

การใช้ถังปฏิกิริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟลิวคคูเลชัน
และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา

นางสาวรัชันน์ ชำนาญหอม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

USE OF HYBRID REACTOR: HYDROCYCLONE COAGULATION-FLOCCULATION AND
FLOTATION WITH AN INTERNAL WATER RECIRCULATION
IN TAP WATER TREATMENT PROCESS

Miss Ratchanan Chamnanmor

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน

โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน
ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา

โดย

นางสาวรัชันน์ ชำนาญหอม

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนิก)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ศรายุทธ ราชู)

รชนั้น ชำนาญหมอ : การใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟลอคคูเลชัน และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา (USE OF HYBRID REACTOR: HYDROCYCLONE COAGULATION-FLOCCULATION AND FLOTATION WITH AN INTERNAL WATER RECIRCULATION IN TAP WATER TREATMENT PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ.ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 211 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟลอคคูเลเตอร์ ความยาว 35 เมตร ซึ่งเป็นส่วนที่เตรียมก่อนเข้าสู่ถังปฏิกริยาไฮบริด และศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดซึ่งเป็นการนำไฮโดรไซโคลน ฟลอคคูเลชัน การลอยและแยกตะกอน มารวมกันไว้ในถังปฏิกริยาเดียว

ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อส่วนที่เตรียมก่อนเข้าสู่ถังปฏิกริยาไฮบริดคือ คุณสมบัติน้ำดิบและพลศาสตร์ของไหล ซึ่งจะส่งผลต่อการรวมตะกอนภายในเส้นท่อ โดยพบสภาวะที่เหมาะสมคือ ความเร็วเกรเดียนท์ 204.26 ต่อวินาที ระยะเวลาพัก 106.37 วินาที และ ตัวแปร G.T 21,715.57 โดยระบบให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 94.25 ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอน

ในการศึกษาถังปฏิกริยาไฮบริดโดยทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ผลการวิจัยพบว่า ถังปฏิกริยาไฮบริดสามารถสร้างฟลอคชนิดพิเศษที่มีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายใน ถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว กลับเข้ามาเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกริยาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดและประสิทธิภาพในการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใส โดยพบสภาวะที่เหมาะสมเมื่อเดินระบบด้วยถังปฏิกริยาไฮบริดนี้คือ อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 80 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในเป็น 1 เท่าของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ และมีสัดส่วนอากาศเท่ากับ 0.0059 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 64 และ 61.59 ตามลำดับ ระบบมีประสิทธิภาพในการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใส โดยทำการวิเคราะห์ความขุ่นและสารแขวนลอยเท่ากับ 65.71 และ 73.18 ตามลำดับ

ภาควิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม...ลายมือชื่ออนิสิต.....
สาขาวิชา...วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม...ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2556.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5370332521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : HYDROCYCLONE / HYBRID REACTOR / COAGULATION PROCESS / FLOCCULATION PROCESS / FLOTATION PROCESS / INTERNAL WATER RECIRCULATION

RATCHANAN CHAMNANMOR: USE OF HYBRID REACTOR: HYDROCYCLONE COAGULATION-FLOCCULATION AND FLOTATION WITH AN INTERNAL WATER RECIRCULATION IN TAP WATER TREATMENT PROCESS. ADVISOR: ASST. PROF. CHIYAPORN PUPRASERT, CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. PISUT PAINMANAKUL, 211 pp.

This research aimed to study in-line coagulation and flocculation processes, using a static mixer and a 35-m hydraulic flocculator as a pre-coagulation integrating with a hybrid reactor. The hybrid reactor is a special designed reactor that combines a hydrocyclone, flocculation, flotation as well as separation in one reactor.

For the study of the pre-coagulation, it was found that the treatment efficiencies were affected by raw water characteristics and fluid dynamic parameters (i.e. G, T and G.T). From this study, the optimal G, T and G.T values were 204.26 s^{-1} , 106.37 s and 21,715.57 s/s, respectively. The highest turbidity removal was 94.25% operating under this optimal condition analyzed by sedimentation methods.

For the study of the hybrid reactor that was operated continuously, it was found that the reactor could produce aerated floc with entrapped micro-bubbles inside. Furthermore, the results also showed that internal water recirculation, for the purpose of increasing velocity toward the top part of the reactor, could enhance treatment efficiency as well as separation efficiency between floc and treated water. The optimal conditions, particularly in this reactor, were 800 L/hr raw water flow rate, 80 L/hr pressurized water flow rate, internal water recirculation equal to raw water flow rate and air fraction of 0.0059. Under this optimal condition, the treatment efficiencies of turbidity and suspended solid were 64% and 61.59%, while separation efficiencies analyzing turbidity and suspended solid were 65.1 and 73.18, respectively.

Department : Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2013 Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยพระคุณของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภู่งประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้โอกาส และสละเวลาให้คำแนะนำและคำปรึกษา อีกทั้งยังคอยถ่ายทอดวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ และ ดร. ศรายุทธ ราชู ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำแนะนำ ดิฉันแก้ไขให้งานวิจัยนี้เป็นไปในแนวทางที่ดีและมีความสมบูรณ์มากที่สุด

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่คอยอบรมสั่งสอนความรู้ในทุกรายวิชาและคำปรึกษาในทุกเรื่อง

ขอขอบพระคุณนายประจักษ์ ศาสตร์เวช และบุคลากรของบริษัทริเวอร์ เอนจิเนียริง จำกัด และโรงผลิตน้ำประปาสามเสนที่อนุเคราะห์พื้นที่บริเวณโรงกำจัดตะกอนสามเสน ในการทำการวิจัยระดับทดลองนี้ และให้ความช่วยเหลือรวมทั้งให้คำปรึกษาในการติดตั้งอุปกรณ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์กรุณาให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ นายพชร โพธิ์ทอง นายณัฐวิญญู ชวลิตพรศิยา และนายธนากร อ้อมมุกดากุล สำหรับคำปรึกษา และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนสำหรับกำลังใจที่มีให้กันตลอดมา อีกทั้งยังคอยช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ทำวิจัย

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณแม่ คุณพ่อ ครอบครัว นายกานต์ ตุ่มศรี นางสาววิภาชนีย์ ตั้งกิจจาวิสุทธิ นางสาวมาริสรา สุทธาโรจน์ และนางสาวกมลนภัช อภิบุญสุวรรณ ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดสำหรับผู้วิจัยในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฒ
 บทที่	
1.บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2.เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การผลิตน้ำประปา.....	5
2.1.1 แหล่งน้ำดิบ.....	5
2.1.2 ลักษณะน้ำดิบ.....	5
2.1.3 ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา.....	6
2.2 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน.....	7
2.2.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	7
2.2.1.1 อนุภาคคอลลอยด์.....	8
2.2.1.2 เสถียรภาพของคอลลอยด์.....	8
2.2.1.3 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์.....	9
2.2.1.4 ทฤษฎีดับเบิลเลเยอร์.....	15
2.2.2 กระบวนการฟล็อกคูเลชัน.....	15

บทที่	หน้า
2.2.2.1 เพอร์โคเนติก ฟลึอคคูเลชัน.....	16
2.2.2.2 ออโรโคเนติก ฟลึอคคูเลชัน.....	16
2.2.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลึอคคูเลชัน.....	16
2.2.3.1 โคแอกกูแลนท์.....	16
2.2.3.2 ฟลึอคคูแลนท์.....	17
2.2.4 การเลือกสารโคแอกกูแลนท์.....	18
2.2.4.1 สารเคมีสำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นสูงและมีความเป็นต่างสูง.....	18
2.2.4.2 สารเคมีสำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นสูงและมีความเป็นต่างต่ำ.....	18
2.2.4.3 สารเคมีสำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำและมีความเป็นต่างสูง.....	18
2.2.4.4 สารเคมีสำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำและมีความเป็นต่างต่ำ.....	19
2.2.5 ความเร็วเกรเดียนท์.....	19
2.2.6 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลึอคคูเลชัน.....	19
2.2.6.1 การควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนท์ในถังกวนเร็ว.....	19
2.2.6.2 การควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนท์ในถังกวนช้า.....	20
2.3 กระบวนการทำให้ลอย.....	21
2.3.1 กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย.....	22
2.4 กฎของเฮนรี่.....	23
2.5 ไฮโดรไซโคลน.....	24
2.5.1 หลักการทำงานของไฮโดรไซโคลน.....	24
2.5.2 กฎของสโตก.....	25
2.5.3 รูปแบบการไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน.....	27
2.5.4 ความเร็วของการไหลภายในไฮโดรไซโคลน.....	27
2.5.4.1 ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง.....	27
2.5.4.2 ความเร็วในแนวแกน.....	29
2.5.4.3 ความเร็วในรัศมี.....	29
2.5.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลน.....	29

บทที่	หน้า
2.5.5.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน.....	29
2.5.5.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะของช่องจ่ายของไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน.....	30
2.5.5.3 ความยาว ขนาด และรูปร่างของช่องน้ำออกด้านบน.....	30
2.5.5.4 ลักษณะทางกายภาพของตัวไฮโดรไซโคลน	31
2.5.5.5 ขนาดและลักษณะของช่องจ่ายของผสมเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน.....	31
2.5.6 ข้อดีและข้อเสียของไฮโดรไซโคลน.....	31
2.5.6.1 ข้อดีของไฮโดรไซโคลน.....	31
2.5.6.2 ข้อเสียของไฮโดรไซโคลน.....	32
2.6 แนวคิดเกี่ยวกับถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล๊อคคูเลชันและการลอยตะกอนที่มีการเวียนกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา.....	32
2.6.1 แนวคิดเกี่ยวกับถังปฏิกริยาไฮบริด.....	32
2.6.2 ข้อดีและข้อเสียของถังปฏิกริยาไฮบริดเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตน้ำประปาทั่วไป.....	34
2.6.2.1 ข้อดีของถังปฏิกริยาไฮบริด.....	34
2.6.2.2 ข้อเสียของถังปฏิกริยาไฮบริด.....	35
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
2.7.1 การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล๊อคคูเลชัน ก่อนเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน....	35
2.7.2 การศึกษากระบวนการไฮบริด.....	40
3. ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	52
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	52
3.1.1 วัตถุประสงค์.....	52
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	52
3.1.3 สารเคมี.....	53
3.2 แผนการทดลอง.....	53
3.3 ส่วนประกอบและการติดตั้งอุปกรณ์ระดับทดลอง.....	54

บทที่	หน้า
3.3.1 ส่วนที่เตรียมน้ำอิมิตัวด้วยอากาศ.....	56
3.3.2 ส่วนที่เตรียมน้ำดิบสังเคราะห์.....	
3.3.3 ส่วนที่เตรียมนโคแอกกูแลนท์.....	56
3.3.4 ส่วนที่เตรียมนฟล็คคูลแลนท์.....	57
3.3.5 ส่วนที่เตรียมน้ำหมุนเวียนภายใน.....	57
3.3.6 ถังปฏิกริยาไฮบริด.....	57
3.4 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	57
3.5 วิธีเก็บน้ำตัวอย่าง.....	59
3.6 วิธีวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง.....	76
3.7 วิธีวิเคราะห์ประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริด.....	77
3.7.1 ประสิทธิภาพในแง่การบำบัดน้ำ.....	77
3.7.2 ประสิทธิภาพในแง่การแยกระหว่างฟล็คคูลและน้ำใส.....	77
	78
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	81
4.1 การศึกษาการกำจัดความขุ่นกระบวนกรโคแอกกูเลชั่นและฟล็คคูลเลชั่น.....	82
4.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์.....	82
4.1.2 การศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนกรโคแอกกูเลชั่น และฟล็คคูลเลชั่น.....	84
4.2 การศึกษากระบวนกรโคแอกกูเลชั่นและฟล็คคูลเลชั่นภายในเส้นท่อ โดยใช้สแตติคมิทเซอร์และไฮดรอลิคฟล็คคูลเลเตอร์.....	86
4.2.1 การศึกษาเปรียบเทียบความเร็วเกรเดียนท์ (G) ระหว่างสแตติคมิทเซอร์ และไฮดรอลิคฟล็คคูลเลเตอร์ กับการกวนเร็วและกวนช้าโดยใช้อุปกรณ์ จาร์เทสต์ ตามลำดับ.....	88
4.2.2 การศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาพัก (T) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	92
4.2.3 การศึกษาผลกระทบของตัวแปร G.T ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด ความขุ่น.....	98

บทที่	หน้า
4.2.4 การศึกษากระบวนการตกตะกอนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ โคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ	99
4.2.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพ ของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิกฟล็อกคูเลเตอร์.....	103
4.3 การศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา.....	111
4.3.1 การศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ ฟล็อกคูแลนต์ และ ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน.....	112
4.3.2 การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อปรากฏการณ์ ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด.....	119
4.3.3 การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศที่มีต่อปรากฏการณ์ ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด.....	128
4.3.4 การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายใน ที่จุดจ่าย น้ำหมุนเวียนภายในต่างๆ ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ภายในถังปฏิกริยาไฮบริด.....	132
4.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยทำการทดลองกับน้ำดิบจริงจาก โรงผลิตน้ำประปาสามเสน.....	142
5.สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	148
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	148
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	153
รายการอ้างอิง.....	155
ภาคผนวก.....	159
ภาคผนวก ก เอกสารข้อมูลผลการทดลองของกระบวนการโคแอกกูเลชันและ ฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ.....	160

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ข เอกสารข้อมูลของการใช้ถึงปฏิกิริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล๊อคคูเลชัน และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา.....	195
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	211

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ค่าพีเอชที่เหมาะสมตามชนิดไอออนของโคแอกกูแลนต์.....	17
2-2	สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำธรรมชาติด้วยกระบวนการไฮบริด.....	51
3-1	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1.....	59
3-2	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.....	60
3-3	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.....	63
3-4	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.....	64
3-5	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5.....	65
3-6	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6.....	66
3-7	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 7.....	67
3-8	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 8.....	69
3-9	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 9.....	70
3-10	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 10.....	71
3-11	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 11.....	72
3-12	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 12.....	74
3-13	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 13.....	75
4-1	ลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์.....	82
4-2	ค่าอัตราน้ำล้นผิวที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน ภายในเส้นท่อ ที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 60 ถึง 90.....	103
4-3	การแจกแจงมิติของตัวแปรต่างๆ.....	104
4-4	ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริดที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ค่าต่างๆ.....	121
4-5	สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการ เวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา โดยทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ เปรียบเทียบกับงานวิจัยของวรศิริ เสียงสนั่น (2552).....	141
4-6	คุณสมบัติของน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน.....	143

ตารางที่		หน้า
5-1	สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคคูเลชันภายใน เส้นท่อ.....	149
5-2	สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการ เวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา โดยทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์.....	152

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	การจำแนกขนาดของสารต่างๆ ในน้ำ	8
2-2	แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ.....	9
2-3	ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับอนุภาคคอลลอยด์.....	11
2-4	การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของ คอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ.....	11
2-5	กลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบเชื่อมด้วยโพลีเมอร์.....	14
2-6	ศักย์ไฟฟ้าของประจุรอบผิวคอลลอยด์.....	15
2-7	เส้นทางการไหลของไฮโดรไซโคลน	24
2-8	รูปแบบการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลน.....	27
2-9	แนวคิดของถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา	33
2-10	ปรากฏการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในงานวิจัยของ Puprasert (2004).....	40
2-11	ถังปฏิกริยาที่ใช้ในงานวิจัยของ วรศิริ เสียงสนั่น (2549).....	43
2-12	ถังปฏิกริยาไฮโดรไซโคลนลักษณะต่างๆ ในงานวิจัยของ Bumrungsri (2008) และวิธีหยदन้ำมัน (Oil droplet method).....	47
2-13	เส้นทางการเคลื่อนที่ของหยदन้ำมันภายในไฮโดรไซโคลน.....	48
3-1	แผนผังและลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์.....	55
3-2	ลักษณะของถังปฏิกริยาไฮบริด ซึ่งเป็นรูปร่างเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยของ วรศิริ เสียงสนั่น (2552).....	58
3-3	ความเร็วภายในถังปฏิกริยาไฮบริดที่ระดับความสูงต่างๆ.....	73
3-4	การเก็บตัวอย่างของถังปฏิกริยาไฮบริด.....	76
3-5	แผนภาพแสดงบริเวณที่เก็บพารามิเตอร์ต่างๆ มาวิเคราะห์ สำหรับคำนวณประสิทธิภาพในแง่การบำบัดน้ำ.....	78
3-6	แผนภาพแสดงบริเวณที่เก็บพารามิเตอร์ต่างๆ มาวิเคราะห์ สำหรับคำนวณประสิทธิภาพในแง่การแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส.....	80

4-1	ขนาดอนุภาคเบนโทไนท์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค.....	83
ภาพที่		หน้า
4-2	ผลการทดลองตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling) ที่ความขุ่นเริ่มต้นน้ำดิบสังเคราะห์ค่าต่างๆ.....	84
4-3	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่มีความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ด้วยอะลูมินัมซัลเฟตความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้จาร์เทสต์.....	85
4-4	กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ.....	87
4-5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเกรเดียนท์และอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ กับจาร์เทสต์.....	90
4-6	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาพักและอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ กับจาร์เทสต์.....	91
4-7	ผลของความเร็วเกรเดียนท์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น จากน้ำดิบสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน ภายในเส้นท่อ.....	93
4-8	การตกตะกอนภายในเส้นท่อ ที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง หรือความเร็วเกรเดียนท์ 83.35 ต่อวินาที.....	95
4-9	ภาพจำลองการเกิดการตกตะกอนภายในเส้นท่อ ที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อ ชั่วโมง หรือความเร็วเกรเดียนท์ 83.35 ต่อวินาที.....	95
4-10	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ค่าตัวแปร G.T และความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ เริ่มต้น ค่าต่างๆ.....	98
4-11	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และอัตราน้ำล้นผิว ที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ค่าต่างๆ และจาร์เทสต์ ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู.....	101
4-12	ประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์และอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ค่าต่างๆ.....	106

ภาพที่		หน้า
4-13	เปรียบเทียบผลการทำนายประสิทธิภาพด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับประสิทธิภาพจริงที่ได้จากการทดลอง เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบ สังเคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้นค่าต่างๆ.....	108
4-14	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเปรียบเทียบระหว่างของเหลวที่ผ่านการ ตกตะกอนด้วยคอลัมน์ทรงกระบอกและของเหลวที่ผ่านกระบวนการรวม ตะกอนภายในเส้นท่อ เมื่อใช้อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู.....	110
4-15	ผลการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ และฟล็อกคูแลนต์ ที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน 30 วินาที.....	113
4-16	กลไกการสร้างสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาค (Polymer bridging).....	114
4-17	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและระยะเวลาสำหรับ กระบวนการฟล็อกคูเลชัน เมื่อใช้โพลีเมอร์ประจุลบและ ความเข้มข้นอะลูมินัมซัลเฟตความเข้มข้นค่าต่างๆ	116
4-18	ผลการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) และความเข้มข้นของสารฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) ที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน 20 นาที.....	117
4-19	ลักษณะและขนาดของถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอก.....	120
4-20	การไหลแบบหมุนวน (Vortex) ขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกริยาไฮบริด เมื่อใช้อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง.....	122
4-21	การเกิดปรากฏการณ์รวมตัวกันของฟองอากาศ (Bubble coalescence) เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1200 ลิตรต่อชั่วโมง.....	123
4-22	ผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอย.....	124
4-23	ผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยก ฟล็อกและน้ำใส.....	126
4-24	ผลของอัตราการไหลน้ำอิมิตัวด้วยอากาศ ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัด ความขุ่น.....	128

ภาพที่	หน้า
4-25	ผลของอัตราการไหลน้ำอิมิตัวด้วยอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัด สารแขวนลอย..... 129
4-26	ผลของอัตราการไหลน้ำอิมิตัวด้วยอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพการแยก ระหว่างฟล็อกและน้ำใส (ความขุ่น)..... 130
4-27	ผลของอัตราการไหลน้ำอิมิตัวด้วยอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพการแยก ระหว่างฟล็อกและน้ำใส (สารแขวนลอย)..... 130
4-28	ความเร็วภายในถังปฏิกิริยาไฮบริดที่ระดับความสูงต่างๆ..... 133
4-29	แนวคิดในการเวียนน้ำใสกลับเข้ามาเพิ่มความเร็วช่วงบนของถังปฏิกิริยาไฮบริด 135
4-30	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารความขุ่น เมื่อมีการเวียนน้ำใสกลับเข้า มาเพื่อเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกิริยา ที่จุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน เท่ากับ 50 60 และ 70 เซนติเมตร..... 135
4-31	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารแขวนลอย เมื่อมีการเวียนน้ำใสกลับ เข้ามาเพื่อเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกิริยา ที่จุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน เท่ากับ 50 60 และ 70 เซนติเมตร..... 137
4-32	ผลของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการแยก ความขุ่น เมื่อมีการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับเข้ามาเพื่อเพิ่มความเร็ว ในช่วงบนของถังปฏิกิริยา โดยตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในเท่ากับ 50 60 และ 70 เซนติเมตร..... 137
4-33	ผลของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการแยก สารแขวนลอย เมื่อมีการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับเข้ามาเพื่อเพิ่ม ความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกิริยา โดยตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน เท่ากับ 50 60 และ 70 เซนติเมตร..... 138
4-34	ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยาไฮบริดเมื่อเดินระบบด้วยอัตรา การไหลน้ำหมุนเวียนภายในค่าต่างๆ ที่ตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน สูงจากขอบด้านล่าง 70 เซนติเมตร..... 139
4-35	บริเวณสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันหรือบริเวณสัมผัส และบริเวณแยก เมื่อมีการจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในที่ตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในต่างๆ

	จากขอบด้านล่างของถังปฏิกรณ์.....	140
ภาพที่		หน้า
4-36	ผลการศึกษาความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟตและโพลีเมอร์ประจุลบที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่นจากน้ำดิบจริงของโรงผลิตน้ำประปาสามเสน (จาร์เทสต์).....	143
4-37	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอย จากน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน เมื่อเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์ไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม.....	145
4-38	ประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส จากน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน เมื่อเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์ไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม.....	146
4-39	ฟล็อกชนิดพิเศษ ซึ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายใน (Aerated floc).....	147

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร รวมไปถึงการขยายตัวของชุมชนและอุตสาหกรรม แหล่งน้ำดิบเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตน้ำประปา แต่ปัญหาสำคัญในการนำน้ำดิบมาผลิตคือ ความขุ่นของน้ำดิบจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน ซึ่งจากข้อมูลของการประปานครหลวง พ.ศ.2552 พบว่ามีค่าความขุ่นเฉลี่ย 47 เอ็นทียู และช่วงที่มีความขุ่นโดยเฉลี่ยสูงที่สุดจะอยู่ในช่วง เดือนกันยายน-ตุลาคม โดยมีค่าความขุ่นประมาณ 88-107 เอ็นทียู (ธัญญธรณ์ สวัสดิวงษ์, 2553)

เทคโนโลยีของโรงผลิตน้ำประปาในปัจจุบันประกอบด้วยกระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation process) เพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์หรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่อยู่ในน้ำ กระบวนการฟล็อกคูเลชัน (Flocculation process) เพื่อรวมสารแขวนลอยขนาดเล็กให้เป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือที่เรียกว่า ฟล็อก (Floc) จากนั้นตะกอนขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจะถูกแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอน (Sedimentation) แล้วจึงนำไปผ่าน กระบวนการกรอง (Filtration) เพื่อกำจัดความขุ่นที่เหลืออยู่ในน้ำออกทั้งหมด และสุดท้ายคือ กระบวนการฆ่าเชื้อโรค ตามลำดับ ซึ่งแต่ละกระบวนการต้องการถึงปฏิกิริยา และพื้นที่ในการก่อสร้างจำนวนมาก ส่งผลให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการดำเนินการก่อสร้างและการบำรุงรักษา

ไฮโดรไซโคลอน (Hydrocyclone) เป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมเซรามิก และอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น เพื่อแยกของผสมออกจากกันโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในการแยกของผสมซึ่งอาจเป็นของแข็งกับของแข็ง ของแข็งกับของเหลว หรือของเหลวกับของเหลว โดยของผสมทั้งสองชนิดต้องมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ข้อดีของไฮโดรไซโคลอนคือ สามารถติดตั้งได้ง่าย ใช้พื้นที่น้อย ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ

แนวคิดของถึงปฏิกิริยาไฮบริดคือ การนำกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน การทำให้ฟล็อกลอย และแยกฟล็อกออกจากน้ำใสโดยอาศัยกลไกของไฮโดรไซโคลอน มารวมไว้ในถึงปฏิกิริยาเดียว เพื่อใช้ในการกำจัดความขุ่นจากแหล่งน้ำดิบ โดยสามารถช่วยลดจำนวนถึงปฏิกิริยา

และพื้นที่ในการดำเนินการ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตน้ำประปาที่ใช้กันทั่วไป นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในโรงผลิตน้ำประปาที่มีพื้นที่ใช้สอยจำกัด

จากงานวิจัยของ วรศิริ เสียงสนั่น (2552) ซึ่งทำการศึกษากระบวนการไฮบริดด้วยไฮโดรไซโคลนในการผลิตน้ำประปา พบว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดความขุ่นในน้ำดิบจากแม่น้ำลามาวัน ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งมีความขุ่นเพียง 6-7 เอ็นทียูได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยร้อยละ 61 และ 66 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วของไหลบริเวณตอนบนของถังปฏิกริยามีค่าต่ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส มีค่าไม่สูงเท่าที่ควร

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริดซึ่งเป็นการนำกลไกของไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน และกระบวนการแยกตะกอนออกโดยการทำให้ลอย มารวมกันไว้ในถังปฏิกริยาเดียวในการกำจัดความขุ่นจากแหล่งน้ำดิบซึ่งมีความขุ่นสูง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถังปฏิกริยาไฮบริดมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาในประเทศไทย และมีแนวคิดที่จะปรับปรุงถังปฏิกริยาไฮบริดโดยการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว (Internal water recirculation) กลับมาเพิ่มความเร็วของน้ำในช่วงบนของถังปฏิกริยา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ สารฟล็อกคูแลนต์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ และอัตราการไหลของน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริด

1.2.2 ศึกษาการปรับปรุงถังปฏิกริยาไฮบริดโดยเวียนน้ำกลับภายใน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในส่วนของการแยกฟล็อกออกจากน้ำใส โดยศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายใน และตำแหน่งของจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริด

1.2.3 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถังปฏิกริยาไฮบริดมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาในประเทศไทย

นอกจากนี้ เพื่อความสมบูรณ์ของงานวิจัย จึงมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1.2.4 ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity gradient, G) ระยะเวลาพัก (Retention time, T) ตัวแปร G.T ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ และความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ ที่มีต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes)

1.2.5 ศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) เพื่อทำนายประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจากน้ำดิบสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับทดลอง (Pilot scale) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง ณ โรงผลิตน้ำประปาสามเสน และห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตในการวิจัย ได้แก่

1.3.1 น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำดิบสังเคราะห์จากน้ำประปาผสมอนุภาคเบนโทไนท์ ให้มีความขุ่นตามที่ต้องการ และใช้น้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

1.3.2 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ ทำการทดลองโดยใช้สแตติคмикเซอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ความยาว 0.2 เมตร และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 35 เมตร

1.3.3 การใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอนที่มีการเวียนกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา ทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกริยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 1.2 เมตร ปริมาตร 9.42 ลิตร ซึ่งมีรูปร่างเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยของ วรศิริ เสียงสนั่น (2552)

1.3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าพีเอช สภาพความเป็นต่าง ความขุ่น และของแข็งแขวนลอย เพื่อนำไปคำนวณประสิทธิภาพในแง่ของการบำบัดน้ำ และประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส

1.3.5 การแสดงปรากฏการณ์บำบัดจะแสดงด้วยภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัล เพื่อศึกษาประสิทธิภาพระหว่างฟล็อกและน้ำใส

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับถังปฏิกริยาไฮบริด

1.4.2 ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

1.4.3 ทราบความเป็นไปได้ในการนำถังปฏิกริยาไฮบริดมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาในประเทศไทย

1.4.4 ทราบสถานะที่เหมาะสมของการดำเนินการด้วยถังปฏิกริยาไฮบริดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบจริงต่อไป

1.4.5 ทราบผลของการปรับปรุงถังปฏิกริยาไฮบริดโดยเพิ่มการเวียนน้ำกลับภายในกลับมาเพิ่มความเร็วของน้ำในช่วงบนของถังปฏิกริยา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตน้ำประปา

2.1.1 แหล่งน้ำดิบ (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2542)

แหล่งน้ำดิบถือเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตน้ำประปาให้ได้คุณภาพสูง เนื่องจากการเลือกแหล่งน้ำดิบที่มีความสกปรกน้อยที่สุดจะทำให้สามารถผลิตน้ำประปาได้ในราคาประหยัด แหล่งน้ำดิบในการผลิตประปาแบ่งออกเป็น 2 แหล่ง คือ

1) น้ำผิวดิน ได้แก่ น้ำจากแม่น้ำ คลอง ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ หนอง และบึง เป็นแหล่งน้ำดิบที่สำคัญมากในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากมีปริมาณมากกว่าแหล่งน้ำดิบอื่นและสะดวกต่อการนำมาใช้ประโยชน์ การไหลนองบนพื้นดินทำให้น้ำผิวดินได้รับความสกปรกจากสิ่งแวดล้อม โดยมักมีความขุ่นและสารอินทรีย์ในระดับสูง ปริมาณเกลือแร่ในน้ำอาจสูงหรือต่ำ นอกจากนี้น้ำฝนยังอาจชะล้างสารพิษต่างๆ ได้แก่ โลหะหนัก ไนเตรท ฟอสฟอรัส ยาฆ่าแมลง เป็นต้น จากบริเวณเกษตรกรรม มารวมกับน้ำผิวดิน

2) น้ำบาดาล หมายถึง น้ำที่ไหลซึมลงไปใต้ดินจะซึมผ่านชั้นต่างๆ ของดินจนถึงชั้นหินซึ่งซึมผ่านไม่ได้ มักมีปริมาณน้อย ความขุ่นต่ำ ปราศจากสีและสารอินทรีย์ ปริมาณสารละลาย (TDS) จะมีปริมาณสูง มักไม่มีออกซิเจนละลายน้ำ แต่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันใต้ดิน นอกจากนี้ยังพบเหล็กและแมงกานีสได้ง่ายในน้ำใต้ดิน

2.1.2 ลักษณะน้ำดิบ (การประปานครหลวง, www.mwa.co.th)

น้ำดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยา โดยแม่น้ำเจ้าพระยาจะไหลเข้าสู่สถานีสูบน้ำดิบสำแล ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการรับน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยามายังคลองประปาตะวันออก ซึ่งมีลักษณะเป็นคลองดิน เส้นทางของคลองประปาจะผ่านชุมชนและสิ่งก่อสร้างมากมาย เพื่อส่งน้ำต่อไปยังโรงงานผลิตน้ำ 3 แห่ง โดยให้บริการแก่พื้นที่ทางฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นหลัก ได้แก่ โรงผลิตน้ำบางเขน โรงผลิตน้ำสามเสน และโรงผลิตน้ำธนบุรี

สถานีสูบน้ำดิบสำแลเป็นจุดเริ่มต้นของการรับน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาเข้าสู่คลองประปาตะวันออก ที่ตำบลสำแล จังหวัดปทุมธานี ห่างจากกรุงเทพ 41 กิโลเมตร ไกลจากปากอ่าวไทย 90 กิโลเมตร แล้วส่งต่อเข้าสู่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน โดยมีปริมาณการสูบน้ำดิบประมาณวันละ 3.8 ล้านลูกบาศก์เมตร และจากการสอบถามข้อมูลลักษณะน้ำดิบตลอดช่วงปี 2552 พบว่า มีค่าความขุ่นเฉลี่ย 47 เอ็นทียู โดยจากข้อมูลช่วงที่มีความขุ่นโดยเฉลี่ยสูงที่สุดอยู่ในช่วงเดือนกันยายน-ตุลาคม มีค่าความขุ่นประมาณ 88-107 เอ็นทียู (ธัญธรณ์ สวัสดิวงษ์, 2553)

2.1.3 ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา (มันสิน ตันกุลเวศน์, 2542)

ขั้นตอนและกรรมวิธีในการผลิตน้ำประปาโดยทั่วไป เป็นไปตามหลักเกณฑ์การผลิตน้ำของการประปานครหลวงคือ การใช้สารเคมีเป็นตัวปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ การกำจัดตะกอนผ่านกระบวนการกรองน้ำ และการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้คลอรีน เพื่อให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำดื่ม โดยแบ่งขั้นตอนในการผลิตที่สำคัญออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

1) การสูบน้ำ การผลิตน้ำประปาเริ่มจากการสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลำเลียงเข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งน้ำดิบที่สามารถนำมาผลิตน้ำประปาได้นั้นต้องเป็นน้ำที่ไม่มีสี กลิ่น รส และสิ่งสกปรกใดโครกปนเปื้อนเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด หลังจากนั้นจะผ่านตะแกรงหยาบ (Trash rack) และตะแกรงละเอียด (Fine screen) เพื่อกำจัดสวะ เศษไม้ สาหร่าย กุ้งปลา สติ๊ก และสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ที่ลอยมากับน้ำดิบ ดักเก็บและป้องกันไม่ให้วัสดุที่ไม่ต้องการเหล่านี้ เข้าไปเป็นอันตรายหรืออุดตันเครื่องสูบน้ำและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตน้ำ

2) การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ ทำโดยการเติมสารเคมี เช่น สารส้มและปูนขาว เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ สารละลายสารส้มจะช่วยให้การตกตะกอนได้ดีขึ้น และสารละลายปูนขาวจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำ บางครั้งจะมีการเติมคลอรีนเพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนมากับน้ำในขั้นตอนนี้ก่อน

3) การตกตะกอน เมื่อเติมสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบแล้ว ตะกอนในน้ำดิบจะทำปฏิกิริยากับสารเคมีรวมตัวกันเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นไหลเข้าถังตกตะกอน ทำให้ตะกอนหนักตกสู่พื้นล่างของถังตกตะกอนและน้ำส่วนบนจะไหลเข้ารางรับน้ำไปยังบ่อกรองน้ำ ส่วนตะกอนหนักที่อยู่พื้นล่างจะถูกระบายออกไปเก็บไว้ในบ่อพักตะกอนเพื่อรอการกำจัดต่อไป

4) การกรอง น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วยังคงมีตะกอนละเอียดแขวนลอยอยู่บางส่วน (ความขุ่นไม่เกิน 5 เอ็นทียู) จะไหลเข้าสู่ถังกรองทรายเพื่อกำจัดตะกอนที่ละเอียดอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งน้ำที่ผ่านการกรองขั้นตอนนี้จะมีความใสมากโดยมีความขุ่นไม่เกิน 2 เอ็นทียู

5) การฆ่าเชื้อโรคและควบคุมความเป็นกรด-ด่าง น้ำที่ออกจากถังกรองทรายก่อนที่จะนำไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำใสอาจยังมีแบคทีเรียหลงเหลืออยู่ จึงต้องมีการฆ่าเชื้อโรคเพื่อให้ความปลอดภัยสามารถอุปโภคและบริโภคได้ โดยจะใช้คลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อโรคและเติมน้ำปูนขาวเพื่อปรับสภาพสภาวะความเป็นกรด-ด่าง ให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก

6) การควบคุมคุณภาพน้ำประปา ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะน้ำประปาที่ทำการผลิตมาแล้วนั้นจะต้องวิเคราะห์ตรวจสอบอีกครั้ง ซึ่งต้องดำเนินการอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ได้น้ำประปาที่สะอาด ปลอดภัย สำหรับการอุปโภคบริโภค

7) การสูบน้ำประปา น้ำประปาที่ได้ผ่านกรรมวิธีการผลิตข้างต้นจะมีการเก็บตัวอย่างน้ำไปตรวจสอบวิเคราะห์อยู่ตลอดเวลา เพื่อประกันว่าจะได้คุณภาพตามมาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก สามารถบริโภคได้อย่างปลอดภัย และจะถูกสูบน้ำจากถังเก็บน้ำใสเข้าระบบท่อประปา เพื่อจ่ายให้กับประชาชนในเขตบริการของการประปานครหลวงต่อไป

จากขั้นตอนการผลิตน้ำประปาดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นจะเห็นได้ว่า ระบบผลิตน้ำประปาทั่วไปประกอบด้วยหลากหลายขั้นตอนและกรรมวิธีในการผลิต ซึ่งจำเป็นต้องใช้ถึงปฏิกิริยาและพื้นที่เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้หากนำถึงปฏิกิริยาไฮบริดมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา จะสามารถรวมขั้นตอนที่ 2 และ 3 เข้าไว้ด้วยกัน อีกทั้งยังช่วยลดขนาดพื้นที่ในการดำเนินการเนื่องจากถึงปฏิกิริยามีขนาดเล็ก

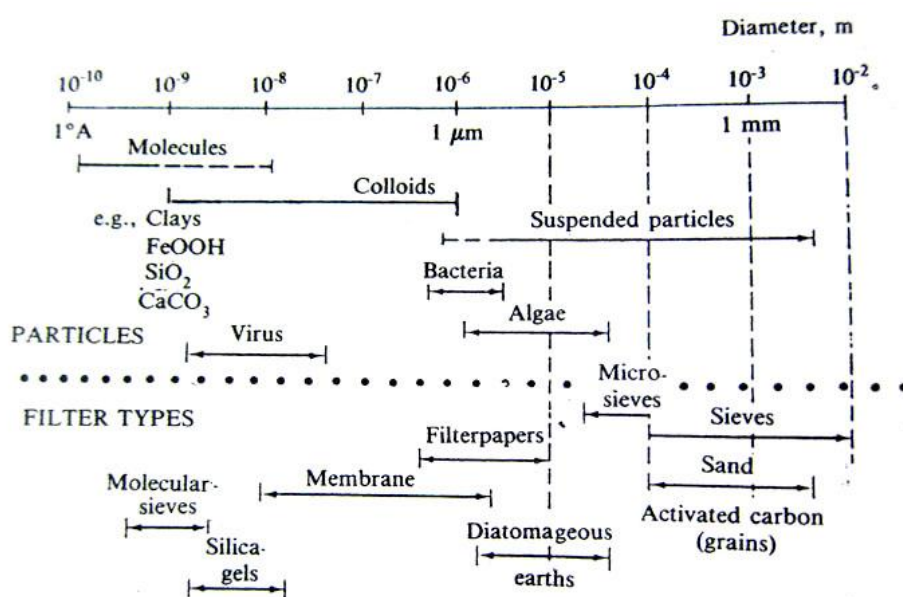
2.2 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (Coagulation and flocculation processes)

2.2.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation process) (มันสิน ตันกุลเวศน์, 2542)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน คือการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีขนาดเล็กมากและน้ำหนักเบาจนไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาจำกัด ให้สามารถจับตัวเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อกขนาดเล็ก (Microfloc) ได้

2.2.1.1 อนุภาคคอลลอยด์

ความขุ่นหรือสารแขวนลอย เป็นปัญหาสำคัญของกระบวนการผลิตน้ำประปา อีกทั้งยังเป็นสาเหตุทำให้ต้นทุนการผลิตด้านสารเคมีสูง ความยากง่ายในการกำจัดความขุ่นจะขึ้นกับขนาดเป็นสำคัญ ความขุ่นที่เกิดจากขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ย่อมสามารถกำจัดได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ความขุ่นที่สร้างปัญหาต่อการผลิตน้ำประปามักเกิดจากอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particle) ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10^{-6} มิลลิเมตร (1 นาโนเมตร) จนถึง 10^{-3} มิลลิเมตร (1 ไมครอน)

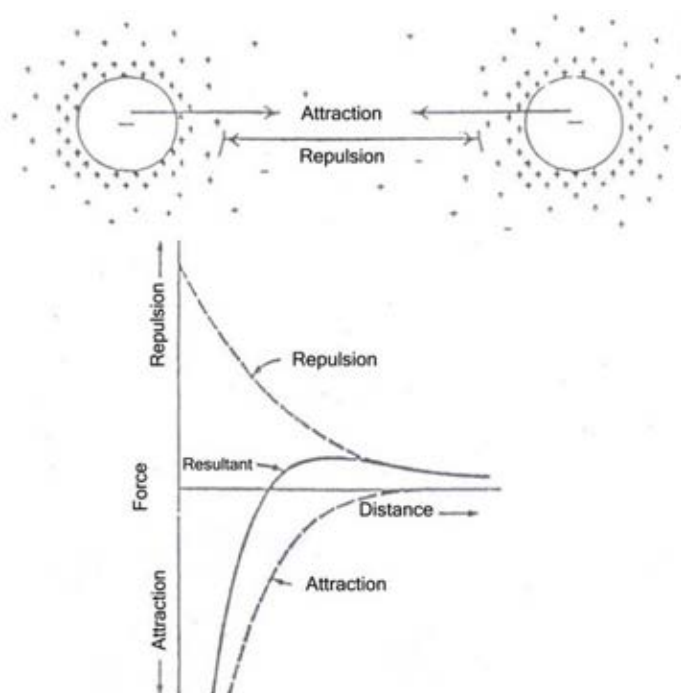


ภาพที่ 2-1 การจำแนกขนาดของสารต่างๆ ในน้ำ (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2542)

2.2.1.2 เสถียรภาพของคอลลอยด์

ระบบคอลลอยด์อาจมีเสถียรภาพหรือไม่ก็ได้ อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพเมื่อสามารถดำรงสถานะแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนภายในระยะเวลาจำกัด เมื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์ตกตะกอนและแยกตัวออกจากน้ำก็ถือว่า เสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกทำลายและไม่มีเสถียรภาพอีกต่อไป ด้วยเหตุนี้เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงผลักระหว่างอนุภาคจะต้องสูงกว่าแรงดึงดูดจึงจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดึงดูดมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาค อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ สามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟลอคได้ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์เสียเสถียรภาพได้ แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า van der Waals force เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิด

ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค ดังภาพที่ 2-2 จะเห็นได้ว่าแรงดึงดูดมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลักรกต่อเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากๆ โดยปกติแล้วแรงผลักรกซึ่งเกิดจากซีตาโพเทนเชียลไม่เปิดโอกาสให้อนุภาคต่างๆ เข้ามาใกล้จนเกิดการดูดเข้าหากัน



ภาพที่ 2-2 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ (มันลีน ตันซูลเวสท์, 2542)

2.2.1.3 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

เสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงผลักรกและแรงดูดระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ แรงผลักรกเกิดขึ้นจากศักย์ไฟฟ้าซึ่งชักนำโดยประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ ส่วนแรงดูดเป็น Van Der Waals Force ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของอนุภาคขนาดเล็กและของโมเลกุล แรงผลักรกซึ่งมากกว่าแรงดูดทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ถ้าแรงดูดสูงกว่าแรงผลักรก อนุภาคคอลลอยด์จะไม่มีเสถียรภาพและไม่สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถกระทำได้โดยอาศัยกลไก

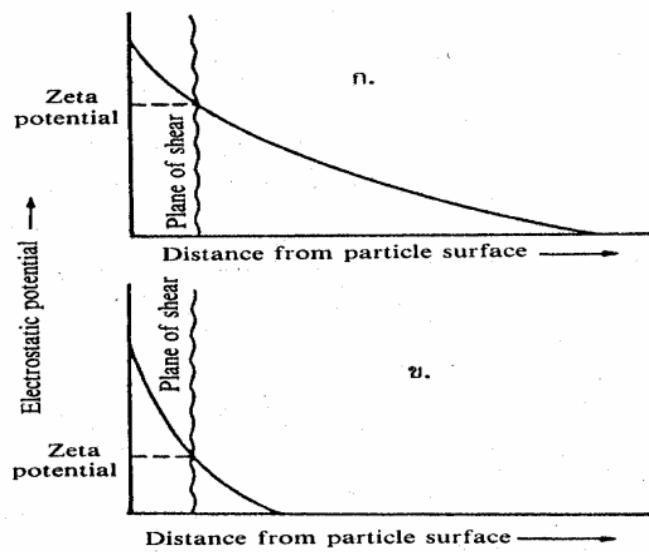
4 แบบ คือ

1. การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer)

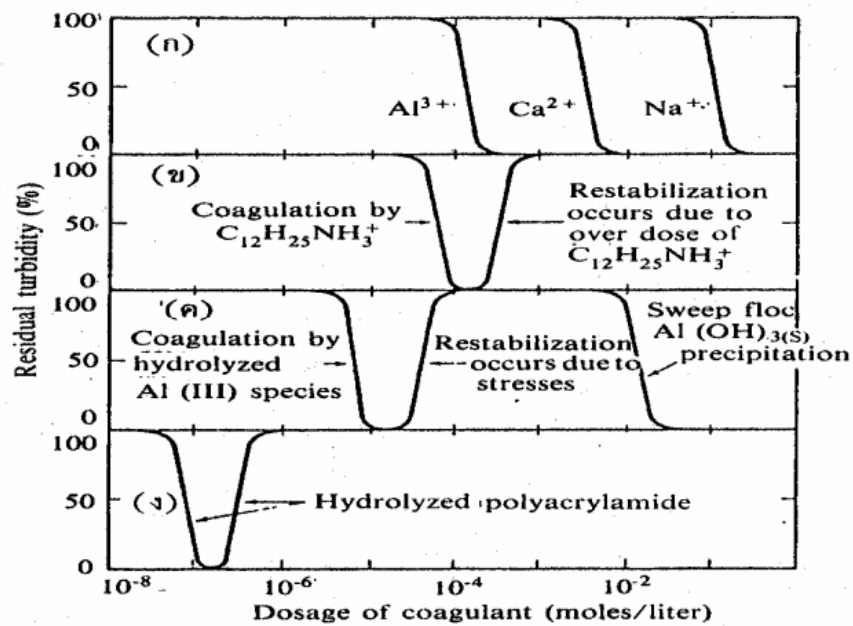
การเพิ่มจำนวนของไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค เป็นการเพิ่มจำนวน Counter Ion ในชั้นกระจาย ผลที่เกิดขึ้นคือ ชั้นกระจายมีความหนาแน่นและทำให้ซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย (ภาพที่ 2-3) การที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมีประจุบวกเข้าไป ออกันอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้นทำให้อำนาจของประจุบวของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม ไอออนต่างๆ มีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจาย (ซึ่งเท่ากับลดซีตาโพเทนเชียล) ไม่เท่ากัน ปรากฏว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ (Valence) 1 2 และ 3 มีอำนาจดังกล่าวเป็นสัดส่วน 1:10:1,000 ตามลำดับ เช่น Al^{3+} จะให้ผลดีกว่า Ca^{2+} ถึง 1,000 เท่า (ภาพที่ 2-4) ข้อสังเกตที่ควรตระหนักคือ ไอออนบวกต่างๆ ดังกล่าวไม่ได้ดำรงอยู่อย่างอิสระ เนื่องจากไอออนบวกเหล่านี้ มักมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ เช่น Al^{3+} มีน้ำ 6 โมเลกุลจับกันอยู่ การที่ Al^{3+} หรือโลหะอื่นๆ มีน้ำจับรวมอยู่ด้วย เป็นข้อเสียเพราะจะทำให้ไอออนบวก (ของโลหะ) ไม่สามารถดูดติดที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ โมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนเกราะป้องกันการสัมผัสโดยตรง ระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับไอออนบวก ไอออนบวกต่างๆ จึงออกันอยู่ในชั้นกระจายและไม่สามารถทำลายประจุบวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ดีเท่าที่ควร การลดโมเลกุลของน้ำในสารประกอบคอมเพล็กซ์ซึ่งช่วยให้ไอออนบวกและอนุภาคคอลลอยด์เข้าใกล้กันมากขึ้น เช่น $Al(OH)(H_2O)_5^{+2}$ หรือ $Al(OH)_2(H_2O)_4^+$ สามารถเกาะติดบนผิวอนุภาคคอลลอยด์ได้ แต่ $Al(H_2O)_6^{+3}$ ไม่สามารถกระทำได้ด้วยเหตุนี้ ภาพที่ 2-4 (ค) จึงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า $Al(OH)^{+2}$ หรือ $Al(OH)_2^+$ หรือสารคอมเพล็กซ์อื่นๆ สิ้นเปลืองน้อยกว่า Al^{3+} ในการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ การทำลายเสถียรภาพโดยการลดความหนาของชั้นกระจายด้วยการเติมสารละลายของเกลือต่างๆ มีข้อที่น่าสนใจดังนี้

