระบวนการ

ขั้นตอนที่ 6 – ขั้นตอนที่ 7 การประเมินผลกระทบประกอบด้วย การจำแนกกลุ่มผลกระทบ (Classification) และการกำหนดบทบาท (Characterization) ซึ่งผลกระทบที่เกิดจากการใช้ทรัพยากรและการปล่อยของเสียทั้งหมดจะถูกจำแนกกลุ่มและระบุปริมาณเชิงตัวเลขแยกตามประเภทของผลกระทบสิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจมีการให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting)

ขั้นตอนที่ 8 การประเมินปรับปรุง เป็นการรายงานผลข้อมูลการศึกษา และผลการประเมินโอกาสที่เป็นไปได้ในการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นระบบ



ภาพที่ 2-6 กรอบการดำเนินงาน LCA จากอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040
(พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์, 2547)

2.8.3 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต

การศึกษาการประเมินวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ต้องทราบว่าอะไรคือสิ่งที่จะทำการศึกษาและจะศึกษาอย่างไร ซึ่งผลของการศึกษาจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา โดยการประเมินวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์สามารถนำไปใช้กับเป้าหมายหลักๆ ที่มีความแตกต่างกัน ได้แก่

1. เพื่อวิเคราะห์จุดแข็งและจุดอ่อนของผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องอาศัยข้อมูลด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
2. เพื่อปรับปรุงผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องอาศัยความรู้พื้นฐานของการออกแบบและข้อมูลในเชิงตัวเลขค่อนข้างมาก
3. เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ซึ่งต้องอาศัยความรู้ของระบบผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องและข้อมูลเพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกซื้อ

ขอบเขตของการศึกษาจะสัมพันธ์กับความซับซ้อนของเป้าหมายการศึกษาและจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการศึกษา หากการศึกษามีเป้าหมายที่ต้องการความน่าเชื่อถือของข้อมูลสูง หรือต้องการเผยแพร่สู่สาธารณะ ขอบเขตของการศึกษา ระยะเวลา และค่าใช้จ่ายก็จะสูงตาม

2.8.3.1 เป้าหมายของการศึกษา

เป้าหมายของการศึกษาควรจะมีความชัดเจน ไม่คลุมเครือ ควรกำหนดเหตุผลในการศึกษาและจุดมุ่งหมายที่จะนำผลการศึกษาไปเผยแพร่หรือใช้งานต่อ เนื่องจากเป้าหมายเป็นจุดเริ่มต้นการศึกษาจึงมีความสำคัญต่อแนวทางการประเมินที่ออกมา นอกจากนี้ควรประเมินว่าวิธีการวิเคราะห์วิธีใดสามารถนำมาใช้ในการศึกษาได้บ้างโดยพิจารณาจากเหตุผลในการศึกษาลักษณะการนำผลการศึกษาไปใช้

2.8.3.2 ขอบเขตของการศึกษา

ขอบเขตของการศึกษาเป็นตัวกำหนด ระบบ ขอบเขต ความถูกต้องของข้อมูล สมมติฐาน และข้อจำกัดของข้อมูล โดยที่ควรมีการกำหนดรายละเอียดของขอบเขตที่เพียงพอ ขอบเขตทั้งหมดรวมทั้งลำดับขั้นและสมมติฐานควรระบุอย่างชัดเจนและเข้าใจง่ายและขอบเขตของการประเมินจะต้องมีความสอดคล้องกับเป้าหมาย โดยขอบเขตของการประเมินไม่จำเป็นที่จะต้องครอบคลุมกระบวนการทั้งหมดอาจยกเว้นขั้นตอนการขนส่ง การใช้งานและการกำจัดเมื่อหมดอายุ แต่หากต้องการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่มีหน้าที่เดียวกันโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ปลายน้ำที่มีการนำไปใช้งานจำเป็นต้องคำนึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานและการทำลายซากผลิตภัณฑ์เมื่อหมดอายุ

2.8.3.3. หน่วยการทำงาน

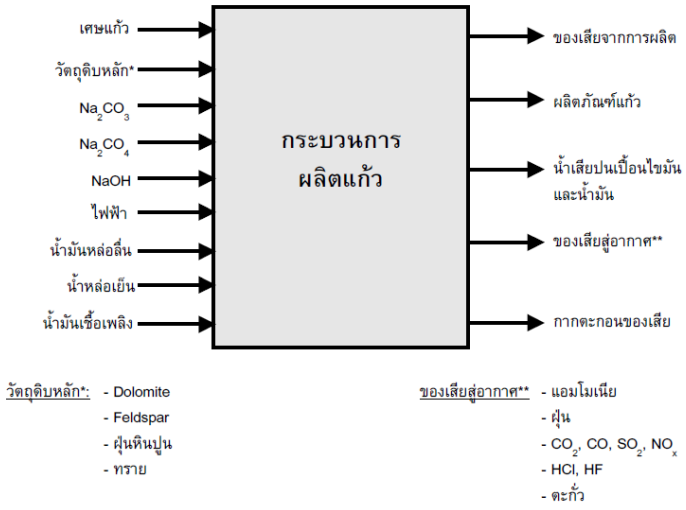
หน่วยการทำงานถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้เป็นพื้นฐานสำหรับกำหนดการวัดหรือเก็บข้อมูลของสารขาเข้าและสารขาออกจากระบบ หน่วยการทำงานมีความสำคัญใช้ในการเปรียบเทียบผลหรือเป็นตัววัดค่าระหว่างผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ข้อมูลอยู่บนหน่วยพื้นฐานเดียวกัน

2.8.4 การจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Life cycle inventory)

การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขต เนื่องจากความถูกต้องของการประเมินวัฏจักรชีวิตขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลจึงจำเป็นต้องเก็บรวบรวมและทำการคำนวณข้อมูลของสารของสารขาเข้า และสารขาออกที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์ (Product system) การรวบรวมข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิ โดยข้อมูลสารขาเข้า เช่น วัตถุดิบ ทรัพยากร พลังงานที่ใช้ในกระบวนการ

ผลิต และข้อมูลขาออก เช่น การปล่อยของเสียสู่อากาศ น้ำ ดิน โดยการรวบรวมข้อมูลจะพิจารณาถึงคุณภาพของข้อมูลที่ใช้ในการประเมินและการได้มาซึ่งข้อมูล รวมถึงความละเอียดและชัดเจน

การวิเคราะห์บัญชีรายการอาจต้องซ้ำไปมาในบางครั้ง เนื่องจากอาจมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติม การเปลี่ยนแปลงวิธีเก็บข้อมูล หรือการเพิ่มประเด็นปัญหาเพื่อให้สอดคล้องกับเป้าหมายของการศึกษาที่ตั้งไว้ นอกจากนี้การเก็บข้อมูลในบัญชีรายการนั้นจะต้องทำความสัมพันธ์กับทุกกระบวนการย่อยในระบบ ซึ่งมีวิธีการเก็บข้อมูลแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเป้าหมายกระบวนการหรือระบบที่เกี่ยวข้อง



ภาพที่ 2-7 ตัวอย่างสารขาเข้าและขาออกของกระบวนการผลิตแก้ว (พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์, 2547)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8.4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data collection)

เมื่อแบ่งกระบวนการทั้งระบบออกเป็นกระบวนการย่อยต่างๆ แล้วจึงรวบรวมข้อมูลรายละเอียดต่างๆ ของสารขาเข้า เช่น วัตถุดิบ พลังงาน เป็นต้น ข้อมูลขาออก เช่น ผลิตภัณฑ์ ของเสีย มลสารที่ปล่อยออกสู่อากาศ น้ำ ดิน เป็นต้น โดยข้อมูลในแต่ละกระบวนการภายในขอบเขตจะต้องแสดงทั้งชนิดและปริมาณตามบัญชีหลักๆ ดังนี้

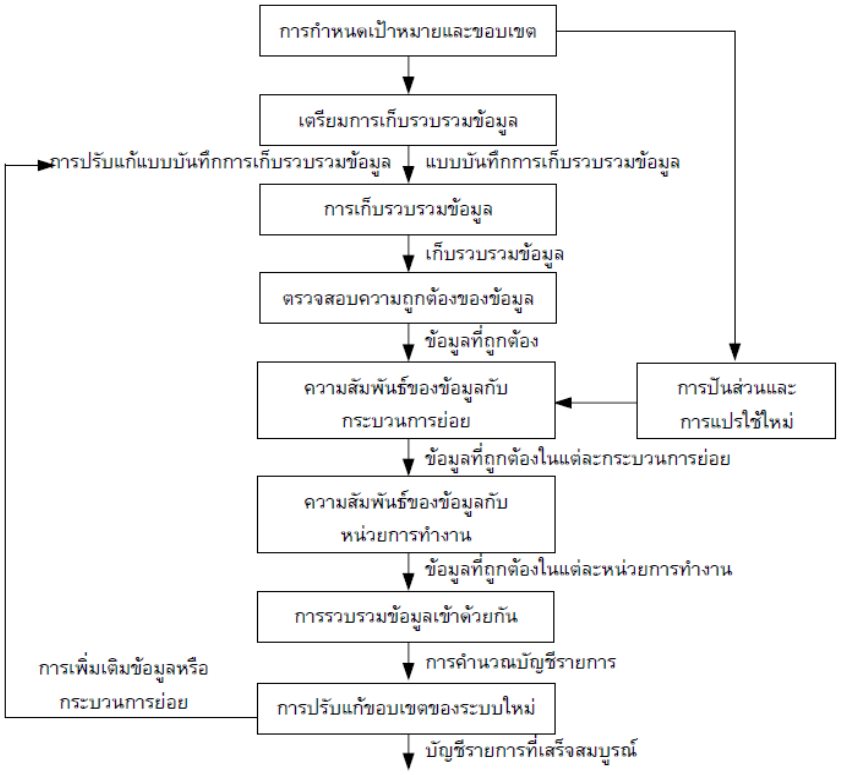
1. พลังงานที่นำเข้าระบบ วัตถุดิบที่นำเข้า ทรัพยากร และส่วนนำเข้าอื่นๆ
2. ผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์พลอยได้ และของเสียที่เกิดขึ้น
3. มลสารที่ปล่อยสู่อากาศ มลสารที่ปล่อยสู่น้ำ และในดิน
4. ปัญหาสิ่งแวดล้อมอื่นๆ

2.8.4.2 การคำนวณข้อมูล (Calculation)

ภายหลังจากการเก็บรวบรวมข้อมูลเรียบร้อย ขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนการคำนวณข้อมูลซึ่งเป็นการสร้างผลลัพธ์เพื่อการกำหนดบัญชีรายการของแต่ละกระบวนการย่อย การคำนวณข้อมูลจะประมวลจากข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมมาแล้ว นำมาคิดตามแต่ละขั้นตอนซึ่งรวมถึงการตรวจสอบความถูกต้อง การเชื่อมโยงข้อมูลกับหน่วยการทำงาน และการเชื่อมโยงข้อมูลกับหน่วยการผลิตและหน่วยการศึกษา

2.8.4.3 การปันส่วน (Allocation)

ในการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม ในกระบวนการย่อยภายในระบบที่ศึกษาอาจเกิดผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป แต่มีผลิตภัณฑ์เพียงชนิดเดียวที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการต่อไปหรือนำมาพิจารณา ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปแปรรูปใช้ใหม่เป็นวัตถุดิบในกระบวนการอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องมีการปันส่วนปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมเข้าไปในผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด (อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 2560)

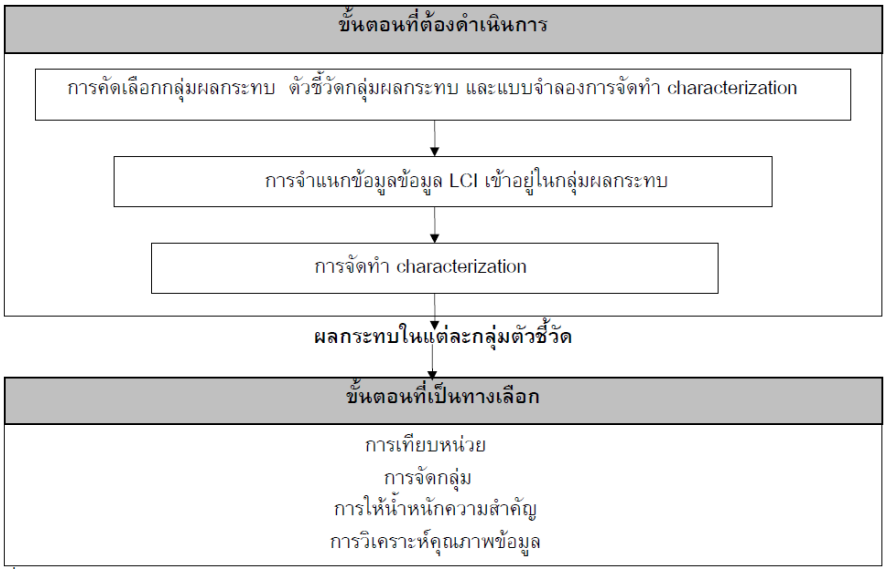


ภาพที่ 2-8 ขั้นตอนโดยทั่วไปของการวิเคราะห์บัญชีรายการ (อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 2560)

2.8.5 การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life cycle impact assessment)

การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เพื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ จัดเป็นกระบวนการที่ต้องใช้เทคนิคในการจัดการข้อมูลในเชิงคุณภาพและปริมาณจากการใช้ทรัพยากรและการปล่อยของเสียหรือสารขาเข้าและสารขาออกที่ได้มาจากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม การประเมินผลกระทบตามหลักการที่กำหนดในมาตรฐาน 14042 การทำการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนที่ต้องดำเนินการ ได้แก่
   - การคัดเลือกกลุ่มผลกระทบ (Impact categories) ตัวชี้วัดกลุ่มผลกระทบ (Category indicators) และแบบจำลองการกำหนดบทบาท
   - การจำแนกข้อมูลบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมเข้าอยู่ในกลุ่มผลกระทบ
   - การกำหนดบทบาท
2. ขั้นตอนที่เป็นทางเลือกให้ศึกษาเพิ่มเติม ได้แก่
   - การเทียบหน่วย
   - การจัดกลุ่ม
   - การให้น้ำหนักความสำคัญ
   - การวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูล



ภาพที่ 2-9 ขั้นตอนการจัดทำ LCIA ตามมาตรฐาน ISO 14042 (พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์, 2547)

2.8.5.1 การคัดเลือกกลุ่มผลกระทบ (Impact catagories)

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมนั้นจะต้องจำแนกว่าระบบผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเป้าหมายและขอบเขตการศึกษานั้นมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านใดบ้างและเกิดขึ้นจากกระบวนการใด ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์และจำแนกผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากสารขาเข้าและสารขาออกทั้งหมดออกเป็นหมวดหมู่ สำหรับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญต่อกระประเมินผลกระทบ (Kounina และคณะ, 2013) ตัวอย่างเช่น

- การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change)
- การสิ้นเปลืองทรัพยากร (Resource depletion)
- การก่อให้เกิดความเป็นกรด (Acidification)
- การทำให้โลกร้อน (Global warming)
- การทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ (Ozone depletion)
- การออกซิเดชั่นที่เกิดจากปฏิกิริยาแสง-เคมี (Photochemical oxidation)
- ภาวะการณ์เพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหารในแหล่งน้ำ (Nutrification)
- การก่อให้เกิดความเป็นพิษในมหาสมุทร (Aquatic ecotoxicicity)
- การก่อให้เกิดสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8.5.2 การกำหนดประเภทผลกระทบ (Classification)

การนำข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์บัญชีรายการมาจำแนกตามกลุ่มผลกระทบที่ได้คัดเลือกไว้แล้วซึ่งในกลุ่มผลกระทบหนึ่งๆ อาจจะมีสารขาเข้าหรือสารขาออกมากกว่า 1 ชนิดที่เป็นปัจจัยต่อการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในการพิจารณาผลกระทบประเภทนี้จะต้องพิจารณาถึงกลไกการเกิดผลกระทบซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ผลกระทบแบบคู่ขนาน และผลกระทบแบบอนุกรมหรือแบบต่อเนื่อง

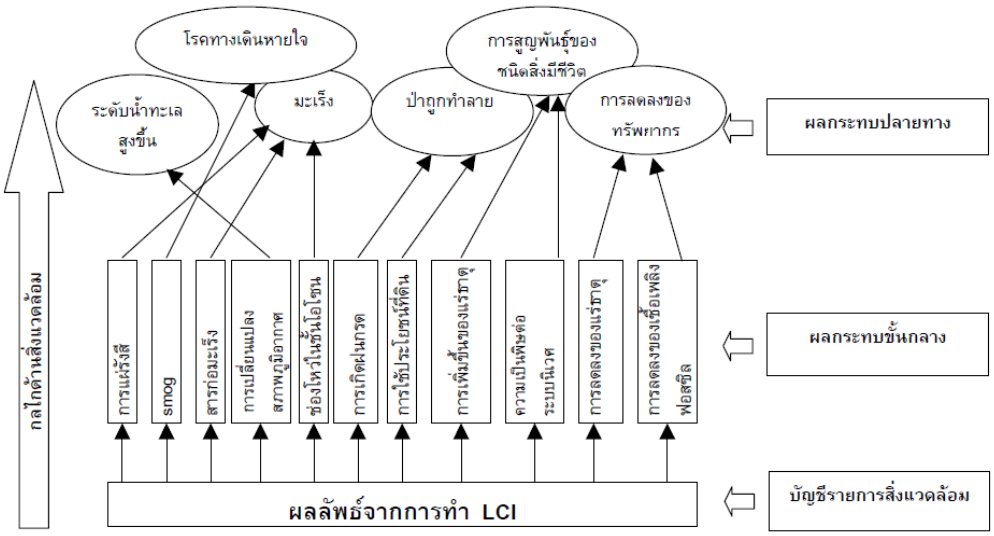
2.8.5.3 การหาขนาดผลกระทบ (Normalization)

การแสดงขนาดผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวม เนื่องจากผลกระทบที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันตามสภาวะแวดล้อม ในกรณีที่เปรียบเทียบกับพื้นที่เป็นตารางเมตร ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันตามเขตพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ที่ได้รับผลกระทบ

อาจจะเป็นระดับท้องถิ่น ภูมิภาค หรือระดับโลก เช่น ภาวะโลกร้อนที่เป็นผลกระทบระดับโลก การทำให้เกิดฝนกรดส่งผลกระทบในระดับภูมิภาค จึงต้องมีการกำหนดให้ผลกระทบจากผลิตภัณฑ์มีการคำนวณเทียบเป็นสัดส่วนของผลกระทบทั้งหมดต่อผลกระทบเพียงในเฉพาะพื้นที่นั้นๆ

2.8.5.4 การให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting)

เป็นการให้น้ำหนักความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นโดยจะทำการเปรียบเทียบว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมใดสำคัญที่สุด ซึ่งลักษณะของผลกระทบจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ และการใช้ทรัพยากร (Pillot และคณะ, 2016)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 2-10 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์ LCI กับผลกระทบขั้นกลางและผลกระทบปลายทาง (พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์, 2547)

2.8.6 การแปลผล (Interpretation)

ขั้นตอนการแปลผลเป็นการนำผลการศึกษาที่ได้รับจากการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมและการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาเชื่อมโยงเพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ สรุปผลและจัดเตรียมข้อเสนอแนะที่มาจากผลลัพธ์ของการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ รวมถึงจัดทำรายงานสรุปผลการแปลผลการศึกษาให้สามารถเข้าใจได้ง่าย สมบูรณ์ครบถ้วน และมีความสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษาที่กำหนด

การแปลผลการศึกษาประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ได้แก่

1. การจำแนกประเด็นที่สำคัญมาจากผลลัพธ์ของขั้นการวิเคราะห์
2. การประเมินค่าเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ ความอ่อนไหวของผลการศึกษา และความสอดคล้องของข้อมูล
3. การจัดทำบทสรุป ข้อเสนอแนะและรายงานผล

2.8.6.1 การจำแนกประเด็นสำคัญ

การจำแนกประเด็นสำคัญคือ การจัดกลุ่มของข้อมูลหรือผลลัพธ์จากการประเมินวัฏจักรชีวิตโดยต้องสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษาและการประเมินค่าผลการศึกษาผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินจะถูกนำมาจัดกลุ่มให้เหมาะสม เช่น จัดกลุ่มแยกตามขั้นตอนที่เกิดขึ้นในวัฏจักร แยกตามกระบวนการย่อยของระบบผลิตภัณฑ์ การขนส่ง การจัดหาพลังงาน โดยข้อมูลเหล่านี้อาจอยู่ในรูปของตาราง รายการ หรือการนำเสนอแบบอื่นๆ

2.8.6.2 การประเมินค่า

การประเมินค่าคือ การตรวจสอบความสมบูรณ์ของข้อมูลเพื่อให้แน่ใจว่าข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลที่ต้องการและตรงประเด็นสำหรับการแปลผลการศึกษา การประเมินค่าควรจะพิจารณาถึงความสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตการศึกษาและการนำผลลัพธ์ไปใช้ภายหลังด้วย

2.8.6.3 การจัดทำบทสรุป ข้อเสนอแนะ และรายงานผล

การจัดทำบทสรุปคือ ขั้นตอนในการปรับปรุงกระบวนการโดยจะต้องทำสรุปผลการประเมิน และข้อเสนอแนะแนวทางที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง โดยในการจัดทำบทสรุปมีลำดับขั้นดังนี้

1. จำแนกประเด็นสำคัญ
2. ประเมินวิธีการและผลลัพธ์ เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ ความอ่อนไหวและสอดคล้องผลการศึกษา
3. จัดทำผลสรุปเบื้องต้นและตรวจสอบความสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษาที่กำหนดไว้ โดยเฉพาะในเรื่องคุณภาพของข้อมูล การตั้งสมมติฐานและค่าอ้างอิงต่างๆ และการนำไปประยุกต์ใช้
4. ถ้ามีความสอดคล้องกันตามข้อ 3 แล้ว ให้จัดทำเป็นรายงานสรุปฉบับเต็ม หากไม่สอดคล้องให้ย้อนกลับไปทำ 3 ขั้นตอนข้างต้นอีกครั้งหนึ่ง

2.9 โปรแกรมประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

ปัจจุบันบริษัทและองค์กรต่างๆ ได้พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต และแก้ปัญหาในการจัดการกับข้อมูลในปริมาณมาก การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์บางโปรแกรมได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างสมบูรณ์ แต่บ่อยครั้งที่ตัวอย่างโปรแกรมเหล่านี้มีข้อจำกัดในการศึกษา ประเด็นสำคัญในการเลือกใช้โปรแกรมคือ เรื่องของฐานข้อมูลและวิธีในการวิเคราะห์คำนวณผลกระทบ คุณสมบัติของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิตแต่ละโปรแกรมแสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 การเปรียบเทียบโปรแกรมสำเร็จรูปในการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Ren และ Su, 2016)

หัวข้อ	SimaPro V.8.3 (2016)	Gabi V.2016	CES V.2016	Sustainable Minds 2016
ผลิตภัณฑ์เป็นไปตามมาตรฐาน	★★★★	★★★★	★★	★★
วิธีในการประเมิน	★★★★	★★★	★	★★
ฐานข้อมูล	★★★★	★★★	★★★	★★
การเพิ่มฐานข้อมูล	★★★★	★★★	★	★
การแสดงผล	★★★★	★★	★★	★★★
รายละเอียด	★★★★	★★★★	★	★★
ความแพร่หลาย	★★★★	★★★	★★	★★★

หมายเหตุ : เกณฑ์การให้คะแนน

★★★★ = ดี

★★★ = ปานกลาง

★★ = น้อย

★ = น้อยที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Haydar และ Aziz (2009) ศึกษาการใช้สารส้มร่วมกับโพลิเมอร์ประจุบวกและโพลิเมอร์ประจุลบในกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อคคูเลชันของการบำบัดน้ำเสีย โดยผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้สารส้มเป็นสารตกตะกอน การใช้สารส้มร่วมกับโพลิเมอร์ประจุบวกและการใช้สารส้มร่วมกับโพลิเมอร์ประจุลบ พบว่าการใช้สารส้ม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับโพลิเมอร์ประจุบวก 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดความขุ่นได้ถึงร้อยละ 97 ที่ความขุ่นน้ำดิบ 1184 เอ็นทียู และการใช้สารส้ม 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับโพลิเมอร์ประจุลบ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดความขุ่นได้สูงถึงร้อยละ 99.4 ที่ความขุ่นน้ำดิบ 1302 เอ็นทียู เนื่องจากการใช้โพลิเมอร์เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมให้ตะกอนเคลื่อนที่มาสัมผัสและรวมกลุ่มกันเป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นและสามารถตกตะกอนได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการใช้สารเคมีต่อน้ำปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร การใช้สารส้มร่วมกับโพลิเมอร์มีต้นทุนที่ต่ำกว่าการใช้สารส้มในการกำจัดความขุ่นเพียงชนิดเดียว

Bonton และคณะ (2012) เปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของระบบผลิตน้ำประปาแบบระบบ ทั่วไป และแบบระบบนาโนฟิลเทรชัน (Nanofiltration) เนื่องจากระบบผลิตน้ำประปามีขั้นตอนในการผลิตที่จะต้องใช้พลังงานและสารเคมีจำนวนมากในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนซึ่งเป็นปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้นำการประเมินวัฏจักรชีวิตมาเป็นเครื่องมือในการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยขอบเขตการศึกษาครอบคลุม Candle to grave ซึ่งข้อมูลที่นำมาจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตทั้งหมดเช่น วัตถุดิบ สารเคมี พลังงาน การขนส่ง รวมถึงการปล่อยของเสียจากกระบวนการผลิต เป็นต้น การประเมินวัฏจักรชีวิตในการศึกษานี้ได้เลือกประเภทผลกระทบในขั้นกลาง 13 ประเภทซึ่งจะนำมาให้น้ำหนักและจัดกลุ่มเป็นผลกระทบในขั้นปลาย จากผลการศึกษาพบว่าระบบนาโนฟิลเทรชัน มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 0.55 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมากกว่าระบบทั่วไปที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเพียง 0.16 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผลิตโดยระบบทั่วไปทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ร้อยละ 62 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและการลดลงของทรัพยากรร้อยละ 88 เนื่องจากสารเคมีตัวดูดซับใช้ผลิตมากจากถ่านซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของทรัพยากรธรรมชาติ รวมถึงมลพิษที่ปล่อยมาจากกระบวนการผลิตที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นิติวิศว์ แตงไทย (2556) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สามารถลดลงได้จากการโครงการลดปริมาณน้ำสูญเสียที่เกิดจากระบบผลิตและจ่ายน้ำประปา เพื่อจัดทำข้อเสนอแนะในการส่งเสริมการลดน้ำสูญเสียและแนวทางในการประเมินก๊าซเรือนกระจกที่ลดลงได้จากการดำเนินการลดน้ำสูญเสีย กรณีศึกษาจากการประปาส่วนภูมิภาคสาขาเชียงราย โดยมีขอบเขตการศึกษาในกระบวนการผลิตน้ำประปาและระบบจ่ายน้ำประปา การเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการวิจัยได้อาศัยข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้ปฏิบัติงาน การประมวลผลข้อมูลทุติยภูมิโดยเก็บรวบรวมข้อมูลย้อนหลังเป็นเวลา 3 ปี เช่น กำลังการผลิตน้ำประปา ชนิดและปริมาณสารเคมีและพลังงานที่ใช้ในการผลิต พื้นที่ให้บริการ จำนวนผู้ใช้น้ำประปา ปริมาณน้ำสูญเสีย แนวทางการลดน้ำสูญเสีย เป็นต้น การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจัดทำจากโปรแกรม SimaPro7.0 วิเคราะห์ด้วยวิธี ReCiPe แบบผลกระทบปลายทาง จากการวิจัยพบว่า ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการผลิตและจ่ายน้ำประปาเฉลี่ยประมาณ 118,000 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเดือน ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดต่อน้ำประปาที่ผลิตประมาณ 0.17 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร โดยน้ำสูญเสียที่เกิดขึ้นเฉลี่ยประมาณ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน และหลังจากการดำเนินโครงการลดน้ำสูญเสียสามารถลดน้ำสูญเสียได้ประมาณ 60,000 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน เมื่อเทียบออกมาเป็นก๊าซเรือนกระจกที่เกิดที่เกิดจากน้ำสูญเสียสามารถลดลงจากการลดปริมาณน้ำสูญเสียในระยะเวลา 2 ปี ลดลงเท่ากับ 131,075 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และปริมาณน้ำสูญเสียที่สามารถลดลงได้จากการดำเนินโครงการเท่ากับ 850,121 ลูกบาศก์เมตร และสรุปแนวทางการลดน้ำสูญเสียในกระบวนการผลิตและจ่ายน้ำประปา คือ การตรวจสอบและเปลี่ยนท่อและรอยต่อของท่อที่ชำรุด การควบคุมแรงดันในท่อจ่ายน้ำประปาให้อยู่ในช่วง 5-7 เมตรเพื่อป้องกันการระเบิดหรือท่อแตก แบ่งพื้นที่ระบบการจ่ายน้ำประปาให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มจำนวนระบบตรวจสอบและติดตามการรั่วไหล ตรวจสอบและเปลี่ยนมิเตอร์น้ำประปาที่ชำรุด และจัดทำเบอร์โทรศัพท์ศูนย์แจ้งการพบน้ำรั่วไหล เพื่อให้ประชาชนสามารถช่วยติดตามและตรวจสอบท่อประปาที่มีปัญหา

พลอยไพลิน ร่มโพธิ์ภักดิ์ (2556) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนชนิดเจ็ทแคร์รีไฟเออร์ (Sludge Recirculation Jet Clarifier) สำหรับการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบ เพื่อหากลไกภายในถังตกตะกอนและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ โดยงานวิจัยนี้ศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการควบคุมถังตกตะกอนได้แก่ ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ 4 ชนิดคือ สารส้มน้ำ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอร์ริคคลอไรด์ และอะลูมิเนียมคลอโรไฮเดรต ศึกษาชนิดและความขุ่นของน้ำดิบเริ่มต้น (20-200 เอ็นทียู) โดยมีน้ำดิบสังเคราะห์จากน้ำประปาผสมอนุภาคเบนโทไนท์และน้ำดิบจริงจากคลองประปา ศึกษาอัตราการไหลของน้ำดิบที่เข้าสู่ถังตกตะกอน ศึกษาความสูงของชั้น

ตะกอนในถังตกตะกอนและระยะห่างระหว่างสัดส่วนต่างๆ ภายในถังตกตะกอน โดยทุกการทดลองจะดำเนินการทดลองจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ผลการวิจัยพบว่าสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตกตะกอนในการศึกษา คือ สารส้มน้ำ ปริมาณของสารเคมีที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบและปริมาณสารเคมีที่ใช้จะมีผลต่อคุณภาพน้ำออกเช่น ความขุ่นของน้ำ ค่าพีเอช และค่าความเป็นด่าง และถังตกตะกอนมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมากกว่าร้อยละ 80 ที่อัตราการไหล 70 ลิตรต่อชั่วโมง (อัตราน้ำล้นผิว 0.2859 เมตรต่อชั่วโมง) ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามเกณฑ์การออกแบบ และความสูงของชั้นตะกอนที่เหมาะสมคือ 25 เซนติเมตร เนื่องจากความสูงของชั้นตะกอนจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนกลับเข้าไปในระบบเพื่อเพิ่มเป้าสัมผัสระหว่างอนุภาคในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

Del Borghi, Strazza และ Gallo (2013) ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตระบบผลิตและสูบจ่ายน้ำประปาในประเทศอิตาลี โดยศึกษาตั้งแต่การได้มาซึ่งน้ำดิบ กระบวนการผลิต และกระบวนสูบจ่ายน้ำประปา จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนของผลกระทบจากการกระบวนการต่างๆ ในการผลิตน้ำประปา เช่น กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ น้ำสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ การใช้พลังงานในกระบวนการ และการซ่อมบำรุงอุปกรณ์เครื่องจักร โดยผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนส่วนใหญ่เกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยค่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนที่เกิดจากโรงงานผลิตน้ำประปาในปี 2010 มีค่าเท่ากับ 0.205 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร และค่าผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดมีค่าเท่ากับ 0.003 กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Pillot และคณะ (2016) ได้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตเพื่อประเมินและเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มาจากการทำโครงการลดน้ำสูญเสีย ตั้งแต่การออกแบบ การทำกิจกรรมทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับโครงการตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุด เพื่อหาแนวทางการดำเนินงานโครงการลดน้ำสูญเสียในระบบสูบจ่ายน้ำประปาที่เหมาะสมที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดและให้มีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ครอบคลุมไปถึงระบบนิเวศ ทรัพยากรธรรมชาติ และสุขอนามัยของชุมชน จากการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต พบว่าผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบปลายทางของทั้ง 4 โครงการจะพบว่าในโครงการที่ 1 มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมากแต่มีปริมาณน้ำสูญเสียมาก ในโครงการที่ 4 มีประสิทธิภาพการสูบจ่ายน้ำสูงแต่ก็มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงตามมาเช่นกัน และในโครงการที่ 2 และ 3 มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับค่อนข้างสูงใกล้เคียงกัน แต่ในโครงการที่ 3 สามารถลด

ปริมาณน้ำสูญเสียได้มากที่สุดถึง 154,553 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อถึงในระดับหนึ่ง ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจะถูกชดเชยด้วยปริมาณน้ำสูญเสียที่ลดลง

Rodriquez, Villamizar-Gallardo และ Garcia (2016) ได้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต การประเมินวัฏจักรของโรงงานผลิตน้ำ 4 แห่งที่ตั้งอยู่ทางตะวันออกเฉียงเหนือของโคลัมเบียเพื่อประเมินภาระด้านสิ่งแวดล้อมตามแนวทางสากลระบุใน ISO 14040 ขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการน้ำดื่มได้รับการประเมินอย่างละเอียด เริ่มต้นตั้งแต่จุดกักเก็บน้ำผ่านกระบวนการผลิตและการสูบจ่ายน้ำ หน่วยการทำงานถูกกำหนดคือน้ำดื่ม 1 ลูกบาศก์เมตรที่ผลิตในโรงงาน วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ฐานข้อมูล Ecoinvent v.3.01 และมีการประมวลผลในซอฟต์แวร์ SimaPro ผลที่ได้พบว่า ในกระบวนการตกตะกอนมีภาระทางสิ่งแวดล้อมที่สูงมาจากการใช้สารโคแอกกูแลนต์ และการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตเป็นแหล่งกำเนิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ โดยการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยมุ่งเน้นไปที่สารเคมีและการใช้พลังงานจะสามารถช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตได้

Stravropoulos และคณะ (2016) เปรียบเทียบการใช้วิธีที่แตกต่างกันในการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยในแต่ละวิธีการมีตัวชี้วัดผลกระทบที่แตกต่างกัน ซึ่งวิธีการที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ได้แก่ วิธีการแบบ ReCiPe วิธีการแบบ Eco-indicator 99 และวิธีการแบบ IMPACT 2002+ โดยเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการประเมินผลกระทบปลายทางทั้ง 3 ด้านพบว่า ค่าผลกระทบจากการประเมินแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โดยวิธีการประเมินแบบ ReCiPe และ IMPACT 2002+ จะให้ความสำคัญกับการประเมินผลกระทบปลายทางในด้านผลกระทบต่อระบบนิเวศและผลกระทบต่อการใช้ทรัพยากร ในส่วนของวิธีการประเมินแบบ Eco-indicator 99 จะให้ความสำคัญกับการประเมินผลกระทบปลายทางด้านสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ซึ่งในการเลือกใช้งานวิธีการประเมินผลกระทบในแต่ละวิธีขึ้นอยู่กับความต้องการและความสนใจของผู้ที่ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

Raghuvanshi และคณะ (2017) ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของการนำน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ของมหาวิทยาลัยในประเทศอินเดีย การปล่อยมลพิษจากระบบบำบัดน้ำเสียมาจากหลายปัจจัยจึงได้นำการประเมินวัฏจักรชีวิตมาเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Umberto NXT Universal ซึ่งเป็นซอฟแวร์ในการประเมินวัฏจักรชีวิต ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จำแนกในการประเมินนี้จำแนกออกเป็น 2 ประเภทคือ ผลกระทบขั้นกลาง และผลกระทบปลายทาง โดยผลกระทบขั้นกลางที่เลือกใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิตนี้ได้แก่ การลดลงของโอโซน ความเป็นพิษต่อมนุษย์ การแผ่รังสี หมอกและควัน ฝุ่นละอองขนาดเล็ก การเปลี่ยนแปลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สภาพภูมิอากาศ ภาวะความเป็นกรด การใช้ทรัพยากรดิน การใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิง และการใช้ทรัพยากรน้ำและแร่ธาตุ ซึ่งผลกระทบขั้นกลางเหล่านี้เมื่อนำมาจำแนกจะได้ความสัมพันธ์กับผลกระทบปลายทาง 3 กลุ่มคือ สุขอนามัยของมนุษย์ ระบบนิเวศ และทรัพยากรธรรมชาติ จากผลการศึกษาได้นำข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการดำเนินการเช่น พลังงานไฟฟ้า ปริมาณน้ำมันดีเซล ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมาประเมิน พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าส่งผลต่อการประเมินผลกระทบมากที่สุดและการประเมินวัฏจักรชีวิตของการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่จากระบบบำบัดน้ำเสียจะช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ แต่จะส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนให้เพิ่มขึ้น การประเมินวัฏจักรชีวิตนี้จะเป็นเครื่องมือในการช่วยตัดสินใจเลือกระหว่างการบำบัดน้ำเสียที่ไม่นำน้ำกลับมาใช้ใหม่กับระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

Al-Husseini, Ghawi และ Ali (2018) ศึกษาผลของการกวนเร็วในกระบวนการโคแอกกูเลชันต่อการกำจัดความขุ่นจากน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งการทดลองนี้ใช้การกวนเร็วโดยน้ำกระโดด (Hydraulic jump) เพื่อที่จะผสมสารเคมีเข้ากับน้ำดิบ และเปรียบเทียบการกำจัดความขุ่นกับปัจจัยอื่นๆ ที่มีผล เช่น ปริมาณสารส้ม ค่าฟรูดนัมเบอร์ (Froude number) ค่าความเร็วแกรเดียนท์ ระยะเวลาในการกวนเร็ว จากการทดลองพบว่าที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู เมื่อใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 10-15 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงค่าพีเอช 6-7 และค่าความเร็วแกรเดียนท์มีค่า 800 วินาที$^{-1}$ จะให้ผลในการกำจัดความขุ่นที่ดีที่สุดและปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดความขุ่นจากกระบวนการกวนเร็วคือระยะเวลาในการกวนเร็ว โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการกวนจะส่งให้ค่า Gt (ผลคูณระหว่างค่าความเร็วแกรเดียนท์และระยะเวลาในการกวน) มีค่าเพิ่มมากขึ้น สำหรับกวนเร็วค่า Gt ที่แนะนำจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1,500 ถึง 4,000 จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงถึงร้อยละ 99 เมื่อค่า Gt มีค่า 1,600

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

De Jesus และคณะ (2018) ประเมินวัฏจักรชีวิตของอุตสาหกรรมการผลิตน้ำประปาในประเทศบราซิล โดยขอบเขตการศึกษาครอบคลุมตั้งแต่การได้มาซึ่งน้ำดิบจนถึงกระบวนการสูบจ่ายน้ำประปา โดยใช้โปรแกรม SimaPro และเลือกฐานข้อมูล Ecoinvent สำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิต พบว่า ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กับปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในการสูบน้ำและกระบวนการผลิตน้ำประปารวมถึงน้ำสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งหากสามารถปรับปรุงการใช้พลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพและลดปริมาณน้ำสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ จะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในการผลิตน้ำประปา และการประเมินวัฏจักรชีวิตจะเป็นเครื่องมือสำหรับการช่วยตัดสินใจการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดค่าใช้จ่ายและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต

Mohammed และ Shakir (2018) ศึกษาผลของระยะเวลาในการตกตะกอน (Settling time) และค่าความเร็วแกรเดียนท์ (Gradient velocity) ในการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบ โดยศึกษาจากการใช้สารโคแอกกูแลนท์ 3 ชนิด ได้แก่ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอร์ริคคลอไรด์ และโพลิเมอร์ประจุบวก ทั้งการใช้สารเคมีชนิดเดียวและการใช้สารเคมีร่วมกัน ผลการทดลองพบว่าในการกำจัดความขุ่นจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเพิ่มค่าระยะเวลาในการตกตะกอน และการปรับความเร็วรอบในการกวนให้มีค่าอยู่ระหว่าง 45-55 รอบต่อนาที ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความเร็วแกรเดียนท์อยู่ในช่วงระหว่าง 54.5-78.5 วินาที$^{-1}$ ค่าความเร็วแกรเดียนท์ที่เป็นเกณฑ์ในการออกแบบการกวนจะอยู่ในช่วง 10-75 วินาที$^{-1}$ และในการใช้สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนร่วมกันระหว่าง โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์และโพลิเมอร์ประจุบวก จะสามารถลดปริมาณการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เหลือเพียง 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จากเดิมที่ใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เพียงชนิดเดียวที่ 80-100 มิลลิกรัมต่อลิตร และยังทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 99

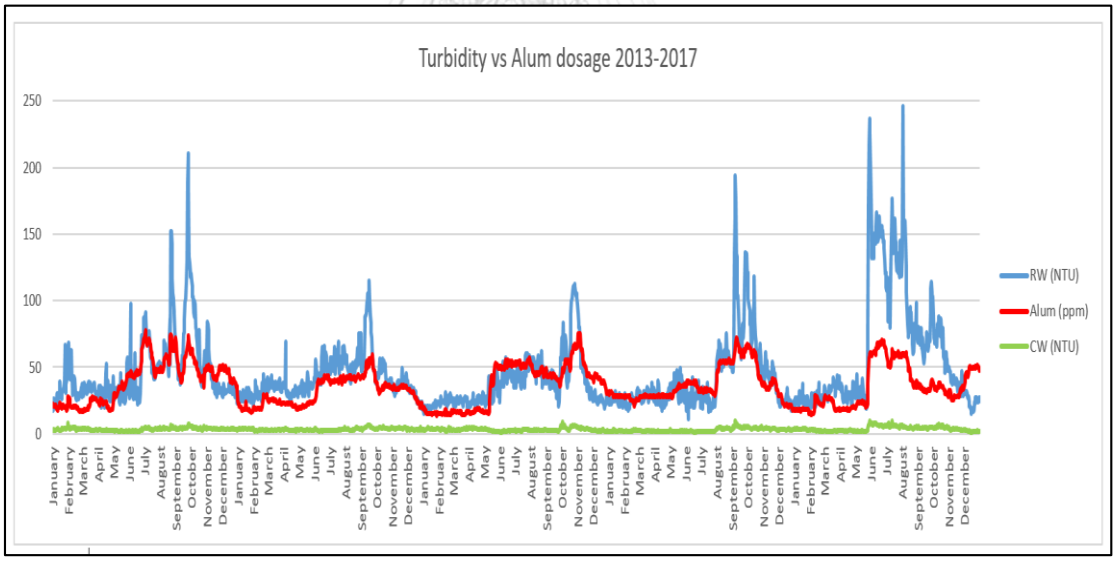
Katrivesis และคณะ (2019) ศึกษาการใช้สารโคแอกกูแลนต์ได้แก่ สารส้มน้ำ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ไคโตซาน (Chitosan) และโพลิอะคริลาไมด์ สำหรับการสร้างตะกอนในกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยหาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum dose) ด้วยวิธีการทำจาร์เทสต์ และเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าความขุ่น ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซีตาโพเทลเชียลและขนาดของกลุ่มตะกอนที่เกิดขึ้น โดยผลการศึกษาพบว่า การใช้สารส้มน้ำในการกำจัดความขุ่นในช่วงความขุ่นน้ำดิบ 50-250 เอ็นทียู ความเข้มข้นของสารส้มที่ใช้ในการกำจัดความขุ่นอยู่ในช่วง 10-30 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุดร้อยละ 97 และทำให้เกิดสลัดจ์ที่ต้องกำจัดเป็นจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในการกำจัดความขุ่นจะใช้ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 5-20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงถึงร้อยละ 99 โดยก่อให้เกิดสลัดจ์ที่ต้องกำจัดน้อยกว่า และเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำที่น้อยกว่า เช่น ค่าพีเอช และค่าความเป็นด่าง เป็นต้น

Ma และคณะ (2019) ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารตกตะกอนในการกำจัดความขุ่นโดยสารตกตะกอนที่ใช้ในการศึกษาคือ โพลิซิลิเกตอะลูมิเนียมแมกนีเซียม (PSAM) และโพลิอะคริลาไมด์ประจุบวก (cPAM) ซึ่งใช้ในกระบวนการตกตะกอนสำหรับการผลิตน้ำดื่ม ตัวอย่างน้ำดิบสังเคราะห์ได้เตรียมจากดินขาวและโซเดียมฮิวเมต ประสิทธิภาพของกระบวนการตกตะกอนขึ้นอยู่กับในเงื่อนไขการตกตะกอน ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญเช่นค่า พีเอชของตัวอย่างน้ำ อุณหภูมิ ระยะเวลาการตกตะกอน ชนิดและปริมาณของสารตกตะกอน โดยค่าที่เหมาะสมต่อกระบวนการตกตะกอนที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ การใช้สารเคมีที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำที่ 7.0 อุณหภูมิ 25

องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการตกตะกอน 25 นาที ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นมีค่าสูงถึงร้อยละ 98 การใช้โพลีซิลิเกตอะลูมิเนียมแมกนีเซียมและโพลีอะคริลาไมด์ประจุบวก พบว่าเป็นสารเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่สูง

2.10 ตัวอย่างข้อมูลการดำเนินงานควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

จากการดำเนินที่ผ่านมาในอดีตของโรงงานผลิตน้ำบางเขนได้มีการรวบรวมข้อมูล เพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงการทำงาน ข้อดี ข้อเสีย และแนวโน้มความเปลี่ยนแปลงในด้านต่างๆ ทำให้พบว่าความขุ่นของน้ำดิบที่เข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูฝน (เดือนกรกฎาคม-ตุลาคม) ที่ค่าความขุ่นมีแนวโน้มสูงขึ้นและมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงฤดูหนาวถึงฤดูร้อน (เดือนพฤศจิกายน-มิถุนายน) ซึ่งทำให้ส่งผลกระทบต่อปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตและคุณภาพของน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนการผลิต โดยกระบวนการผลิตที่สามารถกำจัดความขุ่นออกจากน้ำได้มากที่สุดคือกระบวนการตกตะกอนโดยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน



ภาพที่ 2-11 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความขุ่นน้ำดิบกับสารส้มที่ใช้

2.11 เปรียบเทียบแนวทางวิธีดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพกับปัญหาการดำเนินการในปัจจุบัน

ตารางที่ 2-2 ตารางเปรียบเทียบปัญหาจากการดำเนินงานในปัจจุบันกับแนวทางจากวิธีดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

วิธีดำเนินการ	ปัญหาในปัจจุบัน	วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพ
ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี	- ใช้สารส้มน้ำเป็นสารตกตะกอนในช่วงที่น้ำดิบอยู่ในสภาวะปกติและใช้สารส้มร่วมกับโพลิเมอร์ในช่วงที่น้ำดิบมีความขุ่นสูงกว่าปกติ - ปริมาณสารเคมีที่ใช้ได้จากการทำการทดลองจาร์เทสต์	- ใช้สารส้มน้ำหรือโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์(PACl) เป็นสารตกตะกอน - ปริมาณสารเคมีที่ใช้ได้จากการทำการทดลองจาร์เทสต์หรือต่ำกว่า
ความเร็วรอบของใบพัดสำหรับการกวนช้าใน บริเวณทำปฏิกิริยา	- การปรับความเร็วรอบของใบพัดโดยขึ้นอยู่ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาโดยจะปรับความเร็วรอบของใบพัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตะกอนมีค่าน้อยและจะปรับความเร็วรอบของใบพัดลดน้อยลงเมื่อความเข้มข้นของตะกอนมีค่ามาก ซึ่งจะทำให้ค่าความเข้มข้นของตกตะกอนมีความแปรปรวน	- การปรับความเร็วรอบของใบพัดจะเดินความเร็วรอบของใบพัดให้คงที่อยู่ตลอดเวลาด้วยความเร็วที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองและวิเคราะห์ซึ่งจะได้ความเร็วรอบของใบพัดที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าสู่ถังตกตะกอน
อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าสู่ถังตกตะกอน	- ปรับอัตราการไหลของน้ำดิบตามความต้องการสูบส่งและสูบจ่ายน้ำประปา	- ปรับอัตราการให้ของน้ำดิบให้มีค่าคงที่และเหมาะสม
ความเข้มข้นของตะกอนในถังตกตะกอน	- การรักษาความเข้มข้นของตะกอนภายในถังตกตะกอน บริเวณทำปฏิกิริยาและก้นถัง ให้มีความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 20 ซึ่งในบางกรณีที่ความเข้มข้นของตะกอนมากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะทำให้คุณภาพน้ำออกแย่ลง	- การรักษาความเข้มข้นของตะกอนภายในถังตกตะกอนให้มีความเหมาะสมอยู่ในช่วงค่าที่ได้จากการทดลองและวิเคราะห์ตลอดเวลาและสามารถคำนวณปริมาณตะกอนล่วงหน้าได้ ซึ่งจะทำให้น้ำที่ออกมีคุณภาพคงที่ตลอดเวลา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้รวบรวมข้อมูลการผลิตน้ำและดำเนินการทดลองในสภาพการทำงานจริง ณ โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง

เนื่องจากในปัจจุบันโรงงานผลิตน้ำบางเขนดำเนินการผลิตน้ำประปาเต็มความสามารถของกำลังการผลิต 4.4 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน และดำเนินการผลิตต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ด้วยระบบการผลิตแบบทั่วไปที่มีถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน (Solid contact clarifier sludge recirculation type) ที่ใช้ในการตกตะกอน ทำให้ยากต่อการเปลี่ยนแปลงระบบการผลิตที่มีมาตั้งแต่ในอดีต งานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการรวบรวมข้อมูลการดำเนินงานควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบันโดยมีข้อมูลการดำเนินงานและการเก็บตัวอย่างน้ำในปัจจุบันตามหัวข้อ 3.1 และหัวข้อ 3.2 และนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน

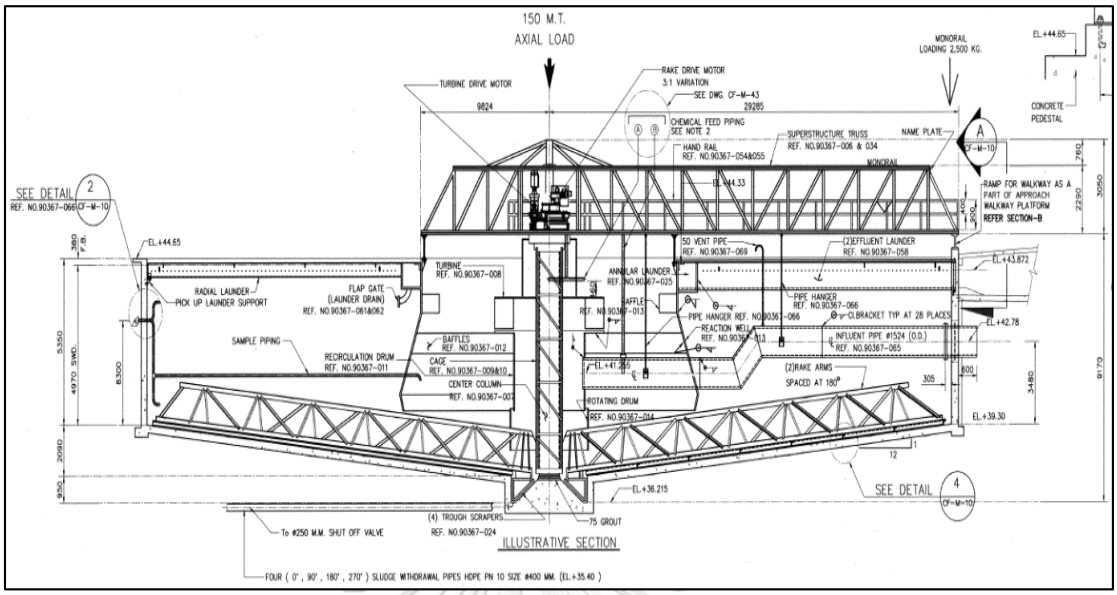
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นถังตกตะกอนที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง ในปัจจุบันมีจำนวนการใช้งานทั้งหมด 22 ถัง ซึ่งในแต่ละถังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 เมตร ความสูง 4.74 เมตร ปริมาตรน้ำ 15,194 ลูกบาศก์เมตร สัดส่วนดังแสดงในภาพที่ 4-1 โดยจะมีการรับน้ำดิบผ่านทางท่อน้ำขนาด 1,500 มิลลิเมตร และมีการกวนเร็วผสมสารเคมีที่ใช้สำหรับการตกตะกอนในเส้นท่อโดยใช้การกวนในเส้นท่อ (Inline blender) และน้ำกระโดด (Hydraulic Jump) เพื่อให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน อย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการกวนช้าที่บริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอน และการควบคุมปริมาณตะกอนในถังตกตะกอนจะมีการควบคุมผ่านวาล์วระบายน้ำตะกอนที่ก้นถังผ่านท่อขนาด 300 มิลลิเมตร จำนวน 2 ท่อ โดยจะมีท่อเก็บตัวอย่างน้ำในถังตกตะกอน 4 จุดคือ

1. บริเวณก้นถังตกตะกอน (Bottom zone)
2. บริเวณกลางถังตกตะกอน (Middle zone)
3. บริเวณน้ำใสด้านบน (Top zone)
4. บริเวณทำปฏิกิริยา (Reaction zone)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 3-1 ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน (พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ, 2559)

3.1.2 ข้อมูลถังตกตะกอน

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลถังตกตะกอน (พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ, 2559)

1.) ชนิด	ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน
2.) กำลังการผลิต	200,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน/ถัง
3.) ปริมาตร	15,194 ลูกบาศก์เมตร
4.) ระยะเวลากักเก็บน้ำใน Reaction chamber	15 – 20 นาที/ถัง
5.) ระยะเวลากักเก็บน้ำน้ำในถังตกตะกอน	ไม่น้อยกว่า 1.5 ชั่วโมง
6.) อัตราการไหลขึ้น	ไม่เกิน 0.06 เมตร/นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.3 น้ำดิบ

น้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง นำน้ำผิวดินซึ่งจากแม่น้ำเจ้าพระยาโดยมีจุดรับน้ำดิบอยู่ที่ สถานีสูบน้ำดิบสำแล ตั้งอยู่ที่ ตำบลบ้านกระแชง อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี และลำเรียงน้ำผ่านคลองส่งน้ำดิบหรือที่เรียกกันว่าคลองประปา ส่งน้ำดิบเข้าสู่โรงงานผลิตน้ำบางเขน ซึ่งคุณภาพน้ำดิบจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาตามสภาพอากาศและฤดูกาลต่างๆ

3.1.4 การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน

สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนได้แก่ สารส้มน้ำ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ โพลิอิเล็กโทรไลต์ ปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีที่จะใช้ในแต่ละครั้งจะมีการเปลี่ยนแปลงตามคุณภาพน้ำดิบ โดยจะมีการทำจาร์เทสต์ (Jar test) เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสมในการตกตะกอน

3.1.5 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน

1. สารส้ม
2. โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์
3. โพลิอิเล็กโทรไลต์

3.1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน
2. ชุดอุปกรณ์จาร์เทสต์
3. เครื่องวัดความขุ่น
4. เครื่องวัดค่าพีเอช
5. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า
6. ชุดอุปกรณ์การวิเคราะห์ค่าความเป็นด่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

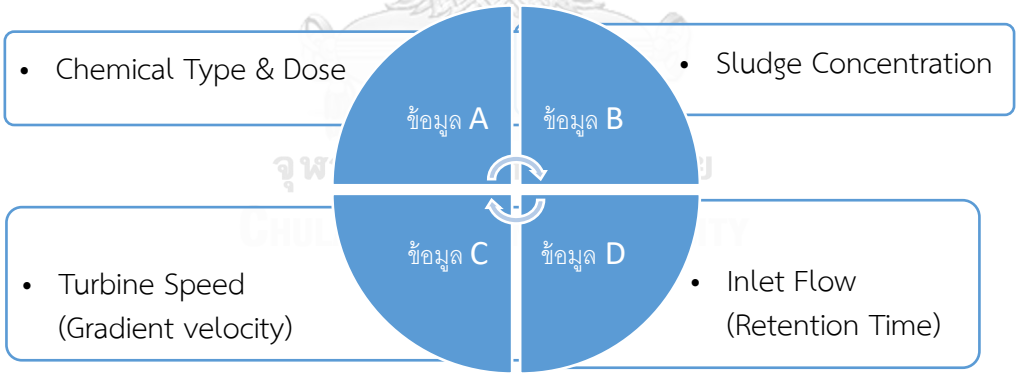
3.2 วิธีการเก็บตัวอย่างตะกอนและตัวอย่างน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอน

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองดำเนินงานในถังตกตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน ที่มีการใช้งานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา 24 ชั่วโมง โดยจะมีการเก็บตัวอย่างตะกอนในถังตกตะกอนทุกๆ 3 ชั่วโมง ตามวิธีการปฏิบัติงานของโรงงานผลิตน้ำบางเขน (เวลา 00.00 น. 03.00 น. 06.00 น. 09.00 น. 12.00 น. 15.00 น. 18.00 น. 21.00 น.) จุดเก็บตัวอย่างตะกอน 4 จุด (Reaction zone, Bottom

zone, Middle zone, Top zone) เพื่อควบคุมความเข้มข้นของตะกอนในถังตกตะกอนแต่ละบริเวณให้เหมาะสม และตัวอย่างน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอนจะมีการเก็บตัวอย่างเพื่อมาทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทุกๆ 4 ชั่วโมง (เวลา 00.00 น. 04.00 น. 08.00 น. 12.00 น. 16.00 น. 20.00 น.) โดยตัวอย่างน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอนที่เก็บมาจะทำการวิเคราะห์ค่าความขุ่น ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง และค่าการนำไฟฟ้า โดยมีการวิเคราะห์ค่า ณ ห้องปฏิบัติการส่วนวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โรงงานผลิตน้ำบางเขน

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนแบบสัมผัส

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนแบบสัมผัส จะวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการย้อนหลังเป็นเวลา 5 ปี โดยมุ่งเน้นที่กระบวนการตกตะกอน ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับสารเคมี และการควบคุมถังตกตะกอนสำหรับการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบที่นำมาผลิตน้ำประปา โดยจะหาความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์น้ำดิบ พารามิเตอร์ในการควบคุมถังตกตะกอน คือ ปริมาณการใช้สารเคมี ปริมาณของตะกอนที่จุดต่างๆ ในถังตกตะกอน ความเร็วรอบของใบพัดในการกวนตะกอน ระยะเวลาเก็บกักน้ำในระบบดังภาพที่ 3-2 เพื่อที่นำข้อมูลเหล่านี้มาสรุปเป็นแนวทางสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน



ภาพที่ 3-2 พารามิเตอร์ในการควบคุมถังตกตะกอนที่นำมาวิเคราะห์

3.4 การวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอน

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองในสภาพการทำงานจริงของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวงโดยทำการทดลองและวิเคราะห์การควบคุมการทำงานจากผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน และคัดเลือกแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบจากผลกระทบ

ต่อสิ่งแวดล้อมจากการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและการใช้ทรัพยากรรวมถึงต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในกระบวนการผลิต

การพิจารณาประสิทธิภาพในด้านการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบ โดยคำนวณจากความขุ่นของน้ำดิบที่เข้าสู่ถังตกตะกอน กับความขุ่นของน้ำใสที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนแล้ว เพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น (Turbidity removal efficiency) จากนั้นจะนำค่าประสิทธิภาพความขุ่นที่ได้จากการทดลองเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพความขุ่นของถังตกตะกอนที่ดำเนินการควบคุมด้วยวิธีปกติในปัจจุบันของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

$$\text{Turbidity removal efficiency (\%)} = [\,(T_{in} - T_{out}) / T_{in}\,] \times 100 \qquad (3\text{-}1)$$

เมื่อ T_{in} = ความขุ่นของน้ำดิบ

T_{out} = ความขุ่นของน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอน

3.5 การดำเนินงานวิจัย

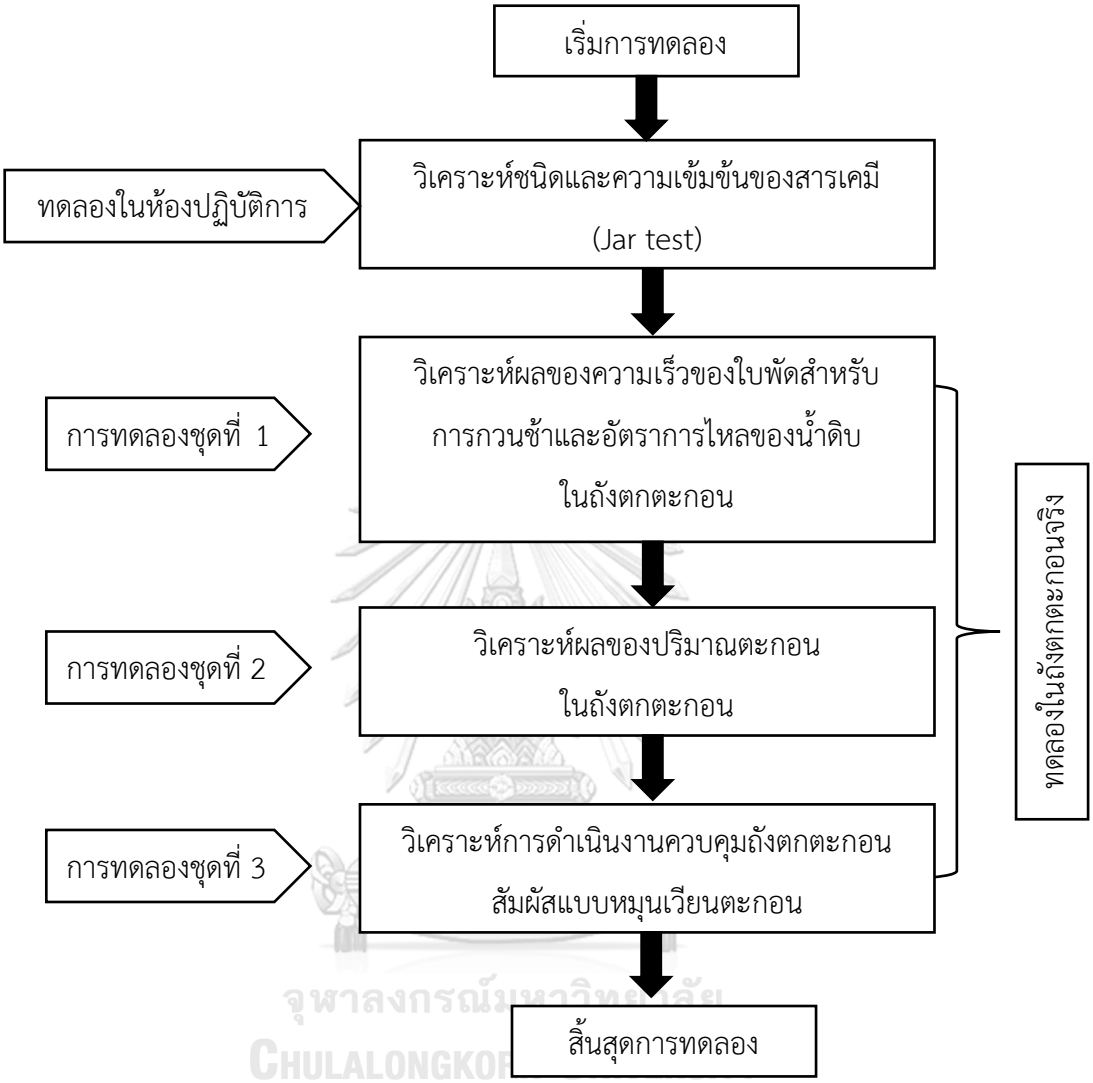
งานวิจัยนี้มีการดำเนินการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอน รายละเอียดในหัวข้อ 3.5.1 โดยทดลองในห้องปฏิบัติการ ส่วนควบคุมวิเคราะห์เพื่อวิเคราะห์หาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนซึ่งจะมีการดำเนินการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดลอง ในสภาพการทำงานจริง ณ โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง

การทดลองที่ 1 การวิเคราะห์ผลของความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้าในถังตกตะกอน รายละเอียดในหัวข้อ 3.5.2

การทดลองที่ 2 การวิเคราะห์ผลของปริมาณตะกอนในถังตกตะกอน รายละเอียดในหัวข้อ 3.5.3

การทดลองที่ 3 การวิเคราะห์การดำเนินงานควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน รายละเอียดในหัวข้อ 3.5.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 3-3 แผนทดลองงานวิจัย

3.5.1 วิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอน

การทดลองนี้จะใช้น้ำดิบจริงจากคลองประปาที่เข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำของโรงงานผลิตน้ำบางเขน นำมาทำการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำดิบ จากนั้นนำมาทำการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอน

ตัวแปรต้น	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ชนิดของสารเคมี	- สารส้มน้ำ - โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ - สารส้มน้ำและโพลิอิเล็กโทรไลต์
2. ความเข้มข้นของสารเคมี	
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ความเร็วในการกวนเร็ว	100 รอบ/นาที
2. ความเร็วในการกวนช้า	50 รอบ/นาทีและ 20 รอบ/นาที
ตัวแปรตาม	**วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ**
1. ความขุ่นของน้ำใส	Nephelometric Turbidity
2. ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น	การคำนวณ
3. ค่าพีเอช	เครื่องวัดค่าพีเอช
4. ค่าความเป็นด่าง	การไตเตรท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. เก็บตัวอย่างน้ำดิบที่จะเข้าสู่กระบวนการตกตะกอนจากจุดเก็บน้ำดิบ
2. เตรียมตัวอย่างน้ำดิบที่เก็บมาใส่บีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ
3. เติมสารส้มน้ำ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในแต่ละบีกเกอร์
4. กวนเร็วด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 1 นาที
5. กวนช้าด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 5 นาที ต่อจากนั้นลดความเร็วรอบให้เหลือ 20 รอบต่อนาทีและกวนต่อไปอีกเป็นเวลา 5 นาที
6. ปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำน้ำส่วนใสที่ผิวน้ำของแต่ละบีกเกอร์มาวิเคราะห์ค่าความขุ่น ค่าพีเอช และค่าความเป็นด่าง

7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 1-6 โดยทำการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนเป็นโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และสารส้มน้ำร่วมกับโพลิอิเล็กโทรไลต์

3.5.2 การวิเคราะห์ผลของความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้าและอัตราการไหลของน้ำดิบในถังตกตะกอน

การทดลองนี้จะมีการดำเนินการทดลองโดยใช้ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนโรงงานผลิตน้ำบางเขน ณ สภาพการทำงานจริง ซึ่งจะทดลองโดยมีการใช้ความเร็วรอบของใบพัดในการกวนช้าอยู่ที่ 400 500 และ 600 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้าและอัตราการไหลของน้ำดิบ

ตัวแปรต้น	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. การควบคุมความเร็วรอบของใบพัดสำหรับการกวนช้า (Turbine speed in reaction zone)	400 500 600 รอบ/นาที
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี	ผลจากการวิเคราะห์ที่ 3.5.1
2. ปริมาณของตะกอนที่ก้นถังตกตะกอน	ไม่เกินร้อยละ 20
3. อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน	160,000 ลบ.ม./วัน
	200,000 ลบ.ม./วัน
	210,000 ลบ.ม./วัน
ตัวแปรตาม	**วิธีวิเคราะห์**
1. ความขุ่นของน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอน	Nephelometric Turbidity
2. ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น	การคำนวณ
3. ปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยา	การทดลอง
4. อัตราการระบายตะกอน	การทดลอง
5. ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ	การทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

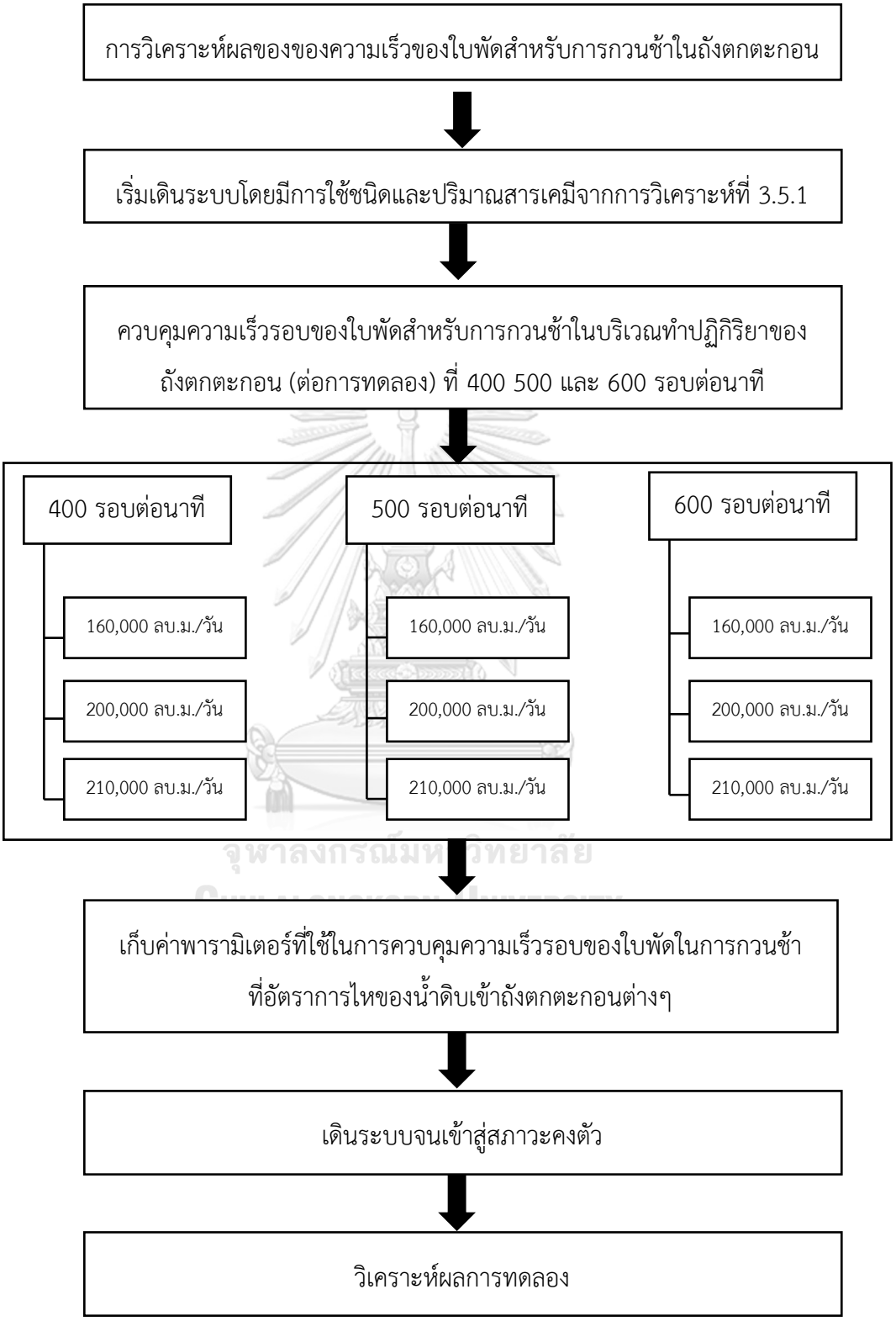
ในการทดลองนี้จะศึกษาความเร็วรอบของใบพัดสำหรับการกวนช้า โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้ากับอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าสู่ถังตกตะกอน โดยค่าความเร็วของใบพัดที่วัดจะวัดจากความเร็วรอบของชุดมอเตอร์แล้วแปลงค่าเทียบเป็นค่าความเร็วรอบของใบพัด ซึ่งในการทดลองจะมีการปรับค่าความเร็วรอบของใบพัดที่ความเร็วรอบต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าสู่ถังตกตะกอนที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3-3

1. ดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนโดยใช้ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ (ผลจากการวิเคราะห์ที่ 3.5.1) และโดยควบคุมความเร็วรอบของใบพัด สำหรับการกวนช้าในถังตกตะกอนให้มีค่าตัวแปรต่างๆ
2. ดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนโดยควบคุมความเร็วรอบของใบพัดสำหรับการกวนช้าในถังตกตะกอนที่ค่า 400 500 และ 600 รอบต่อนาที ในแต่ละชุดการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเร็วของใบพัดกับอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอนที่ค่าต่างๆ ที่มีผลต่อความสัมพันธ์ในการสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยา
3. แบ่งการทดลองที่ 1 การวิเคราะห์ผลของความเร็วใบพัดจะแบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดลองย่อย
   - ชุดที่ 1 ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ใบพัดให้มีค่าความเร็วของใบพัด 400 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหล 160,000 200,000 และ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
   - ชุดที่ 2 ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ใบพัดให้มีค่าความเร็วของใบพัด 500 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหล 160,000 200,000 และ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
   - ชุดที่ 3 ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ใบพัดให้มีค่าความเร็วของใบพัด 600 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหล 160,000 200,000 และ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

4. เก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในทดลอง

5. เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยา คุณภาพน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอน และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 3-4 แผนผังการวิเคราะห์ผลของการควบคุมความเร็วรอบของใบพัดสำหรับการกวนช้า

3.5.3 การวิเคราะห์ผลของปริมาณตะกอนในถังตกตะกอน

การทดลองนี้จะมีการดำเนินการทดลองโดยใช้ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนโรงงานผลิตน้ำบางเขน ณ สภาพการทำงานจริง ซึ่งทดลองโดยมีการใช้ปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 5-10 ร้อยละ 10-15 และร้อยละ 15-20

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณตะกอนในถังตกตะกอน

ตัวแปรต้น	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอนบริเวณทำปฏิกิริยา (Reaction zone)	ร้อยละ 5-10 ร้อยละ 10-15 และร้อยละ 15-20
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี	ผลจากการวิเคราะห์ที่ 3.5.1
2. ปริมาณของตะกอนที่ก้นถังตกตะกอน	ไม่เกินร้อยละ 20
3. การควบคุมความเร็วรอบของใบพัดสำหรับการกวนช้า	ผลจากการวิเคราะห์ที่ 3.5.2
4. อัตราการไหลเข้าของน้ำดิบ	ผลจากการวิเคราะห์ที่ 3.5.2
ตัวแปรตาม	**วิธีวิเคราะห์**
1. ความขุ่นของน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอน	Nephelometric Turbidity
2. ประสิทธิภาพการการกำจัดความขุ่น	การคำนวณ
3. อัตราการระบายตะกอน	การทดลอง
4. ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ	การทดลอง

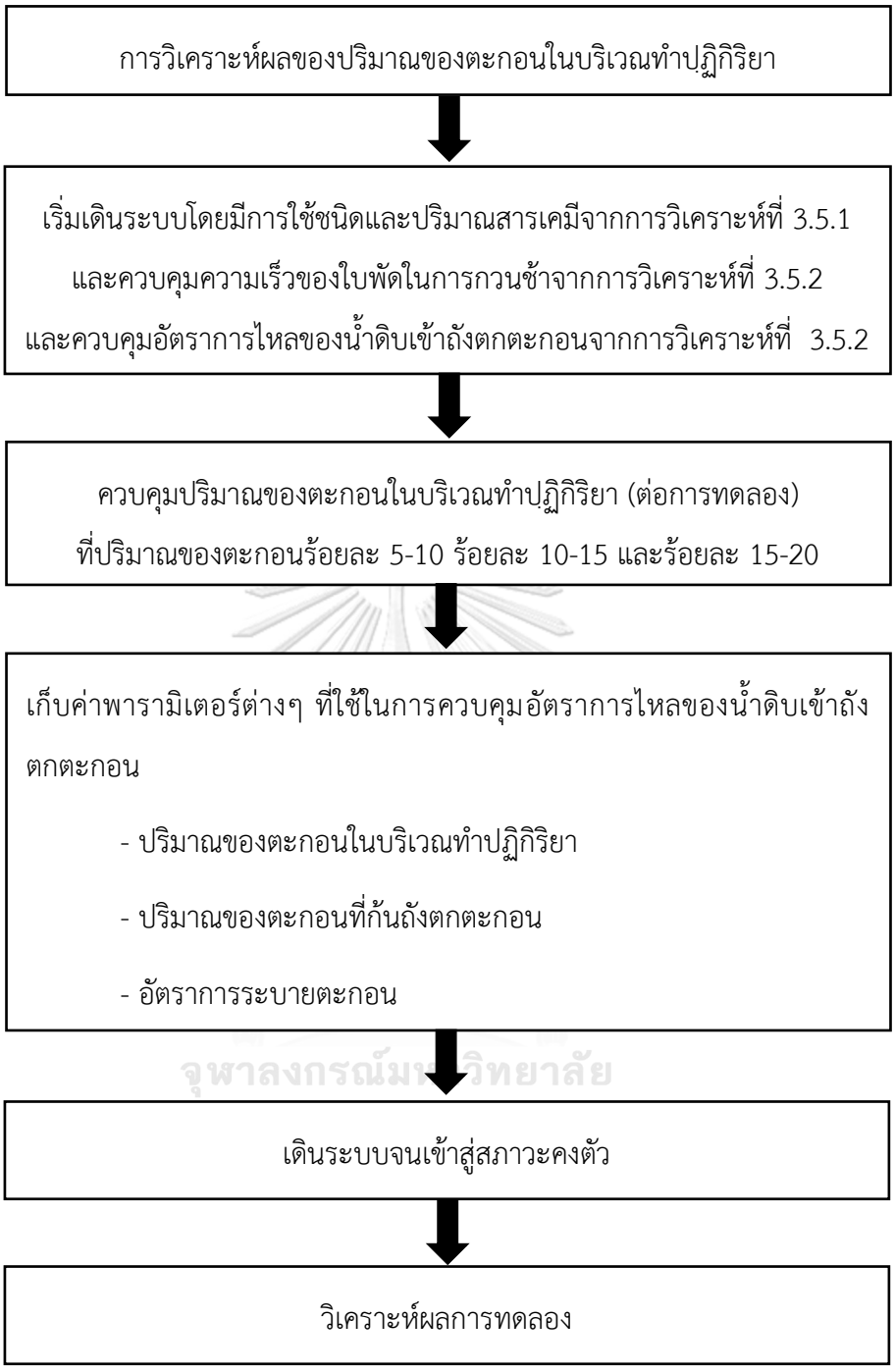
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

ในการทดลองนี้จะศึกษาปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาโดยเปรียบเทียบปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอน ซึ่งจะมีการรักษาปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอนให้อยู่ที่ค่าต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน

1. ดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนโดยใช้ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ
2. ดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนโดยรักษาปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอนให้มีค่าตัวแปรต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองตามตารางที่ 3-4
3. แบ่งชุดการทดลองการวิเคราะห์ค่าปริมาณของตะกอนออกเป็น 3 ชุดทดลอง
   - ชุดการทดลองที่ 1 ควบคุมปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาให้มีปริมาณของตะกอนร้อยละ 5 – 10
   - ชุดการทดลองที่ 2 ควบคุมปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาให้มีปริมาณของตะกอนร้อยละ 10 – 15
   - ชุดการทดลองที่ 3 ควบคุมปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาให้มีปริมาณของตะกอนร้อยละ 15 – 20
4. เก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยา
5. เปรียบเทียบคุณภาพน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอน และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 3-5 แผนผังการวิเคราะห์ผลของปริมาณของตะกอน

3.5.4 วิเคราะห์การดำเนินงานควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

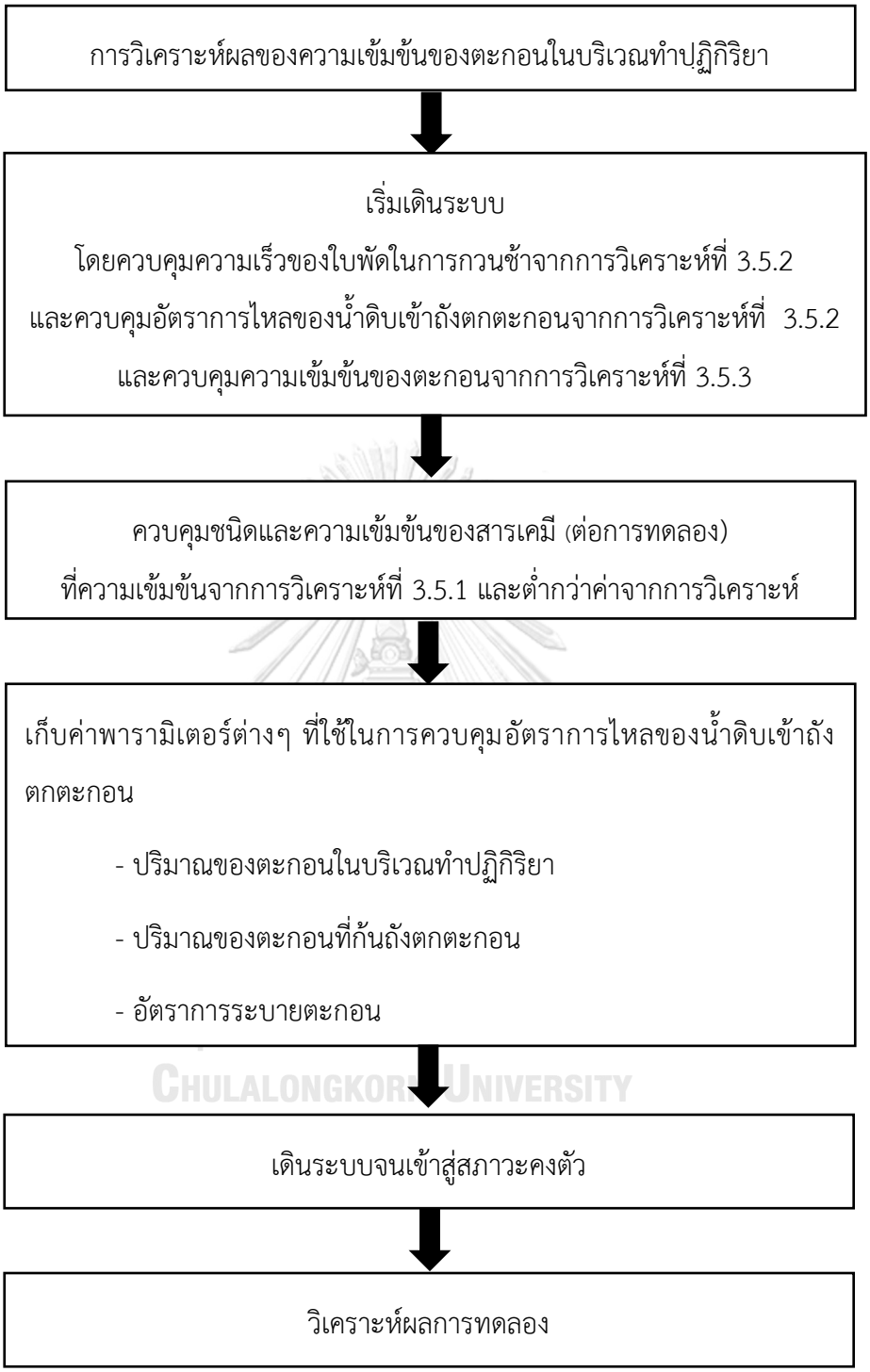
การทดลองนี้จะมีการดำเนินการทดลองโดยใช้ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนโรงงานผลิตน้ำบางเขน ณ สภาพการทำงานจริง ซึ่งจะทดลองโดยมีการใช้ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีจากผลการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการนำมาใช้ในการควบคุมถังตกตะกอนจริง

ตารางที่ 3-5 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์การดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

ตัวแปรต้น	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี	ผลจากการวิเคราะห์ที่ 3.5.1 และลดความเข้มข้นสารเคมี
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. การควบคุมความเร็วรอบของใบพัดสำหรับการกวนช้า	ผลจากการวิเคราะห์ที่ 3.5.2
2. อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน	ผลจากการวิเคราะห์ที่ 3.5.2
3. ปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอน	ผลจากการวิเคราะห์ที่ 3.5.3
ตัวแปรตาม	**วิธีวิเคราะห์**
1. ความขุ่นของน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอน	Nephelometric Turbidity
2. ประสิทธิภาพการการกำจัดความขุ่น	การคำนวณ
3. ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบ	การทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

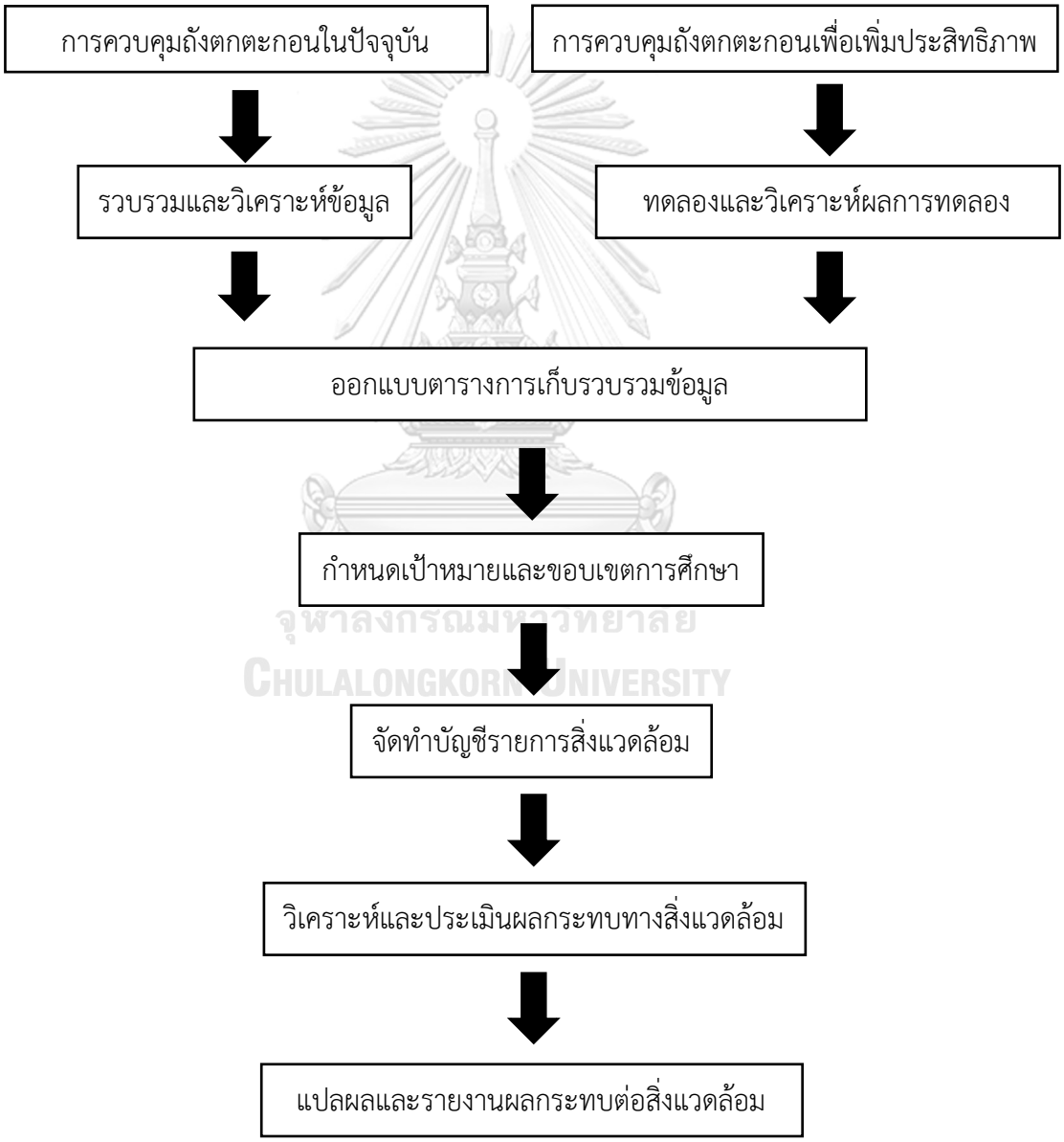
ในการทดลองนี้วิเคราะห์การดำเนินงานควบคุมถังตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยจะนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการทดลองที่ 3.5.2 และการทดลองที่ 3.5.3 มาใช้ร่วมกันในการควบคุมถังตกตะกอน ในช่วงความขุ่นของน้ำดิบที่เข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขนโดยมีการใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีที่ได้จากผลการวิเคราะห์ที่ 3.5.1 และใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีที่ต่ำลงกว่าค่าที่แนะนำจากผลการวิเคราะห์ที่ 3.5.1 เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอน และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น



ภาพที่ 3-6 แผนผังการวิเคราะห์การดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

3.6 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการของการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

งานวิจัยนี้ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยมีขอบเขตของการศึกษาครอบคลุมในส่วนของกระบวนการผลิตน้ำประปาตั้งแต่กระบวนการสูบน้ำดิบ การจ่ายสารเคมี การตกตะกอน การกรอง การเก็บน้ำใส กระบวนการสูบส่งน้ำประปาและสูบจ่ายน้ำประปา สำหรับขั้นตอนการขนส่ง การใช้ซ้ำ การนำไปใช้ใหม่ การซ่อมแซมบำรุงรักษาเครื่องจักร จะไม่มีการนำมาพิจารณา



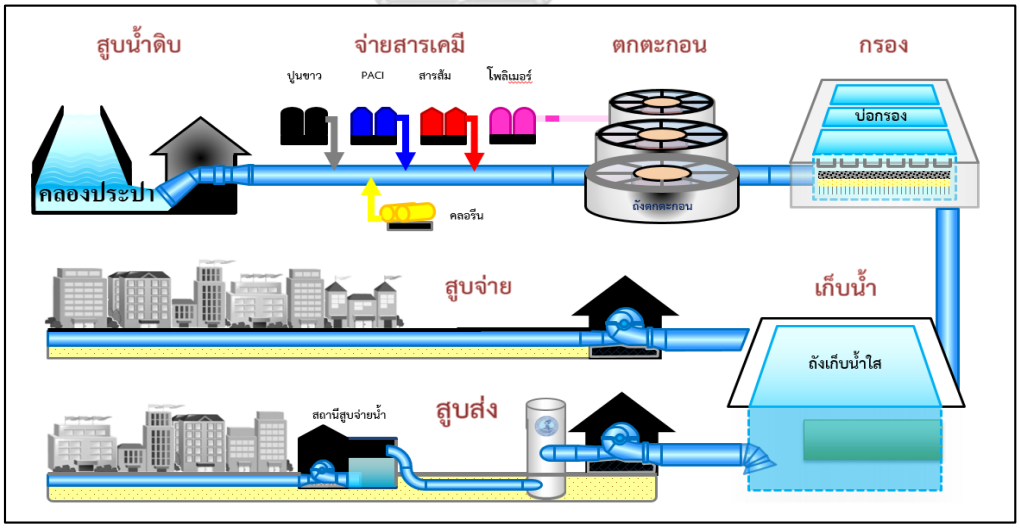
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 3-7 แผนผังการประเมินวัฏจักรชีวิตของการดำเนินการควบคุมถังตกตะกอน

3.6.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and scope definition)

การประเมินวัฏจักรชีวิตของงานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อจัดทำฐานข้อมูลบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ซึ่งคือน้ำประปาของการประปานครหลวง ขอบเขตของระบบในงานวิจัยนี้จะต้องทำการศึกษากระบวนการผลิตน้ำประปา เพื่อตรวจสอบกระบวนการที่เกี่ยวข้องทั้งหมดตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบและพลังงาน โดยขอบเขตของระบบที่ทำการวิเคราะห์นั้นจะมีเฉพาะในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา กระบวนการสูบส่งน้ำประปาและสูบจ่ายน้ำประปา สำหรับขั้นตอนการขนส่ง การใช้ซ้ำ การนำไปใช้ใหม่ การซ่อมแซมบำรุงรักษาจะไม่มีการนำมาพิจารณา ซึ่งเป้าหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์งานวิจัยนี้คือ

1. เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตน้ำประปาที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบันเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตน้ำประปาที่การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น
2. เพื่อเสนอแนะแนวทางที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยพิจารณาจากคุณภาพน้ำประปาที่ได้ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนในกระบวนการผลิต



ภาพที่ 3-8 กระบวนการผลิตน้ำประปา

หน่วยหน้าที่การศึกษา (Functional unit) กำหนดเพื่อใช้เป็นพื้นฐานสำหรับกำหนดการวัดหรือเก็บข้อมูลของสารขาเข้าและสารขาออกจากระบบ โดยในงานวิจัยนี้หน่วยหน้าที่การศึกษา คือ การผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร

การรวบรวมข้อมูลที่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยนี้จะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขนที่มีการบันทึกข้อมูลต่างๆ สำหรับการผลิตน้ำประปาตามมาตรฐานการจัดทำระบบมาตรฐาน ISO 9001:2015 ของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง ทำให้ได้มาซึ่งข้อมูลปฐมภูมิ และสำหรับข้อมูลอื่นๆ ซึ่งเป็นข้อมูลทุติยภูมิที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลทางวิชาการจากเอกสารทางวิชาการระดับนานาชาติ วิทยานิพนธ์ วารสารงานวิจัยทั้งในประเทศ และต่างประเทศ

3.6.2 การจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Inventory analysis)

การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขต การรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยนี้ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิ โดยข้อมูลสารขาเข้า เช่น วัตถุดิบ ทรัพยากร พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต เป็นต้น และข้อมูลขาออก เช่น การปล่อยของเสียสู่อากาศ น้ำ เป็นต้น โดยการรวบรวมข้อมูลจะพิจารณาถึงคุณภาพของข้อมูลที่ใช้ในการประเมินและการได้มาซึ่งข้อมูล รวมถึงความละเอียดและชัดเจน

ตารางที่ 3-6 ตัวอย่างตารางการเก็บข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม

การผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน	
สารขาเข้า (Inputs)	**ปริมาณ.....หน่วย (Unit)**
น้ำดิบ	.....ลูกบาศก์เมตร (m^3)
สารส้ม	.....กิโลกรัม (kg)
โพลิเมอร์	.....กิโลกรัม (kg)
ไฟฟ้า	.....กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh)
สารขาออก (Outputs)	**หน่วย (Unit)**
น้ำประปา	.....ลูกบาศก์เมตร (m^3)
ตะกอนดิน	.....กิโลกรัม (kg)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

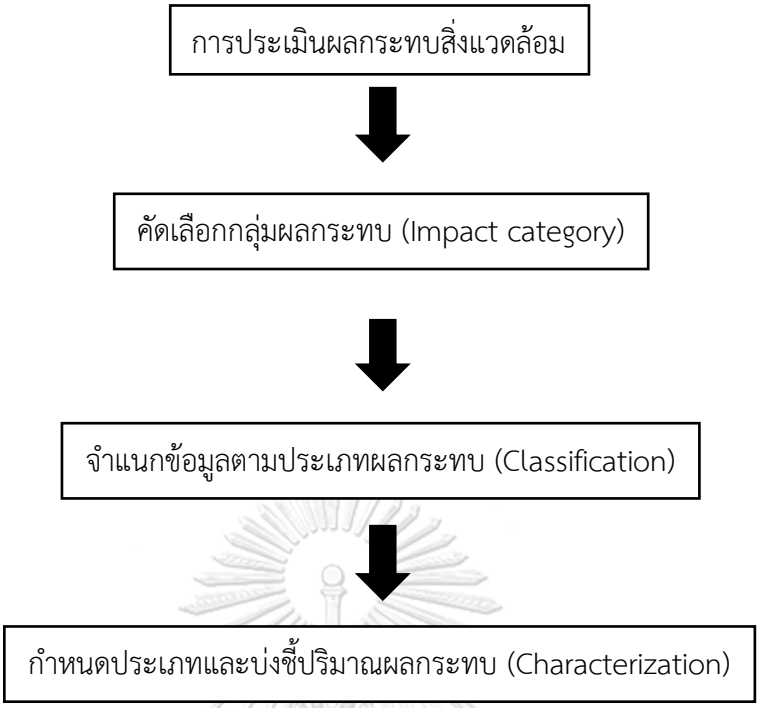
ตารางที่ 3-6 ตัวอย่างตารางการเก็บข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (ต่อ)

การดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น	
สารขาเข้า (Inputs)	**ปริมาณ.....หน่วย (Unit)**
น้ำดิบ	.....ลูกบาศก์เมตร (m^3)
สารส้ม	.....กิโลกรัม (kg)
โพลิเมอร์	.....กิโลกรัม (kg)
ไฟฟ้า	.....กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh)
สารขาออก (Outputs)	**หน่วย (Unit)**
น้ำประปา	.....ลูกบาศก์เมตร (m^3)
ตะกอนดิน	.....กิโลกรัม (kg)

3.6.3 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Impact Assessment)

ในงานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยตามหลักการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ที่กำหนดในมาตรฐาน ISO 14040 (Pfister และคณะ, 2017) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตรของแต่ละขั้นตอนในกระบวนการผลิตน้ำ จะถูกนำมาจัดกลุ่มและคัดเลือกตัวชี้วัดของกลุ่ม จากนั้นนำผลที่ได้มาคำนวณเพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นให้ความสำคัญกับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่ ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (Global warming potential) ผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรด (Acidification) ผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรธรรมชาติน้ำ (Water depletion) และผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิง (Fossil depletion) เนื่องจากผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ในปัจจุบันทั่วโลกให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก ในส่วนของผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรธรรมชาติและผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดเกิดจากการที่กระบวนการผลิตน้ำประปานั้นมีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและสารเคมีต่างๆ ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก



ภาพที่ 3-9 แผนผังขั้นตอนการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต

3.6.4 การแปลผลและรายงานผลกระทบ (Life cycle interpretation)

การแปลผลการศึกษาจากการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากทุกขั้นตอนมาวิเคราะห์และสรุปผลหาสาเหตุของปัญหา เพื่อให้ทราบว่าสิ่งใดจากกระบวนการผลิตที่จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเกิดผลกระทบในด้านใด โดยวิเคราะห์จากผลลัพธ์ และจัดทำข้อเสนอแนะที่ได้จากการประเมินโดยผลการประเมินวัฏจักรชีวิตจะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงขั้นตอนที่เพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมลง (Zanghelini, Cherubini และ Soares, 2018)

3.7 การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับกระบวนการดำเนินงานควบคุมการตกตะกอนของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

การศึกษาและวิเคราะห์กระบวนการดำเนินงานควบคุมการตกตะกอนของถังตกตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ได้รวบรวมข้อมูลและวิธีการดำเนินการที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น ปริมาณการใช้สารเคมี การใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นต้นทุนในกระบวนการผลิตน้ำประปา แล้วนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการดำเนินการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.8 การนำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในระบบผลิตน้ำประปาที่เหมาะสมที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยและให้มีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ

จากการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลการดำเนินงานควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน และรวมถึงทดลองวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ทำให้ทราบถึงแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการตกตะกอนในถังตกตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขนที่ได้มีการดำเนินการใช้งานอย่างต่อเนื่องอยู่ในปัจจุบัน เพื่อให้ได้น้ำประปาที่มีคุณภาพที่ดีผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ และทำให้ทราบถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นรวมถึงต้นทุนเมื่อมีการดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพื่อที่จะมุ่งเสนอแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการตกตะกอนในระบบผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล

4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนแบบสัมผัส

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลการดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขนย้อนหลังเป็นระยะเวลา 5 ปี จนถึงปัจจุบันและวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน ซึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนในงานวิจัยนี้ได้แก่ คุณภาพน้ำดิบ ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ ความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้า และอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน

4.1.1 คุณภาพน้ำดิบ

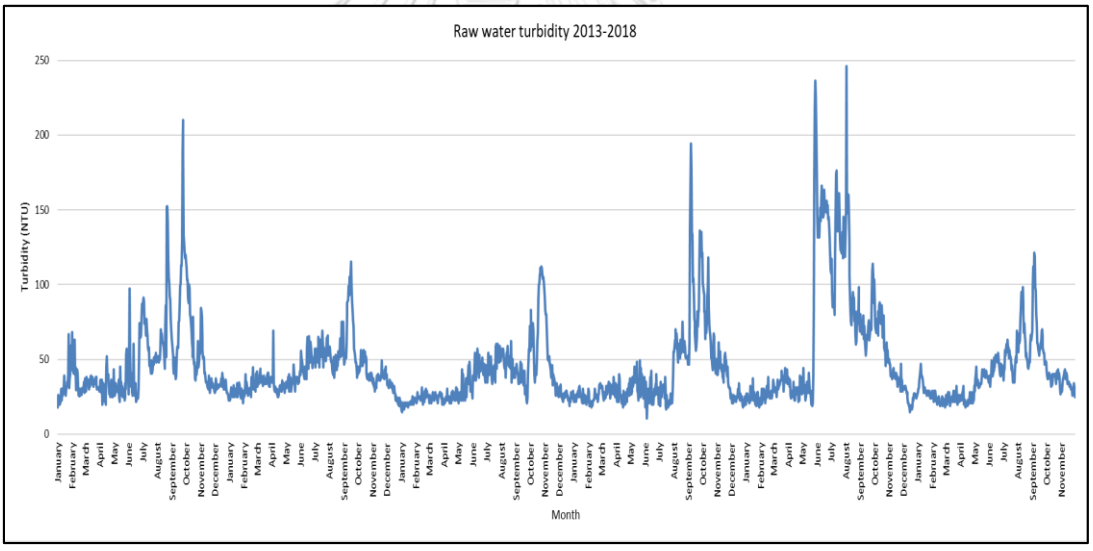
โรงงานผลิตน้ำบางเขนรับน้ำดิบจากโรงสูบน้ำดิบสำแล ผ่านมาตามคลองประปาซึ่งจะเกิดการฟอกตัวตามธรรมชาติทำให้น้ำดิบถูกปรับปรุงคุณภาพก่อนสู่โรงงานผลิตน้ำ และมีกระบวนการเติมอากาศ การดักขยะด้วยตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียดเพื่อกำจัดเศษขยะ พืชน้ำ ซากพืชซากสัตว์ที่อยู่ในน้ำดิบก่อนเข้าสู่ระบบสูบน้ำดิบ โรงงานผลิตน้ำบางเขนมีโรงสูบน้ำดิบจำนวน 2 โรงสูบ ได้แก่ โรงสูบน้ำดิบ 1 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำดิบจำนวน 6 ตัว กำลังสูบตัวละ 500,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และโรงสูบน้ำดิบ 2 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำดิบจำนวน 4 ตัว กำลังสูบตัวละ 500,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน คุณภาพของน้ำดิบที่เข้าสู่โรงงานผลิตน้ำบางเขนจากข้อมูลการดำเนินงานที่ผ่านมาพบว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในแต่ละฤดูกาลส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำดิบที่เข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำทำให้น้ำดิบมีคุณภาพที่ต่ำลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในช่วงฤดูฝนที่มีฝนตกปริมาณมากระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมน้ำดิบจะมีค่าความขุ่นค่อนข้างสูงมากกว่า 50 เอ็นทียู ทำให้ส่งผลกระทบกับกระบวนการผลิตน้ำและคุณภาพน้ำประปา รวมถึงค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำที่สูงขึ้น เนื่องจากระบบผลิตน้ำของโรงงานผลิตน้ำบางเขนในปัจจุบัน มีข้อจำกัดในด้านของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อัตราการจ่ายสารเคมี และปริมาณความต้องการของผู้ใช้น้ำที่มีความต้องการในปริมาณที่สูงและต่อเนื่องตลอดเวลา ผลกระทบจากปัญหาน้ำดิบความขุ่นสูงส่งต่อกระบวนการผลิตน้ำประปา เช่น ด้านของค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีที่เพิ่มมากขึ้นและสูญเสียน้ำที่เกิดจากการระบายตะกอนส่วนเกินมากกว่าปกติ ในกระบวนการตกตะกอนโดยถังตกตะกอนที่เป็นกลไกสำคัญไม่สามารถกำจัดความขุ่นในน้ำดิบที่สูงมากได้ทำให้น้ำที่

ผ่านกระบวนตกตะกอนมีความขุ่นสูงเกินเกณฑ์และจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพน้ำประปาในด้านของความขุ่น

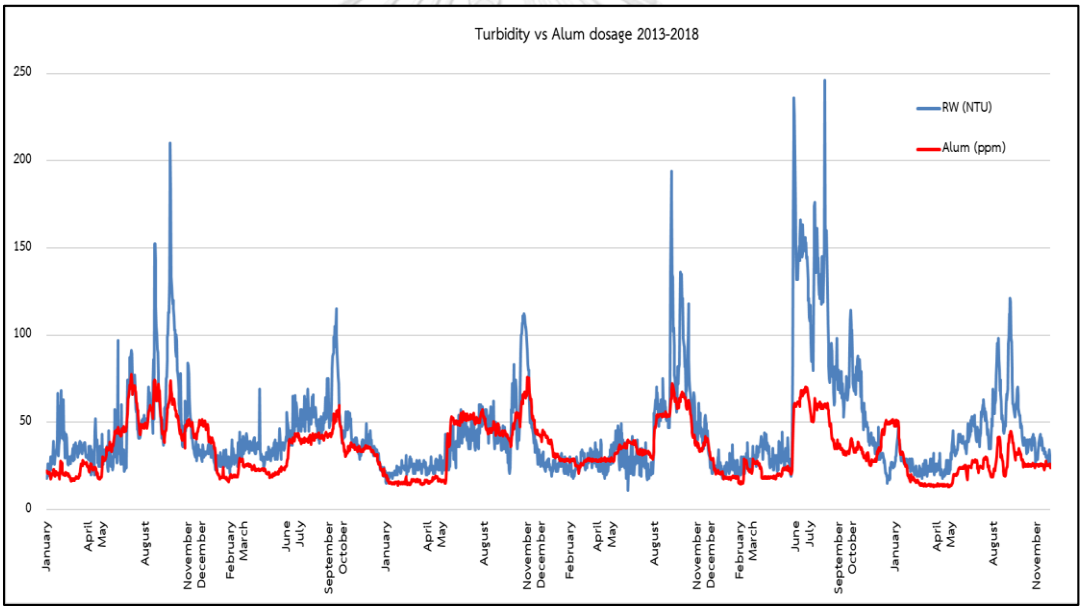
ในช่วงฤดูร้อนระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน คุณภาพน้ำดิบที่นำมาผลิตน้ำประปามีความขุ่นที่ค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 15-50 เอ็นทียู ทำให้สามารถควบคุมกระบวนการผลิตน้ำประปาได้ดีแต่หากมีการดำเนินการที่ขาดประสิทธิภาพก็ทำให้คุณภาพน้ำประปาที่ผลิตได้มีคุณภาพที่เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ และเนื่องจากสภาพของแหล่งน้ำดิบที่เป็นน้ำผิวดินที่มาเขื่อน แม่น้ำ ลำคลอง ซึ่งเป็นระบบเปิดตลอดเส้นทางจึงมีสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่มากมาย เช่น สัตว์น้ำ พืชน้ำ สาหร่าย โปรโตซัว รวมถึงแบคทีเรียชนิดต่างๆ และปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงของแหล่งน้ำต่างๆ ทำให้แหล่งน้ำมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตต่างๆ โดยเฉพาะสาหร่าย และเมื่อสาหร่ายที่มีปริมาณสูงเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบผลิตน้ำประปาที่ต้องกำจัดสาหร่ายในระบบตกตะกอนโดยการเพิ่มปริมาณการใช้สารเคมีให้สูงขึ้น



ภาพที่ 4-1 ความขุ่นของน้ำดิบที่เข้าระบบผลิตน้ำประปา

4.1.2 ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์

เมื่อน้ำดิบถูกส่งเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาต้องมีการจ่ายสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำตามความเหมาะสมกับคุณภาพน้ำดิบโดยสารเคมีที่โรงงานผลิตน้ำบางเขนจ่ายในปัจจุบันมีหลายชนิด โดยสารเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนคือ สารส้มน้ำ ปริมาณความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่จ่ายในระบบผลิตน้ำประปามาจากการหาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมด้วยวิธีการจาร์เทสต์ในห้องปฏิบัติการ โดยในช่วงที่น้ำดิบมีความขุ่นสูงเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาจะมีการใช้สารส้มน้ำในปริมาณที่สูงขึ้นกว่าช่วงเวลาปกติ และในช่วงที่น้ำดิบมีปริมาณสาหร่ายสูงเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา จะมีการใช้คลอรีนในการควบคุมปริมาณสาหร่ายไม่ให้เจริญเติบโตในระบบผลิตน้ำประปา ซึ่งจะต้องมีการจ่ายอย่างเพียงพอและต่อเนื่องตลอดเวลา และความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในช่วงสาหร่ายสูงจะมีการใช้งานเหมือนในช่วงการผลิตน้ำปกติ



ภาพที่ 4-2 เปรียบเทียบความขุ่นน้ำดิบกับสารส้มที่ใช้ในการตกตะกอน

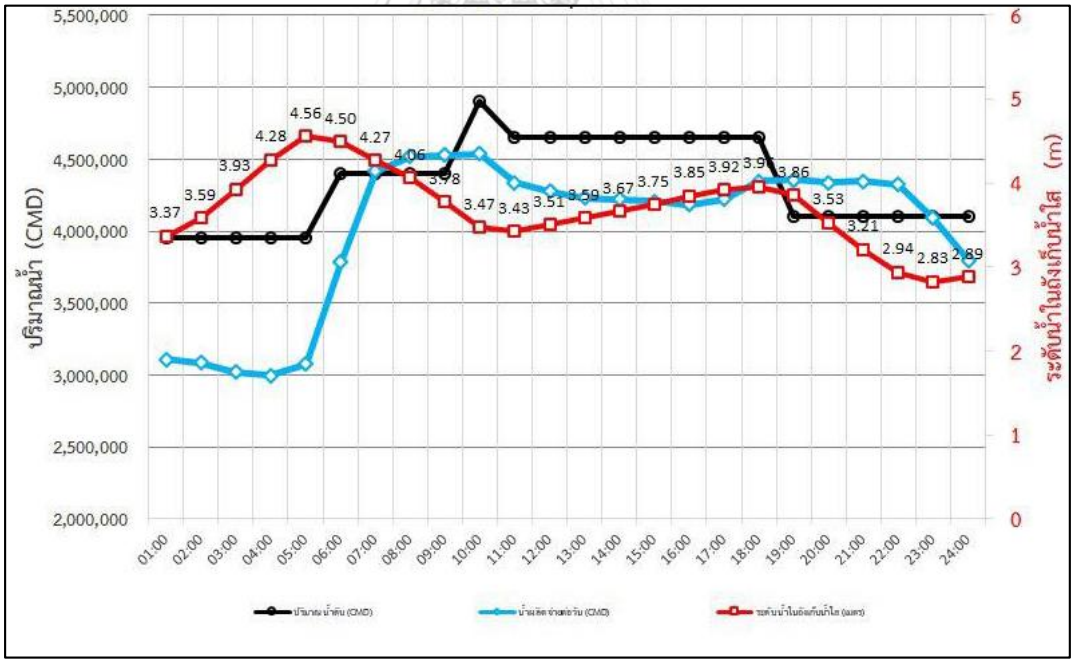
4.1.3 ความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้า

เมื่อน้ำดิบผ่านการผสมกับสารโคแอกกูแลนต์ในเส้นท่อเข้าสู่บริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนซึ่งเป็นบริเวณสำหรับการกวนช้าเพื่อสร้างกลุ่มตะกอนให้มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะตกตะกอน โดยมีอุปกรณ์สำหรับการกวนช้าประกอบด้วยชุดมอเตอร์ ชุดเกียร์เพื่อทดความเร็วรอบและชุดมอเตอร์จะมีแกนเพลาประกอบติดกับใบพัดสำหรับการกวนช้าเป็นประเภทใบพัด (Turbine blade) อยู่บริเวณกลางถังตกตะกอนเพื่อเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของน้ำให้เคลื่อนที่ลงด้านล่างของถังตกตะกอนเพื่อสร้างความปั่นป่วนในบริเวณทำปฏิกิริยาให้เกิดการรวมตัวกันของตะกอน ตะกอนที่รวมตัวกันและตกลงสู่ด้านล่างของถังตกตะกอนจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ตะกอนส่วนเกินที่ต้องกำจัดออกจากถังตกตะกอนและตะกอนส่วนที่นำมาหมุนเวียนใหม่ ในการควบคุมความเร็วรอบของใบพัดสำหรับการกวนช้าจะมีการปรับความเร็วรอบให้เหมาะสมกับอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอนและปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยา หากมีกรณีการปรับอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอนเพิ่มมากขึ้นจะมีการปรับลดความเร็วรอบของใบพัดลงเพื่อลดความปั่นป่วนของน้ำและป้องกันการฟุ้งกระจายของตะกอนที่ด้านล่างถังตกตะกอนไม่ให้ขึ้นมาบริเวณด้านบนของถังตกตะกอนซึ่งถ้ามีการลดความเร็วรอบของใบพัดให้น้อยเกินไปจะทำให้ไม่เพียงพอต่อการสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยา หรือกรณีที่มีการปรับลดอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอนจะมีปรับเพิ่มค่าความเร็วรอบของใบพัดเพื่อเพิ่มความปั่นป่วนในบริเวณทำปฏิกิริยาซึ่งถ้ามีการปรับค่าความเร็วรอบของใบพัดที่มากเกินก็สามารถที่จะทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนได้เช่นกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าหากมีการปรับค่าความเร็วของใบพัดที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลต่อการสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาและความขุ่นของน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.4 อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน

การปรับค่าอัตราการไหลของน้ำดิบหรือกำลังการผลิตของโรงงานผลิตน้ำบางเขนจะขึ้นอยู่ความต้องการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำโดยอัตราการผลิตน้ำจะมีปริมาณสูงในช่วงเวลาเช้าที่มีความต้องการน้ำจากผู้ใช้น้ำสูง ซึ่งทำให้มีการเพิ่มกำลังการผลิตโดยมีการปรับค่าอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าระบบผลิตน้ำประปาเพิ่มขึ้นจนเต็มความสามารถของกำลังการผลิตที่ 4.4 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งทำให้อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าสู่ถังตกตะกอนมีค่าเท่ากับ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และเมื่อผลิตน้ำประปาได้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้น้ำก็มีการปรับลดกำลังการผลิตลงซึ่งเป็นช่วงเวลากลางคืนที่ผู้ใช้น้ำพักผ่อนจากกิจกรรมประจำวันซึ่งมีปริมาณความต้องการใช้น้ำน้อย ทำให้มีการลดกำลังการผลิตลงเหลือ 3.6 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน ทำให้อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าสู่ถังตกตะกอนมีค่าประมาณ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในกรณีที่มีการปรับอัตราการไหลของน้ำดิบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราน้ำล้นผิวและปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ที่เข้าถังตกตะกอนซึ่งส่งผลกระทบต่อการสร้างตะกอนและการรักษาตะกอน อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนในถังตกตะกอนได้



ภาพที่ 4-3 ปริมาณน้ำดิบที่นำมาผลิตน้ำประปา

4.2 การวิเคราะห์การเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอน

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้น้ำดิบจริงที่เข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน ซึ่งมีความขุ่นอยู่ในช่วง 15-30 เอ็นทียู ซึ่งนำน้ำดิบมาทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยวิธีการจาร์เทสต์ (Jar test) และหาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอน

การศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนเพื่อกำจัดความขุ่น ในการทดลองนี้ทำเพื่อศึกษาหาความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum dose) และหาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยวิธีการจาร์เทสต์ (Jar test) ซึ่งสารโคแอกกูแลนต์ที่นำมาทดลองในขั้นตอนนี้มีทั้งหมด 3 ชนิด คือ สารส้มน้ำ (Aluminium Sulphate, $Al_2(SO_4)_3$) โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminium Chloride, PACl) และโพลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte, Polymer) โดยความขุ่นของน้ำดิบที่นำมาทดลองมีค่า 20 เอ็นทียู ผลการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนเพื่อกำจัดความขุ่น มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4-1 และตารางที่ 4-2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-1 ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ค่าความขุ่นเริ่มต้น (เอ็นทียู)	ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์	ความเข้มข้นสารเคมี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าความขุ่นสุดท้าย (เอ็นทียู)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (ร้อยละ)
20	สารส้มน้ำ	5	16	20.00
		10	7.8	61.00
		15	2.6	87.00
		20	1.8	91.00
		25	1.4	93.00
		30	1.3	93.50
		35	1.2	94.00
		40	1.4	93.00
		45	1.5	92.50
		50	1.5	92.50
		55	2.0	90.00
		60	2.3	88.50
	โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	6	4.0	80.00
		8	2.8	86.00
		10	1.7	91.50
		12	1.7	91.50
		14	1.6	92.00
		16	1.3	93.50
		18	1.0	95.00
		20	1.4	93.00
		22	1.4	93.00
		24	1.5	92.50
		26	1.7	91.50
		28	2.5	87.50

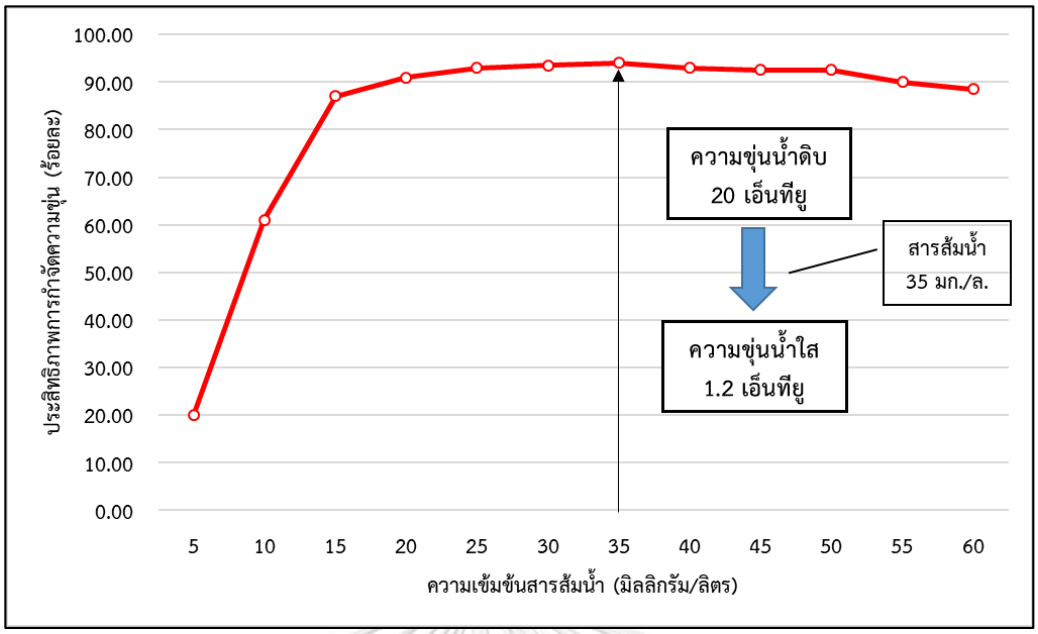
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-2 ความเข้มข้นของสารส้มน้ำกับโพลิอิเล็กโทรไลต์ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

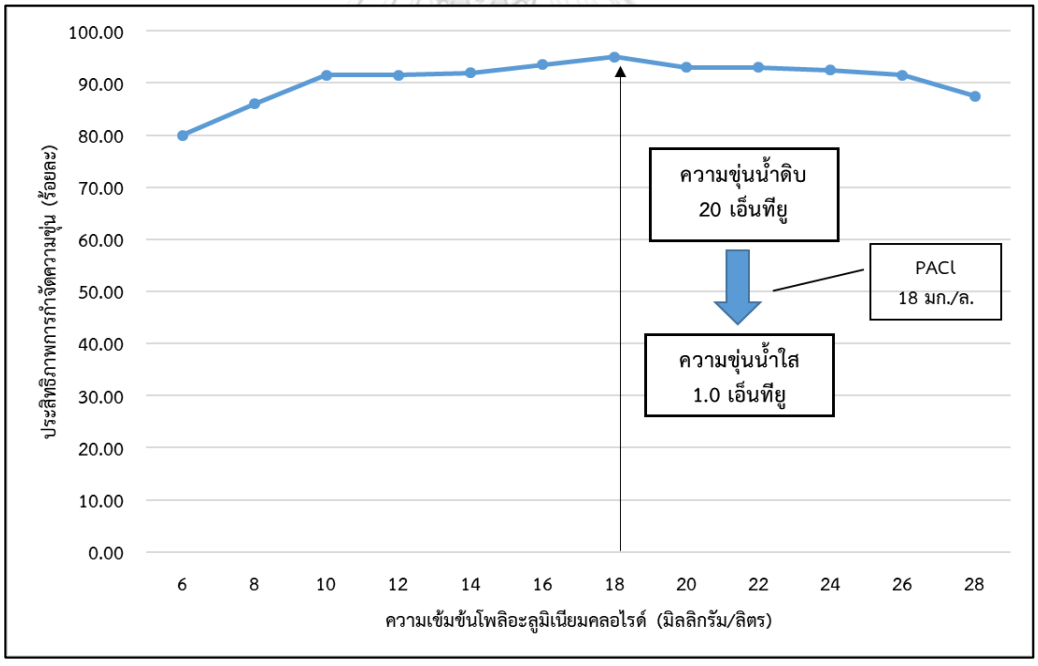
ค่าความขุ่นเริ่มต้น (เอ็นทียู)	ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์	ความเข้มข้นสารส้มน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าความขุ่นสุดท้าย (เอ็นทียู)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (ร้อยละ)
20	สารส้มน้ำ + โพลิอิเล็กโทรไลต์ (0.04 มิลลิกรัม/ลิตร)	20	1.6	92.00
		25	1.3	93.00
		30	1.2	94.00
		35	1.1	94.50
		40	0.8	96.00
		45	1.0	95.00

จากผลการทดลองพบว่าสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดได้แก่ สารส้มน้ำ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และสารส้มน้ำร่วมกับโพลิอิเล็กโทรไลต์ มีความเข้มข้นที่เหมาะสมและประสิทธิภาพต่อการกำจัดความขุ่นแตกต่างกัน ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของสารส้มน้ำ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และการใช้สารส้มน้ำร่วมกับโพลิอิเล็กโทรไลต์ มีค่าที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการตกตะกอน โดยที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 เอ็นทียู (ตามสภาพน้ำดิบจริงขณะช่วงเวลาที่ทดลอง) การกำจัดความขุ่นของสารส้มน้ำที่ความเข้มข้น 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเท่ากับร้อยละ 20.00 61.00 87.00 91.00 93.00 93.50 94.00 93.00 92.50 92.50 90.00 และ 88.00 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-4 ส่วนการกำจัดความขุ่นของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 และ 28 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเท่ากับร้อยละ 80.00 86.00 91.50 91.50 92.00 93.50 95.00 93.00 93.00 92.50 91.50 และ 87.50 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-5 และเมื่อนำโพลิอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้น 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร มาใช้เป็นสารช่วยตกตะกอนร่วมกับสารส้มน้ำที่ความเข้มข้น 15 20 25 30 35 40 และ 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นอยู่ในช่วงร้อยละ 89.00-96.00 แสดงดังภาพที่ 4-6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการกำจัดความขุ่นด้วยสารส้มเพียงชนิดเดียว

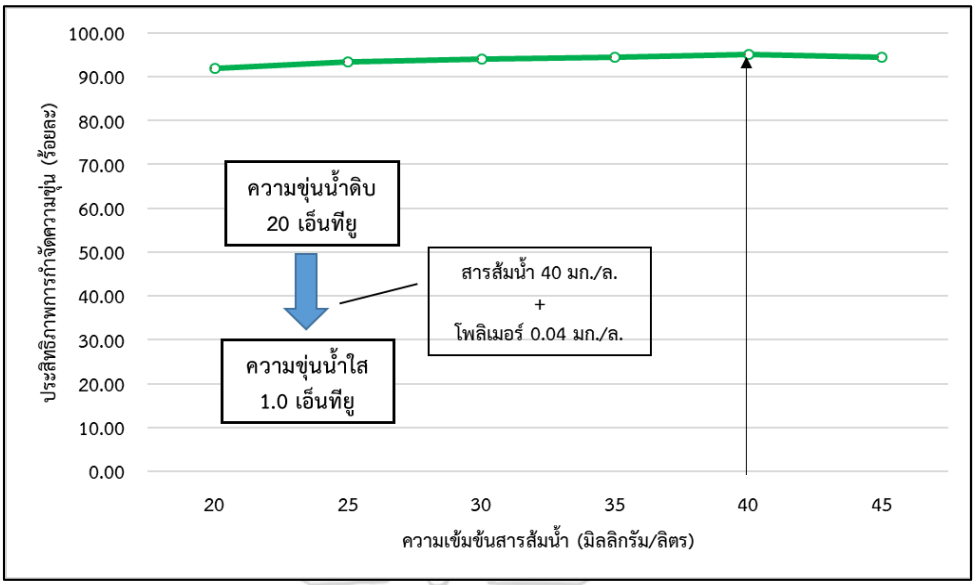
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4-4 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยสารส้มน้ำ



ภาพที่ 4-5 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์



ภาพที่ 4-6 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยสารส้มน้ำร่วมกับโพลิเมอร์

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ที่ความขุ่นน้ำดิบ 20 เอ็นทียู สารส้มน้ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้สูงสุดร้อยละ 94.00 โดยใช้ความเข้มข้นที่ 35 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ความขุ่นคงเหลือเท่ากับ 1.2 เอ็นทียู ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณเฉพาะค่าสารส้มน้ำในการทดลองจาร์เทสต์เท่ากับ 0.162 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่การใช้ของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้สูงสุดร้อยละ 95.00 โดยใช้ความเข้มข้นที่ 18 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ความขุ่นคงเหลือเท่ากับ 1.0 เอ็นทียู ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณเฉพาะค่าโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ในการทดลองจาร์เทสต์เท่ากับ 0.215 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อใช้สารส้มน้ำร่วมกับโพลิอิเล็กโทรไลต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุดร้อยละ 95.00 โดยใช้ความเข้มข้นสารส้มน้ำ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และโพลิเมอร์ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคำนวณเฉพาะค่าสารเคมีในการทดลองจาร์เทสต์เท่ากับ 0.189 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ในระบบผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขนปัจจุบันต้องการความขุ่นน้ำหลังกระบวนการตกตะกอนที่ไม่เกิน 3 เอ็นทียู (เพื่อให้ค่าความขุ่นน้ำหลังกระบวนการกรองไม่เกิน 0.5 เอ็นทียู) พบว่าที่ความขุ่นคงเหลือหลังกระบวนการตกตะกอนที่ 3 เอ็นทียู จะต้องใช้สารส้มน้ำที่มีความเข้มข้น 22.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และต้องใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ 7.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบซึ่งเมื่อนำมาคำนวณเฉพาะค่าสารเคมีในการทดลองจาร์เทสต์สำหรับการใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์เท่ากับ 0.162 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

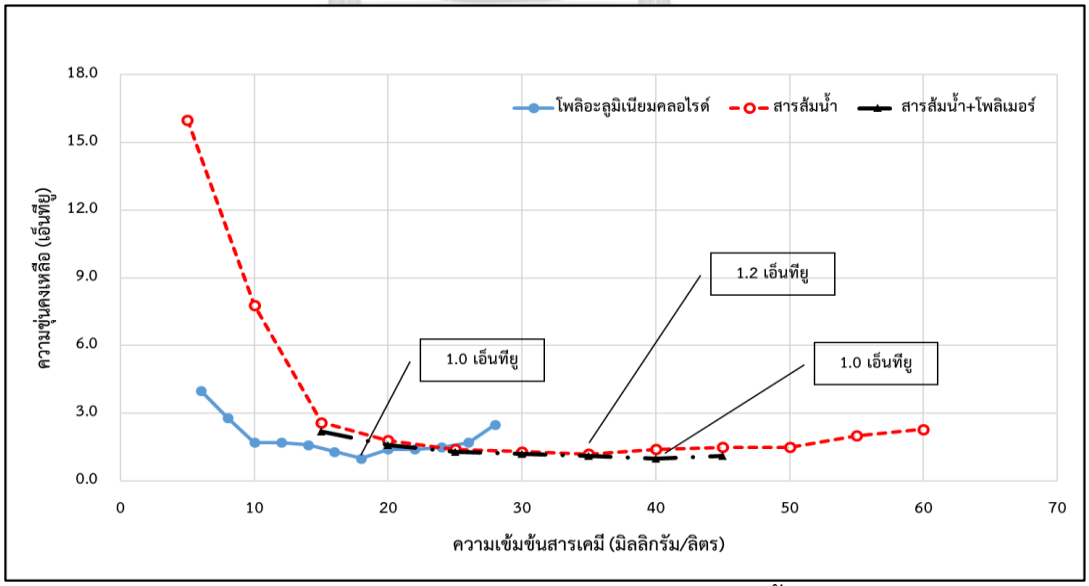
และค่าสารเคมีสำหรับการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์เท่ากับ 0.091 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 เปรียบเทียบค่าสารเคมีในการผลิตน้ำประปา

สารโคแอกกูแลนต์	ราคา (บาท/ตัน)	ความเข้มข้นที่ใช้ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าสารเคมี (บาท/ลูกบาศก์เมตร)
สารส้มน้ำ	2,315	22.1	0.102
		35.0	0.162
โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	4,180	7.7	0.091
		18.0	0.215

หมายเหตุ : ราคาสารเคมีอ้างอิงจากราคาที่การประปานครหลวงซื้อในปัจจุบัน (พ.ศ.2561)

กระบวนการตกตะกอนที่มีทั้งกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการฟล็อคคูเลชันมีความสำคัญต่อการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบ โดยประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์ จากภาพที่ 4-7 สามารถอธิบายได้ว่าการใช้สารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ มีการใช้ในปริมาณที่แตกต่างกันที่ความขุ่นน้ำดิบ 20 เอ็นทียู ปริมาณที่เหมาะสมของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์คือ 8-18 มิลลิกรัมต่อลิตรและปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มน้ำคือ 15-35 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้สารส้มน้ำที่ความเข้มข้น 15-35 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับโพลิอิเล็กโทรไลต์ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4-7 เปรียบเทียบความขุ่นคงเหลือจากการใช้สารส้มน้ำ โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ และสารส้มน้ำร่วมกับโพลิอิเล็กโทรไลต์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมของสารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ จะพบว่าการใช้สารส้มน้ำมีปริมาณที่สูงกว่าโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ซึ่งเป็นผลมาจากกลไกหลักของการทำลายเสถียรภาพและการรวมตะกอนของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด กล่าวคือ สารส้มน้ำมีกลไกหลักเป็นการห่อหุ้มอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น (Sweep flocculation) ซึ่งต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์สูงเพื่อสร้างผลึกสำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาค (Xu และคณะ, 2016) และเนื่องจากเป็นกลไกที่ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของอนุภาค การตกตะกอนจึงไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นในขณะที่ค่าซีตาโพเทนเชียลมีค่าต่ำสุด และค่าพีเอชจะมีความสำคัญต่อการตกตะกอน เนื่องจากจะส่งผลต่อความสามารถในการตกผลึกของสารต่างๆ โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมในการใช้สารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน และส่งผลต่อกลไกการดูดติวผิว การทำลายประจุไฟฟ้ารวมถึงกลไกการห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก ซึ่งช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6.5-8.0

สำหรับการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์จะทำลายเสถียรภาพของอนุภาคด้วยกลไกการดูดติวผิว (Adsorption coagulation) ดังนั้นการรวมตะกอนด้วยวิธีนี้จะไม่ต้องการสารโคแอกกูแลนต์ในปริมาณมาก โดยกลแบบดูดติดผิวนี้สามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์เป็นประจุตรงข้าม (Charge reversal) ได้หากมีการเติมปริมาณที่มากเกินไปและจะทำให้เสถียรภาพของอนุภาคกลับคืนมาใหม่ (Zhang และคณะ, 2017) จึงมีความจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ทางทฤษฎีระหว่างปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์กับปริมาณความขุ่นเพื่อประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับการกำจัดความขุ่น

สำหรับการใช้โพลิอิเล็กโทรไลต์ เป็นสารช่วยตกตะกอนร่วมกับสารส้มน้ำซึ่งเป็นสารตกตะกอนหลักพบว่าในช่วงทำการทดลองค่าความขุ่นของน้ำดิบมีค่าต่ำทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของการใช้สารส้มน้ำร่วมกับโพลิเมอร์มีค่าใกล้เคียงกับการใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากโพลิเมอร์เป็นอนุภาคที่มีลักษณะเป็นสายยาวและปลายอิสระซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคความขุ่นเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคให้มารวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่เพียงพอ (Wei และคณะ, 2018) แต่ในช่วงที่ความขุ่นต่ำอนุภาคที่มาเป็นเป้าสัมผัสมีค่อนข้างน้อยและโพลิเมอร์ไม่สามารถสร้างเป้าสัมผัสเพิ่มขึ้นได้ โอกาสสัมผัสกันระหว่างอนุภาคจึงมีน้อย ทำให้การใช้โพลิเมอร์เป็นสารช่วยตกตะกอนในช่วงที่น้ำดิบความขุ่นต่ำมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นใกล้เคียงกับการใช้สารส้มน้ำเพียงอย่างเดียว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-4 คุณภาพน้ำก่อนและหลังกำจัดความขุ่น

คุณภาพน้ำดิบ			ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าที่ตรวจวัดหลังการทดลองจาร์เทสต์		
ความขุ่น (เอ็นทียู)	พีเอช	ความเป็นด่าง (มก./ล.)			ความขุ่น (เอ็นทียู)	พีเอช	ความเป็นด่าง (มก./ล.)
20	7.68	94	สารส้มน้ำ	5	16	7.61	91
				10	7.8	7.54	89
				15	2.6	7.41	86
				20	1.8	7.32	84
				25	1.4	7.23	82
				30	1.3	7.17	81
				35	1.2	7.11	79
				40	1.4	7.07	77
				45	1.5	7.00	74
				50	1.5	6.93	72
				55	2.0	6.85	70
				60	2.3	6.78	68
			โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	6	4.0	90	7.57
				8	2.8	90	7.56
				10	1.7	89	7.54
				12	1.7	88	7.53
				14	1.6	88	7.51
				16	1.3	88	7.49
				18	1.0	87	7.49
				20	1.4	86	7.47
				22	1.4	86	7.46
				24	1.5	86	7.46
				26	1.7	85	7.44
				28	2.5	85	7.43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในกระบวนการตกตะกอนในระบบผลิตน้ำประปาที่ประกอบด้วยขั้นตอนโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และฟล็อคคูเลชัน (Flocculation) นั้นเป็นกระบวนการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำด้วยกระบวนการทางเคมีและกายภาพ ทำให้ต้องมีพิจารณาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของน้ำในขั้นตอนกระบวนการผลิต เช่น ค่าความขุ่นของน้ำดิบ ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง เป็นต้น โดยคุณภาพน้ำในขั้นตอนกระบวนการตกตะกอนจะส่งผลถึงประสิทธิภาพการตกตะกอน การควบคุมคุณภาพน้ำในกระบวนการตกตะกอนจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากมีการเติมสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดความขุ่น สำหรับคุณภาพน้ำที่ต้องควบคุมในขั้นตอนการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำ นอกจากจะพิจารณาถึงความขุ่นแล้วยังต้องพิจารณาถึง ค่าความเป็นด่าง และค่าพีเอชเป็นสำคัญอีกด้วย ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองชนิดนี้จะส่งผลถึงปฏิกิริยาของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอน (Kan, Huang และ Pan, 2002) และกลไกในการบำบัดน้ำในขั้นตอนต่อไปสำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปาจากตารางที่ 4-4 พบว่าการเติมสารโคแอกกูแลนต์ส่งผลให้ค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างของน้ำดิบมีการเปลี่ยนแปลง โดยค่าความเป็นด่างจะมีค่าลดลงและค่าพีเอชจะ ลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากค่าความเป็นด่างจะเป็นตัวที่ช่วยในการสะเทินกรดที่เข้าสู่ระบบ และการที่สารเคมีที่เป็นกรดเข้าสู่ระบบก็จะทำให้ค่าพีเอชมีโอกาสที่จะลดลง จากการทดลองพบว่าสารส้มน้ำส่งผลต่อค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างมากกว่าโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงและกลไกที่เกิดขึ้นได้จากสมการเคมีต่อไปนี้

สารส้มน้ำ : $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O + 6H_2O \longrightarrow 2Al(OH)_3 + 3H_2SO_4 + 18H_2O$

โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ : $Al_2(OH)_3Cl_3 \longrightarrow 2Al(OH)_3 + 3HCl + 18H_2O$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยการพิจารณาจากสมการเคมีเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชและค่าความเป็นด่าง พบว่าสารส้มน้ำ ($Al_2(SO_4)_3$) 1 โมล จะทำให้เกิดกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 3 โมล ในขณะที่โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($Al_2(OH)_3Cl_3$) 1 โมล จะทำให้เกิดกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 3 โมล (Luttrell, 2015) ซึ่งปริมาณกรดแก่ที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าเท่ากันเมื่อเทียบสัดส่วนต่อโมล แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดในการกำจัดความขุ่นให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน จากการทดลอง สารส้มน้ำจำเป็นต้องใช้ในปริมาณที่สูงกว่าโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ประมาณ 2.5 เท่า ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นใกล้เคียงกัน และคุณสมบัติของน้ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างจากการเติมสารส้มน้ำมากกว่าการเติมโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

จากการทดลองศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนเพื่อกำจัดความขุ่นสามารถสรุปได้ว่า กระบวนการโคแอกกูชันและฟล็อคคูเลชันมีความสำคัญต่อการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบ โดยสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ได้แก่ สารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบใกล้เคียงกันแต่ปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์จะมีปริมาณที่แตกต่างกัน ส่วนการใช้สารส้มน้ำร่วมกับโพลิเมอร์ก็ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ใกล้เคียงกับการใช้สารส้มน้ำเพียงอย่างเดียวในการตกตะกอน สารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในส่งผลต่อคุณภาพน้ำหลังกระบวนการตกตะกอน โดยพารามิเตอร์ที่ให้ความสำคัญนอกจากค่าความขุ่น ได้แก่ ค่าความเป็นด่าง และค่าพีเอช และสิ่งที่สำคัญในการเลือกใช้สารโคแอกกูแลนต์ในกระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อให้บริการแก่ผู้ใช้น้ำนั้นต้องคำนึงถึง ราคาสารเคมี ซึ่งจะเป็นต้นทุนในกระบวนการผลิต ในปัจจุบันโรงงานผลิตน้ำบางเขนได้ใช้สารโคแอกกูแลนต์ในกระบวนการผลิตน้ำประปา 2 ชนิดคือ สารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ โดยราคาของสารส้มน้ำที่ใช้ในปัจจุบันมีราคา 2,315 บาทต่อตัน และราคาของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีราคา 4,180 บาทต่อตัน ซึ่งเมื่อนำราคาสารเคมีมาคำนวณเป็นค่าต้นทุนสารเคมีต่อการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร พบว่ามีต้นทุนเฉพาะค่าสารโคแอกกูแลนท์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่ใกล้เคียงกันทั้งสารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำสารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มาใช้เป็นสารโคแอกกูแลนต์ทดลองกับถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขนที่สภาพการทำงานจริง เนื่องจากทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการจาร์เทสต์ทั้งสารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์สามารถกำจัดความขุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ผลของความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดสำหรับการกวนช้าและอัตราการไหลของน้ำดิบในถังตกตะกอน

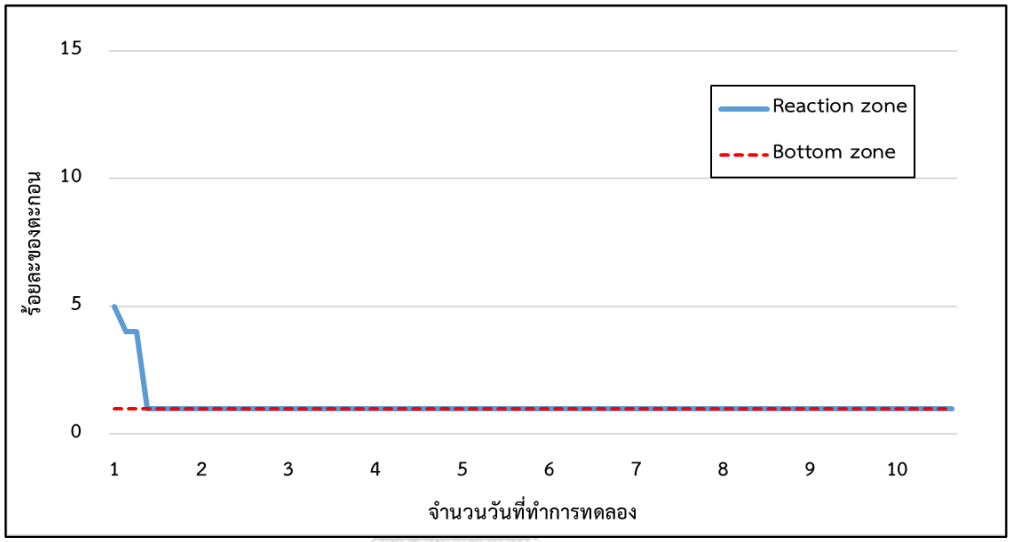
การวิเคราะห์ผลของความเร็วมอเตอร์ของใบพัดสำหรับการกวนช้าและอัตราการไหลของน้ำดิบในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน เนื่องจากการกวนช้าเป็นการสร้างโอกาสให้อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วมาสัมผัสและรวมตัวกันเป็นกลุ่มตะกอน (Floc) ที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้น เมื่อมีจำนวนที่มากพอกลายเป็นกลุ่มตะกอนที่มีน้ำหนักเพียงพอที่จะตกตะกอน การทดลองนี้ได้กำหนดค่าความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดสำหรับการกวนช้าในบริเวณทำปฏิกิริยา (Reaction zone) ที่ 400 500 และ 600 รอบต่อนาที และทำการทดลองกับอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าสู่ถังตกตะกอนที่อัตราการไหล 160,000 200,000 และ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยมีค่าความขุ่นของน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบอยู่ในช่วงความขุ่น 15-25 เอ็นทียู ตามสภาพการใช้งานจริงในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง โดยใช้สารส้มน้ำความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นสารโคแอกกูแลนต์จากการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ สำหรับผลการทดลองสามารถอธิบายโดยละเอียดได้ดังต่อไปนี้

4.2.2.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 400 500 และ 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

จากการวิเคราะห์ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้า พบว่าความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้ามีผลต่อการสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนโดยใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์ ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันดังต่อไปนี้

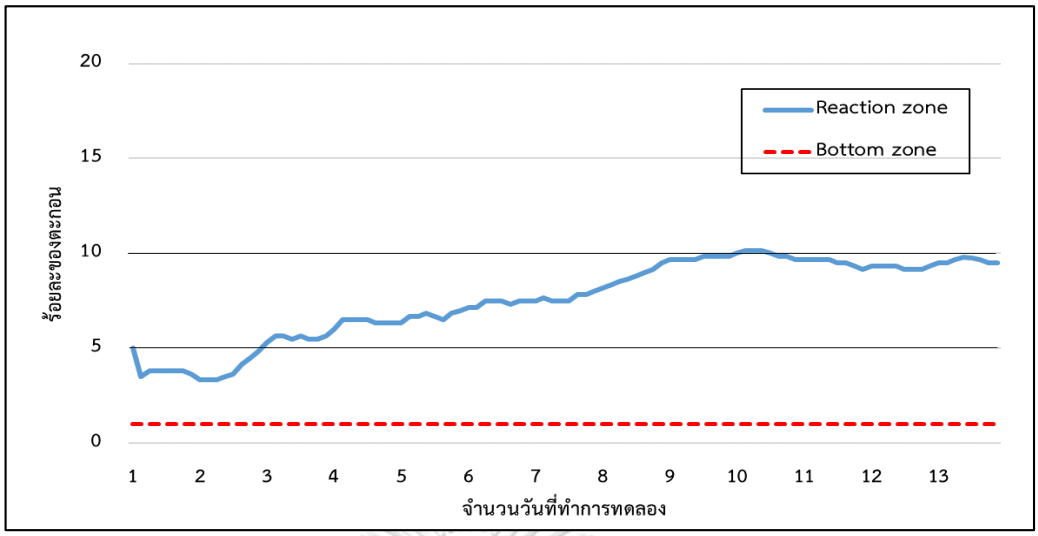
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ถังตกตะกอนที่ 1 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 400 รอบต่อนาที ปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยา (Reaction zone) มีค่าเท่ากับร้อยละ 1 และตะกอนที่ก้นถังตกตะกอน (Bottom zone) มีค่าเท่ากับร้อยละ 1 ตลอดระยะเวลาการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4-8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วรอบของใบพัดในการกวนช้าที่ 400 รอบต่อนาที ไม่เพียงพอที่จะสร้างความปั่นป่วนให้กับอนุภาคมาสัมผัสและรวมตัวกัน ที่อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน



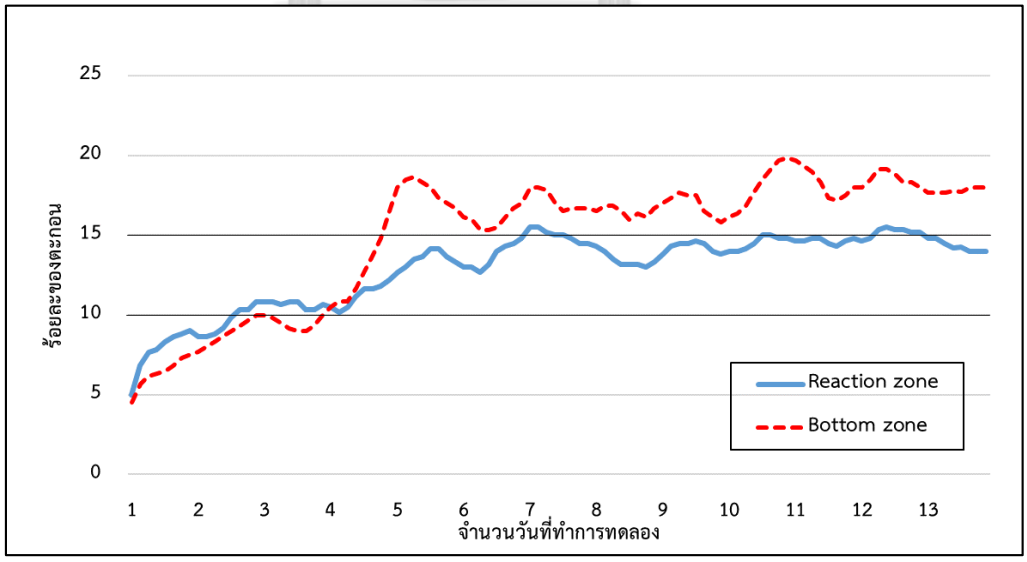
ภาพที่ 4-8 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 400 รอบ/นาที และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน

ถังตกตะกอนที่ 2 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 500 รอบต่อนาที ปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5-10 ซึ่งในช่วงแรกของการทดลองตะกอนจะมีค่าร้อยละ 2-3 โดยมีปริมาณตะกอนเพิ่มมากขึ้นและคงที่ในช่วงร้อยละ 5-10 ตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีค่าเท่ากับร้อยละ1 ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4-9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วของใบพัดในการกวนช้าที่ 500 รอบต่อนาที ทำให้อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพมาสัมผัสและรวมตัวกันได้มากกว่าขึ้น โดยรักษาปริมาณตะกอนให้อยู่ในปริมาณค่อนข้างต่ำแต่ยังไม่สามารถที่จะสร้างตะกอนให้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น และปริมาณตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนยังไม่เพียงพอทำให้ไม่สามารถควบคุมตะกอนและทำให้เกิดการหมุนเวียนตะกอนจากด้านล่างของถังตกตะกอนกลับขึ้นมาได้



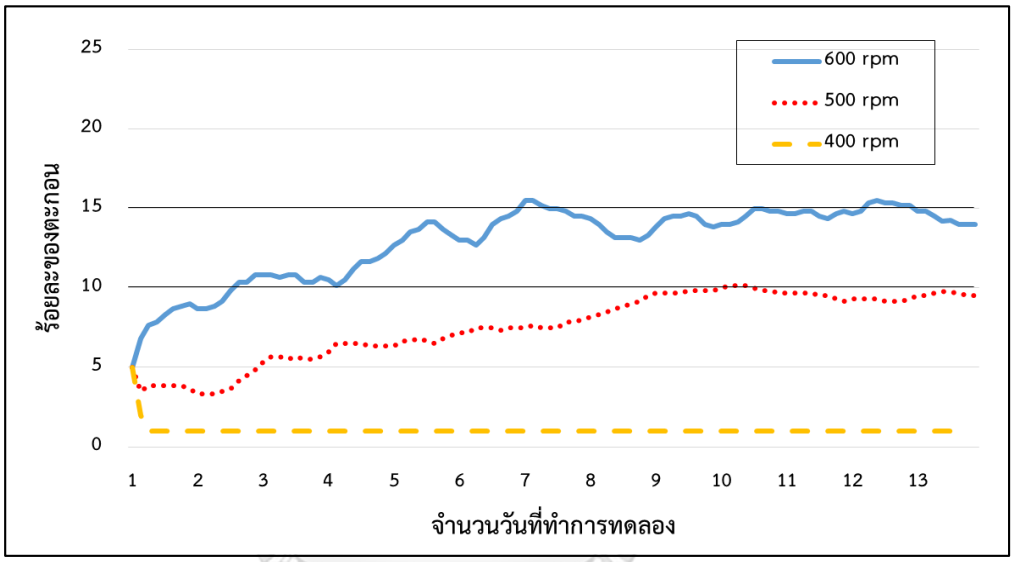
ภาพที่ 4-9 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน

ถังตกตะกอนที่ 3 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 600 รอบต่อนาที ปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าค่อนข้างสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 ซึ่งตะกอนจะมีค่าร้อยละ 5-10 ในช่วงแรกของการทดลอง และจะมีการเพิ่มขึ้นและคงที่ในช่วงร้อยละ 10-15 โดยตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีค่าค่อนข้างสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 15-20 ดังแสดงในภาพที่ 4-10 เนื่องจากตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีปริมาณมากพอที่จะตกตะกอนและรักษาปริมาณตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนได้ รวมถึงความเร็วรอบของใบพัดมีเพียงพอที่จะหมุนเวียนตะกอนที่ก้นถังตกตะกอน



ภาพที่ 4-10 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน

การควบคุมความเร็วใบพัดใบพัดสำหรับการกวนช้าในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 400 500 และ 600 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน พบว่า เมื่อใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 400 รอบต่อนาที ไม่สามารถสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาได้ ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 รอบต่อนาที สามารถสร้างกลุ่มตะกอนให้มีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 5-10 และความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 600 รอบต่อนาที สามารถสร้างกลุ่มตะกอนให้มีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 ดังแสดงในภาพที่ 4-11