(1) ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้า (ที่มีไอออนประจุบวก) ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยวิธีลดความหนาของชั้นกระจายไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์

(2) ไม่ว่าจะเติมไอออนบวกมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้อนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวกได้ (Charge Reversal) ดังภาพที่ 2-4 (ก)



ภาพที่ 2-3 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับอนุภาคคอลลอยด์ (ก) ก่อนเติมไอออน (ข) หลังจากการเติมไอออนแล้ว (มันลิน ตัณฑุลเวศน์, 2542)



ภาพที่ 2-4 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ด้วยกลไกแบบต่างๆ จะเห็นว่าแบบ (ก) เป็นการลดความหนาของชั้นกระจายด้วย Al^{3+} , Ca^{+2} และ Na^{+} ต้องการสารเคมีมากที่สุด ส่วนแบบ (ง) เป็นการใช้โพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมโยงให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมตัวกันมีความต้องการสารเคมีโคแอกกูแลนต์ที่น้อยที่สุด (มันลิน ตัณฑุลเวศน์, 2542)

2. การทำลายอำนาจประจุของอนุภาคคอลลอยด์

สารเคมีบางหมู่สามารถดูดติด (Adsorbed) บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ถ้าสารเหล่านั้นมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ การดูดติดผิวจะมีผลในทางการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กลไกแบบดูดติดผิวนี้นี้แตกต่างจากกลไกแบบแรก 3 ประการ ดังนี้

(1) กลไกแบบดูดติดผิวต้องการไอออนต่างชนิดน้อยกว่ากลไกแบบแรก เนื่องจากไอออนต่างประจุสามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ การทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์จึงได้ผลดีกว่าไอออนต่างประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้

(2) การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดติดผิว เป็นแบบสโตยชิโอเมตริก (Stoichiometric) กล่าวคือ ปริมาณของโคแอกกูแลนต์ที่ใช้เพิ่มหรือลดตามการเพิ่มหรือลดของปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ แต่การทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่เป็นสโตยชิโอเมตริก

(3) กลไกแบบดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามกับของเดิม (Charge Reversal) ทั้งนี้การใช้โคแอกกูแลนต์มากเกินไป เสถียรภาพของคอลลอยด์จะฟื้นขึ้นมาใหม่เนื่องจากการเปลี่ยนประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น กลไกแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนประจุเป็นตรงกันข้าม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าจำนวนไอออนต่างชนิดในชั้นกระจายถูกกำจัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์เสมอ โคแอกกูแลนต์ที่เติมมากเกินไปจะอยู่นอกชั้นกระจาย ดังนั้นไม่ว่าจะเติมโคแอกกูแลนต์มากเท่าใด การเปลี่ยนประจุของคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้าม จะไม่สามารถเกิดขึ้นถ้าโคแอกกูแลนต์ไม่สามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ข้อที่ควรสังเกตเกี่ยวกับ Charge Reversal ของกลไกแบบดูดติดผิวคือ การที่ไอออนต่างประจุสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์จนประจุเปลี่ยนเป็นตรงกันข้าม แสดงว่ามีปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนต่างประจุกับอนุภาคคอลลอยด์จนสามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกันได้

3. การห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น

ถ้าเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปในน้ำในปริมาณที่เพียงพอจะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าว เพื่อให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรืออาจจับตัวรวมกับผลึก ลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ อาจถือว่าเป็นการเพิ่มขนาดหรือนำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ เป็นผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้

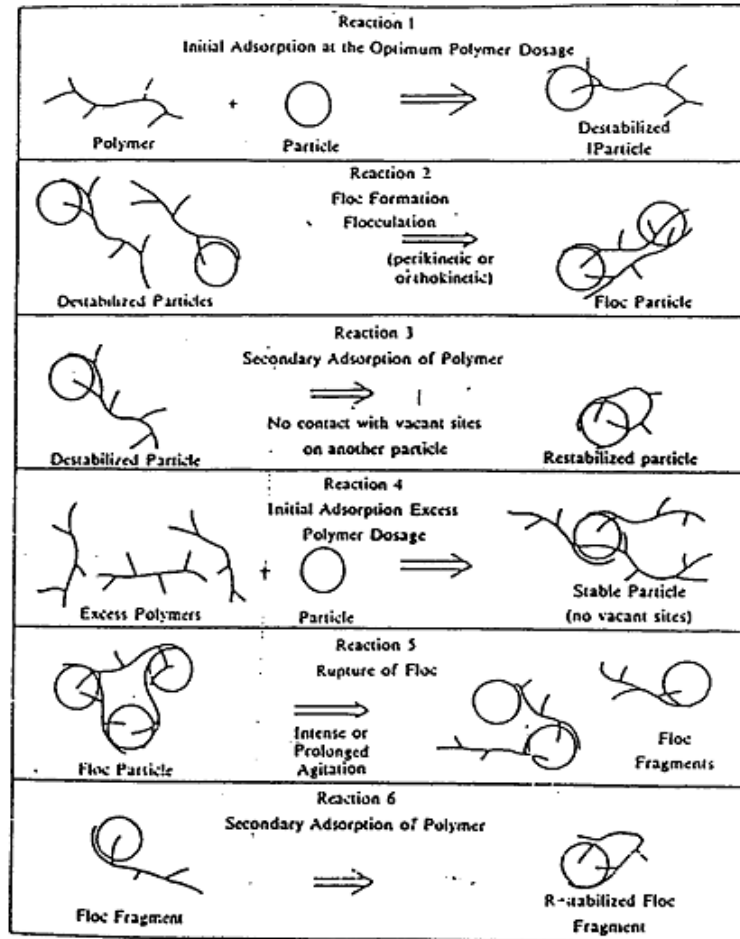
กลไกที่ใช้ผลึกสารอินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรก คือ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมแปรผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ น้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้โคแอกกูแลนต์จำนวนมากจึงจะเกิดการตกตะกอนได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้โคแอกกูแลนต์น้อยกว่า เหตุผลคือน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้นแม้ว่าการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นแล้วก็ตาม การตกตะกอนอาจไม่เกิดได้ดีเท่าที่ควร การใช้โคแอกกูแลนต์ปริมาณสูงก็เพื่อสร้างผลึกจำนวนมากๆ สำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูงโอกาสสัมผัสย่อมมีมากจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมากเท่าในกรณีแรก

เนื่องจากกลไกแบบนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ การตกตะกอนจึงไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นในขณะที่ซีตาโพเทนเชียลมีค่าต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามพีเอชมีบทบาทสำคัญมากต่อกลไกแบบนี้ เนื่องจากมีความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการตกผลึกของสารต่างๆ โดยโคแอกกูแลนต์แต่ละตัวจะมีระดับพีเอชที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน

4. การใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์

กลไกลักษณะนี้อธิบายได้โดยโมเดลที่เรียกว่า Polymer Bridging (ภาพที่ 2-5) กล่าวคือ สารโพลีเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง ซึ่งการเกาะติดนี้อาจเป็นผลมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และอนุภาคคอลลอยด์ หรือเป็นแรงทางปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่ต่างกันระหว่างโพลีเมอร์และอนุภาคคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติด โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่นๆ ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (Destabilized particle) อนุภาคนี้สามารถจับกับอนุภาคอื่นๆ ได้ โดยอาศัยโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม ในกรณีที่ปลายอิสระของโพลีเมอร์ไม่มีที่เกาะจับอนุภาคอื่นๆ ปลายอิสระจะจับอนุภาคเดิม ทำให้ไม่มีปลายอิสระจับอนุภาคอื่นและตำแหน่งว่างบนพื้นผิวลดลง เรียกว่า อนุภาคมีเสถียรภาพกลับคืน (Restabilized particle) กรณีใช้สารโพลีเมอร์มากเกินไปจะเกิดผลเสียเพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์จนกระทั่งไม่มีตำแหน่งว่างบนพื้นผิวอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาค นอกจากนี้การกวนที่รุนแรงหรือนานเกินไปจะทำให้ฟลอคที่เกิดขึ้นแล้วกลับแตกออกเป็นส่วนๆ

และทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับบนอนุภาคเดิม อนุภาคคอลลอยด์จึงคืนเสถียรภาพอีกครั้ง



ภาพที่ 2-5 กลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบเชื่อมด้วยโพลีเมอร์ (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2542)

ในงานวิจัยนี้จะใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นโคแอกกูแลนต์ โดยใช้กลไกกลไกการดูดติดผิวและการตกตะกอนแบบกวาด ตามลำดับ สาเหตุที่ใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นโคแอกกูแลนต์ เนื่องจากอะลูมิเนียมซัลเฟตมีความเหมาะสมกับลักษณะน้ำดิบในประเทศไทยซึ่งเป็นน้ำดิบที่มีความขุ่นค่อนข้างสูงและความเป็นด่างสูง ส่งผลให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันได้ง่าย นอกจากนี้อะลูมิเนียมซัลเฟตยังมีราคาถูก จึงมีความเหมาะสมในการศึกษาความเป็นไปได้และสภาวะที่เหมาะสมของถังปฏิกริยาไฮบริด

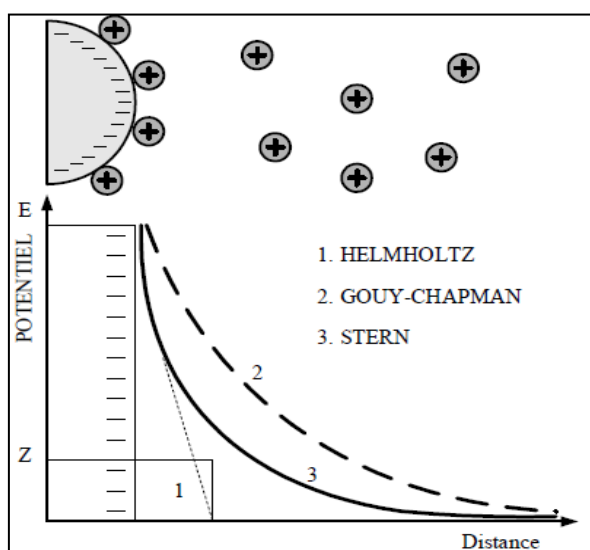
2.2.1.4 ทฤษฎีดับเบิลเลเยอร์ (The double layer theory)

ปกติคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำดิบจะมีประจุลบที่ผิว ทำให้ไอออนประจุบวกที่อยู่ในน้ำจะหนาแน่นบริเวณผิวคอลลอยด์ เกิดเป็นชั้นของประจุบวกรอบๆ ทฤษฎีต่างๆ ที่กล่าวถึงชั้นประจุดังนี้ (Monod, 1991)

- ทฤษฎีของ Helmholtz: ชั้นของไอออนประจุบวกจะปกคลุมผิวของคอลลอยด์และลดลงแบบเชิงเส้นจนเป็นกลางเมื่อระยะห่างออกไป เรียกความหนาบริเวณนี้ว่า Boundary layer

- ทฤษฎีของ Gouy-Chapman: ชั้นของไอออนประจุบวกจะปกคลุมผิวของคอลลอยด์และค่อยๆ ลดลงจนเป็นกลางเมื่อระยะห่างออกไป เรียกความหนาบริเวณนี้ว่า Diffuse layer ซึ่งจะหนามากกว่าชั้น Boundary layer จากทฤษฎีของ Helmholtz

- ทฤษฎีของ Stern เป็นการนำทฤษฎีทั้งสองข้างต้นมารวมกัน และเรียกใหม่ว่าเป็นทฤษฎีดับเบิลเลเยอร์ (Double layer theory) โดยชั้นแรกคักย์ของประจุที่ผิวคอลลอยด์ลดลงรวดเร็ว ส่วนในชั้นที่สอง คักย์ของประจุที่ผิวคอลลอยด์ลดลงอย่างช้าๆ เมื่อระยะห่างออกไป ดังแสดงดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 คักย์ไฟฟ้าของประจุรอบผิวคอลลอยด์

2.2.2 กระบวนการฟลอคคูเลชัน (Flocculation process)

กระบวนการฟลอคคูเลชัน คือ กระบวนการที่ทำให้กลุ่มอนุภาค หรือฟลอคขนาด เล็กที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน มีโอกาสสัมผัสและรวมตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคที่มี

ขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้การแยกออกจากน้ำเป็นไปได้ง่ายขึ้น สิ่งที่จะต้องพิจารณาในการสร้างโอกาสในการสัมผัสระหว่างกลุ่มอนุภาคขนาดเล็ก (Microfloc) คือ ความเข้มข้นของปริมาณของแข็งแขวนลอยในตัวกลาง และขนาดของกลุ่มอนุภาคขนาดเล็กดังกล่าว

2.2.2.1 เพอริไคเนติก ฟลอคคูเลชัน (Perikinetic flocculation)

คือ การสร้างสัมผัสระหว่างฟลอคขนาดเล็กต่างๆ ที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน หรืออาศัยความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำ โดยฟลอคขนาดเล็กจะกระทบกันเองเนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ วิธีนี้จะใช้เวลานานมาก จึงไม่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา นอกจากนี้วิธีนี้สามารถสร้างสัมผัสให้กับคอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า 0.1-1 ไมครอน เท่านั้น

2.2.2.2 ออโธไคเนติก ฟลอคคูเลชัน (Orthokinetic flocculation)

คือ การสร้างโอกาสสัมผัสให้กับฟลอคขนาดเล็กโดยใช้อุปกรณ์ทำลายเสถียรภาพ หรือเรียกว่า ถังกวนช้า ทำให้แต่ละอนุภาคมีความเร็วไม่เท่ากัน และเกิดการชนหรือสัมผัสกัน ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป อนุภาคควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอน และความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยวิธีนี้จะต้องทำให้น้ำมีความปั่นป่วนโดยสามารถวัดได้ด้วยพารามิเตอร์ที่เรียกว่า ความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity gradient: G) อย่างไรก็ตาม ถ้าอนุภาคมีขนาด 1 ไมครอน จะมีอัตราการรวมกลุ่มเป็นฟลอคขนาดเล็กสูงกว่าหรือเท่ากับในฟลอคคูเลชันแบบออโธไคเนติก เมื่อค่าความเร็วเกรเดียนท์มากกว่าหรือเท่ากับ 10 ต่อวินาที ดังนั้นกระบวนการฟลอคคูเลชันในงานวิจัยนี้จึงควรเป็นแบบออโธไคเนติก

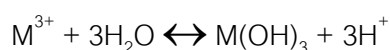
2.2.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคคูเลชัน

2.2.3.1 โคแอกกูแลนต์ (Coagulant)

โคแอกกูแลนต์ คือสารที่ใช้ในการลดเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยทั่วไปโคแอกกูแลนต์มักเป็นสารประเภทอนินทรีย์ไตรวาเลนต์ประจุบวก (Trivalent cations)

เนื่องจากที่ผิวคอลลอยด์มีประจุลบ ดังนั้นในการทำให้ประจุเป็นกลาง ต้องมีการเพิ่มโคแอกกูแลนต์ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่มีประจุบวก ถ้ามีวาเลนซ์สูงกว่า จะทำให้มีประสิทธิภาพในการเกิดโคแอกกูเลชันได้มากกว่า (โดยทฤษฎีของ Schultz-Hardy กล่าวว่า ไตรวาเลนท์อิเล็กตรอนมีประสิทธิภาพมากกว่าไดวาเลนท์อิเล็กตรอนไอออนถึงสิบเท่า) (Monod, 1991) ในการเลือกสารโคแอกกูแลนต์ควรพิจารณาสารที่ไม่เป็นพิษต่อน้ำและราคาไม่แพง ดังนั้นจึงนิยมใช้สารโคแอกกูแลนต์แบบไตรวาเลนท์ประจุบวก หรือเกลืออะลูมิเนียมในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

นอกจากนี้ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารโคแอกกูแลนต์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำที่ต้องการบำบัด



ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดคอลลอยด์จะอยู่ระหว่างค่าพีเอชที่เหมาะสมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน และค่าพีเอชที่เหมาะสมกับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของคอลลอยด์และกลุ่มอนุภาคที่รวมตัวจากเหล็กหรืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป ตามลำดับ

ตารางที่ 2-1 ค่าพีเอชที่เหมาะสมตามชนิดไอออนของโคแอกกูแลนต์ (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2542)

ไอออนบวก	ค่าพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน
Al ³⁺	6.0-7.4
Fe ³⁺	>5

2.2.3.2 ฟล็อกคูแลนต์ (Flocculant)

ฟล็อกคูแลนต์ หรืออาจเรียกว่า โคแอกกูแลนต์เอ็ดส์ (Coagulant aids) คือสารที่ช่วยในการรวมตะกอนที่ผ่านการลดเสถียรภาพแล้ว ให้มารวมกลุ่มและมีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้ง่ายต่อการแยกออกจากน้ำต่อไป ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการใช้สารอนินทรีย์โพลิเมอร์ เช่น แอลคิลเวตเต็ดซิลิกา และสารโพลิเมอร์ในธรรมชาติ เช่น แป้ง เป็นฟล็อกคูแลนต์ แต่ปัจจุบันสารโพลิเมอร์สังเคราะห์ให้ประสิทธิภาพในการเกิดฟล็อกคูเลชันที่ดีกว่า สารฟล็อกคูแลนต์จะไม่ส่งผลใดๆ จนกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันจะผ่านไปก่อน และเวลาที่ใช้ในขั้นตอนโคแอกกูเลชันขึ้นอยู่กับ

กับชนิดของคอลลอยด์ อุณหภูมิของน้ำดิบ ปัจจัยหลักที่ควรคำนึงถึงคือขนาดของฟล็อก การเกาะตัวกัน และอัตราการตกตะกอน

การใช้สารฟล็อกคูแลนท์สังเคราะห์ โดยส่วนใหญ่จะให้ปริมาณตะกอนสลัดจ์น้อยที่สุด และเมื่อใช้เทคนิคการแยกฟล็อกออกจากน้ำที่ทันสมัย จะทำให้ได้ตะกอนสลัดจ์ที่เข้มข้น สามารถส่งไปบำบัดในขั้นตอนการรีดน้ำได้โดยตรง

2.2.4 การเลือกสารโคแอกกูแลนท์

การเลือกสารเคมีมาเป็นโคแอกกูแลนท์ มักขึ้นกับคุณสมบัติของน้ำดิบเป็นสำคัญ สารโคแอกกูแลนท์ที่นิยมใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันมี 2 ชนิด คือ สารส้ม และสารประกอบเหล็ก เช่น เฟอร์ริคคลอไรด์ โดยอาจจำแนกตามประเภทของน้ำดิบได้ ดังนี้

2.2.4.1 สารเคมีสำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นสูงและมีความเป็นด่างสูง

น้ำดิบที่มีความขุ่นสูงและความเป็นด่างสูง จัดเป็นน้ำดิบที่สามารถสร้างโคแอกกูเลชันได้ง่าย โดยพีเอชที่เหมาะสมในการใช้สารส้มและเกลือเฟอร์ริคคลอไรด์อยู่ในช่วง 6-7 และ 5-7 ตามลำดับ โดยมักไม่ต้องการโคแอกกูแลนท์เอดส์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้โพลีเมอร์ที่มีประจุบวกเป็นโคแอกกูแลนท์ได้เช่นกัน โดยค่าพีเอชมีผลกระทบท่อการใช้โพลีเมอร์น้อย เนื่องจากน้ำที่มีความขุ่นสูงนั้น อนุภาคมีโอกาสร่วมตัวกันได้ง่าย ฟล็อกจึงมีขนาดใหญ่โดยไม่จำเป็นต้องเติมเป่าจากภายนอก ทั้งนี้โพลีเมอร์ที่ใช้ควรพิจารณาที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

2.2.4.2 สารเคมีสำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นสูงและมีความเป็นด่างต่ำ

ในกรณีนี้โพลีเมอร์อาจใช้เป็นโคแอกกูแลนท์ได้ดี สารส้มและเกลือเฟอร์ริกก็สามารถใช้ได้ดีเช่นกัน แต่ต้องระวังเรื่องพีเอชลดต่ำลงเนื่องจากมีบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องมีการปรับพีเอชด้วยสารละลายต่าง เพื่อป้องกันมิให้พีเอชของน้ำลดต่ำลงจนโคแอกกูเลชันเกิดไม่สมบูรณ์

2.2.4.3 สารเคมีสำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำและมีความเป็นด่างสูง

น้ำดิบชนิดนี้จำเป็นต้องมีการเติมเป่าสัมผัสจากภายนอกด้วย เนื่องจากไม่อาจสร้างโคแอกกูเลชันได้ด้วยโพลีเมอร์เพียงลำพัง เป่าสัมผัสที่ใช้ อาจเป็นผงดินเหนียวปน เช่น Kaolite หรือ Bentonite หรืออาจใช้แอ็คติเวตเต็ดชิลิก้าก็ได้ ส่วนสารส้มและเกลือเฟอร์ริกก็ให้ผลดี

ในการสร้างโคแอกกูเลชัน แต่ต้องใช้ในปริมาณค่อนข้างสูง ทั้งนี้เพื่อสร้างผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ หรือ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ให้เป็นเป้าสัมผัสนั่นเอง

2.2.4.4 สารเคมีสำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำและมีความเป็นด่างต่ำ

น้ำดิบชนิดนี้สร้างโคแอกกูเลชันได้ยากเนื่องจากมีเป้าสัมผัสน้อย อีกทั้งการใช้สารส้มหรือเหล็กเพอริกจะทำให้มีพีเอชลดต่ำได้เป็นอย่างมาก ข้อเสนอแนะสำหรับน้ำประเภทนี้ คือ เติมนูนขาวหรือต่างอย่างอื่น เพื่อเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ให้กับน้ำ และ/หรือเพิ่มเป้าสัมผัสให้กับน้ำ โดยการเติมดินเหนียว หรือสารเจือยอย่างอื่น

2.2.5 ความเร็วเกรเดียนท์

ความเร็วเกรเดียนท์ (G) หมายถึง ความปั่นป่วนของน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในถังกวนเร็ว และถังกวนช้าตามลำดับ โดยน้ำในถังกวนเร็วจะต้องมีระดับความปั่นป่วนสูง (G มักไม่ต่ำกว่า 300 ต่อวินาที) เพื่อให้เกิดการผสมระหว่างสารเคมีกับน้ำอย่างรวดเร็ว และพร้อมกันทุกจุด ส่วนน้ำในถังกวนช้าจะมีระดับความปั่นป่วนต่ำกว่ามาก (G มักไม่เกิน 60-100 ต่อวินาที) เพื่อป้องกันไม่ให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นแตกออก

2.2.6 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

ปัจจัยที่ต้องควบคุมในกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน ได้แก่ ปริมาณและชนิดของสารโคแอกกูแลนท์ ระดับพีเอชของน้ำ ความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลากวนน้ำ

สำหรับงานวิจัยนี้ ปัจจัยสำคัญที่สุดที่ต้องควบคุม คือ ความเร็วเกรเดียนท์ เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

2.2.6.1 การควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนท์ในถังกวนเร็ว

ถังกวนเร็วต้องการความปั่นป่วน หรือความเร็วเกรเดียนท์ (G) สูง และต้องการเวลาในการผสมน้อย พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำเพื่อสร้างความปั่นป่วน โดยความเร็วเกรเดียนท์สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$G = \left(\frac{P}{\mu V}\right)^{0.5} \quad (2-1)$$

- G = ความเร็วเกรเดียนท์หรือระดับความปั่นป่วน (ต่อวินาที)
 P = พลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน (ฟุต-ปอนด์ต่อวินาที)
 μ = ความหนืดของน้ำ (ปอนด์-วินาทีต่อตารางฟุต)
 V = ปริมาตรของน้ำในถังกวนเร็ว (ลูกบาศก์ฟุต)

2.2.6.2 การควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนท์ในถังกวนช้า

ถังกวนช้าต้องการความปั่นป่วน หรือความเร็วเกรเดียนท์ (G) ต่ำ แต่ต้องการระยะเวลาในการสัมผัสหรือเวลารวมตะกอน (T) ซึ่งตรงกันข้ามกับถังกวนเร็ว โดยระเวลาดังกล่าวควรมีค่าประมาณ 20-30 นาที ระดับที่เหมาะสมที่สุดของความเร็วเกรเดียนท์ขึ้นอยู่กับค่าของ T ดังสมการ

$$(G^*)^{2.8}T = K \quad (2-2)$$

- G = ระดับความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสมที่สุด (ต่อวินาที)
 T = เวลารวมตะกอน ซึ่งเท่ากับเวลากักน้ำของถังกวนช้า (นาที)
 K = ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนท์ที่ใช้

ในกรณีที่ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์ในปริมาณที่ต่ำกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้สมการดังนี้

$$(G^*)^{2.8}T = \frac{44 \times 10^5}{C} \quad (2-3)$$

- C = ความเข้มข้นของสารส้มซึ่งอยู่ในช่วง 0-50 มิลลิกรัมต่อลิตร
 G = ระดับความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสมที่สุดที่ส่งผลให้ภายหลัง

กระบวนการฟล็อกคูเลชันแล้วมีความขุ่นเหลือน้อยที่สุด หน่วยต่อวินาที โดยควรมีค่า 20-50 ต่อวินาที

สำหรับงานวิจัยนี้ จะควบคุมค่าความเร็วเกรเดียนท์ให้เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2.3 กระบวนการทำให้ลอย (Flotation process)

กระบวนการทำให้ลอย เป็นกระบวนการแยกอนุภาค สารแขวนลอย หรือตะกอนออกจากน้ำโดยทำให้สิ่งที่ต้องการแยกออกลอยขึ้นมาบนผิวน้ำอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับกระบวนการตกตะกอน กระบวนการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียหลายประเภท ได้แก่ น้ำเสียที่ประกอบด้วยสารแขวนลอยที่จมตัวได้ยาก ใช้เวลานานในการตกตะกอน หรือความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าน้ำ เช่น น้ำมัน สาทห่วย เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำซึ่งสามารถจมตัวได้ดี เช่น สารอินทรีย์ขนาดใหญ่ หรือตะกอนจุลินทรีย์ เป็นต้น (พิชญกุล สงวนนวล, 2543)

การทำให้สารที่ต้องการแยกสามารถลอยขึ้นมาพร้อมกันที่ผิวน้ำอย่างรวดเร็ว สามารถกระทำได้โดยการใช้ฟองอากาศขนาดเล็กไปเกาะบนสิ่งที่ต้องการแยก เพื่อทำให้ความถ่วงจำเพาะของสิ่งที่ต้องการแยกนั้นลดต่ำลง กล่าวคือฟองอากาศดังกล่าวจะพยุงสิ่งที่ต้องการแยกนั้นให้ลอยขึ้นมา ส่งผลให้ตะกอนสามารถแยกออกมาได้ดีขึ้น โดยประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้ลอยจะขึ้นกับปัจจัย 2 ชนิด คือ ขนาดของฟองอากาศที่เหมาะสม และการสัมผัสกันระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคของแข็ง

กระบวนการทำให้ลอยมีหลากหลายวิธี เช่น กระบวนการทำให้ลอยโดยการต่อกระแสตรงผ่านแผ่นขั้วไฟฟ้าสองขั้วที่อยู่ในน้ำ ทำให้เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน (Electroflotation) และการต่อเครื่องปั่นความเร็วสูงในระบบการจ่ายอากาศให้เข้าไปกระจายในน้ำ (Dispersed-air flotation) แต่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Dissolved air flotation: DAF) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Dissolved air flotation: DAF) (วรศิริ เตียงสนัน, 2549)

หลักการการทำงานของกระบวนการ DAF อาศัยการอัดอากาศเข้าไปในน้ำภายใต้ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศในถังความดัน โดยส่วนใหญ่ที่ 4-5 บรรยากาศ อากาศจะละลายในน้ำมากขึ้น จากนั้นจึงปล่อยความดันให้เข้าสู่สภาวะของความดันบรรยากาศ วิธีนี้มีอยู่ 2 ระบบด้วยกัน คือ ระบบไม่มีการหมุนเวียน และระบบมีการหมุนเวียน

อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ DAF มี 2 ส่วน คือ ส่วนที่ทำให้ตะกอนลอย (Flotation) และเครื่องทำให้อากาศละลาย (Saturator)

1. ส่วนที่ทำให้ตะกอนลอย (Flotation) จะทำให้เกิดการแยกระหว่างเฟสของแข็งออกจากเฟสของเหลว

2. เครื่องทำให้อากาศละลาย (Saturator) จะทำให้อากาศละลายในน้ำภายใต้ความดัน หลังจากนั้นจะไหลเข้าไปในส่วนของ Flotation ผ่านวาล์วลดความดัน (Pressure release valve) โดยเมื่อผ่านวาล์วลดความดัน ความดันจะลดลงเท่ากับความดันบรรยากาศ ส่งผลให้น้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศภายใต้แรงดันกลายเป็นน้ำที่อิ่มตัวยิ่งยวดด้วยอากาศ ทำให้อากาศแยกออกมาจากของเหลวในลักษณะเป็นฟองขนาดเล็ก (Microbubble) และสัมผัสกับอนุภาคของเสียในน้ำจนอยู่ในรูปก้อนของฟองอากาศและอนุภาค (Bubble-particle agglomerate) ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ แรงลอยตัวทำให้ฟองอากาศและอนุภาคลอยขึ้น และรวมตัวกันเป็นตะกอนลอย (Floated floc) ที่บริเวณผิวน้ำ ทั้งนี้ ฟองอากาศขนาดเล็กที่เหมาะสมควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 40-50 ไมโครเมตร

สำหรับระบบมีการหมุนเวียนจะนิยมใช้กับน้ำที่มีตะกอนชนิดเปราะแตกง่าย ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะให้น้ำตะกอนไหลเข้าสู่ถังความดันโดยตรง เนื่องจากอาจส่งผลให้ตะกอนอาจแตกกระจาย ลักษณะการทำงานของระบบนี้ คือจะนำน้ำจากถัง Flotation ส่งไปยังถังความดัน แล้วปล่อยออกไปรวมกับน้ำที่เข้าสู่ระบบเพื่อนำไปเข้าสู่ถัง Flotation เพื่อแยกตะกอนออกจากน้ำเสียต่อไป จากนั้นจึงสามารถทำการแยกออกจากน้ำใสได้โดยการกวาดตะกอนลอยที่บริเวณผิวน้ำ (Skimming)

ในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการ DAF ในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก (Microbubble) เพื่อแทรกภายในโครงสร้างของฟlocsที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชันก่อนเข้าสู่ถังปฏิกริยา

ไฮบริด และกระบวนการฟล็อกคูเลชันที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ไฮบริด ส่งผลให้ฟล็อกดังกล่าวมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ และเกิดการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสด้วยกลไกของไฮโดรไซโคลอน

2.4 กฎของเฮนรี (Henry's law)

ความเข้มข้นที่คงที่หรืออิมิตัวของแก๊สที่ละลายในของไหลนั้น ขึ้นกับชนิดของแก๊สและความดันย่อยของแก๊สที่สัมผัสกับของไหล โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของแก๊สในบรรยากาศเหนือของไหล และสัดส่วนโมลของแก๊สในของไหลแสดงดังสมการที่ (2-4) ซึ่งเรียกว่ากฎของเฮนรี (Tchobanoglous และคณะ, 2004)

$$p_g = \frac{H}{P_T} x_g \quad (2-4)$$

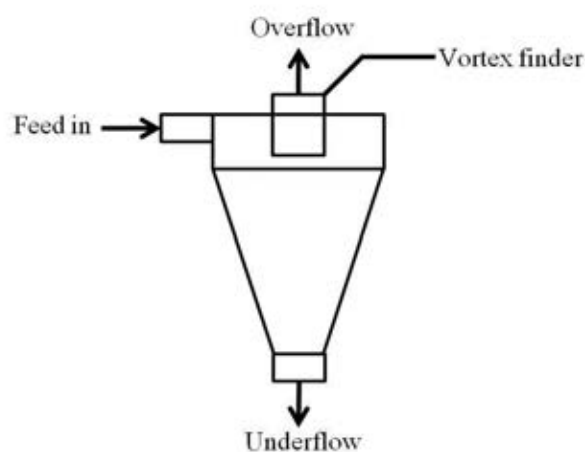
p_g	=	สัดส่วนโมลของแก๊สในอากาศ (โมลแก๊ส/โมลอากาศ)
H	=	ค่าคงที่กฎของเฮนรี, $\frac{Atm(moleGas/moleAir)}{(moleGas/moleWater)}$
P_T	=	ความดันรวม ซึ่งโดยทั่วไปใช้ 1 บรรยากาศ
x_g	=	สัดส่วนของโมลอากาศในน้ำ (โมลแก๊ส/โมลน้ำ)
	=	$\frac{moleGas(n_g)}{moleGas(n_g)+moleWater(n_w)}$

งานวิจัยนี้จะใช้กฎของเฮนรีในการคำนวณปริมาตรของอากาศที่ได้จากน้ำที่อิมิตัวด้วยอากาศ ซึ่งขึ้นกับความดันย่อย (Partial pressure) ที่เปลี่ยนแปลงภายในถังความดัน แล้วนำมาคำนวณสัดส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมด (Air fraction) ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ไฮบริด เพื่อเปรียบเทียบกับ Air fraction ของกระบวนการทำให้อากาศละลายที่ใช้กันทั่วไป (Conventional dissolved air flotation) ซึ่งใช้สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดสูงถึง 0.1500-0.5000 (วรศิริ เสียงสนัน, 2552)

2.5 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)

ไฮโดรไซโคลน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกของผสมออกจากกันด้วยแรงหนีศูนย์กลาง เช่น ของแข็งกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว หรือของเหลวกับของเหลว โดยของผสมนั้นต้องมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน

การแยกด้วยไฮโดรไซโคลนที่ใช้โดยทั่วไปจะมีเส้นทางการไหล 3 ส่วน (Rushton และคณะ, 2000) ได้แก่ น้ำและอนุภาคแขวนลอยที่จ่ายเข้าไป (Feed in) น้ำที่มีความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยต่ำจะถูกแยกออกทางด้านบน (Overflow) และน้ำที่มีความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยสูงจะถูกแยกออกทางด้านล่าง (Underflow) ดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 เส้นทางการไหลของไฮโดรไซโคลน (Bumrungsri, 2009)

2.5.1 หลักการทำงานของไฮโดรไซโคลน

ไฮโดรไซโคลนมีหลักการทำงาน คือ จ่ายของผสมหรือน้ำที่ต้องการบำบัดเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential feed) เพื่อให้เกิดการหมุนวนแล้วเกิดเส้นทางการไหลใน 2 ลักษณะคือ ส่วนที่ไหลลงสู่ด้านล่าง (Underflow) ซึ่งจะนำเอาของแข็งแขวนลอยหรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และ/หรือ มีน้ำหนักมากกว่าออกมา และส่วนที่แยกไหลขึ้นสู่ด้านบน (Overflow) ซึ่งจะนำน้ำใส และอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และ/หรือ มีน้ำหนักเบาออกมา

การหมุนวนของของไหลภายในไฮโดรไซโคลน แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การหมุนวนภายนอก (Primary vortex) เป็นการหมุนวนบริเวณใกล้ผนังไฮโดรไซโคลนในทิศทางลง ทำหน้าที่พาอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่และ/หรือมีน้ำหนักมากกว่า ไหลออกทางส่วนล่างของ

ไฮโดรไซโคลน ส่วนการหมุนวนภายใน (Secondary vortex) เป็นการหมุนวนบริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลนในทิศทางขึ้น ทำหน้าที่พาน้ำและอนุภาคแขวนลอยที่เล็ก/หรือมีน้ำหนักเบากว่าขึ้น โดยไหลออกทางช่องด้านบน เรียกว่า Overflow vortex finder

การออกแบบท่อที่ให้ของผสมไหลออกทางด้านบน (Vortex finder) มีความสำคัญต่อการไหลลัดวงจรของอนุภาคแขวนลอยภายในไฮโดรไซโคลน (Short-circuit flow) กล่าวคือเกิดการไหลวนอยู่เฉพาะบริเวณภายในช่วงบนของไฮโดรไซโคลน แล้วไหลลัดออกทางด้านบน (Overflow) โดยไม่ผ่านการหมุนวนทั้งภายนอก (Primary vortex) และภายใน (Secondary vortex) จึงไม่เกิดการแยกอนุภาคในเส้นการไหลลัดวงจร

2.5.2 กฎของสโตก (Stoke's law)

กฎของสโตก เป็นกฎพื้นฐานที่ใช้ในการหาความเร็วในการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อใช้อธิบายและบอกถึงความเป็นไปได้ในการแยกอนุภาคแขวนลอยจากน้ำ โดยมีสมมติฐานว่าอนุภาคดังกล่าวมีรูปร่างเป็นทรงกลม โดยสมการของสโตก (Stoke's law equation) (Tchobanoglous และคณะ, 2004) เขียนได้ดังนี้

$$v_p = \frac{g(\Delta\rho)d_p^2}{18\mu} \quad (2-5)$$

V_p	=	ความเร็วในการตกตะกอน (เมตรต่อวินาที)
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.81 เมตรต่อวินาที ²)
$\Delta\rho$	=	ความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
d_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร)
μ	=	ความหนืดพลศาสตร์ของเหลว (นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร)

ปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อความเร็วในการแยกอนุภาค มีดังนี้

1. ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก โดยทั่วไปแล้วการแยกอนุภาคด้วยการตกตะกอนโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงโลก ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งภายในไฮโดรไซโคลนกับ

ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก สามารถแสดงได้ดังนี้ (Puprasert, 2004; McCabe, Smith และ Harriot, 1993)

$$\zeta = \frac{V_y^2}{R \cdot g} \quad (2-6)$$

ζ	=	ความเร่งแรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ภายในไฮโดรไซโคลน (Relative centrifugal acceleration in hydrocyclone)
V_y	=	ความเร็วสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน (เมตรต่อวินาที)
R	=	รัศมีของไฮโดรไซโคลนบริเวณที่เป็นทรงกระบอก (เมตร)

2. ความแตกต่างของความหนาแน่นของเฟสทั้งสอง ($\Delta\rho = \rho_p - \rho_w$) เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกฎของสโตก ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวภายในไฮโดรไซโคลน หากเฟสทั้งสองไม่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ($\Delta\rho = 0$) จะส่งผลให้ความเร็วในการแยกอนุภาค (v_p) มีค่าเป็นศูนย์ กล่าวคือไม่สามารถทำการแยกเฟสทั้งสองออกจากกันได้ ดังนั้นการแยกด้วยไฮโดรไซโคลนจะเกิดขึ้นได้ต้องมีความแตกต่างของความหนาแน่นของเฟสทั้งสอง

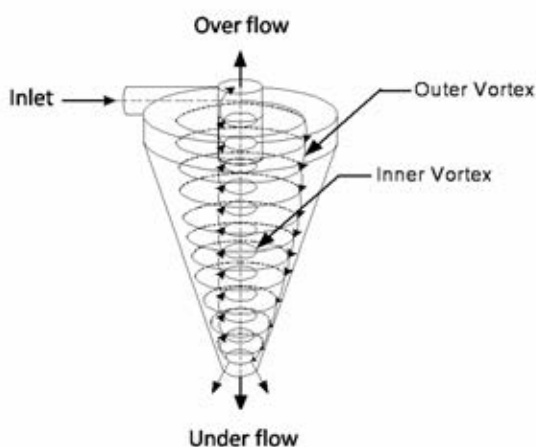
3. ความหนืดของของไหล (μ) ส่งผลต่อความเร็วในการแยกอนุภาค (v_p) เนื่องจากหากค่าความหนืดของของไหลสูง จะทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาคต่ำ นอกจากนี้ความหนืดยังสัมพันธ์กับคุณสมบัติของของไหลอีกด้วย โดยคุณสมบัติสูงจะส่งผลให้ความหนืดของของไหลต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ค่าความเร็วในการแยกอนุภาคสูง ของไหลจึงควรมีความหนืดต่ำและคุณสมบัติสูง จึงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค

4. ขนาดของอนุภาคของแข็ง (d_p) เป็นปัจจัยสำคัญเนื่องจากในสมการสโตก ขนาดของอนุภาคจะอยู่ในรูปยกกำลังสอง กล่าวคือถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่จะยิ่งทำให้ความเร็วในการแยก (v_p) เพิ่มขึ้นมากตามไปด้วย ดังนั้นหากสามารถทำการเพิ่มขนาดของอนุภาคของแข็งได้ จะทำให้การแยกด้วยไฮโดรไซโคลนเกิดได้ดียิ่งขึ้น

2.5.3 รูปแบบการไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน

(Fluid flow pattern and particle motion in the hydrocyclone)

การแยกของผสมออกจากกันด้วยไฮโดรไซโคลน อาศัยหลักการของแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลน รูปแบบการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลนสามารถแสดง ดังภาพที่ 2-8 โดยการไหลแบบหมุนวนเกิดจากการจ่ายของไหลเข้าไปในแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน



ภาพที่ 2-8 รูปแบบการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลน (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

2.5.4 ความเร็วของการไหลภายในไฮโดรไซโคลน (Velocity profile)

เมื่อทำการจ่ายของผสมเข้าไปภายในภายในไฮโดรไซโคลนในแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน จะส่งผลให้ความเร็วของของไหลสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity) ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) และความเร็วตามแนวรัศมี (Radial velocity) (Kelsall, 1952 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

2.5.4.1 ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity, V_y)

ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง คือ ความเร็วเชิงเส้นของของไหลที่ถูกจ่ายบริเวณทางเข้า ซึ่งมีทิศทางสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน และมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหล และพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้า แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$V_i = \frac{Q}{A_i} \quad (2-7)$$

- V_i = ความเร็วของของไหลที่ออกจากท่อ ณ จุดจ่ายของไหลเข้า
(เมตรต่อวินาที)
 Q = อัตราการไหลเข้าของของไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
 A_i = พื้นที่หน้าตัดของช่องจ่ายของไหลเข้า (ตารางเมตร)

นอกจากนี้ ในทางทฤษฎี ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงสามารถคำนวณได้จากหลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) กรณีไม่พิจารณาแรงต้านทาน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_y R = constant \quad (2-8)$$

- V_y = ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่มีรัศมีการหมุนใดๆ
(เมตรต่อวินาที)
 R = รัศมีการหมุนใดๆ (เมตร)

แต่ในทางปฏิบัติ จะมีการสูญเสียจากโมเมนตัมเชิงมุม ส่งผลให้ค่าที่คำนวณได้น้อยกว่าสมการข้างต้น ดังสมการที่ (2-9)

$$V_y R^n = constant \quad (2-9)$$

- V_y = ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่มีรัศมีการหมุนใดๆ
(เมตรต่อวินาที)
 R = รัศมีการหมุนใดๆ (เมตร)
 n = ค่าคงที่ไฮโดรไดนามิก ซึ่งโดยทั่วไป มีค่าระหว่าง 0.5-0.9 และในกรณีการไหลไม่มีแรงเสียดทาน n จะมีค่าเท่ากับ 1 (Svarovsky, 1984 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

องค์ประกอบของความเร็วภายในไฮโดรไซโคลนที่สำคัญที่สุด คือ ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน โดยสมการที่ (2-9) ถือเป็นสมการพื้นฐานที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณ

2.5.4.2 ความเร็วในแนวแกน (Axial velocity)

ความเร็วในแนวแกน คือความเร็วที่มีทิศทางตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลนโดยอาจมีทิศทางขึ้นหรือลง การไหลในส่วนที่หมุนวนด้านนอก (Outer vortex) ที่ลดลงและการไหลหมุนวนภายใน (Inner vortex) ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดตำแหน่งที่มีความเร็วในแนวแกนเท่ากับศูนย์ (Locus of Zero Vertical Velocity: LZVV) โดยตำแหน่งดังกล่าวอยู่ระหว่างการไหลแบบหมุนวนภายนอก และการไหลแบบหมุนวนภายใน

2.5.4.3 ความเร็วในแนวรัศมี (Radial velocity)

ความเร็วในแนวรัศมี คือความเร็วที่มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของไฮโดรไซโคลน เป็นความเร็วการไหลภายในไฮโดรไซโคลนที่มีค่าความเร็วต่ำสุดจากความเร็วทั้งหมด และมีความสำคัญน้อยที่สุด

2.5.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลน (Svarovsky, 1984)

2.5.5.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน จะวัดที่ฐานของส่วนที่เป็นกรวยหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในแง่ของขนาดตัด (Cut size) โดยให้อัตราการไหลคงที่ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (d_{50}) และความดันลด (Δp) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลน (D_c) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-10) และ (3-11) ดังต่อไปนี้

$$d_{50} \propto D_c^x \quad (2-10)$$

$$\Delta p \propto D_c^y \quad (2-11)$$

โดยที่ x มีค่าอยู่ในช่วง 1.36 ถึง 1.52 และ y มีค่าอยู่ในช่วง -3.6 ถึง -4.1

จะเห็นว่า ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลนเล็ก จะทำให้อนุภาคที่แยกออกมาได้ขนาดเล็กตามไปด้วย และเมื่อไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความดันลดมีค่ามากขึ้นเช่นกัน

2.5.5.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะของช่องจ่ายของไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (Aperture diameter)

ในการออกแบบและควบคุมการทำงานของไฮโดรไซโคลนนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลมีความสำคัญมากสำหรับไฮโดรไซโคลน โดยโดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลต่างๆ ประกอบด้วย เส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายเข้า (Feed: D_f) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Overflow: D_o) และช่องทางออกด้านล่าง (Underflow: D_u) โดยที่ขนาดของ D_f และ D_u จะใช้ควบคุมความดันลดและขนาดอนุภาคในการแยกด้วยไฮโดรไซโคลน ขนาดของ D_o ใช้ควบคุมสัดส่วนของอัตราการไหล (Flow split ratio) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายเข้า (D_f) จะใช้ควบคุมความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity) (Bradley, 1965 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น, 2552) ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (D_o) จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน ซึ่งสาเหตุสำคัญ มี 2 กรณี คือการไหลลัดวงจร (Short-circuit flow) ซึ่งไหลผ่านวงบนของไฮโดรไซโคลนและไหลที่ผนังด้านนอกของช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) และผลกระทบที่ตำแหน่งเส้นความเร็วเป็นศูนย์ (Locus of zero vertical velocity: LZVV)

2.5.5.3 ความยาว ขนาด และรูปร่างของช่องน้ำออกด้านบน (Vortex finder dimensions)

ช่องน้ำออกด้านบน (Vortex finder) เป็นช่องทางที่ให้น้ำไหลออกทางด้านบน (Overflow) และป้องกันการไหลลัดวงจรด้วย โดยอนุภาคจะไหลลงที่ผิวด้านนอกของ Vortex finder และไหลลงไปในส่วนของตัวเรือนไฮโดรไซโคลน โดยความยาวของ Vortex finder นี้ ส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการคัดแยกอนุภาค โดยความยาว Vortex finder ที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดของกลุ่มอนุภาคที่จ่ายเข้าไปและจุดตัด (Cut-point) ซึ่งสัมพันธ์กับการกระจายขนาดนั้นๆ สำหรับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ผนังด้านนอกของ Vortex

finder มีความสำคัญเช่นกัน หากมีการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านบน (D_o) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนลดลง

2.5.5.4 ลักษณะทางกายภาพของตัวไฮโดรไซโคลน (Body dimension)

ตัวไฮโดรไซโคลนจะประกอบด้วย ส่วนที่เป็นทรงกระบอก ส่วนที่เป็นกรวย หรืออาจมีส่วนประกอบอื่นเพิ่มเข้ามา การเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของไฮโดรไซโคลนนั้นมีข้อเสียเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงเกิดการทำให้ไฮโดรไซโคลนแบบไม่มีส่วนทรงกระบอก หรือการทำไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กโดยไม่มีส่วนกรวยเช่นกัน

การเพิ่มความยาวทั้งหมดของไฮโดรไซโคลน คือการเพิ่มความยาวของส่วนกรวย หรือการลดมุมกรวยของไฮโดรไซโคลนอย่างใดอย่างหนึ่งนั้น ส่งผลให้ความจุ (Capacity) และประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น (Dahlistrom, 1949)

สำหรับขนาดมุมกรวยและความยาวของไฮโดรไซโคลน เป็นปัจจัยที่ควรคำนึงถึงน้อยที่สุดในการออกแบบ เนื่องจากไม่มีผลสรุปแน่นอนของผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพจากการเปลี่ยนแปลงความยาวและมุมกรวยของไฮโดรไซโคลน