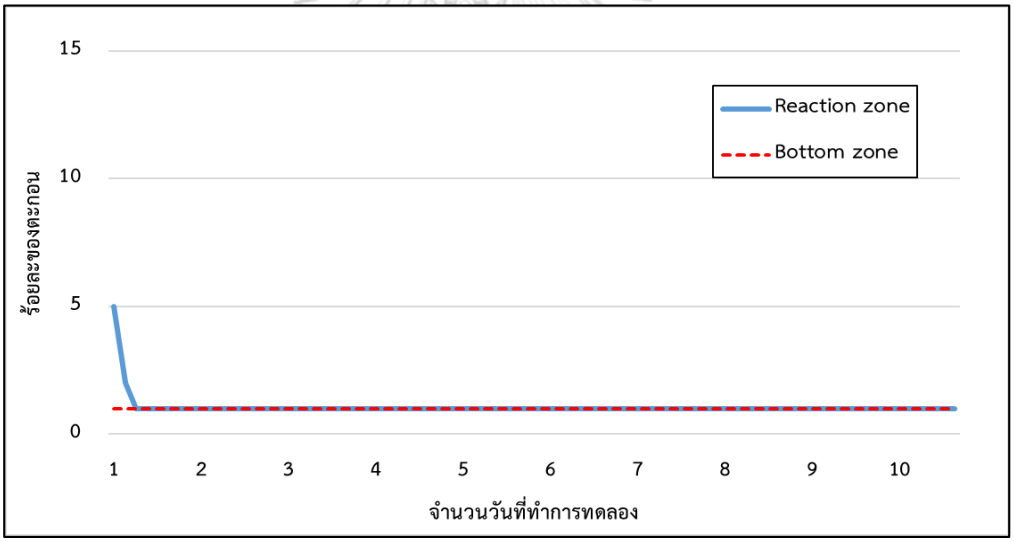
ภาพที่ 4-11 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.2.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 400 500 และ 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

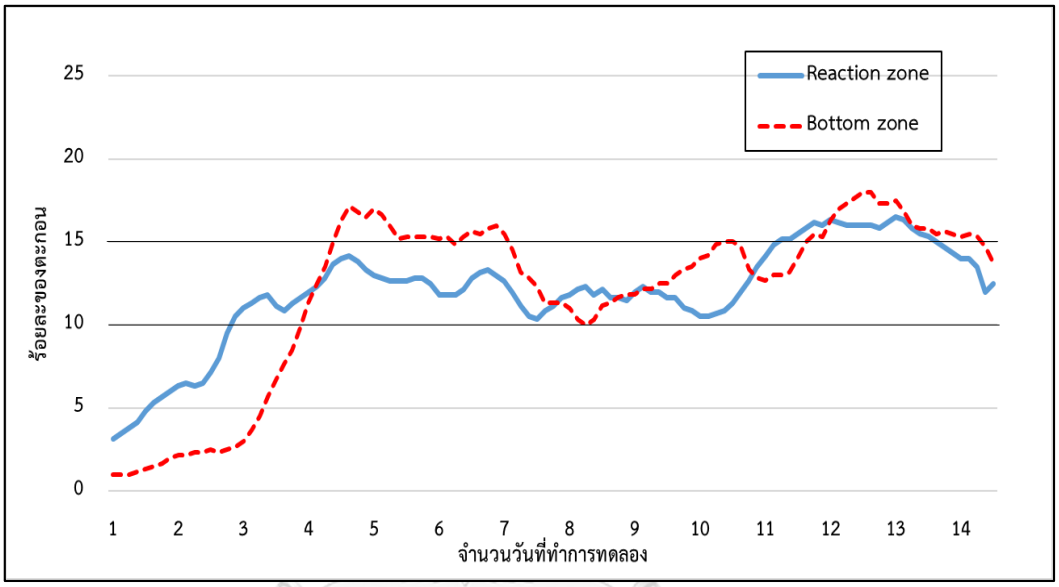
จากการวิเคราะห์ผลของความเร็วของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้า พบว่าความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้ามีผลต่อการสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์ ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังต่อไปนี้

ถังตกตะกอนที่ 1 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 400 รอบต่อนาที ปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับร้อยละ 1 และปริมาณตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีค่าเท่ากับร้อยละ 1 ตลอดระยะเวลาการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4-12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วรอบของใบพัดในการกวนช้าที่ 400 รอบต่อนาที ไม่เพียงพอที่จะสร้างความปั่นป่วนให้กับอนุภาคมารวมตัวกัน



ภาพที่ 4-12 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 400 รอบ/นาที และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน

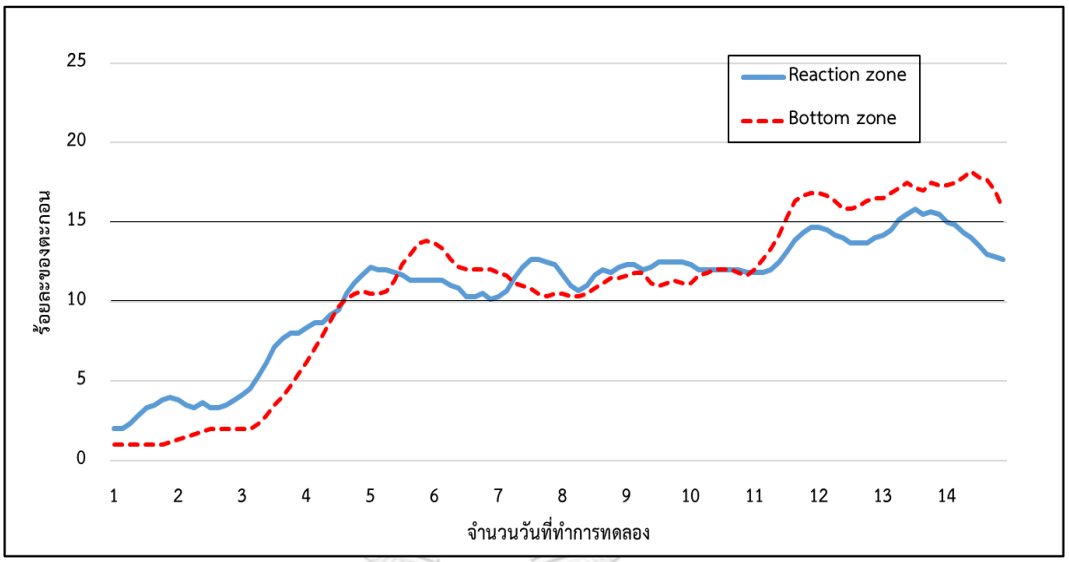
ถังตกตะกอนที่ 2 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 500 รอบต่อนาที ปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 ซึ่งในช่วงแรกของการทดลองตะกอนจะมีค่าร้อยละ 5-10 มีค่าเพิ่มมากขึ้นและคงที่ในช่วงร้อยละ 10-15 และปริมาณของตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีค่าเท่ากับร้อยละ 10-15 ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4-13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วของใบพัดในการกวนช้าที่ 500 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถที่จะรักษาปริมาณตะกอนให้อยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง



ภาพที่ 4-13 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน

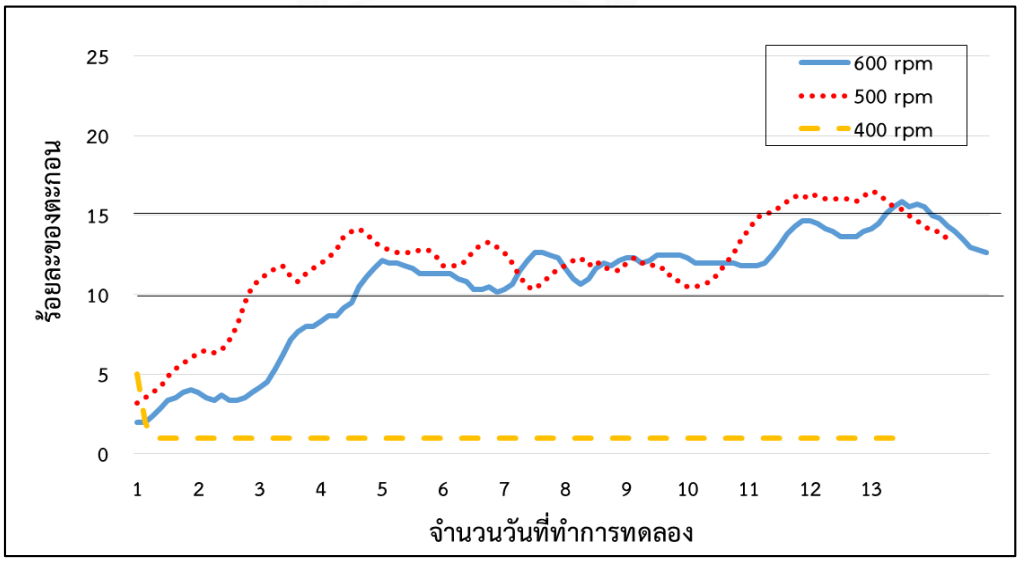
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ถังตกตะกอนที่ 3 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 600 รอบต่อนาที ปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าค่อนข้างสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 ซึ่งตะกอนจะมีค่าร้อยละ 5-10 ในช่วงแรกของการทดลอง มีการเพิ่มขึ้นและคงที่ในช่วงร้อยละ 10-15 และตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีปริมาณค่อนข้างสูงเช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 4-14 เนื่องจากตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีมากพอที่จะตกตะกอนและรักษาปริมาณของตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนได้ รวมถึงความเร็วรอบของใบพัดมีเพียงพอที่จะหมุนเวียนตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนให้กลับมาหมุนเวียนในระบบ



ภาพที่ 4-14 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน

การควบคุมความเร็วใบพัดใบพัดสำหรับการกวนช้าในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 400 500 และ 600 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน พบว่า เมื่อใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 400 รอบต่อนาที ไม่สามารถสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาได้ ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที สามารถสร้างกลุ่มตะกอนให้มีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 ดังแสดงในภาพที่ 4-15



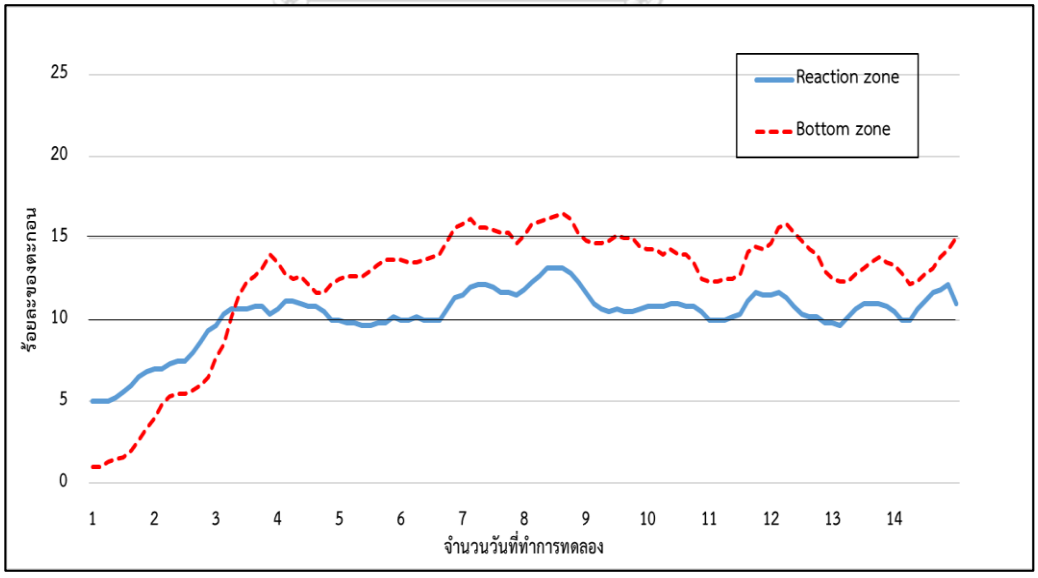
ภาพที่ 4-15 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน

4.2.2.3 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 400 500 และ 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

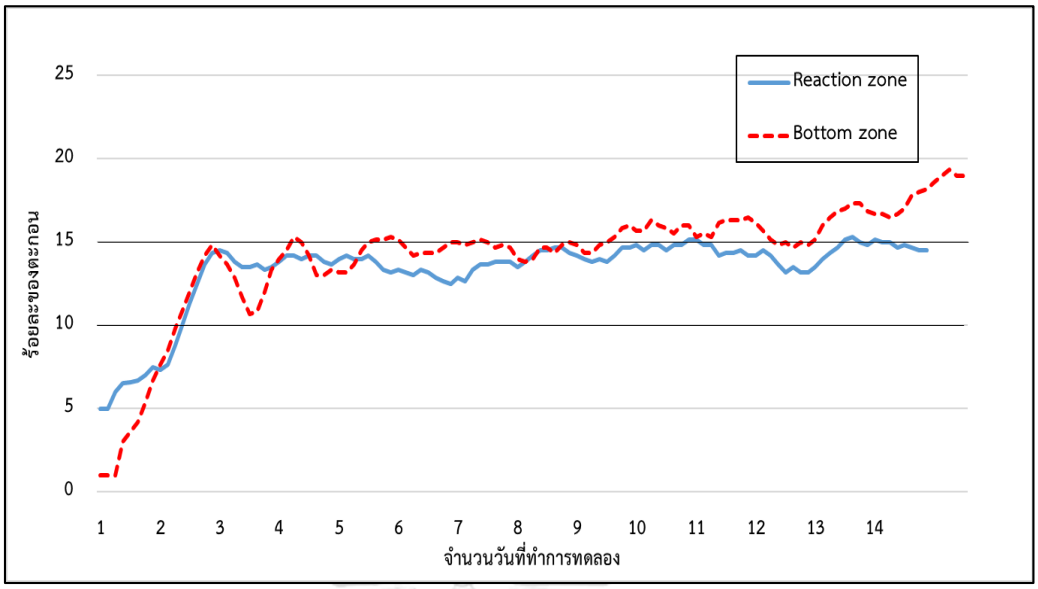
จากการวิเคราะห์ผลของความเร็วของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้า พบว่าความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้ามีผลต่อการสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์ ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังต่อไปนี้

ถังตกตะกอนที่ 1 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 400 รอบต่อนาที ผลจากการทดลองปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับร้อยละ 1 และตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีค่าเท่ากับร้อยละ 1 ตลอดระยะเวลาการทดลอง

ถังตกตะกอนที่ 2 และถังตกตะกอนที่ 3 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที ตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่าปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4-16 และภาพที่ 4-17 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วของใบพัดในการกวนช้าที่ 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถที่จะรักษาปริมาณตะกอนให้อยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง และรักษาตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนได้



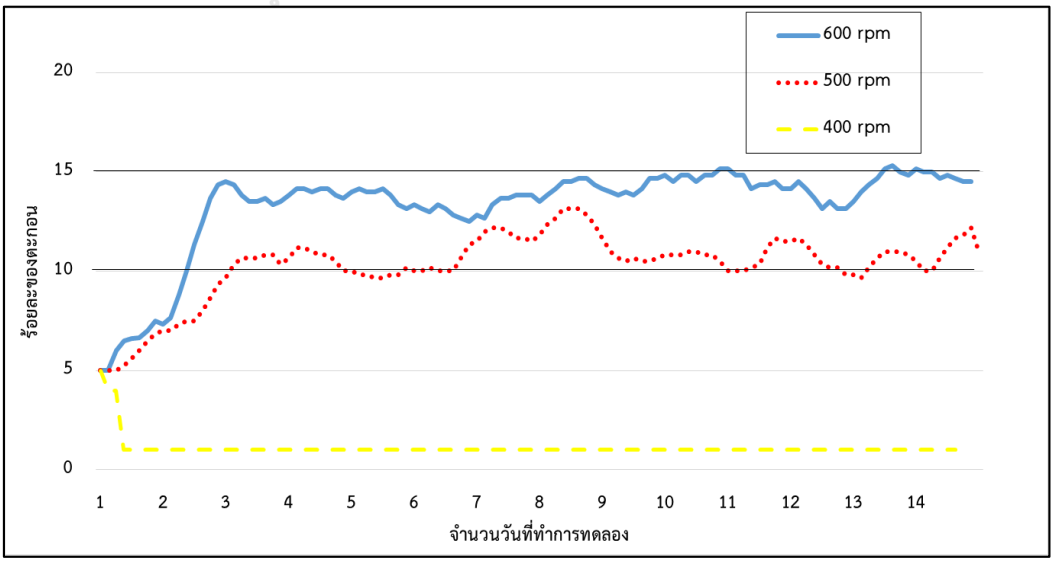
ภาพที่ 4-16 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และอัตราการไหล 210,000 ลบ.ม./วัน



ภาพที่ 4-17 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที และอัตราการไหล 210,000 ลบ.ม./วัน

การควบคุมความเร็วใบพัดใบพัดสำหรับการกวนช้าในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 400 500 และ 600 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน พบว่า เมื่อใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 400 รอบต่อนาที ไม่สามารถสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาได้ ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที สามารถสร้างกลุ่มตะกอนให้มีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 ดังแสดงในภาพที่ 4-18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4-18 ร้อยละของตะกอนสารส้มที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการไหล 210,000 ลบ.ม./วัน

เมื่อนำผลการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดสำหรับการกวนช้าในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 400 500 และ 600 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน อัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และอัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน พบว่า เมื่อใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 400 รอบต่อนาที ไม่สามารถสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาได้ในทุกอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน เนื่องจากในช่วงที่ทำการทดลองความขุ่นของน้ำดิบค่อนข้างต่ำทำให้อนุภาคที่จะมาเป็นตัวตั้งต้นในการสร้างกลุ่มตะกอนมีน้อย และการควบคุมความเร็วรอบของใบพัดที่ต่ำก็ทำให้โอกาสของอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพมารวมตัวกันลดลง (Wang และคณะ, 2018) เมื่อเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสและความปั่นป่วนให้กับอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพมีโอกาสที่สัมผัสกันมากขึ้น และสามารถสร้างกลุ่มตะกอนให้มีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 และที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 และ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

4.2.2.4 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 400 500 และ 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

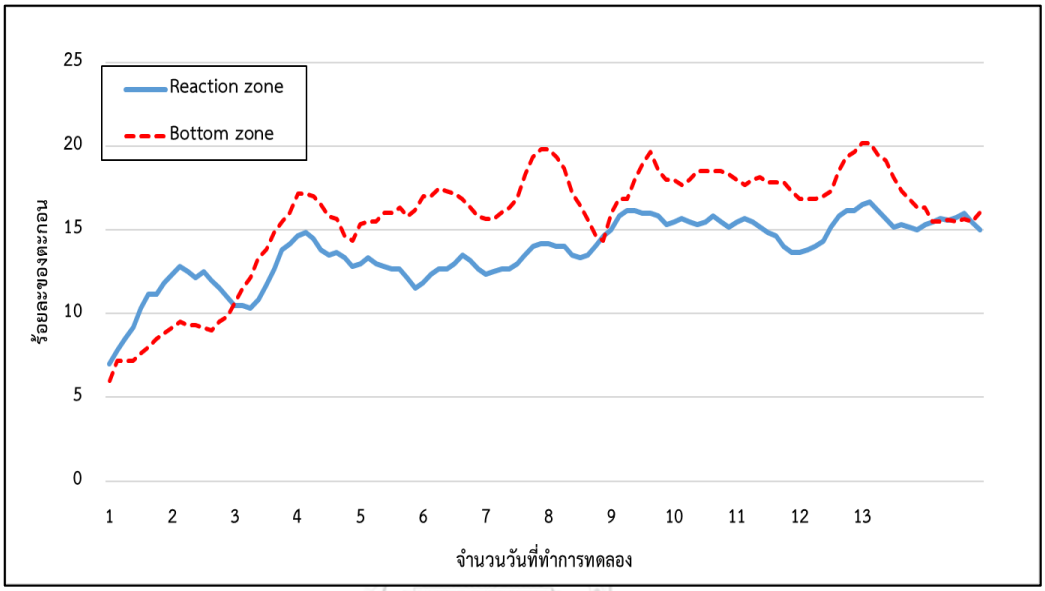
จากการวิเคราะห์ผลของความเร็วของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้า พบว่าความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้ามีผลต่อการสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนโดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันดังต่อไปนี้

CHULALONGKORN UNIVERSITY

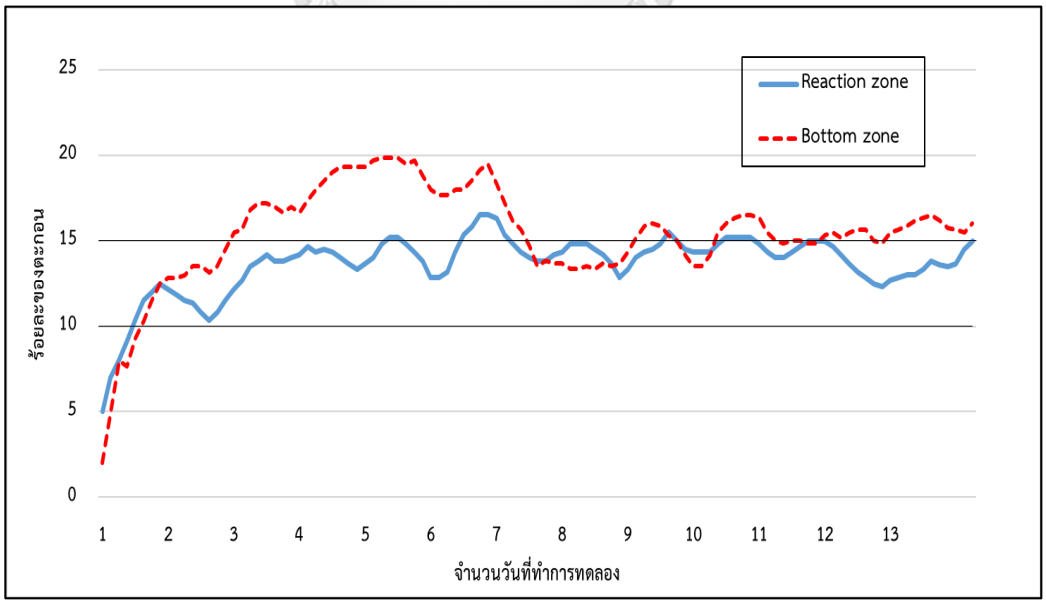
ถังตกตะกอนที่ 1 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 400 รอบต่อนาที ผลจากการทดลองปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับร้อยละ 1 และตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีค่าเท่ากับร้อยละ 1 เช่นเดียวกันตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วรอบของใบพัดในการกวนช้าที่ 400 รอบต่อนาที ไม่เพียงพอที่จะสร้างความปั่นป่วนให้กับอนุภาคมารวมตัวกัน

ถังตกตะกอนที่ 2 และถังตกตะกอนที่ 3 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที ตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่าค่าความเข้มข้นของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 ซึ่งในช่วงแรกของการทดลองปริมาณของตะกอนจะมีค่าร้อยละ 5-10 และมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นและคงที่ในช่วงร้อยละ 10-

15 และตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีค่าเท่ากับร้อยละ 10-15 ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4-19 และภาพที่ 4-20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วของใบพัดในการกวนช้าที่ 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถที่จะรักษาปริมาณตะกอนให้อยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง และรักษาตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนได้



ภาพที่ 4-19 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน



ภาพที่ 4-20 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน

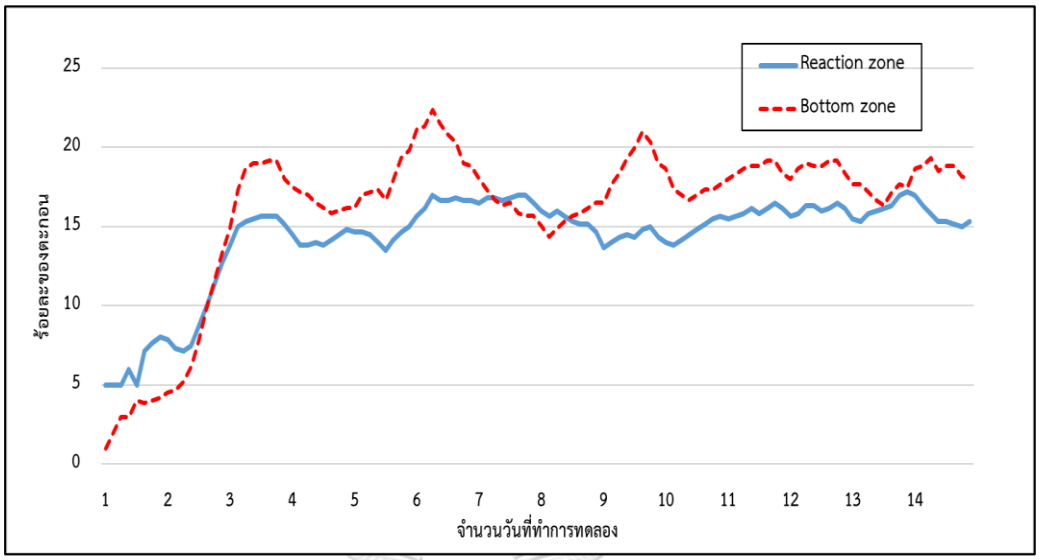
4.2.2.5 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 400 500 และ 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

จากการวิเคราะห์ผลของความเร็วของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้า พบว่าความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้ามีผลต่อการสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนโดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันดังต่อไปนี้

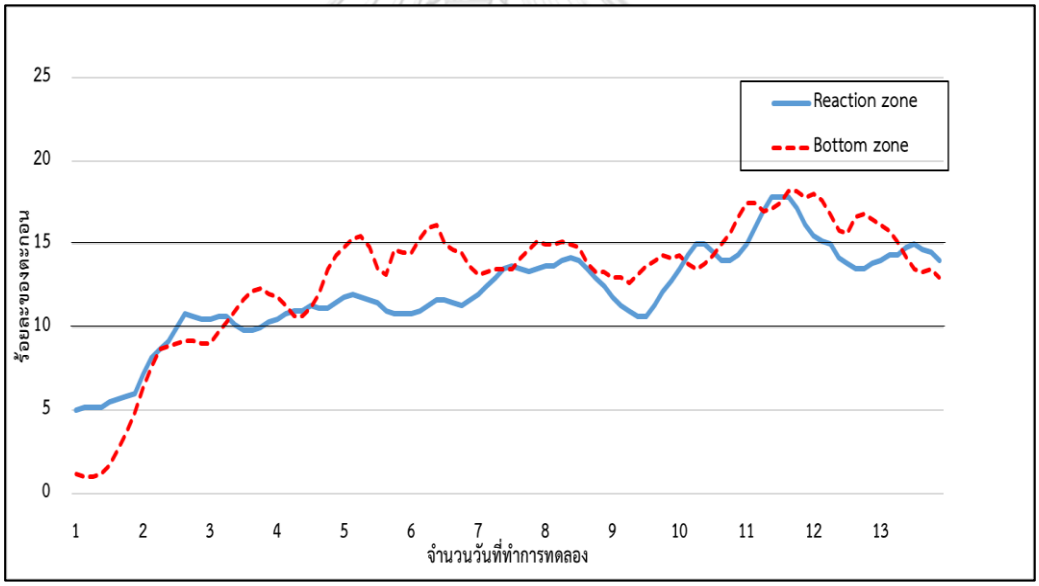
ถังตกตะกอนที่ 1 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 400 รอบต่อนาที ปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับร้อยละ 1 และตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีค่าเท่ากับร้อยละ 1 เช่นเดียวกันตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วรอบของใบพัดในการกวนช้าที่ 400 รอบต่อนาที ไม่เพียงพอที่จะสร้างความปั่นป่วนให้กับอนุภาคมารวมตัวกัน

ถังตกตะกอนที่ 2 และถังตกตะกอนที่ 3 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที ตามลำดับ ผลจากการทดลองพบว่าปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 ซึ่งในช่วงแรกของการทดลองตะกอนจะมีค่าร้อยละ 5-10 และมีตะกอนเพิ่มมากขึ้นและคงที่ในช่วงร้อยละ 10-15 และตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีค่าเท่ากับร้อยละ 10-15 ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4-21 และภาพที่ 4-22 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วของใบพัดในการกวนช้าที่ 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถที่จะรักษาปริมาณตะกอนให้อยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง และรักษาตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4-21 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน



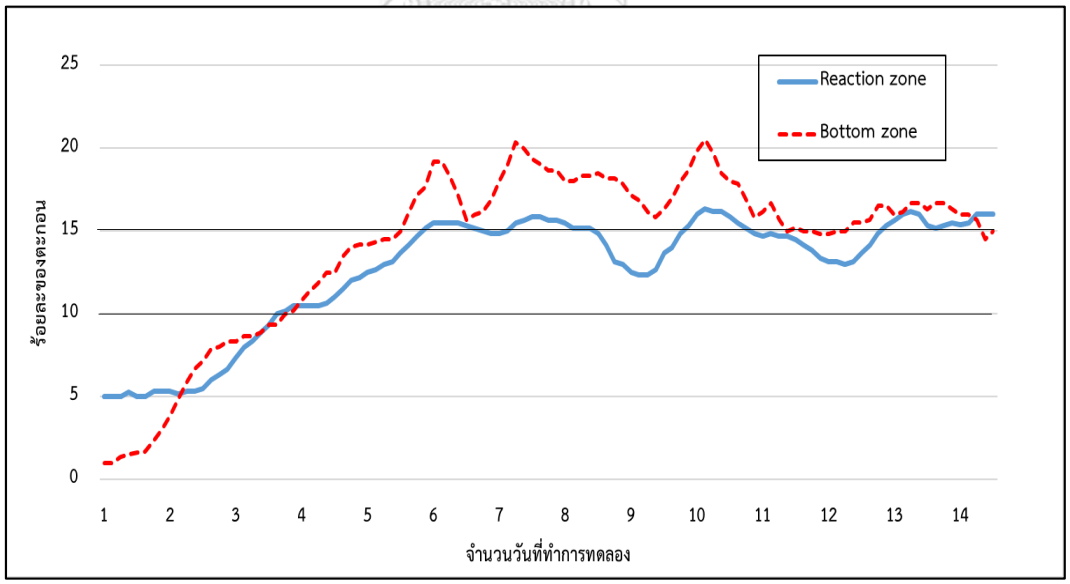
ภาพที่ 4-22 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน

4.2.2.6 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 400 500 และ 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

จากการวิเคราะห์ผลของความเร็วของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้า พบว่าความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้ามีผลต่อการสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนโดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังต่อไปนี้

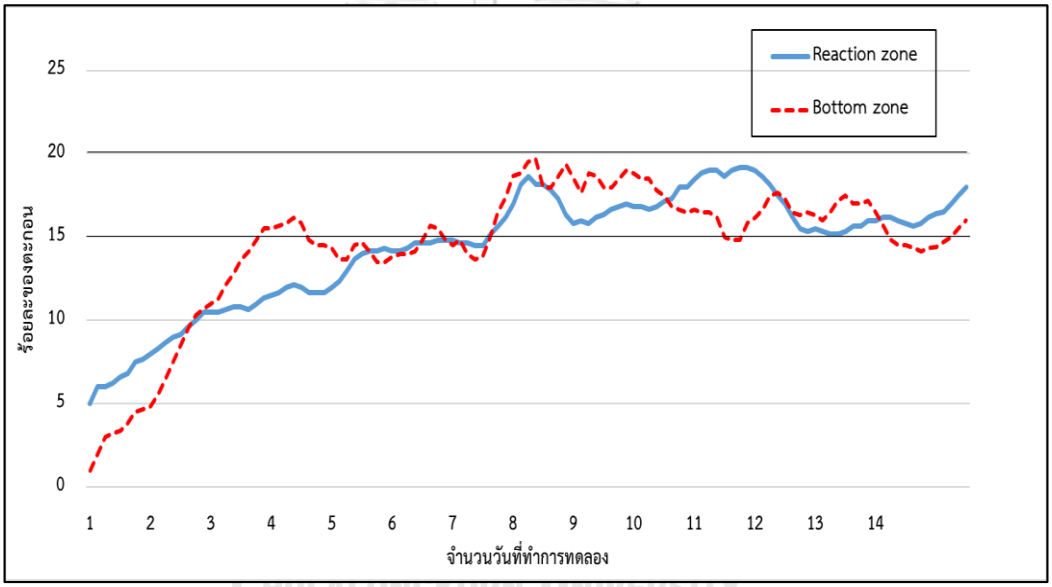
ถังตกตะกอนที่ 1 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 400 รอบต่อนาที ผลจากการทดลองปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับร้อยละ 1 และตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีค่าเท่ากับร้อยละ 1 ตลอดระยะเวลาการทดลอง

ถังตกตะกอนที่ 2 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 500 รอบต่อนาที ปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 ซึ่งในช่วงแรกของการทดลองปริมาณตะกอนจะมีค่าร้อยละ 5-10 โดยมีตะกอนเพิ่มมากขึ้นและคงที่ในช่วงร้อยละ 10-15 และตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีค่าเท่ากับร้อยละ 10-15 ดังแสดงในภาพที่ 4-23



ภาพที่ 4-23 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และอัตราการไหล 210,000 ลบ.ม./วัน

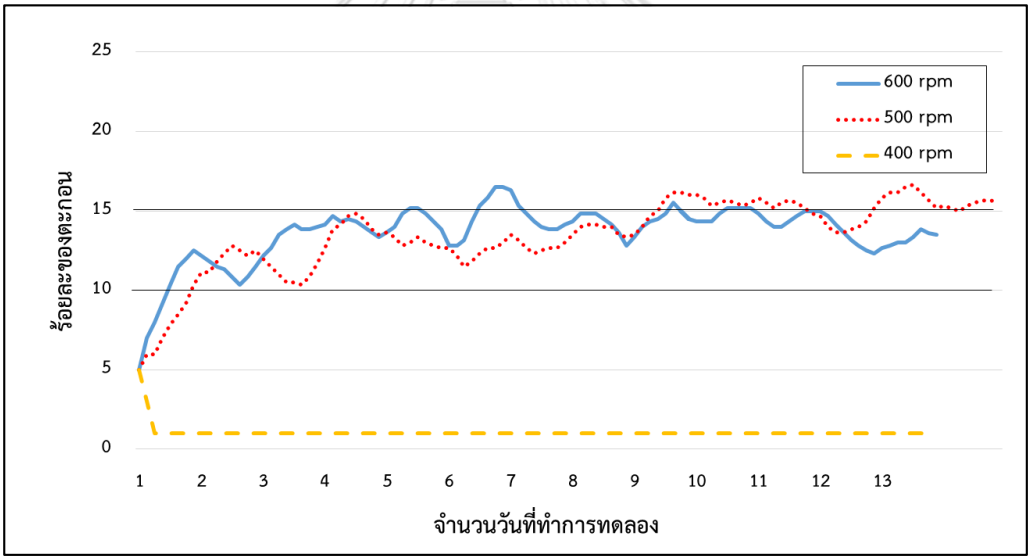
ถังตกตะกอนที่ 3 เมื่อมีการควบคุมความเร็วของใบพัดในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 600 รอบต่อนาที ปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีค่าสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 15-20 ซึ่งตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 จนถึงร้อยละ15 ในช่วงแรกของการทดลอง โดยตะกอนมีการเพิ่มขึ้นและคงที่ในช่วงร้อยละ 15-20 ส่วนตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนมีปริมาณสูงเช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 4-24 เนื่องจากตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยามีมากพอที่จะตกตะกอนและรักษาปริมาณของตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนได้ รวมถึงความเร็วรอบของใบพัดมีเพียงพอที่จะหมุนเวียนตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนให้กลับมาหมุนเวียนในระบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วของใบพัดในการกวนช้าที่ 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถที่จะรักษาปริมาณตะกอนให้อยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง และรักษาตะกอนที่ก้นถังตกตะกอนได้



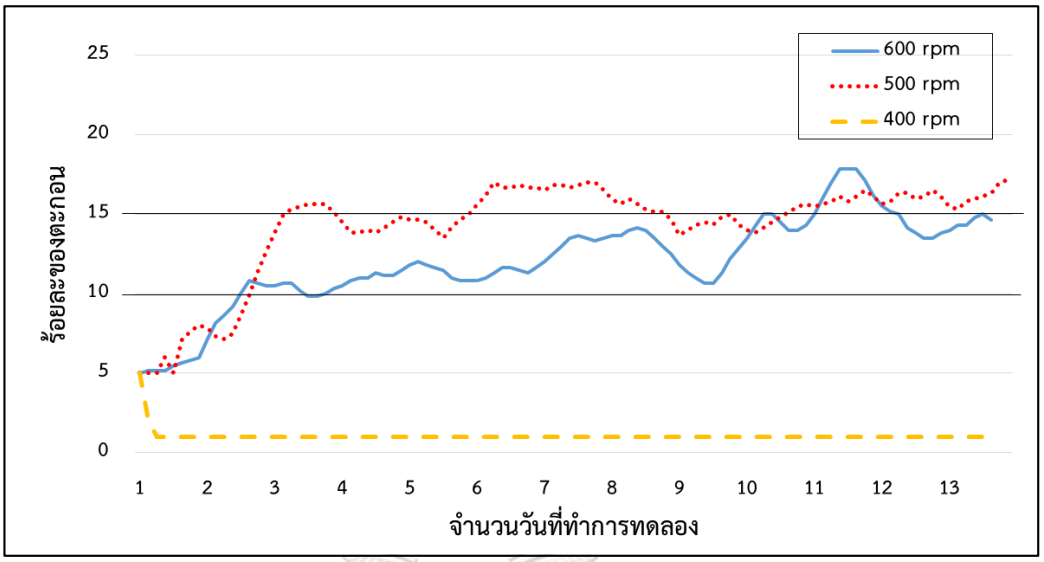
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4-24 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที และอัตราการไหล 210,000 ลบ.ม./วัน

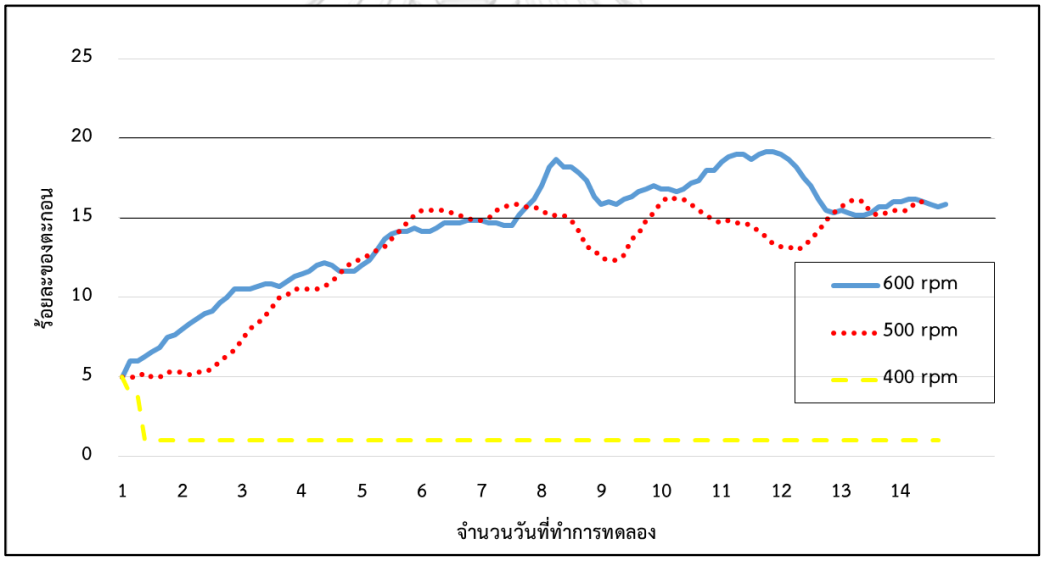
เมื่อนำผลการควบคุมความเร็วใบพัดใบพัดสำหรับการกวนช้าในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ 400 500 และ 600 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน อัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และอัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน พบว่าเมื่อใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ทุกอัตราการไหลของน้ำดิบให้ผลเช่นเดียวกันทั้งหมด โดยที่ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 400 รอบต่อนาทีไม่สามารถสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยา เนื่องจากในช่วงที่ทำการทดลองความขุ่นของน้ำดิบค่อนข้างต่ำทำให้อนุภาคที่จะมาเป็นตัวตั้งต้นในการสร้างกลุ่มตะกอนมีน้อย เมื่อเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสและความปั่นป่วนให้กับอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพมีโอกาสที่สัมผัสกันมากขึ้นและสามารถสร้างกลุ่มตะกอนให้มีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 10-20 และที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 และ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน



ภาพที่ 4-25 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการไหล 160,000 ลบ.ม./วัน



ภาพที่ 4-26 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการไหล 200,000 ลบ.ม./วัน



ภาพที่ 4-27 ร้อยละของตะกอนโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเร็วรอบต่างๆ และอัตราการไหล 210,000 ลบ.ม./วัน

จากผลการวิเคราะห์ผลของความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้าและอัตราการไหลของน้ำดิบในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน สามารถวิเคราะห์ร่วมกันได้ผลว่า ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ ความเร็วรอบของใบพัดสำหรับการกวนช้า และอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอนส่งผลต่อการสร้างตะกอนในถังตกตะกอน โดยพบว่าโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์จะมีปริมาณการใช้ที่น้อยกว่าสารส้มน้ำในการกำจัดความขุ่น และการสร้างตะกอนในถังตะกอนสัมผัสที่ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 400 รอบต่อนาที โดยใช้สารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ไม่สามารถสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอน ที่อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถัง 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ส่วนของการใช้ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถัง 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์สามารถสร้างตะกอนให้อยู่ในช่วงร้อยละ 5-10 และการสร้างตะกอนในถังตะกอนสัมผัสที่ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาทีโดยใช้สารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ด้วยอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถัง 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาให้มีปริมาณร้อยละ 10-15

เนื่องจากในการสร้างตะกอนโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อคคูเลชันนั้นต้องการปัจจัยที่เหมาะสมทั้งจำนวนของอนุภาคที่เข้ามาในระบบเพื่อเป็นอนุภาคตั้งต้นในการสร้างกลุ่มตะกอน ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสม และค่าความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้าที่เหมาะสม กระบวนการกวนช้าโดยใช้ความเร็วของใบพัดที่ต่ำเกินไปทำให้ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยทำให้อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพไม่สามารถที่จะมาสัมผัสและเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มตะกอนได้ เช่นเดียวกันกับในกรณีที่ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 400 รอบต่อนาที ($G=34.89\ s^{-1}$) ซึ่งไม่สามารถสร้างให้เกิดกลุ่มตะกอนได้ในทุกค่าอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดเป็น 500 รอบต่อนาที ($G=46.34\ s^{-1}$) และ 600 รอบต่อนาที ($G=65.78\ s^{-1}$) สามารถสร้างกลุ่มตะกอนให้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจนมีปริมาณที่เหมาะสมในทุกค่าอัตราการไหลของน้ำดิบ โดยค่าอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอนที่เหมาะสมคือ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งเป็นค่าอัตราการไหลตามเกณฑ์การออกแบบของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน และสามารถสร้างกลุ่มตะกอนได้เพียงพอสำหรับการตกตะกอนได้ด้วยค่าความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-5 ร้อยละของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาที่อัตราการไหลและความเร็วรอบมอเตอร์ต่างๆ

สาร โคแอกกูแลนต์	อัตราการไหล (ลบ.ม./วัน)	ความเร็วมอเตอร์ (รอบ/นาที)	ปริมาณตะกอน (ร้อยละ)
สารส้มน้ำ	160,000	400	1
		500	5-10
		600	10-15
	200,000	400	1
		500	10-15
		600	10-15
	210,000	400	1
		500	10-15
		600	10-15
โพลิอะลูมิเนียม คลอไรด์	160,000	400	1
		500	10-15
		600	10-15
	200,000	400	1
		500	10-15
		600	10-15
	210,000	400	1
		500	10-15
		600	15-20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ดังนั้นจากการวิเคราะห์จึงสรุปได้ว่าการสร้างตะกอนในถังตะกอนสัมผัสที่เหมาะสมคือ อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถัง 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาให้มีปริมาณร้อยละ 10-15 ได้ด้วยสารเคมีทั้ง 2 ชนิด ถึงแม้ว่าที่อัตราการไหล 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะสามารถสร้างตะกอนได้ใกล้เคียงกันแต่ก็ยังมีกำลังการผลิตที่น้อยกว่าอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถึงร้อยละ 20 และที่อัตราการไหล 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันที่สามารถสร้างกลุ่มตะกอนให้มีความเข้มข้นได้เช่นเดียวกับที่อัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

แต่เนื่องจากเป็นค่าที่เกินเกณฑ์การออกแบบทำให้ยากต่อการควบคุมอัตราน้ำล้นผิวในถังตกตะกอน ซึ่งจะทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนได้ เมื่อนำค่าความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดที่ 400 500 และ 600 รอบต่อนาที มาคำนวณค่าความเร็วแกรเดียนท์ (Gradient velocity) ดังสรุปในตารางที่ 4-6 และแสดงรายละเอียดการคำนวณที่ภาคผนวก ข-6

ตารางที่ 4-6 ตารางสรุปค่าความเร็วแกรเดียนท์ (Gradient Velocity)

วิธีการ	อัตราการไหล (ลบ.ม./วัน)	ความเร็วมอเตอร์ (รอบ/นาที)	ความเร็วรอบใบพัดจริง (รอบ/นาที)	ความเร็วแกรเดียนท์ (วินาที$^{-1}$)	G•t
ถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน	160,000	400	1.032	34.89	23,490
		500	1.248	46.34	31,200
		600	1.578	65.78	44,394
	200,000	400	1.032	34.89	18,791
		500	1.248	46.34	24,960
		600	1.578	65.78	35,435
	210,000	400	1.032	34.89	17,897
		500	1.248	46.34	23,772
		600	1.578	65.78	33,748

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ความเร็วแกรเดียนท์ (Gradient velocity) เป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์ในการสร้างตะกอนสำหรับการกวนช้าในถังตกตะกอน โดยความเร็วแกรเดียนท์แสดงถึงความปั่นป่วนของน้ำ โดยน้ำในกระบวนการกวนช้าที่ต้องการความปั่นป่วนในระดับที่ต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้กลุ่มตะกอนที่รวมตัวกันเกิดการแตกแยกออกจากกัน เนื่องจากการกวนช้ามีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างอนุภาคและรวมตัวกันเป็นกลุ่มตะกอนที่มีขนาดใหญ่เพียงพอเพื่อตกตะกอน ในกระบวนการกวนช้าเกณฑ์การออกแบบค่าความเร็วแกรเดียนท์มีค่าอยู่ระหว่าง 20-80 วินาที$^{-1}$ โดยค่าที่นิยมใช้ค่าความเร็วแกรเดียนท์มีค่า 35-75 วินาที$^{-1}$ (Degremont, 2007) และเวลาที่ใช้ในกระบวนการกวนช้าเพื่อสร้างตะกอนมีความสำคัญเช่นกันและในทางทฤษฎีเมื่อค่าความเร็วแกรเดียนท์สูงเวลาที่ใช้ในการสร้างตะกอนจะลดลง

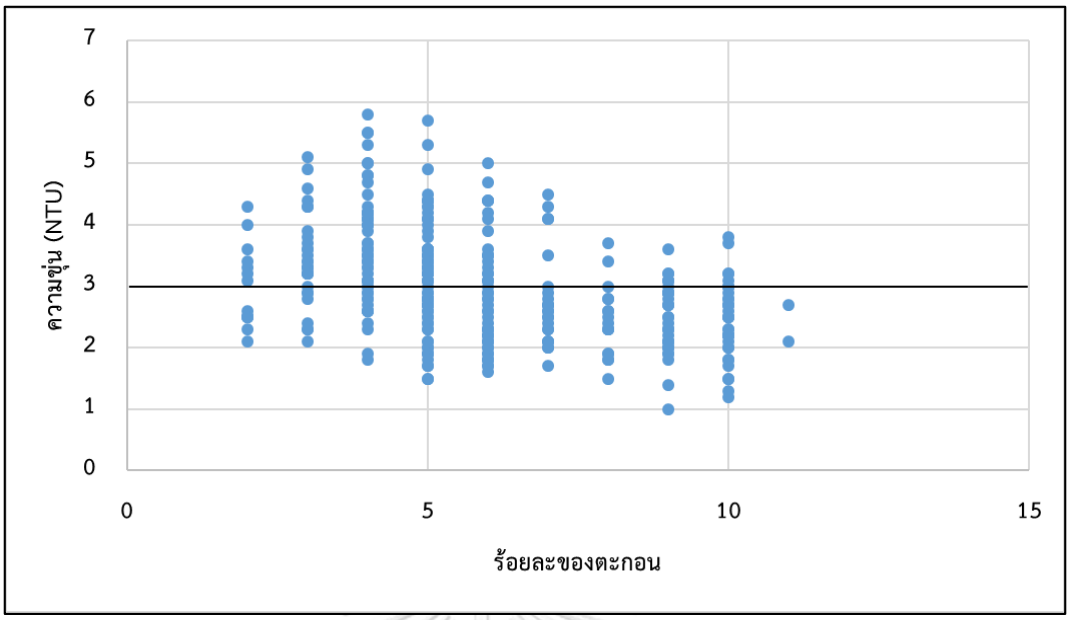
จากตารางที่ 4-6 ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าที่ค่าความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 400 500 และ 600 รอบต่อนาที ค่าความเร็วแกรเดียนท์มีค่าเท่ากับ 34.89 46.34 และ 65.78 วินาที$^{-1}$ ตามลำดับ ค่าความเร็วแกรเดียนท์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการสร้างตะกอนเพิ่มมากขึ้นด้วย จะเห็นได้ผลการทดลองที่ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 400 รอบต่อนาที มีค่าความเร็วแกรเดียนท์ 34.89 วินาที$^{-1}$ ไม่สามารถสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนได้เนื่องจากค่าค่อนข้างต่ำ และที่ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 และ 600 รอบต่อนาที มีค่าความเร็วแกรเดียนท์ 46.34 และ 65.78 วินาที$^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าความเร็วแกรเดียนท์นี้มีค่าอยู่ในเกณฑ์การออกแบบที่เหมาะสมและการควบคุมระบบการกวนช้า (G = 35-75 s^{-1}) สามารถสร้างตะกอนได้มากเพียงพอ เนื่องจากค่าความเร็วแกรเดียนท์ที่เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพมีโอกาสที่มาสัมผัสหรือมีจำนวนครั้งในการชนกันระหว่างอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วได้มากขึ้น