2.5.5.5 ขนาดและลักษณะของช่องจ่ายของผสมเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน

ช่องจ่ายของผสมเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (Feed inlet) สามารถมีรูปร่างได้หลายลักษณะและหลายตำแหน่ง ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนไม่มากนัก โดยช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมที่มีด้านยาวขนานกับแกนของไฮโดรไซโคลนจะดีกว่าช่องเปิดแบบวงกลม เมื่อมีพื้นที่เปิดสมมูล (Equivalent area) เท่ากัน ความยาวต่อความกว้าง ควรเป็น 2:1 (Bradley, 1965 อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนัน, 2552) แต่เนื่องจากช่องจ่ายที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมก่อให้เกิดความยุ่งยากในการผลิต ดังนั้นไฮโดรไซโคลนทั่วไปจึงยังคงลักษณะของช่องจ่ายของผสมให้เป็นวงกลมเอาไว้

2.5.6 ข้อดีและข้อเสียของไฮโดรไซโคลน

2.5.6.1 ข้อดีของไฮโดรไซโคลน

1) เป็นอุปกรณ์ที่ดำเนินการและติดตั้งได้ง่าย ราคาถูก และมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ

2) สามารถใช้ในการแยกของผสมออกจากกัน กล่าวคือ สามารถใช้แยกของเหลวออกจากสิ่งเจือปนที่เข้มข้น แยกของเหลวสองชนิดที่ไม่ผสมกัน อีกทั้งยังสามารถแยกก๊าซออกจากของเหลวได้

3) สิ้นเปลืองพลังงานน้อย เนื่องจากไม่มีส่วนใดของไฮโดรไซโคลน เคลื่อนที่

2.5.6.2 ข้อเสียของไฮโดรไซโคลน

1) แรงเฉือน (Shear force) ที่มีมากภายในไฮโดรไซโคลน อาจส่งผลเสียโดยการทำให้ออนุภาค (Floc) ที่ผ่านจากกระบวนการฟล็อกคูเลชัน (Flocculation) แตกตัวออกจากกัน

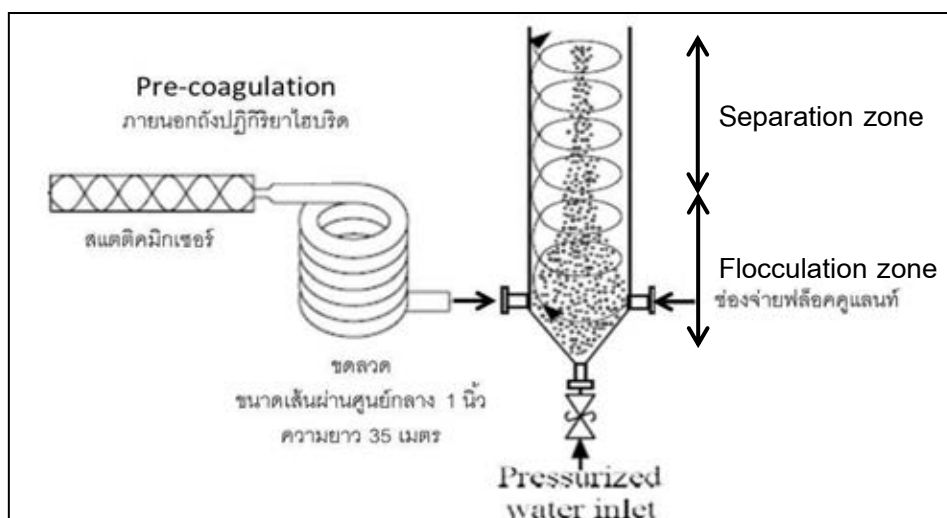
2) มีการฟุ้งร่อนที่บริเวณผิวด้านในของไฮโดรไซโคลน เนื่องจากแรงกระแทกจากของผสมที่จ่ายเข้าไป

3) ไม่สามารถแยกขนาดของอนุภาคให้สมบูรณ์ชัดเจนมากได้ มักมีการปะปนของอนุภาคขนาดใหญ่ในส่วนที่ต้องการแยกอนุภาคละเอียด หรือมีการปะปนของอนุภาคขนาดเล็กในส่วนที่ต้องการแยกอนุภาคขนาดหยาบเสมอ

2.6 แนวคิดเกี่ยวกับถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา

2.6.1 แนวคิดเกี่ยวกับถังปฏิกริยาไฮบริด

ถังปฏิกริยาไฮบริด เป็นการนำกลไกของไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน และกระบวนการแยกตะกอนออกโดยการทำให้อลอย มารวมกันไว้ในถังปฏิกริยาเดียว ดังแสดงในภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 แนวคิดของถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลอน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

ถังปฏิกริยาไฮบริด แบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณภายนอกถังปฏิกริยาไฮบริด บริเวณส่วนล่างของถังปฏิกริยา และบริเวณส่วนบนของถังปฏิกริยา

1) บริเวณภายนอกถังปฏิกริยาไฮบริด คือกระบวนการโคแอกกูเลชันภายนอกถังปฏิกริยาไฮบริด (Pre-coagulation) โดยน้ำดิบถูกจ่ายเข้าสู่สแตติคมีกเซอร์พร้อมกับสารละลายโคแอกกูแลนท์เพื่อลดเสถียรภาพของคอลลอยด์ แล้วไหลผ่านขดลวด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 35 เมตร เพื่อเพิ่มระยะเวลาที่จำเป็นสำหรับฟล็อกที่ผ่านการลดเสถียรภาพมาแล้ว ให้กลายเป็นฟล็อกขนาดเล็ก (Microfloc) ซึ่งมีขนาดเหมาะสมต่อการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษ ซึ่งมีอากาศแทรกอยู่ภายใน หลังจากนั้นจึงจ่ายเข้าสู่ถังปฏิกริยาไฮบริด

2) บริเวณส่วนล่างของถังปฏิกริยา มีช่องสำหรับจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ ฟล็อกคูแลนท์ และฟล็อกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชันภายนอกถังปฏิกริยาไฮบริด ซึ่งบริเวณดังกล่าวเกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชันแบบลำดัดขึ้น (Taper flocculation) ส่งผลให้อนุภาครวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะเดียวกัน น้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศซึ่งผลิตมาจากการใช้เทคนิคการทำให้อากาศละลาย (Dissolved air flotation) เมื่อผ่านเข้าสู่ถังปฏิกริยาไฮบริดซึ่งมีค่าความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำอิ่มตัวด้วยอากาศนั้น จะแทรกตัวออกมาในลักษณะฟองอากาศขนาดเล็ก (Microbubble) โดยจะเกิดพร้อมกับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน และจะไปแทรกตัวอยู่ในกลุ่มฟล็อกที่เกิดขึ้น กลายเป็นฟล็อกชนิดพิเศษ (Aerated floc) ซึ่งมีฟองอากาศแทรกอยู่ภายใน

3) บริเวณส่วนบนของถังปฏิกริยา แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในถังปฏิกริยาไฮบริด ส่งผลให้เกิดการแยกระหว่างฟลอคชนิดพิเศษและน้ำใส โดยกลุ่มฟลอคชนิดพิเศษจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ เนื่องจากมีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายใน จะแยกตัวเข้ามารวมกันที่บริเวณแกนกลางของถังปฏิกริยาไฮบริด

สรุปแนวคิดของถังปฏิกริยาไฮบริดคือ การนำกระบวนการบำบัดน้ำทั้ง 3 กระบวนการ ได้แก่ โคแอกกูเลชัน ฟลอคคูเลชัน และการทำให้ตะกอนลอยมารวมไว้ในถังปฏิกริยาเดียว โดยตะกอนดังกล่าวจะถูกแยกออกด้วยกลไกของไฮโดรไซโคลอน

จากงานวิจัยของวรศิริ เสียงสนัน (2552) ซึ่งศึกษากระบวนการไฮบริดด้วยไฮโดรไซโคลอน โคแอกกูเลชัน ฟลอคคูเลชัน และการลอยตะกอน ในกระบวนการผลิตน้ำประปา พบว่าการศึกษากระบวนการไฮบริดประสบความสำเร็จทั้งในแง่การบำบัดน้ำ และการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใส ในการกำจัดความขุ่นในน้ำดิบจากแม่น้ำลามาวัน ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งมีความขุ่นต่ำเพียง 6-7 เอ็นทียู ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถังปฏิกริยาไฮบริดมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาในประเทศไทย ซึ่งแหล่งน้ำดิบมีความขุ่นค่อนข้างสูง นอกจากนี้ในงานวิจัยของ วรศิริ เสียงสนัน (2552) ยังพบข้อบกพร่องคือ ความเร็วของไหลบริเวณตอนบนของถังปฏิกริยามีค่าต่ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใสมีค่าไม่สูงเท่าที่ควร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงถังปฏิกริยาไฮบริดโดยการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว (Internal water recirculation) กลับมาเพิ่มความเร็วของน้ำในช่วงบนของถังปฏิกริยา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใสด้วยกลไกของไฮโดรไซโคลอน

2.6.2 ข้อดีและข้อเสียของถังปฏิกริยาไฮบริดเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตน้ำประปาทั่วไป

2.6.2.1 ข้อดีของถังปฏิกริยาไฮบริด

1) ประหยัดพื้นที่ในการก่อสร้าง เนื่องจากสามารถรวมกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟลอคคูเลชัน และการทำให้ตะกอนลอยไว้ในถังปฏิกริยาเดียว และมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแยกชนิดอื่นจึงเหมาะที่จะประยุกต์ใช้ในโรงผลิตน้ำประปาที่มีพื้นที่ใช้สอยจำกัด

2) ใช้เวลากักน้ำน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการตกตะกอนในการผลิตน้ำประปาทั่วไป

3) สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปา เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดระหว่างถังปฏิริยาไฮบริด และเทคนิคการทำให้อากาศละลายโดยทั่วไป (Conventional dissolved air flotation) พบว่าถังปฏิริยาไฮบริดใช้สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดต่ำกว่า (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

2.6.2.2 ข้อเสียของถังปฏิริยาไฮบริด

- 1) แรงเฉือนภายในถังปฏิริยาไฮบริดที่มากเกินไป อาจส่งผลให้ฟล็อกชนิดพิเศษที่เกิดขึ้นแตกออก
- 2) ไม่สามารถควบคุมความเร็วกระเจียนภายในไฮโดรไซโคลนที่แน่นอนได้ เนื่องจากเป็นไปตามกลไกการไหลวนภายในไฮโดรไซโคลน

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน ก่อนเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน

Roldan-villasana และ Williams (1999)

ศึกษาการแยกและการแตกของฟล็อกในไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ถึง 50 มิลลิเมตร เพื่อคัดแยกของผสมซึ่งประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 2 ไมครอน) โดยต้องมีการรวมอนุภาคขนาดเล็กเหล่านั้นให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถแยกอนุภาคดังกล่าวออกได้โดยใช้แรงหนีศูนย์กลาง

จากงานวิจัยในอดีตพบว่า การเติมสารเพื่อให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคขนาดเล็กยังไม่ประสบผลสำเร็จ เนื่องจากแรงเฉือนภายในไฮโดรไซโคลนทำให้เกิดการแตกออกของกลุ่มอนุภาค แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่อธิบายถึงกลไกการแยกของกลุ่มอนุภาค และการแตกของกลุ่มอนุภาคในขั้นตอนการแยกอย่างชัดเจน อีกทั้งยังไม่มีแบบจำลองที่สามารถอธิบายการแตกออกและการแยกของอนุภาค ดังนั้นงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กเพื่อทำการศึกษาเพิ่มเติมจากสิ่งที่ยานวิจัยที่ผ่านมายังไม่สามารถหาคำตอบได้ ซึ่งคือแบบจำลองที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การแตกและการแยกของอนุภาคได้

ข้อจำกัดที่สำคัญสองประการที่มีต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนคือ ไม่สามารถแยกของแข็งออกมาได้อย่างสมบูรณ์และข้อจำกัดของการไหลภายใต้แรงหนีศูนย์กลาง

โดยขนาดตัดที่เล็กที่สุดที่สามารถแยกได้ด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เท่ากับ 2 ไมครอน (Rushton, Ward และ Holdich, 2000) (โดยการใช้ซิลิกาเป็นของแข็ง) ในการปรับเปลี่ยนเพื่อแก้ไขข้อจำกัดเหล่านั้นนี้อาจทำได้ดังนี้

1. การต่อไฮโดรไซโคลนเข้าด้วยกันแบบอนุกรมหรือขนาน
2. รวมกลุ่มอนุภาคละเอียดก่อนที่จะส่งเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน

วิธีการแรกเป็นที่นิยมมากเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและดำเนินการต่ำ แต่ยังไม่สามารถบำบัดอนุภาคคอลลอยด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การรวมกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก เพื่อให้กลายเป็นกลุ่มอนุภาคเดี่ยวซึ่งจะมีพฤติกรรมแยกเหมือนอนุภาคขนาดใหญ่ โดยการใช้โคแอกกูแลนต์ทางไฟฟ้า (Electrostatic coagulant) หรือสารโพลีเมอร์เป็นฟล็อกคูแลนต์ (Polymeric flocculant) เพื่อรวมคอลลอยด์ให้กลายเป็นกลุ่มอนุภาค ส่งผลให้ความเข้มข้นของอนุภาคที่ถูกแยกออกมาที่ช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) สูงขึ้น

นอกจากนี้ Roldan-Villasana และ Williams (1999) ยังกล่าวว่า การใช้โคแอกกูแลนต์และฟล็อกคูแลนต์เพื่อบำบัดของผสมก่อนจ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนมักไม่ค่อยประสบความสำเร็จในทางปฏิบัติ เนื่องจากฟล็อกที่เกิดขึ้น ไม่สามารถทนต่อแรงเฉือนภายในไฮโดรไซโคลน (Kelsall, 1952; Svarovsky, 1980; Cobb และคณะ, 1973 อ้างถึงใน Roldan-villasana และ Williams, 1999) อย่างไรก็ตาม มีบางรายงานกล่าวว่าสารฟล็อกคูแลนต์สามารถบำบัดอนุภาคขนาดเล็กและสารอินทรีย์แขวนลอยก่อนที่จะแยกในไฮโดรไซโคลน โดยงานวิจัยนี้ แสดงความเป็นไปได้ในการใช้ฟล็อกคูแลนต์กับอนุภาคละเอียดก่อนจ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน

Plitt และ Lilge (1967 อ้างถึงใน Roldan-villasana และ Williams, 1999)

ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำผสมดินเหนียว (Clay slurry) และทราย (Silica) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5 ไมครอน และ 25 ไมครอน ตามลำดับ ด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร โดยใช้โพลีอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) เป็นฟล็อกคูแลนต์

ผลการทดลองพบว่า การใช้ฟล็อกคูแลนต์สามารถลดความเข้มข้นของของแข็งที่ออกทางช่องทางออกด้านบน (Overflow) เมื่อทำการบำบัดน้ำผสมดินเหนียวและทรายได้ร้อยละ 72 และ 50 ตามลำดับ

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ในการใช้กระบวนการฟล็อกคูแลนต์กับอนุภาคของแข็งแขวนลอยก่อนนำมาบำบัดด้วยไฮโดรไซโคลนนั้น ประสิทธิภาพมากกว่า เมื่ออนุภาคที่ต้องการบำบัดนั้นมีขนาดเล็กกว่า เช่น ดินเหนียว (Clay)

Visman และ Hamza (1973 อ้างถึงใน Roldan-villasana และ Williams, 1999)

ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมถ่านหิน ซึ่งผ่านกระบวนการฟล็อกคูเลชันมาแล้ว โดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 ถึง 50 มิลลิเมตร

ผลการทดลองสรุปว่ากลุ่มอนุภาค (Floc) สามารถคงสภาพจากแรงเฉือนภายในไฮโดรไซโคลนได้เมื่อใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 ถึง 50 มิลลิเมตร แต่ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่าง ผลของการใช้กระบวนการฟล็อกคูเลชันก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน (Flocculated system) กับการบำบัดแบบไม่มีกระบวนการฟล็อกคูเลชัน (Non-flocculated system)

Wallace และคณะ (1980 อ้างถึงใน Roldan-villasana และ Williams, 1999)

ศึกษาการบำบัดคาโอลิไนต์ (kaolinite) เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 0.77 ไมครอน โดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 6 ตัว ต่อกันแบบขนาน

ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดรวมสูงขึ้นเมื่อมีการเติมสารโพลีอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) เป็นฟล็อกคูแลนท์

Borts และคณะ (1982 อ้างถึงใน Roldan-villasana และ Williams, 1999)

ทำการเพิ่มประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลนโดยการเติมโพลีอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) เป็นฟล็อกคูแลนท์สำหรับของผสม (Slurry) โดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร

ผลการทดลองพบว่าไฮโดรไซโคลนทั้งสองขนาดสามารถกำจัดของแข็งออกจากของผสมได้ร้อยละ 94 ขณะที่เมื่อไม่ได้ใช้ฟล็อกคูแลนท์สามารถกำจัดได้เพียงร้อยละ 53 แต่ไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียดของของผสม (Slurry)

Williams และ Roldan-Villasana (1991 อ้างถึงใน Roldan-villasana และ Williams, 1999)

ทำการพัฒนาประสิทธิภาพการบำบัดคาโอลิน (Kaolin) ที่ผ่านการกระบวนการฟล็อกคูเลชันโดยใช้โพลีอะคริลาไมด์เป็นฟล็อกคูแลนท์ ด้วยไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร โดยมีท่อที่ให้ของผสมไหลออกจากด้านบน ขนาด 2.6 มิลลิเมตร จำนวน 6 ตัวต่อกันแบบขนาน

จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่า มีการนำสารเคมีมาใช้ร่วมกับการบำบัดด้วยไฮโดรไซโคลน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีการนำสารเคมีมาใช้ในขั้นตอนโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันเช่นกัน

Woodfield และ Bickert (2004)

ศึกษาการแยกฟล็อกภายในไฮโดรไซโคลน โดยมุ่งเน้นที่การแตกตัวของฟล็อกและกลศาสตร์ของไหลที่ส่งผลต่อฟล็อก โดยทำการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร เพื่อทำการบำบัดอนุภาคอะลูมินาไตรไฮเดรต (Alumina trihydrate) ด้วยกระบวนการฟล็อกคูเลชัน โดยใช้โพลีเมอร์เป็นสารฟล็อกคูแลนท์ก่อนเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนที่ทดลองด้วยความดัน 100 กิโลปาสคาล ซึ่งมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1) แรงเฉือนภายในไฮโดรไซโคลนจะทำให้ฟล็อกที่เกิดจากกระบวนการฟล็อกคูเลชันแตกตัว และไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนด้วยการทำกระบวนการฟล็อกคูเลชันก่อนเข้าสู่การแยกด้วยไฮโดรไซโคลนได้

2) ในการทดลองมีการแตกของฟล็อกภายในไฮโดรไซโคลน แต่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนน้อยมาก โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้ฟล็อกแตกตัวคือ ความหนาแน่นและกลศาสตร์ของไหลที่ส่งผลต่อฟล็อก (Floc hydrodynamics) มิใช่แรงเฉือน

3) ขนาดของฟล็อกที่ออกทางช่องทางออกด้านบน (Overflow) มีขนาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ ฟล็อกที่ออกทางช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) โดยสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องมาจากอนุภาคขนาดละเอียดรวมตัวเป็นฟล็อกกับอนุภาคหยาบด้วยสารฟล็อกคูแลนท์ แล้วถูกแยกออกที่ Underflow

โดยสรุปคือ ความหนาแน่นของฟล็อกและกลศาสตร์ของไหลที่ส่งผลต่อฟล็อก (Floc hydrodynamics) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากกว่าแรงเฉือน ต่อการแตกตัวของฟล็อกภายในไฮโดรไซโคลน ซึ่งฟล็อกจะสามารถคงตัวอยู่ในไฮโดรไซโคลนได้ หากมีการเตรียมฟล็อกให้แข็งแรงพอสำหรับแรงเฉือนที่มีภายในไฮโดรไซโคลน

Franks และคณะ (2005)

ศึกษาผลของแรงเฉือนที่มีต่อขนาดและความหนาแน่นของฟล็อกที่เกิดขึ้น สำหรับการรีดน้ำในกระบวนการแยกแ้วด้วยไฮโดรไซโคลน ทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกริยาทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 139 มิลลิเมตร ความยาว 300 มิลลิเมตร เพื่อบำบัดอนุภาคแ้ว 2 ชนิด

ได้แก่ อนุภาคซึ่งมีขนาดตัดเฉลี่ยเท่ากับ 0.4 และ 10 ไมครอน ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีเมอร์ประจุบวก น้ำหนักมวลโมเลกุลต่ำเป็นโคแอกกูแลนต์ แล้วทำการศึกษาผลของฟลอคคูแลนต์ โดยทำการปรับเปลี่ยนน้ำหนักมวลโมเลกุล และชนิดของโพลีเมอร์ ได้แก่ โพลีเมอร์ประจุลบ และโพลีเมอร์ไม่มีประจุ นอกจากนี้ยังทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของอนุพันธ์ประจุลบในโพลีเมอร์ประจุลบอีกด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่า

1) การใช้โพลีเมอร์ประจุลบซึ่งมีอัตราส่วนของอนุพันธ์ประจุลบในโพลีเมอร์อยู่ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 40 และมีน้ำหนักมวลโมเลกุลสูง มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสร้างฟลอคที่สามารถต้านทานต่อแรงเฉือนสูงที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลน

2) ความหนาแน่นของฟลอคที่เกิดขึ้นเป็นปัจจัยหลักซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการรีดน้ำในกระบวนการแยกแ้วด้วยไฮโดรไซโคลน โดยฟลอคที่มีความหนาแน่นต่ำส่งผลให้เกิดขีดจำกัดของความสามารถในการบำบัดด้วยไฮโดรไซโคลน

3) ความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างฟลอคและน้ำ ก่อให้เกิดขีดจำกัดของความเร็วในการแยกด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

โดยสรุปคือ การใช้โพลีเมอร์ประจุลบ ซึ่งมีน้ำหนักมวลโมเลกุลสูงเป็นฟลอคคูแลนต์ สามารถสร้างฟลอคที่ทนต่อแรงเฉือนสูงที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลน นอกจากนี้ยังทำให้ทราบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยไฮโดรไซโคลนคือ ความหนาแน่นของฟลอค

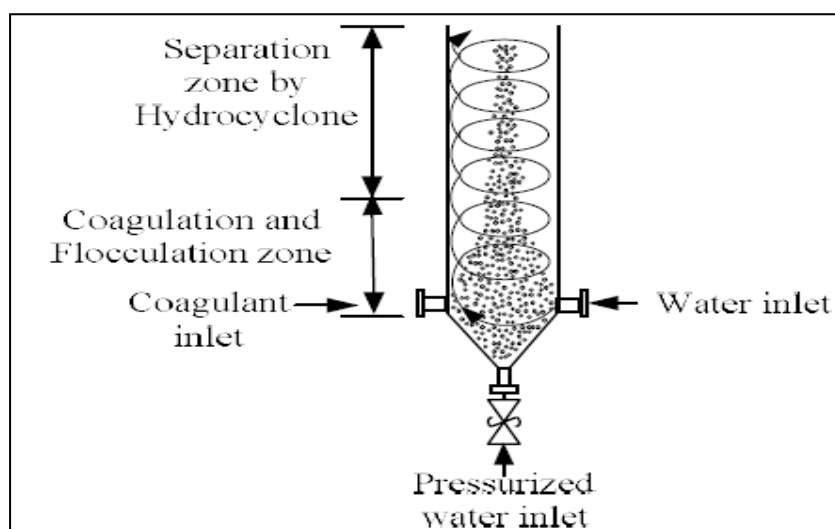
จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดชี้ให้เห็นว่า แรงเฉือน (Shear force) ที่สูงเกินไปภายในไฮโดรไซโคลน อาจทำให้ฟลอคแตกได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องระวังไม่ให้ความเร็วกระเดียนที่สูงเกินไปในช่วงที่เกิดการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใส ทั้งนี้เนื่องจากยังไม่มีงานวิจัยใดระบุค่าความเร็วกระเดียนที่จะไม่ทำให้ฟลอคแตกอย่างชัดเจน จึงอ้างอิงค่าความเร็วกระเดียนที่เหมาะสมจากกระบวนการฟลอคคูเลชันคือ 30-100 ต่อวินาที (Monod, 1991) นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมายังสนับสนุนแนวคิดเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันก่อนเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน และการใช้ฟลอคคูแลนต์ในกระบวนการฟลอคคูเลชัน ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด

2.7.2 การศึกษากระบวนการไฮบริด

Puprasert (2004)

ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำดิบสังเคราะห์สำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ 50 มิลลิเมตร น้ำดิบสังเคราะห์จากเบนโทไนท์ และใช้โพลีเมอร์ประจุบวกชนิด EM470 เป็นโคแอกกูแลนต์

การทดลองทำโดยสูบน้ำจ่ายสารละลายโคแอกกูแลนต์เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนในแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน พร้อมกับน้ำดิบสังเคราะห์ด้วยความเร็วเชิงมุมที่เหมาะสม สำหรับการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน ในขณะที่เดียวกันก็ทำการจ่ายน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศเข้าทางส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน ดังแสดงในภาพที่ 3.10 เมื่อน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศผ่านเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนซึ่งมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ส่งผลให้อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำ เปลี่ยนสถานะและพยายามแทรกตัวออกมาในลักษณะฟองอากาศขนาดเล็ก (Microbubble) ณ จุดที่มีการจ่ายเข้าของน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศ น้ำดิบสังเคราะห์และโคแอกกูแลนต์ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น คือ มีการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษซึ่งมีฟองอากาศขนาดเล็ก (Microbubble) แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างฟล็อก โดยงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้



ภาพที่ 2-10 ปรากฏการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในงานวิจัยของ Puprasert (2004)

ส่วนที่ 1 การทดลองความเป็นไปได้ของกระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอนโดยเป็นการไหลแบบต่อเนื่อง

ผลการทดลองพบว่า ไม่เกิดปรากฏการณ์ที่คาดหวัง ดังแสดงในภาพที่ 3.10 โดยพบว่าน้ำภายในไฮโดรไซโคลนยังคงขุ่นด้วยอนุภาคคอลลอยด์ของเบนโทไนท์ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดลองแบบแบตช์ โดยเดินระบบสูบน้ำจ่ายเส้นการไหลทั้งสามเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน และหยุดการเดินระบบโดยปิดเครื่องสูบน้ำที่สูบน้ำจากทั้งสามส่วนคือ น้ำดิบสังเคราะห์ น้ำที่อิมตัวด้วยอากาศ และโคแอกกูแลนต์ พบว่าเมื่อหยุดการจ่ายน้ำทั้งสามส่วนดังกล่าว น้ำภายในไฮโดรไซโคลนยังคงขุ่นด้วยความเฉื่อยต่อไปแต่มีความเร็วลดลง เกิดฟล็อกขนาดใหญ่ขึ้น โดยฟล็อกดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันอยู่บริเวณแกนกลาง และลอยขึ้นสู่ด้านบนของไฮโดรไซโคลน เมื่อนำกลุ่มอนุภาคหรือฟล็อกที่เกิดขึ้นมาส่งด้วยกล่องไมโครสโคป พบว่าเป็นฟล็อกชนิดพิเศษ คือมีฟองอากาศแทรกอยู่ภายในโครงสร้าง ส่งผลให้ฟล็อกสามารถลอยขึ้นสู่ด้านบนของไฮโดรไซโคลน

ส่วนที่ 2 การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของฟล็อกที่ลอยขึ้น

เนื่องจากในการทดลองส่วนที่ 1 นั้น ผลการทดลองพบว่าฟล็อกที่เกิดขึ้น ไม่ได้ลอยขึ้นสู่ด้านบนของไฮโดรไซโคลนทั้งหมด แต่ยังมีบางส่วนจมอยู่ด้านล่าง ดังนั้นจึงทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศ 4 ค่า ได้แก่ 14 21 28 และ 35 ลิตรต่อชั่วโมง

ผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศเพิ่มขึ้น ฟล็อกที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลนลอยเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 35 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าฟล็อกสามารถลอยขึ้นได้ทั้งหมด เกิดการแบ่งชั้นระหว่างน้ำใสและกลุ่มฟล็อกที่ลอยอยู่ด้านบนอย่างชัดเจน ซึ่งที่อัตราการไหลดังกล่าว มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 9 ของอัตราการไหลเข้าของ น้ำดิบสังเคราะห์ โดยอัตราการไหลดังกล่าวมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับกระบวนการลอยตะกอนด้วยวิธี Dissolved air flotation (DAF) ที่ใช้กันทั่วไป โดยกระบวนการ DAF จะต้องการปริมาณน้ำอิมตัวด้วยอากาศสูงถึงร้อยละ 30-50 (Tchobanoglous และคณะ, 2004)

ส่วนที่ 3 การทดลองเพื่อปรับเปลี่ยนค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

การปรับเปลี่ยนความเร็วเกรเดียนต์ดังกล่าวสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนความเร็วของน้ำดิบสังเคราะห์ที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน และควบคุมให้บริเวณส่วนล่างของไฮโดรไซโคลนมีค่าความเร็วเกรเดียนต์เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน ส่วนบริเวณตอนกลางของไฮโดรไซโคลนควบคุมให้มีความเร็วเกรเดียนต์เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชัน และสุดท้าย ทางด้านบนของไฮโดรไซโคลนซึ่งแรงหนีศูนย์กลางทำให้ฟล็อกชนิดพิเศษแยกตัวออกจากน้ำมารวมตัวกันที่บริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลน

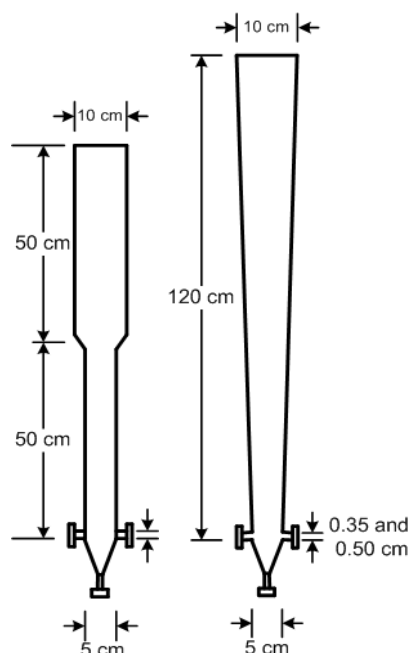
ผลการทดลองพบว่า ยังไม่เกิดปรากฏการณ์ตามที่คาดหวังไว้ เนื่องจากเมื่อปรับอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์เพื่อให้ความเร็วเกรเดียนต์เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันที่บริเวณส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน ส่งผลให้ความเร็วเกรเดียนต์ที่บริเวณตอนกลางของถังปฏิกริยาสูงเกินไป ไม่เหมาะกับการเกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชัน และเมื่อปรับความเร็วเกรเดียนต์ที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนเพื่อให้บริเวณส่วนบนของไฮโดรไซโคลนเหมาะกับการฟล็อกคูเลชัน ส่งผลให้บริเวณส่วนล่างมีความเร็วเกรเดียนต์ไม่เพียงพอต่อการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน นอกจากนี้ เนื่องจากบริเวณส่วนบนของถังปฏิกริยามีแรงหนีศูนย์กลางต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกตัวระหว่างฟล็อกและน้ำไหลลดลงตามไปด้วย

สรุปข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้

- 1) การทดลองประสบผลสำเร็จในการสร้างฟล็อกแบบพิเศษ ซึ่งคือฟล็อกที่เกิดจากอนุภาคเบนโทไนท์กับสารโคแอกกูแลนต์ โดยมีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ในฟล็อกนั้น
- 2) ปรากฏการณ์ที่คาดหวังไว้ดังแสดงในภาพที่ 2-10 ยังไม่สามารถทำได้สำเร็จด้วยการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง
- 3) กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอนนี้มีความเป็นไปได้ เนื่องจากมีฟล็อกแบบพิเศษเกิดขึ้น

วรศิริ เสียงสนั่น (2549)

ศึกษากระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดคือ ไฮโดรไซโคลน 2 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรไซโคลนทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสองขนาด และไฮโดรไซโคลนทรงกรวย โดยแต่ละชนิดทำการทดลองแบบแบตช์และแบบไหลต่อเนื่อง



ภาพที่ 2-11 ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยของ วรศิริ เสียงสนั่น (2549)

(ก) ถังปฏิกิริยาไฮโดรไซโคลนทรงกระบอกสองรัศมี (ข) ถังปฏิกิริยาไฮโดรไซโคลนทรงกรวย

ทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ ได้แก่ โพลีเมอร์ประจุบวก FO107 FO300 โพลีเมอร์ประจุลบ AN910 AN934 และโพลีเมอร์ไม่มีประจุ FO4190 อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์เท่ากับ 150 200 300 400 และ 550 ลิตรต่อชั่วโมง และความดันของน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศเท่ากับ 2.0 2.5 3.0 3.5 และ 4.0 บาร์ ที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาไฮบริด โดยงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 หาชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม ด้วยวิธีจาร์เทสต์

งานวิจัยนี้เลือกใช้โพลีเมอร์เป็นโคแอกกูแลนต์แทนการใช้โคแอกกูแลนต์อื่นที่เป็นที่นิยม เช่น สารส้ม เนื่องจากโพลีเมอร์ให้ประสิทธิภาพดีกว่าสารส้ม และเนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการไฮบริด จึงต้องการให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยทำการศึกษาชนิดของโพลีเมอร์ที่มีความแตกต่างกันในแง่ของประจุ 5 ชนิด ได้แก่ FO107 FO300 AN910 AN934 และ FO4190 โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า ชนิดประจุของโพลีเมอร์ให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขุ่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ชนิดของประจุไม่ส่งผลต่อกลไกที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นเป็นกลไกการรวมตะกอนด้วยโพลีเมอร์ แต่สังเกตพบว่าโพลีเมอร์ประจุบวก FO107 สามารถสร้างฟล็อกได้ดีที่สุด

ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของรูปร่างลักษณะของถังปฏิกริยาไฮบริด

ทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอกสองขนาด ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 10 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.11 (ก) และถังปฏิกริยาทรงกรวย ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 140 เซนติเมตร และทำมุม 1.19° ดังภาพที่ 3.12 (ข) นอกจากนี้ยังทำการทดลองปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องจ่ายน้ำดิบ 0.5 และ 0.35 เซนติเมตร

สำหรับถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอกสองขนาด ผลการทดลองพบว่า

- 1) เกิดการแยกแหว่งฟล็อกและน้ำใสในการทดลองแบบแบตซ์เท่านั้น
- 2) สามารถสร้างฟล็อกชนิดพิเศษซึ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายในได้
- 3) ชนิดประจุของโพลีเมอร์ให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขุ่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยกลไกในการกำจัดความขุ่นเป็นแบบรวมตะกอนด้วยโพลีเมอร์ (Polymer bridging)
- 4) สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศและอัตราการไหลเข้าทั้งหมด (Air fraction) เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษ
- 5) จุดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเปลี่ยน เป็นจุดที่ก่อให้เกิดการรบกวนการหมุนวน ส่งผลให้ไม่เกิดการแยกแหว่งฟล็อกและน้ำใส
- 6) ความดันที่เหมาะสมสำหรับสร้างน้ำที่อิมิตัวด้วยอากาศ คือ อย่างน้อย 3.5 บาร์
- 7) การไหลแบบหมุนวน (Vortex) เกิดขึ้นที่อัตราการไหล 400 ลิตรต่อชั่วโมง แต่ยังไม่เกิดการแยกแหว่งฟล็อกกับน้ำใส

สำหรับถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกรวย ผลการทดลองพบว่า

- 1) เกิดการแยกแหว่งฟล็อกและน้ำใสในการทดลองแบบแบตซ์เท่านั้น
- 2) สามารถสร้างฟล็อกชนิดพิเศษซึ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายในได้
- 3) ชนิดประจุของโพลีเมอร์ให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดความขุ่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยกลไกในการกำจัดความขุ่นเป็นแบบรวมตะกอนด้วยโพลีเมอร์ (Polymer bridging)
- 4) การเพิ่มอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ หรือเพิ่มความเร็วเกรเดียนท์ ส่งผลให้ฟองอากาศเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ไม่สามารถสร้างฟล็อกชนิดพิเศษได้ โดยที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ต่ำ (150 ลิตรต่อชั่วโมง) พบว่าฟล็อกลอยขึ้นสู่ด้านบนทั้งหมด แต่ไม่เกิดการหมุนวน (Vortex) ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกแหว่งฟล็อกและน้ำใส ส่วนที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์สูง (450 ลิตรต่อชั่วโมง) พบว่าฟล็อกที่เกิดขึ้นตกตะกอนลงมาด้านล่าง

หลังจากหยุดการเดินระบบ ซึ่งอธิบายได้ว่าสาเหตุดังกล่าวเกิดจากปริมาณอากาศไม่เพียงพอต่อการสร้างฟลอคชนิดพิเศษ

- 5) ความดันที่เหมาะสมสำหรับสร้างน้ำที่อิมิตัวด้วยอากาศ คือ 4 บาร์
- 6) การไหลแบบหมุนวน (Vortex) เกิดขึ้นที่อัตราการไหล 300 ลิตรต่อชั่วโมง แต่ยังไม่เกิดการแยกระหว่างฟลอคกับน้ำใส

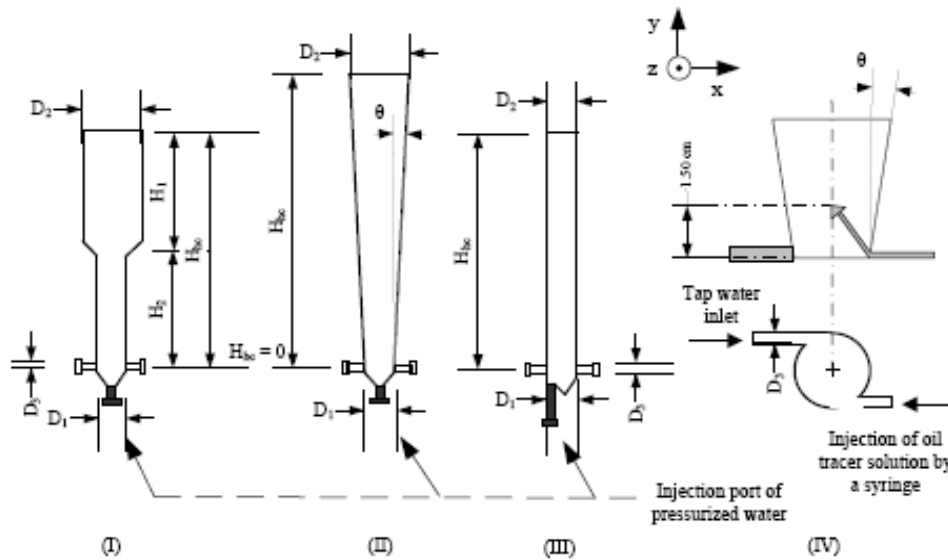
สรุปข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้

- 1) กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟลอคคูเลชัน และการลอยตะกอนในงานวิจัยนี้เกิดขึ้นได้ด้วยการทดลองแบบแบตช์เท่านั้น
- 2) กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคคูเลชันด้วยกระบวนการไฮบริดสามารถสร้างฟลอคชนิดพิเศษที่มีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายในได้
- 3) ยังไม่เกิดปรากฏการณ์การแยกระหว่างฟลอคกับน้ำใส
- 4) กรณีถึงปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกสองรัศมีพบว่า ที่จุดเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังปฏิกิริยา ทำให้เกิดการรวมกันการไหลแบบหมุนวนภายในถัง ซึ่งลักษณะการไหลแบบหมุนวนนี้จะใช้สำหรับแยกระหว่างฟลอคกับน้ำใสเมื่อผ่านช่วงโคแอกกูเลชันและฟลอคคูเลชันแล้ว ทำให้ไม่สามารถเกิดปรากฏการณ์การแยกระหว่างฟลอคชนิดพิเศษกับน้ำใสได้ เพราะการไหลแบบหมุนวนอ่อนกำลังลงบริเวณตอนบนของถังปฏิกิริยา

ส่วนกรณีถึงปฏิกิริยาไฮบริดทรงกรวยพบว่า การเพิ่มอัตราการไหลส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันเองของฟองอากาศ และประสิทธิภาพในการสร้างฟลอคชนิดพิเศษลดลง เนื่องจากฟองอากาศที่รวมตัวกันเองไม่สามารถแทรกเข้าไปภายในฟลอคได้ ทำให้ฟลอคที่ลอยขึ้นสู่ด้านบนมีปริมาณลดลง

Bumrungsri (2008)

ศึกษากระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟลิวคคูเลชัน และการลอยตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา



ภาพที่ 2-12 ดังปฏิกิริยาไฮโดรไซโคลนลักษณะต่างๆ ในงานวิจัยของ Bumrungsri (2008) และวิธีหยदन้ำมัน (Oil droplet method)

โดยงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

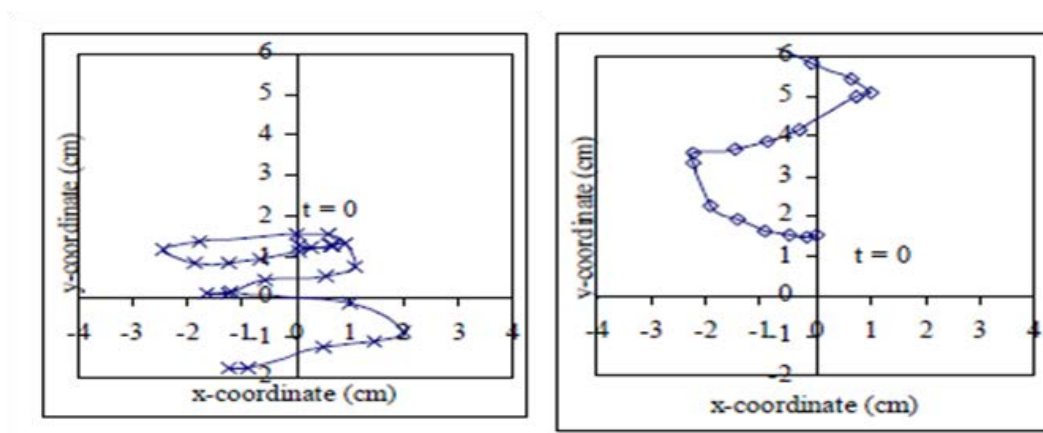
ส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบการไหลภายในไฮโดรไซโคลน ด้วยวิธีหยदन้ำมัน (Oil droplet method) แล้วถ่ายด้วยกล้องความเร็วสูง เพื่อวัดความเร็วในแนวสัมผัส (Tangential velocity) ความเร็วในแนวแกน (Axial velocity) และความเร็วเกรเดียนท์เฉลี่ย (Average velocity gradient) ภายในไฮโดรไซโคลน ผลการทดลองพบว่า

1) ในแต่ละไฮโดรไซโคลน เมื่อฉีดหยदन้ำมันเข้าไปที่จุดศูนย์กลางพบว่า หยदनน้ำมันจะเคลื่อนที่ในทิศลง แต่ในทางกลับกันเมื่อฉีดเข้าไปที่บริเวณใกล้ผนังไฮโดรไซโคลน หยदनน้ำมันจะเคลื่อนที่ในทิศขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วในแนวแกนเฉลี่ย (Average axial velocity) ของไฮโดรไซโคลนชนิดกรวยมีทิศลง และมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลนชนิดทรงกระบอก

2) เมื่อทำการวัดความเร็วในแนวสัมผัสของในไฮโดรไซโคลนทุกรูปแบบพบว่า ความเร็วเกรเดียนท์เฉลี่ยที่บริเวณจุดศูนย์กลางมีค่าต่ำกว่าบริเวณใกล้ผนังไฮโดรไซโคลนอย่างมี

นัยสำคัญ โดยสามารถสรุปได้ว่า การหมุนวนภายนอก (External vortex) ซึ่งอยู่ใกล้บริเวณผนังไฮโดรไซโคลน จะมีความแข็งแรงกว่าการหมุนวนภายใน (Internal vortex) ซึ่งอยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน

3) เมื่อสังเกตเส้นทางการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมันพบว่า ที่บริเวณแกนกลาง ($0 \leq r \leq 1$ เซนติเมตร) หยดน้ำมันจะเคลื่อนที่ในทิศลง แต่ที่บริเวณใกล้ผนังไฮโดรไซโคลน ($1 < r < 2.5$ เซนติเมตร) หยดน้ำมันจะเคลื่อนที่ในทิศขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 เส้นทางการเคลื่อนที่ของหยดน้ำมันภายในไฮโดรไซโคลน

(ก) บริเวณแกนกลาง (ข) บริเวณใกล้ผนังไฮโดรไซโคลน

4) ในไฮโดรไซโคลนทุกรูปแบบ ช่องจ่ายน้ำดิบเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าจะส่งผลให้ของไหลซึ่งในการทดลองนี้คือ น้ำ เคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างเร็วกว่าช่องจ่ายน้ำดิบเข้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า นอกจากนี้ยังพบว่า การไหลของน้ำในไฮโดรไซโคลนทรงกรวยจะเคลื่อนที่ในทิศลงสู่ด้านล่างเร็วกว่าการไหลของน้ำในไฮโดรไซโคลนทรงกระบอก

ส่วนที่ 2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการไฮบริดที่สภาวะและรูปร่างของไฮโดรไซโคลนที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า

1) ไฮโดรไซโคลนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไฮบริดคือ ไฮโดรไซโคลนทรงกระบอกรัศมีคงที่ (ไฮโดรไซโคลน 3)

2) สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไฮบริด ได้แก่ อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 200 ลิตรต่อชั่วโมง ช่องจ่ายน้ำดิบเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5

เซนติเมตร โคแอกกูแลนท์ชนิดโพลีเมอร์ประจุบวก FO934 ความเข้มข้น 3.0-4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ความดันภายในถังอัดความดัน 3.5 บาร์ และสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมด 0.0082-0.0100

3) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าว พบว่าประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสเท่ากับ ร้อยละ 70 และฟล็อกที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ อยู่ในช่วง 0.1-0.5 เซนติเมตร

สรุปข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้

1) ศึกษากระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา ประสบความสำเร็จในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

2) งานวิจัยนี้ทำให้ทราบรูปแบบการไหลภายในไฮโดรไซโคลน (Hydrodynamic) อีกทั้งยังทราบสภาวะที่เหมาะสมและลักษณะของไฮโดรไซโคลนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไฮบริด

3) กระบวนการไฮบริดในงานวิจัยนี้สามารถสร้างฟล็อกชนิดพิเศษซึ่งมีอากาศแทรกอยู่ภายใน และเกิดปรากฏการณ์ตามที่คาดหวังไว้ กล่าวคือเกิดการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส ที่บริเวณส่วนบนของไฮโดรไซโคลน แต่เนื่องจากฟล็อกที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสภายในไฮโดรไซโคลนทรงกระบอกรัศมีคงที่

งานวิจัยของ Bumrungsri (2008) ยังมีข้อบกพร่องคือ ขีดจำกัดของประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่เกิดการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสมีขนาดไม่ใหญ่พอต่อฟล็อกขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้น ดังนั้นงานวิจัยที่จะกล่าวต่อไปนี้จะทำการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลนเพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่เกิดการแยก โดยคาดหวังว่าจะสามารถแยกฟล็อกออกจากน้ำใสได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

วรศิริ เสียงสนั่น (2552)

ศึกษากระบวนการไฮบริดด้วยไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน ในกระบวนการผลิตน้ำประปา

ทำการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการไฮบริดโดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ การศึกษากับน้ำดิบสังเคราะห์ และศึกษากับน้ำธรรมชาติจากแม่น้ำ โดยมีจุดประสงค์

เพื่อประยุกต์กระบวนการไฮบริดในการนำไปใช้บำบัดน้ำจริง โดยทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ลักษณะน้ำดิบ ชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ ฟล็อกคูแลนต์ สัดส่วนของอากาศที่ใช้ อัตราการจ่ายน้ำดิบเข้า เป็นต้น แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษากระบวนการไฮบริดกับน้ำดิบสังเคราะห์จากเบนโทไนท์ โดยผลการทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ มีดังนี้

1) ในการศึกษาความแรงของการหมุนวนและลักษณะของฟองอากาศที่ระดับความสูงต่างๆ ภายในไฮโดรไซโคลน โดยทำการทดลองที่ความดัน 3.5-4 บาร์ และอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าความแรงของการหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลนเป็นไปตามที่คาดหวัง กล่าวคือเกิดการหมุนวนอย่างต่อเนื่องจนถึงด้านบนของไฮโดรไซโคลน และฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจะหมุนวนและไหลไปตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลน โดยไม่เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ (Bubble coalescence) ที่บริเวณส่วนบนของไฮโดรไซโคลน

นอกจากนี้ยังพบว่า บริเวณส่วนล่างของไฮโดรไซโคลนมีค่าความเร็วเกเรเดียนท์สูง โดยไม่เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ และมีค่าต่ำลงจนคงที่เมื่อไหลหมุนวนสู่บริเวณส่วนบนของไฮโดรไซโคลน ซึ่งความเร็วเกเรเดียนท์ที่มีค่าต่ำดังกล่าวอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส

2) ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของเบนโทไนท์ที่มีต่อกระบวนการไฮบริดพบว่า ความเข้มข้นของเบนโทไนท์ต่ำก่อให้เกิดฟล็อกที่มีขนาดเล็ก ในขณะที่ความเข้มข้นของเบนโทไนท์สูงก่อให้เกิดฟล็อกที่มีขนาดใหญ่

3) ในการศึกษาผลของชนิดของโคแอกกูแลนต์ที่มีต่อกระบวนการไฮบริดพบว่า ที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าโพลีเมอร์ประจุบวก FO107 ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพสูงกว่าอะลูมินัมซัลเฟต

4) ในการศึกษาความแตกต่างระหว่างการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันภายนอกถังปฏิกิริยาและภายในถังปฏิกิริยาพบว่า กระบวนการไฮบริดโดยทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันภายในไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้โคแอกกูแลนต์คือโพลีเมอร์ประจุบวก FO107 ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของเบนโทไนท์ 0.1 กรัมต่อลิตร โดยสามารถกำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยได้ร้อยละ 85.2 และ 60 ตามลำดับ ส่วนกระบวนการไฮบริดโดยทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย Static mixer ก่อนเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้โคแอกกูแลนต์คืออะลูมินัมซัลเฟต ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟล็อกคูแลนต์คือ

โพลีเมอร์ประจุบวก FO107 ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของเบนโทไนท์ 0.5 กรัมต่อลิตร โดยสามารถกำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยได้ร้อยละ 66.4 และ 45.2 ตามลำดับ แต่มีประสิทธิผลการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสดำ

5) ในส่วนของการศึกษากระบวนการไฮบริดโดยทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย Static mixer ก่อนเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนซึ่งพบว่าการใช้โพลีเมอร์ประจุลบ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่คาดหวัง กล่าวคือเกิดการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส

ส่วนที่ 2 ศึกษากระบวนการไฮบริดกับน้ำดิบสังเคราะห์ เพื่อ และน้ำธรรมชาติจากแม่น้ำลามาวัน ประเทศฝรั่งเศส โดยผลการทดลองกับน้ำธรรมชาติจากแม่น้ำลามาวัน ประเทศฝรั่งเศส มีดังนี้

1) ในการศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ ฟล็อกคูแลนต์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุดเมื่อใช้โคแอกกูแลนต์คือ อะลูมินัมซัลเฟต ความเข้มข้น 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟล็อกคูแลนต์คือโพลีเมอร์ประจุลบ AN905 ความเข้มข้น 0.1-0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน 30 วินาที ซึ่งสามารถเกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชันได้ แต่อาจไม่เพียงพอต่อการเกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชันที่มีประสิทธิภาพ

2) ในการศึกษาผลของการหมุนวนและพฤติกรรมของฟองอากาศที่มีต่อกระบวนการไฮบริดพบว่า ที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลของน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศที่เหมาะสมคือ 100-200 ลิตรต่อชั่วโมง ก่อให้เกิดการหมุนวนอย่างต่อเนื่องและไหลไปตามแนวแกนจนถึงด้านบนของไฮโดรไซโคลน โดยไม่เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ (Bubble coalescence) ที่บริเวณส่วนบนของไฮโดรไซโคลน

3) อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลบริเวณใกล้ผนังไฮโดรไซโคลนและบริเวณแกนกลาง หรืออัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของน้ำใสและฟล็อกบริเวณแกนกลาง คือ 70:30

4) สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษากระบวนการไฮบริดกับน้ำธรรมชาติจากแม่น้ำลามาวัน คือ 0.0055-0.0104

5) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมดังแสดงในตาราง พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สารแขวนลอย และประสิทธิภาพในการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส ร้อยละ 61 66 และ 91 ตามลำดับ

ตารางที่ 2-2 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำธรรมชาติด้วยกระบวนการไฮบริด

พารามิเตอร์	ค่าที่เหมาะสม
อัตราการไหลน้ำดิบ	1,000 ลิตรต่อชั่วโมง
อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ	100-200 ลิตรต่อชั่วโมง
ชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์	อะลูมิเนียมซัลเฟต 70 มิลลิกรัมต่อลิตร
ชนิดและความเข้มข้นของฟล็อกคูแลนต์	โพลีเมอร์ประจุลบ AN 905 0.1-0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมด	0.0055-0.0104

สรุปข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้

1) ศึกษากระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา ประสบความสำเร็จในการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง การสร้างฟล็อกชนิดพิเศษซึ่งมีฟองอากาศแทรกอยู่ภายใน และการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส

2) งานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่ากระบวนการไฮบริดสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำธรรมชาติได้จริง อีกทั้งยังพบข้อดีเนื่องจากหากเปรียบเทียบระยะเวลาที่กักพักระหว่างกระบวนการไฮบริดและกระบวนการผลิตน้ำประปาทั่วไปพบว่า กระบวนการไฮบริดใช้ระยะเวลาที่กักพักเพียง 30 วินาที หรือ 1 นาที ขณะที่กระบวนการผลิตน้ำประปาทั่วไปต้องใช้เวลาน้อยกว่า 30 นาที

3) เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดระหว่างกระบวนการไฮบริด และเทคนิคการทำให้อากาศละลายโดยทั่วไป (Conventional dissolved air flotation) พบว่ากระบวนการไฮบริดใช้สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมด 0.0055-0.0104 ขณะที่เทคนิคการทำให้อากาศละลายโดยทั่วไปใช้สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดสูงถึง 0.1500-0.5000

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. ถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอก
2. ถังเก็บน้ำประปา
3. ถังรองรับน้ำล้น
4. ถังอัดความดัน
5. ถังอากาศภายใต้ความดัน
6. ถังเตรียมและเก็บโคเอกกูแลนท
7. ถังเตรียมและเก็บฟลือคคูแลนท
8. ถังเตรียมและเก็บน้ำดิบสังเคราะห์
9. วาล์วไฟฟ้าสามทาง
10. วาล์วลดความดัน (Diaphragm relief valve)
11. มาตรวัดความดัน
12. ตัวกลางแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำกับอากาศ
13. อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำภายในถังความดัน
14. เครื่องสูบน้ำ
15. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter)
16. สแตติกมิคเซอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ความยาว 0.2 เมตร
17. ไฮดรอลิคฟลือคคูเลเตอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 35 เมตร

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. กล้องจุลทรรศน์
2. กล้องถ่ายภาพดิจิทัล
3. ชุดอุปกรณ์การกรองสำหรับการหาของแข็งแขวนลอย
4. ชุดอุปกรณ์จาร์เทสต์ (Jar test)
5. เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity meter) ยี่ห้อ Lovibond รุ่น CheckitDirect

3.1.3 สารเคมี

1. เบนโทไนท์ (Bentonite)
2. สารส้ม (อะลูมิเนียมซัลเฟต หรือ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)
3. โพลีเมอร์ประจุลบ ยี่ห้อ Superfloc รุ่น ABA-4310
4. น้ำกลั่น
5. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

3.2 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (Coagulation and flocculation)

- การศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์
- การศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

(จาร์เทสต์)

ส่วนที่ 2 การศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes) โดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ตามลำดับ

- การศึกษาเปรียบเทียบความเร็วเกรเดียนท์ (G) ระหว่างสแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ กับการกวนเร็วและกวนช้าโดยใช้อุปกรณ์จาร์เทสต์ ตามลำดับ

- การศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาพัก (T) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

- การศึกษาผลกระทบของตัวแปร G.T ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น
- การศึกษากระบวนการตกตะกอนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน

และฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes)

- การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ ตามลำดับ

ส่วนที่ 3 การศึกษาการใช้ถังปฏิริยาไฮบริด: โคแอกกูแลชั่น ฟล็อกคูแลชั่น และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา

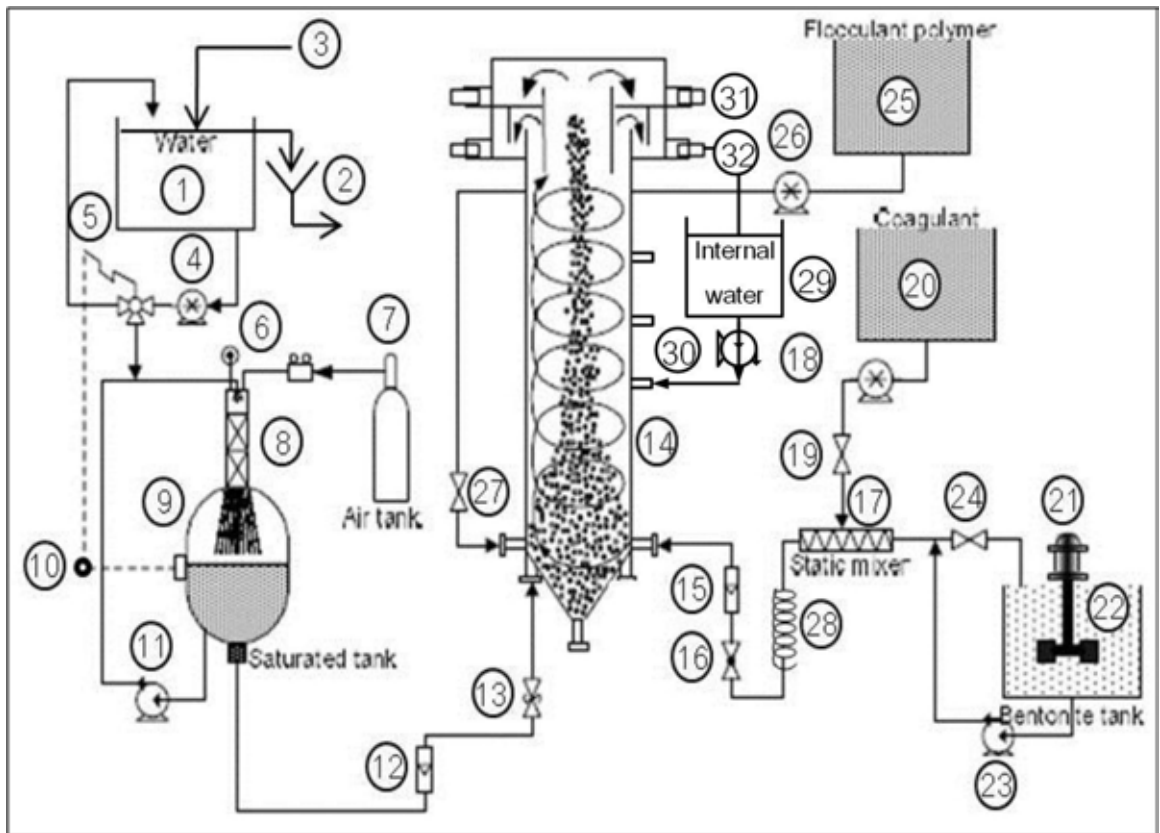
- การศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนท์ ฟล็อกคูแลนท์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูแลชั่น
- การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิริยาไฮบริด
- การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำอัดตัวด้วยอากาศที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิริยาไฮบริด
- การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายในและตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิริยาไฮบริด
- การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำอัดตัวด้วยอากาศที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิริยาไฮบริด
- ศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยทำการทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

3.3 ส่วนประกอบและการติดตั้งอุปกรณ์ระดับทดลอง (Pilot scale)

แบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก ดังนี้

1. ส่วนที่เตรียมน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศ (Air pressurized water preparation)
2. ส่วนที่เตรียมน้ำดิบสังเคราะห์ (Synthetic raw water preparation)
3. ส่วนที่เตรียมน้ำโคแอกกูแลนท์ (Coagulant preparation)
4. ส่วนที่เตรียมน้ำฟล็อกคูแลนท์ (Flocculant preparation)
5. ถังปฏิริยาไฮบริด (Hybrid reactor)

โดยรายละเอียดแต่ละขั้นตอนและลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ ดังภาพที่ 3-1 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3-1 แผนผังและลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์

- | | |
|---|---|
| 1. ถังเก็บน้ำประปาเพื่อเตรียมน้ำอัดอากาศ | 18. เครื่องสูบน้ำจากถังเก็บโคแอกกูแลนท์ |
| 2. ถังรองรับน้ำล้น | 19. วาล์วสำหรับปรับอัตราการไหล |
| 3. น้ำที่เติมเข้าสู่ระบบ | 20. ถังเตรียมและเก็บสารโคแอกกูแลนท์ |
| 4. เครื่องสูบน้ำ | 21. เครื่องกวนผสม |
| 5. วาล์วไฟฟ้าสามทาง | 22. ถังเตรียมและเก็บน้ำดิบสังเคราะห์ |
| 6. มาตรฐานวัดความดัน | 23. เครื่องสูบน้ำจากถังเก็บน้ำดิบสังเคราะห์ |
| 7. ถังความดัน | 24. วาล์วสำหรับปรับอัตราการไหลเข้าของน้ำดิบสังเคราะห์ |
| 8. ตัวกลางแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำและอากาศ | 25. ถังเตรียมและเก็บสารฟลอคคูแลนท์ |
| 9. ถังความดันสำหรับผลิตน้ำอัดด้วยอากาศ | 26. เครื่องสูบน้ำจากถังเก็บฟลอคคูแลนท์ |
| 10. อุปกรณ์ตรวจวัดระดับน้ำภายในถังความดัน | 27. วาล์วสำหรับปรับอัตราการไหล |
| 11. เครื่องสูบน้ำหมุนเวียน | 28. ไฮดรอลิคฟลอคคูเลเตอร์ |
| 12. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล | 29. ถังเตรียมน้ำหมุนเวียนภายใน |
| 13. วาล์วลดความดัน | 30. เครื่องสูบน้ำหมุนเวียนภายใน |
| 14. ถังปฏิกิริยาไฮบริด | |

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 15. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล | 31. บริเวณที่ตะกอนออก |
| 16. วาล์วควบคุมทิศทางการไหล | 32. บริเวณที่น้ำผ่านการบำบัดแล้วออก |
| 17. สเตติคมิคเซอร์ (Static mixer) | |

3.3.1 ส่วนที่เตรียมน้ำอัดตัวด้วยอากาศ (Air pressurized water preparation)

การสร้างน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศ (Pressurized water) ซึ่งโดยปกติจะใช้ในกระบวนการทำให้เกิดตะกอนลอย (Flotation) ทำโดยเตรียมน้ำไว้ในถังเก็บน้ำ (1) ซึ่งมีการเติมน้ำเพื่อรักษาระดับน้ำไว้ให้เพียงพอตลอดเวลา (3) และสูบน้ำจากถังเก็บน้ำด้วยเครื่องสูบน้ำ เพื่อส่งไปที่ถังความดัน ติดตั้งวาล์วสามทางที่เส้นทางก่อนเข้าสู่ถังความดันเพื่อควบคุมปริมาณน้ำให้เหมาะสมตามที่ต้องการก่อนส่งไปที่ถังความดัน (9) หากปริมาณน้ำภายในถังความดันมีมากเกินไปกว่าระดับที่กำหนดไว้ สัญญาณจะส่งไปที่วาล์วสามทาง(5) เพื่อเวียนน้ำกลับไปถังเก็บน้ำข้างต้น ก่อนที่น้ำประปาจะเข้าสู่ถังความดันนั้นจะต้องผ่านตัวกลางแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำกับอากาศ (8) เพื่อทำให้น้ำกระจายตัวในขณะที่เข้าสู่ถังความดัน และเพิ่มโอกาสให้น้ำสัมผัสอากาศมากขึ้น ที่ถังความดันจะมีอุปกรณ์ตรวจสอบระดับน้ำ (10) หากระดับน้ำต่ำเกินกว่าที่ต้องการ สัญญาณจะส่งไปที่วาล์วสามทางเพื่อปรับให้ปริมาณน้ำเข้าถังความดันมากขึ้น เครื่องสูบน้ำที่ต่ออยู่ด้านล่างของถังความดัน (11) ทำหน้าที่สูบน้ำวนเวียนกลับเข้าไปในถังอีก เพื่อให้แน่ใจว่าอากาศจะละลายลงในน้ำได้อย่างสมบูรณ์ ความดันในถังความดันควบคุมโดยใช้วาล์วปรับความดัน และจากอากาศเตรียมจากถังอากาศภายใต้ความดัน (7) โดยการส่งอากาศผ่านวาล์วปรับความดันมาเข้าที่ถังความดัน โดยผ่านตัวกลางแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำกับอากาศเช่นเดียวกัน และตรวจสอบความดันภายในด้วยมาตรวัดความดัน (6) จากนั้นทำการส่งน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศไปที่ถังปฏิบัติการไฮบริดโดยผ่านวาล์วลดความดัน (13)

3.3.2 ส่วนที่เตรียมน้ำดิบสังเคราะห์ (Synthetic raw water preparation)

น้ำที่ใช้แทนน้ำดิบในงานวิจัยนี้ เป็นน้ำดิบสังเคราะห์ที่เกิดจากการผสมระหว่างน้ำประปากับเบนโทไนท์ เพื่อเป็นตัวแทนของน้ำดิบในธรรมชาติ การเตรียมน้ำดิบสังเคราะห์ทำได้โดยนำน้ำประปาและเบนโทไนท์มาควนด้วยใบพัดอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้น นำน้ำดิบมาเตรียมน้ำในถังเก็บน้ำดิบสังเคราะห์ (22) และเตรียมสารโคแอกกูแลนต์ไว้อีกถังหนึ่ง (20) ติดตั้งเครื่องสูบน้ำ (18) เพื่อสูบน้ำจากทั้งสองส่วนผ่านวาล์วที่สามารถทำการบังคับทิศทางการไหลได้

3.3.3 ส่วนที่เตรียมโคแอกกูแลนต์ (Coagulant preparation)

โคแอกกูแลนต์ที่ใช้คืออะลูมิเนียมซัลเฟต โดยทราบความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจากการทำจาร์เทสต์ (Jar test) โคแอกกูแลนต์ดังกล่าวจะถูกเตรียมให้มีความเข้มข้นตามที่ต้องการโดยการปรับอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำ (18) ในส่วนนี้จะมีการติดตั้ง Static mixer เพื่อให้เกิดกระบวนการโคแอกกูแลนต์ภายนอกถังปฏิกิริยาไฮบริด โดยทำการจ่ายโคแอกกูแลนต์เข้าสู่ระบบก่อน หลังจากนั้นจึงสูบน้ำดิบสังเคราะห์เข้าสู่สแตติคмикเซอร์ (17) แล้วไหลผ่านไฮดรอลิคฟลอคคูเลเตอร์ (28) ซึ่งเป็นสายยางพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ความยาว 35 เมตร

3.3.4 ส่วนที่เตรียมฟลอคคูแลนต์ (Flocculant preparation)

ฟลอคคูแลนต์ที่ใช้ คือ โพลีเมอร์ประจุลบโดยทราบความเข้มข้นของฟลอคคูแลนต์ที่เหมาะสมจากการทำจาร์เทสต์ (Jar test) จะถูกเตรียมให้มีความเข้มข้นตามที่ต้องการโดยการปรับอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำ (26) หลังจากนั้นจะทำการจ่ายฟลอคคูแลนต์เข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริด (14) โดยตรง เพื่อให้เกิดกระบวนการฟลอคคูเลชัน

3.3.5 ส่วนที่เตรียมน้ำหมุนเวียนภายใน (Internal water recirculation preparation)

น้ำหมุนเวียนภายใน คือน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังปฏิกิริยาไฮบริดแล้ว เวียนกลับเข้ามาเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกิริยาไฮบริด การเตรียมน้ำหมุนเวียนภายในทำได้โดยนำผ่านการบำบัดแล้วมาพักไว้ในถังเก็บน้ำหมุนเวียนภายใน (29) หลังจากนั้นจึงทำการจ่ายเข้าสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริดด้วยเครื่องสูบน้ำ (30) ที่จุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในตำแหน่งต่างๆ

3.3.6 ถังปฏิกิริยาไฮบริด (Hybrid reactor)

ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร สูง 1.2 เมตร ปริมาตร 9.42 ลิตร โดยใช้รูปร่างเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยของ วรศิริ เสียงสนั่น (2552) เนื่องจากเป็นลักษณะถังปฏิกิริยาที่เกิดสภาวะที่ดีที่สุดในงานวิจัยที่ผ่านมา ดังภาพที่ 3-2

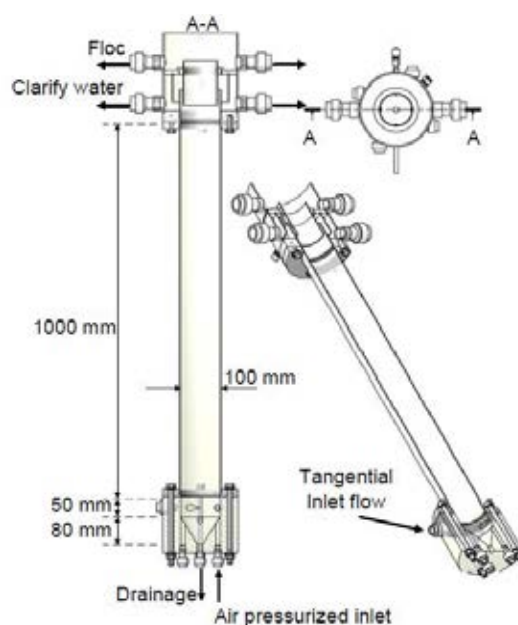
บริเวณส่วนล่างของถังปฏิกิริยาไฮบริดมีช่องสำหรับจ่ายน้ำเข้าสามทาง ดังนี้

1) ช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ซึ่งผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันภายนอกถังปฏิกิริยาไฮบริดมาแล้ว โดยจ่ายเข้าในแนวสัมผัสกับเส้นรอบวง และสัมผัสกับผนังของถังปฏิกิริยาไฮบริด

2) ช่องจ่ายฟล็อกคูลแลนท์ โดยจ่ายเข้าในแนวสัมผัสกับเส้นรอบวงของถังปฏิกริยาไฮบริด

3) ช่องจ่ายน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศ (Pressurized water) โดยช่องทางเข้าจะอยู่ใกล้ผนังไฮโดรไซโคลนบริเวณด้านล่างของถังปฏิกริยาไฮบริด โดยมีวาล์วลดความดัน (หมายเลข 13) ก่อนถึงปากกรวย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศกับความดันบรรยากาศมากเกินไป

บริเวณส่วนบนของถังปฏิกริยาไฮบริดมีการแยกเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดระหว่างน้ำบริเวณใกล้ผนังและบริเวณแกนกลาง กล่าวคือมีการแยกเก็บระหว่างน้ำใสและฟล็อกที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 3-2 ลักษณะของถังปฏิกริยาไฮบริด

ซึ่งเป็นรูปร่างเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยของ วรศิริ เสียงสนั่น (2552)

3.4 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (Coagulation and flocculation) โดยทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง ดังนี้

3.4.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์

ทดลองน้ำดิบสังเคราะห์จากเบนโทไนท์ที่มีความขุ่น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ไม่ปรับค่าพีเอชเริ่มต้น จากนั้นทำการทดลองด้วยวิธีการดังนี้

1. เตรียมน้ำดิบสังเคราะห์จากเบนโทไนท์ให้มีความขุ่น 50 เอ็นทียู
2. นำน้ำดิบสังเคราะห์ที่เตรียมไว้มาใส่ในคอลัมน์ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร และความสูง 2 เมตร
3. เก็บน้ำตัวอย่างที่ความลึก 0.5 และ 1.8 เมตร ทุก 3 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อนำมาวิเคราะห์ความขุ่นและปริมาณสารแขวนลอย
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 1-4 โดยทำการปรับเปลี่ยนความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้นเป็น 20 และ 200 เอ็นทียู
5. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อศึกษาคูณลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์

ตารางที่ 3-1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1

การทดลอง	ศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์
ตัวแปรอิสระ	1. ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู
ตัวแปรควบคุม	1. ความลึกของจุดเก็บน้ำตัวอย่าง 0.5 และ 1.8 เมตร 2. ความถี่ในการเก็บน้ำตัวอย่าง 3 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
ตัวแปรตาม	1. ค่าความขุ่น 2. สารแขวนลอย

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.4.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

ทดลองน้ำดิบสังเคราะห์จากเบนโทไนท์ที่ความขุ่น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ไม่ปรับค่าพีเอชเริ่มต้น จากนั้นทำการทดลองด้วยวิธีการดังนี้

1. เตรียมน้ำดิบสังเคราะห์จากเบนโทไนท์ที่มีความขุ่น 50 เอ็นทียู ในปีกเกอร์ ขนาด 1000 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ
2. เติมโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) ความเข้มข้น 10 20 30 40 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในปีกเกอร์
3. กวนเร็วด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที
4. กวนช้าด้วยความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที
6. ทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที
7. ดูดน้ำใสส่วนบนมาวิเคราะห์ความขุ่นและปริมาณสารแขวนลอย
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 1-7 โดยทำการปรับเปลี่ยนความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้นเป็น 20 และ 200 เอ็นทียู
9. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) ที่เหมาะสมและนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2

การทดลอง	การศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน โดยทำการทดลองด้วยวิธีจาร์เจสต์
ตัวแปรอิสระ	1. โคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) ความเข้มข้น 10 20 30 40 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ 2. ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู
ตัวแปรควบคุม	1. ความเร็วในการกวนเร็ว 200 รอบต่อนาที 2. ระยะเวลาสำหรับการกวนเร็ว 1 นาที 3. ความเร็วในการกวนช้า 60 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3-2 (ต่อ) ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2

ตัวแปร ควบคุม	4. ระยะเวลาสำหรับการกวนช้า 20 นาที 5. ระยะเวลาในการตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 20 นาที
ตัวแปรตาม	1. ค่าความขุ่น 2. ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละความขุ่นเพื่อนำไปใช้ในการศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ อีกทั้งยังทราบประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

ส่วนที่ 2 การศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes) โดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ โดยทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์แบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลอง ดังนี้

3.4.3 การทดลองที่ 3 การศึกษาเปรียบเทียบความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาพัก (T) ระหว่างสแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ กับการกวนเร็วและกวนช้าโดยใช้อุปกรณ์จาร์เทสต์ ตามลำดับ

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาความเร็วเกรเดียนท์เปรียบเทียบระหว่างความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity gradient, วินาที⁻¹) ภายในสแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ กับการกวนเร็วและกวนช้าโดยใช้อุปกรณ์จาร์เทสต์ ตามลำดับ สำหรับการศึกษาจะทำการศึกษาที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้สมการ (3-1) (3-2) (3-3)

ความเร็วเกรเดียนท์สำหรับการกวนเร็วด้วยจาร์เทสต์ สามารถคำนวณดังสมการ (3-1)

$$G_{\text{rapid}} = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (3-1)$$

เมื่อ P คือ กำลังที่ใช้ในการกวนผสม (นิวตันเมตรต่อวินาที)
μ คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ (นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร)

V คือ ปริมาตรของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร)

ความเร็วเกรเดียนท์สำหรับการกวนช้าด้วยจาร์เทสต์ สามารถคำนวณดังสมการ

(3-2)

$$G_{\text{slow}} = \sqrt{\frac{C_D \rho (v_p - v)^3 A_p}{2V\mu}} \quad (3-2)$$

เมื่อ	C_D	คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทาน หรือ Drag coefficient
	ρ	คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	$v_p - v$	คือ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของเหลวและใบพัด (เมตรต่อวินาที)
	A_p	คือ พื้นที่ของใบพัดที่ใช้ในการเคลื่อนที่โดยตรง (ตารางเมตร)
	V	คือ ปริมาตรของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร)
	μ	คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ (นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร)

สำหรับ ความเร็วเกรเดียนท์ภายในสแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟลิกคูลเตออร์ สามารถคำนวณดังสมการ (3-3)

$$G_{\text{Static, Hydraulic}} = \sqrt{\frac{\gamma h_L}{T\mu}} \quad (3-3)$$

เมื่อ	γ	คือ ความถ่วงจำเพาะของน้ำ
	h_L	คือ แรงดันสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในสแตติคมีกเซอร์หรือไฮดรอลิคฟลิกคูลเตออร์ (เมตร)
	T	คือ ระยะเวลาพัก (วินาที)
	μ	คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ (นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร)

สำหรับระยะเวลาพัก สามารถคำนวณดังสมการ (3-4)

$$T = \frac{Q}{V} \quad (3-4)$$

เมื่อ	T	คือ ระยะเวลาชัก (วินาที)
	Q	คือ อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (ลิตรต่อชั่วโมง)
	V	คือ ปริมาตรของภาชนะหรือเส้นท่อ (ลูกบาศก์เมตร)

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3

การทดลอง	การศึกษาเปรียบเทียบความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาชัก (T) ระหว่างสแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟลิวคูลเตอร์ กับการกวนเร็วและกวนช้าโดยใช้อุปกรณ์จาร์เทสต์ ตามลำดับ
ตัวแปรอิสระ	1. อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรควบคุม	1. ความเร็วในการกวนเร็ว 200 รอบต่อนาที 2. ระยะเวลาสำหรับการกวนเร็ว 1 นาที 3. ความเร็วในการกวนช้า 60 รอบต่อนาที 4. ระยะเวลาสำหรับการกวนช้า 20 นาที 5. สแตติคมีกเซอร์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ความยาว 0.2 เมตร 6. ไฮดรอลิคฟลิวคูลเตอร์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 35 เมตร
ตัวแปรตาม	1. ความเร็วเกรเดียนท์ (ต่อวินาที) 2. ระยะเวลาชัก (วินาที)

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบความเร็วเกรเดียนท์ภายในสแตติคมีกเซอร์ ไฮดรอลิคฟลิวคูลเตอร์ การกวนเร็วและกวนช้าด้วยวิธีจาร์เทสต์ และนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อเป็นการศึกษาในเบื้องต้น

3.4.4 การทดลองที่ 4 การศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาชัก (T) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลิวคูลชันภายในเส้นท่อ โดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟลิวคูลเตอร์ เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาชัก (T) ที่มีต่อประสิทธิภาพความขุ่น อุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่

สแตติคมีกเซอร์ ทำจากวัสดุ UPVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ความยาว 20 เซนติเมตร และไฮดรอลิคฟลิวคคูเลเตอร์ ทำจากสายยาง PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 35 เมตร วางชุดไว้ในแนวนอน ทำการทดลองที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง ด้วยการควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ดังแสดงในตารางที่ 3-4 และเดินระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำขาออกจากไฮดรอลิคฟลิวคคูเลเตอร์มาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน และพิจารณาเปรียบเทียบที่ระยะเวลา 30 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความขุ่น และประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4

การทดลอง	การศึกษามลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาพัก (T) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น
ตัวแปรอิสระ	1. อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง 2. ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู
ตัวแปรควบคุม	1. ความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 2) 2. ระยะเวลาสำหรับการเดินระบบ 20 นาที 3. พิจารณาเปรียบเทียบที่ระยะเวลาดังตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที
ตัวแปรตาม	1. ค่าความขุ่น 2. ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น 3. ความเร็วเกรเดียนท์ (G) 4. ระยะเวลาพัก (T)

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาพัก (T) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลิวคคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes)

3.4.5 การทดลองที่ 5 การศึกษามลกระทบของตัวแปร G.T ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาระบบการโคแอกกูเลชันและฟลิวคคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟลิวคคูเลเตอร์ เพื่อศึกษามลกระทบของตัวแปร G.T

ที่มีต่อประสิทธิภาพความขุ่น ทำการทดลองที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง ด้วยการควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ดังแสดงในตารางที่ 3-5 และเดินระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ 3-5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5

การทดลอง	การศึกษากิจกรรมของตัวแปร G.T ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น
ตัวแปรอิสระ	1. อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง 2. ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู
ตัวแปรควบคุม	1. ความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 2) 2. ระยะเวลาสำหรับการเดินระบบ 20 นาที 3. พิจารณาเปรียบเทียบที่ระยะเวลาดังตั้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที
ตัวแปรตาม	1. ค่าความขุ่น 2. ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น 3. ตัวแปร G.T

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบผลกระทบของตัวแปร G.T ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes)

3.4.6 การทดลองที่ 6 การศึกษากระบวนการตกตะกอนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes)

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบถังตกตะกอนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยตัวแปรซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบถังตกตะกอน คือ อัตราน้ำล้นผิว (Overflow rate, OFR) และระยะเวลากัก (Retention time, T) ในการทดลองนี้จะทำการทดลองที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง ด้วยการควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ดังแสดงในตารางที่ 3-6 หลังจากนั้นจึงเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ มาทดสอบการตกตะกอนด้วยคอลัมน์ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร สูง 2

เมตร โดยเก็บน้ำตัวอย่างที่ความลึก 0.5 และ 1.8 เมตร ทุกๆ 3 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อพิจารณาอัตราการนำฝนผิวที่เหมาะสมสำหรับทุกสภาวะ

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 6

การทดลอง	ศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์
ตัวแปรอิสระ	1. ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู 2. อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรควบคุม	1. ความลึกของจุดเก็บน้ำตัวอย่าง 0.5 และ 1.8 เมตร 2. ความถี่ในการเก็บน้ำตัวอย่าง 3 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
ตัวแปรตาม	1. ค่าความขุ่น 2. สารแขวนลอย

3.4.7 การทดลองที่ 7 การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อโดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ ตามลำดับ

ในขั้นนี้ จะทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์มิติ (Dimension analysis) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของของไหลด้วยการวิเคราะห์ถึงตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้อง และจัดให้เกิดเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติเพื่อกำหนดคุณลักษณะของการไหล โดยในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์กลุ่มตัวแปรไร้มิติด้วยวิธีตามทฤษฎีบัคกิงแฮมไพ (Buckingham Pi Theorem) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัด อีกทั้งยังทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองและประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าวอีกด้วย

จากทฤษฎีบัคกิงแฮมไพ (Buckingham Pi Theorem) ซึ่งกล่าวถึงจำนวนของตัวแปรไร้มิติอิสระซึ่งใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชุดตัวแปรต่างๆ ที่ปรากฏในรูปแบบการไหลหรือปรากฏการณ์ใดๆ โดยกลุ่มตัวแปรอิสระไร้มิติ หรือ π สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3-6)

$$\pi = n - m \quad (3-5)$$

เมื่อ Π คือ จำนวนตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless group)
 n คือ จำนวนตัวแปรที่เกี่ยวข้อง
 m คือ จำนวนมิติปฐมภูมิ

กลุ่มตัวแปรอิสระไร้มิติเรียกว่า π ซึ่งเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (3-6)$$

หรือ
$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) \quad (3-7)$$

เมื่อพิจารณาจากการทดลอง จึงแจ่มแจ้งว่ามีตัวแปรใดที่ส่งผลต่อคุณลักษณะการไหลได้บ้าง และแจ่มแจ้งมิติของแต่ละตัวแปร หลังจากนั้นจึงจัดกลุ่มตัวแปรให้เป็นตัวแปรไร้มิติ และหาความสัมพันธ์เพื่อทำนายประสิทธิภาพโดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล

ตารางที่ 3-7 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 7

การทดลอง	การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลื้อคคูเลชันภายในเส้นท่อโดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิกฟลื้อคคูเลเตอร์ ตามลำดับ
ตัวแปรอิสระ	1. ความชันน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู 2. อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรตาม	1. ประสิทธิภาพการบำบัดจริง 2. ประสิทธิภาพการบำบัดจากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง 3. ปริมาณสารแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร) 4. ความเร็วเกรเดียนท์ (จากการคำนวณดังสมการ (3-3)) 5. ระยะเวลาพัก (จากการคำนวณดังสมการ (3-4))

ส่วนที่ 3 ศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟลื้อคคูเลชันและการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายในในการผลิตน้ำประปา เป็นการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous flow) เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริด ความเป็นไปได้ในการนำถังปฏิกริยาไฮบริดมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต

น้ำประปาในประเทศไทย และการปรับปรุงถึงปฏิกริยาไฮบริดโดยเวียนน้ำกลับภายใน แบ่งการทดลองออกเป็น 5 การทดลอง ดังนี้

- ศึกษาการใช้ถึงปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน ในการผลิตน้ำประปา

3.4.8 การทดลองที่ 8 ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์และฟล็อกคูแลนต์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน โดยวิธีจาร์เทสต์

ทดลองนำดิบสังเคราะห์จากเบนโทไนท์ที่มีความขุ่น 50 เอ็นทียู ไม่ปรับค่าพีเอช เริ่มต้น จากนั้นทำการทดลองด้วยวิธีการดังนี้

1. เตรียมน้ำดิบสังเคราะห์จากเบนโทไนท์ให้มีความขุ่น 50 เอ็นทียู ในบีกเกอร์ ขนาด 1000 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ

2. เติมโคแอกกูแลนต์อะลูมินัมซัลเฟต ความเข้มข้น 40 50 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในบีกเกอร์ทั้ง 6 ใบ

3. กวนเร็วด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที

4. เติมฟล็อกคูแลนต์ชนิดโพลีเมอรัประจุลบ ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในแต่ละบีกเกอร์

5. กวนช้าด้วยความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที

6. ทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที

7. ดูดน้ำใสส่วนบนมาวิเคราะห์ความขุ่นและปริมาณสารแขวนลอย

8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 1-7 โดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของฟล็อกคูแลนต์เป็น 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 1-8 โดยทำการปรับเปลี่ยนระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน (ระยะเวลากวนช้า) เป็น 1 นาที และ 20 นาที

10. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ และฟล็อกคูแลนต์ที่เหมาะสมและนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3-8 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 8

การทดลอง	ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์และฟล็อกคูแลนต์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน โดยทำการทดลองด้วยวิธีจาร์เทสต์
ตัวแปรอิสระ	<ol style="list-style-type: none"> โคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) ความเข้มข้น 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ฟล็อกคูแลนต์ชนิดโพลีเมอร์ประจุลบ ความเข้มข้น 0.1 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน 30 วินาที 1 นาที และ 20 นาที
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู ระยะเวลาสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน 1 นาที ความเร็วในการกวนเร็ว 200 รอบต่อนาที ความเร็วในการกวนช้า 60 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 20 นาที
ตัวแปรตาม	<ol style="list-style-type: none"> ปริมาณของแข็งแขวนลอย ค่าความขุ่น

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์และฟล็อกคูแลนต์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน เพื่อนำไปใช้ในการทดลองถัดไป

3.4.9 การทดลองที่ 9 ศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริด

ในการทดลองนี้ใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ซึ่งการติดตั้งถังปฏิกริยาไฮบริดเป็นแบบที่สามารถถอดออกได้สะดวก ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่จ่ายเข้าถังปฏิกริยาไฮบริดและทำการทดลองด้วยการควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ดังแสดงในตารางที่ 3-9 และเดินระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง จากนั้นเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.5 3.6 และ 3.7

ตารางที่ 3-9 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 9

การทดลอง	ศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริด
ตัวแปรอิสระ	1. อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 800 1,000 และ 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรควบคุม	1. ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู 2. ความดันภายในถังอัดความดัน 4.5 บาร์ 3. อัตราการไหลของน้ำที่อมตัวด้วยอากาศ 80 ลิตรต่อชั่วโมง 4. ความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 8) 5. ความเข้มข้นของฟล็อกคูแลนต์ที่เหมาะสม (จากการทดลองที่ 8)
ตัวแปรตาม	1. ปริมาณของแข็งแขวนลอย 2. ค่าความขุ่น 3. ปรากฏการณ์ที่มองเห็นด้วยตาภายในถังปฏิกริยาไฮบริด 4. ค่าพีเอช 5. สภาพความเป็นต่าง

หมายเหตุ ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำ

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำที่มีความขุ่นค่อนข้างสูงด้วยถังปฏิกริยาไฮบริดที่เดินระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง ซึ่งอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับความเร็วเกรเดียนท์ภายในถังปฏิกริยาไฮบริด และส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การแยกแหว่งฟล็อกและน้ำใสอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีความเร็วเกรเดียนท์เหมาะสมโดยไม่ทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นแตกออก

3.4.10 การทดลองที่ 10 ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่อมตัวด้วยอากาศที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริด

ในการทดลองนี้ใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำที่อมตัวด้วยอากาศที่จ่ายเข้าถังปฏิกริยาไฮบริด และทำการทดลองด้วยการควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดไว้ดังแสดงในตารางที่ 3-10 และเดินระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง จากนั้นเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.5 3.6 และ 3.7

ตารางที่ 3-10 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 10

การทดลอง	ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริด
ตัวแปรอิสระ	1. อัตราการไหลของน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศ 40 80 และ 120 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรควบคุม	1. ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู 2. ความดันภายในถังอัดความดัน 4.5 บาร์ 3. ความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 8 4. ความเข้มข้นของฟล็อกคูแลนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 8 5. อัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 9
ตัวแปรตาม	1. ปริมาณของแข็งแขวนลอย 2. ค่าความขุ่น 3. ปรากฏการณ์ที่มองเห็นด้วยตาภายในถังปฏิกริยาไฮบริด 4. ค่าพีเอช 5. สภาพความเป็นต่าง

หมายเหตุ ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำ

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบอัตราการไหลของน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำที่มีความขุ่นค่อนข้างสูงด้วยถังปฏิกริยาไฮบริดที่เดินระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง ซึ่งอัตราการไหลของน้ำที่อิมตัวด้วยอากาศดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษซึ่งมีอากาศแทรกอยู่ภายใน นอกจากนี้ยังสามารถนำไปคำนวณสัดส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมด (Air fraction) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกระบวนการทำให้ตะกอนลอยที่ใช้กันทั่วไป (Conventional dissolved air flotation)

3.4.11 การทดลองที่ 11 ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในและจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริด

ในการทดลองนี้ใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร โดยมีการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับเข้าสู่ถังปฏิกริยาโดยมีตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในที่ 50 60 และ 70 เซนติเมตร จากขอบถังปฏิกริยา ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในที่จ่ายเข้าถังปฏิกริยาไฮบริดให้เป็นไปตามค่าที่

กำหนดไว้ และควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3-11 และเดินระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง จากนั้นเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.5 3.6 และ 3.7

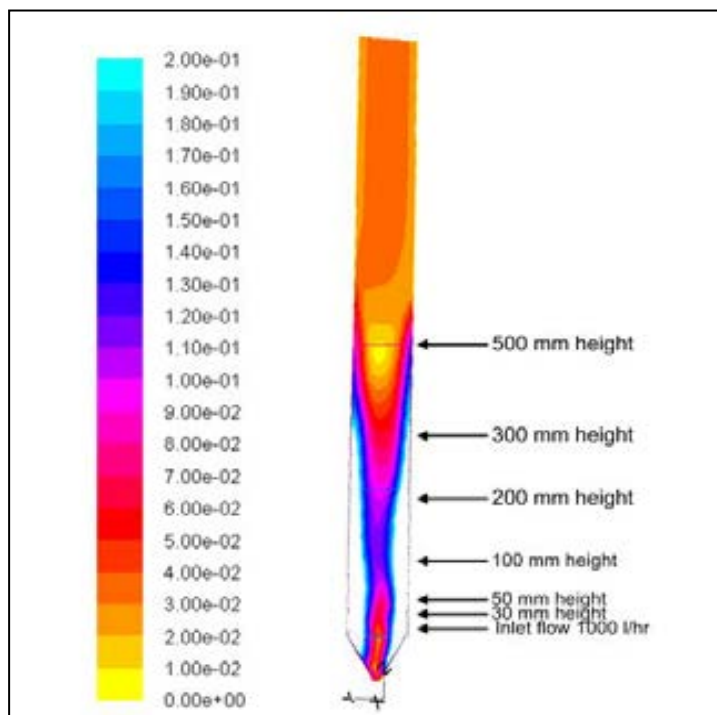
ตารางที่ 3-11 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 11

การทดลอง	ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายใน และจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริด
ตัวแปรอิสระ	<ol style="list-style-type: none"> 1. อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายใน 600 800 1,000 และ 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง 2. ตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน 50 60 และ 70 เซนติเมตร
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู 2. ความดันภายในถังอัดความดัน 4.5 บาร์ 3. ความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 8 4. ความเข้มข้นของฟล็อกคูแลนต์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 8 5. อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 9 6. อัตราการไหลของน้ำที่อัดตัวด้วยอากาศที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 10
ตัวแปรตาม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ปริมาณของแข็งแขวนลอย 2. ค่าความขุ่น 3. ปรากฏการณ์ที่มองเห็นด้วยตาภายในถังปฏิกริยาไฮบริด 4. ค่าพีเอช 5. สภาพความเป็นต่าง

หมายเหตุ ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิของน้ำ

จากงานวิจัยของวรศิริ เสียงสนัน (2552) ซึ่งศึกษากระบวนการไฮบริดด้วยไฮโดรไซโคลน โคแอกกูแลชั่น ฟล็อกคูแลชั่น และการลอยตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา พบข้อบกพร่องคือ ความเร็วบริเวณส่วนบนของถังปฏิกริยามีค่าต่ำลงจนคงที่เมื่อของไหลไหลหมุนวนสู่บริเวณส่วนบนของถังปฏิกริยา ดังภาพที่ 3-3 ซึ่งความเร็วที่มีค่าค่อนข้างต่ำดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีแนวคิดในการปรับปรุงถังปฏิกริยาไฮบริดโดยการเพิ่มการหมุนเวียนภายใน โดยการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว กลับมาเพิ่มความเร็วของน้ำในบริเวณส่วนบนของถังปฏิกริยา ซึ่งในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำ

หมุนเวียนภายในที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริด โดยปรับเปลี่ยนให้ตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในอยู่ที่ระดับความสูง 50 60 และ 70 เซนติเมตร ของถังปฏิกริยา



ภาพที่ 3-3 ความเร็วภายในถังปฏิกริยาไฮบริดที่ระดับความสูงต่างๆ (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำที่มีความขุ่นค่อนข้างสูงด้วยถังปฏิกริยาไฮบริดที่เดินระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง โดยคาดหวังว่าอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในดังกล่าวจะสามารถเพิ่มความเร็วยวบริเวณส่วนบนของถังปฏิกริยา และส่งผลให้เกิดการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ความเร็วดังกล่าวต้องไม่ทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นแตกออก

3.4.12 การทดลองที่ 12 ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์และฟล็อกคูแลนต์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน โดยวิธีจาร์เทสต์ ทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

นำน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสนมาทำการทดลองด้วยวิธีการดังนี้

1. เตรียมน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน ในบีกเกอร์ขนาด 1000

มิลลิลิตร

2. เติมโคแอกกูแลนท์อะลูมิเนียมซัลเฟต ความเข้มข้น 30 40 50 60 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในบีกเกอร์
3. กวนเร็วด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที
4. เติมฟลิวคูลูแลนท์ชนิดโพลีเมอร์ประจุลบ ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในแต่ละบีกเกอร์
5. กวนช้าด้วยความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลาเท่ากับระยะเวลากักภายในถังปฏิกริยาไฮบริดจากการทดลองที่ 11
6. ทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที
7. ดูดน้ำใสส่วนบนมาวิเคราะห์ความขุ่นและปริมาณสารแขวนลอย
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 1-7 โดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของฟลิวคูลูแลนท์เป็น 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
9. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาความเข้มข้นของโคแอกกูแลนท์ และฟลิวคูลูแลนท์ที่เหมาะสมและนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3-12 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 12