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของตะกอนในถังตกตะกอน

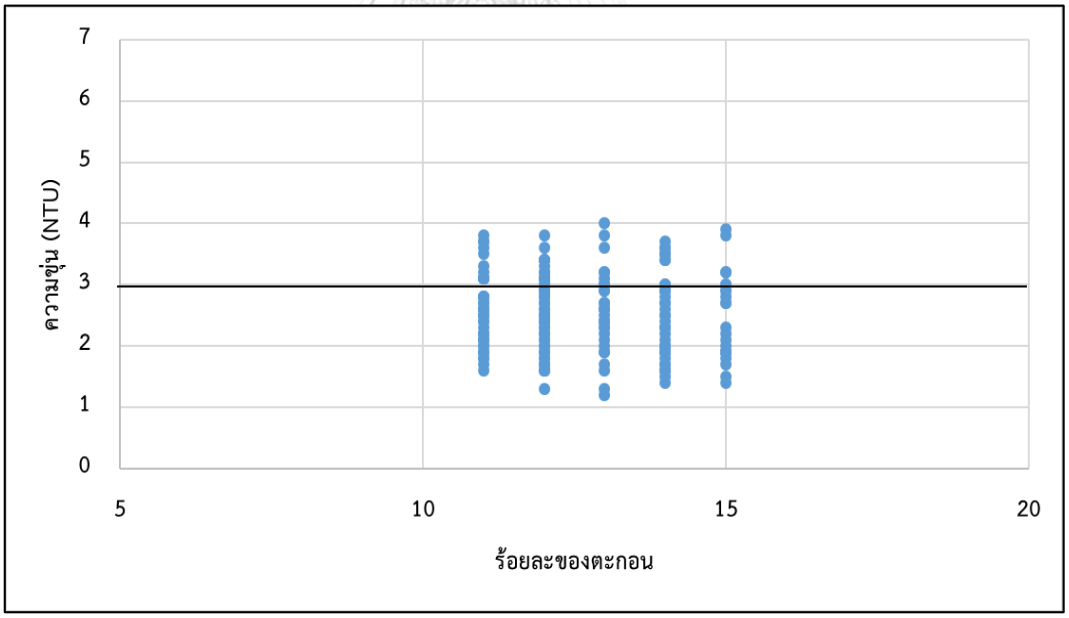
การวิเคราะห์ผลของปริมาณร้อยละของตะกอนในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน ที่ส่งผลต่อการกำจัดความขุ่นในถังตกตะกอน โดยการทดลองควบคุมตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 5-10 ร้อยละ 10-15 และร้อยละ 15-20 ควบคุมอัตราการไหลของน้ำดิบที่ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดที่ 500 รอบต่อนาที มีค่าความขุ่นของน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบอยู่ในช่วงความขุ่น 15-25 เอ็นทียู ตามสภาพการใช้งานจริงในช่วงเวลาที่ทำการทดลอง โดยใช้สารส้มน้ำความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นสารโคแอกกูแลนต์จากการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้อย่างละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.3.1 ผลปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอนโดยใช้สารส้มน้ำ

จากการวิเคราะห์ผลของปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอน โดยควบคุมตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 1-10 และร้อยละ 10-15 โดยใช้สารส้มน้ำความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นสารโคแอกกูแลนต์ พบว่าปริมาณของตะกอนร้อยละ 1-10 สามารถกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบทำให้น้ำใสออกจากถังตกตะกอนมีความขุ่นคงเหลือ 1-6 เอ็นทียู ดังแสดงในภาพที่ 4-28 เมื่อควบคุมปริมาณตะกอนให้มีค่าร้อยละ 10-15 สามารถกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบทำให้น้ำใสออกจากถังตกตะกอนมีความขุ่นคงเหลือ 1-4 เอ็นทียู ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4-29



ภาพที่ 4-28 ความขุ่นคงเหลือของน้ำใสออกจากถังตกตะกอนที่ตะกอนร้อยละ 1-10 โดยใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์

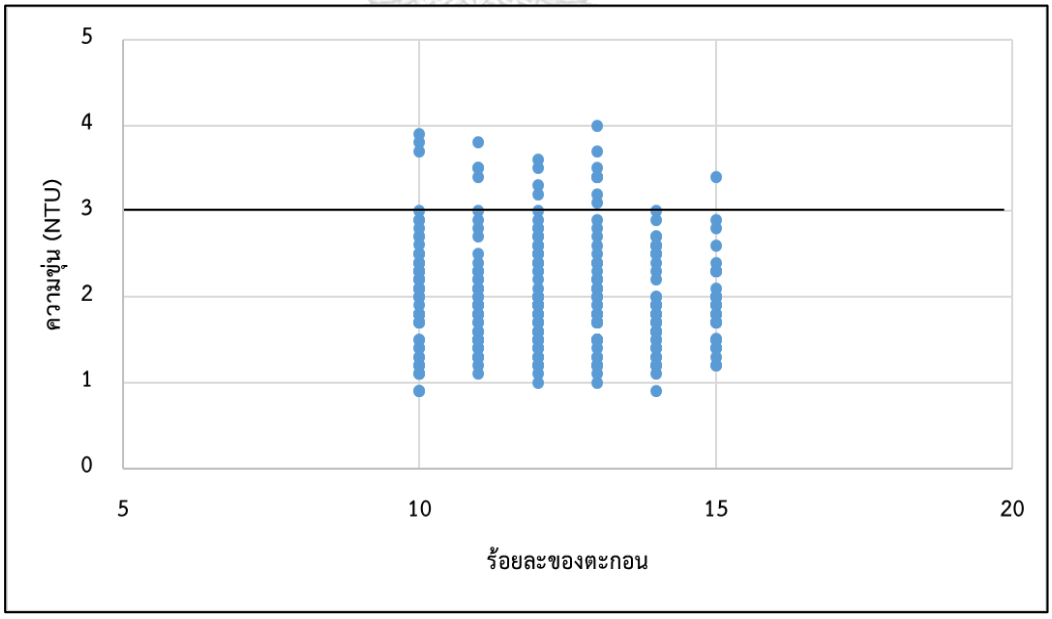


ภาพที่ 4-29 ความขุ่นคงเหลือของน้ำใสออกจากถังตกตะกอนที่ตะกอนร้อยละ 10-15 โดยใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์

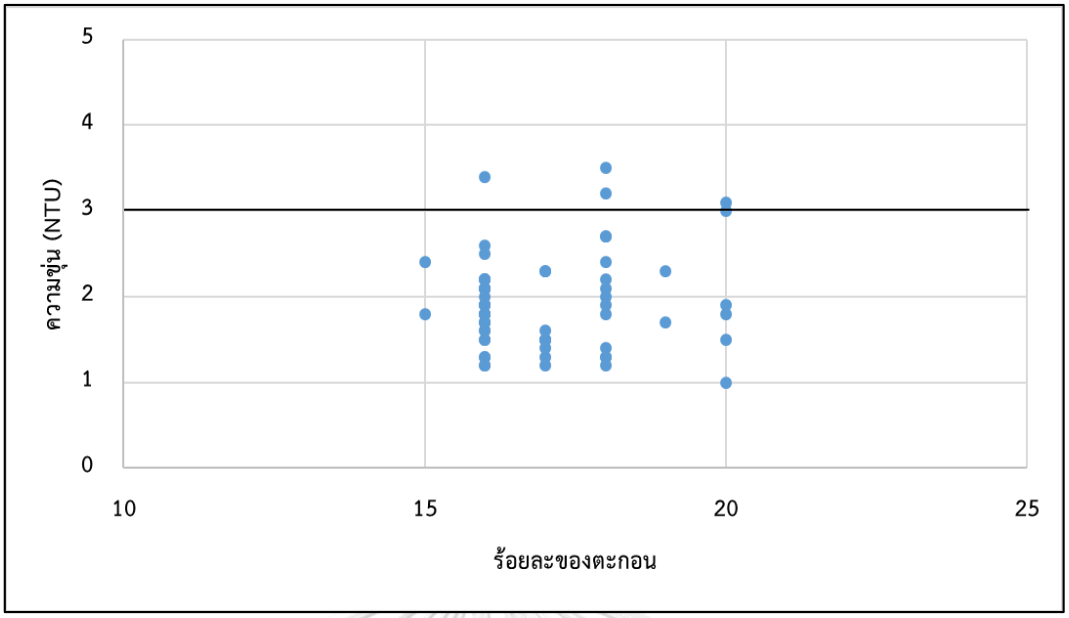
จากการวิเคราะห์จึงได้ผลของปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอนโดยใช้สารส้มน้ำที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากการทดลองนี้คือร้อยละ 10-15 ที่สามารถกำจัดความขุ่นออกจากน้ำ ทำให้มีความขุ่นของน้ำใสคงเหลือได้ต่ำกว่า 4 เอ็นทียู ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นดีกว่าปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ร้อยละ 1-10 ที่สามารถทำให้มีความขุ่นของน้ำใสคงเหลือได้ต่ำกว่า 6 เอ็นทียู ซึ่งการที่สามารถควบคุมความขุ่นของน้ำใสให้ต่ำกว่า 3 เอ็นทียูเป็นส่วนใหญ่จะส่งผลให้ความขุ่นของน้ำประปามีค่าต่ำกว่า 0.5 เอ็นทียู

4.2.2.2 ผลปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอนโดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

จากการวิเคราะห์ผลของปริมาณของตะกอนในถังตกตะกอน โดยควบคุมปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 10-15 และร้อยละ 15-20 และใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นสารโคแอกกูแลนต์ พบว่าปริมาณของตะกอนร้อยละ 10-15 สามารถควบคุมความขุ่นน้ำใสออกจากถังตกตะกอนให้มีความขุ่นคงเหลือ 1-4 เอ็นทียู และเมื่อควบคุมปริมาณของตะกอนให้มีค่าร้อยละ 15-20 สามารถควบคุมความขุ่นน้ำใสออกจากถังตกตะกอนให้มีความขุ่นคงเหลือ 1-4 เอ็นทียู



ภาพที่ 4-30 ความขุ่นคงเหลือของน้ำใสออกจากถังตกตะกอนที่ตะกอนร้อยละ 10-15 โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์



ภาพที่ 4-31 ความขุ่นคงเหลือของน้ำใสออกจากถังตกตะกอนที่ตะกอนร้อยละ 15-20 โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในถังตกตะกอน โดยปริมาณของตะกอนที่ใช้สารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการควบคุมถังตกตะกอนคือ ปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาร้อยละ 10-15 เนื่องจากปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาคือตะกอนที่จะเป็นเป้าสัมผัสให้ระหว่างอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพและทำให้เกิดการสร้างกลุ่มตะกอนให้มีขนาดใหญ่เพียงพอต่อการตกตะกอน และปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยายังมีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนที่จะหมุนเวียนกลับเข้าไปในระบบของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนโดยเมื่อตะกอนที่เกิดการรวมตัวมีขนาดใหญ่และน้ำหนักเพียงพอที่ตกลงสู่ด้านล่างของถังตะกอน ซึ่งส่วนหนึ่งของตะกอนที่ด้านล่างถังตกตะกอนจะถูกดึงกลับเข้ามาหมุนเวียนในกลไกฟล็อคคูเลชันโดยอาศัยแรงดึงจากใบพัดและการเคลื่อนที่ของน้ำในถังตกตะกอน (Liu และคณะ, 2019) ตะกอนอีกส่วนหนึ่งซึ่งเป็นตะกอนส่วนเกินมีการระบายออกจากถังตกตะกอนผ่านทางท่อระบายตะกอน เนื่องจากการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนมีตะกอนใหม่ที่เกิดขึ้นจากการกำจัดความขุ่นอยู่ตลอดเวลา เพราะฉะนั้นนอกจากการที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำดิบที่เหมาะสม ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดสำหรับการกวนช้า เพื่อรักษาอัตราการสร้างและหมุนเวียนตะกอน จำเป็นต้องมีการควบคุมและรักษาปริมาณของตะกอนภายในถังตกตะกอนให้คงที่และสม่ำเสมอภายในระบบโดยการควบคุมอัตราการระบายตะกอนที่ด้านล่างถังตกตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.4 ผลการวิเคราะห์การดำเนินงานควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

การวิเคราะห์การดำเนินงานควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน เนื่องจากกระบวนการตกตะกอนเพื่อกำจัดความขุ่นอาศัยกลไกของกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟล็อคคูเลชันในการกำจัดความขุ่น ซึ่งจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสม ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์ ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดสำหรับการกวนช้า อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน และปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอน จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.2.1-4.2.3 ดังแสดงในตารางที่ 4-7

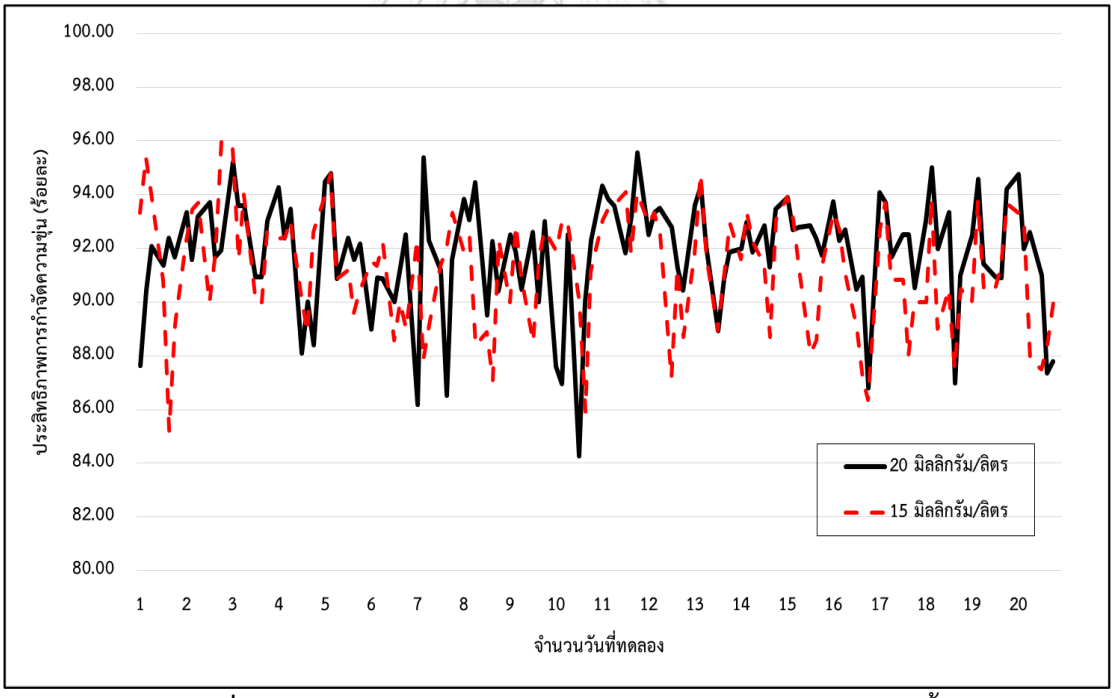
ตารางที่ 4-7 ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์การดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน

ปัจจัยในการควบคุมถังตกตะกอน	ค่าที่ใช้ในการควบคุม
1. ชนิดและความเข้มข้นของสารเคมี	
1.1 สารส้มน้ำ	15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
1.2 โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	6 และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด	500 รอบต่อนาที
3. อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน	200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
4. ความเข้มข้นของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยา	ร้อยละ 10-15

ในการทดลองนี้วิเคราะห์การดำเนินงานควบคุมถังตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยจะนำค่าปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดสำหรับการกวนช้า 500 รอบต่อนาที อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันและปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาร้อยละ 10-15 มาใช้ร่วมกันในการควบคุมถังตกตะกอน ในช่วงความขุ่นของน้ำดิบที่เข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำของโรงงานผลิตน้ำบางเขน (15-30 เอ็นทียู) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตกตะกอนระหว่างการใช้สารโคแอกกูแลนต์ 2 ชนิด คือ สารส้มน้ำที่ความเข้มข้น 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 6 และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร

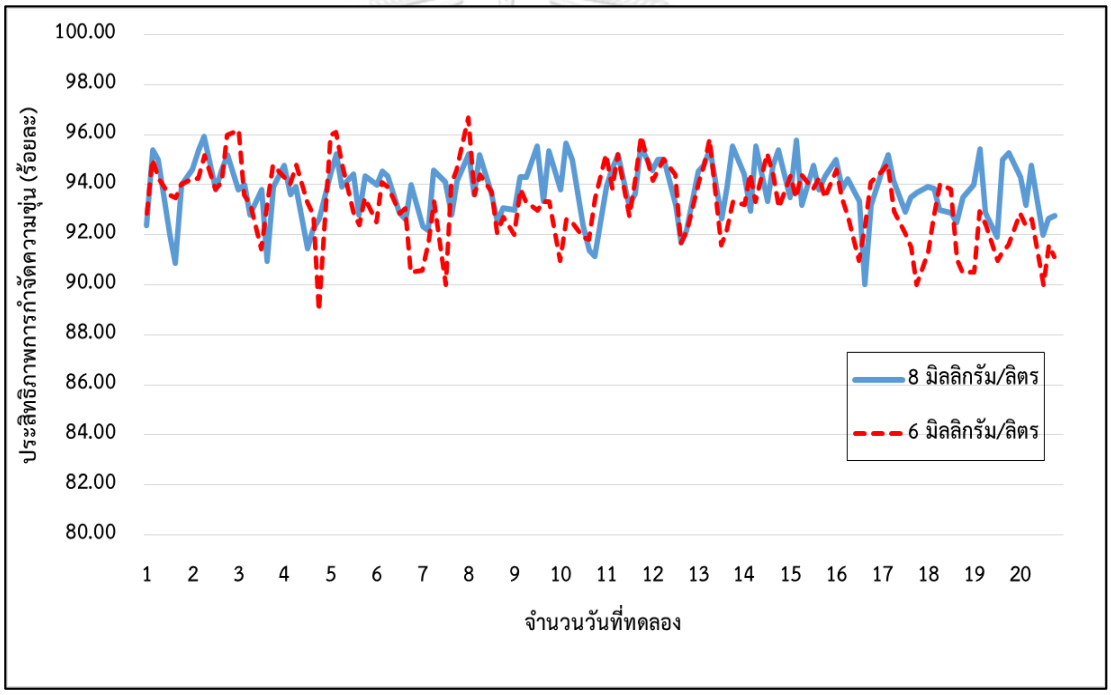
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการวิเคราะห์พบว่าการควบคุมถังตกตะกอนแบบหมุนเวียนตะกอนโดยการใช้สารส้มน้ำที่ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอยู่ในช่วงร้อยละ 85.22-95.56 โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 91.22 และสารส้มน้ำที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอยู่ในช่วงร้อยละ 84.28-96.00 โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 91.25 ซึ่งจะพบว่าการใช้สารส้มน้ำที่ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำที่ใกล้เคียงและคุณภาพของน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอนยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดของโรงงานผลิตน้ำบางเขน โดยการลดความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ลงแต่หากมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมถังตกตะกอนให้เหมาะสมก็สามารถที่จะควบคุมคุณภาพของน้ำออกจากถังตกตะกอนให้มีคุณภาพตามที่ต้องการได้และเมื่อนำมาคิดเป็นราคาต้นทุนในกระบวนการผลิตน้ำประปาเมื่อลดความเข้มข้นของสารส้มน้ำที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถประเมินศักยภาพค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้ด้านต้นทุนเฉพาะค่าสารเคมีของสารส้มน้ำที่ใช้เป็นเงิน 101,860 บาทต่อวัน ดังแสดงในตารางที่ 4-8



ภาพที่ 4-32 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของสารส้มน้ำที่ความเข้มข้น 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ส่วนการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 6 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอยู่ในช่วงร้อยละ 88.94–95.92 โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 93.23 และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นอยู่ในช่วงร้อยละ 89.50-95.92 โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 93.72 ซึ่งการลดความเข้มข้นของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์และควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมถังตกตะกอน ก็สามารถที่จะควบคุมคุณภาพน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอนให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้เช่นเดียวกัน และเมื่อนำมาคิดเป็นราคาต้นทุนในกระบวนการผลิตน้ำประปาเมื่อลดความเข้มข้นของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือเท่ากับ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถประเมินศักยภาพค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้ด้านต้นทุนเฉพาะค่าสารเคมีของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้เป็นเงิน 105,097 บาทต่อวัน ดังแสดงในตารางที่ 4-8



ภาพที่ 4-33 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 6 และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4-8 ศักยภาพค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้จากการลดความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนต์

สารโคแอกกูแลนต์	ราคา (บาท/ตัน)	ความเข้มข้นที่ใช้ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าใช้จ่าย (บาท/ลบ.ม.)	ค่าสารเคมีที่ลดได้ (บาท/วัน)
สารส้มน้ำ	2,315	20	0.093	101,860
		15	0.069	
โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	4,180	8	0.096	105,097
		6	0.072	

เนื่องจากการกำจัดความขุ่นด้วยโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงกว่าสารส้มน้ำเล็กน้อย สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ เนื่องจากกลไกหลักของการตกตะกอนด้วยโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เกิดจากกลไกการดูดติวผิวของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งเป็นการทำลายเสถียรภาพและทำให้อนุภาคคอลลอยด์สามารถรวมกันเกิดเป็นฟล็อคที่มีขนาดใหญ่จนสามารถตกตะกอน ในขณะที่กลไกหลักของการตกตะกอนด้วยสารส้มน้ำจะใช้การห่อหุ้มอนุภาคไว้ด้วยผลึกอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ซึ่งมีลักษณะเป็นปุย (Luttrell, 2015) การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นจากการเติมสารส้มที่มากเกินพอทำให้ผลึกอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และสามารถสัมผัสกับอนุภาคคอลลอยด์ได้เพิ่มมากขึ้นเป็นฟล็อคที่มีขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ เพราะฉะนั้นกลไกการดูดติดผิวจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ากลไกการห่อหุ้มอนุภาคไว้ในช่วงที่น้ำดิบมีความขุ่นต่ำเนื่องจากปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบมีน้อย

ดังนั้นการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนด้วยปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสม ตั้งแต่การควบคุมอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าสู่ถังตกตะกอนเข้าไปผสมกับสารโคแอกกูแลนต์ในท่อน้ำดิบเพื่อให้เกิดการกวนเร็วในเส้นท่อ และเมื่อน้ำดิบเข้าสู่บริเวณทำปฏิกิริยากลางถังตกตะกอนต้องมีการควบคุมความเร็วรอบของใบพัดในการกวนช้าและปริมาณตะกอนที่เหมาะสมเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มขนาดใหญ่จนสามารถตกตะกอน ซึ่งปัจจัยการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนได้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เมื่อนำค่าที่เหมาะสมมาใช้ในการควบคุมถังตกตะกอนโดยมีการเปรียบเทียบการลดปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์ของสารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ทำให้สามารถลดการใช้สารโคแอกกูแลนต์ อีกทั้งยังสามารถควบคุมคุณภาพน้ำใสที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนให้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์คุณภาพที่ต้องการได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment)

งานวิจัยนี้ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน โดยมีขอบเขตของการศึกษาครอบคลุมในส่วนของกระบวนการผลิตน้ำประปาตั้งแต่กระบวนการสูบน้ำดิบ การจ่ายสารเคมี การตกตะกอน การกรอง การเก็บน้ำใส กระบวนการสูบส่งน้ำประปาและสูบจ่ายน้ำประปา สำหรับขั้นตอนการขนส่ง การใช้ซ้ำ การนำไปใช้ใหม่ การซ่อมแซมบำรุงรักษาเครื่องจักร จะไม่มีการนำมาพิจารณา

4.3.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and scope definition)

การประเมินวัฏจักรชีวิตของงานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อจัดทำฐานข้อมูลบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ซึ่งคือน้ำประปาของการประปานครหลวง ขอบเขตของระบบในงานวิจัยนี้จะต้องทำการศึกษากระบวนการผลิตน้ำประปา กระบวนการสูบส่งน้ำประปาและสูบจ่ายน้ำประปา สำหรับขั้นตอนการขนส่ง การใช้ซ้ำ การนำไปใช้ใหม่ การซ่อมแซมบำรุงรักษา ไม่มีการนำมาพิจารณา

หน่วยหน้าที่การศึกษา (Functional unit) กำหนดเพื่อใช้เป็นพื้นฐานสำหรับกำหนดการวัดหรือเก็บข้อมูลของสารขาเข้าและสารขาออกจากระบบ โดยในงานวิจัยนี้หน่วยหน้าที่การศึกษา คือ การผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร

4.3.2 การจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Inventory analysis)

การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขต การรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยนี้ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิ โดยข้อมูลสารขาเข้า เช่น วัตถุดิบ ทรัพยากร พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต เป็นต้น และข้อมูลขาออก เช่น การปล่อยของเสียสู่อากาศ น้ำ เป็นต้น โดยการรวบรวมข้อมูลจะพิจารณาถึงคุณภาพของข้อมูลที่ใช้ในการประเมินและการได้มาซึ่งข้อมูลโดยมีการเก็บรวมรวมข้อมูลจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3.2.1 ข้อมูลวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตและจ่ายน้ำประปา

กระบวนการนี้เป็นขั้นตอนการสูบน้ำดิบจากคลองประปาเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปา โดยมีการเติมสารเคมีเพื่อบำบัดและปรับปรุงคุณภาพน้ำ เช่น สารส้มน้ำ โพลิอิเล็กโทรไลต์ คลอรีน เป็นต้น สำหรับขั้นตอนนี้ประกอบด้วยข้อมูลปริมาณสารขาเข้า และปริมาณสารขาออกดังแสดงในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ตัวอย่างข้อมูลสารขาเข้า พลังงาน และสารขาออกจากกระบวนการผลิตน้ำประปา ปี พ.ศ. 2561

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
<u>สารขาเข้า</u>		
พลังงานไฟฟ้า	15,626667.80	กิโลวัตต์-ชั่วโมง
สารส้มน้ำ	4,673.23	ตัน
คลอรีน	477.29	ตัน
น้ำล้างบ่อกรอง	1,055,110	ลูกบาศก์เมตร
<u>สารขาออก</u>		
น้ำประปา	116,618,802.00	ลูกบาศก์เมตร

เนื่องจากมีการกำหนดหน่วยหน้าที่การศึกษา (Functional unit)) กำหนดเพื่อใช้เป็นพื้นฐานสำหรับกำหนดการวัดหรือเก็บข้อมูลของสารขาเข้าและสารขาออกจากระบบ โดยในงานวิจัยนี้หน่วยหน้าที่การศึกษา คือ การผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร จึงมีการคำนวณปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกเทียบในปริมาณต่อหน่วยการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในตารางที่ 4-10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-10 ตัวอย่างข้อมูลสารขาเข้า พลังงาน และสารขาออกจากกระบวนการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร ปี พ.ศ. 2561

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
<u>สารขาเข้า</u>		
พลังงานไฟฟ้า	0.136	กิโลวัตต์-ชั่วโมง
สารส้มน้ำ	0.041	กิโลกรัม
คลอรีน	0.004	กิโลกรัม
น้ำล้างบ่อกรอง	0.009	ลูกบาศก์เมตร
<u>สารขาออก</u>		
น้ำประปา	1.000	ลูกบาศก์เมตร

4.3.2.2 ข้อมูลสารโคแอกกูแลนต์และพลังงานไฟฟ้าจากการวิเคราะห์การควบคุมถังตกตะกอน

จากการวิเคราะห์ผลการควบคุมถังตกตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน และคัดเลือกแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาจากการควบคุมถังตกตะกอนที่เหมาะสมที่อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 รอบต่อนาที และควบคุมปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาที่ร้อยละ 10-15 พบว่าสามารถลดปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์ในกระบวนการตกตะกอนได้โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ใกล้เคียงกันทั้งสารส้มน้ำที่ความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 6 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมถึงการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดสำหรับการกวนช้าเหมาะสมซึ่งทำให้สามารถที่จะลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4- 11 ข้อมูลสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ที่ความเข้มข้นต่างๆ

สารโคแอกกูแลนต์	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาณสารเคมีต่อการผลิตน้ำประปา (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
สารส้มน้ำ	15	0.030
	20	0.040
โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	6	0.017
	8	0.023

ตารางที่ 4-12 ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ใบพัดต่างๆ

ความเร็วรอบมอเตอร์ (รอบ/นาที)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมใบพัด (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมใบพัด (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร)
500	300.12	0.0015
600	375.15	0.0019

จากการรวบรวมข้อมูลปริมาณสารขาเข้า สารขาออก และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร โดยนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบผลกระทบที่ลดลงจากการใช้สารโคแอกกูแลนต์และการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนของการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3.3 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Impact Assessment)

ในงานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยตามหลักการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ที่กำหนดในมาตรฐาน ISO 14040 (Pfister และคณะ, 2017) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตรของแต่ละขั้นตอนในกระบวนการผลิตและจ่ายน้ำ จะถูกนำมาจัดกลุ่มและคัดเลือกตัวชี้วัดของกลุ่ม จากนั้นนำผลที่ได้มาคำนวณเพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro V.8.4 และโปรแกรม Microsoft excel โดยใช้วิธีการประเมินแบบ ReCiPe Midpoint (H)

สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นให้ความสำคัญกับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่ ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (Global warming potential) ผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรด (Acidification) ผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำ (Water depletion) และผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิง (Fossil depletion)

ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน เกิดจากการใช้พลังงานในกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์โดยเฉพาะกระบวนการเผาไหม้ในการผลิตทางอุตสาหกรรม ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ภูมิอากาศของโลกเปลี่ยนแปลงไปโดยทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น (Lamnatou และคณะ, 2019) โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อโลกมีอุณหภูมิสูงและร้อนขึ้นส่งผลให้น้ำแข็งละลายเป็นจำนวนมหาศาลและไหลลงทะเล ระดับทะเลจึงสูงขึ้นและอาจทำให้พื้นที่ต่างๆ ของโลกเกิดน้ำท่วมได้ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลและความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ

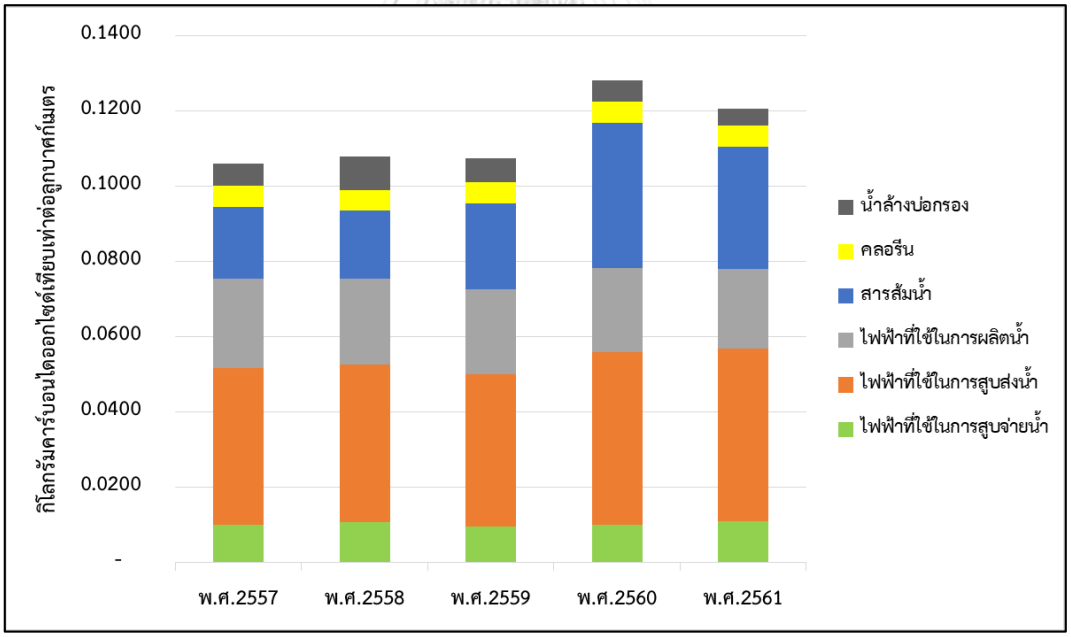
ผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรด เกิดจากการปล่อยก๊าซพิษและสารที่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์และไนโตรเจนซึ่งอาจเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ส่งผลให้สารประกอบเหล่านี้เมื่อถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมและทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นกรดในสิ่งแวดล้อม สารพิษต่างๆ เมื่ออยู่ในน้ำฝนจะกลายเป็นฝนกรด และเมื่อน้ำซึมลงสู่พื้นดินสารพิษก็จะเข้าไปทำลายแร่ธาตุสารอาหารที่มีประโยชน์ในดินส่งผลให้ต้นไม้หรือพืชมีการเจริญเติบโตที่ช้าลง (Valente, Iribarren, และ Dufour, 2018)

ผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำและผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิง เกิดจากการใช้ทรัพยากร เกิดจากการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่มาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยขาดการบริหารจัดหารและการใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดการลดลงของทรัพยากรและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3.3.1 ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน

ผลการประเมินผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาในปี พ.ศ.2557 ถึงปี พ.ศ. 2561 ดังแสดงในภาพที่ 4-34 จากผลประเมินพบว่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนในปี พ.ศ. 2561 มาจากการใช้ไฟฟ้าในขั้นตอนการสูบส่งน้ำประปาเท่ากับ 4.58×10^{-2} กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 38) การใช้ไฟฟ้าในขั้นตอนการผลิตน้ำประปาเท่ากับ 2.13×10^{-2} กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์ (ร้อยละ 17) การใช้ไฟฟ้าในขั้นตอนการสูบจ่ายน้ำเท่ากับ 1.09×10^{-2} กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 9) การใช้สารส้มน้ำในกระบวนการผลิตเท่ากับ 3.23×10^{-2} กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 27) การใช้คลอรีนในกระบวนการผลิตเท่ากับ 5.70×10^{-3} กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 5) และการใช้น้ำในการล้างบ่อกรองเท่ากับ 4.50×10^{-3} กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 4) โดยผลรวมของผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนจากการผลิตและจ่ายน้ำประปาเท่ากับ 0.121 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร

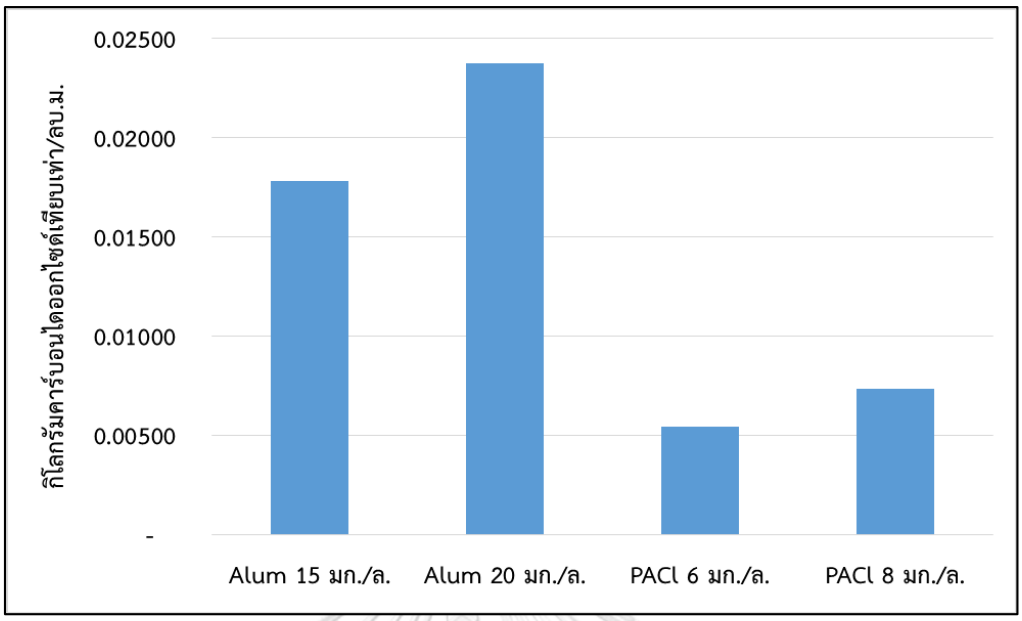


ภาพที่ 4-34 ปริมาณผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร

เมื่อพิจารณาในกระบวนการผลิตและจ่ายน้ำประปาจะพบว่าขั้นตอนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งในการผลิตและจ่ายน้ำประปา มีการสร้างผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนมากที่สุดรวมเท่ากับ 7.80×10^{-2} กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 64 ของกระบวนการรวมทั้งหมด) โดยมาจากไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบส่งน้ำประปามากที่สุด รองลงมาคือไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนกระบวนการผลิต และไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบจ่ายน้ำประปา ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการผลิตและสูบส่งสูบจ่ายน้ำประปามีการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณมากซึ่งมาจากการใช้เครื่องสูบน้ำที่มีขนาดใหญ่ตั้งแต่การสูบน้ำดิบเข้าระบบผลิตน้ำประปา และการสูบน้ำประปาไปยังบ้านเรือนผู้ใช้น้ำ โดยในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่เกิดจากการเผาผลาญเชื้อเพลิงกระบวนการเหล่านี้ได้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจกจำนวนมาก และส่วนที่เหลือมาจากการใช้สารส้มน้ำ การใช้คลอรีนในกระบวนการผลิต และการใช้น้ำในการล้างบ่อกรอง โดยตลอดปี พ.ศ. 2561 มีการผลิตและจ่ายน้ำประปาเท่ากับ 1,374,209,930 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งนำมาคำนวณกับค่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร (0.121 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร) พบว่ามีค่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนผลิตน้ำประปาตลอดปี พ.ศ. 2561 เท่ากับ 165,729,717 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

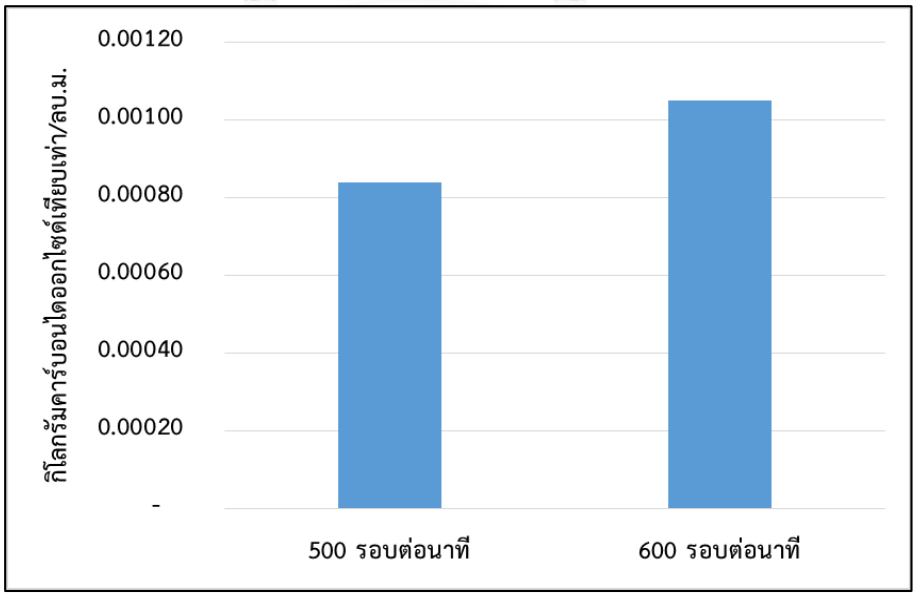
จากผลการวิเคราะห์การควบคุมถังตกตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นพบว่าสามารถลดปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์และความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดได้ โดยในการประเมินผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการผลิตน้ำประปาในช่วงความขุ่นต่ำที่ 15-30 เอ็นทียู การลดความเข้มข้นสารส้มน้ำลงเหลือ 15 มิลลิกรัมต่อลิตรจากความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งเป็นปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมในการผลิตน้ำประปาในภาวะปกติพบว่าสามารถลดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนได้ 5.90 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 4.89 ของปริมาณผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้น และผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนที่สามารถลดลงได้จากการลดการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ลงจากความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือความเข้มข้น 6 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนได้ 1.90 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 1.57 ของปริมาณผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4-35 ปริมาณผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนต่อปริมาณและชนิดของสารโคแอกกูแลนต์

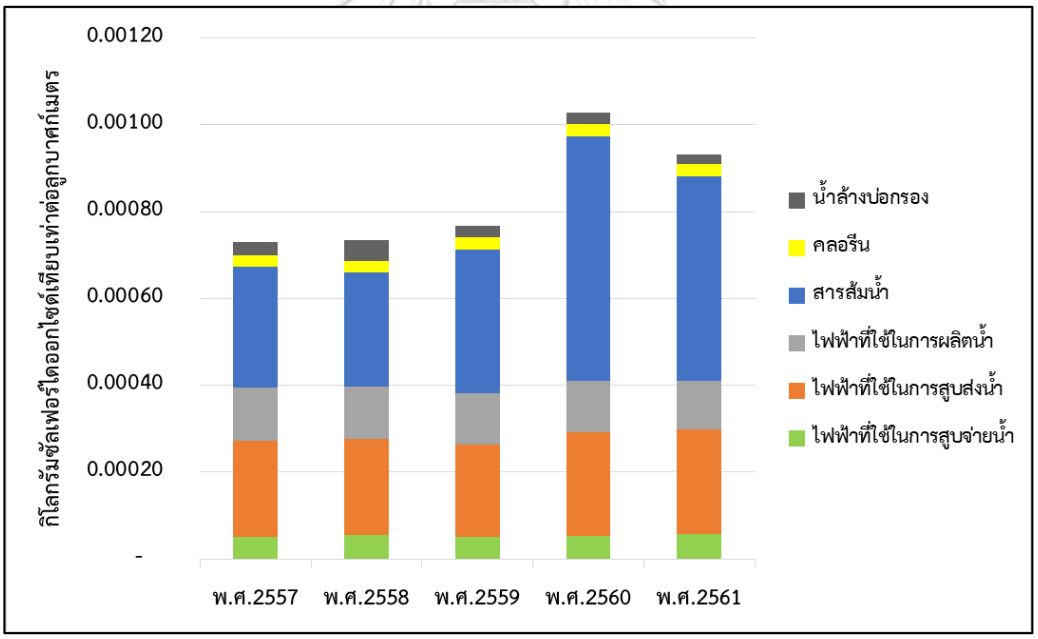
การประเมินผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนที่สามารถลดลงได้จากการลดความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นจากการวิเคราะห์ความเร็วรอบมอเตอร์ใบพัดที่เหมาะสมสามารถลดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนลงได้เท่ากับ 2.09×10^{-4} กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในภาพที่ 4-36



ภาพที่ 4-36 ปริมาณผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนจากพลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ต่างๆ

4.3.3.2 ผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรด

ผลการประเมินผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดจากกระบวนการผลิตน้ำประปาในปี พ.ศ.2557 ถึงปี พ.ศ. 2561 ดังแสดงในภาพที่ 4-37 พบว่าผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดในปี พ.ศ. 2561 มาจากการใช้ไฟฟ้าในขั้นตอนการสูบส่งน้ำประปาเท่ากับ 2.41×10^{-4} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 26) การใช้ไฟฟ้าในขั้นตอนการสูบจ่ายน้ำเท่ากับ 5.74×10^{-5} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 6) การใช้ไฟฟ้าในขั้นตอนการผลิตน้ำประปาเท่ากับ 1.12×10^{-4} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 12) การใช้สารส้มน้ำในกระบวนการผลิตเท่ากับ 4.71×10^{-4} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 51) การใช้คลอรีนในกระบวนการผลิตเท่ากับ 2.83×10^{-5} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 3) และการใช้น้ำในการล้างบ่อกรองเท่ากับ 2.23×10^{-5} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 2) โดยผลรวมของผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดจากการผลิตและจ่ายน้ำประปาเท่ากับ 9.31×10^{-4} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร

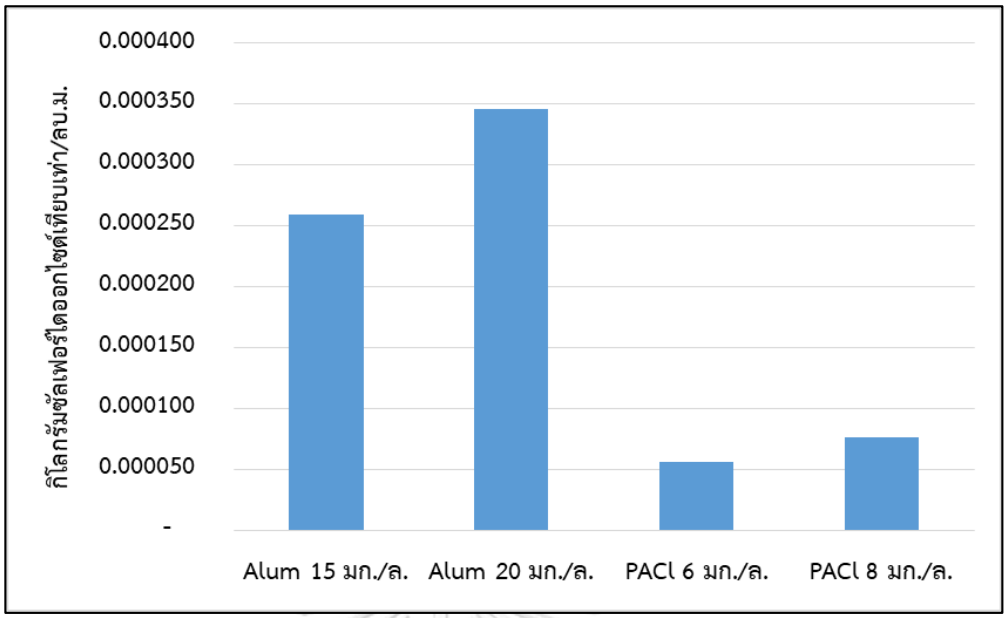


ภาพที่ 4-37 ปริมาณผลกระทบต่อความเป็นกรดจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร

เมื่อพิจารณาในกระบวนการผลิตและจ่ายน้ำประปาจะพบว่าการใช้สารส้มน้ำในกระบวนการผลิตมีการสร้างผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดมากที่สุดเท่ากับ 4.71×10^{-4} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร (คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 51 ของกระบวนการรวมทั้งหมด) เนื่องจากสารส้มน้ำเป็นเกลือเคมีประเภทหนึ่งที่สามารถละลายน้ำและจะทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรด เมื่อนำมาใช้ในกระบวนการตกตะกอนเมื่อรวมกับอนุภาคความขุ่นจะเกิดเป็นตะกอนของสารส้ม($Al(OH)_3$) และมีกรดเกิดขึ้นในระบบซึ่งก่อให้เกิดการสะสมของกรดเพิ่มมากขึ้น รองลงมาคือไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบส่งน้ำประปา ไฟฟ้าในขั้นตอนกระบวนการผลิต และไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบจ่ายน้ำประปา ตามลำดับ และส่วนที่เหลือมาจากการใช้คลอรีนในกระบวนการผลิต และการใช้น้ำในการล้างบ่อกรอง โดยตลอดปี พ.ศ. 2561 มีการผลิตและจ่ายน้ำประปาเท่ากับ 1,374,209,930 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งนำมาคำนวณกับค่าผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร (9.31×10^{-4} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร) พบว่ามีค่าผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดผลิตน้ำประปาตลอดปี พ.ศ. 2561 เท่ากับ 1,236,789 กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่า

จากผลการวิเคราะห์การควบคุมถังตกตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นพบว่าสามารถลดปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์ โดยในการประเมินผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดที่เกิดจากการลดความเข้มข้นสารส้มน้ำลง 5 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถลดผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดได้ 8.64×10^{-5} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 9.99 ของปริมาณผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้น และผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดที่สามารถลดลงได้จากการลดการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ลง 2 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถลดผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดได้ 1.98×10^{-5} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 2.22 ของปริมาณผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้น และการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดต่ำกว่าการใช้สารส้มน้ำที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมเท่ากับ 2.03×10^{-4} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในภาพที่ 4-38

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

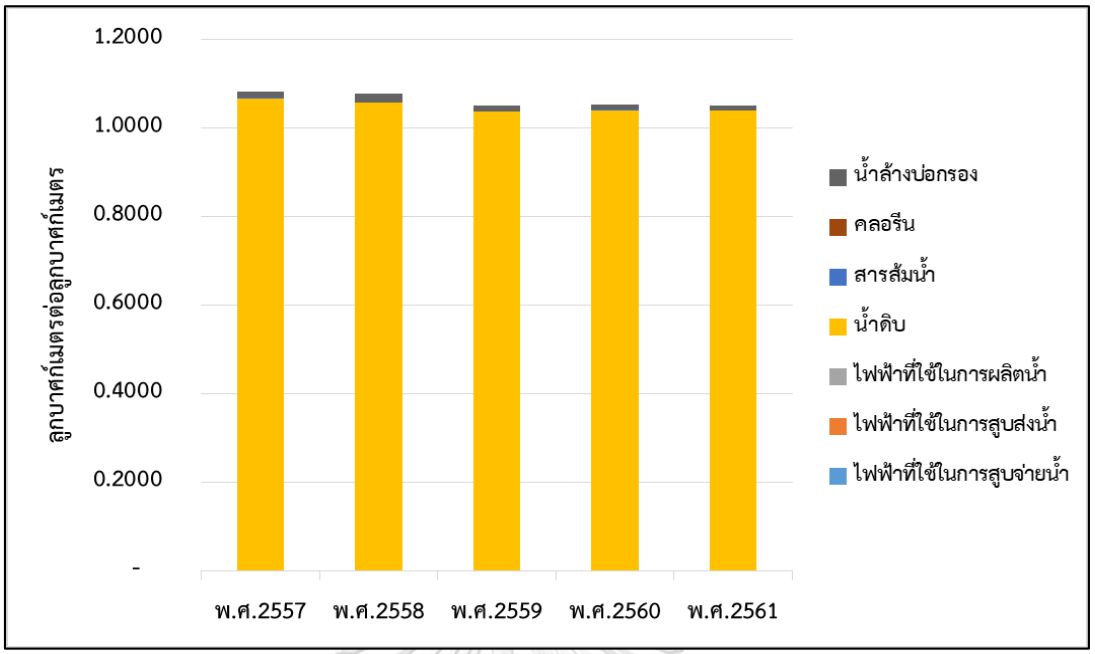


ภาพที่ 4-38 ปริมาณผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดต่อปริมาณและชนิดของสารโคแอกกูแลนต์

4.3.3.3 ผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำ

ผลการประเมินผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำน้ำประปาในปี พ.ศ.2557 ถึงปี พ.ศ. 2561 ดังแสดงในภาพที่ 4-39 พบว่าผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำในปี พ.ศ. 2561 มาจากน้ำดิบที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำประปา 1.038 ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร (คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 99 ของกระบวนการรวมทั้งหมด) และส่วนที่เหลือมาจากการใช้ไฟฟ้าในการสูบส่งน้ำประปา 5.71×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร การใช้ไฟฟ้าในขั้นตอนการสูบจ่ายน้ำเท่ากับ 1.36×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร การใช้ไฟฟ้าในขั้นตอนการผลิตน้ำประปาเท่ากับ 2.65×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร การใช้สารส้มน้ำในกระบวนการผลิตเท่ากับ 1.13×10^{-3} ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร การใช้คลอรีนในกระบวนการผลิตเท่ากับ 1.74×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร และการใช้น้ำในการล้างบ่อกรองเท่ากับ 9.84×10^{-3} ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร โดยผลรวมของผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำจากการผลิตและจ่ายน้ำประปาเท่ากับ 1.050 ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

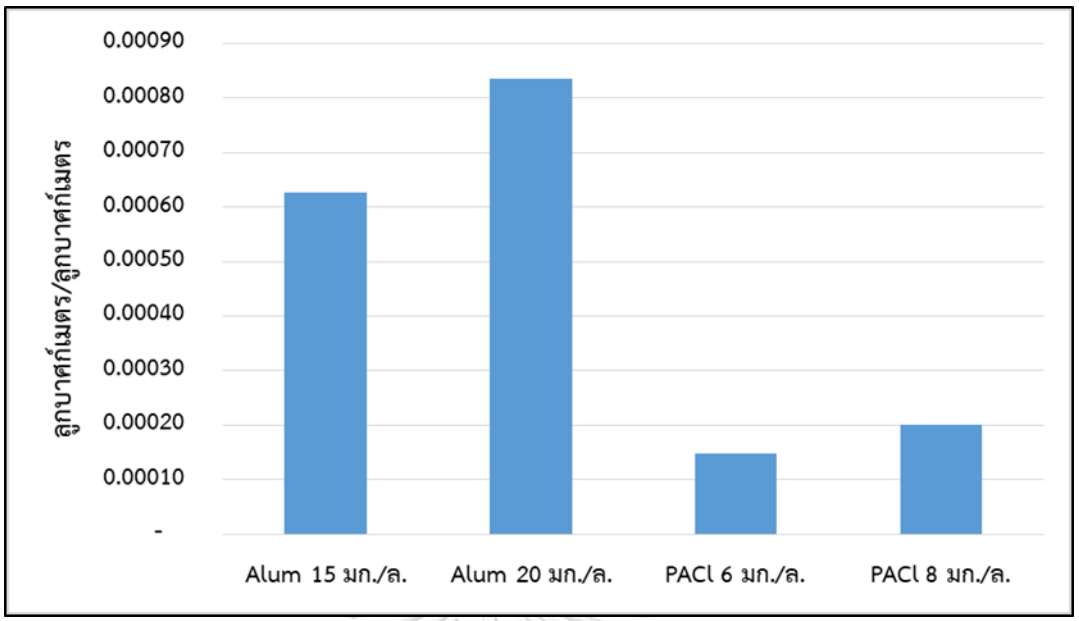


ภาพที่ 4-39 ผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร

เมื่อพิจารณาในกระบวนการผลิตและจ่ายน้ำประปาจะพบว่าการนำน้ำดิบมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำประปา มีการสร้างผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำมากที่สุดรวมเท่ากับ 1.038 ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร (คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 99 ของกระบวนการรวมทั้งหมด) เมื่อนำผลปี พ.ศ. 2561 ที่มีการผลิตและจ่ายน้ำประปาเท่ากับ 1,374,209,930 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งนำมาคำนวณกับค่าผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร (1.050 ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร) พบว่ามีค่าผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำผลิตน้ำประปาตลอดปี พ.ศ. 2561 เท่ากับ 1,443,470,110 ลูกบาศก์เมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากผลการวิเคราะห์การควบคุมถังตกตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นพบว่าสามารถลดปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์ โดยในการประเมินผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำที่เกิดจากการลดความเข้มข้นสารส้มน้ำลง 5 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถลดผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำได้ 2.09×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร และผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำที่สามารถลดลงได้จากการลดการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ลง 2 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถลดผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำได้ 5.25×10^{-5} ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร และการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำต่ำกว่าการใช้สารส้มน้ำที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมเท่ากับ 4.77×10^{-4} ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในภาพที่ 4-40



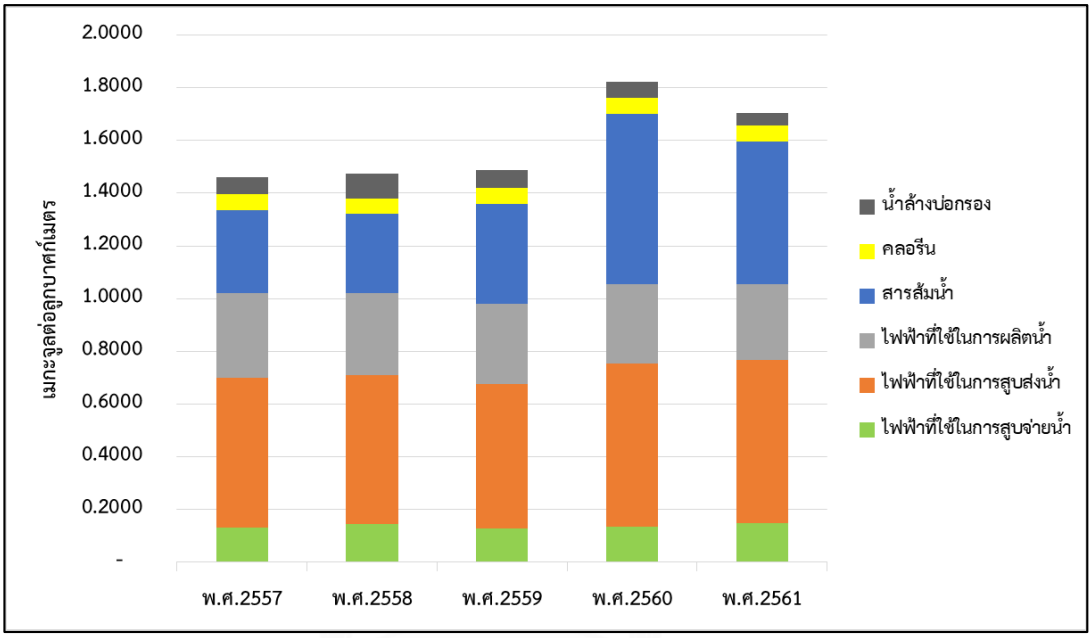
ภาพที่ 4-40 ปริมาณผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำต่อปริมาณและชนิดของสารโคแอกกูแลนต์

4.3.3.4 ผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิง

ผลการประเมินผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงจากกระบวนการผลิตน้ำประปาในปี พ.ศ.2557 ถึงปี พ.ศ. 2560 ดังแสดงในภาพที่ 4-41 พบว่าผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงในปี พ.ศ. 2561 มาจากการใช้ไฟฟ้าในขั้นตอนการสูบส่งน้ำประปาเท่ากับ 0.620 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 36) การใช้ไฟฟ้าในขั้นตอนการสูบจ่ายน้ำเท่ากับ 0.148 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 9) การใช้ไฟฟ้าในขั้นตอนการผลิตน้ำประปาเท่ากับ 0.288 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 17) การใช้สารส้มน้ำในกระบวนการผลิตเท่ากับ 0.539 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 32) การใช้คลอรีนในกระบวนการผลิตเท่ากับ 0.061 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 4) และการใช้น้ำในการล้างบ่อกรองเท่ากับ 0.048 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 3) โดยผลรวมของผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงจากการผลิตและจ่ายน้ำประปาเท่ากับ 1.704 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร

เมื่อพิจารณาในกระบวนการผลิตและจ่ายน้ำประปาจะพบว่าขั้นตอนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งในการผลิตและจ่ายน้ำประปา มีการสร้างผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงมากที่สุดรวมเท่ากับ 1.056 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร (คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 62 ของกระบวนการรวมทั้งหมด) โดยมาจากไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบส่งน้ำประปามากที่สุด รองลงมาคือไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนกระบวนการผลิต และไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบจ่ายน้ำประปา ตามลำดับ เนื่องจากในการผลิต

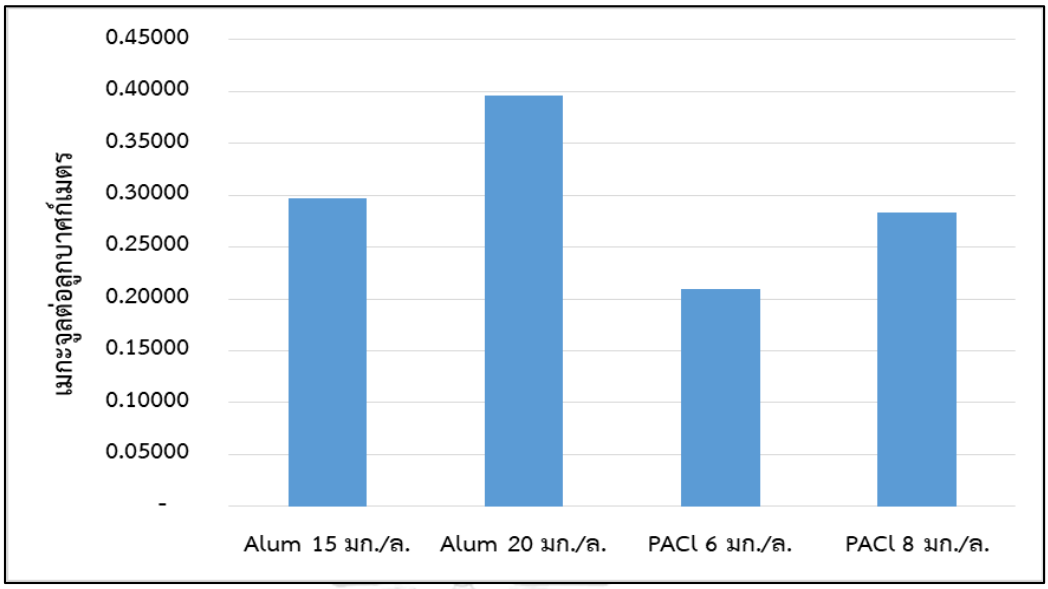
พลังงานไฟฟ้ามีการใช้เชื้อเพลิงจำพวก ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ จำนวนมากเป็นแหล่งพลังงานในการผลิตพลังงานไฟฟ้า และส่วนที่เหลือมาจากการใช้สารส้มน้ำร้อยละ 32 การใช้คลอรีนในกระบวนการผลิตและการใช้น้ำในการล้างบ่อกรอง โดยตลอดปี พ.ศ. 2561 มีการผลิตและจ่ายน้ำประปาเท่ากับ 1,374,209,930 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งนำมาคำนวณกับค่าผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร (1.704 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร) พบว่ามีค่าผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงจากการผลิตน้ำประปาตลอดปี พ.ศ. 2561 เท่ากับ 2,341,241,458 เมกะจูล



ภาพที่ 4-41 ปริมาณผลกระทบต่อการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร

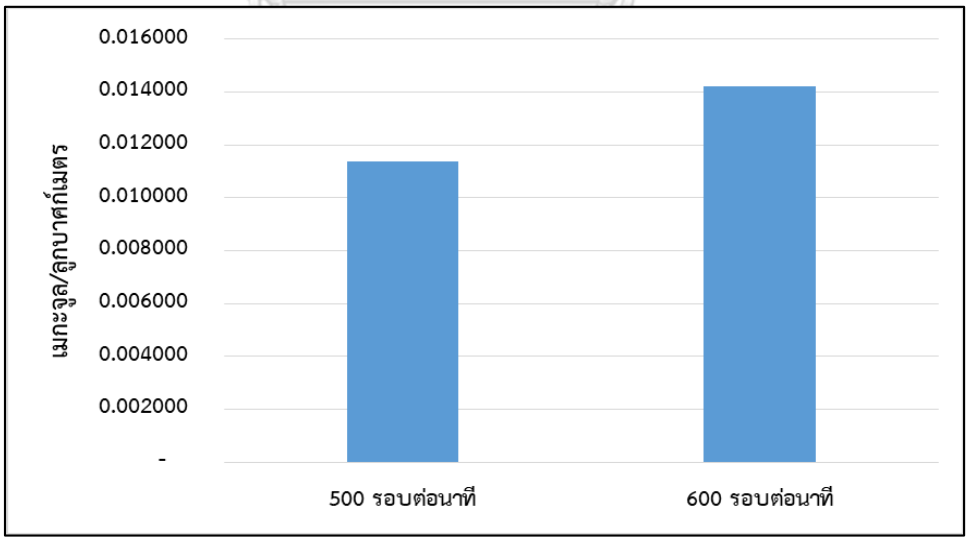
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากผลการวิเคราะห์การควบคุมถังตกตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นพบว่าสามารถลดปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์ โดยในการประเมินผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงที่เกิดจากการลดความเข้มข้นสารส้มน้ำลง 5 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถลดผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงได้ 0.099 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร และผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงที่สามารถลดลงได้จากการลดการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ลง 2 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถลดผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงได้ 0.074 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร และการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงต่ำกว่าการใช้สารส้มน้ำที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมเท่ากับ 0.090 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในภาพที่ 4-42



ภาพที่ 4-42 ปริมาณผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงต่อปริมาณและชนิดของสารโคแอกกูแลนต์

การประเมินผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงที่สามารถลดลงได้จากการลดความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นจากการวิเคราะห์ความเร็วรอบมอเตอร์ใบพัดที่เหมาะสมสามารถลดผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงได้เท่ากับ 2.84×10^{-3} เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในภาพที่ 4-43



ภาพที่ 4-43 ปริมาณผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงจากพลังงานไฟฟ้า

4.3.4 การแปลผล (Interpretation)

จากการวิเคราะห์ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิตน้ำประปามีศักยภาพในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนเท่ากับ 0.121 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร ผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดเท่ากับ 9.31×10^{-4} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร ผลกระทบต่อการสิ้นเปลืองทรัพยากรน้ำเท่ากับ 1.050 ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร และผลกระทบต่อการสิ้นเปลืองทรัพยากรเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.704 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร โดยผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนและผลกระทบต่อการสิ้นเปลืองทรัพยากรเชื้อเพลิงเกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการต่างๆ มากที่สุด ทั้งการสูบส่งน้ำประปา การสูบจ่ายน้ำประปา และกระบวนการผลิต เนื่องจากในขั้นตอนกระบวนการของการผลิตพลังงานไฟฟ้ามีการใช้ทรัพยากรและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตจำนวนมาก การเผาไหม้เชื้อเพลิงก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซเรือนกระจก ซึ่งโมเลกุลของก๊าซเหล่านี้จะทำหน้าที่เก็บกักรังสีความร้อนที่สะท้อนออกจากผิวโลกเป็นสาเหตุให้เกิดสภาวะโลกร้อน และการใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ส่งผลให้เกิดการลดลงต่อทรัพยากรเชื้อเพลิงโดยตรง ผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดเกิดจากการใช้สารส้มน้ำในกระบวนการผลิตมากที่สุดถึงร้อยละ 44 เนื่องจากสารส้มน้ำเป็นสารเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนของการผลิตน้ำประปา เมื่อนำมาใช้ในกระบวนการตกตะกอนเมื่อรวมกับอนุภาคความขุ่นจะเกิดเป็นตะกอนของสารส้ม($Al(OH)_3$) และมีกรดเกิดขึ้นในระบบซึ่งก่อให้เกิดการสะสมของกรดเพิ่มมากขึ้น ผลกระทบต่อการสิ้นเปลืองทรัพยากรน้ำเกิดจากการนำน้ำดิบมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำประปามากที่ถึงร้อยละ 99 เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำประปามีการนำน้ำดิบมาเป็นวัตถุดิบตั้งที่สำคัญที่สุดในการผลิต น้ำดิบที่นำมาผลิตน้ำประปาเป็นน้ำผิวดินมาจากแหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งผลกระทบโดยตรงต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำ จากผลการวิเคราะห์การควบคุมถังตกตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสามารถลดปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์ ในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยการลดปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์และการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ใบพัดที่เหมาะสมสำหรับการกวนช้าที่ 500 รอบต่อนาทีทำให้สามารถลดการใช้พลังงานส่งผลให้สามารถลดศักยภาพในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตน้ำประปา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4 การประเมินต้นทุนและการดำเนินงานควบคุมการตกตะกอนของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

การเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนสามารถควบคุมกระบวนการผลิตและคุณภาพของน้ำประปาให้มีประสิทธิภาพเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนด โดยสามารถควบคุมการใช้สารเคมีและพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิต พบว่าต้นทุนเฉพาะค่าสารเคมีในการผลิตน้ำประปาที่ช่วงความขุ่น 15-30 เอ็นทียู ซึ่งเป็นค่าความขุ่นในช่วงระยะเวลาที่ทำการทดลอง โดยในกระบวนการตกตะกอนที่มีการทดสอบหาความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมโดยการทำจาร์เทสต์ซึ่งใช้สารส้มน้ำที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคำนวณต้นทุนเฉพาะสารเคมีที่ใช้มีราคาเท่ากับ 0.093 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (ราคาสารส้มน้ำเท่ากับ 2,315 บาทต่อตัน) และเมื่อคำนวณเฉพาะค่าสารเคมีในการผลิตน้ำ 4.4 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวันเท่ากับ 407,440 บาทต่อวัน การวิเคราะห์การดำเนินงานเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัส พบว่าสามารถลดปริมาณการใช้สารส้มน้ำเป็นสารโคแอกกูแลนต์โดยที่สามารถลดความเข้มข้นที่ใช้ลงได้เหลือเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อคำนวณต้นทุนเฉพาะค่าสารเคมีที่ใช้มีราคาเท่ากับ 0.069 บาทต่อลูกบาศก์เมตร คำนวณเฉพาะค่าสารเคมีในการผลิตน้ำ 4.4 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวันเท่ากับ 305,580 บาทต่อวัน เมื่อนำราคาต้นทุนสารส้มที่ใช้ในการกำจัดความขุ่นมาเปรียบเทียบสามารถประเมินศักยภาพค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้เฉพาะค่าสารเคมีประมาณ 100,000 บาทต่อวัน และสำหรับต้นทุนสารเคมีของการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์พบว่าที่ช่วงความขุ่น 15-20 เอ็นทียูความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองจาร์เทสต์ใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำมาคำนวณต้นทุนเฉพาะค่าสารเคมีที่ใช้มีราคาเท่ากับ 0.096 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (ราคาสารส้มน้ำเท่ากับ 4,180 บาทต่อตัน) และคำนวณเฉพาะค่าสารเคมีในการผลิตน้ำ 4.4 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวันเท่ากับ 420,388 บาทต่อวัน เมื่อวิเคราะห์การดำเนินงานเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัส พบว่าสามารถลดปริมาณการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์โดยที่สามารถลดความเข้มข้นที่ใช้ลงได้เหลือเท่ากับ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อคำนวณต้นทุนเฉพาะค่าสารเคมีที่ใช้มีราคาเท่ากับ 0.072 บาทต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าสารเคมีในการผลิตน้ำ 4.4 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวันเท่ากับ 315,291 บาทต่อวัน เมื่อนำราคาต้นทุนสารส้มที่ใช้ในการกำจัดความขุ่นมาเปรียบเทียบพบว่าสามารถประเมินศักยภาพค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้เฉพาะค่าสารเคมีประมาณ 100,000 บาทต่อวัน เมื่อเปรียบเทียบราคาต้นทุนเฉพาะค่าสารเคมีของสารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้ในการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กำจัดความขุ่นที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมโดยไม่รวมค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่างๆ พบว่ามีต้นทุนค่าสารเคมีที่ใกล้เคียงกัน โดยโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีราคาต่อหน่วยการผลิตน้ำที่สูงกว่าสารส้มน้ำเล็กน้อย และโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่สูงกว่าสารส้มน้ำ

เมื่อวิเคราะห์การดำเนินงานเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัส พบว่า การควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขนที่เหมาะสม คือการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดให้คงที่ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที โดยการควบคุมความเร็วรอบที่คงที่สม่ำเสมอจะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตน้ำประปาลงได้ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ถึงแนวทางการควบคุมถังตกตะกอนที่เหมาะสมคือ การควบคุมอัตราการไหลของน้ำดิบเข้าสู่ถังตกตะกอนที่ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งทำให้สามารถควบคุมปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในปริมาณทำปฏิกิริยาให้มีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 และทำให้สามารถควบคุมคุณภาพของน้ำประปาให้อยู่ในเกณฑ์ตามที่มาตรฐานกำหนดได้ ถึงแม้ว่าที่อัตราการไหล 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะสามารถสร้างตะกอนได้ใกล้เคียงกันแต่ก็ยังมีกำลังการผลิตที่น้อยกว่าอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และการควบคุมอัตราการไหลที่ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งมีกำลังการผลิตที่สูงกว่าแต่ก็ทำให้การควบคุมถังตกตะกอนมีความยากมากขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มความเร็วของน้ำล้นผิวให้มากยิ่งขึ้นทำให้มีโอกาสเกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนในถังตกตะกอนได้มากยิ่งขึ้นซึ่งจะทำให้คุณภาพน้ำมีโอกาสที่เกิดค่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่มุ่งเน้นการวิเคราะห์แนวทางการดำเนินงานควบคุมตกตะกอนสำหรับถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง โดยวิเคราะห์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมถังตกตะกอน เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อคคูเลชัน ด้วยวิธีการจาร์เทสต์ โดยเมื่อทราบถึงชนิดและความเข้มข้นที่เหมาะสมแล้วจึงนำไปใช้ในการทดลองกับสภาพการทำงานจริงของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนในโรงงานผลิตน้ำบางเขน เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่สำคัญในการควบคุมถังตกตะกอน โดยปัจจัยที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดสำหรับการกวนช้าในบริเวณทำปฏิกิริยา อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าสู่ถังตกตะกอน และปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยา รวมถึงวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตน้ำประปาและการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การดำเนินงานควบคุมตกตะกอนสำหรับถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

- การวิเคราะห์ผลจากชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนมีผลต่อความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อคคูเลชัน โดยสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้สารส้มน้ำมีความเข้มข้นที่เหมาะสมสูงกว่าโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ประมาณ 2.5 เท่า (ความขุ่นน้ำดิบที่ทำการทดลองเท่ากับ 20 เอ็นทียู) และในการใช้สารส้มน้ำร่วมกับโพลิเมอร์ในการกำจัดความขุ่นพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ใกล้เคียงกับการใช้สารส้มน้ำเพียงชนิดเดียว ซึ่งการใช้โพลิเมอร์เป็นสารช่วยตกตะกอนจึงไม่จำเป็นสำหรับในช่วงที่น้ำดิบมีความขุ่นต่ำซึ่งจะเป็นการเพิ่มต้นทุนในกระบวนการผลิตน้ำประปา ดังนั้นควรเลือกใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ในกระบวนการตกตะกอนเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงที่สุด และมีปริมาณการใช้ที่น้อยกว่าสารโคแอกกูแลนต์ชนิดอื่นซึ่งทำให้สามารถลดปริมาณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้นได้

- การวิเคราะห์ผลของความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดสำหรับการกวนช้าและอัตราการไหลของน้ำดิบต่อการสร้างตะกอนในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน พบว่าการควบคุมเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัด 500 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน สามารถสร้างกลุ่มตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาให้มีปริมาณเพียงพอและเหมาะสมต่อการตกตะกอน

- การวิเคราะห์ผลของปริมาณร้อยละของตะกอนในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน พบว่าการควบคุมปริมาณร้อยละของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบ โดยปริมาณร้อยละของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10-15 ที่การใช้สารโคแอกกูแลนต์ทั้ง 2 ชนิดคือ สารส้มน้ำและโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ซึ่งสามารถควบคุมความขุ่นคงเหลือของน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอนให้อยู่ในช่วง 1-4 เอ็นทียู

- การวิเคราะห์การดำเนินงานควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน ด้วยปัจจัยที่เหมาะสมได้แก่ อัตราการไหลของน้ำดิบเข้าถังตกตะกอน 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความเร็วรอบมอเตอร์ของใบพัดสำหรับการกวนช้า 500 รอบต่อนาที และควบคุมปริมาณของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 10-15 ทำให้สามารถลดปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์ในการกำจัดความขุ่นได้และยังคงให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ใกล้เคียงและได้คุณภาพน้ำใสที่ออกจากถังตกตะกอนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

2. การประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตน้ำประปาและการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

- การประเมินผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตและสูบส่งสูบจ่ายน้ำประปาส่งให้เกิดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนสูงสุด 7.81×10^{-2} กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 64 ของกระบวนการทั้งหมด โดยค่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตรมีค่าเท่ากับ 0.121 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร

- การประเมินผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรด พบว่าการใช้สารส้มน้ำในกระบวนการผลิตส่งให้เกิดผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดสูงสุดเท่ากับ 4.71×10^{-4} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 51 ของกระบวนการทั้งหมด โดยค่าผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดจากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตรมีค่าเท่ากับ 9.31×10^{-4} กิโลกรัมซัลเฟอร์ไดออกไซด์เทียบเท่าต่อลูกบาศก์เมตร

- การประเมินผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำ พบว่าเกิดจากการนำน้ำดิบมาใช้ในการผลิตน้ำประปา 1.038 ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 99 ของกระบวนการรวมทั้งหมด โดยค่าผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำ จากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตรมีค่าเท่ากับ 1.050 ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร

- การประเมินผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิง พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งในการผลิตและจ่ายน้ำประปา มีการสร้างผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงมากที่สุดรวมเท่ากับ 1.056 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 62 ของกระบวนการรวมทั้งหมด โดยค่าผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำ จากการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตรมีค่าเท่ากับ 1.704 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร

- การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ของน้ำประปา พบว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่เกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าและการใช้สารส้มน้ำในการผลิตน้ำประปา ซึ่งในส่วนของการดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและสารเคมีในกระบวนการตกตะกอนของการผลิตน้ำประปา เมื่อนำมาประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมพบว่าสามารถลดค่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน ผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรด ผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำ และผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิง ที่เกิดขึ้นได้ โดยการลดการใช้สารเคมีส่งผลให้ค่าผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าส่งผลให้ค่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน และผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.2 ประโยชน์ที่การประปานครหลวงที่ได้รับจากงานวิจัย

1. จากยุทธศาสตร์การบริหารการประปานครหลวงฉบับที่ 4 (2560-2564) การประปานครหลวงมีเป้าหมายและความมุ่งมั่นในการยกระดับองค์กรสู่การเป็นองค์กรสมรรถนะสูง (High Performance Organization : HPO) มีความรับผิดชอบต่อสังคม (Social Responsibility) ตลอดจนถึงการมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำประปาที่มีคุณภาพตามแผนน้ำประปาปลอดภัย (Water Safety Plan) จากงานวิจัยนี้สามารถตอบสนองเป้าหมายพันธกิจของการประปานครหลวง 2 ด้านของการประปานครหลวง

พันธกิจด้านที่ 1 สร้างการเติบโตและความยั่งยืนขององค์กร (Sustainability) โดยมุ่งเน้นการลดการสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นสำคัญ ในงานวิจัยนี้จากการประเมินวัฏจักรชีวิตของการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังตกตะกอน พบว่าสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำประปา และสามารถควบคุมการใช้สารเคมีได้อย่างเหมาะสม

พันธกิจด้านที่ 2 ดำเนินการตามแผนน้ำประปาปลอดภัยของขององค์การอนามัยโลก ด้วยการพัฒนาระบบน้ำดิบ-ผลิต-จ่ายน้ำประปาให้มีเสถียรภาพที่มีดัชนีชีวัดคือ สามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีประสิทธิภาพและคุณภาพน้ำประปา ณ สถานที่ใช้น้ำให้มีค่าความขุ่นต่ำกว่า 0.5 เอ็นทียู ในงานวิจัยนี้การดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขนสามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมถังตกตะกอน โดยสามารถผลิตน้ำประปาที่มีคุณภาพตรงตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

2. โครงการพัฒนาระบบตรวจวัดระดับตะกอนและควบคุมถังตกตะกอนอัตโนมัติ ร่วมกันระหว่างการประปานครหลวงกับศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิสก์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ในการบูรณาการนำเทคโนโลยีเข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมถังตกตะกอน โดยข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้นำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องวัดตะกอนอัตโนมัติจะสามารถสร้างระบบซอฟต์แวร์สำหรับใช้ในห้องควบคุมและสถานีตกตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

3. คู่มือการดำเนินการควบคุมถังตกตะกอน โดยข้อมูลส่วนหนึ่งจากงานวิจัยนี้จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลในการจัดทำคู่มือสำหรับการควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน ของโรงงานผลิตน้ำบางเขน เพื่อเผยแพร่ให้กับผู้ปฏิบัติงานในฝ่ายโรงงานผลิตน้ำบางเขน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การวิเคราะห์กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อคคูเลชันโดยวิธีจาร์เทสต์และการสร้างตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยา ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าซีตาโพเทนเชียล ลักษณะของกลุ่มตะกอน ความหนาแน่น และขนาดของตะกอนที่เกิดขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะเกี่ยวข้องและส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

2. งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสในช่วงที่มีความขุ่นของน้ำดิบ 15-30 เอ็นทียู ซึ่งเป็นช่วงความขุ่นที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นควรมีการวิเคราะห์การควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสในช่วงที่มีความขุ่นน้ำดิบสูงขึ้นต่อไปในอนาคต

3. การวิเคราะห์การดำเนินการควบคุมถังตกตะกอนในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนเท่านั้น ซึ่งในการนำไปใช้ควบคุมกับถังตกตะกอนชนิดอื่นจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมของถังตกตะกอนชนิดนั้นๆ

4.การประเมินวัฏจักรชีวิตในกระบวนการผลิตและจ่ายน้ำประปา ในส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตเนื่องจากมิเตอร์จำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้มีการรวมที่เดียว หากสามารถระบุพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้แต่ละกระบวนการได้อย่างชัดเจนจะสามารถวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากแต่ละกระบวนการได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

5. การประเมินวัฏจักรชีวิตในกระบวนการผลิตน้ำประปา ควรมีการประเมินค่าผลกระทบแยกในแต่ละกระบวนการของการผลิตน้ำประปาให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

6. จากการประเมินวัฏจักรชีวิตในกระบวนการผลิตน้ำประปา พบว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ ที่เกิดขึ้นมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตและสูบน้ำประปาเนื่องจากการมีการใช้พลังงานในปริมาณมาก ดังนั้นการประปานครหลวงจึงควรให้ความสำคัญและลดการใช้พลังงานไฟฟ้าหรือใช้พลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อเป็นการอนุรักษ์ทรัพยากร ลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต และจะส่งผลให้สามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลงได้อีกทางหนึ่ง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กลุ่มเทคโนโลยีการป้องกันมลพิษ. (2556). LCI-LCA แนวปฏิบัติในการจัดทำข้อมูลวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์น้ำตาลทรายดิบ, กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร.

นิติวิศว์ แตงไทย. (2556). การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตและจ่ายน้ำประปา กรณีศึกษาการประปาส่วนภูมิภาคสาขาเชียงราย [วิทยานิพนธ์]. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทีมคอนซัลติ้งเอนจิเนียริ่งแอนด์แมเนจเมนท์. (2552). ข้อมูลเกณฑ์การออกแบบและการควบคุมถังตกตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน. โครงการปรับปรุงกิจการประปาแผนหลักครั้งที่ 8.

ธวัชชัย ลิจุติภูมิ. (2559). สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา. ฝ่ายวางแผนและพัฒนาการผลิตระบบส่งและจ่ายน้ำ การประปานครหลวง.

ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง. (2559). มาตรฐานน้ำประปาของการประปานครหลวง.

พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์. (2547). คู่มือการจัดทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์. ฝ่ายธุรกิจและสิ่งแวดล้อม สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย.

พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. (2559). ถังตกตะกอน (Solid Contact Clarifier) ชนิดหมุนเวียนตะกอน (Sludge Recirculation). ฝ่ายควบคุมคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง.

พลอยไพลิน ร่มโพธิ์ภักดิ์. (2556). การกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน [วิทยานิพนธ์]. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. (2542). วิศวกรรมการประปา เล่ม1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. (2542). วิศวกรรมการประปา เล่ม2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันส่งเสริมการบริหารกิจการบ้านเมืองที่ดี. (2559). ยุทธศาสตร์การบริหารการประปานครหลวง ฉบับที่ 4.

สมศักดิ์ ปัสนานนท์. (2558). การศึกษาภาวะวิกฤติและแนวทางการแก้ไขปัญหาวิกฤติในกระบวนการผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวง. กรุงเทพมหานคร.

อรทัย ชวาลภาฤทธิ์. (2560). การจัดการของเสียอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Al-Husseini, T. R., Ghawi, A. H. and Ali, A. H. (2018). Performance of hydraulic jump rapid mixing for enhancement of turbidity removal from synthetic wastewater: A comparative study. *Journal of Water Process Engineering*.

Blokker, M., Vreeburg, J. and Speight, V. (2014). Residual Chlorine in the Extremities of the Drinking Water Distribution System: The Influence of Stochastic Water Demands. *Procedia Engineering, 70*, 172-180

Bonton, A., Bouchard, C., Barbeau, B. and Jedrzejak, S. (2012). Comparative life cycle assessment of water treatment plants. *Desalination, 284*, 42-54.

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J. and Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design* (3 ed.). John Wiley & Sons Inc.

Degremont. (2007). *Water Treatment Handbook* (7 ed. Vol. 1-2). France: Lavoisier Publishing Inc.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

De Jesus, J. O. N., Esquerre, K. P. S. O., Kiperstok, A., da Motta, A. R. P., Medeiros, D. L. and de B. Lemos, C. P., (2018). Life Cycle Analysis of an Industrial Water Supply System. *Process Systems Engineering (PSE 2018).* 1789-1794.

Del Borghi, A., Strazza, C., Gallo, M., Messineo, S. and Naso, M. (2013). Water supply and sustainability: life cycle assessment of water collection, treatment and distribution service. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18(5): 1158-1168.

Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W. and Greenberg, A. E. (1996). *Standard methods for the examination of water and wastewater*: American public health Assoc.

Haydar, S. and Aziz, J. A. (2009). Coagulation-flocculation studies of tannery wastewater using combination of alum with cationic and anionic polymers. *J Hazard Mater, 168*(2-3), 1035-1040.

Herrmann, I. T. and Moltesen, A. (2015). Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi. *Journal of Cleaner Production* 86: 163-169.

Kan, C., Huang, C., and Pan, J. R. (2002). Time requirement for rapid mixing in coagulation. *Colloids and surface A: Physicochemical and Engineering Aspect, 203*(1-3), 1-9.

Katrivesis, F. K., Karela, A. D., Papadakis, V. G. and Paraskeva, C. A. (2019). Revisiting of coagulation-flocculation processes in the production of potable water. *Journal of Water Process Engineering* 27: 193-204.

Kawamura, S. (2000). *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*: John Wiley & Sons Inc..

Kounina, A., Margni, M., Bayart, J., Boulay, A., Peters, G., Pfister, S., Ridoutt, B., Zelem, R., Van Verones, F. and Humbert, S. (2013). Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. *Life Cycle Assessment,* 707e721.

Lamnatou, C., Nicolai, R., Chemisana, D., Cristofari, C. and Cancellieri, D. (2019). Biogas production by means of an anaerobic- digestion plant in France: LCA of greenhouse- gas emissions and other environmental indicators. *Sci Total Environ* 670: 1226-1239.

Liu, Z., Wei, H., Li, A. and Yang, H. (2019). Enhanced coagulation of low-turbidity micro-polluted surface water: Properties and optimization. *J Environ Manage* 233: 739-747.

Luttrell, W. E. (2015). Aluminum sulfate. *Journal of Chemical Health and Safety, 22(6),* 33–35.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Ma, J., Wang, R., Wang, X., Zhang, H., Zhu, B., Lian, L. and Lou, D. (2019). Drinking water treatment by stepwise flocculation using polysilicate aluminum magnesium and cationic polyacrylamide. *Journal of Environmental Chemical Engineering 7*(3).

Mohammed, T. J. and Shakir, E. (2018). Effect of settling time, velocity gradient, and camp number on turbidity removal for oilfield produced water. *Egyptian Journal of Petroleum, 27*(1), 31-36.

Pfister, S., Boulay, A.-M., Berger, M., Hadjikakou, M., Motoshita, M., Hess, T. and Henderson, A. (2017). Understanding the LCA and ISO water footprint: A response to Hoekstra (2016) "A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA". *Ecological Indicators, 72*, 352-359.

Pillot, J., Catel, L., Renaud, E., Augeard, B. and Roux, P. (2016). Up to what point is loss reduction environmentally friendly?: The LCA of loss reduction scenarios in drinking water networks. *Water Research, 104*, 231-241.

Raghuvanshi, S., Bhakar, V., Sowmya, C. and Sangwan, K. S. (2017). Waste Water Treatment Plant Life Cycle Assessment: Treatment Process to Reuse of Water. *Procedia CIRP, 61*, 761-766.

Ren, Z. M., and Su, D. Z. (2016). Comparison of Different Life Cycle Impact Assessment Software Tools. *Key Engineering Materials, 572*, 44-49.

Rodriquez, O., Villamizar-Gallardo, R., Garcia, R. (2016). Life cycle assessment of four potable water treatment plants in northestern Colombia. *Journal of applied science,* 1980-993.

Stavropoulos, P., Giannoulis, C., Papacharalampopoulos, A., Foteinopoulos, P. and Chryssolouris, G. (2016). Life Cycle Analysis: Comparison between Different Methods and Optimization Challenges. *Procedia CIRP* 41: 626-631.

Valente, A., Iribarren, D. and Dufour, J. (2018). Harmonising methodological choices in life cycle assessment of hydrogen: A focus on acidification and renewable hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Wang, Z., Nan, J., Ji, X. and Yang, Y. (2018). Effect of the micro-flocculation stage on the flocculation/ sedimentation process: The role of shear rate. *Sci Total Environ* 633: 1183-1191.

Wei, H., Gao, B., Ren, J., Li, A. and Yang, H. (2018). Coagulation/ flocculation in dewatering of sludge: A review. *Water Res* 143: 608-631.

White, G.C. (1999). *Handbook of chlorination and alternative disinfectants*. John Wiley & Sons Inc.

Xu, J., Xu, W., Wang, D., Sang, G. and Yang, X. (2016). Evaluation of enhanced coagulation coupled with magnetic ion exchange (MIEX) in natural organic matter and sulfamethoxazole removals: The role of Al- based coagulant characteristic. *Separation and Purification Technology* 167: 70-78.

Zanghelini, G. M., Cherubini, E., and Soares, S. R. (2018). How Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) is aiding Life Cycle Assessment (LCA) in results interpretation. *Journal of Cleaner Production, 172,* 609–622.

Zhang, Z., Wang, J., Liu, D., Li, J., Wang, X., Song, B. and Song, Y. (2017). Hydrolysis of polyaluminum chloride prior to coagulation: Effects on coagulation behavior and implications for improving coagulation performance. *J Environ Sci (China), 57*, 162-169.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

เอกสารข้อมูลผลการทดลอง

การศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนเพื่อกำจัดความขุ่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก-1 การคำนวณค่าสารเคมีในการผลิตน้ำประปา

ตารางที่ ก-1 ผลการคำนวณต้นทุนสารเคมีที่ความเข้มข้นต่างๆ

สาร โคแอกกูแลนท์	ราคา (บาท/ตัน)	ร้อยละ ของแข็ง	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าใช้จ่าย (บาท/ลบ.ม.)
สารส้มน้ำ	2,315	50	5	0.023
			10	0.046
			15	0.069
			20	0.093
			25	0.116
			30	0.139
			35	0.162
			40	0.185
			45	0.208
			50	0.232
			55	0.255
			60	0.278
โพลิอะลูมิเนียม คลอไรด์	4,180	35	6	0.072
			8	0.096
			10	0.119
			12	0.143
			14	0.167
			16	0.191
			18	0.215
			20	0.239
			22	0.263
			24	0.287
			26	0.311
			28	0.334

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>วิธีการคำนวณค่าสารเคมี</u>

1. สารเคมีชนิดสารส้มน้ำร้อยละ 50 (Weight/weight)

ราคาสารส้มน้ำ (ขายทั้งเนื้อสารส้มและน้ำ)	=	2,315	บาท/ตัน
สารส้มน้ำ 1 ตัน มีเนื้อสารส้ม	=	500	กิโลกรัม
เนื้อสารส้ม 500 กิโลกรัม	=	2,315	บาท
เนื้อสารส้ม 1,000 กิโลกรัม	=	2,315 x 2	บาท
เนื้อสารส้ม 1,000,000,000 มิลลิกรัม	=	2,315 x 2	บาท

สมมติความเข้มข้นสารส้มน้ำ 35 มิลลิกรัมต่อลิตร

เนื้อสารส้ม 35 มิลลิกรัม $= \frac{\mathbf{2{,}315\ x\ 2\ x\ 35}}{\mathbf{1{,}000{,}000{,}000}}$ บาท

$= 1.62 \times 10^{-4}$ บาท/ลิตร

ดังนั้นการใช้สารส้มน้ำ 35 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการผลิตน้ำ 1 ลบ.ม.

= 0.162 บาท/ลบ.ม.

2. สารเคมีชนิดโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์(PACl) ร้อยละ 35 (Weight/weight)

ราคา PACl (ขายทั้งเนื้อและน้ำ)	=	4,180	บาท/ตัน
PACl น้ำ 1 ตัน มีเนื้อ PACl	=	350	กิโลกรัม
เนื้อ PACl 350 กิโลกรัม	=	4,180	บาท
เนื้อ PACl 1 กิโลกรัม	=	4,180 / 350	บาท
เนื้อสารส้ม 1,000,000 มิลลิกรัม	=	4,180 / 350	บาท

สมมติความเข้มข้นโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 18 มิลลิกรัมต่อลิตร

เนื้อสารส้ม 35 มิลลิกรัม $= \frac{\mathbf{4{,}180\ x\ 18}}{\mathbf{350\ x\ 1{,}000{,}000}}$ บาท

$= 2.15 \times 10^{-4}$ บาท/ลิตร

ดังนั้นการใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 18 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการผลิตน้ำ 1 ลบ.ม.

= 0.215 บาท/ลบ.ม.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. สารเคมีชนิดโพลิเมอร์ประจุลบ

ราคาโพลิเมอร์ประจุลบ = 94,100 บาท/ตัน

สมมติความเข้มข้นโพลิเมอร์ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร

โพลิเมอร์ประจุลบ 0.04 มิลลิกรัม = $\frac{\mathbf{94{,}100\ x\ 0.04}}{\mathbf{1{,}000{,}000{,}000}}$ บาท

= 3.76×10^{-6} บาท

ดังนั้นการใช้โพลิเมอร์ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการผลิตน้ำ 1 ลบ.ม.

= 0.00376 บาท/ลบ.ม.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

เอกสารข้อมูลผลการทดลอง

การศึกษาผลของความเร็วของใบพัดสำหรับการกวนช้าและอัตราการไหลของน้ำดิบ ในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 400 500 และ 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

ตารางที่ ข-1.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 400 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
1	4/12/61	03.00 น.	5	1
		06.00 น.	2	1
		09.00 น.	2	1
		12.00 น.	1	1
		15.00 น.	1	1
		18.00 น.	1	1
		21.00 น.	1	1
		24.00 น.	1	1
2	5/12/61	03.00 น.	1	1
		06.00 น.	1	1
		09.00 น.	1	1
		12.00 น.	1	1
		15.00 น.	1	1
		18.00 น.	1	1
		21.00 น.	1	1
		24.00 น.	1	1
3	6/12/61	03.00 น.	1	1
		06.00 น.	1	1
		09.00 น.	1	1
		12.00 น.	1	1
		15.00 น.	1	1
		18.00 น.	1	1
		21.00 น.	1	1
		24.00 น.	1	1
4	7/12/61	03.00 น.	1	1
		06.00 น.	1	1
		09.00 น.	1	1
		12.00 น.	1	1
		15.00 น.	1	1
		18.00 น.	1	1
		21.00 น.	1	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-1.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
1	4/12/61	03.00 น.	3	1
		06.00 น.	3	1
		09.00 น.	4	1
		12.00 น.	3	1
		15.00 น.	3	1
		18.00 น.	4	1
		21.00 น.	4	1
		24.00 น.	5	1
2	5/12/61	03.00 น.	4	1
		06.00 น.	3	1
		09.00 น.	3	1
		12.00 น.	4	1
		15.00 น.	3	1
		18.00 น.	3	1
		21.00 น.	4	1
		24.00 น.	3	1
3	6/12/61	03.00 น.	4	1
		06.00 น.	5	1
		09.00 น.	6	1
		12.00 น.	5	1
		15.00 น.	6	1
		18.00 น.	6	1
		21.00 น.	6	1
		24.00 น.	5	1
4	7/12/61	03.00 น.	5	1
		06.00 น.	6	1
		09.00 น.	5	1
		12.00 น.	6	1
		15.00 น.	7	1
		18.00 น.	7	1
		21.00 น.	8	1
		24.00 น.	6	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-1.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
5	8/12/61	03.00 น.	5	1
		06.00 น.	6	1
		09.00 น.	6	1
		12.00 น.	7	1
		15.00 น.	8	1
		18.00 น.	6	1
		21.00 น.	7	1
		24.00 น.	6	1
6	9/12/61	03.00 น.	7	1
		06.00 น.	6	1
		09.00 น.	7	1
		12.00 น.	8	1
		15.00 น.	8	1
		18.00 น.	7	1
		21.00 น.	7	1
		24.00 น.	8	1
7	10/12/61	03.00 น.	7	1
		06.00 น.	8	1
		09.00 น.	7	1
		12.00 น.	8	1
		15.00 น.	7	1
		18.00 น.	8	1
		21.00 น.	8	1
		24.00 น.	7	1
8	11/12/61	03.00 น.	7	1
		06.00 น.	8	1
		09.00 น.	9	1
		12.00 น.	8	1
		15.00 น.	9	1
		18.00 น.	8	1
		21.00 น.	8	1
		24.00 น.	9	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-1.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
9	12/12/61	21.00 น.	10	1
		24.00 น.	9	1
9	12/12/61	03.00 น.	10	1
		06.00 น.	9	1
		09.00 น.	10	1
		12.00 น.	9	1
		15.00 น.	10	1
		18.00 น.	10	1
		21.00 น.	10	1
		24.00 น.	9	1
10	13/12/61	03.00 น.	10	1
		06.00 น.	10	1
		09.00 น.	10	1
		12.00 น.	10	1
		15.00 น.	10	1
		18.00 น.	10	1
		21.00 น.	11	1
		24.00 น.	10	1
11	14/12/61	03.00 น.	10	1
		06.00 น.	9	1
		09.00 น.	9	1
		12.00 น.	10	1
		15.00 น.	10	1
		18.00 น.	10	1
		21.00 น.	10	1
		24.00 น.	9	1
12	15/12/61	03.00 น.	9	1
		06.00 น.	9	1
		09.00 น.	10	1
		12.00 น.	9	1
		15.00 น.	9	1
		18.00 น.	10	1
		21.00 น.	9	1
		24.00 น.	9	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-1.3 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
1	4/12/61	03.00 น.	5	1
		06.00 น.	7	5
		09.00 น.	8	5
		12.00 น.	6	6
		15.00 น.	6	5
		18.00 น.	7	5
		21.00 น.	7	8
		24.00 น.	12	8
2	5/12/61	03.00 น.	9	6
		06.00 น.	9	7
		09.00 น.	8	7
		12.00 น.	8	8
		15.00 น.	8	9
		18.00 น.	10	9
		21.00 น.	9	8
		24.00 น.	10	9
3	6/12/61	03.00 น.	10	9
		06.00 น.	12	10
		09.00 น.	11	11
		12.00 น.	10	11
		15.00 น.	12	10
		18.00 น.	10	9
		21.00 น.	10	8
		24.00 น.	11	8
4	7/12/61	03.00 น.	12	9
		06.00 น.	10	10
		09.00 น.	9	10
		12.00 น.	10	11
		15.00 น.	12	12
		18.00 น.	10	11
		21.00 น.	10	11
		24.00 น.	12	10
5	8/12/61	03.00 น.	13	15
		06.00 น.	13	17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-1.3 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
5	8/12/61	09.00 น.	12	18
		12.00 น.	11	18
		15.00 น.	12	20
		18.00 น.	15	20
		21.00 น.	15	18
		24.00 น.	16	18
6	9/12/61	03.00 น.	13	16
		06.00 น.	14	16
		09.00 น.	12	16
		12.00 น.	12	18
		15.00 น.	13	16
		18.00 น.	14	15
		21.00 น.	13	15
		24.00 น.	12	12
7	10/12/61	03.00 น.	15	16
		06.00 น.	17	19
		09.00 น.	15	20
		12.00 น.	15	18
		15.00 น.	15	17
		18.00 น.	16	18
		21.00 น.	15	16
		24.00 น.	15	18
8	11/12/61	03.00 น.	14	15
		06.00 น.	15	15
		09.00 น.	14	18
		12.00 น.	14	18
		15.00 น.	15	16
		18.00 น.	14	17
		21.00 น.	12	17
		24.00 น.	12	15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-1.3 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
9	12/12/61	03.00 น.	12	16
		06.00 น.	14	15
		09.00 น.	15	18
		12.00 น.	13	16
		15.00 น.	14	20
		18.00 น.	15	17
		21.00 น.	15	18
		24.00 น.	15	17
10	13/12/61	03.00 น.	15	17
		06.00 น.	14	16
		09.00 น.	13	14
		12.00 น.	12	15
		15.00 น.	14	16
		18.00 น.	16	19
		21.00 น.	15	18
		24.00 น.	15	19
11	14/12/61	03.00 น.	15	19
		06.00 น.	15	20
		09.00 น.	14	20
		12.00 น.	15	22
		15.00 น.	15	19
		18.00 น.	14	18
		21.00 น.	15	17
		24.00 น.	16	18
12	15/12/61	03.00 น.	14	16
		06.00 น.	13	16
		09.00 น.	14	18
		12.00 น.	16	20
		15.00 น.	16	20
		18.00 น.	15	18
		21.00 น.	15	19
		24.00 น.	16	20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 และ 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