การทดลอง	ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนท์และฟลิวคูลูแลนท์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟลิวคูลูเลชัน โดยทำการทดลองด้วยวิธีจาร์เทสต์ ทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน
ตัวแปรอิสระ	<ol style="list-style-type: none"> 1. โคแอกกูแลนท์ (อะลูมิเนียมซัลเฟต) ความเข้มข้น 30 40 50 60 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ 2. ฟลิวคูลูแลนท์ชนิดโพลีเมอร์ประจุลบ ความเข้มข้น 0.1 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร 3. ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู 4. ระยะเวลาสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน 1 นาที
ตัวแปรควบคุม	<ol style="list-style-type: none"> 1. ความเร็วในการกวนช้า 60 รอบต่อนาที 2. ความเร็วในการกวนเร็ว 200 รอบต่อนาที 3. ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟลิวคูลูเลชัน (เท่ากับระยะเวลากักภายในถังปฏิกริยาไฮบริดจากการทดลองที่ 11)

ตารางที่ 3-12 (ต่อ) ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 12

ตัวแปร ควบคุม	4. ระยะเวลาในการตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 20 นาที
ตัวแปรตาม	1. ปริมาณของแข็งแขวนลอย 2. ค่าความขุ่น

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์และฟล็อกคูแลนต์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน เพื่อนำไปใช้ในการทดลองกับถังปฏิกริยาไฮบริดในการทดลองถัดไป

3.4.13 การทดลองที่ 13 ศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดภายใต้สภาวะที่เหมาะสมกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

ในการทดลองนี้ใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ทำการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 8 9 และ 10 และควบคุมค่าตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.13 และเดินระบบด้วยการไหลแบบต่อเนื่อง จากนั้นเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.5 3.6 และ 3.7

ตารางที่ 3-13 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 13

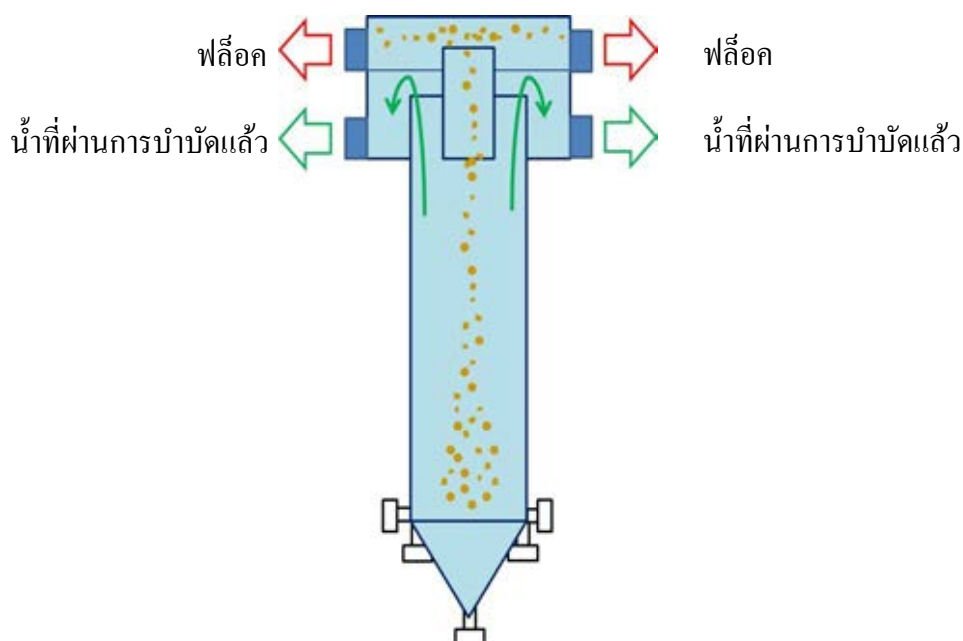
การทดลอง	ศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน
ตัวแปร ควบคุม	1. ความดันภายในถังอัดความดัน 4.5 บาร์ 2. ความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม 3. ความเข้มข้นของฟล็อกคูแลนต์ที่เหมาะสม 4. อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 10 5. ตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 10 6. อัตราการไหลของน้ำที่ฉีดด้วยอากาศที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 9
ตัวแปรตาม	1. ปริมาณของแข็งแขวนลอย 2. ค่าความขุ่น 3. ปรากฏการณ์ที่มองเห็นด้วยตาภายในถังปฏิกริยาไฮบริด

หมายเหตุ ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม คือ อุณหภูมิน้ำ และคุณสมบัติน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

ผลที่คาดว่าจะได้รับคือ ทราบประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดภายใต้การเวียนน้ำกลับภายในภายใต้สภาวะที่เหมาะสมกับน้ำดิบจริงที่มีความขุ่นสูงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

3.5 วิธีเก็บน้ำตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ทำโดยการดำเนินระบบตามสภาวะดำเนินการอย่างต่อเนื่องให้มีเวลานานกว่าเวลากักเก็บภายในถังปฏิกริยา เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล หลังจากนั้นจึงทำการเก็บน้ำตัวอย่างในขณะที่ระบบยังดำเนินการอยู่อย่างต่อเนื่อง โดยฟล็อกและน้ำใสที่เกิดขึ้นจะออกสู่ท่อบริเวณด้านบนซึ่งเป็นท่อที่แยกกันอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 3-4 แล้วนำไปเก็บไว้ในถังเก็บฟล็อกและถังเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว ทำการเก็บตัวอย่างทุก 5 นาที เป็นเวลา 20 นาที โดยเก็บน้ำตัวอย่างครั้งละอย่างน้อย 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นจึงนำน้ำตัวอย่างที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ



ภาพที่ 3-4 การเก็บตัวอย่างของถังปฏิกริยาไฮบริด

3.6 วิธีวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความขุ่น และสารแขวนลอย โดยกรณีความขุ่น จะวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความขุ่น (Turbidity meter) โดยใช้วิธีเนฟเฟโลเมตริก (Nephelometric method) ส่วนในกรณีสารแขวนลอยจะวิเคราะห์ตามวิธี 2540 D. (APHA, AWWA และ WEF, 2005) ซึ่งมีขั้นตอนคือ นำตัวอย่างน้ำตัวอย่างที่ได้มากรองผ่านกระดาษกรองซึ่งมีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมโครเมตร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น หลังจากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักกระดาษกรองในตอนเริ่มต้น จึงจะทราบปริมาณสารแขวนลอย

3.7 วิธีวิเคราะห์ประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริด

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ทำโดยเดินระบบตามสภาวะดำเนินการอย่างต่อเนื่องให้มีเวลานานกว่าเวลากักเก็บภายในถังปฏิกริยา เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล และทำการเก็บตัวอย่างน้ำในขณะที่ระบบยังดำเนินการอยู่อย่างต่อเนื่อง วิธีวิเคราะห์ประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดมี 2 วิธี ดังนี้ (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

3.7.1 ประสิทธิภาพในแง่การบำบัดน้ำ

พิจารณาประสิทธิภาพในแง่การบำบัดน้ำโดยการคำนวณความแตกต่างระหว่างความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น และความขุ่นของน้ำใสที่ผ่านการบำบัดแล้วบริเวณใกล้ผนังไฮโดรไซโคลน เปรียบเทียบกับความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น แล้วคิดเป็นเปอร์เซ็นต์กำจัดความขุ่น ดังสมการที่ (3-1)

$$\text{Turbidity removal efficiency (\%)} = \left(\frac{T_{\text{Raw water}} - T_{\text{Wall zone}}}{T_{\text{Raw water}}} \right) \times 100\% \quad (3-8)$$

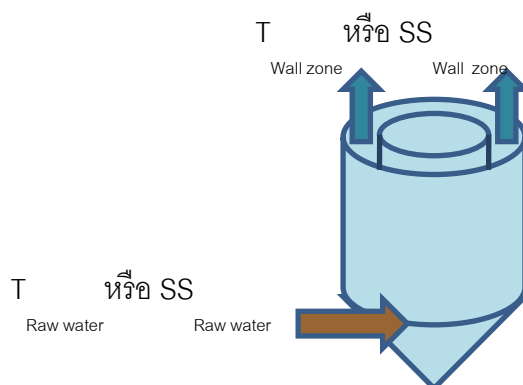
$$\begin{aligned} T_{\text{Raw water}} &= \text{ความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น} \\ T_{\text{Wall zone}} &= \text{ความขุ่นของน้ำใสที่ผ่านการบำบัดแล้วบริเวณใกล้ผนังไฮโดรไซโคลน} \end{aligned}$$

นอกจากนี้ยังพิจารณาประสิทธิภาพในแง่การบำบัดน้ำโดยการคำนวณความแตกต่างระหว่างสารแขวนลอยของน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น และสารแขวนลอยของน้ำใสที่ผ่านการบำบัดแล้วบริเวณใกล้ผนังไฮโดรไซโคลน เปรียบเทียบกับสารแขวนลอยของน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น แล้วคิดเป็นเปอร์เซ็นต์กำจัดสารแขวนลอย ดังสมการที่ (3-2)

$$\text{SS removal efficiency (\%)} = \left(\frac{\text{SS}_{\text{Raw water}} - \text{SS}_{\text{Wall zone}}}{\text{SS}_{\text{Raw water}}} \right) \times 100\% \quad (3-9)$$

$\text{SS}_{\text{Raw water}}$ = สารแขวนลอยของน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น

$\text{SS}_{\text{Wall zone}}$ = สารแขวนลอยของน้ำใสที่ผ่านการบำบัดแล้วบริเวณใกล้ผนังไฮโดรไซโคลน



ภาพที่ 3-5 แผนภาพแสดงบริเวณที่เก็บพารามิเตอร์ต่างๆ มาวิเคราะห์ สำหรับคำนวณประสิทธิภาพในแง่การบำบัดน้ำ

3.7.2 ประสิทธิภาพในแง่การแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส

พิจารณาประสิทธิภาพในแง่การแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสโดยการคำนวณความแตกต่างระหว่างความขุ่นของฟล็อกชนิดพิเศษที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลน และความขุ่นของน้ำใสที่ผ่านการบำบัดแล้วบริเวณใกล้ผนังไฮโดรไซโคลน เปรียบเทียบกับความขุ่นของฟล็อกชนิดพิเศษที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลน แล้วคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส ดังสมการที่ (3-3)

$$\text{Separation efficiency}_{\text{turbidity}} (\%) = \left(\frac{T_{\text{Center zone}} - T_{\text{Wall zone}}}{T_{\text{Center zone}}} \right) \times 100\% \quad (3-10)$$

$T_{\text{Center zone}}$ = ความขุ่นของของฟล็อกชนิดพิเศษที่เกิดขึ้นบริเวณ
แกนกลางของไฮโดรไซโคลน

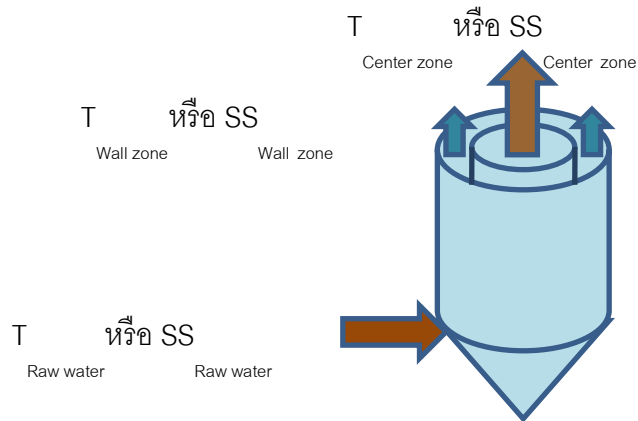
$T_{\text{Wall zone}}$ = ความขุ่นของน้ำใสที่ผ่านการบำบัดแล้วบริเวณใกล้ผนัง
ไฮโดรไซโคลน

พิจารณาประสิทธิภาพในแง่การแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสโดยการคำนวณความแตกต่างระหว่างสารแขวนลอยของฟล็อกชนิดพิเศษที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลน และสารแขวนลอยของน้ำใสที่ผ่านการบำบัดแล้วบริเวณใกล้ผนังไฮโดรไซโคลนเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยของฟล็อกชนิดพิเศษที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลนแล้วคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสดังสมการที่ (3-4) นอกจากนี้ในการสังเกตปรากฏการณ์การการบำบัดจะแสดงด้วยภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลในลักษณะภาพนิ่ง เพื่อศึกษาการดำเนินการของถังปฏิกริยาไฮบริด

$$\text{Separation efficiency}_{\text{SS}} (\%) = \left(\frac{SS_{\text{Center zone}} - SS_{\text{Wall zone}}}{SS_{\text{Center zone}}} \right) \times 100\% \quad (3-11)$$

$SS_{\text{Center zone}}$ = สารแขวนลอยของของฟล็อกชนิดพิเศษที่เกิดขึ้นบริเวณ
แกนกลางของไฮโดรไซโคลน

$SS_{\text{Wall zone}}$ = สารแขวนลอยของน้ำใสที่ผ่านการบำบัดแล้วบริเวณ
ใกล้ผนังไฮโดรไซโคลน



ภาพที่ 3-6 แผนภาพแสดงบริเวณที่เก็บพารามิเตอร์ต่างๆ มาวิเคราะห์สำหรับคำนวณประสิทธิภาพในแง่การแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส

นอกจากนี้ในการสังเกตปรากฏการณ์การการบำบัดจะแสดงด้วยภาพถ่ายจากกล้องดิจิตอลในลักษณะภาพนิ่ง เพื่อศึกษาการดำเนินการของถังปฏิกริยาไฮบริด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. การศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

- การศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์
- การศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

(จาร์เทสต์)

2. การศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยใช้สแตติคมีกเซอร์

และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ ตามลำดับ

- การศึกษาเปรียบเทียบความเร็วเกรเดียนท์ (G) ระหว่างสแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ กับการกวนเร็วและกวนช้าโดยใช้อุปกรณ์จาร์เทสต์ ตามลำดับ
- การศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาพัก (T) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

- การศึกษาผลกระทบของตัวแปร G.T ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

- การศึกษากระบวนการตกตะกอนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน

และฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

- การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ ตามลำดับ

3. การศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด: โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน

ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา

- การศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนท์ ฟล็อกคูแลนท์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน

- การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด

- การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำอึมตัวด้วยอากาศที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด
- การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายในและตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด
- การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำอึมตัวด้วยอากาศที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด
- ศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยทำการทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน ผลการทดลองและวิจารณ์ผล แสดงใน 3 หัวข้อหลัก ดังต่อไปนี้

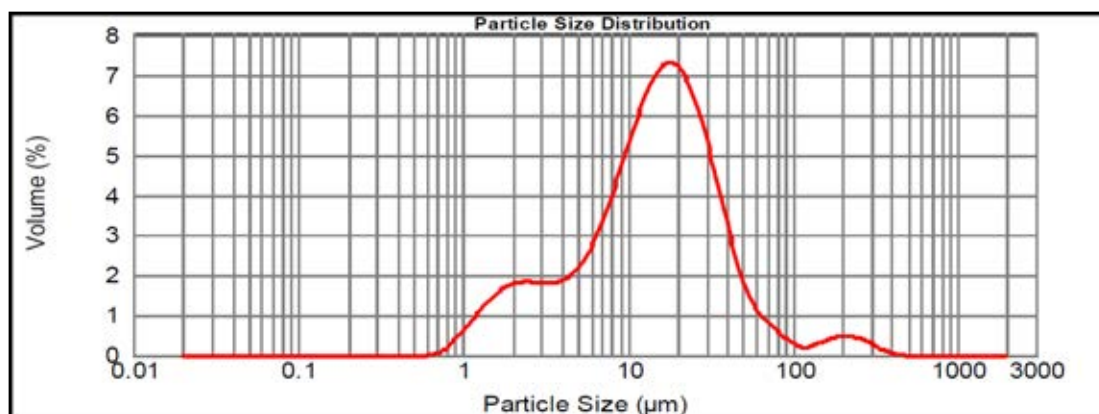
4.1 การศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคคูเลชัน(Coagulation and flocculation)

4.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์

น้ำดิบสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการผสมระหว่างน้ำประปากับเบนโทไนท์ที่มีความขุ่นค่าต่างๆ โดยเลือกใช้เบนโทไนท์เพื่อเป็นตัวแทนของอนุภาคคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำดิบจริงตามธรรมชาติ ซึ่งลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์ มีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 4-1

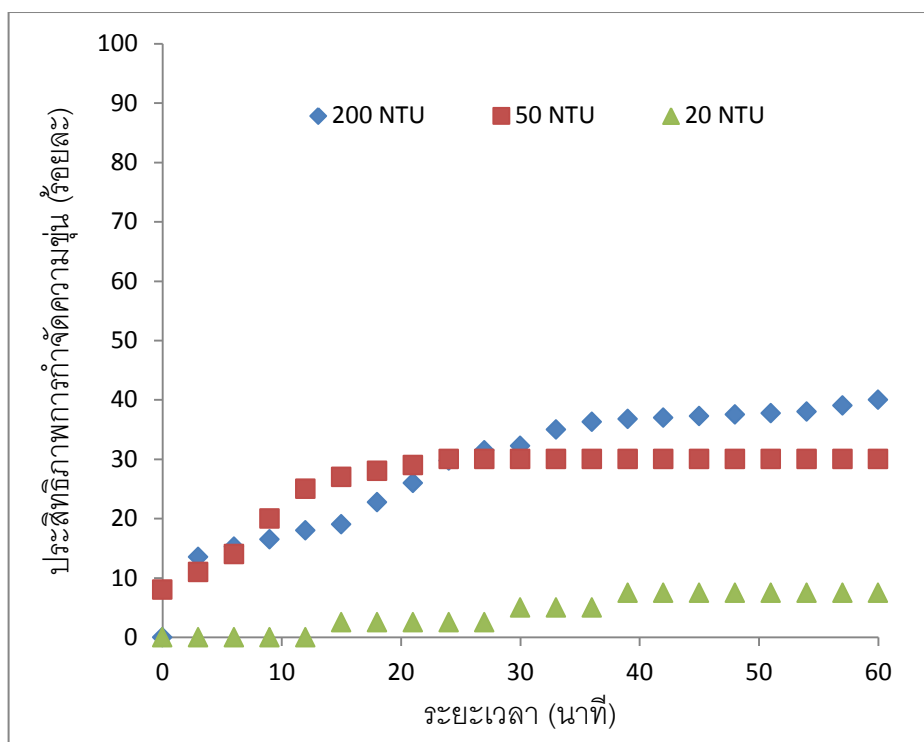
ตารางที่ 4-1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำดิบสังเคราะห์

ลักษณะของน้ำดิบสังเคราะห์	ค่าพารามิเตอร์
ขนาดอนุภาค D_{50} (ไมครอน)	~15
ความขุ่น (เอ็นทียู)	20-200
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	80-804
ค่าพีเอช	7.0-8.5
สภาพต่าง (mg/L as $CaCO_3$)	50-60



ภาพที่ 4-1 ขนาดอนุภาคเบนโทไนท์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle analyzer)

จากตารางที่ 4-1 และภาพที่ 4-1 พบว่า เมื่อทำการวัดขนาดอนุภาคความขุ่นเบนโทไนท์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์อนุภาค (Particle analyzer) อนุภาคเบนโทไนท์จะมีขนาดประมาณ 15 ไมครอน นอกจากนี้เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity sedimentation) โดยทำการทดลองด้วยวิธีการตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling test) ด้วยคอลัมน์ทรงกระบอกซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร ความสูง 2 เมตร โดยเก็บน้ำใสมาวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ความลึก 0.5 และ 1.8 เมตร ทุกๆ 3 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-2 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าประมาณร้อยละ 5 30 และ 32.25 ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ตามลำดับ เมื่อตั้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที กล่าวคือ อนุภาคเบนโทไนท์มีเสถียรภาพในระบบ อีกทั้งศักย์ทางไฟฟ้า (Zeta potential) ของอนุภาคเบนโทไนท์ยังมีค่าเป็นลบ ส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค จึงไม่สามารถตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Lawrence และคณะ, 2005)



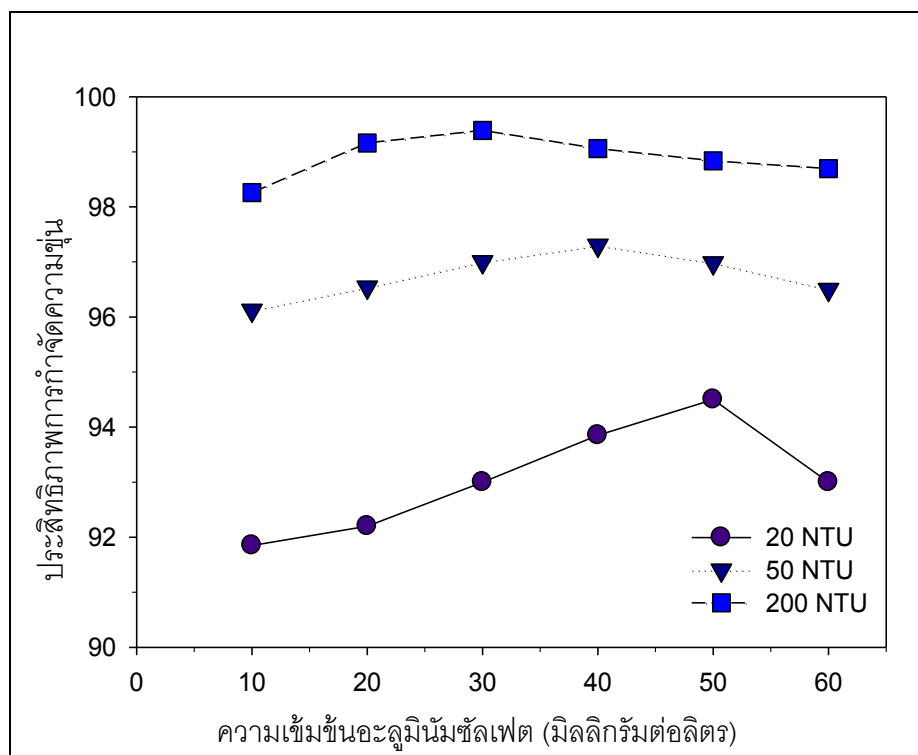
ภาพที่ 4-2 ผลการทดลองตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling) ที่ความขุ่นเริ่มต้นน้ำดิบสังเคราะห์ค่าต่างๆ

ผลการศึกษาในขั้นนี้สรุปได้ว่า น้ำดิบสังเคราะห์สามารถบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพได้ แต่มีประสิทธิผลต่ำ เนื่องจากอนุภาคเบนโทไนท์มีขนาดเล็กและมีประจุลบ ส่งผลให้อนุภาคดังกล่าวยากต่อการแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง จึงมีความจำเป็นในการทำให้อนุภาคเบนโทไนท์มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในขั้นต่อไปจึงทำการศึกษาระบบการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันด้วยวิธีจาร์เทสต์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.1.2 การศึกษาการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

การศึกษาระบบการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันในขั้นนี้ จะใช้อุปกรณ์จาร์เทสต์ (Jar test) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมต่อน้ำดิบสังเคราะห์ โดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต หรือ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ผลการศึกษา

ประสิทธิภาพการบำบัดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความขุ่นเริ่มต้นค่าต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่มีความขุ่นเริ่มต้น

20 50 และ 200 เอ็นทียู ด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟตความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้จาร์เทสต์

จากภาพที่ 4-3 ผลการศึกษาพบว่า การกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน และฟล็อกคูเลชันโดยใช้อุปกรณ์จาร์เทสต์ และอะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารโคแอกกูแลนต์ สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 94.5 97.3 และ 99.39 เมื่อใช้ความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนต์ 50 40 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ตามลำดับ โดยมีพีเอชของน้ำหลังการบำบัดประมาณ 7.0-7.5

นอกจากนี้ยังพบว่า ความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ลดลงเมื่อความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์เพิ่มขึ้น โดยสามารถอธิบายได้ว่า ที่ความขุ่นเริ่มต้นสูงจะมีจำนวนอนุภาคมากกว่า จึงเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคความขุ่นและสารโคแอกกูแลนต์ ส่งผลให้สามารถแยกอนุภาคที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Bratby, 2006)

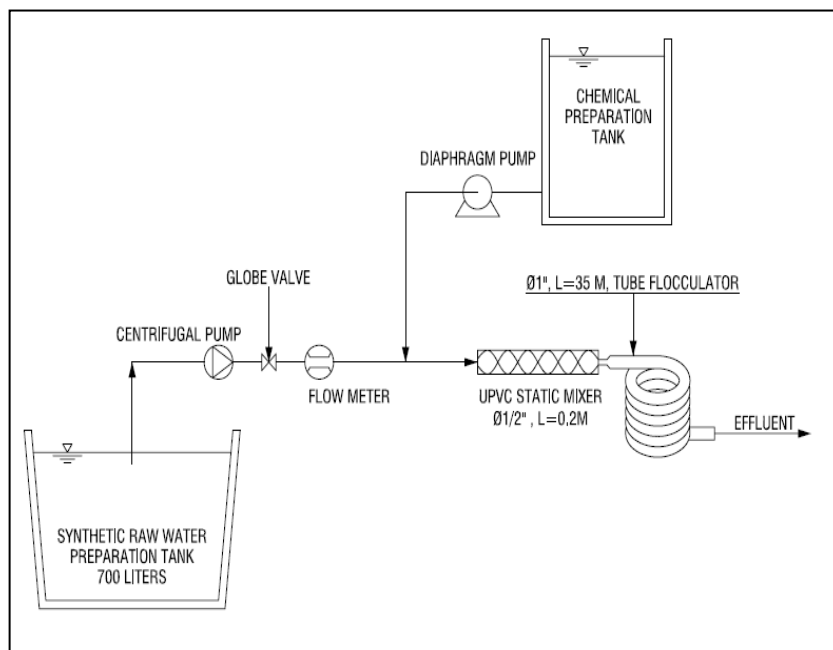
ผลการศึกษานี้สรุปได้ว่า กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันด้วยการใช้ อุปกรณ์จาร์เทสต์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดและปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมต่อน้ำดิบสังเคราะห์ โดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟต หรือ $Al_2(SO_4)_3$ เป็นสารโคแอกกูแลนท์ สามารถใช้ทำลายเสถียรภาพของความขุ่นในน้ำดิบสังเคราะห์ได้ และมีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นร้อยละ 94.5 97.3 และ 99.4 เมื่อใช้ความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนท์ 50 40 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ตามลำดับ โดยมีพีเอชน้ำเสียหลังการบำบัดประมาณ 7.0-7.5 นอกจากนี้ ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมสารโคแอกกูแลนท์ (Aluminum sulfate) ต่อกความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้นว่ามีปริมาณลดลงเมื่อความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในการศึกษาขั้นต่อไปจะเลือกใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ 50 40 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ตามลำดับ เพื่อศึกษาในทุกการทดลองของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันในผลิตน้ำประปาทั่วไป (Conventional water treatment process) ยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ ต้องการพื้นที่ขนาดใหญ่สำหรับถังตกตะกอน อีกทั้งยังต้องการพื้นที่มากในการติดตั้งถังโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน ส่งผลให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสำหรับการก่อสร้างและดำเนินการติดตั้งถึงปฏิบัติการ นอกจากนี้กระบวนการผลิตน้ำประปาทั่วไปดังกล่าวยังต้องการพลังงานไฟฟ้าและระยะเวลาที่สูงในการผลิตน้ำประปา (Ian และคณะ, 2011)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อโดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิกฟล็อกคูเลเตอร์ ตามลำดับ เพื่อกำจัดความขุ่นในการผลิตน้ำประปา โดยผลการศึกษาระบบการดังกล่าวจะแสดงในหัวข้อถัดไป

4.2 การศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes) โดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิกฟล็อกคูเลเตอร์

กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes) เป็นกระบวนการที่ใช้อุปกรณ์ 2 ชนิด ได้แก่ สแตติคมีกเซอร์ และไฮดรอลิกฟล็อกคูเลเตอร์ สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-4 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรวมตะกอนภายในเส้นท่ออย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 4-4 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคคูเลชันภายในเส้นท่อ

นอกจากนี้ กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลอคคูเลชันภายในเส้นท่อยังมีความสำคัญต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริด โดยในงานวิจัยของ Puprasert (2004) ซึ่งทำการศึกษาระบบการไฮบริด โดยใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร น้ำดิบสังเคราะห์จากเบนโทไนท์ และใช้โพลีเมอร์ประจุบวกชนิด EM470 เป็นโคแอกกูแลนต์ งานวิจัยนี้มีแนวคิดให้ถังปฏิกริยาไฮบริดเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟลอคคูเลชัน และการแยกตะกอนออก ภายในถังปฏิกริยาเดียว โดยคาดหวังว่าจะเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันบริเวณผนังไฮโดรไซโคลน กระบวนการฟลอคคูเลชันบริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลน และถูกแยกออกด้วยกลไกของไฮโดรไซโคลนบริเวณตอนบนของถังปฏิกริยา ผลการศึกษพบว่า การทดลองประสบความสำเร็จในแง่การสร้างฟลอคซึ่งมีอากาศแทรกอยู่ภายใน แต่ไม่ประสบความสำเร็จเมื่อเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากความเร็วแรงแรงเฉื่อยภายในไฮโดรไซโคลนสูงเกินไปและระยะเวลาที่ต่ำเกินไป ส่งผลให้ฟลอคที่สร้างขึ้นมีขนาดเล็กมาก จึงไม่สามารถสร้างฟลอคชนิดพิเศษเมื่อเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง ในเวลาต่อมา วรศิริ เสียงสนั่น (2010) ได้ทำการศึกษาพัฒนาถังปฏิกริยาไฮบริดโดยมีแนวคิดในการทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันภายนอกถังปฏิกริยาไฮบริด (Pre-coagulation) ทำการศึกษาโดยใช้สแตติคมิคเซอร์และขดลวด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 35 เมตร เพื่อให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน สแตติคมีกเซอร์และขดลวดดังกล่าวนำมาทดลองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดเสถียรภาพของ คอลลอยด์ในน้ำดิบสังเคราะห์และเพิ่มระยะเวลาพักของฟล็อกที่ผ่านการลดเสถียรภาพมาแล้ว เพื่อเตรียมฟล็อกให้มีขนาดใหญ่ขึ้นกลายเป็นฟล็อกขนาดเล็ก (Microfloc) เพื่อเข้าสู่ถังปฏิกริยา ไฮบริดต่อไป ผลการศึกษาพบว่าทำให้เกิดกระบวนการ Pre-coagulation โดยใช้สแตติคมีกเซอร์และขดลวด ความยาว 35 เมตร ก่อนเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนซึ่ง ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่ คาดหวัง กล่าวคือเกิดการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส เมื่อเดินระบบแบบไหลต่อเนื่อง

กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อในงานวิจัยนี้ คือกระบวนการ โคแอกกูเลชันและเตรียมฟล็อกให้มีขนาดพอเหมาะก่อนเข้าสู่ถังปฏิกริยาไฮบริด (Pre-coagulation) นั่นเอง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาถึงกลไกการทำงานและตัวแปร ต่างๆ ที่อาจส่งผลต่อกระบวนการดังกล่าว เช่น ความเร็วเกรเดียนท์ ระยะเวลาพัก ตัวแปร G.T เป็นต้น โดยใช้สแตติคมีกเซอร์ และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ซึ่งเป็นสายยางพีวีซีใส ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 35 เมตร เช่นเดียวกับขดลวดที่ใช้ในงานวิจัยของ วรศิริ เสียงสนัน (2010)

4.2.1 การศึกษาเปรียบเทียบความเร็วเกรเดียนท์ (G) ระหว่างสแตติคมีกเซอร์ และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ กับการกวนเร็วและกวนช้าโดยใช้อุปกรณ์จาร์เทสต์ ตามลำดับ

ในหัวข้อนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความเร็วเกรเดียนท์ระหว่างสแตติคมีก เซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ กับการกวนเร็วและกวนช้าโดยใช้อุปกรณ์จาร์เทสต์ ตามลำดับ โดยความเร็วเกรเดียนท์สำหรับการกวนเร็วและกวนช้าด้วยจาร์เทสต์ และความเร็วเกรเดียนท์ สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อโดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิค ฟล็อกคูเลเตอร์ สามารถคำนวณดังสมการที่ (4-1) (4-2) (4-3) และ (4-4) ตามลำดับ โดยผลการศึกษา แสดงดังภาพที่ 4-5

ความเร็วเกรเดียนท์สำหรับการกวนเร็วด้วยจาร์เทสต์ สามารถคำนวณดังสมการ

(4-1)

$$G_{\text{rapid}} = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (4-1)$$

เมื่อ	P	คือ กำลังที่ใช้ในการกวนผสม (นิวตันเมตรต่อวินาที)
	μ	คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ (นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร)
	V	คือ ปริมาตรของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร)

ความเร็วเกรเดียนท์สำหรับการกวนช้าด้วยจาร์เทสต์ สามารถคำนวณดังสมการ (4-2)

$$G_{\text{slow}} = \sqrt{\frac{C_D \rho (v_p - v)^3 A_p}{2V\mu}} \quad (4-2)$$

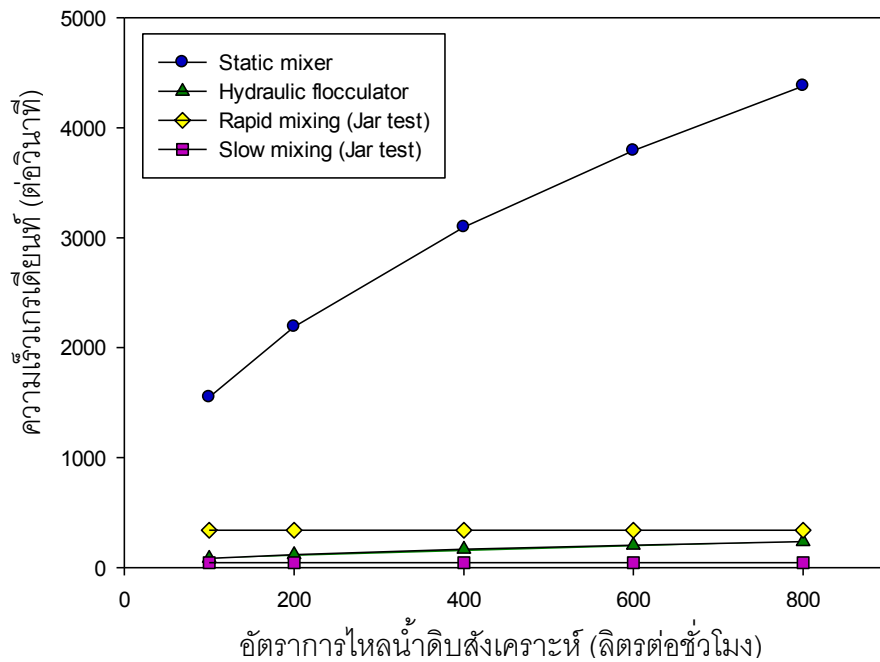
เมื่อ	C_D	คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทาน หรือ Drag coefficient
	ρ	คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	$v_p - v$	คือ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของเหลวและใบพัด (เมตรต่อวินาที)
	A_p	คือ พื้นที่ของใบพัดที่ใช้ในการเคลื่อนที่โดยตรง (ตารางเมตร)
	V	คือ ปริมาตรของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร)
	μ	คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ (นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร)

สำหรับกระบวนการรวมตะกอนภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes) ความเร็วเกรเดียนท์ภายในสแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ สามารถคำนวณดังสมการ (4-3)

$$G_{\text{Static,Hydraulic}} = \sqrt{\frac{\gamma h_L}{T\mu}} \quad (4-3)$$

เมื่อ	γ	คือ ความตึงจำเพาะของน้ำ
	h_L	คือ แรงดันสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในสแตติคมีกเซอร์หรือไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ (เมตร)

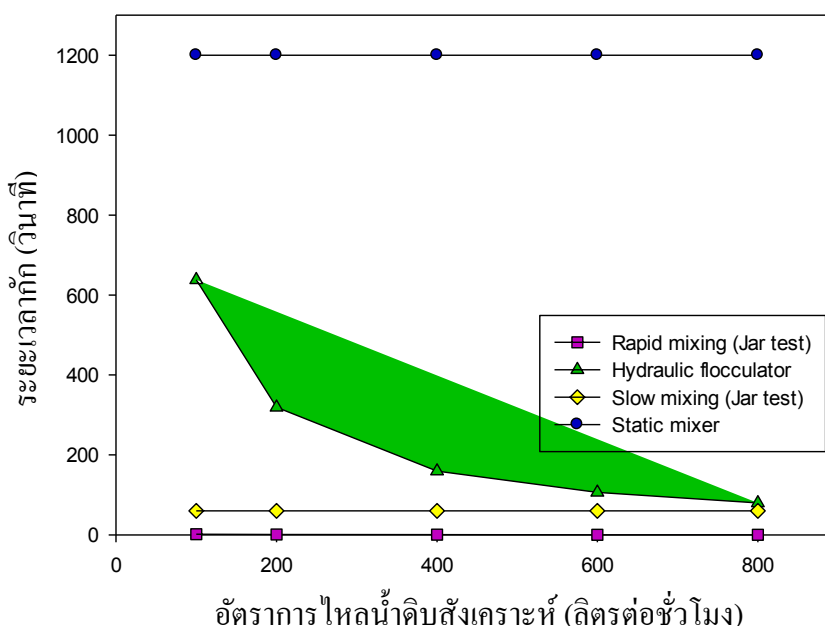
- T คือ ระยะเวลาพัก (วินาที)
 μ คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ (นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร)



ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเกรเดียนท์และอัตราการไหลน้ำดิบส่งเคราะห์
 เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ กับจาร์เทสต์

จากภาพที่ 4-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเกรเดียนท์และอัตราการไหลของน้ำดิบส่งเคราะห์ เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อกับการกวนเร็วและกวนช้าด้วยจาร์เทสต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความเร็วเกรเดียนท์ระหว่างสแตติคมิกเซอร์และการกวนเร็วด้วยจาร์เทสต์ ผลการศึกษาพบว่า อัตราการไหลน้ำดิบส่งเคราะห์ 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง ส่งผลให้ความเร็วเกรเดียนท์ภายในสแตติคมิกเซอร์เป็น 1,548.47 2,189.87 3,096.94 3,792.96 และ 4,379.73 ต่อวินาที ตามลำดับ กล่าวคืออัตราการไหลน้ำดิบส่งเคราะห์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความเร็วเกรเดียนท์ภายในสแตติคมิกเซอร์มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่การกวนเร็วด้วยจาร์เทสต์ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ความเร็วเกรเดียนท์จะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่เท่ากับ 340 ต่อวินาที นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความเร็วเกรเดียนท์ระหว่างไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์และการกวนช้าด้วยจาร์เทสต์ ผลการศึกษาพบว่า อัตราการไหลน้ำดิบส่งเคราะห์ 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง ส่งผลให้ความเร็วเกรเดียนท์มีค่า

83.35 117.88 166.70 204.16 และ 235.76 ต่อวินาที ตามลำดับ ในขณะที่การกวนช้าด้วย จาร์เทสต์ที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที ความเร็วเกรเดียนท์จะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่เท่ากับ 45 ต่อวินาที



ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาพักและอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ กับจาร์เทสต์

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาระยะเวลาพัก (T) (คำนวณดังสมการ (4-4)) เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยการกวนเร็วและกวนช้าด้วยจาร์เทสต์ กับการเกิดกระบวนการดังกล่าวภายในเส้นท่อโดยใช้สแตติคมิคเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4-6 ผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาพักภายในสแตติคมิคเซอร์เป็น 1.64 0.82 0.41 0.27 และ 0.21 วินาที และระยะเวลาพักภายในไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์เป็น 638.13 319.06 159.53 106.37 และ 79.77 วินาที เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์เป็น 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ กล่าวคือ อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาพักภายในเส้นท่อดำลง ในขณะที่การกวนเร็วและกวนช้าด้วยจาร์เทสต์จะควบคุมระยะเวลาพักให้มีค่าคงที่เท่ากับ 1 และ 20 นาที ตามลำดับ

$$T = \frac{Q}{V} \quad (4-4)$$

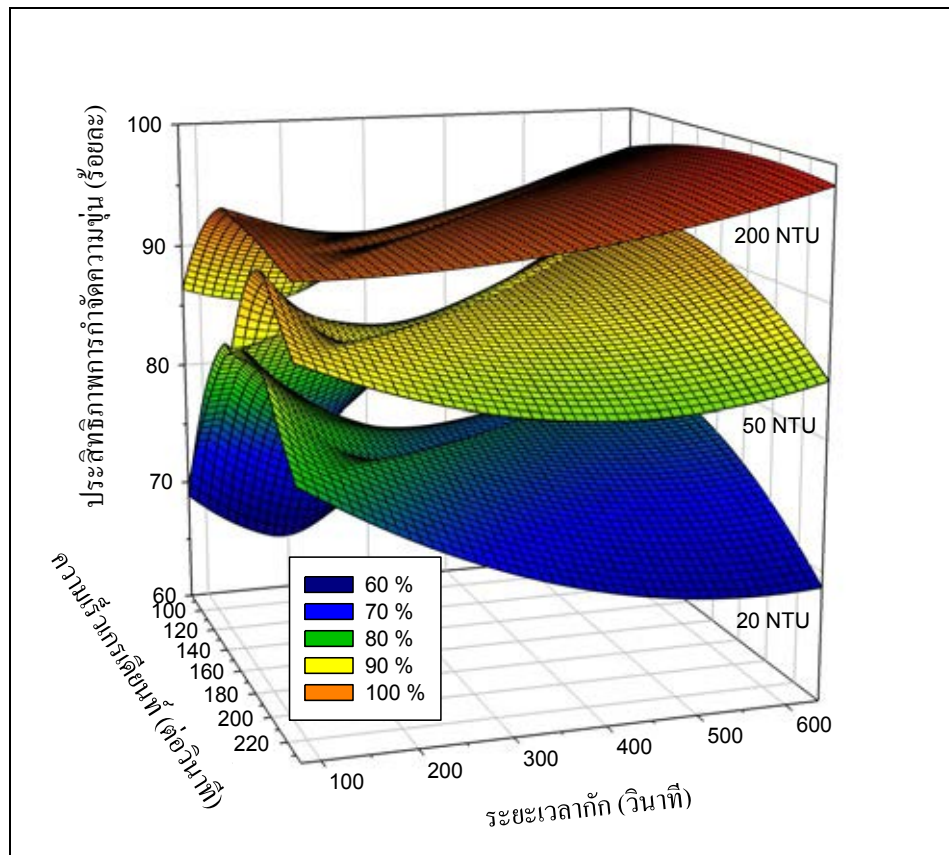
เมื่อ	T	คือ ระยะเวลาพัก (วินาที)
	Q	คือ อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (ลิตรต่อชั่วโมง)
	V	คือ ปริมาตรของภาชนะหรือเส้นท่อ (ลูกบาศก์เมตร)

จากผลการศึกษารูปได้ว่า ความเร็วเกรเดียนท์ภายในสแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์มีค่าสูงกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วเกรเดียนท์ในการกวนเร็วและกวนช้าด้วยจาร์เทสต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่สูงขึ้น ยังส่งผลให้ระบบมีระยะเวลากักลดลง ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นด้วย ดังนั้นในขั้นต่อไปจึงทำการศึกษาผลของความเร็วเกรเดียนท์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

4.2.2 การศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลากัก (T) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes) เป็นกระบวนการที่ใช้กลไกการทำลายเสถียรภาพและรวมตะกอน โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการดังกล่าวซึ่งจะส่งผลให้ตะกอนสามารถแยกออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ ความเร็วเกรเดียนท์ ระยะเวลาพัก ความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น เป็นต้น ในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจากน้ำดิบสังเคราะห์

ทั้งนี้ เนื่องจากกระบวนการฟล็อกคูเลชันเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการรวมตะกอนที่ผ่านการลดเสถียรภาพมาแล้วจากกระบวนการโคแอกกูเลชันให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกตะกอนดังกล่าวออกจากน้ำ ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ที่เกิดจากกระบวนการฟล็อกคูเลชันภายในไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4-7



ภาพที่ 4-7 ผลของความเร็วกระแสน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจากน้ำดิบสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ภาพที่ 4-7 แสดงผลของความเร็วกระแสน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจากน้ำดิบสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ เมื่อเดินระบบโดยใช้ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ 20 50 และ 200 เอ็นทียู และอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์เป็น 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งส่งผลให้ความเร็วกระแสน้ำภายในไฮดรอลิกฟล็อกคูเลเตอร์มีค่าเป็น 83.35 117.88 166.70 204.16 และ 235.76 ต่อวินาที ระยะเวลาตกมีค่าเป็น 638.13 319.06 159.53 106.37 และ 79.77 วินาที ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำน้ำที่ผ่านการบำบัดมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร สูง 2 เมตร แล้วเก็บส่วนที่เป็นน้ำใสออกมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 91.12 83.67 87.34 90.23 และ 88.30 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 200 400 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ทั้งนี้จะพิจารณาอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์เป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. ช่วงอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ต่ำกว่า 200 ลิตรต่อชั่วโมง (100 ลิตรต่อชั่วโมง)
2. อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ตั้งแต่ 200 ถึง 600 ลิตรต่อชั่วโมง
3. อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์สูงกว่า 600 ลิตรต่อชั่วโมง (800 ลิตรต่อชั่วโมง)

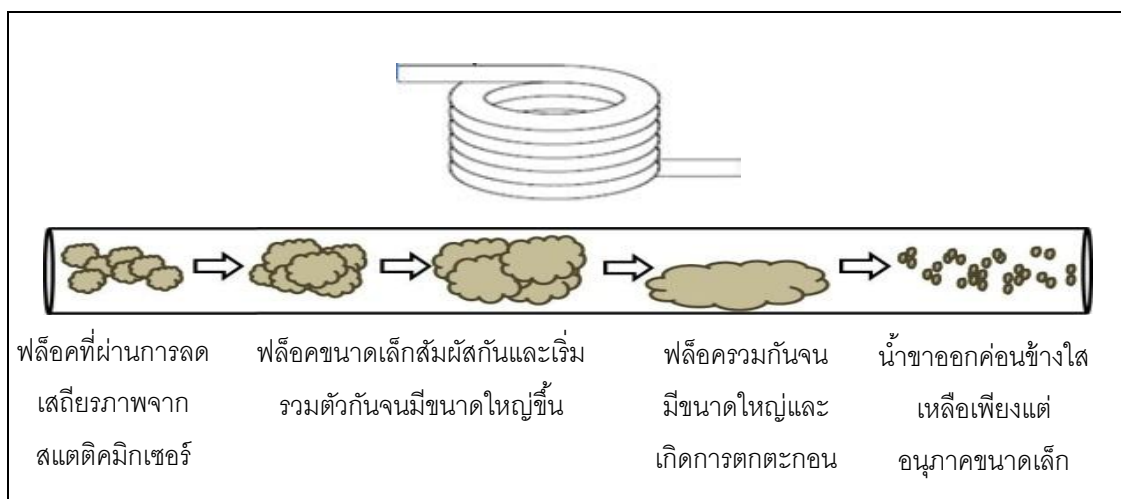
4.2.2.1 อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ต่ำกว่า 200 ลิตรต่อชั่วโมง

ในการทดลองนี้จะศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยทำการเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง จากภาพที่ 4-7 พบว่าที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ดังกล่าว มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 77.4 91.12 และ 96.67 ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 50 และ 200 NTU ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นกับอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ทั้งหมดตั้งแต่ 100 ถึง 800 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุด

อย่างไรก็ตาม จากภาพที่ 4-8 เมื่อสังเกตภายในไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ซึ่งเป็นสายยางพีวีซีใส พบว่ามีตะกอนบางส่วนตกตะกอนอยู่ภายในเส้นท่อ ทั้งนี้สามารถตั้งสมมติฐานถึงสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ว่า ที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง จะส่งผลให้ความเร็วของของเหลวภายในเส้นท่อมักมีค่า 0.05 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วที่ต่ำเกินไปในการไหลภายในเส้นท่ออย่างมีประสิทธิภาพ จึงส่งผลให้มีตะกอนบางส่วนตกตะกอน (Shun, 2007) ดังภาพที่ 4-9 ซึ่งเป็นภาพจำลองการเกิดการตกตะกอนภายในเส้นท่อ ดังนั้นการเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง จึงอาจไม่เหมาะสมต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (Kreith และคณะ, 1999)



ภาพที่ 4-8 การตกตะกอนภายในไฮดรอลิคฟลิวคูลเตอร์ซึ่งเป็นสายยางพีวีซีใส ที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง หรือความเร็วเกรเดียนท์ 83.35 ต่อวินาที