ตารางที่ ข-2.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
1	18/12/61	03.00 น.	2	1
		06.00 น.	2	1
		09.00 น.	3	1
		12.00 น.	4	1
		15.00 น.	4	1
		18.00 น.	4	1
		21.00 น.	4	1
		24.00 น.	4	1
2	19/12/61	03.00 น.	5	2
		06.00 น.	8	2
		09.00 น.	7	2
		12.00 น.	6	2
		15.00 น.	6	3
		18.00 น.	6	2
		21.00 น.	6	2
		24.00 น.	7	3
3	20/12/61	03.00 น.	8	2
		06.00 น.	10	3
		09.00 น.	11	2
		12.00 น.	15	3
		15.00 น.	12	3
		18.00 น.	10	5
		21.00 น.	10	6
		24.00 น.	12	8
4	21/12/61	03.00 น.	12	9
		06.00 น.	11	9
		09.00 น.	10	9
		12.00 น.	13	10
		15.00 น.	12	14
		18.00 น.	14	17
		21.00 น.	14	16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-2.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
4	21/12/61	24.00 น.	14	15
5	22/12/61	03.00 น.	15	18
		06.00 น.	15	18
		09.00 น.	13	19
		12.00 น.	12	15
		15.00 น.	11	14
		18.00 น.	12	18
		21.00 น.	14	16
		24.00 น.	14	14
6	23/12/61	03.00 น.	13	14
		06.00 น.	12	16
		09.00 น.	12	14
		12.00 น.	12	18
		15.00 น.	12	16
		18.00 น.	10	13
		21.00 น.	13	15
		24.00 น.	12	13
7	24/12/61	03.00 น.	14	17
		06.00 น.	16	20
		09.00 น.	14	15
		12.00 น.	11	15
		15.00 น.	11	16
		18.00 น.	10	10
		21.00 น.	10	11
		24.00 น.	11	12
8	25/12/61	03.00 น.	10	13
		06.00 น.	10	12
		09.00 น.	14	10
		12.00 น.	12	10
		15.00 น.	13	11
		18.00 น.	12	10
		21.00 น.	12	9
		24.00 น.	11	10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-2.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
9	26/12/61	03.00 น.	11	12
		06.00 น.	14	15
		09.00 น.	10	12
		12.00 น.	12	12
		15.00 น.	11	10
		18.00 น.	14	10
		21.00 น.	13	14
		24.00 น.	12	15
10	27/12/61	03.00 น.	10	14
		06.00 น.	10	12
		09.00 น.	11	13
		12.00 น.	10	12
		15.00 น.	12	15
		18.00 น.	10	18
		21.00 น.	10	15
		24.00 น.	11	16
11	28/12/61	03.00 น.	12	14
		06.00 น.	13	12
		09.00 น.	16	13
		12.00 น.	14	10
		15.00 น.	15	12
		18.00 น.	15	15
		21.00 น.	16	16
		24.00 น.	15	12
12	29/12/61	03.00 น.	16	14
		06.00 น.	16	15
		09.00 น.	17	18
		12.00 น.	17	18
		15.00 น.	15	15
		18.00 น.	17	18
		21.00 น.	15	18
		24.00 น.	15	17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-2.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
1	18/12/61	03.00 น.	2	1
		06.00 น.	2	1
		09.00 น.	4	1
		12.00 น.	5	1
		15.00 น.	5	1
		18.00 น.	3	1
		21.00 น.	4	1
		24.00 น.	3	2
2	19/12/61	03.00 น.	3	2
		06.00 น.	3	2
		09.00 น.	4	2
		12.00 น.	5	2
		15.00 น.	2	2
		18.00 น.	3	2
		21.00 น.	4	2
		24.00 น.	5	2
3	20/12/61	03.00 น.	6	2
		06.00 น.	7	2
		09.00 น.	7	4
		12.00 น.	8	5
		15.00 น.	10	6
		18.00 น.	8	5
		21.00 น.	8	6
		24.00 น.	7	7
4	21/12/61	03.00 น.	9	8
		06.00 น.	10	10
		09.00 น.	10	11
		12.00 น.	11	11
		15.00 น.	10	11
		18.00 น.	13	10
		21.00 น.	13	10
		24.00 น.	13	11
5	22/12/61	03.00 น.	13	10
		06.00 น.	10	11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-2.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
5	22/12/61	09.00 น.	10	12
		12.00 น.	12	14
		15.00 น.	12	16
		18.00 น.	11	15
		21.00 น.	13	14
		24.00 น.	10	12
6	23/12/61	03.00 น.	10	11
		06.00 น.	12	12
		09.00 น.	10	12
		12.00 น.	10	12
		15.00 น.	10	13
		18.00 น.	10	12
		21.00 น.	11	11
		24.00 น.	10	12
7	24/12/61	03.00 น.	11	11
		06.00 น.	12	11
		09.00 น.	15	10
		12.00 น.	14	11
		15.00 น.	14	10
		18.00 น.	10	10
		21.00 น.	10	10
		24.00 น.	11	12
8	25/12/61	03.00 น.	11	10
		06.00 น.	10	10
		09.00 น.	12	10
		12.00 น.	12	11
		15.00 น.	14	12
		18.00 น.	13	14
		21.00 น.	10	12
		24.00 น.	12	10
9	26/12/61	03.00 น.	13	11
		06.00 น.	12	12
		09.00 น.	12	12
		12.00 น.	14	10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-2.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
9	26/12/61	15.00 น.	12	11
		18.00 น.	12	11
		21.00 น.	13	12
		24.00 น.	12	11
10	27/12/61	03.00 น.	11	12
		06.00 น.	12	13
		09.00 น.	12	12
		12.00 น.	12	12
		15.00 น.	13	12
		18.00 น.	12	11
		21.00 น.	11	11
		24.00 น.	11	12
11	28/12/61	03.00 น.	12	14
		06.00 น.	12	16
		09.00 น.	14	16
		12.00 น.	15	16
		15.00 น.	15	18
		18.00 น.	15	18
		21.00 น.	15	16
		24.00 น.	14	17
12	29/12/61	03.00 น.	14	16
		06.00 น.	14	15
		09.00 น.	13	16
		12.00 น.	14	15
		15.00 น.	13	16
		18.00 น.	14	18
		21.00 น.	14	18
		24.00 น.	16	16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-3 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 และ 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

ตารางที่ ข-3.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
1	2/1/62	03.00 น.	5	1
		06.00 น.	5	1
		09.00 น.	5	2
		12.00 น.	6	2
		15.00 น.	7	2
		18.00 น.	8	4
		21.00 น.	8	5
		24.00 น.	7	5
2	3/1/62	03.00 น.	6	6
		06.00 น.	6	7
		09.00 น.	9	5
		12.00 น.	9	5
		15.00 น.	8	5
		18.00 น.	10	6
		21.00 น.	10	8
		24.00 น.	10	10
3	4/1/62	03.00 น.	11	12
		06.00 น.	13	10
		09.00 น.	10	15
		12.00 น.	10	14
		15.00 น.	10	13
		18.00 น.	11	12
		21.00 น.	11	15
		24.00 น.	10	15
4	5/1/62	03.00 น.	12	12
		06.00 น.	13	10
		09.00 น.	10	11
		12.00 น.	10	13
		15.00 น.	10	12
		18.00 น.	10	12
		21.00 น.	10	12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-3.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	R
4	5/1/62	24.00 น.	10	13
5	6/1/62	03.00 น.	10	13
		06.00 น.	9	14
		09.00 น.	10	12
		12.00 น.	9	12
		15.00 น.	10	14
		18.00 น.	11	15
		21.00 น.	10	15
		24.00 น.	11	14
6	7/1/62	03.00 น.	9	12
		06.00 น.	9	11
		09.00 น.	11	14
		12.00 น.	10	16
		15.00 น.	10	16
		18.00 น.	11	15
		21.00 น.	13	17
		24.00 น.	13	16
7	8/1/62	03.00 น.	12	15
		06.00 น.	13	18
		09.00 น.	11	13
		12.00 น.	11	15
		15.00 น.	12	16
		18.00 น.	11	15
		21.00 น.	12	15
		24.00 น.	12	14
8	9/1/62	03.00 น.	13	16
		06.00 น.	14	19
		09.00 น.	14	17
		12.00 น.	14	16
		15.00 น.	12	16
		18.00 น.	12	15
		21.00 น.	11	14
		24.00 น.	11	14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-3.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
1	12/1/62	03.00 น.	5	1
		06.00 น.	5	1
		09.00 น.	8	4
		12.00 น.	8	6
		15.00 น.	7	6
		18.00 น.	7	7
		21.00 น.	7	8
		24.00 น.	8	9
2	13/1/62	03.00 น.	7	10
		06.00 น.	10	11
		09.00 น.	14	14
		12.00 น.	14	13
		15.00 น.	15	15
		18.00 น.	15	16
		21.00 น.	14	16
		24.00 น.	14	15
3	14/1/62	03.00 น.	15	10
		06.00 น.	13	10
		09.00 น.	12	10
		12.00 น.	13	9
		15.00 น.	14	10
		18.00 น.	15	16
		21.00 น.	13	17
		24.00 น.	14	18
4	15/1/62	03.00 น.	14	14
		06.00 น.	15	12
		09.00 น.	14	15
		12.00 น.	14	14
		15.00 น.	14	12
		18.00 น.	14	11
		21.00 น.	12	14
		24.00 น.	14	14
5	16/1/62	03.00 น.	16	14
		06.00 น.	15	14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-3.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 210,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
5	17/1/62	09.00 น.	13	15
		12.00 น.	14	16
		15.00 น.	13	17
		18.00 น.	12	15
		21.00 น.	13	14
		24.00 น.	14	15
6	18/1/62	03.00 น.	14	14
		06.00 น.	13	13
		09.00 น.	12	14
		12.00 น.	14	16
		15.00 น.	12	14
		18.00 น.	12	15
		21.00 น.	13	16
		24.00 น.	12	15
7	19/1/62	03.00 น.	14	14
		06.00 น.	13	15
		09.00 น.	16	15
		12.00 น.	14	16
		15.00 น.	13	15
		18.00 น.	13	13
		21.00 น.	14	15
		24.00 น.	13	14
8	20/1/62	03.00 น.	14	11
		06.00 น.	16	15
		09.00 น.	15	16
		12.00 น.	15	17
		15.00 น.	14	15
		18.00 น.	14	12
		21.00 น.	14	14
		24.00 น.	14	16
9	21/1/62	03.00 น.	14	15
		06.00 น.	14	14
		09.00 น.	13	15
		12.00 น.	15	15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-4 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 400 500 และ 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

ภาคผนวก ข-4.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
1	4/12/61	03.00 น.	5	1
		06.00 น.	6	7
		09.00 น.	6	8
		12.00 น.	7	7
		15.00 น.	7	6
		18.00 น.	11	7
		21.00 น.	10	8
		24.00 น.	10	7
2	5/12/61	03.00 น.	10	8
		06.00 น.	14	10
		09.00 น.	12	8
		12.00 น.	11	10
		15.00 น.	14	10
		18.00 น.	13	9
		21.00 น.	13	10
		24.00 น.	12	9
3	6/12/61	03.00 น.	10	8
		06.00 น.	13	9
		09.00 น.	11	9
		12.00 น.	10	12
		15.00 น.	10	12
		18.00 น.	9	14
		21.00 น.	10	13
		24.00 น.	12	13
4	7/12/61	03.00 น.	14	16
		06.00 น.	15	15
		09.00 น.	16	18
		12.00 น.	16	18
		15.00 น.	12	16
		18.00 น.	15	20
		21.00 น.	15	16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-4.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
4	7/12/61	24.00 น.	13	14
5	8/12/61	03.00 น.	12	15
		06.00 น.	14	14
		09.00 น.	13	15
		12.00 น.	13	14
		15.00 น.	12	14
		18.00 น.	14	20
		21.00 น.	14	16
		24.00 น.	12	14
6	9/12/61	03.00 น.	12	18
		06.00 น.	12	14
		09.00 น.	12	16
		12.00 น.	11	17
		15.00 น.	10	18
		18.00 น.	14	19
		21.00 น.	15	18
		24.00 น.	14	17
7	10/12/61	03.00 น.	12	15
		06.00 น.	13	16
		09.00 น.	13	16
		12.00 น.	12	16
		15.00 น.	12	15
		18.00 น.	12	16
		21.00 น.	13	15
		24.00 น.	14	18
8	11/12/61	03.00 น.	13	18
		06.00 น.	14	19
		09.00 น.	15	24
		12.00 น.	15	22
		15.00 น.	14	18
		18.00 น.	14	18
		21.00 น.	12	15
		24.00 น.	14	15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-4.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
9	12/12/61	03.00 น.	14	18
		06.00 น.	14	18
		09.00 น.	15	13
		12.00 น.	17	12
		15.00 น.	16	13
		18.00 น.	16	25
		21.00 น.	17	20
		24.00 น.	16	18
10	13/12/61	03.00 น.	15	20
		06.00 น.	16	18
		09.00 น.	16	17
		12.00 น.	15	18
		15.00 น.	14	17
		18.00 น.	17	18
		21.00 น.	16	18
		24.00 น.	15	20
11	14/12/61	03.00 น.	15	20
		06.00 น.	16	18
		09.00 น.	16	17
		12.00 น.	15	18
		15.00 น.	14	17
		18.00 น.	17	18
		21.00 น.	16	18
		24.00 น.	15	20
12	15/12/61	03.00 น.	14	18
		06.00 น.	13	16
		09.00 น.	13	17
		12.00 น.	13	18
		15.00 น.	14	15
		18.00 น.	15	17
		21.00 น.	15	18
		24.00 น.	14	16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-4.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
1	4/12/61	03.00 น.	5	1
		06.00 น.	5	6
		09.00 น.	10	8
		12.00 น.	11	10
		15.00 น.	12	11
		18.00 น.	12	10
		21.00 น.	12	11
		24.00 น.	12	12
2	5/12/61	03.00 น.	13	15
		06.00 น.	14	16
		09.00 น.	10	13
		12.00 น.	10	10
		15.00 น.	10	12
		18.00 น.	11	15
		21.00 น.	10	15
		24.00 น.	11	14
3	6/12/61	03.00 น.	13	15
		06.00 น.	14	16
		09.00 น.	14	18
		12.00 น.	14	16
		15.00 น.	15	22
		18.00 น.	13	16
		21.00 น.	15	15
		24.00 น.	12	15
4	7/12/61	03.00 น.	14	16
		06.00 น.	15	18
		09.00 น.	16	20
		12.00 น.	16	20
		15.00 น.	13	19
		18.00 น.	13	18
		21.00 น.	13	19
		24.00 น.	13	20
5	8/12/61	03.00 น.	14	20
		06.00 น.	14	20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-4.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
5	8/12/61	09.00 น.	15	19
		12.00 น.	15	20
		15.00 น.	18	20
		18.00 น.	15	20
		21.00 น.	14	20
		24.00 น.	12	18
6	9/12/61	03.00 น.	12	20
		06.00 น.	12	15
		09.00 น.	12	15
		12.00 น.	15	18
		15.00 น.	16	20
		18.00 น.	19	20
		21.00 น.	18	20
		24.00 น.	15	18
7	10/12/61	03.00 น.	16	19
		06.00 น.	15	20
		09.00 น.	15	13
		12.00 น.	13	13
		15.00 น.	15	14
		18.00 น.	12	15
		21.00 น.	14	13
		24.00 น.	14	13
8	12/12/61	03.00 น.	15	15
		06.00 น.	15	12
		09.00 น.	16	14
		12.00 น.	15	13
		15.00 น.	14	13
		18.00 น.	14	14
		21.00 น.	13	14
		24.00 น.	13	14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-5 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 400 500 และ 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

ภาคผนวก ข-5.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
1	18/12/61	03.00 น.	5	1
		06.00 น.	5	3
		09.00 น.	7	4
		12.00 น.	9	6
		15.00 น.	9	5
		18.00 น.	8	4
		21.00 น.	8	2
		24.00 น.	7	4
2	19/12/61	03.00 น.	6	6
		06.00 น.	6	7
		09.00 น.	8	8
		12.00 น.	10	10
		15.00 น.	15	12
		18.00 น.	15	16
		21.00 น.	14	17
		24.00 น.	14	17
3	20/12/61	03.00 น.	15	17
		06.00 น.	17	25
		09.00 น.	17	20
		12.00 น.	16	18
		15.00 น.	15	17
		18.00 น.	14	18
		21.00 น.	15	17
		24.00 น.	14	18
4	21/12/61	03.00 น.	13	17
		06.00 น.	12	16
		09.00 น.	15	16
		12.00 น.	15	15
		15.00 น.	14	15
		18.00 น.	16	16
		21.00 น.	15	18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-5.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	R
4	21/12/61	24.00 น.	14	17
5	22/12/61	03.00 น.	14	16
		06.00 น.	15	20
		09.00 น.	13	16
		12.00 น.	13	17
		15.00 น.	12	14
		18.00 น.	18	25
		21.00 น.	17	24
		24.00 น.	17	23
6	23/12/61	03.00 น.	17	24
		06.00 น.	16	18
		09.00 น.	17	20
		12.00 น.	16	20
		15.00 น.	17	20
		18.00 น.	18	20
		21.00 น.	16	16
		24.00 น.	16	17
7	24/12/61	03.00 น.	16	15
		06.00 น.	18	16
		09.00 น.	17	16
		12.00 น.	17	18
		15.00 น.	17	17
		18.00 น.	17	13
		21.00 น.	16	14
		24.00 น.	15	16
8	25/12/61	03.00 น.	14	12
		06.00 น.	15	14
		09.00 น.	19	20
		12.00 น.	15	16
		15.00 น.	14	16
		18.00 น.	14	17
		21.00 น.	14	14
		24.00 น.	12	16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-5.1 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	R
9	27/12/61	03.00 น.	13	20
		06.00 น.	17	23
		09.00 น.	16	20
		12.00 น.	15	23
		15.00 น.	13	18
		18.00 น.	15	22
		21.00 น.	14	16
		24.00 น.	13	15
10	28/12/61	03.00 น.	14	18
		06.00 น.	14	15
		09.00 น.	15	16
		12.00 น.	17	20
		15.00 น.	16	18
		18.00 น.	15	17
		21.00 น.	16	18
		24.00 น.	15	17
11	29/12/61	03.00 น.	14	18
		06.00 น.	18	22
		09.00 น.	17	20
		12.00 น.	17	18
		15.00 น.	14	18
		18.00 น.	17	19
		21.00 น.	16	18
		24.00 น.	16	17
12	30/12/61	03.00 น.	14	18
		06.00 น.	18	22
		09.00 น.	17	20
		12.00 น.	17	18
		15.00 น.	14	18
		18.00 น.	17	19
		21.00 น.	16	18
		24.00 น.	16	17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-5.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	B
1	18/12/61	03.00 น.	5	1
		06.00 น.	5	1
		09.00 น.	5	1
		12.00 น.	5	1
		15.00 น.	5	1
		18.00 น.	5	1
		21.00 น.	6	1
		24.00 น.	5	1
2	19/12/61	03.00 น.	5	2
		06.00 น.	7	4
		09.00 น.	6	7
		12.00 น.	6	7
		15.00 น.	7	8
		18.00 น.	12	10
		21.00 น.	11	10
		24.00 น.	10	10
3	20/12/61	03.00 น.	9	8
		06.00 น.	11	8
		09.00 น.	12	9
		12.00 น.	11	10
		15.00 น.	10	9
		18.00 น.	10	10
		21.00 น.	10	12
		24.00 น.	11	12
4	21/12/61	03.00 น.	9	13
		06.00 น.	9	14
		09.00 น.	10	12
		12.00 น.	11	11
		15.00 น.	12	10
		18.00 น.	12	11
		21.00 น.	11	10
		24.00 น.	10	10
5	22/12/61	03.00 น.	10	12
		06.00 น.	13	14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข-5.2 ผลของความเร็วใบพัดสำหรับการกวนช้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำดิบ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ต่อ)

No.	Date	Time	% Sludge	
			R	R
5	22/12/61	09.00 น.	11	15
		12.00 น.	12	20
		15.00 น.	13	15
		18.00 น.	12	13
		21.00 น.	11	15
		24.00 น.	12	15
6	23/12/61	03.00 น.	10	11
		06.00 น.	11	12
		09.00 น.	10	13
		12.00 น.	11	22
		15.00 น.	11	14
		18.00 น.	12	15
		21.00 น.	11	16
		24.00 น.	13	16
7	24/12/61	03.00 น.	12	14
		06.00 น.	11	15
		09.00 น.	10	12
		12.00 น.	11	14
		15.00 น.	13	11
		18.00 น.	15	13
		21.00 น.	15	15
		24.00 น.	14	16
8	25/12/61	03.00 น.	13	12
		06.00 น.	12	14
		09.00 น.	12	15
		12.00 น.	14	16
		15.00 น.	16	18
		18.00 น.	15	15
		21.00 น.	13	12
		24.00 น.	14	15
9	26/12/61	03.00 น.	13	14
		06.00 น.	13	15
		09.00 น.	13	12
		12.00 น.	12	12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข-6 การคำนวณค่าความเร็วแกรเดียนท์ ระยะเวลากักเก็บน้ำ และตัวแปร G•t

ตัวอย่างการคำนวณค่าความเร็วแกรเดียนท์ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ใบพัด 500 รอบต่อนาที และอัตราการไหล 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

1. การคำนวณค่าความเร็วแกรเดียนท์ในช่วงการกวนช้า (Flocculation) ซึ่งในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน ใช้ใบพัดแบบเทอร์ไบน์ (Turbine)

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

G = ความเร็วแกรเดียนท์ (วินาที$^{-1}$)

P = กำลังจากการกวน (วัตต์)

μ = ความหนืดของน้ำ (กิโลกรัม/เมตร-วินาที)

V = ปริมาตรของถังกวน (ลูกบาศก์เมตร)

$$P = 2\pi nT$$

T = ทอร์คของใบพัด (นิวตัน-เมตร)

n = ความเร็วรอบใบพัด (รอบ/วินาที)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$P = N_p \rho n^3 d^5$$

N_p = จำนวนกำลังของใบพัด

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (เมตร)

$R_e = d^2 n \rho / \mu$

R_e = ตัวเลขเรย์โนลด์

n = ความเร็วรอบใบพัด (รอบ/วินาที)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) = 995.7 ที่ 30 ℃

μ = ความหนืดของน้ำ (กิโลกรัม/เมตร-วินาที) = 0.000798 ที่ 30 ℃

จาก ความเร็วรอบมอเตอร์ใบพัด 500 รอบต่อนาที จะได้ ความเร็วรอบใบพัดจริง 48 วินาที/รอบ (ความเร็วใบพัด = 0.0208 รอบ/วินาที , เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด = 7.5 เมตร)

$R_e = (7.5 \times 7.5 \times 0.0208 \times 995.7) / 0.000798$

$R_e = 1{,}462{,}200$

ดังนั้น ตัวเลขเรย์โนลด์ > 1,000 ==> **Turbulent**

จาก $P = N_p \rho n^3 d^5$

(ปริมาตรในบริเวณทำปฏิกิริยา = 1,250 m^3 , จำนวนกำลังของใบพัด = 10)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$P = (10 \times 995.7 \times 0.0208^3 \times 7.5^5)$

$P = 2136.54$ วัตต์

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

$G = \sqrt{\frac{2{,}136.54}{0.000798 \times 1{,}250}}$

$G = 46.34$ วินาที$^{-1}$

2. คำนวณระยะเวลากักเก็บในบริเวณทำปฏิกิริยา และค่า G•t

อัตราการไหล, Q	=	200,000	ลูกบาศก์เมตร/วัน
	=	2.31	ลูกบาศก์เมตร/วินาที
ปริมาตรถังกวน, V	=	1,250	ลูกบาศก์เมตร
เวลาในบริเวณทำปฏิกิริยา, t	=	1,250/2.31	วินาที
	=	538.66	วินาที
	=	8.98	นาที
G•t	=	46.34 x 538.6	
	=	24,960.46	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ค

เอกสารข้อมูลผลการทดลอง

การศึกษาผลของความเข้มข้นของตะกอนในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-1 ผลของปริมาณตะกอนในถังตกตะกอน โดยใช้สารส้มน้ำ

ภาคผนวก ค-1.1 ผลของปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 1-10 โดยใช้สารส้มน้ำ

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
1	6	3	17	2.1	87.65
2	6	5	21	1.8	91.43
3	6	6	21	1.9	90.95
4	9	5	22	2.7	87.73
5	9	5	22	1.9	91.36
6	9	7	24	2.1	91.25
7	9	7	26	2.8	89.23
8	9	5	21	2.1	90.00
9	5	3	21	1.9	90.95
10	5	3	23	1.7	92.61
11	6	2	18	2.0	88.89
12	7	2	25	2.7	89.20
13	7	1	21	2.0	90.48
14	8	1	20	2.6	87.00
15	6	2	20	1.9	90.50
16	7	2	24	2.0	91.67
17	6	3	19	1.6	91.58
18	7	5	24	2.3	90.42
19	6	2	20	2.3	88.50
20	10	5	20	2.5	87.50
21	10	1	21	2.2	89.52
22	9	1	24	2.7	88.75
23	11	1	20	2.1	89.50
24	10	1	23	2.5	89.13
25	5	1	21	2.1	90.00
26	7	1	20	2.1	89.50
27	8	1	24	2.3	90.42
28	7	1	26	2.5	90.38
29	8	1	23	2.4	89.57
30	5	2	20	2.7	86.50
31	5	2	22	2.3	89.55
32	6	2	19	2.6	86.32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-1.1 ผลของปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 1-10 โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
33	5	2	21	2.5	88.10
34	4	1	27	2.3	91.48
35	4	2	21	2.9	86.19
36	3	1	22	3.2	85.45
37	4	1	22	3.3	85.00
38	7	2	19	4.1	78.42
39	6	2	21	3.3	84.29
40	6	2	23	2.9	87.39
41	8	5	21	2.8	86.67
42	9	6	24	2.9	87.92
43	5	1	23	2.9	87.39
44	5	1	20	2.8	86.00
45	5	1	23	3.1	86.52
46	6	1	23	3.1	86.52
47	7	2	22	2.9	86.82
48	5	1	25	2.6	89.60
49	6	2	23	2.3	90.00
50	7	2	21	2.1	90.00
51	2	1	25	2.5	89.97
52	3	3	24	2.3	90.42
53	2	1	23	2.3	90.00
54	2	1	26	2.5	90.38
55	2	1	26	2.1	91.92
56	5	1	22	4.4	80.00
57	6	1	22	1.8	91.82
58	6	1	21	1.7	91.90
59	5	1	18	1.5	91.67
60	6	1	22	2	90.91
61	5	1	23	2	91.30
62	6	2	22	2.4	89.09
63	5	2	19	1.9	90.00
64	6	2	18	2.2	87.78
65	5	2	16	1.7	89.38
66	6	3	22	2.1	90.45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-1.1 ผลของปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 1-10 โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
67	5	3	23	1.5	93.48
68	7	3	21	3.5	83.33
69	10	13	22	1.2	94.55
70	9	10	23	3.1	86.52
71	10	10	26	1.8	93.08
72	10	10	24	2.3	90.42
73	10	11	20	1.5	92.50
74	10	13	20	2.1	89.50
75	8	10	22	1.8	91.82
76	9	13	20	2.0	90.00
77	10	16	22	2.6	88.18
78	9	13	22	2.9	86.82
79	9	14	18	1.9	89.44
80	10	16	20	3.2	84.00
81	10	18	23	2.3	90.00
82	9	17	21	2.0	90.48
83	10	17	23	1.3	94.35
84	8	2	23	1.9	91.74
85	9	2	28	2.1	92.50
86	9	2	22	2.3	89.55
87	7	1	26	2.4	90.77
88	6	1	21	1.7	91.90
89	7	3	23	2.7	88.26
90	8	1	23	2.3	90.00
91	9	1	27	1.0	96.30
92	8	1	25	1.8	92.80
93	9	1	24	1.8	92.50
94	9	1	22	2.3	89.55
95	9	6	23	2.3	90.00
96	9	7	23	2.0	91.30
97	8	5	23	1.5	93.48
98	9	6	22	1.4	93.64
99	9	7	23	2.1	90.87
100	10	16	22	1.5	93.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-1.1 ผลของปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 1-10 โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
101	10	13	21	1.7	91.90
102	10	12	26	2.9	88.85
103	10	5	21	1.8	91.43
104	10	14	24	2.7	88.75
105	9	14	25	3.2	87.20
106	9	15	27	2.9	89.26
107	8	16	28	3.0	89.29
108	10	16	25	3.2	87.20
109	2	2	23	2.5	89.13
110	3	2	23	2.1	90.87
111	2	2	25	2.6	89.60
112	4	3	26	3.4	86.92
113	5	3	25	2.8	88.80
114	5	5	23	3.1	86.52
115	5	6	23	3.2	86.09
116	6	5	23	3.6	84.35
117	2	2	22	3.1	85.91
118	2	1	25	3.6	85.60
119	2	2	24	2.5	89.58
120	2	3	23	3.3	85.65
121	3	2	22	3.4	84.55
122	2	2	25	3.4	86.40
123	6	1	22	3.1	85.91
124	5	1	25	2.9	88.40
125	6	1	24	3	87.50
126	5	3	23	2.0	91.30
127	6	3	23	3.4	85.22
128	7	3	21	2.6	87.62
129	5	3	21	1.9	90.95
130	7	3	25	2.6	89.60
131	8	5	25	2.8	88.80
132	6	5	22	3.2	85.45
133	4	1	20	2.6	87.00
134	5	1	20	2.6	87.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-1.1 ผลของปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 1-10 โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
135	5	2	18	1.8	90.00
136	5	3	23	3.1	86.52
137	5	4	22	2.4	89.09
138	5	3	22	3.2	85.45
139	6	3	23	4.4	80.87
140	6	3	22	2.1	90.45
141	7	3	22	2.3	89.55
142	7	4	26	3.0	88.46
143	7	4	21	2.5	88.10
144	7	5	22	2.7	87.73
145	2	1	24	3.2	86.67
146	4	1	23	2.6	88.70
147	4	1	24	2.7	88.75
148	4	1	22	3.1	85.91
149	5	1	24	2.4	90.00
150	5	2	23	5.7	75.22
151	5	2	26	2.8	89.23
152	3	2	26	2.3	91.15
153	4	3	23	1.8	92.17
154	4	3	26	1.9	92.69
155	5	2	19	2.1	88.95
156	6	2	22	1.8	91.82
157	6	2	19	2.3	87.89
158	7	2	27	1.7	93.70
159	5	1	21	1.9	90.95
160	4	1	23	3.7	83.91
161	5	1	20	3.5	82.50
162	6	1	20	3.5	82.50
163	4	1	20	3.1	84.50
164	6	1	23	4.7	79.57
165	6	1	23	5.0	78.26
166	5	1	24	4.3	82.08
167	7	1	23	4.5	80.43
168	5	1	20	4.2	79.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-1.2 ผลของปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 11-15 โดยใช้สารส้มน้ำ

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
1	12	12	17	2.3	86.47
2	13	13	21	2.7	87.14
3	11	12	21	3.5	83.33
4	12	12	20	2.5	87.50
5	11	12	21	3.1	85.24
6	11	12	19	2.7	85.79
7	12	12	22	2.3	89.55
8	12	9	22	3.4	84.55
9	11	7	22	2.8	87.27
10	11	8	24	2.8	88.33
11	12	9	26	3.0	88.46
12	14	14	22	2.5	88.64
13	14	15	20	3.5	82.50
14	12	15	21	2.9	86.19
15	11	1	21	2.5	88.10
16	11	1	23	2.4	89.57
17	13	1	18	1.3	92.78
18	14	2	25	2.2	91.20
19	12	15	21	2.4	88.57
20	13	16	20	3.2	84.00
21	14	12	20	2.0	90.00
22	14	14	24	1.9	92.08
23	12	15	19	1.8	90.53
24	13	16	24	2.6	89.13
25	15	5	20	3.9	80.50
26	11	5	21	2.4	88.57
27	12	5	24	2.9	87.92
28	11	5	20	2.5	87.50
29	12	10	23	3.4	85.22
30	11	9	21	2.5	88.10
31	12	15	20	2.4	88.00
32	11	14	24	3.7	84.58
33	13	10	26	2.3	91.15
34	12	10	22	2.2	90.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-1.2 ผลของปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 11-15 โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
35	14	12	25	2.9	88.40
36	13	11	23	2.5	89.13
37	12	12	21	2.2	89.52
38	15	20	25	3.2	87.20
39	14	14	24	3.4	85.83
40	14	14	23	2.0	91.30
41	12	18	22	1.7	92.27
42	13	18	21	2.0	90.48
43	11	18	18	1.6	91.11
44	12	16	22	2.7	87.73
45	15	15	23	1.9	91.74
46	14	14	22	2.5	88.64
47	12	13	19	1.8	90.53
48	11	12	18	1.8	90
49	12	13	16	1.7	89.38
50	14	15	22	1.7	92.27
51	13	16	23	2.1	90.87
52	13	15	21	2.4	88.57
53	14	14	22	1.6	92.73
54	11	16	22	2.2	90.00
55	11	17	20	2.8	86.00
56	14	18	23	2.0	91.30
57	15	16	21	1.7	91.90
58	14	15	23	1.5	93.48
59	12	15	19	1.3	93.16
60	11	13	22	2.1	90.45
61	11	14	23	2.3	90.00
62	12	12	23	2.7	88.26
63	11	12	28	2.0	92.86
64	12	13	22	2.4	89.09
65	13	13	23	3.2	86.09
66	13	13	27	3.0	88.89
67	12	13	25	2.2	91.20
68	14	14	24	2.3	90.42

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-1.2 ผลของปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 11-15 โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
69	12	15	22	3.8	82.73
70	11	18	23	3.1	86.52
71	11	15	22	1.9	91.36
72	12	16	24	3.3	86.25
73	11	15	21	2.6	87.62
74	12	16	24	3.1	87.08
75	12	14	21	3.1	85.24
76	11	17	24	2.1	91.25
77	12	16	21	2.8	86.67
78	12	16	24	2.9	87.92
79	13	15	21	2.4	88.57
80	14	15	23	1.8	92.17
81	11	16	24	3.7	84.58
82	11	15	25	3.3	86.80
83	11	16	21	3.1	85.24
84	12	14	18	2.9	83.89
85	14	17	22	3.6	83.64
86	15	18	22	2.9	86.82
87	15	18	20	2	90.00
88	13	19	20	3	85.00
89	11	14	19	3.6	81.05
90	12	18	21	3.2	84.76
91	14	16	21	2.7	87.14
92	13	14	25	2.4	90.40
93	12	16	20	3.2	84.00
94	12	14	21	2.9	86.19
95	12	16	19	3.1	83.68
96	11	13	17	2.6	84.71
97	13	15	17	2.2	87.06
98	14	17	17	1.7	90.00
99	15	20	22	2.8	87.27
100	14	15	21	2.3	89.05
101	11	16	20	3.2	84.00
102	11	10	17	2.8	83.53

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-1.2 ผลของปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 11-15 โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
103	11	11	17	2.1	87.65
104	11	13	16	1.8	88.75
105	11	12	17	1.9	88.82
106	14	10	20	2.3	88.50
107	13	11	21	2.9	86.19
108	12	10	18	2.6	85.56
109	12	9	17	2.8	83.53
110	11	12	15	2.6	82.67
111	14	15	15	2.1	86.00
112	11	12	17	2.6	84.71
113	14	10	20	3	85.00
114	13	14	21	2.3	89.05
115	11	14	19	2.2	88.42
116	11	12	18	2.7	85.00
117	11	13	18	2.2	87.78
118	12	15	16	2.1	86.88
119	12	18	16	2.2	86.25
120	12	15	15	2.6	82.67
121	12	14	16	1.6	90.00
122	13	12	18	1.9	89.44
123	15	12	18	3.8	78.89
124	15	15	17	1.9	88.82
125	13	14	22	2.4	89.09
126	15	14	19	2.2	88.42
127	15	16	16	2.3	85.63
128	14	15	18	2.6	85.56
129	12	14	19	3.1	83.68
130	13	15	19	1.6	91.58
131	12	12	17	1.6	90.59
132	13	13	19	2.6	86.32
133	12	13	16	1.9	88.13
134	11	13	19	3.1	83.68
135	11	15	17	2	88.24
136	12	15	19	3.1	83.68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-1.2 ผลของปริมาณตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 11-15 โดยใช้สารส้มน้ำ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
137	13	16	19	1.2	93.68
138	15	18	22	1.8	91.82
139	14	16	17	1.9	88.82
140	15	24	18	1.4	92.22
141	15	20	20	2.1	89.50
142	15	17	22	1.9	91.36
143	14	16	25	1.6	93.60
144	14	15	22	1.9	91.36
145	13	12	19	1.9	90.00
146	14	12	15	1.9	87.33
147	12	13	16	2.4	85.00
148	12	15	17	1.9	88.82
149	15	14	20	1.5	92.50
150	15	15	18	1.9	89.44
151	11	13	17	1.9	88.82
152	12	14	16	2.5	84.38
153	12	11	17	2.9	82.94
154	15	10	20	2.7	86.50
155	14	10	21	3.5	83.33
156	11	10	15	3.8	74.67
157	12	10	17	3.4	80.00
158	14	12	17	3	82.35
159	13	11	19	3.8	80.00
160	12	12	18	3	83.33
161	12	12	18	2.4	86.67
162	12	11	16	2.5	84.38
163	12	11	16	2.1	86.88
164	13	12	15	2.9	80.67
165	11	12	16	3.1	80.63
166	12	13	18	3.1	82.78
167	12	12	20	2	90.00
168	13	12	18	4.0	77.78
169	12	11	17	2.8	83.53
170	11	11	20	3.1	84.50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-2 ผลของปริมาณตะกอนในถังตกตะกอน โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

ภาคผนวก ค-2.1 ผลของเข้มข้นของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 10-15 โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
1	13	16	17	1.5	91.18
2	14	16	21	2.5	88.10
3	15	19	20	2.6	87.00
4	15	19	20	1.9	90.50
5	13	17	21	2.1	90.00
6	12	15	19	1.5	92.11
7	12	19	22	2.5	88.64
8	14	20	22	1.5	93.18
9	13	18	22	1.8	91.82
10	12	14	20	1.7	91.50
11	15	18	21	2	90.48
12	14	15	21	1.9	90.95
13	14	16	23	1.5	93.48
14	15	16	18	1.7	90.56
15	15	16	21	1.4	93.33
16	14	16	20	1.1	94.50
17	15	20	20	1.5	92.45
18	14	17	24	1.3	94.58
19	13	15	19	1.1	94.21
20	13	17	21	1.8	91.43
21	12	16	24	1.7	92.92
22	13	15	20	1.8	91.00
23	15	17	23	1.7	92.61
24	13	18	21	2.1	90.00
25	13	18	20	1.3	93.50
26	14	16	22	1.6	92.73
27	15	17	19	2	89.47
28	14	16	21	1.6	92.38
29	13	16	27	1.9	92.96
30	12	16	21	1.9	90.95
31	12	15	22	2.0	90.91
32	11	14	22	1.9	91.36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ค-2.1 ผลของเข้มข้นของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 10-15 โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
33	11	16	19	1.9	90.00
34	10	13	21	1.7	91.90
35	10	12	23	2.1	90.87
36	12	13	21	1.5	92.86
37	13	12	24	2.4	90.00
38	15	13	23	2.3	90.00
39	14	14	20	2.5	87.50
40	10	2	23	2.0	91.30
41	10	2	23	2.2	90.43
42	11	3	22	1.8	91.82
43	11	4	25	1.8	92.80
44	11	6	23	2.1	90.87
45	10	7	21	1.5	92.86
46	10	1	25	2.3	90.80
47	10	1	24	1.2	95.00
48	10	1	23	2.5	89.13
49	10	1	26	2.4	90.77
50	10	3	22	2.4	89.09
51	10	5	19	1.3	93.16
52	10	5	18	1.4	92.22
53	10	4	16	1.2	92.50
54	11	5	22	1.6	92.73
55	14	3	23	1.7	92.61
56	12	1	21	3.2	84.76
57	11	1	20	1.5	92.50
58	12	2	20	1.6	92.00
59	12	2	17	1.1	93.53
60	13	3	16	1.4	91.25
61	13	6	22	1.2	94.55
62	11	.	23	1.3	94.35
63	13	2	26	1.7	93.46
64	12	2	24	1.2	95.00
65	11	3	20	1.2	94.00
66	12	3	20	1.2	94.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-2.1 ผลของเข้มข้นของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 10-15 โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
67	11	5	22	1.5	93.18
68	11	3	20	2	90.00
69	12	3	22	1.4	93.64
70	11	5	22	1.3	94.09
71	15	5	18	1.8	90.00
72	15	7	22	1.2	94.55
73	13	8	23	1.7	92.61
74	14	9	21	1.3	93.81
75	15	10	23	1.5	93.48
76	14	12	19	1.4	92.63
77	13	12	22	2.2	90.00
78	14	15	23	1.4	93.91
79	14	14	23	1.7	92.61
80	12	15	28	1.2	95.71
81	11	14	22	1.1	95.00
82	10	15	26	1.3	95.00
83	10	13	21	1.8	91.43
84	10	13	23	2.9	87.39
85	15	12	25	1.2	95.20
86	12	1	23	1.5	93.48
87	11	2	23	1.5	93.48
88	10	4	23	1.2	94.78
89	10	6	22	1.1	95.00
90	10	7	23	1.1	95.22
91	12	8	22	1.2	94.55
92	12	8	24	2	91.67
93	10	6	21	1.4	93.33
94	10	11	24	1.5	93.75
95	11	12	21	1.5	92.86
96	12	12	26	1.8	93.08
97	11	13	24	2	91.67
98	10	11	21	1.8	91.43
99	12	6	23	2.0	91.30
100	12	7	24	1.8	92.50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-2.1 ผลของเข้มข้นของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 10-15 โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
101	12	8	21	1.6	92.38
102	13	9	23	1	95.65
103	11	7	24	1.3	94.58
104	11	7	24	1.3	94.58
105	13	3	25	1.7	93.20
106	13	10	27	2	92.59
107	14	3	28	1.2	95.71
108	15	3	25	1.4	94.40
109	14	4	24	2.6	89.17
110	13	1	21	1.5	92.86
111	11	1	23	1.3	94.35
112	10	1	23	0.9	96.09
113	10	2	25	1.1	95.60
114	11	1	26	1.5	94.23
115	12	1	25	1.6	93.60
116	11	3	23	1.5	93.48
117	15	18	25	1.9	92.40
118	15	15	24	2.8	88.33
119	14	1	22	1.6	92.73
120	14	2	25	1.2	95.20
121	11	2	22	1.5	93.18
122	13	2	25	1.8	92.80
123	11	3	24	1.8	92.50
124	10	4	23	1.8	92.17
125	15	18	22	1.5	93.18
126	14	19	20	1.2	94.00
127	13	16	20	1.2	94.00
128	13	15	18	1.2	93.33
129	15	16	23	1.9	91.74
130	13	15	22	1.3	94.09
131	11	14	22	1.4	93.64
132	14	18	23	1.8	92.17
133	13	16	22	1.2	94.55
134	14	16	22	1.4	93.64

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-2.1 ผลของเข้มข้นของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 10-15 โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
135	12	13	23	2	91.30
136	14	18	23	0.9	96.09
137	13	17	26	1.2	95.38
138	12	12	22	1.3	94.09
139	10	12	19	1.7	91.05
140	10	13	27	0.9	96.67
141	12	18	21	3.0	85.71
142	12	15	20	2.3	88.50
143	13	15	20	3.2	84.00
144	10	14	21	3.9	81.43
145	11	14	19	3.5	81.58
146	13	20	22	3.4	84.55
147	12	19	22	2.9	86.82
148	12	17	22	3.3	85.00
149	13	17	24	2.4	90.00
150	12	18	26	2.4	90.77
151	12	19	24	1.2	95.00
152	11	15	22	3.5	84.09
153	11	14	23	3.8	83.48
154	15	17	21	3.4	83.81
155	12	18	18	1.7	90.56
156	13	21	25	4.0	84.00
157	12	17	21	2.8	86.67
158	12	16	20	2.1	89.50
159	10	13	20	2.2	89.00
160	10	14	24	2.0	91.67
161	10	14	19	2.3	87.89
162	13	17	20	3.4	83.00
163	12	17	20	2.7	86.50
164	13	21	21	2.5	88.10
165	12	19	24	2.4	90.00
166	13	16	20	2.6	87.00
167	14	16	23	2.6	88.70
168	15	17	21	2.3	89.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-2.2 ผลของเข้มข้นของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 16-20 โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
1	20	22	21	1.9	90.95
2	16	22	24	2.1	91.25
3	16	21	26	1.9	92.69
4	16	22	22	1.5	93.18
5	16	23	23	1.6	93.04
6	16	17	25	1.3	94.80
7	18	20	24	1.9	92.08
8	16	20	20	1.7	91.50
9	18	19	20	2	90.00
10	18	25	24	1.8	92.50
11	17	20	26	1.5	94.23
12	17	18	23	1.3	94.35
13	17	19	20	1.5	92.50
14	17	7	20	1.5	92.50
15	17	11	22	1.5	93.18
16	18	20	23	2.1	90.87
17	16	18	27	1.3	95.19
18	16	12	25	1.2	95.20
19	16	11	24	1.2	95.00
20	16	14	22	1.8	91.82
21	16	18	23	1.7	92.61
22	18	18	23	2.2	90.43
23	16	17	22	1.6	92.73
24	17	18	23	1.4	93.91
25	16	19	23	3.4	85.22
26	16	20	21	2.2	89.52
27	20	22	21	1	95.24
28	19	23	22	1.7	92.27
29	20	25	24	1.5	93.75
30	18	20	23	1.3	94.35
31	16	16	24	1.5	93.75
32	18	24	26	1.4	94.62
33	18	20	26	1.3	95.00
34	18	20	24	2.7	88.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค-2.2 ผลของเข้มข้นของตะกอนในบริเวณทำปฏิกิริยาของถังตกตะกอนที่ร้อยละ 16-20 โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (ต่อ)

No.	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. Removal (%)
	R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
35	16	18	24	1.7	92.92
36	16	13	21	1.9	90.95
37	20	25	24	1.8	92.50
38	19	20	26	2.3	91.15
39	16	20	25	1.8	92.80
40	16	18	23	2.2	90.43
41	16	17	20	1.9	90.50
42	16	17	21	2.2	89.52
43	17	18	20	2.3	88.50
44	16	18	20	2.1	89.50
45	16	18	23	2.2	90.43
46	16	17	20	1.9	90.50
47	17	18	20	2.3	88.50
48	16	18	20	2.1	89.50
49	18	20	23	3.5	84.78
50	18	22	20	2.4	88.00
51	15	20	21	2.4	88.57
52	16	19	20	1.8	91.00
53	16	18	20	1.8	91.00
54	15	20	23	1.8	92.17
55	16	16	17	1.5	91.18
56	16	14	22	2.1	90.45
57	17	14	23	1.6	93.04
58	16	13	19	2.0	89.47
59	16	12	20	1.8	91.00
60	18	18	19	3.2	83.16
61	20	18	18	3.0	83.33
62	20	16	20	3.1	84.50
63	16	18	20	2.6	87.00
64	16	20	19	2.5	86.84
65	18	22	15	2.7	82.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง

เอกสารข้อมูลผลการทดลอง

การวิเคราะห์การดำเนินงานควบคุมถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน ของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้สารส้มน้ำ

ภาคผนวก ง-1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้สารส้มน้ำ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
1	12/3/62	03.00 น.	5	2	17	2.1	87.65
		06.00 น.	6	3	23	2.2	90.43
		09.00 น.	5	4	24	1.9	92.08
		12.00 น.	5	3	-	-	-
		15.00 น.	5	1	22	1.9	91.36
		18.00 น.	6	1	25	1.9	92.40
		21.00 น.	6	1	24	2.0	91.67
		24.00 น.	6	1	-	-	-
2	13/3/62	03.00 น.	8	4	21	1.4	93.33
		06.00 น.	9	4	25	2.1	91.60
		09.00 น.	8	4	25	1.7	93.20
		12.00 น.	9	4	-	-	
		15.00 น.	9	4	27	1.7	93.70
		18.00 น.	9	8	24	2.0	91.67
		21.00 น.	10	11	26	2.1	91.92
		24.00 น.	11	11	-	-	-
3	14/3/62	03.00 น.	11	14	21	10	95.24
		06.00 น.	11	13	25	1.6	93.60
		09.00 น.	14	16	25	1.6	93.60
		12.00 น.	12	15	-	-	-
		15.00 น.	14	16	21	1.9	90.95
		18.00 น.	15	17	21	1.9	90.95
		21.00 น.	14	16	23	1.6	93.04
		24.00 น.	13	15	-	-	-
4	15/3/62	03.00 น.	12	16	21	1.2	94.29
		06.00 น.	10	15	25	1.9	92.40
		09.00 น.	10	14	23	1.5	93.48
		12.00 น.	10	15	-	-	-
		15.00 น.	10	15	21	2.5	88.10
		18.00 น.	12	15	18	1.8	90.00
		21.00 น.	13	16	19	2.2	88.42
		24.00 น.	13	15	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้สารส้มน้ำ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
5	16/3/62	03.00 น.	14	16	20	1.1	94.50
		06.00 น.	14	15	23	1.2	94.78
4	16/3/62	09.00 น.	12	14	23	2.1	90.87
		12.00 น.	11	13	-	-	-
		15.00 น.	12	14	25	1.9	92.40
		18.00 น.	18	18	25	2.1	91.60
		21.00 น.	18	18	23	1.8	92.17
		24.00 น.	16	18	-	-	-
6	17/3/62	03.00 น.	16	17	20	2.2	89.00
		06.00 น.	16	14	22	2.0	90.91
		09.00 น.	15	16	23	2.1	90.87
		12.00 น.	13	15	-	-	-
		15.00 น.	12	16	21	2.1	90.00
		18.00 น.	15	15	23	2.0	91.30
		21.00 น.	14	12	20	1.5	92.50
		24.00 น.	12	15	-	-	-
7	18/3/62	03.00 น.	11	17	21	2.9	86.19
		06.00 น.	11	17	26	1.2	95.38
		09.00 น.	10	15	26	2.0	92.31
		12.00 น.	10	16	-	-	-
		15.00 น.	10	14	25	2.2	91.20
		18.00 น.	10	14	23	3.1	86.52
		21.00 น.	10	14	25	2.1	91.60
		24.00 น.	11	14	-	-	-
8	19/3/62	03.00 น.	14	14	26	1.6	93.85
		06.00 น.	14	16	26	1.8	93.08
		09.00 น.	13	15	27	1.5	94.44
		12.00 น.	12	16	-	-	-
		15.00 น.	11	14	21	2.2	89.52
		18.00 น.	10	13	22	1.7	92.27
		21.00 น.	13	14	25	2.4	90.40
		24.00 น.	12	15	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้สารส้มน้ำ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
9	20/3/62	03.00 น.	11	9	20	1.5	92.50
		06.00 น.	12	11	21	1.7	91.90
		09.00 น.	13	12	21	2.0	90.48
		12.00 น.	13	13	-	-	-
		15.00 น.	11	11	27	2.0	92.59
		18.00 น.	10	12	24	2.4	90.00
		21.00 น.	10	12	30	2.1	93.00
		24.00 น.	10	12	-	-	-
10	21/3/62	03.00 น.	11	12	21	2.6	87.62
		06.00 น.	11	13	23	3.0	86.96
		09.00 น.	10	12	20	1.5	92.50
		12.00 น.	10	13	-	-	-
		15.00 น.	11	13	21	3.3	84.29
		18.00 น.	12	16	22	2.2	90.00
		21.00 น.	10	13	26	2	92.31
		24.00 น.	10	12	-	-	-
11	22/3/62	03.00 น.	11	11	23	1.3	94.35
		06.00 น.	12	11	26	1.6	93.85
		09.00 น.	14	17	25	1.6	93.60
		12.00 น.	13	15	-	-	-
		15.00 น.	13	14	22	1.8	91.82
		18.00 น.	12	15	22	1.5	93.18
		21.00 น.	11	15	27	1.2	95.56
		24.00 น.	12	15	-	-	-
12	23/3/62	03.00 น.	11	14	24	1.8	92.50
		06.00 น.	12	16	24	1.6	93.33
		09.00 น.	14	17	20	1.3	93.50
		12.00 น.	16	18	-	-	-
		15.00 น.	18	20	25	1.8	92.80
		18.00 น.	14	15	24	2.1	91.25
		21.00 น.	13	15	23	2.2	90.43
		24.00 น.	12	15	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้สารส้มน้ำ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
13	24/3/62	03.00 น.	13	15	22	1.4	93.64
		06.00 น.	13	15	23	1.3	94.35
		09.00 น.	11	13	24	1.9	92.08
		12.00 น.	10	14	-	-	-
		15.00 น.	11	14	19	2.1	88.95
		18.00 น.	16	16	23	2.1	90.87
		21.00 น.	15	16	27	2.2	91.85
		24.00 น.	15	16	-	-	-
14	25/3/62	03.00 น.	14	16	25	2.0	92.00
		06.00 น.	15	16	27	1.9	92.96
		09.00 น.	14	15	27	2.2	91.85
		12.00 น.	13	14	-	-	-
		15.00 น.	12	13	21	1.5	92.86
		18.00 น.	11	9	23	2.0	91.30
		21.00 น.	13	10	26	1.7	93.46
		24.00 น.	14	10	-	-	-
15	26/3/62	03.00 น.	15	11	23	1.4	93.91
		06.00 น.	14	12	26	1.9	92.69
		09.00 น.	13	11	25	1.8	92.80
		12.00 น.	12	10	-	-	-
		15.00 น.	11	9	21	1.5	92.86
		18.00 น.	12	10	21	1.6	92.38
		21.00 น.	12	12	23	1.9	91.74
		24.00 น.	11	12	-	-	-
16	27/3/62	03.00 น.	10	11	24	1.5	93.75
		06.00 น.	12	12	26	2.0	92.31
		09.00 น.	13	11	26	1.9	92.69
		12.00 น.	13	14	-	-	-
		15.00 น.	14	13	21	2.0	90.48
		18.00 น.	13	12	21	1.9	90.95
		21.00 น.	12	11	22	2.9	86.82
		24.00 น.	12	14	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้สารส้มน้ำ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
17	28/3/62	03.00 น.	11	13	22	1.3	94.09
		06.00 น.	11	15	27	1.7	93.70
		09.00 น.	12	14	24	2.0	91.67
		12.00 น.	11	12	-	-	-
		15.00 น.	10	10	24	1.8	92.50
		18.00 น.	10	11	20	1.5	92.50
		21.00 น.	11	10	19	1.8	90.53
		24.00 น.	11	12	-	-	-
18	29/3/62	03.00 น.	11	11	23	1.6	93.04
		06.00 น.	11	10	26	1.3	95.00
		09.00 น.	10	8	20	1.6	92.00
		12.00 น.	11	9	-	-	-
		15.00 น.	12	10	21	1.4	93.33
		18.00 น.	10	11	20	2.6	87.00
		21.00 น.	11	11	20	1.8	91.00
		24.00 น.	11	12	-	-	-
19	30/3/62	03.00 น.	11	11	20	1.5	92.50
		06.00 น.	12	12	24	1.3	94.58
		09.00 น.	12	14	21	1.8	91.43
		12.00 น.	12	15	-	-	-
		15.00 น.	13	14	21	1.9	90.95
		18.00 น.	12	14	22	2	90.91
		21.00 น.	10	14	19	1.1	94.21
		24.00 น.	11	13	-	-	-
20	31/3/62	03.00 น.	10	12	21	1.1	94.76
		06.00 น.	11	10	25	2	92.00
		09.00 น.	11	11	23	1.7	92.61
		12.00 น.	11	12	-	-	-
		15.00 น.	11	12	20	1.8	91.00
		18.00 น.	13	12	19	2.4	87.37
		21.00 น.	12	13	18	2.2	87.78
		24.00 น.	15	14	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้สารส้มน้ำ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
1	12/3/62	03.00 น.	10	8	21	1.4	93.33
		06.00 น.	11	7	26	1.2	95.38
		09.00 น.	11	9	26	1.6	93.85
		12.00 น.	10	9	-	-	-
		15.00 น.	11	9	25	2.3	90.80
		18.00 น.	11	11	23	3.4	85.22
		21.00 น.	11	11	25	2.7	89.20
		24.00 น.	11	11	-	-	-
2	13/3/62	03.00 น.	10	12	26	2.0	92.31
		06.00 น.	10	14	26	1.7	93.46
		09.00 น.	10	13	27	1.7	93.70
		12.00 น.	10	12	-	-	-
		15.00 น.	10	13	21	2.1	90.00
		18.00 น.	10	12	22	1.8	91.82
		21.00 น.	11	13	25	1.0	96.00
		24.00 น.	10	12	-	-	-
3	14/3/62	03.00 น.	10	13	21	0.9	95.71
		06.00 น.	10	14	25	2.1	91.60
		09.00 น.	13	16	25	1.5	94.00
		12.00 น.	13	15	-	-	-
		15.00 น.	13	14	21	2.1	90.00
		18.00 น.	12	15	21	2.1	90.00
		21.00 น.	12	16	23	1.7	92.61
		24.00 น.	12	14	-	-	-
4	15/3/62	03.00 น.	11	15	21	1.6	92.38
		06.00 น.	11	16	25	1.9	92.40
		09.00 น.	10	15	23	1.6	93.04
		12.00 น.	10	15	-	-	-
		15.00 น.	10	15	21	2.1	90.00
		18.00 น.	13	17	18	2.0	88.89
		21.00 น.	13	19	19	1.4	92.63
		24.00 น.	12	15	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้สารส้มน้ำ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
5	16/3/62	03.00 น.	13	19	20	1.2	94.00
		06.00 น.	12	16	23	1.2	94.78
		09.00 น.	10	14	23	2.1	90.87
		12.00 น.	9	14	-	-	-
		15.00 น.	10	14	25	2.2	91.20
		18.00 น.	15	15	25	2.6	89.60
		21.00 น.	15	16	23	2.2	90.43
		24.00 น.	15	15	-	-	-
6	17/3/62	03.00 น.	15	15	20	1.7	91.50
		06.00 น.	15	13	22	1.9	91.36
		09.00 น.	13	14	23	1.8	92.17
		12.00 น.	12	14	-	-	-
		15.00 น.	13	15	21	2.4	88.57
		18.00 น.	10	10	23	2.3	90.00
		21.00 น.	9	10	20	2.2	89.00
		24.00 น.	10	11	-	-	-
7	18/3/62	03.00 น.	9	10	17	1.3	92.35
		06.00 น.	10	11	23	2.8	87.83
		09.00 น.	10	12	24	2.6	89.17
		12.00 น.	10	11	-	-	-
		15.00 น.	11	13	22	1.9	91.36
		18.00 น.	10	12	25	2	92.00
		21.00 น.	11	13	24	1.6	93.33
		24.00 น.	12	14	-	-	-
8	19/3/62	03.00 น.	11	13	21	1.7	91.90
		06.00 น.	10	12	25	1.9	92.40
		09.00 น.	10	13	25	2.9	88.40
		12.00 น.	10	14	-	-	-
		15.00 น.	10	14	27	3.0	88.89
		18.00 น.	12	14	24	3.1	87.08
		21.00 น.	11	15	26	2.0	92.31
		24.00 น.	11	14	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้สารส้มน้ำ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
9	20/3/62	03.00 น.	12	14	20	2.0	90.00
		06.00 น.	13	16	21	1.5	92.86
		09.00 น.	14	15	21	1.9	90.95
		12.00 น.	14	16	-	-	-
		15.00 น.	13	11	27	3.1	88.52
		18.00 น.	12	12	24	2.0	91.67
		21.00 น.	12	12	30	2.2	92.67
		24.00 น.	12	12	-	-	-
10	21/3/62	03.00 น.	12	13	21	1.7	91.90
		06.00 น.	12	2	23	1.6	93.04
		09.00 น.	12	13	20	1.4	93.00
		12.00 น.	10	14	-	-	-
		15.00 น.	12	10	21	2.1	90.00
		18.00 น.	13	10	22	3.1	85.91
		21.00 น.	13	11	26	2.3	91.15
		24.00 น.	13	12	-	-	-
11	22/3/62	03.00 น.	11	13	23	1.6	93.04
		06.00 น.	11	11	26	1.7	93.46
		09.00 น.	12	10	25	1.6	93.60
		12.00 น.	12	9	-	-	-
		15.00 น.	10	8	22	1.3	94.09
		18.00 น.	10	10	22	1.8	91.82
		21.00 น.	10	10	27	1.6	94.07
		24.00 น.	10	10	-	-	-
12	23/3/62	03.00 น.	12	9	24	1.7	92.92
		06.00 น.	10	11	24	1.6	93.33
		09.00 น.	10	17	20	1.5	92.50
		12.00 น.	12	14	-	-	-
		15.00 น.	16	15	25	3.2	87.20
		18.00 น.	13	14	24	2.1	91.25
		21.00 น.	13	14	23	2.6	88.70
		24.00 น.	12	14	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้สารส้มน้ำ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

13	24/3/62	03.00 น.	14	16	22	1.8	91.82
		06.00 น.	14	15	23	1.2	94.78
		09.00 น.	10	14	24	2.0	91.67
		12.00 น.	11	12	-	-	-
		15.00 น.	10	13	19	2.1	88.95
		18.00 น.	12	2	23	2.1	90.87
		21.00 น.	11	2	27	1.9	92.96
		24.00 น.	10	2	-	-	-
14	25/3/62	03.00 น.	10	2	25	2.1	91.60
		06.00 น.	10	2	27	1.8	93.33
		09.00 น.	9	2	27	2.1	92.22
		12.00 น.	10	2	-	-	-
		15.00 น.	11	2	21	1.8	91.43
		18.00 น.	10	10	23	2.6	88.70
		21.00 น.	10	10	26	1.8	93.08
		24.00 น.	10	11	-	-	-
15	26/3/62	03.00 น.	10	11	23	1.4	93.91
		06.00 น.	10	12	26	1.8	93.08
		09.00 น.	12	15	25	2.2	91.20
		12.00 น.	13	15	-	-	-
		15.00 น.	15	17	21	2.5	88.10
		18.00 น.	14	15	21	2.4	88.57
		21.00 น.	13	16	23	2.0	91.30
		24.00 น.	13	15	-	-	-
16	27/3/62	03.00 น.	13	15	24	1.6	93.33
		06.00 น.	13	14	26	1.9	92.69
		09.00 น.	14	14	26	2.3	91.15
		12.00 น.	14	15	-	-	-
		15.00 น.	14	15	21	2.3	89.05
		18.00 น.	12	12	21	2.7	87.14
		21.00 น.	11	11	22	3.0	86.36
		24.00 น.	10	11	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้สารส้มน้ำ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
17	28/3/62	03.00 น.	11	12	22	1.6	92.73
		06.00 น.	10	12	27	1.7	93.70
		09.00 น.	11	10	24	2.2	90.83
		12.00 น.	11	9	-	-	-
		15.00 น.	11	8	24	2.2	90.83
		18.00 น.	12	12	20	2.4	88.00
		21.00 น.	12	12	19	1.9	90.00
		24.00 น.	12	13	-	-	-
18	29/3/62	03.00 น.	12	13	23	2.3	90.00
		06.00 น.	12	13	26	1.6	93.85
		09.00 น.	12	12	20	2.2	89.00
		12.00 น.	12	12	-	-	-
		15.00 น.	12	13	21	2.0	90.48
		18.00 น.	10	1	20	2.5	87.50
		21.00 น.	11	1	20	1.9	90.50
		24.00 น.	10	2	-	-	-
19	30/3/62	03.00 น.	12	2	20	2	90.00
		06.00 น.	13	2	24	1.5	93.75
		09.00 น.	12	5	21	2.0	90.48
		12.00 น.	10	7	-	-	-
		15.00 น.	11	6	21	2.0	90.48
		18.00 น.	10	5	22	1.9	91.36
		21.00 น.	11	6	19	1.2	93.68
		24.00 น.	10	8	-	-	-
20	31/3/62	03.00 น.	10	9	21	1.4	93.33
		06.00 น.	10	10	25	1.8	92.80
		09.00 น.	10	10	23	2.8	87.83
		12.00 น.	10	10	-	-	-
		15.00 น.	10	10	20	2.5	87.50
		18.00 น.	6	2	19	2.2	88.42
		21.00 น.	5	1	18	1.8	90.00
		24.00 น.	6	1	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์

ภาคผนวก ง-2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
1	12/3/62	03.00 น.	13	5	21	1.6	92.38
		06.00 น.	12	15	26	1.2	95.38
		09.00 น.	14	7	26	1.3	95.00
		12.00 น.	13	8	-	-	-
		15.00 น.	12	10	25	2.0	92.00
		18.00 น.	16	16	23	2.1	90.87
		21.00 น.	16	1	25	1.5	94.00
		24.00 น.	15	1	-	-	-
2	13/3/62	03.00 น.	16	1	26	1.4	94.62
		06.00 น.	17	1	26	1.2	95.38
		09.00 น.	15	1	27	1.1	95.93
		12.00 น.	14	1	-	-	-
		15.00 น.	15	1	21	1.3	93.81
		18.00 น.	13	1	22	1.2	94.55
		21.00 น.	14	1	25	1.2	95.20
		24.00 น.	14	3	-	-	-
3	14/3/62	03.00 น.	15	1	21	1.3	93.81
		06.00 น.	14	3	25	1.5	94.00
		09.00 น.	13	3	25	1.8	92.80
		12.00 น.	12	3	-	-	-
		15.00 น.	11	4	21	1.3	93.81
		18.00 น.	10	4	21	1.9	90.95
		21.00 น.	11	4	23	1.4	93.91
		24.00 น.	10	4	-	-	-
4	15/3/62	03.00 น.	11	4	21	1.1	94.76
		06.00 น.	10	4	25	1.6	93.60
		09.00 น.	21	21	23	1.4	93.91
		12.00 น.	18	20	-	-	-
		15.00 น.	12	17	21	1.8	91.43
		18.00 น.	12	10	18	1.4	92.22
		21.00 น.	12	11	19	1.4	92.63
		24.00 น.	12	12	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
5	16/3/62	03.00 น.	12	12	20	1.1	94.50
		06.00 น.	15	15	23	1.1	95.22
		09.00 น.	14	14	23	1.4	93.91
		12.00 น.	13	15	-	-	-
		15.00 น.	18	20	25	1.4	94.40
		18.00 น.	13	1	25	1.8	92.80
		21.00 น.	12	1	23	1.3	94.35
		24.00 น.	12	1	-	-	-
6	17/3/62	03.00 น.	16	5	20	1.2	94.00
		06.00 น.	16	6	22	1.2	94.55
		09.00 น.	14	5	23	1.3	94.35
		12.00 น.	13	5	-	-	-
		15.00 น.	14	5	21	1.5	92.86
		18.00 น.	15	8	23	1.7	92.61
		21.00 น.	13	9	20	1.2	94.00
		24.00 น.	12	10	-	-	-
7	18/3/62	03.00 น.	17	18	17	1.3	92.35
		06.00 น.	17	18	23	1.8	92.17
		09.00 น.	15	17	24	1.3	94.58
		12.00 น.	15	16	-	-	-
		15.00 น.	14	15	22	1.3	94.09
		18.00 น.	12	15	25	1.8	92.80
		21.00 น.	13	16	24	1.4	94.17
		24.00 น.	14	17	-	-	-
8	19/3/62	03.00 น.	13	16	21	1.0	95.24
		06.00 น.	13	11	25	1.6	93.60
		09.00 น.	12	11	25	1.2	95.20
		12.00 น.	12	12	-	-	-
		15.00 น.	15	19	27	1.7	93.70
		18.00 น.	13	10	24	1.8	92.50
		21.00 น.	12	12	26	1.8	93.08
		24.00 น.	11	12	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
9	20/3/62	03.00 น.	11	5	20	1.4	93.00
		06.00 น.	12	1	21	1.2	94.29
		09.00 น.	10	1	21	1.2	94.29
		12.00 น.	11	1	-	-	-
		15.00 น.	12	3	27	1.2	95.56
		18.00 น.	14	13	24	1.6	93.33
		21.00 น.	17	13	30	1.4	95.33
		24.00 น.	16	12	-	-	-
10	21/3/62	03.00 น.	14	8	21	1.3	93.81
		06.00 น.	15	1	23	1.0	95.65
		09.00 น.	10	10	20	1.0	95.00
		12.00 น.	11	12	-	-	-
		15.00 น.	10	8	21	1.6	92.38
		18.00 น.	11	10	22	1.9	91.36
		21.00 น.	11	10	26	2.3	91.15
		24.00 น.	10	12	-	-	-
11	22/3/62	03.00 น.	10	10	23	1.4	93.91
		06.00 น.	10	10	26	1.4	94.62
		09.00 น.	12	10	25	1.2	95.20
		12.00 น.	10	12	-	-	-
		15.00 น.	11	10	22	1.5	93.18
		18.00 น.	15	20	22	1.4	93.64
		21.00 น.	13	15	27	1.2	95.56
		24.00 น.	17	20	-	-	-
12	23/3/62	03.00 น.	12	10	24	1.3	94.58
		06.00 น.	12	8	24	1.2	95.00
		09.00 น.	16	1	20	1.0	95.00
		12.00 น.	15	1	-	-	-
		15.00 น.	14	6	25	1.7	93.20
		18.00 น.	16	1	24	2	91.67
		21.00 น.	14	1	23	1.8	92.17
		24.00 น.	13	1	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
13	24/3/62	03.00 น.	12	1	22	1.2	94.55
		06.00 น.	10	1	23	1.2	94.78
		09.00 น.	8	2	24	1.1	95.42
		12.00 น.	7	2	-	-	-
		15.00 น.	8	2	19	1.4	92.63
		18.00 น.	16	1	23	1.4	93.91
		21.00 น.	10	1	27	1.2	95.56
		24.00 น.	10	1	-	-	-
14	25/3/62	03.00 น.	10	1	25	1.4	94.40
		06.00 น.	18	1	27	1.9	92.96
		09.00 น.	13	7	27	1.2	95.56
		12.00 น.	14	8	-	-	-
		15.00 น.	13	7	21	1.4	93.33
		18.00 น.	15	3	23	1.2	94.78
		21.00 น.	14	4	26	1.2	95.38
		24.00 น.	11	5	-	-	-
15	26/3/62	03.00 น.	17	16	23	1.5	93.48
		06.00 น.	19	20	26	1.1	95.77
		09.00 น.	15	12	25	1.7	93.20
		12.00 น.	14	10	-	-	-
		15.00 น.	14	11	21	1.1	94.76
		18.00 น.	12	1	21	1.3	93.81
		21.00 น.	14	13	23	1.3	94.35
		24.00 น.	15	15	-	-	-
16	27/3/62	03.00 น.	15	15	24	1.2	95.00
		06.00 น.	15	15	26	1.6	93.85
		09.00 น.	10	11	26	1.5	94.23
		12.00 น.	11	11	-	-	-
		15.00 น.	15	18	21	1.4	93.33
		18.00 น.	18	18	21	2.1	90.00
		21.00 น.	16	18	22	1.5	93.18
		24.00 น.	14	16	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
17	28/3/62	03.00 น.	12	14	22	1.2	94.55
		06.00 น.	12	14	27	1.3	95.19
		09.00 น.	11	13	24	1.4	94.17
		12.00 น.	10	12	-	-	-
		15.00 น.	11	12	24	1.7	92.92
		18.00 น.	15	17	20	1.3	93.50
		21.00 น.	15	15	19	1.2	93.68
		24.00 น.	16	16	-	-	-
18	29/3/62	03.00 น.	15	10	23	1.4	93.91
		06.00 น.	14	10	26	1.6	93.85
		09.00 น.	13	10	20	1.4	93.00
		12.00 น.	10	10	-	-	-
		15.00 น.	10	10	21	1.5	92.86
		18.00 น.	12	11	20	1.5	92.50
		21.00 น.	12	12	20	1.3	93.50
		24.00 น.	12	13	-	-	-
19	30/3/62	03.00 น.	13	14	20	1.2	94.00
		06.00 น.	12	14	24	1.1	95.42
		09.00 น.	12	15	21	1.5	92.86
		12.00 น.	10	15	-	-	-
		15.00 น.	10	15	21	1.7	91.90
		18.00 น.	10	16	22	1.1	95.00
		21.00 น.	10	14	19	0.9	95.26
		24.00 น.	10	11	-	-	-
20	31/3/62	03.00 น.	11	13	21	1.2	94.29
		06.00 น.	17	20	25	1.7	93.20
		09.00 น.	16	21	23	1.2	94.78
		12.00 น.	16	20	-	-	-
		15.00 น.	16	20	20	1.6	92.00
		18.00 น.	15	20	19	1.4	92.63
		21.00 น.	15	18	18	1.3	92.78
		24.00 น.	15	17	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff.
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	removal (%)
1	12/3/62	03.00 น.	13	16	21	1.5	92.86
		06.00 น.	12	10	26	1.3	95.00
		09.00 น.	12	15	26	1.5	94.23
		12.00 น.	11	14	-	-	-
		15.00 น.	10	15	25	1.6	93.60
		18.00 น.	12	1	23	1.5	93.48
		21.00 น.	11	3	25	1.5	94.00
		24.00 น.	10	3	-	-	-
2	13/3/62	03.00 น.	13	1	26	1.5	94.23
		06.00 น.	13	1	26	1.5	94.23
		09.00 น.	11	1	27	1.3	95.19
		12.00 น.	11	1	-	-	-
		15.00 น.	12	1	21	1.3	93.81
		18.00 น.	10	1	22	1.3	94.09
		21.00 น.	11	1	25	1.0	96.00
		24.00 น.	10	3	-	-	-
3	14/3/62	03.00 น.	12	1	21	0.8	96.19
		06.00 น.	13	2	25	1.6	93.60
		09.00 น.	12	2	25	1.7	93.20
		12.00 น.	12	2	-	-	-
		15.00 น.	12	2	21	1.8	91.43
		18.00 น.	11	3	21	1.4	93.33
		21.00 น.	12	3	23	1.2	94.78
		24.00 น.	11	3	-	-	-
4	15/3/62	03.00 น.	12	3	21	1.2	94.29
		06.00 น.	12	3	25	1.5	94.00
		09.00 น.	16	17	23	1.2	94.78
		12.00 น.	15	17	-	-	-
		15.00 น.	16	11	21	1.4	93.33
		18.00 น.	15	14	18	1.3	92.78
		21.00 น.	14	13	19	2.1	88.95
		24.00 น.	12	13	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. removal (%)
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
5	16/3/62	03.00 น.	11	12	20	0.8	96.00
		06.00 น.	12	12	23	0.9	96.09
		09.00 น.	11	13	23	1.2	94.78
		12.00 น.	10	13	-	-	-
		15.00 น.	19	8	25	1.8	92.80
		18.00 น.	15	15	25	1.9	92.40
		21.00 น.	15	15	23	1.5	93.48
		24.00 น.	13	16	-	-	-
6	17/3/62	03.00 น.	10	15	20	1.5	92.50
		06.00 น.	10	16	22	1.3	94.09
		09.00 น.	11	15	23	1.4	93.91
		12.00 น.	11	16	-	-	-
		15.00 น.	12	15	21	1.5	92.86
		18.00 น.	14	10	23	1.6	93.04
		21.00 น.	14	12	20	1.9	90.50
		24.00 น.	13	12	-	-	-
7	18/3/62	03.00 น.	15	19	17	1.6	90.59
		06.00 น.	15	19	23	1.9	91.74
		09.00 น.	14	18	24	1.6	93.33
		12.00 น.	14	17	-	-	-
		15.00 น.	14	15	22	2.2	90.00
		18.00 น.	12	14	25	1.5	94.00
		21.00 น.	11	12	24	1.3	94.58
		24.00 น.	12	13	-	-	-
8	19/3/62	03.00 น.	11	14	21	0.7	96.67
		06.00 น.	11	14	25	1.6	93.60
		09.00 น.	12	14	25	1.4	94.40
		12.00 น.	12	14	-	-	-
		15.00 น.	15	12	27	1.7	93.70
		18.00 น.	14	10	24	1.9	92.08
		21.00 น.	13	12	26	1.9	92.69
		24.00 น.	12	12	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. removal (%)
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
9	20/3/62	03.00 น.	12	13	20	1.6	92.00
		06.00 น.	12	10	21	1.3	93.81
		09.00 น.	10	8	21	1.4	93.33
		12.00 น.	12	9	-	-	-
		15.00 น.	12	10	27	1.9	92.96
		18.00 น.	14	14	24	1.6	93.33
		21.00 น.	14	1	30	2.0	93.33
		24.00 น.	14	1	-	-	-
10	21/3/62	03.00 น.	13	1	21	1.9	90.95
		06.00 น.	11	1	23	1.7	92.61
		09.00 น.	10	12	20	1.5	92.50
		12.00 น.	10	10	-	-	-
		15.00 น.	12	13	21	1.7	91.90
		18.00 น.	11	14	22	1.8	91.82
		21.00 น.	11	14	26	1.7	93.46
		24.00 น.	10	14	-	-	-
11	22/3/62	03.00 น.	10	11	23	1.1	95.22
		06.00 น.	10	12	26	1.6	93.85
		09.00 น.	11	11	25	1.2	95.20
		12.00 น.	10	7	-	-	-
		15.00 น.	10	8	22	1.6	92.73
		18.00 น.	11	13	22	1.3	94.09
		21.00 น.	11	14	27	1.1	95.93
		24.00 น.	10	2	-	-	-
12	23/3/62	03.00 น.	11	9	24	1.4	94.17
		06.00 น.	11	11	24	1.3	94.58
		09.00 น.	18	20	20	1.0	95.00
		12.00 น.	16	18	-	-	-
		15.00 น.	17	14	25	1.4	94.40
		18.00 น.	15	1	24	2.0	91.67
		21.00 น.	13	1	23	1.8	92.17
		24.00 น.	13	1	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. removal (%)
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
13	24/3/62	03.00 น.	11	1	22	1.3	94.09
		06.00 น.	9	1	23	1.2	94.78
		09.00 น.	9	2	24	1.0	95.83
		12.00 น.	10	2	-	-	-
		15.00 น.	11	2	19	1.6	91.58
		18.00 น.	16	7	23	1.8	92.17
		21.00 น.	12	9	27	1.8	93.33
		24.00 น.	11	9	-	-	-
14	25/3/62	03.00 น.	11	9	25	1.7	93.20
		06.00 น.	13	9	27	1.5	94.44
		09.00 น.	16	1	27	1.8	93.33
		12.00 น.	15	1	-	-	-
		15.00 น.	14	1	21	1.0	95.24
		18.00 น.	12	8	23	1.3	94.35
		21.00 น.	12	9	26	1.8	93.08
		24.00 น.	11	8	-	-	-
15	26/3/62	03.00 น.	16	1	23	1.3	94.35
		06.00 น.	19	1	26	1.7	93.46
		09.00 น.	15	7	25	1.4	94.40
		12.00 น.	15	6	-	-	-
		15.00 น.	15	7	21	1.3	93.81
		18.00 น.	13	8	21	1.2	94.29
		21.00 น.	13	7	23	1.5	93.48
		24.00 น.	15	11	-	-	-
16	27/3/62	03.00 น.	15	12	24	1.3	94.58
		06.00 น.	15	13	26	1.7	93.46
		09.00 น.	15	10	26	1.9	92.69
		12.00 น.	15	8	-	-	-
		15.00 น.	10	11	21	1.9	90.95
		18.00 น.	12	9	21	1.6	92.38
		21.00 น.	10	8	22	1.3	94.09
		24.00 น.	9	10	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง-2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยใช้โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร (ต่อ)

No.	Date	Time	%Sludge		Raw water	Clarifier water	Eff. removal (%)
			R	B	Turbidity (NTU)	Turbidity (NTU)	
17	28/3/62	03.00 น.	10	9	22	1.2	94.55
		06.00 น.	11	10	27	1.4	94.81
		09.00 น.	12	10	24	1.7	92.92
		12.00 น.	11	12	-	-	-
		15.00 น.	10	14	24	1.9	92.08
		18.00 น.	15	16	20	1.7	91.50
		21.00 น.	15	16	19	1.9	90.00
		24.00 น.	14	13	-	-	-
18	29/3/62	03.00 น.	10	6	23	2.0	91.30
		06.00 น.	10	6	26	1.9	92.69
		09.00 น.	10	7	20	1.2	94.00
		12.00 น.	10	9	-	-	-
		15.00 น.	10	8	21	1.3	93.81
		18.00 น.	10	7	20	1.8	91.00
		21.00 น.	11	8	20	1.9	90.50
		24.00 น.	11	9	-	-	-
19	30/3/62	03.00 น.	11	10	20	1.9	90.50
		06.00 น.	10	10	24	1.7	92.92
		09.00 น.	10	11	21	1.6	92.38
		12.00 น.	10	12	-	-	-
		15.00 น.	10	11	21	1.9	90.95
		18.00 น.	10	13	22	1.9	91.36
		21.00 น.	11	13	19	1.6	91.58
		24.00 น.	11	12	-	-	-
20	31/3/62	03.00 น.	12	14	21	1.5	92.86
		06.00 น.	15	20	25	1.9	92.40
		09.00 น.	15	20	23	1.7	92.61
		12.00 น.	15	20	-	-	-
		15.00 น.	14	18	20	2.0	90.00
		18.00 น.	16	17	19	1.6	91.58
		21.00 น.	15	16	18	1.6	91.11
		24.00 น.	15	18	-	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีการเก็บค่าในช่วงเวลาดังกล่าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก จ

มาตรฐานน้ำประปา การประปานครหลวง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก จ-1 ลักษณะสมบัติทางชีววิทยา (Biological Quality)

รายการ (parameter)	**หน่วย (Unit)**	**เกณฑ์กำหนด (Specification)**
โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Coliform Bacteria)	พบ – ไม่พบต่อ 100 มิลลิลิตร	ไม่พบ
อีโคไล (*E.coli*)	พบ – ไม่พบต่อ 100 มิลลิลิตร	ไม่พบ
จุลินทรีย์ทั้งหมด (Heterotrophic Plate Count)	ซีเอฟยู/มิลลิลิตร (CFU/mL)	500
คลอสตริเดียม เพอร์ฟริงเจนส์ (*Clostridium perfringens*)	พบ – ไม่พบต่อ 100 มิลลิลิตร	ไม่พบ
ลีเจียนเนลล่า (*Legionella* spp.)	พบ – ไม่พบต่อ 100 มิลลิลิตร	ไม่พบ
ซูโดโมแนส ออรูจิโนซ่า (*Pseudomonas aerudinosa*)	พบ – ไม่พบต่อ 100 มิลลิลิตร	ไม่พบ
ซาลโมเนลลา (*Salmonella* spp.)	พบ – ไม่พบต่อ 100 มิลลิลิตร	ไม่พบ
ชิเกลลา (*Shigella* spp.)	พบ – ไม่พบต่อ 100 มิลลิลิตร	ไม่พบ
สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*)	พบ – ไม่พบต่อ 100 มิลลิลิตร	ไม่พบ
วิบริโอ คลอเลอเร (*Vibrio cholera*)	พบ – ไม่พบต่อ 100 มิลลิลิตร	ไม่พบ
คริปโตสปอริเดียม (*Crytosporidium* spp.)	พบ – ไม่พบต่อ 20 ลิตร	ไม่พบ
ไกอาร์เดีย *(Giardia* spp.)	พบ – ไม่พบต่อ 20 ลิตร	ไม่พบ
ไวรัสตับอักเสบ เอ (Hepatitis A Virus)	พบ – ไม่พบต่อ 20 ลิตร	ไม่พบ
ไวรัสโรต้า (Rotavirus)	พบ – ไม่พบต่อ 20 ลิตร	ไม่พบ
ไวรัสโปลิโอ (Poliovirus)	พบ – ไม่พบต่อ 20 ลิตร	ไม่พบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ที่มา : (ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง, 2559)

หมายเหตุ : CFU หมายถึง Colony forming unit เป็นหน่วยที่ได้จากวิธีตรวจนับปริมาณจุลินทรีย์ซึ่งเจริญขึ้นมาบนผิวหน้า ของอาหารแข็งในจานเลี้ยงเชื้อ โดยเจริญและแบ่งตัวจนเป็นกลุ่มเรียกว่าโคโลนี (Colony)

ภาคผนวก จ-2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Quality)

รายการ (parameter)	**หน่วย (Unit)**	**เกณฑ์กำหนด (Specification)**
สีปรากฏ (Apparent color) #	แพลทินัม-โคบอลต์ (Pt-Co)	15
ความขุ่น (Turbidity) #	เอ็นทียู (NTU)	1.0
รสและกลิ่น (Taste and Odor) #	-	ไม่มีกลิ่นและรส
ค่าพีเอช (pH) #	-	6.5 - 8.5
ปริมาณมวลสารที่ละลายทั้งหมด (Total dissolved solid)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	1,000
คลอรีนอิสระคงเหลือ (Free Residual Chlorine)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.2 - 2.0
อะลูมิเนียม (Aluminium) #	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.2
พลวง (Antimony)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.02
สารหนู (Asenic)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.01
แบเรียม (Barium)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	1.3
แคดเมียม (Cadmium)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.003
โครเมียม (Total Chromium)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.05
ทองแดง (Copper) #	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	1
เหล็ก (Iron) #	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.3
ตะกั่ว (Lead)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.01
แมงกานีส (Manganese) #	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.1
ปรอท (Inorganic Mercury)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.006
นิกเกิล (Nickel)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.07
เงิน (Silver)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.1
โซเดียม (Sodium) #	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	200
สังกะสี (Zinc) #	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	3
คลอไรด์ (Chloride) #	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	250
ฟลูออไรด์ (Fluoride)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก จ-2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Quality) (ต่อ)

รายการ (parameter)	**หน่วย (Unit)**	**เกณฑ์กำหนด (Specification)**
ซัลเฟต (Sulfate) #	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	250
แอมโมเนีย ไนโตรเจน (Ammnia Nitrogen)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	1.5
ไนเตรตคำนวณในรูปไนเตรต (Nitrate as NO_3^-)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	50
ไนไตรต์คำนวณในรูปไนไตรต์ (Nitrate as NO_2^-)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	3
ไซยาไนด์ (Cyanide)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.07
ไมโครซีสติน-แอลอาร์ (Microcystin-LR)	มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0.001

ที่มา : (ฝ่ายคุณภาพน้ำ การประปานครหลวง, 2559)

หมายเหตุ : 1. # หมายถึง รายการที่มีผลต่อความน่าดื่มน่าใช้

2. หน่วย Pt-Co (Platinum–Cobalt scale) หมายถึง หน่วยวัดระดับความเข้มของสีแท้ (True colour) ของน้ำ โดยเปรียบเทียบกับสีของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมคลอโรแพลทติเนทกับโคบอลต์(II) คลอไรด์

3. หน่วย NTU หมายถึง หน่วยวัดความขุ่นในน้ำโดยวิธีเนฟีโลเมตรี

4. คลอรีนอิสระคงเหลือ กำหนดให้ที่ปลายเส้นท่อ 0.2 -2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อใช้ในการเฝ้าระวังน้ำประปา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ฉ

การประเมินวัฏจักรชีวิต

(Life cycle assessment)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ฉ-1 โปรแกรม SimaPro Version 8.4.0

โปรแกรม SimaPro เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ได้รับการพัฒนาจาก Pre'Consultants ประเทศเนเธอร์แลนด์ เป็นโปรแกรมที่มีการใช้อย่างแพร่หลายมากที่สุดในการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เพื่อใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ หรือบริการเป็นการนำเอาขั้นตอนต่างๆ ของการประเมินวัฏจักรชีวิตมาวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ โปรแกรม SimaPro นิยมใช้เนื่องจากมีการวิเคราะห์ผลกระทบตามระบบมาตรฐานสากลมีการเปรียบเทียบผลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเปรียบเทียบ มีฐานข้อมูล มีการแสดงผลในรูปตารางและกราฟ มีความยืดหยุ่นในการเพิ่มข้อมูลใหม่ มีการปรับปรุงข้อมูลและเก็บรวบรวมฐานข้อมูลไว้หลากหลายสาขาการผลิต โดยเฉพาะฐานข้อมูล Ecoinvent ที่ครอบคลุมกระบวนการผลิตถึง 4,000 กระบวนการ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณศักยภาพในการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในรูปของตัวชี้วัดทางด้านสิ่งแวดล้อมทำให้สามารถเปรียบเทียบและแสดงผลได้อย่างชัดเจน (Herrmann และ Moltesen, 2015) ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. การกำหนดขอบเขตและเป้าหมาย เป็นการกำหนดเป้าหมายและขอบเขต วัตถุประสงค์ของการประเมินผลการศึกษา
2. การรวบรวมข้อมูล เป็นการอ้างอิงข้อมูลพื้นฐานของโปรแกรมหรือข้อมูลเพิ่มเติมพื้นฐานจากกระบวนการนั้นๆ
3. การประเมินผลกระทบ โปรแกรมมีวิธีการประเมินผลกระทบมาตรฐานหลายแบบ เช่น Eco-indicator 95, Eco-indicator 99, EPS 2000, EDIP เป็นต้น
4. การแปลความหมายข้อมูล เป็นการนำเอาผลจากการทำบัญชีรายการข้อมูลมาวิเคราะห์และประเมินผลกระทบ เพื่อให้ได้ข้อสรุปและข้อเสนอแนะตามเป้าหมายตามขอบเขตที่ระบุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ฉ-2 ปริมาณสารขาเข้า ขาออก กระบวนการผลิตน้ำประปา

ภาคผนวก ฉ-2.1 ตัวอย่างปริมาณสารขาเข้า ขาออก กระบวนการผลิตน้ำประปา

รายการ	หน่วย	พ.ศ.2561				
		มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม
ปริมาณหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด	กิโลวัตต์-ชั่วโมง	15,727,193.00	14,381,244.00	16,075,260.00	15,448,441.00	16,501,201.00
ปริมาณหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบจ่ายน้ำ	กิโลวัตต์-ชั่วโมง	2,398,000	2,144,000	2,461,000	2,344,000	2,375,000
ปริมาณหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบส่งน้ำ	กิโลวัตต์-ชั่วโมง	8,745,140	8,268,800	9,615,251	8,897,252	9,847,147
ปริมาณหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำ	กิโลวัตต์-ชั่วโมง	4,584,053	3,968,444	3,999,009	4,207,189	4,279,054
ปริมาณน้ำดิบ	ลูกบาศก์เมตร	118,815,320	107,483,870	120,914,120	114,667,238	121,213,462
ปริมาณสารส้มที่ใช้	ตัน	7,945.01	3,749.80	3,362.95	3,185.52	5,122.89
ปริมาณคลอรีนที่ใช้	ตัน	509.37	405.53	489.99	487.00	494.59
ปริมาณน้ำล้างบ่อกรอง	ลูกบาศก์เมตร	1,196,805	915,319	1,051,861	1,055,806	1,055,759
น้ำระบายจากถังตกตะกอน	ลูกบาศก์เมตร	241,346.00	74,005.00	61,310.00	59,115.00	120,687.00
ปริมาณน้ำผลิตจ่าย	ลูกบาศก์เมตร	114,775,961	105,449,252	119,638,902	114,291,987	119,056,859

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ฉ-2.2 ตัวอย่างปริมาณสารขาเข้า ขาออก ของการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร

รายการ	หน่วย	พ.ศ.2561				
		มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม
ปริมาณหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด	กิโลวัตต์-ชั่วโมง	0.13703	0.13638	0.13436	0.13517	0.13860
ปริมาณหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบจ่ายน้ำ	กิโลวัตต์-ชั่วโมง	0.02089	0.02033	0.02057	0.02051	0.01995
ปริมาณหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบส่งน้ำ	กิโลวัตต์-ชั่วโมง	0.07619	0.07841	0.08037	0.07785	0.08271
ปริมาณหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำ	กิโลวัตต์-ชั่วโมง	0.03994	0.03763	0.03343	0.03681	0.03594
ปริมาณน้ำดิบ	ลูกบาศก์เมตร	1.03519	1.01929	1.01066	1.00328	1.01811
ปริมาณสารส้มที่ใช้	กิโลกรัม	0.06922	0.03556	0.02811	0.02787	0.04303
ปริมาณคลอรีนที่ใช้	กิโลกรัม	0.00444	0.00385	0.00410	0.00426	0.00415
ปริมาณน้ำล้างบ่อกรอง	ลูกบาศก์เมตร	0.01043	0.00868	0.00879	0.00924	0.00887
น้ำระบายจากถังตกตะกอน	ลูกบาศก์เมตร	0.00210	0.00070	0.00051	0.00052	0.00101
ปริมาณน้ำผลิตจ่าย	ลูกบาศก์เมตร	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ฉ-3 ค่า Characterization factor ของผลกระทบด้านต่างๆ

ภาคผนวก ฉ-3.1 ค่า Characterization factor ของผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน

รายการ	หน่วย	Emission factor	ที่มา
ไฟฟ้า	kg CO_2 eq/kWh	0.560	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
สารส้ม	kg CO_2 eq/kg	0.594	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
โพลิเมอร์	kg CO_2 eq/kg	2.799	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	kg CO_2 eq/kg	0.319	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
คลอรีน	kg CO_2 eq/kg	1.289	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
น้ำ	kg CO_2 eq/m^3	0.461	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H

ภาคผนวก ฉ-3.2 ค่า Characterization factor ของผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรด

รายการ	หน่วย	Emission factor	ที่มา
ไฟฟ้า	kg SO_2 eq/kWh	0.00294	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
สารส้ม	kg SO_2 eq/kg	0.00864	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
โพลิเมอร์	kg SO_2 eq/kg	0.01690	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	kg SO_2 eq/kg	0.00330	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
คลอรีน	kg SO_2 eq/kg	0.00641	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
น้ำ	kg SO_2 eq/m^3	0.00231	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ฉ-3.3 ค่า Characterization factor ของผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำ

รายการ	**หน่วย**	**Emission factor**	**ที่มา**
ไฟฟ้า	m^3	0.0070	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
น้ำดิบ	m^3	1.0000	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
สารส้ม	m^3	0.0209	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
โพลิเมอร์	m^3	0.0379	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	m^3	0.0088	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
คลอรีน	m^3	0.0392	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
น้ำ	m^3	1.0076	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H

ภาคผนวก จ-3.4 ค่า Characterization factor ของผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิง

รายการ	**หน่วย**	**Emission factor**	**ที่มา**
ไฟฟ้า	MJ	7.5720	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
สารส้ม	MJ	9.8974	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
โพลิเมอร์	MJ	62.2440	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	MJ	12.3060	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
คลอรีน	MJ	13.6593	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H
น้ำ	MJ	4.9371	Ecoinvent 3.3, ReCiPe Midpoint (H) V1.13 / World Recipe H

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ฉ-3.5 ค่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา

รายการ	หน่วย	ค่าเฉลี่ย (kg CO2 eq)				
		พ.ศ. 2557	พ.ศ. 2558	พ.ศ. 2559	พ.ศ. 2560	พ.ศ. 2561
ไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด	kg CO_2 eq	0.0753	0.0754	0.0725	0.0780	0.0780
ไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบจ่ายน้ำ	kg CO_2 eq	0.0098	0.0107	0.0094	0.0100	0.0109
ไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบส่งน้ำ	kg CO_2 eq	0.0418	0.0417	0.0405	0.0457	0.0458
ไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำ	kg CO_2 eq	0.0237	0.0230	0.0225	0.0223	0.0213
น้ำดิบ	kg CO_2 eq	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
สารส้มน้ำ	kg CO_2 eq	0.0190	0.0181	0.0227	0.0387	0.0323
โพลิเมอร์	kg CO_2 eq	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	kg CO_2 eq	0.0000	0.0000	0.0011	0.0000	0.0000
คลอรีน	kg CO_2 eq	0.0057	0.0054	0.0058	0.0057	0.0057
น้ำล้างบ่อกรอง	kg CO_2 eq	0.0060	0.0089	0.0063	0.0056	0.0045
รวม	kg CO_2 eq	0.1060	0.1078	0.1085	0.1281	0.1206

Chulalongkorn University

ตัวอย่างการคำนวณค่าผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน

<u>สารขาเข้า</u>

ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต	=	0.0422	kWh/m^3
Characterization factor	=	0.560	kg CO_2 eq/kWh
ค่าผลกระทบ	=	0.0422 x 0.560	kg CO_2 eq/m^3
	=	0.0236	kg CO_2 eq/m^3

ภาคผนวก ฉ-3.6 ค่าผลกระทบต่อภาวะความเป็นกรดจากกระบวนการผลิตน้ำประปา

รายการ	หน่วย	ค่าเฉลี่ย (kg SO2 eq)				
		พ.ศ. 2557	พ.ศ. 2558	พ.ศ. 2559	พ.ศ. 2560	พ.ศ. 2561
ไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด	kg SO_2 eq	0.00040	0.00040	0.00038	0.00041	0.00041
ไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบจ่ายน้ำ	kg SO_2 eq	0.00005	0.00006	0.00005	0.00005	0.00006
ไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบส่งน้ำ	kg SO_2 eq	0.00022	0.00022	0.00021	0.00024	0.00024
ไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำ	kg SO_2 eq	0.00012	0.00012	0.00012	0.00012	0.00011
น้ำดิบ	kg SO_2 eq	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
สารส้มน้ำ	kg SO_2 eq	0.00028	0.00026	0.00033	0.00056	0.00047
โพลิเมอร์	kg SO_2 eq	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	kg SO_2 eq	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
คลอรีน	kg SO_2 eq	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
น้ำล้างบ่อกรอง	kg SO2 eq	0.00003	0.00005	0.00003	0.00003	0.00002
รวม	kg SO2 eq	0.00073	0.00074	0.00077	0.00103	0.00093

ตัวอย่างการคำนวณค่าผลกระทบต่อความเป็นกรด

<u>สารขาเข้า</u>

สารส้มน้ำ	=	0.0719	kg/m^3
Characterization factor	=	0.0086	kg SO_2 eq/kg
ค่าผลกระทบ	=	0.0719 x 0.0086	kg SO_2 eq/m^3
	=	6.183×10^{-4}	kg SO_2 eq/m^3

ภาคผนวก ฉ-3.7 ค่าผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำ

รายการ	หน่วย	ค่าเฉลี่ย (m^3)				
		พ.ศ.2557	พ.ศ.2558	พ.ศ.2559	พ.ศ.2560	พ.ศ.2561
ไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด	m^3	0.0009	0.0009	0.0009	0.0010	0.0010
ไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบจ่ายน้ำ	m^3	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
ไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบส่งน้ำ	m^3	0.0005	0.0005	0.0005	0.0006	0.0006
ไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำ	m^3	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
น้ำดิบ	m^3	1.0662	1.0561	1.0355	1.0387	1.0383
สารส้มน้ำ	m^3	0.0007	0.0006	0.0008	0.0014	0.0011
โพลิเมอร์	m^3	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	m^3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
คลอรีน	m^3	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
น้ำล้างบ่อกรอง	m^3	0.0131	0.0195	0.0138	0.0122	0.0098
รวม	m^3	1.0812	1.0774	1.0512	1.0534	1.0504

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตัวอย่างการคำนวณค่าผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรน้ำ

<u>สารขาเข้า</u>

น้ำดิบ	=	1.0605	m^3/m^3
Characterization factor	=	1.000	m^3/m^3
ค่าผลกระทบ	=	1.0605 x 1.000	m^3/m^3
	=	1.0605	m^3/m^3

ภาคผนวก ฉ-3.8 ค่าผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิง

รายการ	หน่วย	ค่าเฉลี่ย (MJ)				
		พ.ศ. 2557	พ.ศ. 2558	พ.ศ. 2559	พ.ศ. 2560	พ.ศ. 2561
ไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด	MJ	1.0194	1.0204	0.9814	1.0560	1.0558
ไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบจ่ายน้ำ	MJ	0.1329	0.1443	0.1276	0.1352	0.1479
ไฟฟ้าที่ใช้ในการสูบส่งน้ำ	MJ	0.5657	0.5649	0.5487	0.6185	0.6200
ไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำ	MJ	0.3208	0.3112	0.3050	0.3023	0.2879
น้ำดิบ	MJ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
สารส้มน้ำ	MJ	0.3165	0.3009	0.3785	0.6445	0.5390
โพลิเมอร์	MJ	0.0001	0.0000	0.0001	0.0009	0.0002
โพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์	MJ	0.0000	0.0000	0.0428	0.0000	0.0000
คลอรีน	MJ	0.0600	0.0575	0.0619	0.0607	0.0605
น้ำล้างบ่อกรอง	MJ	0.0644	0.0953	0.0677	0.0599	0.0482
รวม	MJ	1.4603	1.4742	1.5323	1.8219	1.7037

ตัวอย่างการคำนวณค่าผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเชื้อเพลิง

<u>สารขาเข้า</u>

ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต	=	0.0422	kWh/m^3
Characterization factor	=	7.5720	MJ/kWh
ค่าผลกระทบ	=	0.0422 x 7.5720	MJ /m^3
	=	0.3195	MJ /m^3

บรรณานุกรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สราวิทย์ อาภรณ์รัตน์
วัน เดือน ปี เกิด	16 มีนาคม 2533
สถานที่เกิด	ประจวบคีรีขันธ์
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2560
ที่อยู่ปัจจุบัน	หมู่บ้านมัณฑนา ถนนชัยพฤกษ์ ตำบลบางพลับ อำเภอปากเกร็ด นนทบุรี 11120
ผลงานตีพิมพ์	สราวิทย์ อาภรณ์รัตน์ และ ศิริมา ปัญญาเมธีกุล. 2562. การสร้างตะกอนในถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน ของโรงงานผลิตน้ำบางเขน. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 18. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 18, จังหวัดกรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย, 23-24 พฤษภาคม 2562, หน้า 85-86.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University