ภาพที่ 4-9 ภาพจำลองการเกิดการตกตะกอนภายในไฮดรอลิคฟลิวคูลเตอร์ ที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง หรือความเร็วเกรเดียนท์ 83.35 ต่อวินาที

4.2.2.2 อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ตั้งแต่ 200 ถึง 600 ลิตรต่อชั่วโมง

ในการทดลองนี้จะศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยทำการเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ตั้งแต่ 200 ถึง 600 ลิตรต่อชั่วโมง จากภาพที่ 4-7 ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 83.67 87.34 และ 90.23 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 200 400 และ 600 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ที่ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู กล่าวคือเมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์สูงขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงขึ้นด้วย และพบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 90.23 ที่อัตราการไหล 600 ลิตรต่อชั่วโมง หรือความเร็วกระเดียนท์ 204.16 ต่อวินาที ซึ่งมีระยะเวลาที่ 204.16 วินาที ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มความเร็วกระเดียนท์ภายในเส้นท่อ จะส่งผลให้อนุภาคที่ผ่านการลดเสถียรภาพจากกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สแตติคคิมิเคอรัล มีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น รวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Hopkins และ Ducoste, 2003)

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจากน้ำดิบสังเคราะห์ โดยเปรียบเทียบความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 ลิตรต่อชั่วโมง หรือความเร็วกระเดียนท์ 204.16 ต่อวินาที ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเป็นร้อยละ 82.31 90.23 และ 94.25 ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ตามลำดับ กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความขุ่นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างอนุภาค อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอัตราการชนกันระหว่างอนุภาคอีกด้วย (Lin และคณะ, 2008)

4.2.2.3 อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์สูงกว่า 600 ลิตรต่อชั่วโมง

ในการทดลองนี้จะศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยทำการเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 ลิตรต่อชั่วโมง จากภาพที่ 4-7 เมื่อเพิ่มอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์เป็น 800 ลิตรต่อชั่วโมง หรือความเร็วกระเดียนท์ 235.76 ต่อวินาที ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 ลิตรต่อชั่วโมง ทั้งนี้ ผลการทดลองดังกล่าวสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าอาจเกิดจากการที่ระบบมีความเร็วกระเดียนท์สูงเกินไป จึงส่งผลให้ตะกอนแตกออกจากกัน (Floc breakage)

จากผลการศึกษาข้างต้นสรุปได้ว่า เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 ถึง 800 ลิตรต่อชั่วโมง (ความเร็วเกรเดียนท์ 83.35 ถึง 235.76 ต่อวินาที) และความขุ่นเริ่มต้นน้ำดิบสังเคราะห์ 20 ถึง 200 เอ็นทียู กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดที่อัตราการไหล 100 ลิตรต่อชั่วโมง แต่กลับพบว่าที่อัตราการไหลดังกล่าวมีการตกตะกอนภายในเส้นท่อ ดังนั้น อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง หรือความเร็วเกรเดียนท์ 83.35 ต่อวินาที จึงไม่เหมาะสมต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

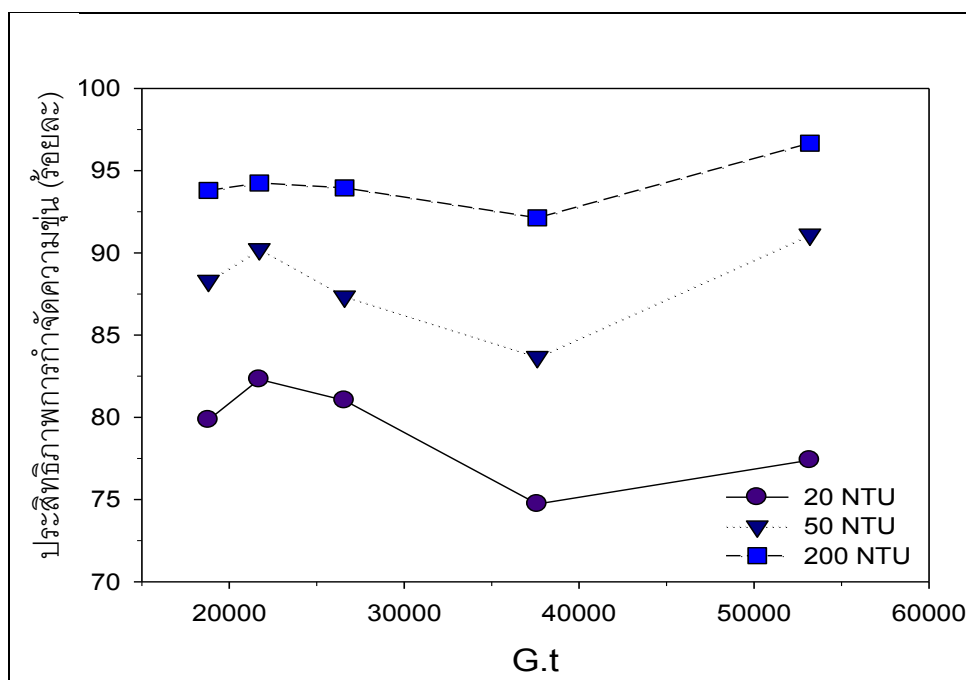
เมื่ออัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 800 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์หรือความเร็วเกรเดียนท์เพิ่มขึ้นและความขุ่นเริ่มต้นน้ำดิบสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 ลิตรต่อชั่วโมง หรือความเร็วเกรเดียนท์ 204.16 ต่อวินาที (ระยะเวลาพัก 106.37 วินาที) จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดเป็นร้อยละ 82.31 90.23 และ 94.25 ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ตามลำดับ

ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าค่าความเร็วเกรเดียนท์และระยะเวลาก็กมีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ เมื่อระบบมีค่าความความเร็วเกรเดียนท์ต่ำเกินไปจะทำให้มีความต้องการระยะเวลาพักสูงขึ้น หรือเมื่อระบบมีค่าความปั่นป่วนสูงเกินไปก็อาจมีผลให้ต้องการระยะเวลาก็กต่ำลง นอกจากนี้ การใช้ไฮดรอลิกฟล็อกคูเลเตอร์ซึ่งมีความยาว 35 เมตร ยังก่อให้เกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชันแบบลำดับขั้น (Taper flocculation) ซึ่งมีความสำคัญต่อการเกิดฟล็อกภายในเส้นท่อ กล่าวคือ ความเร็วเกรเดียนท์ที่เกิดจากอัตราการไหลของของเหลวภายในเส้นท่อจะลดลงตามความยาวท่อ โดยความเร็วเกรเดียนท์ที่ค่อยๆ ลดลง จะส่งผลให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นภายในเส้นท่อ มีขนาดใหญ่ขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันเนื่องจากสามารถช่วยลดการแตกออกของฟล็อกได้ (Svarovsky, 2000; Patrick และคณะ, 1998)

ดังนั้น ในหัวข้อถัดไปจึงศึกษาผลกระทบของตัวแปรค่าความเร็วเกรเดียนท์และระยะเวลาก็กมีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ในลักษณะความสัมพันธ์ของค่า G.T หรือ Camp number (Svarovsky, 2000) ซึ่งเป็นปัจจัยในการออกแบบและควบคุมให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่ออย่างมีประสิทธิภาพ

4.2.3 การศึกษาผลกระทบของตัวแปร G.T ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ดังที่กล่าวในข้างต้น ตัวแปร G และ T มีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผกผันกัน แต่ด้วยช่วงจำกัดของค่า G ที่เหมาะสมในแต่ละกระบวนการ ค่า T จึงมีช่วงความเหมาะสมอยู่ช่วงหนึ่งๆ ตามชนิดของกระบวนการ เช่น ในกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันค่า G.T ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 10^4 ถึง 10^5 (Svarovsky, 2000) และเนื่องจากค่า G และ T ของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อมีค่า G สูงกว่า และ T ต่ำกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันฟล็อกคูเลชันโดยทั่วไป (จารุเทสท์) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลกระทบของตัวแปร G.T ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยผลการศึกษาค่า G.T ของกระบวนการโคแอกกูเลชันฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ จะพิจารณาตัวแปร G.T ที่เกิดขึ้นภายในไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์เท่านั้น เนื่องจากเป็นส่วนที่จะส่งผลต่อการสร้างและรวมตะกอน ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-10



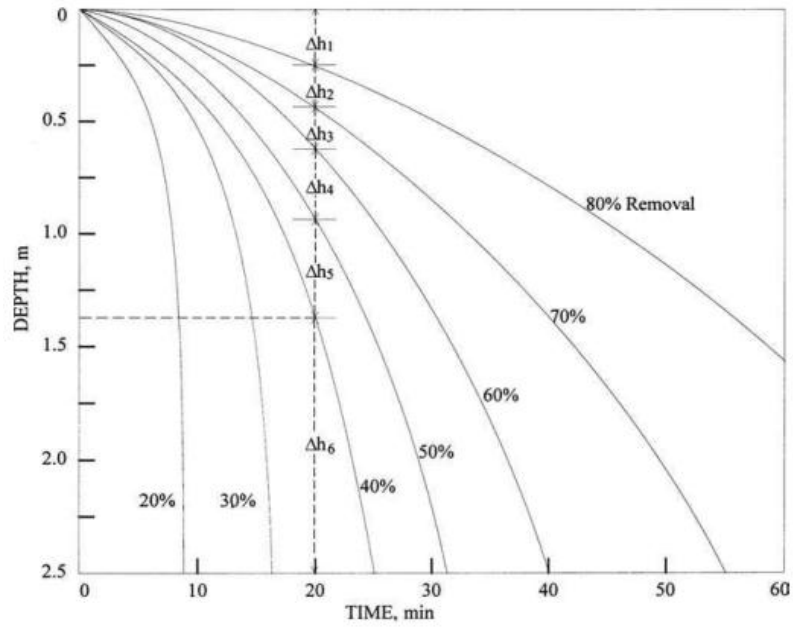
ภาพที่ 4-10 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ค่าตัวแปร G.T และความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น ค่าต่างๆ

จากภาพที่ 4-10 เมื่อพิจารณาอัตราการไหลในช่วง 200 ถึง 800 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ ค่า G.T 37,610 ถึง 18,805 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

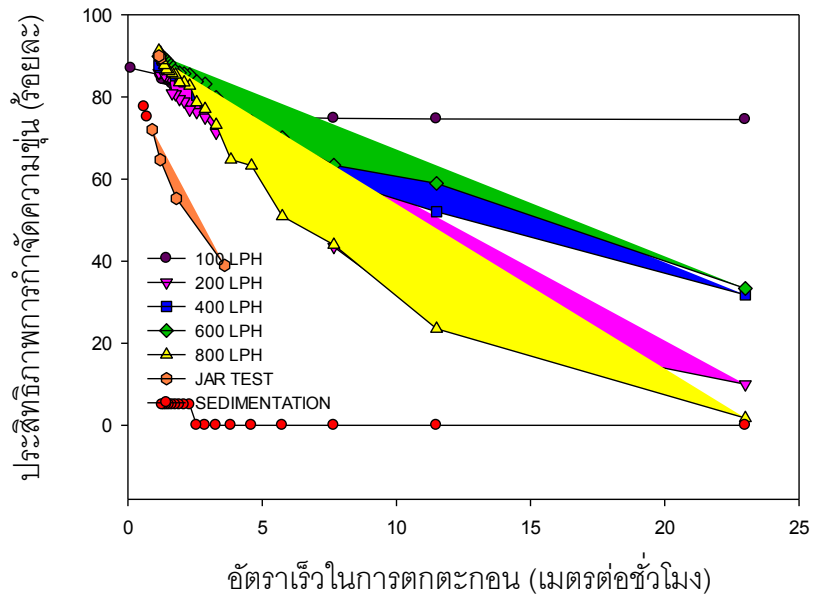
แปรผกผันกับค่า G.T และมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดเมื่อเดินระบบด้วยค่า G.T เท่ากับ 21,715 แต่เมื่อเดินระบบด้วยค่า G.T ที่มีค่าต่ำกว่า 21,715 จะพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นแปรผันตามค่า G.T ผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่ากลไกการทำลายเสถียรภาพและรวมตะกอนที่เหมาะสมในกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อที่มีความสัมพันธ์กับค่า G.T ที่เหมาะสม หรืออาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดขึ้นอยู่กับค่า G.T ซึ่งงานวิจัยนี้พบว่าค่า G.T ที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อคือ 21,715 และเมื่อเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยทั่วไป (Conventional process) คือ 10^4 ถึง 10^5 พบว่าค่า G.T จากกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ มีค่าอยู่ในช่วงดังกล่าว ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ มีความต้องการระยะเวลาที่น้อยกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยทั่วไป อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ เนื่องจากกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อต้องการพื้นที่น้อยและใช้พลังงานการไหลของน้ำเท่านั้นในการกวนผสม เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยทั่วไปซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าโดยใช้ใบพัดในการกวนผสม

4.2.4 การศึกษากระบวนการตกตะกอนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes)

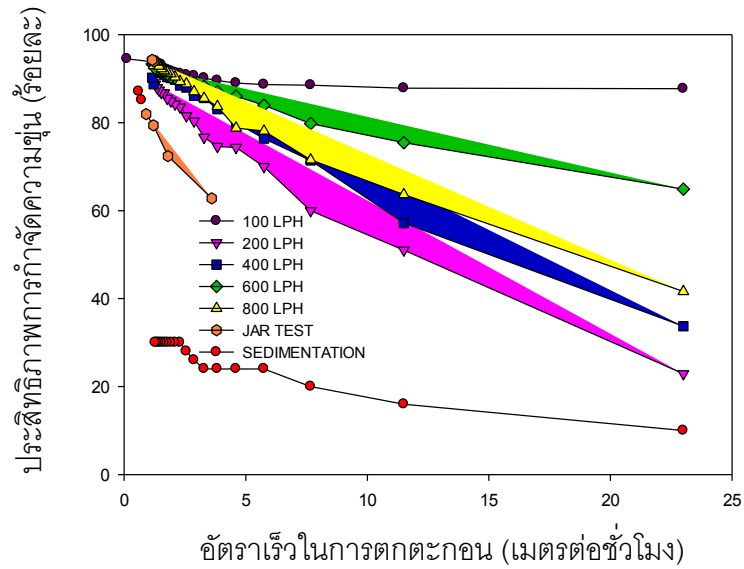
การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบถังตกตะกอนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยตัวแปรซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบถังตกตะกอน คือ อัตราน้ำล้นผิว (Overflow rate, OFR) และระยะเวลาที่กัก (Retention time, T) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำโดยเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ มาทดสอบการตกตะกอนด้วยคอลัมน์ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร สูง 2 เมตร โดยเก็บน้ำตัวอย่างที่มีความลึก 0.5 และ 1.8 เมตร ทุกๆ 3 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อพิจารณาอัตราน้ำล้นผิวที่เหมาะสมสำหรับทุกสภาวะ โดยผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-11



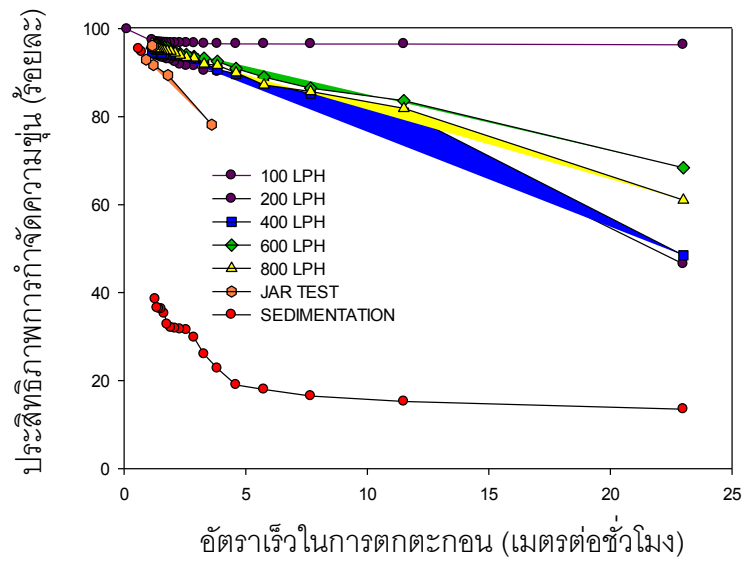
(ก) หลักการตกตะกอนแบบกลุ่ม (Flocculent settling)



(ข) ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 เอ็นทียู



(ค) ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เอ็นทียู



(ง) ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 200 เอ็นทียู

ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราเร็วในการตกตะกอน ที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ค่าต่างๆ และจาร์เทสต์ ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้นค่าต่างๆ

จากภาพที่ 4-11 (ก) แสดงหลักการของการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) ซึ่งเป็นลักษณะการตกตะกอนของฟล็อกสารส้มในกระบวนการผลิตน้ำประปา อนุภาคจะ

มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเกิดขึ้นในระหว่างการตกตะกอนที่ความลึกของถังตกตะกอนและระยะเวลาที่แตกต่างกัน โดยฟล็อกที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น มีน้ำหนักมากขึ้น และตกตะกอนอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ความเร็วในการตกตะกอน จะขึ้นอยู่กับขนาดของฟล็อกเป็นสำคัญ ดังนั้นความลึกของถังตกตะกอนและระยะเวลาที่จำเป็นตัวแปรสำคัญต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและการออกแบบถังตกตะกอน (มันสิน ตัณฑุเวศน์, 2542)

จากภาพที่ 4-11 (ข) (ค) (ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและอัตราน้ำล้นผิว (Overflow rate) โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes) การตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Sedimentation) และจาร์เทสต์ ที่ความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ เริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อซึ่งเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (100 200 400 600 800 ลิตรต่อชั่วโมง) มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันด้วยวิธีจาร์เทสต์ และการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง ที่ทุกค่าความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น

นอกจากนี้ จากภาพที่ 4-11 (ข) (ค) (ง) ยังสามารถพิจารณาค่าอัตราน้ำล้นผิว (OFR) ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราเร็วในการตกตะกอน เมื่อเปรียบเทียบที่ความลึกของจุดเก็บน้ำตัวอย่าง และระยะเวลาเดียวกัน โดยจากการศึกษาพบว่าที่อัตราน้ำล้นผิว 1.64 ถึง 7.67 เมตรต่อชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนคิดเป็นร้อยละ 60 ถึง 96 เมื่อทำการเดินระบบที่ทุกค่าความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบสังเคราะห์ ซึ่งค่าอัตราน้ำล้นผิวดังกล่าวมีค่าสูงกว่าที่ Kawamura แนะนำ (Kawamura, 2000)

จากผลการศึกษาจะได้ว่า ค่าอัตราน้ำล้นผิว (OFR) ที่เหมาะสมต่อการแยกตะกอนออกหลังจากผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ และให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนคิดเป็นร้อยละ 60 ถึง 90 สำหรับความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ค่าอัตราน้ำล้นผิวที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลื้อคคูเลชันภายในเส้นท่อ ที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นร้อยละ 60 ถึง 90

ความขุ่นน้ำดิบส่งเคราะห์เริ่มต้น (เอ็นทียู)	อัตราน้ำล้นผิว (เมตรต่อชั่วโมง)
20	5-1.15
50	7.6-1.15
200	18-4

ในการศึกษาขั้นต่อไป จะนำผลการศึกษาที่ได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) เพื่อใช้ในการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลื้อคคูเลชันภายในเส้นท่อ อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการควบคุมและออกแบบถังปฏิกริยาไฮบริดให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

4.2.5 การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลื้อคคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยใช้สแตติคิมิกเซอร์และไฮดรอลิคฟลื้อคคูเลเตอร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือโมเดล (Model) คือ สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัด ในขั้นนี้ จะทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์มิติ (Dimension analysis) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของของไหลด้วยการวิเคราะห์ถึงตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้อง และจัดให้เกิดเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติเพื่อใช้กำหนดคุณลักษณะของการไหล โดยในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์กลุ่มตัวแปรไร้มิติด้วยวิธีตามทฤษฎีบัคกิงแฮมไพ (Buckingham Pi Theorem) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัด อีกทั้งยังทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองและประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าวอีกด้วย

จากทฤษฎีบัคกิงแฮมไพ (Buckingham Pi Theorem) ซึ่งกล่าวถึงจำนวนของตัวแปรไร้มิติอิสระซึ่งใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชุดตัวแปรต่างๆ ที่ปรากฏในรูปแบบการไหลหรือปรากฏการณ์ใดๆ โดยกลุ่มตัวแปรอิสระไร้มิติ หรือ π สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4-6)

$$\pi = n - m \quad (4-5)$$

เมื่อ	Π	คือ จำนวนตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless group)
	n	คือ จำนวนตัวแปรที่เกี่ยวข้อง
	m	คือ จำนวนมิติปฐมภูมิ

กลุ่มตัวแปรอิสระไร้มิติเรียกว่า π ซึ่งเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (4-6)$$

หรือ
$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) \quad (4-7)$$

เมื่อพิจารณาจากการทดลอง พบว่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องมีทั้งหมด 7 ตัว ได้แก่ ความเข้มข้นของสารแขวนลอยเริ่มต้น (C_{ss}) ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w) อัตราเร็วของของไหล (v) เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D) ความหนืดของน้ำ (μ) ความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาพัก (T) โดยเลือกใช้มิติปฐมภูมิซึ่งมี 3 จำนวน ได้แก่ M L และ T โดยมิติของของตัวแปรสามารถแจกแจงได้ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 การแจกแจงมิติของตัวแปรต่างๆ

ตัวแปร	มิติ
ความเข้มข้นของสารแขวนลอยเริ่มต้น (C_{ss})	M/L^3
ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w)	M/L^3
อัตราเร็วของของไหล (v)	L/t
เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D)	L
ความหนืดของน้ำ (μ)	$M/L \cdot t$
ความเร็วเกรเดียนท์ (G)	$1/t$
ระยะเวลาพัก (T)	t

เมื่อทำการวิเคราะห์จากสมการที่ (4-6) พบว่า การทดลองนี้มีจำนวนตัวแปรไร้มิติ 4 ตัวแปร ได้แก่ π_1 π_2 π_3 และ π_4 ดังสมการที่ (4-9) (4-10) (4-11) (4-12) (4-13)

$$f(\%Removal, C_{SS}, \rho_w, v, D, \mu, G, T) = 0 \quad (4-8)$$

$$\pi_1 = \%Re = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4) \quad (4-9)$$

$$\pi_2 = \frac{C_{SS}}{\rho_w} \quad (4-10)$$

$$\pi_3 = \frac{\rho_w v D}{\mu} = Reynold \ number \quad (4-11)$$

$$\pi_4 = GT = Camp \ number \quad (4-12)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (4-10) จะสามารถสร้างความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติได้ ดังสมการที่ (4-14)

$$\%Re = A \left(\frac{C_{SS}}{\rho_w} \right)^a (Reynold)^b (GT)^c \quad (4-13)$$

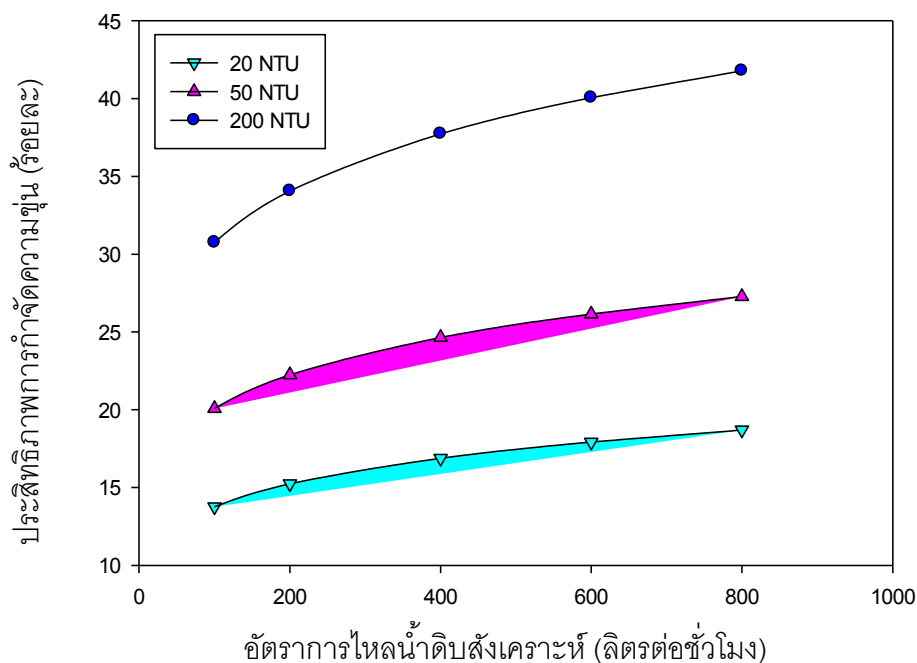
เมื่อ A a b และ c คือ ค่าคงที่สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

จากสมการที่ (4-14) เมื่อนำประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจริงที่ได้จากการทดลอง (Experimental efficiency) ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยเริ่มต้น (C_{SS}) ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w) ค่าคงที่เรย์โนลด์ (Reynold) ความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาพัก (T) มาแทนค่า จะสามารถแก้สมการหาค่าคงที่ A a b และ c ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่าคงที่ A a b และ c มีค่าเป็น 0.105755 0.365399 0.149642 และ 0.004286 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อได้ดังสมการ (4-15) ทั้งนี้ รายการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก-9

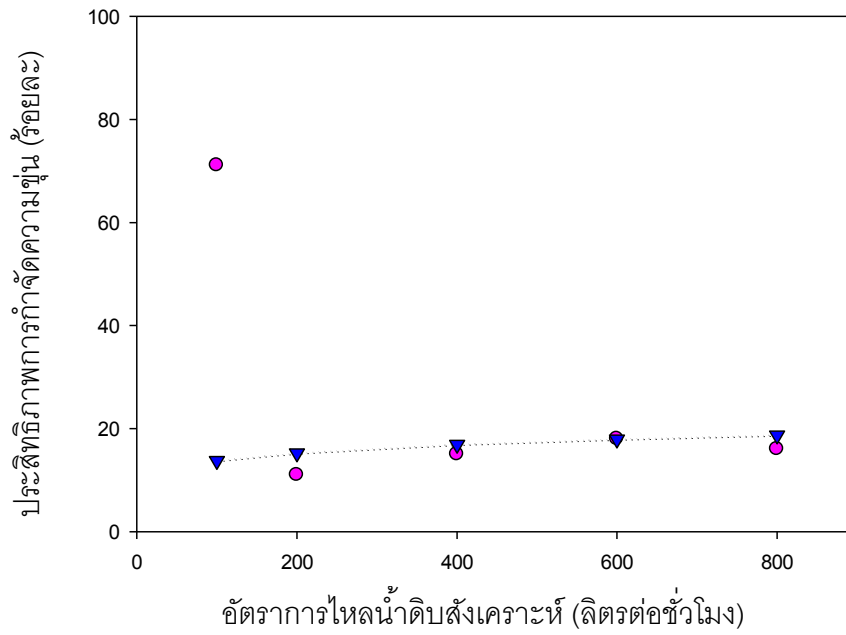
$$\%Re = 0.105755 \left(\frac{C_{SS}}{\rho_w} \right)^{0.365399} (Reynold)^{0.149642} (GT)^{0.004286} \quad (4-14)$$

เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น ดังสมการที่ (4-14) ผลการศึกษาพบว่า ค่าคงที่ $a > b > c$ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ได้จากการทำนาย ดังนั้นจากแบบจำลองจึงอาจกล่าวได้ว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมากที่สุดคือ ปริมาณสารแขวนลอยเริ่มต้น รองลงมาคือค่าคงที่เรย์โนลด์์ และสุดท้ายคือตัวแปร G.T ซึ่งตัวแปรนี้อาจไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น เนื่องจากค่าคงที่ c มีค่าต่ำมากและเข้าใกล้ศูนย์

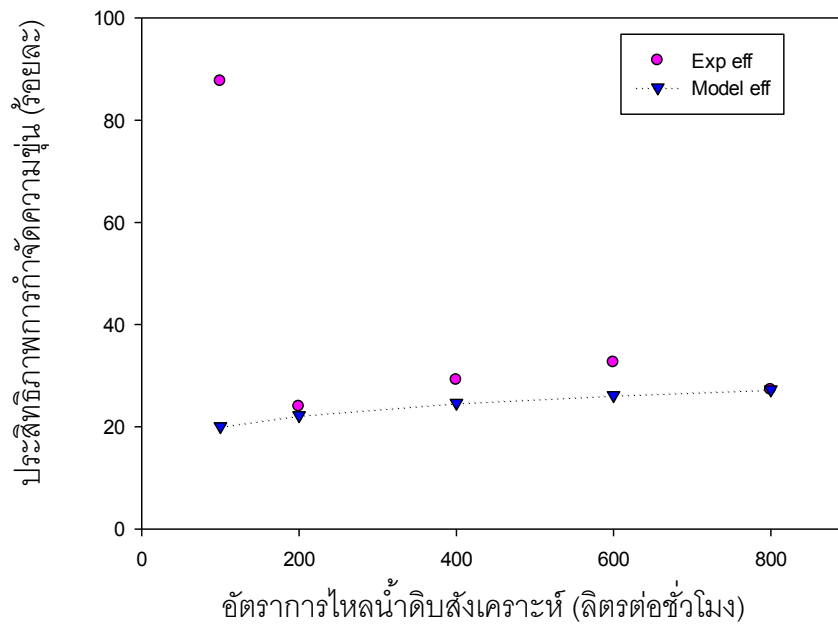
อีกทั้งจากภาพที่ 4-12 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model efficiency) ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์และอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ค่าต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายจะแปรผันตามอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่สูงขึ้น กล่าวคืออัตราการไหลของน้ำดิบที่สูงขึ้น ทำให้ค่าความเร็วเกรเดียนท์และค่าคงที่เรย์โนลด์์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ ผลการศึกษาแบบจำลองดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นแปรผันตามความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยเริ่มต้นหรือความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้นอีกด้วย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายมีค่าสูงขึ้น



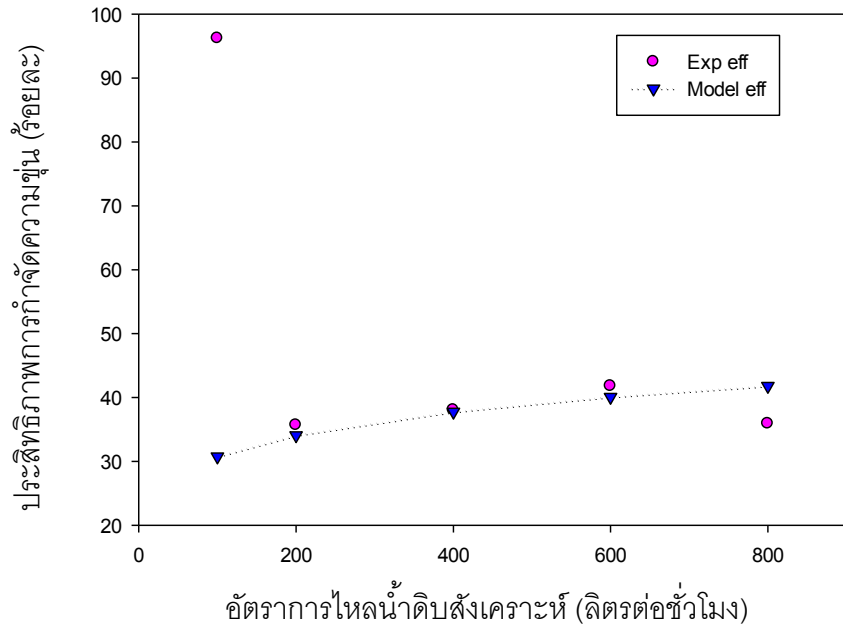
ภาพที่ 4-12 ประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model efficiency) ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์และอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ค่าต่างๆ



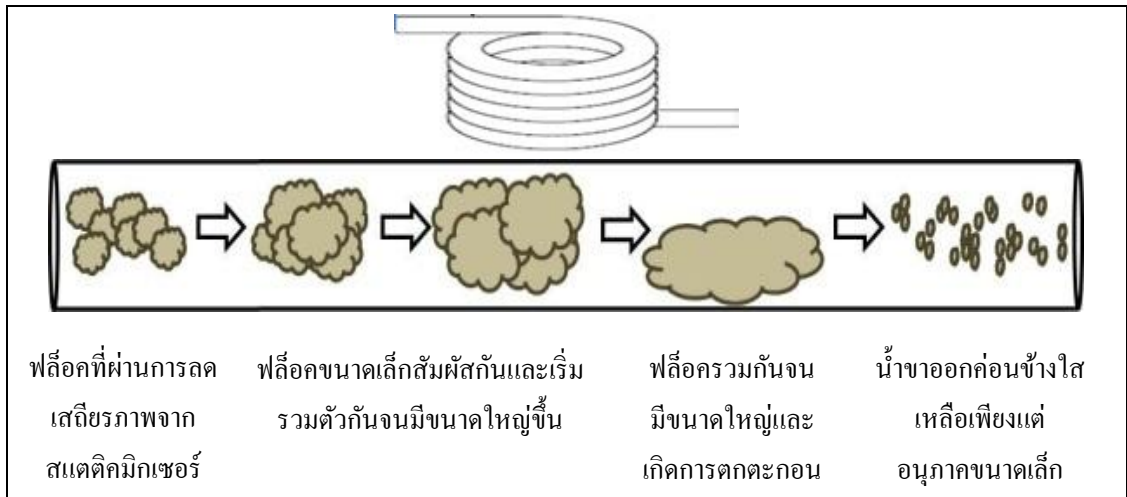
(ก) ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 20 เซ็นติเมตร



(ข) ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เซ็นติเมตร



(ค) ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 200 เอ็นพียู

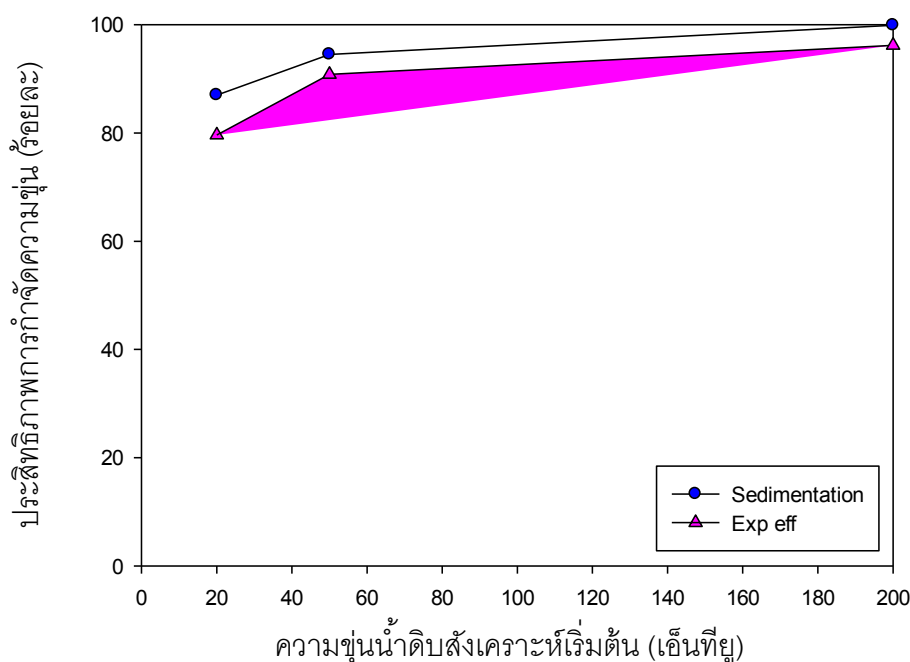


(จ) ภาพจำลองการตกตะกอนภายในเส้นท่อ (จากสมมติฐาน) เมื่อคลี่สายยางออกมา
 ภาพที่ 4-13 เปรียบเทียบผลการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยแบบจำลองทาง
 คณิตศาสตร์กับประสิทธิภาพจริงที่ได้จากการทดลอง เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบ
 สังเคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้นค่าต่างๆ

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายประสิทธิภาพด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับประสิทธิภาพจริงที่ได้จากการทดลอง ดังภาพที่ 4-13 พบว่ามีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์อยู่ในช่วง 200 ถึง 600 ลิตรต่อชั่วโมง ในทุกค่าความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น (มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 20) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรภายในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสัมพันธ์กัน จึงส่งผลให้สามารถทำนายประสิทธิภาพการกำจัดได้ใกล้เคียงประสิทธิภาพที่ได้จากผลการทดลองจริง

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวยังมีข้อจำกัดบางประการในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด (%Re) และตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล ทำให้ผลที่ได้จากการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง มีแนวโน้มที่แตกต่างจากผลที่ได้จากการทดลองจริง โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพจริงที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายมาก โดยจากหัวข้อที่ 4.2.2 ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานไว้เบื้องต้นว่าอาจมีสาเหตุมาจากการที่ของเหลวภายในไฮดรอลิคฟลิคคูลเตอร์ไหลด้วยความเร็วต่ำเกินไป จึงส่งผลให้มีการตกตะกอนในเส้นท่อเกิดขึ้น ทั้งนี้สมมติฐานดังกล่าวสามารถพิสูจน์ได้ด้วยผลการนำของเหลวที่ผ่านการบำบัดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟลิคคูลชันภายในเส้นท่อน้ำตกตะกอนโดยใช้คอลัมน์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร ความสูง 2 เมตร และเก็บตัวอย่างน้ำที่ความลึก 0.5 และ 1.8 เมตร ทุก 3 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำของเหลวที่ผ่านการตกตะกอนแล้วมาวัดความขุ่น ทั้งนี้ จะแสดงผลการศึกษาดังภาพที่ 4-14 โดยพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่อัตราการไหลน้ำล้นผิว (OFR) ค่าเดียวกัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลของเหลวที่ไหลผ่านไฮดรอลิคฟลิคคูลเตอร์ (ลูกบาศก์เมตร) และพื้นที่หน้าตัดของถังปฏิกิริยาที่ของเหลวไหลผ่าน (ตารางเมตร) ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก-9



ภาพที่ 4-14 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเปรียบเทียบระหว่างของเหลวที่ผ่านการตกตะกอนด้วยคอลัมน์ทรงกระบอกและของเหลวที่ผ่านกระบวนการรวมตะกอนภายในเส้นท่อ เมื่อใช้อัตราการไหลน้ำดิบตั้งคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความขุ่นเริ่มต้น 20 50 และ 200 เอ็นทียู

จากภาพที่ 4-13 สำหรับการศึกษาการเดินทางระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบตั้งคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง โดยทำการเปรียบเทียบที่อัตราน้ำล้นผิวเดียวกัน ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเปรียบเทียบระหว่างของเหลวที่ผ่านการตกตะกอนด้วยคอลัมน์ทรงกระบอก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร ความสูง 2 เมตร ทุกๆ 3 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และของเหลวที่ผ่านกระบวนการรวมตะกอนภายในเส้นท่อ มีความสอดคล้องกันในทุกความขุ่นน้ำดิบตั้งคราะห์เริ่มต้น (คลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10) อีกทั้งผลการศึกษา ยังพบว่าสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้เบื้องต้น

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสาเหตุที่อัตราการไหลน้ำดิบตั้งคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นแตกต่างจากประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ เกิดการตกตะกอนภายในเส้นท่อ เนื่องจากอัตราการไหลน้ำดิบตั้งคราะห์ดังกล่าวส่งผลให้ของ

ไหลไหลด้วยความเร็วที่ต่ำเกินไป อัตราการไหลดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมต่อกระบวนการรวมตะกอนภายในเส้นท่อ

ส่วนในกรณีที่เดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 ลิตรต่อชั่วโมง จะพบว่าประสิทธิภาพจริงมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนาย เนื่องจากที่อัตราการไหลดังกล่าวอาจก่อให้เกิดความเร็วกระแสน้ำที่สูงเกินไป และอาจส่งผลให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นไม่สามารถทนต่อแรงเฉือนได้ จึงแตกออกจากกัน ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.2

ผลการศึกษาในขั้นนี้สรุปได้ว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเพื่อทำนายประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes) โดยแบบจำลองดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อนในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นไม่เกินร้อยละ 20 โดยมีตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ความเร็วกระแสน้ำ และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยเริ่มต้นหรือความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันได้ว่าที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง มีสาเหตุจากการตกตะกอนภายในเส้นท่อเนื่องมาจากอัตราการเร็วของของไหลที่ต่ำเกินไป

ทั้งนี้ การทดลองในส่วนของการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อที่ผ่านมาเป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงผลกระทบของปัจจัยต่างๆ และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยใช้สเตติคิมิกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ ตามลำดับ โดยจะนำผลการศึกษาที่ได้มาประยุกต์ใช้และเป็นแนวทางในการศึกษากระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา ในการทดลองขั้นต่อไป

4.3 การศึกษาการใช้ถังปฏิริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา

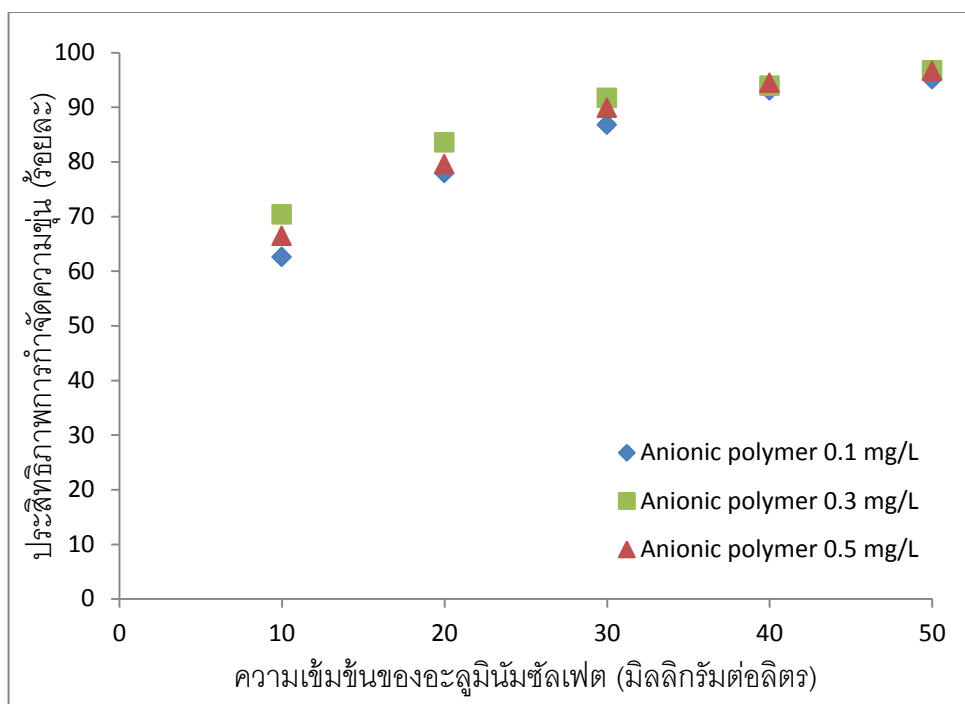
แนวคิดของถังปฏิริยาไฮบริดคือ การนำกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน การทำให้ฟล็อกลอย และแยกฟล็อกออกจากน้ำโดยอาศัยกลไกของไฮโดรไซโคลน เพื่อใช้ในการกำจัดความขุ่นจากแหล่งน้ำดิบ โดยมีข้อดีคือ สามารถช่วยลดจำนวนถังปฏิริยา และพื้นที่ในการดำเนินการ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตน้ำประปาที่ใช้กันทั่วไป นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในโรงผลิตน้ำประปาที่มีพื้นที่ใช้สอยจำกัด

ดังนั้น ในขั้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ และฟล็อกคูแลนต์ อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ อัตราการไหลน้ำอิมิตัวด้วยอากาศ อัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายใน จุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน นอกจากนี้ยังทำการทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสนเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดและแนวทางในการประยุกต์ใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดกับโรงผลิตน้ำประปาในประเทศไทย

4.3.1 การศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ ฟล็อกคูแลนต์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน

การศึกษาขั้นนี้ทำการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ ฟล็อกคูแลนต์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน เพื่อนำชนิดและความเข้มข้นที่เหมาะสมไปประยุกต์ใช้กับถังปฏิกริยาไฮบริดในการทดลองขั้นต่อไป (เนื่องจากในการศึกษาขั้นต่อไปเป็นการศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด จึงมีความจำเป็นในการศึกษาความเข้มข้นฟล็อกคูแลนต์ที่เหมาะสม เนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ฟล็อกคูแลนต์สามารถช่วยรวบรวมอนุภาคและเพิ่มความสามารถในการทนต่อแรงเฉือนภายในไฮโดรไซโคลน) (Woodfield และ Bickert, 2004; Frank และคณะ 2005)

ในการทดลองนี้จะทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) เป็น 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของสารฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) เป็น 0.1 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยควบคุมความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้นเท่ากับ 50 เอ็นทียู เนื่องจากเป็นความขุ่นน้ำดิบเฉลี่ยตลอดปีของโรงผลิตน้ำประปาสามเสน และใช้ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน 30 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ภายในถังปฏิกริยาไฮบริดเมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์สูงสุด 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-15

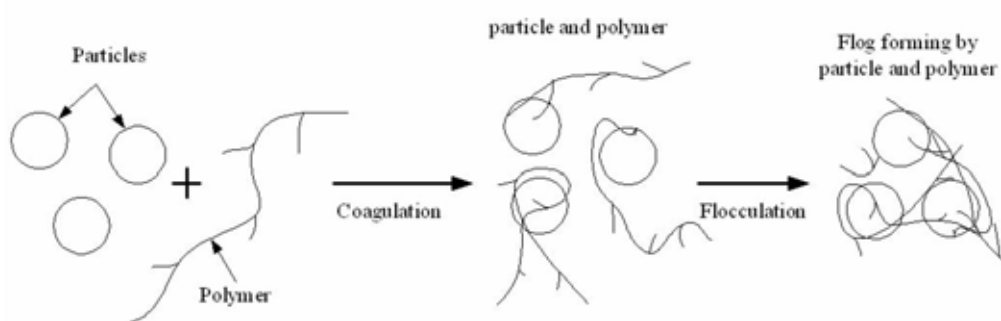


ภาพที่ 4-15 ผลการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) และความเข้มข้นของฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) ที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน 30 วินาที

จากภาพที่ 4-15 ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นแปรผันตามปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ โดยโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) ความเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 96.75 โดยในกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการฟล็อกคูเลชัน ความขุ่นจะถูกกำจัดด้วยกลไกการห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (Sweep coagulation) และกลไกการสร้างสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาค (Polymer bridging) ตามลำดับ

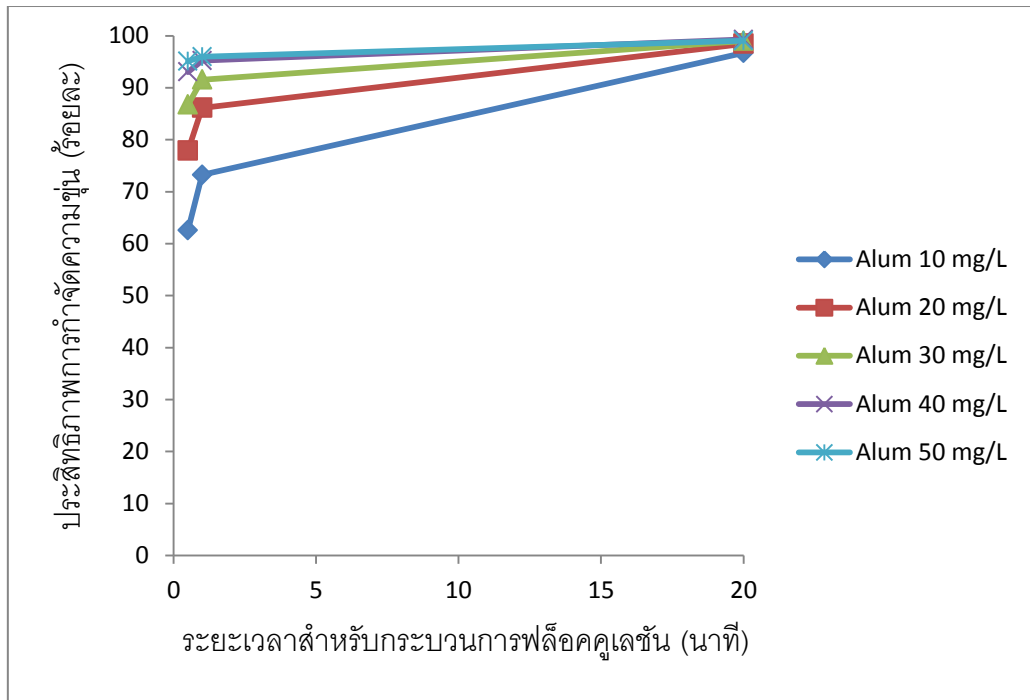
นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่า ความเข้มข้นฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะแปรผันตามความเข้มข้นของฟล็อกคูแลนต์ อย่างไรก็ตามหากความเข้มข้นฟล็อกคูแลนต์สูงเกินไปจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากภาพที่ 4-16 ซึ่งแสดงกลไกการสร้างสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาค (Polymer bridging) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการฟล็อกคูเลชันในทางทฤษฎี อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติด โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่นๆ ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (Destabilized particle) โดยอนุภาคนี้สามารถจับกับอนุภาค

อื่นได้ โดยอาศัยโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม ซึ่งในกรณีที่ใส่สารโพลีเมอร์มากเกินไปจะเกิดผลเสีย เพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์จนกระทั่งไม่มีตำแหน่งว่างบนพื้นผิวอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาค อนุภาคคอลลอยด์จึงคืนเสถียรภาพอีกครั้ง (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2542; Lawrence และคณะ, 2005)

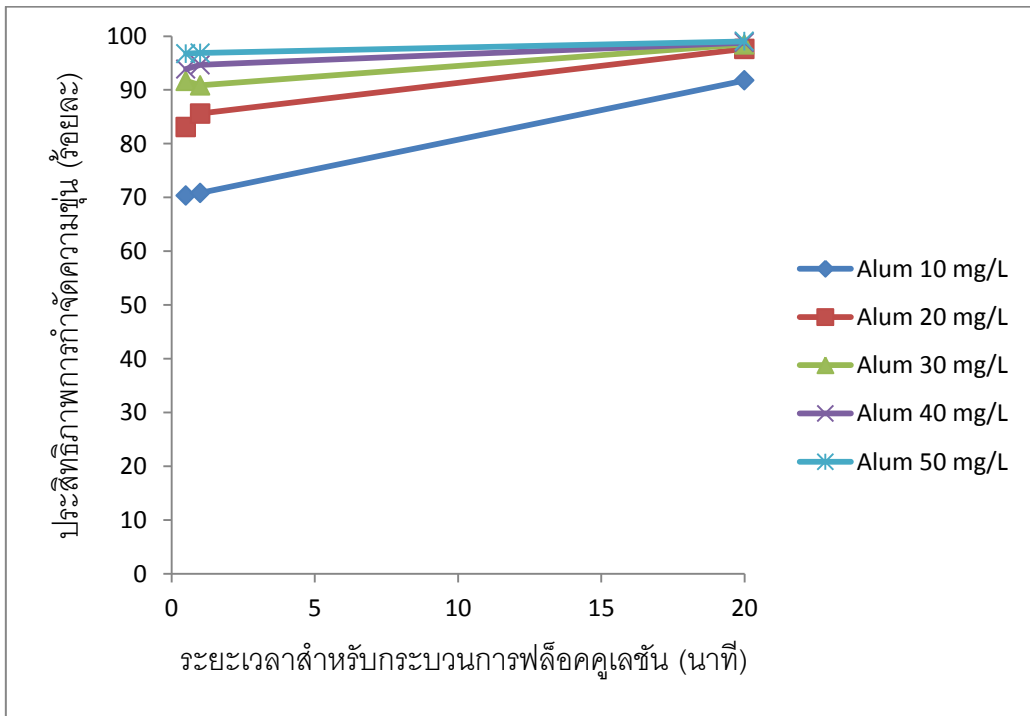


ภาพที่ 4-16 กลไกการสร้างสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาค (Polymer bridging)

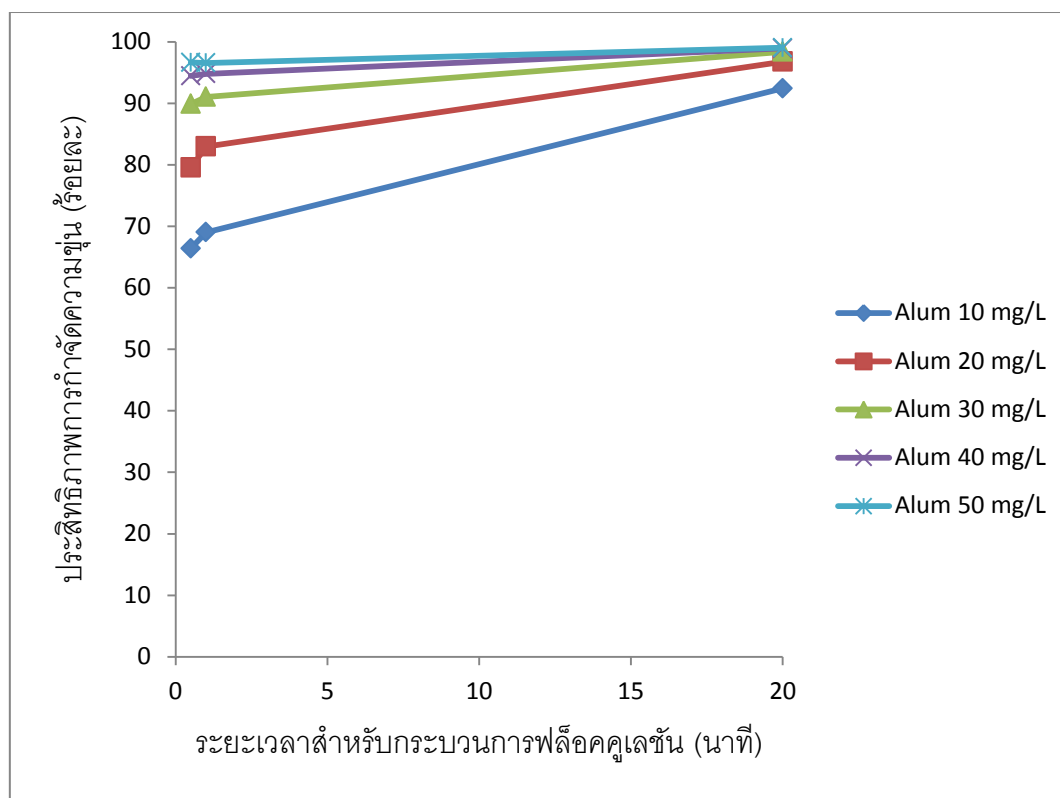
สำหรับการศึกษาระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันเป็น 20 1 นาที และ 30 วินาที ความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ (อะลูมิเนียมซัลเฟต) เป็น 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบเป็น 0.1 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยควบคุมความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้นเท่ากับ 50 เอ็นทียู โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการฟล็อกคูเลชันที่จะเกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-17



(ก) โพลีเมอร์ประจุลบความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ข) โพลีเมอร์ประจุลบความเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร



(ค) โพลีเมอร์ประจุลบความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

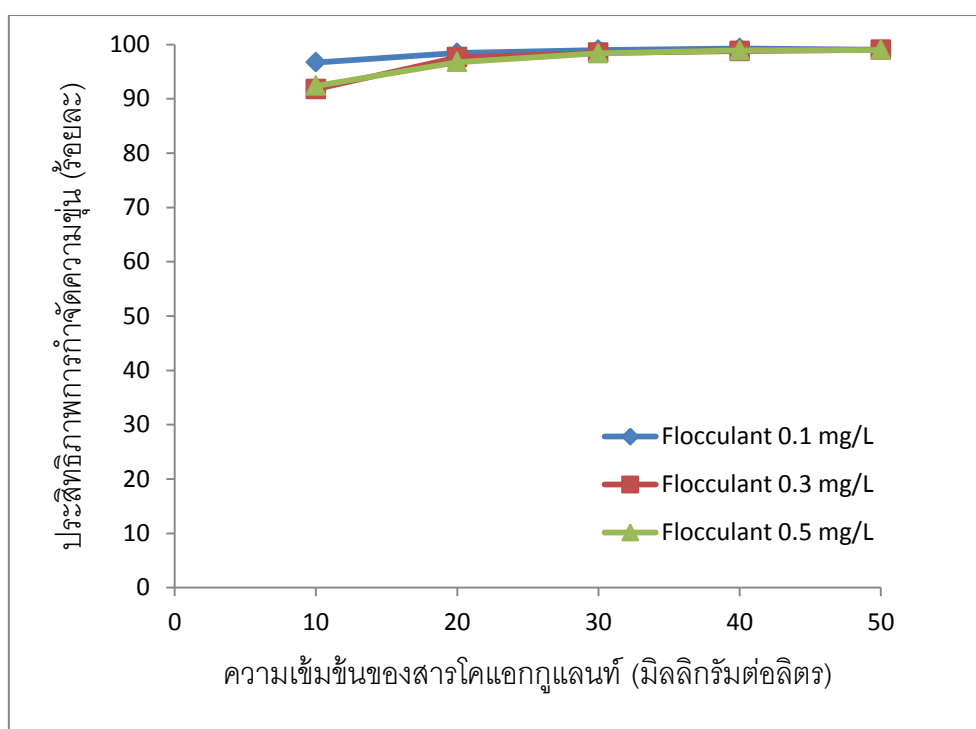
ภาพที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟลอคคูเลชัน เมื่อใช้โพลีเมอร์ประจุลบและความเข้มข้นอะลูมินัมซัลเฟตความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เอ็นทียู

ผลการศึกษาพบว่า การใช้อะลูมินัมซัลเฟตเป็นสารโคแอกกูแลนต์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โพลีเมอร์ประจุลบเป็นสารฟลอคคูแลนต์ความเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟลอคคูเลชันเป็น 20 1 นาที และ 30 วินาที สามารถกำจัดความขุ่นเท่ากับ ร้อยละ 99.02 96.86 และ 96.75 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-16 กล่าวคือ ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟลอคคูเลชันที่ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นลดลง เนื่องจากกระบวนการฟลอคคูเลชันต้องการระยะเวลาที่เหมาะสมในการสัมผัสกันระหว่างอนุภาค เพื่อช่วยในการรวบรวมตะกอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจนมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ จากภาพที่ 4-17 ยังพบว่า เมื่อระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟลอคคูเลชันลดลง ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจาก

กระบวนการโคแอกกูเลชันดังกล่าวเป็นการทำลายเสถียรภาพด้วยกลไกการห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (Sweep coagulation) ซึ่งการเพิ่มปริมาณโคแอกกูแลนต์จะช่วยเพิ่มเป้าสัมผัสทำและเพิ่มโอกาสให้ตะกอนขนาดเล็กมีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้นภายในระยะเวลาสั้น ส่งผลให้สามารถตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว

ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการฟลอคคูเลชันในการผลิตน้ำประปาทั่วไป (Conventional water treatment process) ซึ่งใช้ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟลอคคูเลชัน 20 นาที ทำการทดลองปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) เป็น 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นสารฟลอคคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) เป็น 0.1 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยควบคุมระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟลอคคูเลชันเท่ากับ 20 นาที และความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้นเท่ากับ 50 เอ็นทียู ผลการศึกษาสามารถแสดงดังภาพที่ 4-18



ภาพที่ 4-18 ผลการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) และความเข้มข้นของสารฟลอคคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) ที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟลอคคูเลชัน 20 นาที

จากภาพที่ 4-18 ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน 20 นาที จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 99.29 เมื่อใช้อะลูมินัมซัลเฟต ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และโพลีเมอร์ประจุลบความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยในกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการฟล็อกคูเลชันดังกล่าว ความขุ่นจะถูกกำจัดด้วยกลไกการห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (Sweep flocculation) และกลไกการสร้างสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาค (Polymer bridging) ตามลำดับ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า ที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน 20 นาที ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่แตกต่างกันจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเพียงเล็กน้อย กล่าวคือ ความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์และสารฟล็อกคูแลนต์จะลดลง หากระบบมีระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันที่เพียงพอ

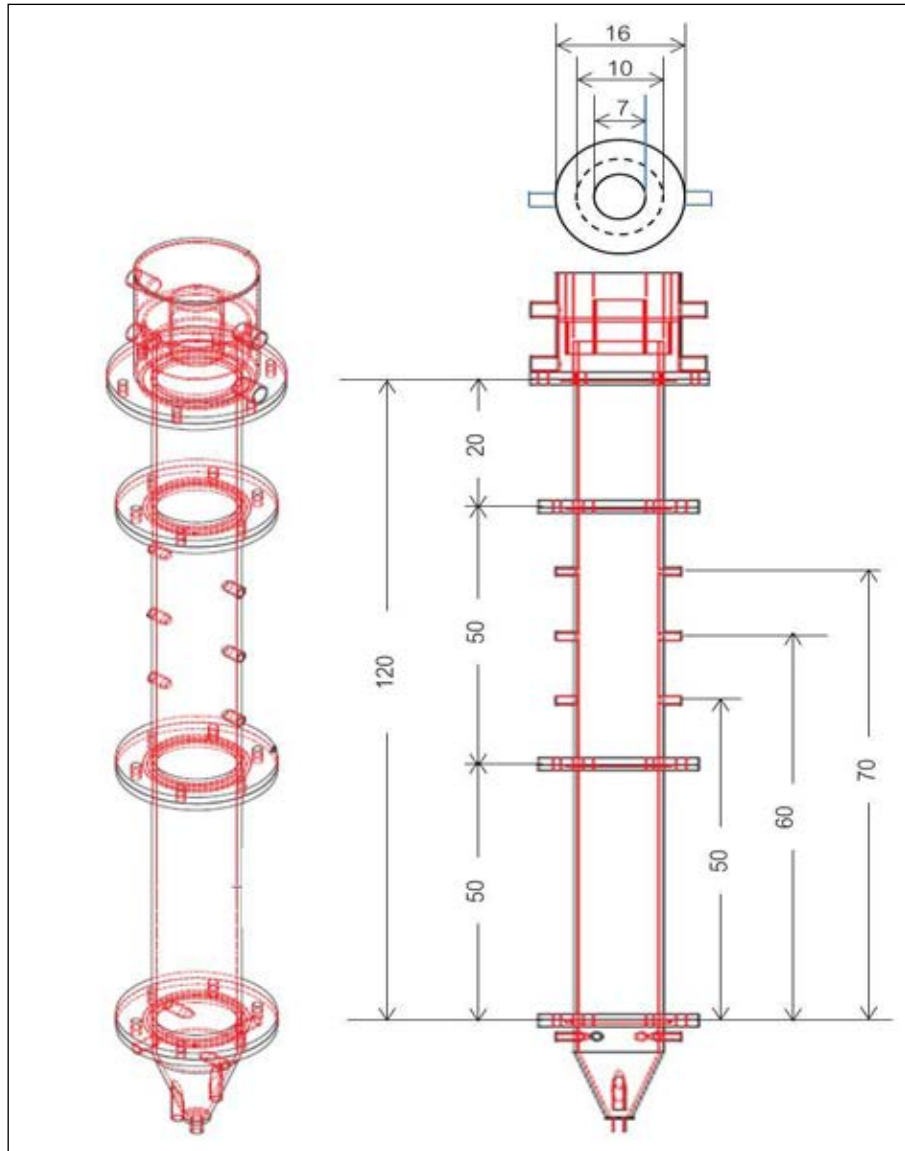
จากผลการศึกษาขั้นนี้สรุปได้ว่า ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) และสารฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) และระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันที่ลดลงจะส่งผลให้มีความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์และฟล็อกคูแลนต์เพิ่มขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ความเข้มข้นของอะลูมินัมซัลเฟต 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และโพลีเมอร์ประจุลบ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุดที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน 30 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ไฮบริดหากเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง ทั้งนี้ ที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน 30 วินาที ยังพบว่าเป็นระยะเวลาที่เพียงพอสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันอีกด้วย เนื่องจากสามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูง (เกินร้อยละ 90)

4.3.2 การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด

อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์เป็นปัจจัยสำคัญต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552) และเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity) ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด (Treatment efficiency) และประสิทธิภาพในการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส (Separation efficiency)

ในขั้นนี้จึงทำการศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (Q_{raw}) เป็น 600 800 1000 และ 1200 ลิตรต่อชั่วโมง โดยควบคุมให้ความชุ่มชื้นของน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้นเป็น 50 เอ็นทียู ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) และฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) เป็น 50 และ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.1) และอัตราการไหลน้ำอัดตัวด้วยอากาศ (Q_p) 80 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดัน 4.5 บาร์ ซึ่งเป็นความดันที่ก่อให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเหมาะสมสำหรับกระบวนการไฮบริด (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)

ในงานวิจัยนี้ใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดเป็นไฮโดรไซโคลนทรงกระบอกซึ่งมีรูปร่างเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยของ วรศิริ เสียงสนั่น แต่เนื่องจากไม่สามารถหาช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 เซนติเมตรได้ จึงเลือกใช้ขนาดที่ใกล้เคียงมากที่สุดคือ 0.8 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 4-19



ภาพที่ 4-19 ลักษณะและขนาดของถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก
 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 1.2 เมตร
 ผลการสังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยาไฮบริดแสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาไฮบริดที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ค่าต่างๆ

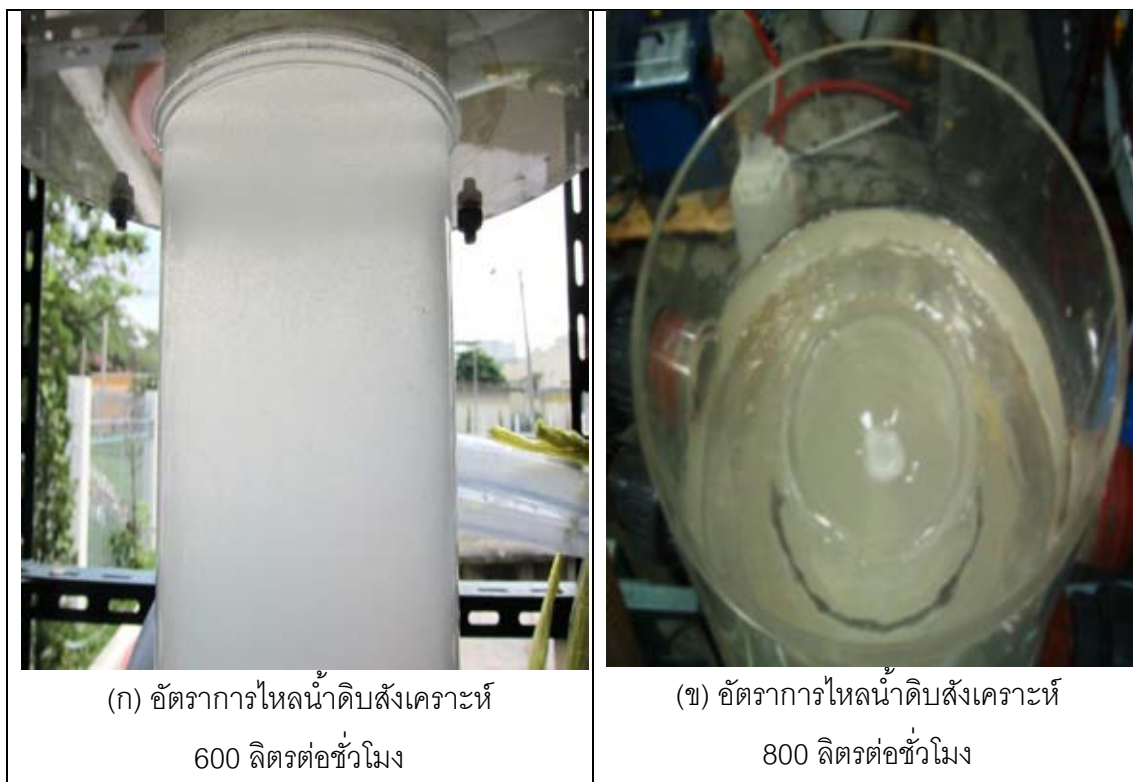
อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (ลิตรต่อชั่วโมง)	600	800	1000	1200
การไหลวน (Vortex presence)	ไม่มี	มี	มี	มี
การรวมตัวกันของฟองอากาศ (Microbubble coalescence)	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	มี
การแยก ระหว่างฟล็อกและน้ำใส (Separation phenomena)	ไม่มี	มี	มี	ไม่มี

จากตารางที่ 4-4 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริดพบว่า เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ตั้งแต่ 600 ถึง 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง ของเหลวมีการไหลวน (Vortex) ขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกริยาไฮบริด ยกเว้นที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 ลิตรต่อชั่วโมง โดยที่ทุกอัตราการไหลไม่พบการเกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ (Microbubble coalescence) ยกเว้นที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษหรือฟล็อกที่มีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายในโครงสร้างของฟล็อก (Aerated floc) และเกิดปรากฏการณ์การแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส (Separation phenomena) ในทุกอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ยกเว้นที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 และ 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการไหลภายในถังปฏิกริยาไฮบริด เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง ดังภาพที่ 4-21 จะสามารถสังเกตเห็นถึงความแตกต่างของลักษณะการไหลภายในถังปฏิกริยาไฮบริด ซึ่งลักษณะการไหลแบบหมุนวน (Vortex) นี้พบว่ามี ความสำคัญต่อการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษ (Aerated floc) ภายในถังปฏิกริยาไฮบริด แสดงดังภาพที่ 4-21

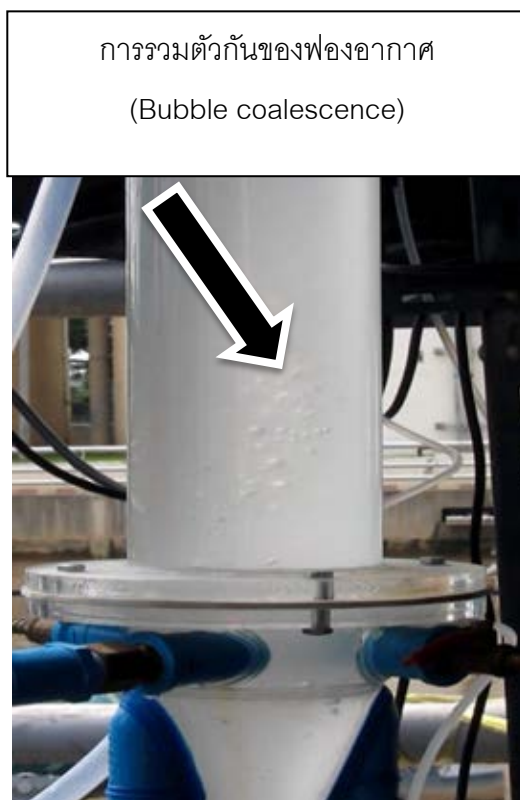
เมื่อของเหลวผ่านเข้าสู่ถังปฏิกริยาไฮบริดจะเกิดกระบวนการฟล็อกคูลเลชัน โดยฟล็อกขนาดเล็กซึ่งถูกสร้างจากไฮดรอลิกฟล็อกคูลเลเตอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 35 เมตร จะมาชนกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด ในขณะที่เดียวกันฟองอากาศขนาดเล็กจากน้ำอิมิตัวด้วยอากาศจะเข้าไปแทรกในโครงสร้างฟล็อก ส่งผลให้บริเวณด้านล่างของถัง

ปฏิกิริยาไฮบริดเกิดการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษ (Aerated floc) ขึ้น ซึ่งฟล็อกดังกล่าวมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ ในขณะที่เดียวกัน การไหลหมุนวน (Vortex) ที่เกิดขึ้นจะทำให้ฟล็อกชนิดพิเศษดังกล่าวมารวมกันบริเวณแกนกลาง และถูกแยกออกด้วยหลักความแตกต่างกันของความหนาแน่นระหว่างฟล็อกและน้ำด้วยกลไกของไฮโดรไซโคลน (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)



ภาพที่ 4-20 การไหลแบบหมุนวน (Vortex) ขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกิริยาไฮบริด
เมื่อใช้อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 และ 800 ลิตรต่อชั่วโมง

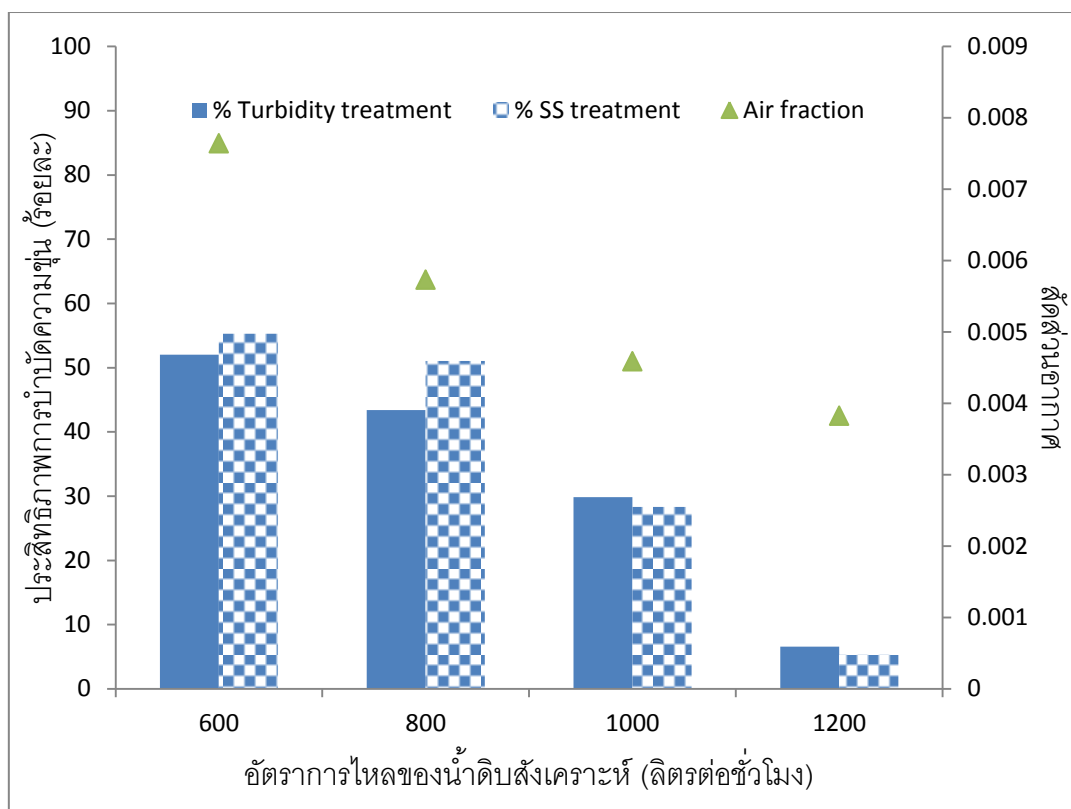
เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ตั้งแต่ 600 ถึง 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้การไหลหมุนวน (Vortex) มีความแรงมากขึ้น และสามารถไหลหมุนวนขึ้นไปถึงด้านบนของถังปฏิกิริยาไฮบริด แต่เมื่ออัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเป็น 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง กลับพบว่ามีเกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ (Bubble coalescence) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการความเร็วภายในถังปฏิกิริยามีค่าสูงเกินไป ส่งผลให้ฟองอากาศจากน้ำอิมัลชันด้วยอากาศรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ (Bamrungsri, 2008) ดังภาพที่ 4-21



ภาพที่ 4-21 การเกิดปรากฏการณ์รวมตัวกันของฟองอากาศ (Bubble coalescence)

เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1200 ลิตรต่อชั่วโมง

ทั้งนี้ ผลการศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัด
ความขุ่นสามารถแสดงดังภาพที่ 4-22



ภาพที่ 4-22 ผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอย

จากภาพที่ 4-22 ผลการศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น (Treatment efficiency) ซึ่งเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้นกับความขุ่นของน้ำหลังการบำบัดบริเวณผนังไฮโดรไซโคลนพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยแปรผกผันกับอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ โดยที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 ลิตรต่อชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยสูงสุดเท่ากับร้อยละ 52 และ 55.26 ตามลำดับ ทั้งนี้จากผลดังกล่าวสามารถอธิบายโดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่พบการไหลหมุนวน vortex และช่วงอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 ถึง 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นช่วงที่พบการไหลหมุนวน vortex

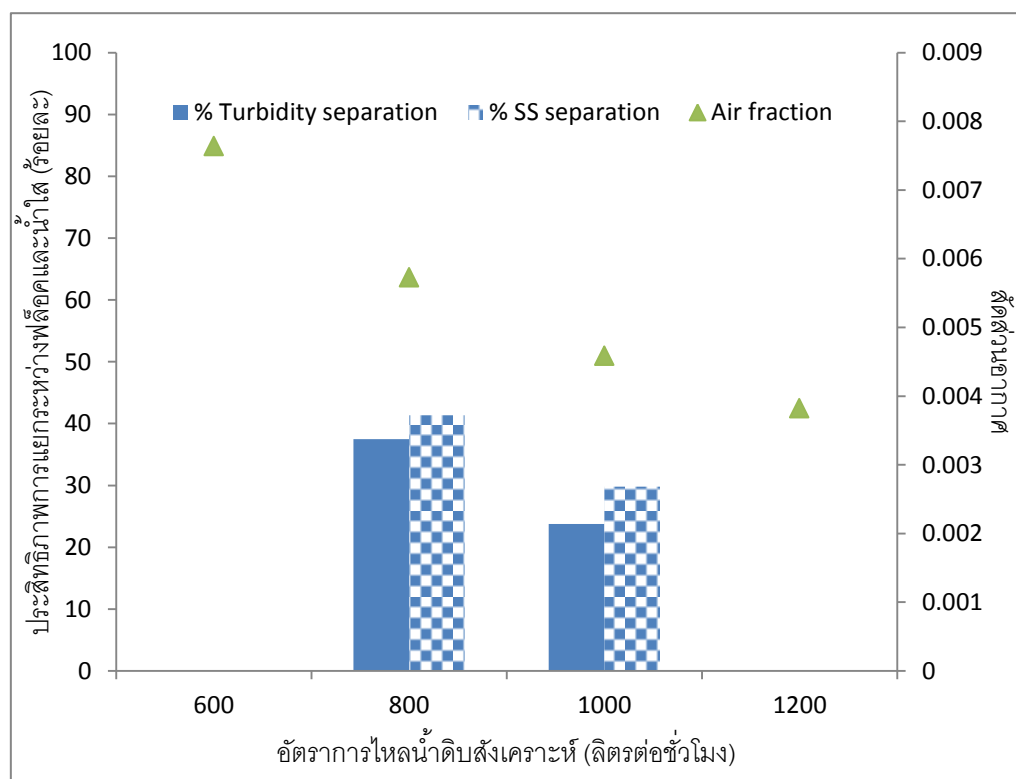
เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยสูงสุด ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของสโตก (Stoke's law) เนื่องจากการเดินระบบด้วยอัตราการไหลดังกล่าวไม่พบการไหลหมุนวน

(Vortex) จึงส่งผลให้ระบบเกิดความปั่นป่วนน้อย อีกทั้งการลดอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ยังเป็นการเพิ่มระยะเวลาพัก หรือระยะเวลาสัมผัส (Contact time) ระหว่างฟล็อกกับฟล็อก รวมทั้งฟองอากาศขนาดเล็กภายในถังปฏิกริยาไฮบริด ฟล็อกที่เกิดขึ้นจึงมีโอกาสที่จะสัมผัสกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้ ผลดังกล่าวเกิดจากความสำคัญของขนาดและความหนาแน่นของฟล็อกต่อความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity, V_T) ที่แตกต่างกันในแต่ละอัตราการไหล กล่าวคือ การรวมตัวของฟล็อกทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความหนาแน่นลดลง ซึ่งการลดอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ลงเป็น 600 ลิตรต่อชั่วโมง จะทำให้อนุภาคในเฟสน้ำ (ฟล็อกและฟองอากาศขนาดเล็ก) มีเวลารวมตัวกันมากขึ้น และเมื่อตะกอนมีขนาดใหญ่ในระดับหนึ่ง การเพิ่มขนาดตะกอนจะมีผลต่อการเพิ่มความเร็วสุดท้ายมากกว่าการลดความหนาแน่นตะกอน ($V_T \propto d_p^2$, $V_T \propto \Delta\rho$) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น

นอกจากนี้ จากการศึกษาในส่วนของการควบคุมการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (ก่อนเข้าสู่ถังปฏิกริยาไฮบริด) ผลการศึกษายังพบว่าที่อัตราการไหล 600 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุด (ประสิทธิภาพเมื่อออกจากไฮดรอลิกฟล็อกคูเลเตอร์) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าที่อัตราการไหลดังกล่าวส่งผลให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นและรวมกันจนมีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อไหลเข้าสู่ถังปฏิกริยาไฮบริดซึ่งมีความปั่นป่วนน้อย และมีเวลาในการสัมผัสกันระหว่างฟล็อกกับฟล็อกและอากาศมาก ฟล็อกจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น และส่งผลต่อการเพิ่มความเร็วสุดท้าย ประสิทธิภาพการบำบัดจึงสูงขึ้น

สำหรับกรณีที่เดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ในช่วง 800 ถึง 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นช่วงอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่ก่อให้เกิดการไหลหมุนวน Vortex ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น โดยควบคุมระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบด้วยอากาศ ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอย แปรผกผันกับอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในช่วงอัตราการไหลดังกล่าว ผลการศึกษพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 43.40 และ 51.04 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 ลิตรต่อชั่วโมง

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส (Separation efficiency) โดยทำการวัดความแตกต่างของความขุ่นและสารแขวนลอยเปรียบเทียบระหว่างของเหลวบริเวณผนังกับแกนกลางของไฮโดรไซโคลน ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-23



ภาพที่ 4-23 ผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส

จากภาพที่ 4-23 ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจาก 600 เป็น 800 ลิตรต่อชั่วโมง และมีประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสสูงสุดเท่ากับร้อยละ 37.5 และ 41.38 สำหรับการแยกความขุ่นและสารแขวนลอยออกจากน้ำตามลำดับ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์มีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงขึ้น ของเหลวเกิดการไหลหมุนวน (Vortex flow) ที่แรงขึ้น ฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดจากน้ำอัดตัวด้วยอากาศจะสามารถสัมผัสและแทรกในโครงสร้างฟล็อกได้ตลอดจนถึงด้านบนสุดของถังปฏิกรณ์ไฮบริด ในขณะเดียวกัน อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่สูงขึ้นก็ยังส่งผลให้ระบบมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่มากขึ้นและสูงพอที่จะแยกฟล็อกซึ่งมีฟองอากาศแทรกอยู่ภายใน (ความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ) ออกจากน้ำด้วยกลไกของไฮโดรไซโคลอน โดยอาศัยหลักการของความหนาแน่นของอนุภาคที่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 ลิตรต่อชั่วโมง จะพบว่าความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่เกิดขึ้น อาจไม่สูงพอที่จะแยกอนุภาคที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันได้

ดังนั้นจึงไม่เกิดการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใสที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 ลิตรต่อชั่วโมง

แต่เมื่ออัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์เพิ่มขึ้นเป็น 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษา กลับพบว่าประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใสแปรผกผันกับอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนอากาศ (Air fraction) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศและอัตราการไหลเข้าของของเหลวทั้งหมด ผลการศึกษพบว่า สัดส่วนอากาศมีค่าเท่ากับ 0.00458 ที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่ง สัดส่วนอากาศดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าช่วงที่ วรศิริ เสียงสนั่น แนะนำไว้ (0.0055-0.0104) กล่าวคือที่ อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ดังกล่าวอาจมีปริมาณอากาศไม่เพียงพอ จึงไม่สามารถสร้างฟลอค ชนิดพิเศษได้ เมื่อเปรียบเทียบความขุ่นและปริมาณสารแขวนลอยระหว่างบริเวณผนัง ไฮโดรไซโคลนและแกนกลางของถังปฏิกริยาไฮบริดจึงพบความแตกต่างเพียงเล็กน้อย ส่วนในกรณี อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,200 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษไม่พบการแยกระหว่างฟลอค และน้ำใส ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ (Bubble coalescence)

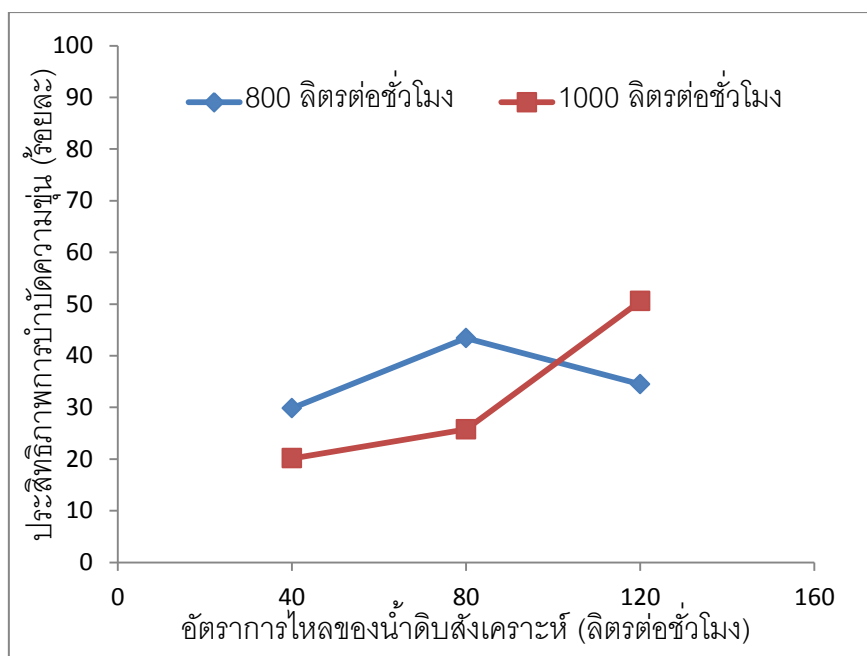
อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่ง สัดส่วนอากาศมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.0076 ผลการศึกษพบว่าสามารถบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยได้ แต่กลับไม่พบความแตกต่างระหว่างบริเวณแกนกลางและผนังของไฮโดรไซโคลน ทั้งนี้อาจสามารถอธิบายได้ว่า ถึงแม้ที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 ลิตรต่อชั่วโมง จะมี สัดส่วนอากาศและมีระยะเวลาพักภายในถังปฏิกริยาที่สูงกว่า แต่หากความเร็วสัมผัสเส้นรอบวงไม่สูงพอก็จะไม่สามารถที่จะแยกฟลอคออกจากน้ำใสได้ (วรศิริ เสียงสนั่น, 2549)

ในการศึกษาขั้นนี้สามารถสรุปได้ว่า อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์เป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดและประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใส เนื่องจาก อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์จะส่งผลความเร็วของของไหลภายในถังปฏิกริยาไฮบริด อีกทั้งยังมีความสำคัญต่อกลไกในการสัมผัสและแยกภายในไฮโดรไซโคลน ซึ่งหากอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ต่ำเกินไป(ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงต่ำเกินไป) เช่นที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 600 ลิตรต่อชั่วโมง จะส่งผลให้ระบบมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางไม่สูงพอที่จะแยกอนุภาคที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันได้ กลไกที่เกิดขึ้นในการบำบัดและแยกความขุ่นและสารแขวนลอย ออกจากน้ำจึงไม่เหมาะสมสำหรับถังปฏิกริยาไฮบริด ดังนั้นในงานวิจัยขั้นต่อไปจึงเลือกอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 และ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อทำการศึกษผลของอัตราการไหลน้ำ อิ่มตัวด้วยอากาศที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด

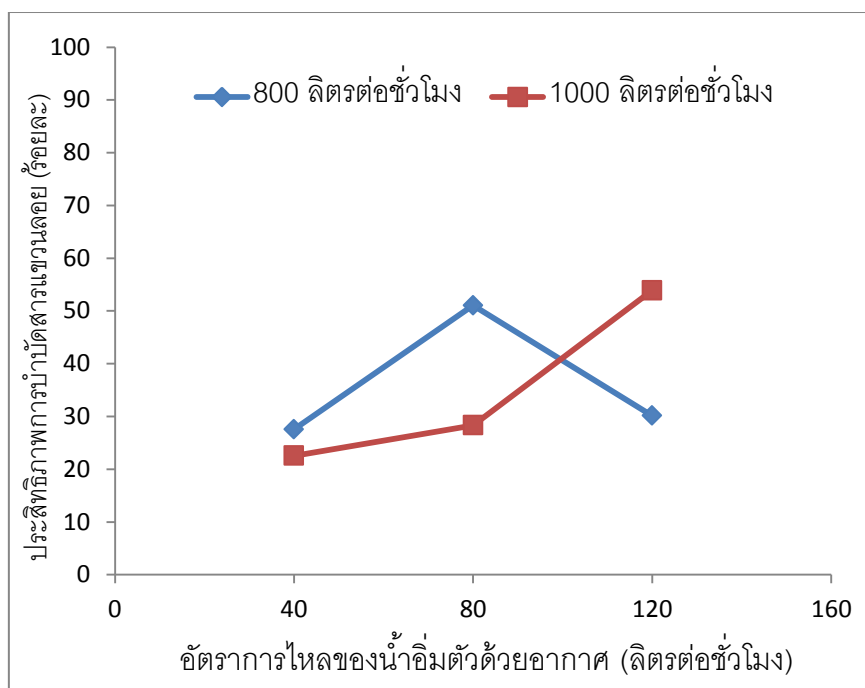
4.3.3 การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำอัดตัวด้วยอากาศที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด

อัตราการไหลน้ำอัดตัวด้วยอากาศ (Pressurized water flow rate) เป็นอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งมีความสำคัญต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552) เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษ (Special floc) ซึ่งมีฟองอากาศขนาดเล็ก (Microbubble) แทรกอยู่ภายใน และจะถูกแยกออกไปด้วยกลไกของไฮโดรไซโคลอน

ในขั้นนี้จึงทำการศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำอัดตัวด้วยอากาศที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลน้ำอัดตัวด้วยอากาศ (Q_p) เป็น 40 80 120 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดัน 4.5 บาร์ (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552) ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์และฟล็อกคูแลนต์เป็น 50 และ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.1) อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 และ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง เนื่องจากเป็นอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่ไม่ก่อให้เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ ซึ่งผลการศึกษแสดงดังภาพที่ 4-24



ภาพที่ 4-24 ผลของอัตราการไหลน้ำอัดตัวด้วยอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดความฟุ้ง

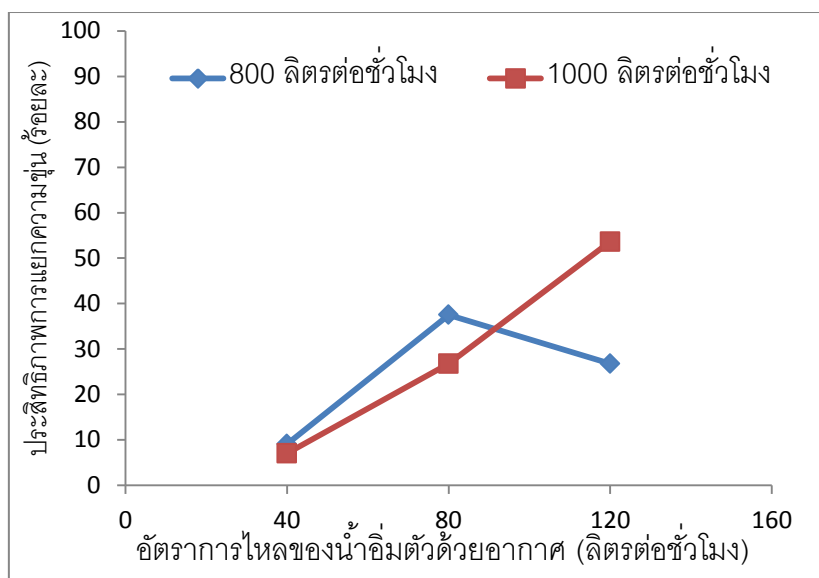


ภาพที่ 4-25 ผลของอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารแขวนลอย

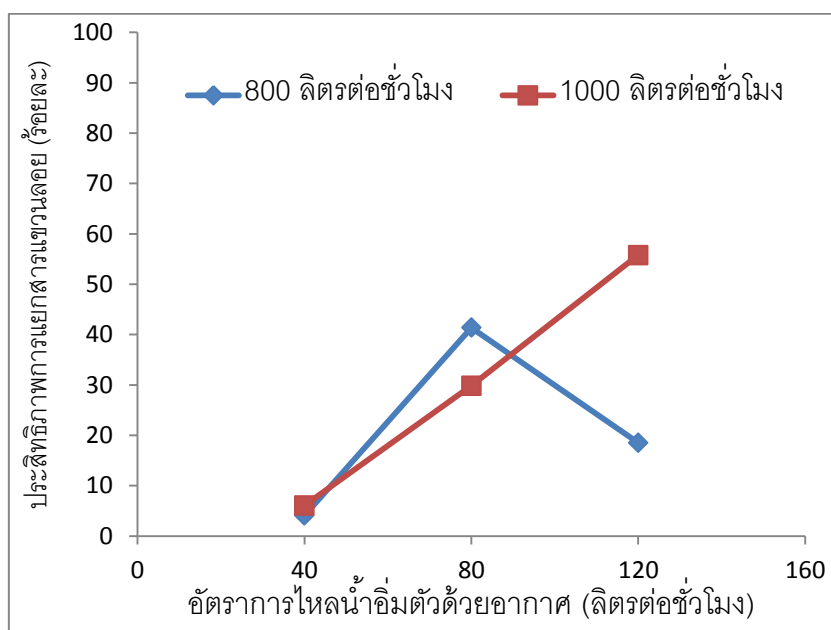
ผลการศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น และสารแขวนลอย (Treatment efficiency) แสดงดังภาพที่ 4-24 และ 4-25 ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นและแปรผันตามอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ โดยเมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัดจะแปรผันตามอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 40 ลิตรต่อชั่วโมง เป็น 120 ลิตรต่อชั่วโมง และจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยสูงสุดเท่ากับร้อยละ 50.54 และ 53.89 ตามลำดับ เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 120 ลิตรต่อชั่วโมง

ส่วนในกรณีที่เกิดระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจะแปรผันตามอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 40 ลิตรต่อชั่วโมง เป็น 80 ลิตรต่อชั่วโมง และจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยสูงสุดเท่ากับร้อยละ 43.40 และ 51.04 ตามลำดับ แต่เมื่ออัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 120 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษากลับพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยกลับแปรผกผันกับอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ

ทั้งนี้ผลการศึกษาดังกล่าวพบว่ามีข้อสอดคล้องกับประสิทธิภาพการแยกแหว่งฟล็อกและน้ำใสที่ลดลง ซึ่งจะกล่าวและอธิบายถึงเหตุผลถัดไปจากนี้



ภาพที่ 4-26 ผลของอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใส (ความขุ่น)



ภาพที่ 4-27 ผลของอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใส (สารแขวนลอย)

จากภาพที่ 4-26 และ 4-27 ซึ่งแสดงการศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ ที่มีต่อประสิทธิภาพในการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใส (Separation efficiency) ผลการศึกษา พบว่า ที่อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 800 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่ออัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ

เพิ่มขึ้นจาก 40 เป็น 80 ลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสจะแปรผันตามอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ โดยที่อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 80 ลิตรต่อชั่วโมง จะมีประสิทธิภาพการแยกความขุ่นและปริมาณสารแขวนลอยสูงสุดเท่ากับร้อยละ 37.5 และ 41.38 ตามลำดับ แต่เมื่ออัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 120 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษากลับพบว่าประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสแปรผกผันกับอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ

ทั้งนี้ผลดังกล่าวทั้งในแง่ประสิทธิภาพการบำบัดและประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส สามารถอธิบายได้ในเทอมของสัดส่วนอากาศ (Air fraction) โดยที่อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศเท่ากับ 40 80 และ 120 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถคำนวณสัดส่วนอากาศ (สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับอัตราการไหลเข้าทั้งหมด) ได้เท่ากับ 0.0031 0.0059 และ 0.0084 ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 ลิตรต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการบำบัดและประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสจะเพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วนอากาศเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 40 ลิตรต่อชั่วโมง จะมีสัดส่วนอากาศหรือปริมาณอากาศที่ต่ำเกินไป จึงไม่เพียงพอต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดและส่งผลกระทบต่อกระบวนการสร้างฟล็อกที่มีอากาศแทรกอยู่ภายใน (Aerated floc) เมื่อปริมาณอากาศมีไม่เพียงพอต่อปริมาณฟล็อกที่เกิดขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสมีค่าต่ำ

ส่วนในกรณีที่เดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 80 ลิตรต่อชั่วโมง จะมีสัดส่วนอากาศเพิ่มขึ้นและมีปริมาณอากาศที่เพียงพอต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมด ส่งผลให้ที่อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการบำบัดและการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสสูงสุด นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาสัดส่วนอากาศที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไฮบริดในงานวิจัยของ วรศิริ เสียงสนั่น ยังพบว่ามีความสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามเมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 120 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีสัดส่วนอากาศสูงขึ้น แต่กลับพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดและการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสลดลง

ผลการศึกษาในขั้นนี้สรุปได้ว่า อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษภายในถังปฏิกริยาไฮบริด และที่อัตราการไหลดังกล่าวควรมีปริมาณอากาศที่เหมาะสมต่อปริมาณอัตราการไหลเข้าของของเหลวทั้งหมด กล่าวคือ การเดินระบบด้วยถังปฏิกริยาไฮบริดต้องการปริมาณน้ำอิมตัวด้วยอากาศหรือปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับเดินระบบอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ค่าหนึ่งๆ จึงจะส่งผลให้ระบบสามารถ

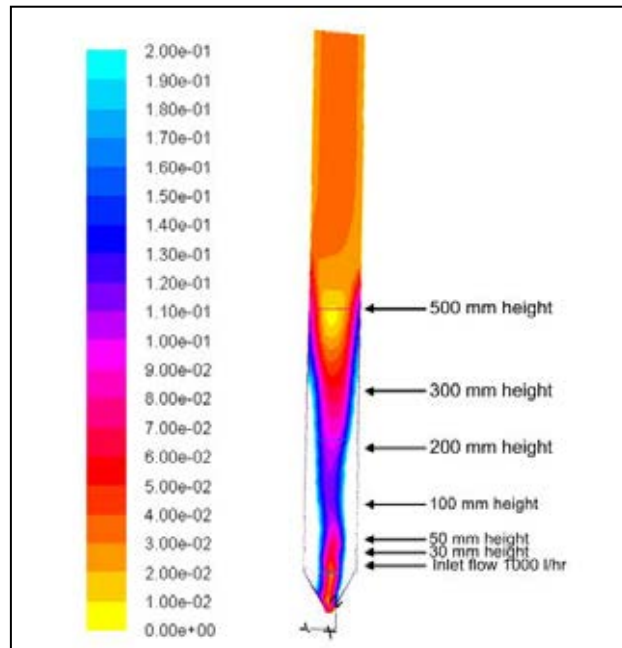
บำบัดและแยกฟล็อกจากน้ำใสได้ โดยในงานวิจัยนี้พบว่าอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังปฏิกริยาไฮบริดคือ อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 120 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง โดยที่สภาวะดังกล่าวคิดเป็นสัดส่วนอากาศเท่ากับ 0.0069 ซึ่งสัดส่วนอากาศดังกล่าวมีความสอดคล้องกับค่าสัดส่วนอากาศที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไฮบริดตามที่ วรศิริ เสียงสนั่น (2552) แนะนำ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดที่ใช้กับถังปฏิกริยาไฮบริด และเทคนิคการทำให้อากาศละลายโดยทั่วไป (Conventional dissolved air flotation) พบว่าถังปฏิกริยาไฮบริดที่ไม่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ใช้สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดเพียง 0.0069 ในขณะที่เทคนิคการทำให้อากาศละลายโดยทั่วไปใช้สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดสูงถึง 0.1500-0.5000

4.3.4 การศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในที่จุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในต่าง ๆ ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด

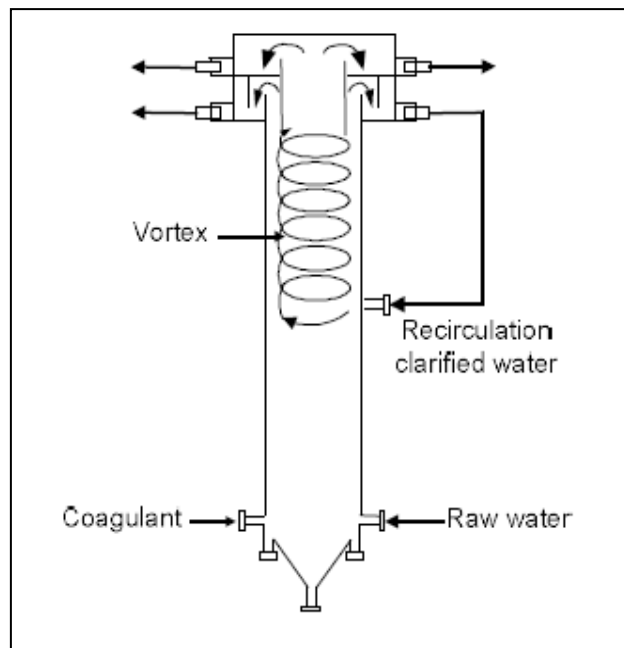
ในเบื้องต้น งานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด เนื่องจากในงานวิจัยของ วรศิริ เสียงสนั่น (2552) ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไฮบริดคือ อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 100 ลิตรต่อชั่วโมง และสัดส่วนอากาศที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.0055-0.0104 โดยที่สภาวะดังกล่าวสามารถบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยได้ อีกทั้งยังสามารถแยกฟล็อกออกจากน้ำใสได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศ (Bubble coalescence)

แต่จากการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริดกลับพบว่าการไหลหมุนวน (Vortex flow) ขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกริยาจะช้าลง ส่งผลกระทบต่อการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส ดังภาพที่ 4-28 ซึ่งแสดงความเร็วภายในถังปฏิกริยาไฮบริดที่ความสูงระดับต่างๆ เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 100 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยของวรศิริ เสียงสนั่น (2552) จะเห็นได้ว่าที่ระดับความสูง 50 เซนติเมตรของถังปฏิกริยาไฮบริด บริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลนจะมีความเร็วต่ำที่สุด จึงอาจส่งผลให้ฟล็อกซึ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายในไม่สามารถเข้ามารวมกันบริเวณแกนกลางได้ดีเท่าที่ควร

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกริยาไฮบริด โดยการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วบริเวณผนังไฮโดรไซโคลนกลับเข้ามาเพิ่มความเร็วในการแยก ระหว่างฟล็อกและน้ำใส แสดงดังภาพที่ 4-29



ภาพที่ 4-28 ความเร็วภายในถังปฏิกริยาไฮบริดที่ระดับความสูงต่างๆ (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)



ภาพที่ 4-29 แนวคิดในการเวียนน้ำใสกลับเข้ามาเพิ่มความเร็วช่วงบนของถังปฏิกริยาไฮบริด

ในงานวิจัยนี้ จากผลการศึกษาที่ผ่านมาในหัวข้อ 4.3.1 4.3.2 และ 4.3.3 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับถังปฏิกริยาไฮบริดคือ อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 120 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดัน 4.5 บาร์ โดยใช้โคแอกกูแลนท์ (อะลูมิเนียมซัลเฟต) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟล็อกคูแลนท์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) ความเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เอ็นทียู

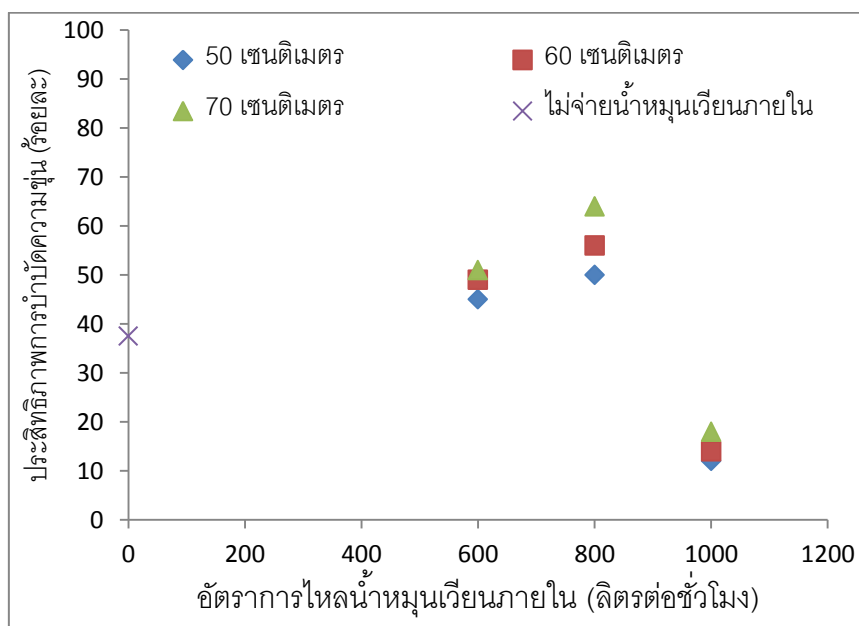
นอกจากนี้ จากการสังเกตภายในถังปฏิกริยาไฮบริดเมื่อหยุดเดินระบบพบว่า ของเหลวภายในถังปฏิกริยาไฮบริดไหลจะหมุนวนช้าลง ฟล็อกขนาดเล็กซึ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายในจะมารวมกันบริเวณแกนกลางและมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการที่ความเร็วของของเหลวลดลง จึงส่งผลให้ระบบมีระยะเวลาที่ฟองอากาศขนาดเล็กสัมผัสกับฟล็อกมากขึ้น ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาตามกฎของสโตก ดังสมการต่อไปนี้

$$v_p = \frac{g(\Delta\rho)d_p^2}{18\mu} \quad (4-15)$$

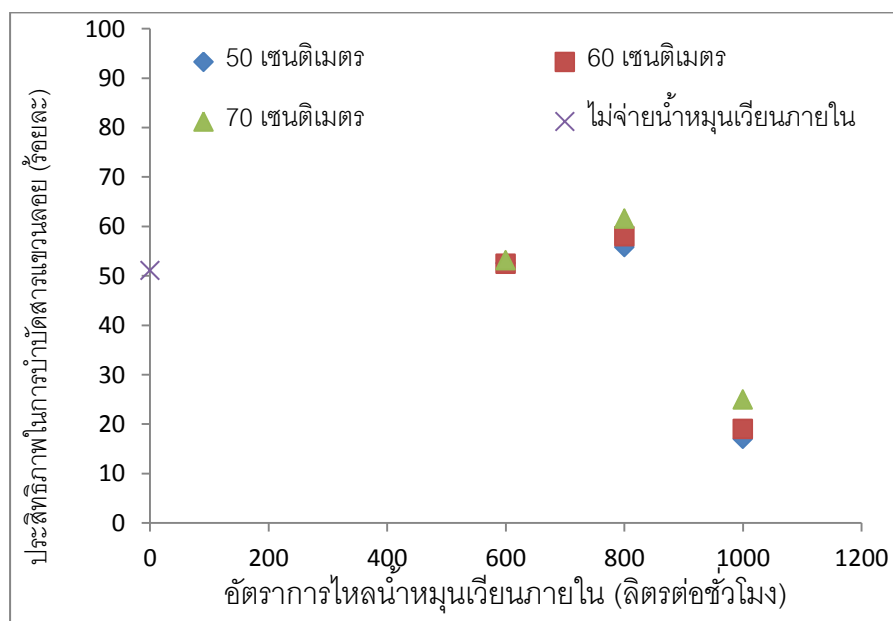
การที่อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น (d_p เพิ่มขึ้น) และมีอากาศเข้าไปแทรกภายในฟล็อกเพิ่มขึ้น ($\Delta\rho$ เพิ่มขึ้น) อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกฟล็อกที่มีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายในให้มารวมกันบริเวณแกนกลาง และสามารถแยกออกจากเฟสของเหลวได้ดีขึ้น (เนื่องจาก V_p เพิ่มขึ้น) ดังนั้นในการศึกษาขั้นนี้ จึงมีแนวคิดในการเพิ่มระยะเวลากักภายในถังปฏิกริยาไฮบริด โดยการลดอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ลงเป็น 800 ลิตรต่อชั่วโมง เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกันระหว่างฟล็อกกับอากาศมากขึ้นในบริเวณสัมผัส (Contact zone) และศึกษาผลของการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว กลับเข้ามาเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกริยาไฮบริดซึ่งเป็นบริเวณแยก (Separation zone) โดยผลที่คาดว่าจะได้รับคือ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส

ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายใน (Q_{re}) เป็น 600 800 1000 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งคิดเป็น 0.75 1 1.25 เท่าของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ตามลำดับ ที่จุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในมีความสูงเท่ากับ 50 60 และ 70 เซนติเมตร โดยควบคุมให้เดินระบบด้วยความดัน 4.5 บาร์ (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552) ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนท์ (อะลูมิเนียมซัลเฟต) และฟล็อกคูแลนท์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) เป็น 50 และ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตามลำดับ (จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.1) ความชุ่มน้ำดิบสังเคราะห์เริ่มต้น 50 เซนติเมตร อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 80 ลิตรต่อชั่วโมง (จากผลการศึกษาในหัวข้อ 4.3.3) ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวที่ 4-30 และ 4-31



ภาพที่ 4-30 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารความชุ่ม เมื่อมีการเวียนน้ำไหลกลับเข้ามา เพื่อเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกริยาที่จุดเจ้าน้ำหมุนเวียนภายในเท่ากับ 50 60 และ 70 ซม.



ภาพที่ 4-31 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารแขวนลอย เมื่อมีการเวียนน้ำไหลกลับเข้ามา

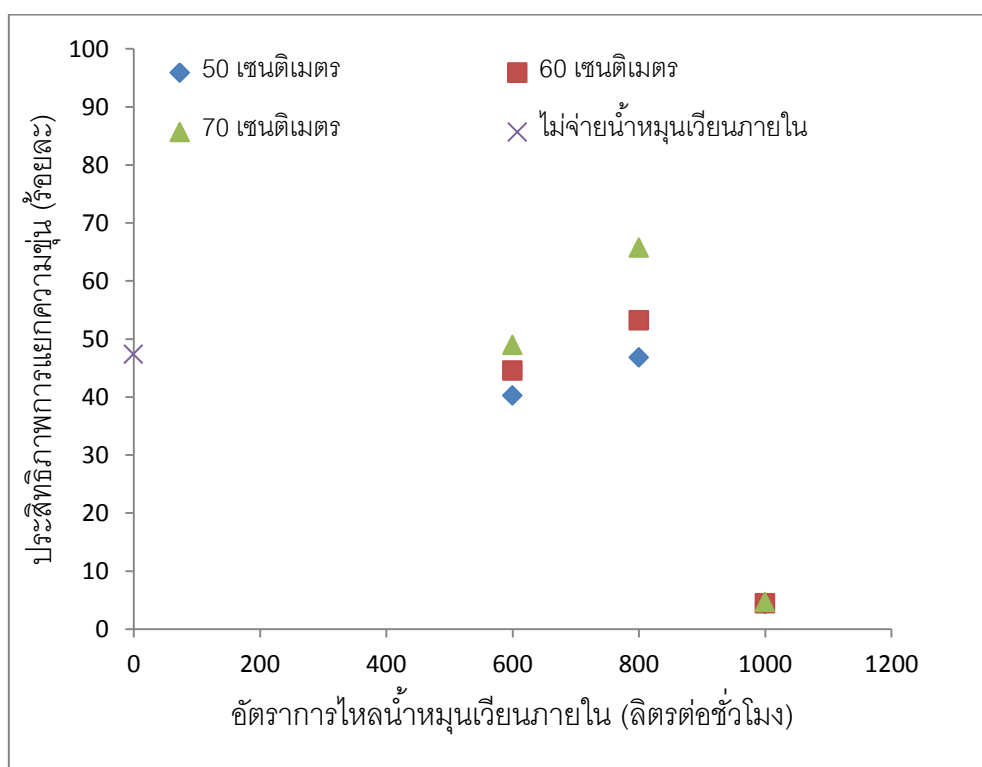
เพื่อเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกริยาที่จุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในเท่ากับ 50 60 และ 70 ซม.

จากภาพที่ 4-30 และ 4-31 เมื่อพิจารณาในแง่ของประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอย โดยเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 ลิตรต่อชั่วโมง และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในเป็น 600 800 และ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งคิดเป็น 0.75 1 และ 1.25 เท่าของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ตามลำดับ และปรับเปลี่ยนตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในให้อยู่ที่ความสูง 50 60 และ 70 เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยแปรผันตามอัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายในที่เพิ่มขึ้น โดยถังปฏิกริยาไฮบริดจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 64 และ 61.59 ตามลำดับ เมื่อมีการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับเข้ามาเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกริยาด้วยอัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายใน 800 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งคิดเป็น 1 เท่าของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ที่ความสูงจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน 70 เซนติเมตร จากขอบด้านล่างของถังปฏิกริยา ทั้งนี้ การจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นได้ อาจมีสาเหตุเนื่องจากการจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในนั้น นอกจากจะเป็นการเวียนน้ำเข้ามาเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกริยา ยังเป็นการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในเบื้องต้น กลับเข้ามาผ่านกระบวนการแยกภายในถังปฏิกริยาไฮบริดอีกครั้ง กล่าวคือการจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในเป็นการเพิ่มระยะเวลาพักของของเหลวภายในถังปฏิกริยานั่นเอง จึงส่งผลให้ถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายในมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิกริยาไฮบริดที่ไม่มีการเวียนน้ำกลับภายใน

อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายในเพิ่มขึ้นจาก 800 เป็น 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษากลับพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยลดลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการที่อัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายใน 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งคิดเป็น 1.25 เท่าของน้ำดิบสังเคราะห์ ก่อให้เกิดแรงเฉือนภายในไฮโดรไซโคลนที่สูงเกินไป จึงส่งผลให้กระบวนการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสภายในถังปฏิกริยาไฮบริด

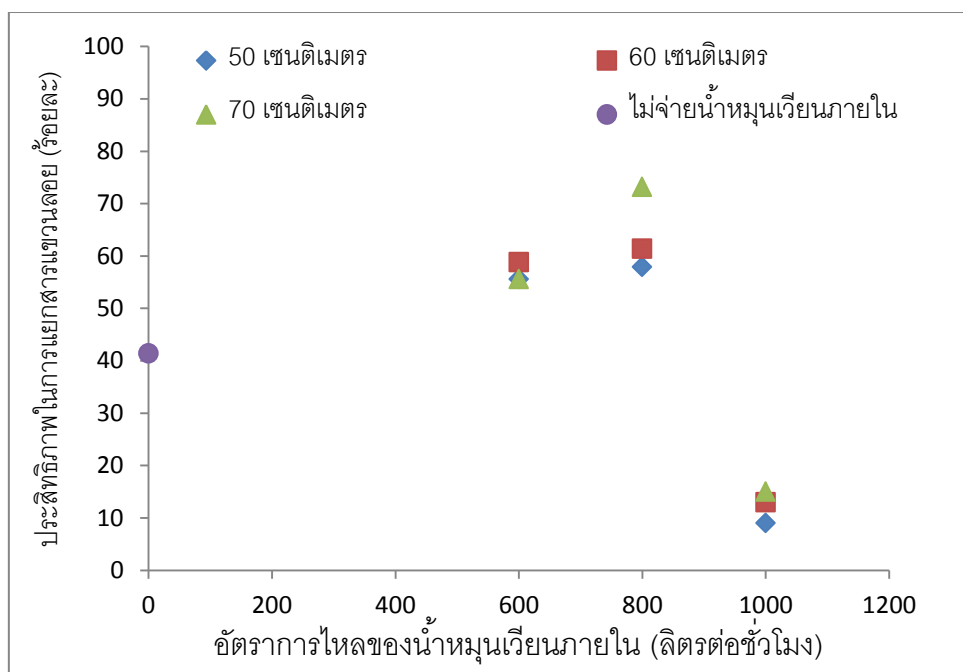
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงผลของการจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในที่ระดับความสูงต่างๆ ของถังปฏิกริยาไฮบริด ผลการศึกษายังพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยแปรผันตามระดับความสูงของจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นจะมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อระดับของจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในสูงขึ้น และพบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดที่ระดับของจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในเท่ากับ 70 เซนติเมตร ของถังปฏิกริยาไฮบริด

สำหรับการศึกษาในแง่การแยกระหว่างฟลอคและน้ำใสของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น แนวคิดในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในคือ การเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว กลับเข้ามาเพิ่มความเร็วในการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใสบริเวณช่วงบนของถังปฏิกริยาไฮบริด ซึ่งเป็นบริเวณสำหรับการแยกฟลอคที่มีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายในออกจากน้ำใส (Separation zone) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4-29 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟลอคและน้ำใสสามารถแสดงดังภาพที่ 4-32 และ 4-33



ภาพที่ 4-32 ผลของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในที่มีต่อประสิทธิภาพ

ในการแยกความขุ่น เมื่อมีการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับเข้ามาเพื่อเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกริยา โดยตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในเท่ากับ 50 60 และ 70 ซม.



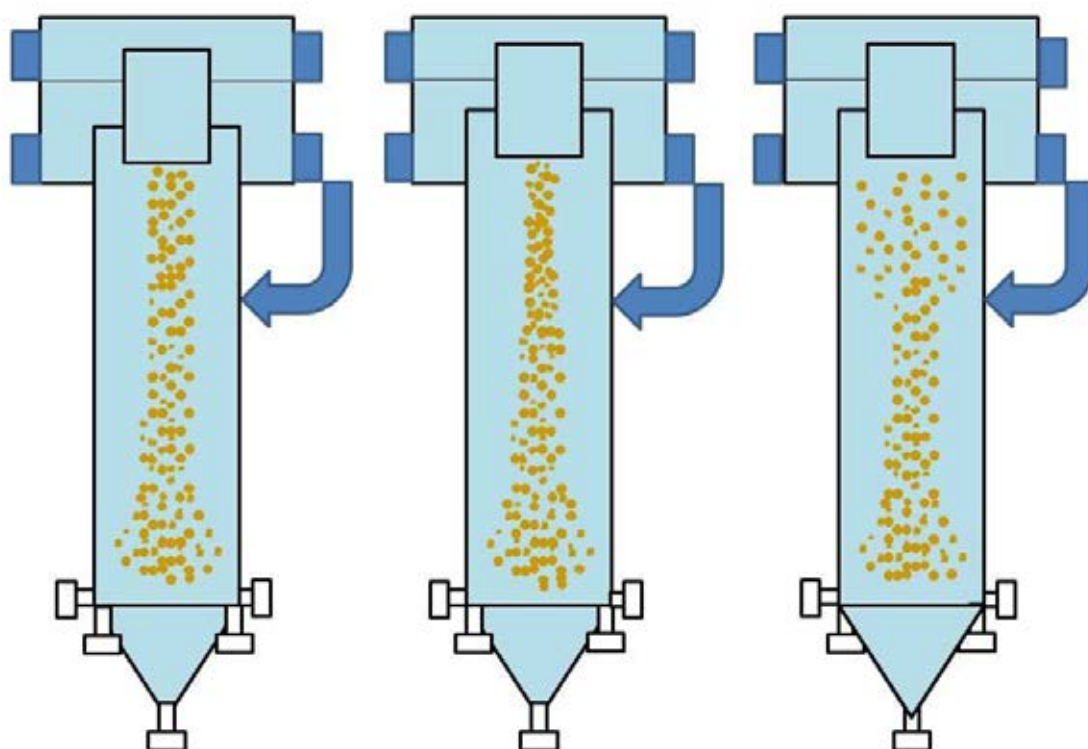
ภาพที่ 4-33 ผลของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในที่มีต่อประสิทธิภาพ

ในการแยกสารแขวนลอย เมื่อมีการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับเข้ามาเพื่อเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกริยา โดยตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในเท่ากับ 50 60 และ 70 ซม.

จากภาพที่ 4-32 และ 4-33 แสดงผลการศึกษาค่าผลของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายในที่มีต่อประสิทธิภาพในการแยกความขุ่นและสารแขวนลอย เมื่อมีการเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว กลับเข้ามาเพื่อเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกริยา ด้วยอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายใน 600 800 และ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งคิดเป็น 0.75 1 และ 1.25 เท่าของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ตามลำดับ ที่ตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในเท่ากับ 50 60 และ 70 เซนติเมตร

จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการแยกความขุ่นและสารแขวนลอยออกจากน้ำแปรผันตามอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายใน และมีประสิทธิภาพการแยกความขุ่นและสารแขวนลอยออกจากน้ำสูงสุดเท่ากับร้อยละ 65.71 และ 73.18 ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าประสิทธิภาพดังกล่าวมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดที่ไม่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนภายใน อาจเป็นการเพิ่มความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง ของเหลวบริเวณช่วงบนของถังปฏิกริยาไฮบริดจึงเกิดการไหลแบบหมุนวน (Vortex) โดยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่สูงขึ้นส่งผลให้ฟล็อกชนิดพิเศษซึ่งมี

อากาศแทรกอยู่ภายในที่เกิดขึ้นจากตอนล่างของถังปฏิกริยาไฮบริด สามารถเข้ามารวมกันบริเวณกลางได้มากขึ้นและแยกออกจากเฟสน้ำได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม หากอัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายในสูงเกินไป เช่นที่อัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายใน 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสลดต่ำลง เนื่องจากการความปั่นป่วนที่สูงเกินไปอาจรบกวนการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษได้ โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถแสดงดังภาพที่ 4-34



(ก) 600 ลิตรต่อชั่วโมง

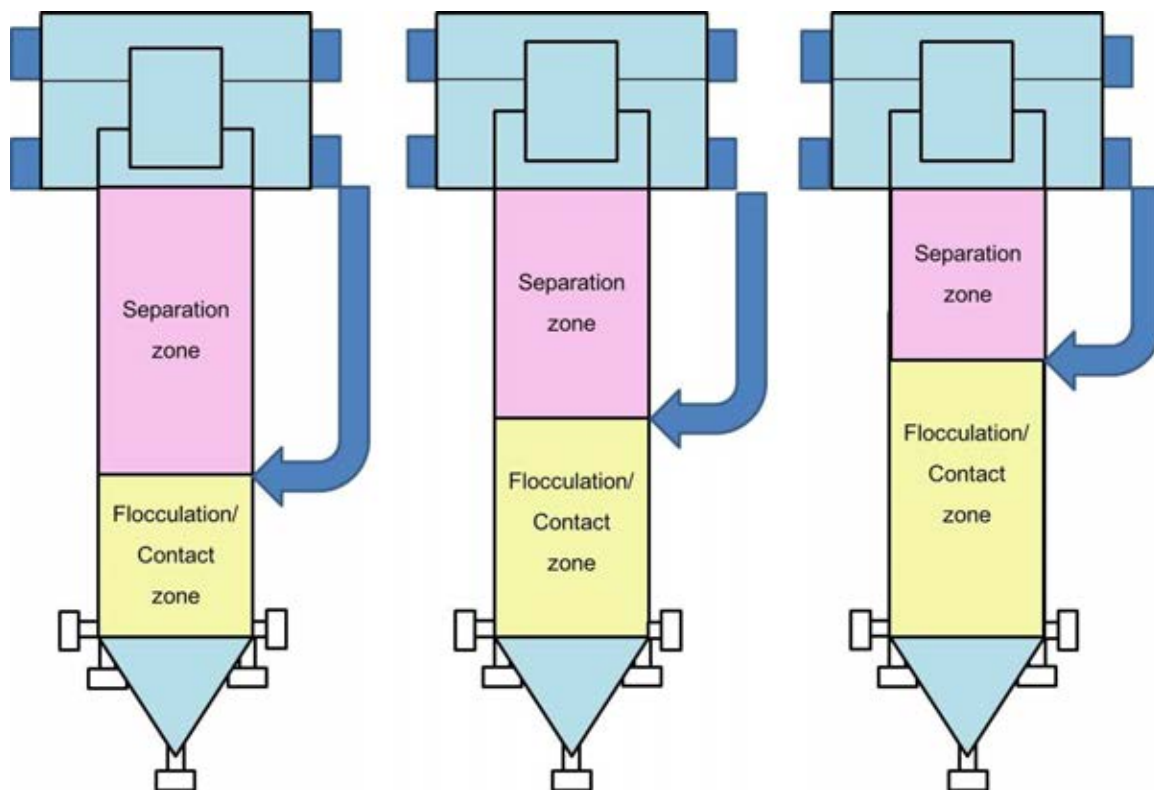
(ข) 800 ลิตรต่อชั่วโมง

(ค) 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง

ภาพที่ 4-34 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริดเมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายในค่าต่างๆ ที่ตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในสูงจากขอบด้านล่าง 70 ซม.

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในที่ตำแหน่งต่างๆ ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสแปรผันตามตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่า

ตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน 70 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสสูงสุด ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 4-35



(ก) 50 เซนติเมตร

(ข) 60 เซนติเมตร

(ค) 70 เซนติเมตร

ภาพที่ 4-35 บริเวณสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันหรือบริเวณสัมผัส และบริเวณแยก เมื่อมีการจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในที่ตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในต่างๆ จากขอบด้านล่างของถังปฏิกริยา

จากภาพที่ 4-35 จะเห็นได้ว่าภายในถังปฏิกริยาไฮบริดสามารถแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันหรือบริเวณสัมผัส (Flocculation/Contact zone) และบริเวณแยก (Separation zone) โดยสามารถอธิบายได้ในแง่ของระยะเวลาที่ภายในระบบได้ว่า ตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในอาจส่งผลต่อระยะเวลาที่สำหรับบริเวณฟล็อกคูเลชันและบริเวณแยก โดยตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในที่สูงขึ้น จะเป็นการเพิ่มระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน กล่าวคือระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ฟล็อกมีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น และรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น อีกทั้งฟองอากาศขนาดเล็กยังสามารถเข้าไปแทรกในโครงสร้างฟล็อกได้มากขึ้น ดังนั้น เมื่อระบบมีการเวียนน้ำกลับเข้ามาด้วยอัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายในและตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในที่เหมาะสมโดยพิจารณาที่บริเวณแยก

ช่วงบนของถังปฏิกริยาไฮบริด การจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในทำให้เกิดการไหลหมุนวน (Vortex) ส่งผลให้ฟล็อกชนิดพิเศษที่ถูกรวบรวมขึ้นมาจากด้านล่างของถังปฏิกริยาไฮบริดจะเข้ามารวมกัน บริเวณแกนกลางมากขึ้นและถูกแยกออกไปอย่างรวดเร็ว โดยไม่เกิดการแตกของฟล็อกและการรวมตัวกันของฟองอากาศ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ อาจกล่าวได้ว่า ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันอาจส่งผลต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน มากกว่าระยะเวลาสำหรับการแยกฟล็อกออกจากน้ำใส ทั้งนี้ ผลดังกล่าวสามารถอธิบายจากสมการสโตกได้ว่า การที่ฟล็อกมีขนาดใหญ่ขึ้นและความหนาแน่นต่ำลง จะส่งผลให้ความเร็วสุดท้ายของฟล็อกเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเวียนน้ำกลับซึ่งมีความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่เหมาะสม (ไม่ทำให้ฟล็อกแตก) จึงส่งผลให้ฟล็อกดังกล่าวมารวมกันบริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลนอย่างต่อเนื่องและแยกออกจากน้ำใสบริเวณผนังไฮโดรไซโคลนได้ดีขึ้น

จากผลการศึกษาในขั้นนี้สามารถสรุปได้ว่า การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาเพิ่มความเร็วน้ำในช่วงบนของถังปฏิกริยา ซึ่งเป็นบริเวณสำหรับการแยกฟล็อกซึ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายในออกจากน้ำ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสได้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดโดยไม่มี การเวียนน้ำกลับภายใน จากการศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดกับน้ำดิบสังเคราะห์ซึ่งมีความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ผลการศึกษาพบว่าสามารถบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยได้เท่ากับ ร้อยละ 64 และ 61.59 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสโดยการวัดเปอร์เซ็นต์การแยกความขุ่นและสารแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 65.71 และ 73.18 ตามลำดับ โดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา สามารถแสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ค่าพารามิเตอร์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา โดยทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยของวรศิริ เสียงสนัน (2552)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ (งานวิจัยนี้)	ค่าพารามิเตอร์ (วรศิริ เสียงสนัน, 2552)
อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (ลิตรต่อชั่วโมง)	800	1,000
อัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายใน (ลิตรต่อชั่วโมง)	800	-

จุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในจากด้านล่าง (เซนติเมตร)	70	-
อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ (ลิตรต่อชั่วโมง)	80	100-200

ตารางที่ 4-5 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา โดยทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยของวรศิริ เสียงสนั่น (2552)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ (งานวิจัยนี้)	ค่าพารามิเตอร์ (วรศิริ เสียงสนั่น, 2552)
สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าของของเหลวทั้งหมด	0.0059	0.0055-0.0104
ความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	50	70
ความเข้มข้นฟล็อกคูแลนต์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.3	0.1-0.2

4.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยทำการทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

การทดลองขั้นนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน โดยทำการทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน และเดินระบบด้วยสภาวะที่เหมาะสม เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถังปฏิกริยาไฮบริดมาประยุกต์ใช้กับโรงผลิตน้ำประปาในประเทศไทย

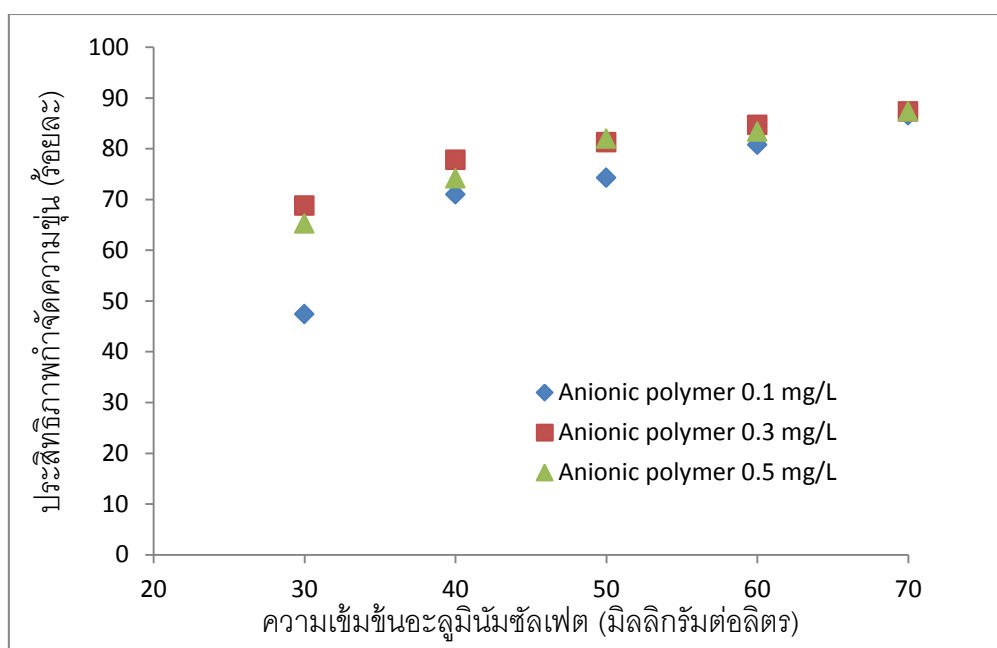
ทำการเก็บตัวอย่างน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสนเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2556 เพื่อมาวิเคราะห์คุณสมบัติ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยคุณสมบัติของน้ำดิบจริงแสดงดังตารางที่ 4-6 หลังจากนั้น น้ำดิบจริงดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีเวียนน้ำกลับภายใน โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ 80 ลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายใน 1 เท่าของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (800 ลิตรต่อชั่วโมง) ทั้งนี้ ความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) และฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) จะได้จากการทำการทดลองจารุเทศใหม่ เนื่องจากน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสนมีความขุ่นต่ำกว่าน้ำดิบสังเคราะห์ที่ได้ทำการศึกษาในเบื้องต้น

ตารางที่ 4-6 คุณสมบัติของน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน (15 มิถุนายน พ.ศ. 2556)

คุณสมบัติของน้ำดิบจริง	ค่าพารามิเตอร์
ความขุ่น (เอ็นทียู)	20-25
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	80-100
ค่าพีเอช	8.0
สภาพต่าง (mg/L as CaCO ₃)	70-80

4.3.5.1 ศึกษาความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์และฟล็อกคูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับการทดลองกับน้ำดิบจริง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) และฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) ที่เหมาะสมสำหรับน้ำดิบจริงซึ่งมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 4-4 ด้วยการทำการทดสอบ โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นอะลูมินัมซัลเฟตเป็น 30 40 50 60 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโพลีเมอร์ประจุลบ 0.1 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน 30 วินาที ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-36



ภาพที่ 4-36 ผลการศึกษาความเข้มข้นอะลูมินัมซัลเฟตและโพลีเมอร์ประจุลบ

ที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่นจากน้ำดิบจริงของโรงผลิตน้ำประปาสามเสน (จาร์เทสต์)

จากภาพที่ 4-36 ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นแปรผันตามความเข้มข้นอะลูมินัมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับในทุกความเข้มข้นโพลีเมอร์ประจุลบ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 87.33 เมื่อใช้อะลูมินัมซัลเฟตความเข้มข้น 70 มิลลิกรัมต่อลิตร และโพลีเมอร์ประจุลบความเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยน้ำหลังการบำบัดมีค่าพีเอชประมาณ 7

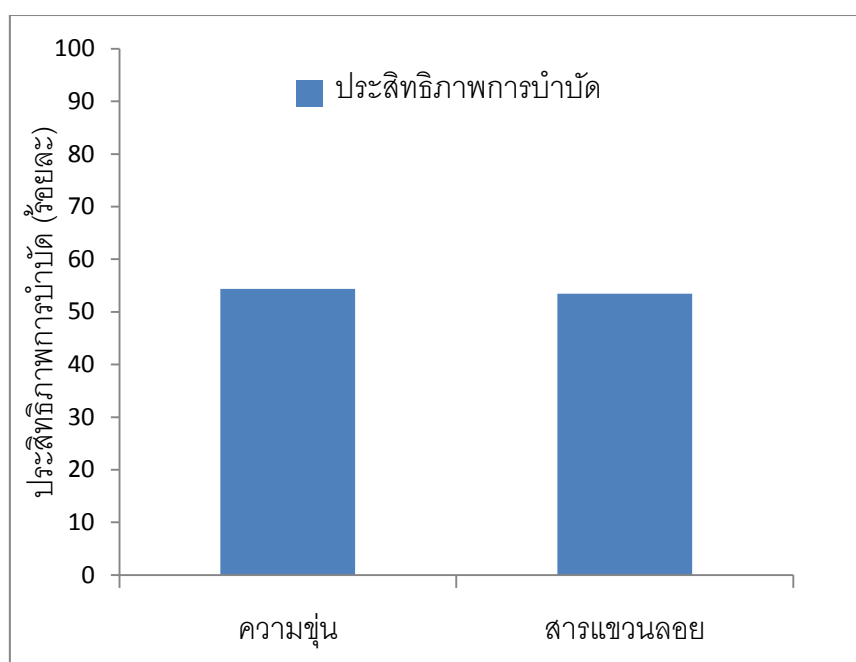
อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปริมาณการใช้อะลูมินัมซัลเฟต (โคแอกกูแลนต์) เปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์และน้ำดิบจริง ผลการศึกษาพบว่าน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสนมีความต้องการปริมาณอะลูมินัมซัลเฟตความเข้มข้นสูงถึง 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่น้ำดิบสังเคราะห์ซึ่งผสมระหว่างน้ำประปากับเบนโทไนท์ที่มีความต้องการปริมาณอะลูมินัมซัลเฟตเพียง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากน้ำดิบจริงตามธรรมชาติมีความขุ่นเพียง 20-25 เอ็นทียู จึงอาจต้องการปริมาณเป่าส้มฝัสดที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำดิบสังเคราะห์ซึ่งมีความขุ่น 50 เอ็นทียู ดังนั้นกระบวนการโคแอกกูเลชันจึงมีความต้องการปริมาณอะลูมินัมซัลเฟตที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มเป่าส้มฝัสดในการรวมตะกอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนอย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์คุณสมบัติที่ใช้ในการทดลองนี้ซึ่งเป็นน้ำดิบจริงตามธรรมชาติผลการศึกษายังพบว่ามีค่าพีเอชและสภาพต่าง (Alkalinity) สูงกว่าน้ำดิบสังเคราะห์ที่ทำการศึกษาในเบื้องต้น ดังนั้น กระบวนการทำลายเสถียรภาพและรวมตะกอนของน้ำดิบจริงจึงอาจมีความต้องการสารโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) ในปริมาณที่สูงกว่าเพื่อให้กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยการทำลายเสถียรภาพด้วยกลไกการตกตะกอนแบบกวาด (Sweep coagulation) ซึ่งขึ้นกับค่าพีเอช เป็นไปอย่างสมบูรณ์

ดังนั้น จากการทดลองครั้งนี้จึงเลือกใช้โคแอกกูแลนต์และฟล็อกคูแลนต์ ได้แก่ อะลูมินัมซัลเฟต และโพลีเมอร์ประจุลบ ความเข้มข้น 70 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เพื่อนำมาศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายในภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยทำการทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสนในขั้นต่อไป

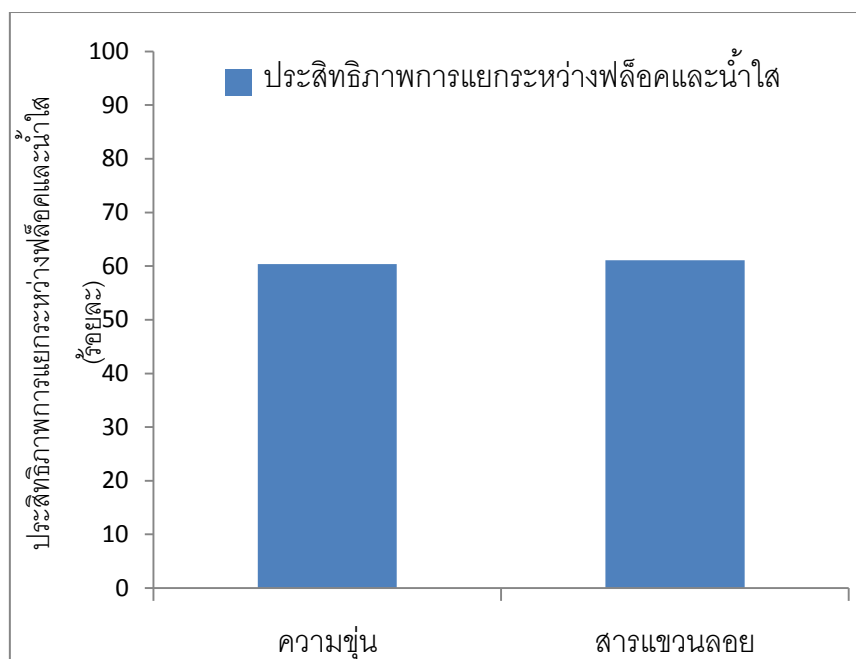
4.3.5.2 ศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยทำการทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

ในขั้นนี้จะทำการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน โดยทำการทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 4-4 ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองเบื้องต้นกับน้ำดิบสังเคราะห์ และใช้สารเคมีได้แก่ อะลูมินัมซัลเฟตและโพลิเมอร์ประจุลบ ซึ่งทราบความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.3.5.1 โดย สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน สามารถแสดงดังตารางที่ 4-5 ทั้งนี้ ผลการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 4-37 และ 4-38



ภาพที่ 4-37 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอย (Treatment efficiency)

จากน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน เมื่อเดินระบบด้วยถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม



ภาพที่ 4-38 ประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส (Separation efficiency)

ทำการทดลองน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน และเดินระบบด้วยถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

ในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริด เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมซึ่งแสดงดังตารางที่ 4-5 จากภาพที่ 4-37 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในแง่การบำบัดซึ่งเปรียบเทียบระหว่างน้ำดิบเริ่มต้นกับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วบริเวณผนังไฮโดรไซโคลน ผลการศึกษาพบว่า ถังปฏิกริยาไฮบริดมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยเท่ากับ ร้อยละ 54.35 และ 53.43 ตามลำดับ จากภาพที่ 4-38 สำหรับประสิทธิภาพในแง่การแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส ผลการศึกษาพบว่า ถังปฏิกริยาไฮบริดมีประสิทธิภาพในการแยกความขุ่นและสารแขวนลอยเท่ากับ ร้อยละ 60.38 และ 61.09 ตามลำดับ

นอกจากนี้ เมื่อเดินระบบภายใต้สภาวะเหมาะสมดังกล่าวและเก็บตัวอย่างบริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลนมาส่งด้วยกล้องจุลทรรศน์ ผลการศึกษาพบว่าสามารถสร้างฟล็อกชนิดพิเศษ (Aerated floc) ได้ แสดงดังภาพที่ 4-39 ซึ่งฟล็อกชนิดพิเศษที่เกิดขึ้นจะส่งผลดีต่อการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส เนื่องจากจะทำให้ฟล็อกมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ และถูกแยกออกไปด้วยกลไกของไฮโดรไซโคลนซึ่งอาศัยหลักความแตกต่างของความหนาแน่น



ภาพที่ 4-39 ฟล็อกชนิดพิเศษ ซึ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายใน (Aerated floc)

ผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) การใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา สามารถเดินระบบด้วยการไหลอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังสามารถสร้างฟล็อกชนิดพิเศษที่มีฟองอากาศแทรกอยู่ภายใน และการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใส นอกจากนี้การเวียนน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วเข้ามาเพิ่มความเร็วในถังปฏิกริยาไฮบริดยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอย และประสิทธิภาพในการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสอีกด้วย

2) งานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าถังปฏิกริยาไฮบริดสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำดิบสังเคราะห์ซึ่งมีความขุ่นค่อนข้างสูงและน้ำดิบจากธรรมชาติได้จริง และมีประสิทธิภาพดีพอควร อีกทั้งยังพบข้อดีเนื่องจากหากเปรียบเทียบระยะเวลาที่ระหว่างการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดและกระบวนการผลิตน้ำประปาทั่วไปพบว่า ถังปฏิกริยาไฮบริดที่เวียนน้ำกลับภายในใช้ระยะเวลาที่พักเพียง 40 วินาที ขณะที่กระบวนการผลิตน้ำประปาทั่วไปต้องใช้เวลาอย่างน้อย 30 นาที

3) เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดระหว่างกระบวนการไฮบริด และเทคนิคการทำให้อากาศละลายโดยทั่วไป (Conventional dissolved air flotation) พบว่าถังปฏิกริยาไฮบริดใช้สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดเพียง 0.0059 ในขณะที่เทคนิคการทำให้อากาศละลายโดยทั่วไปใช้สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดสูงถึง 0.1500-0.5000

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (In-line coagulation and flocculation processes)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาระบบการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ โดยใช้สแตติคมีกเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญเบื้องต้นก่อนเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาไฮบริด จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ สามารถสรุปได้ 2 ชนิด คือ ปัจจัยจากคุณสมบัติของน้ำดิบ และปัจจัยจากลักษณะการไหลของเฟสของไหลหรือตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamic parameters) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ปัจจัยจากคุณสมบัติของน้ำดิบ

งานวิจัยนี้พบว่าคุณสมบัติน้ำดิบ เช่น ความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นแปรผันตามความขุ่นเริ่มต้นของน้ำดิบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ความขุ่นเริ่มต้นน้ำดิบที่เพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มเป้าสัมผัส ส่งผลให้ตะกอนภายในเส้นท่อมมีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายขึ้น

2. ปัจจัยตัวแปรทางพลศาสตร์ของไหล

งานวิจัยนี้พบว่าลักษณะการไหลของของไหลส่งผลต่อกลไกการบำบัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ อัตราการไหลของน้ำดิบสังเคราะห์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity gradient : G) ระยะเวลาพัก (Detention time : T) ตัวแปร G.T ซึ่งก่อให้เกิดการรวมตะกอนในลักษณะต่างๆ และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น นอกจากนี้ ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความปั่นป่วนและระยะเวลาพักในลักษณะของการแปรผกผันคือค่า G.T โดยพบว่าระบบกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อสามารถกำจัดความขุ่นได้ดีที่สุดที่ค่า G.T ค่าหนึ่งๆ

ทั้งนี้ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล๊อคคูเลชันภายในเส้นท่อแสดงดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล๊อคคูเลชันภายในเส้นท่อ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล๊อคคูเลชันภายในเส้นท่อ	ค่าพารามิเตอร์
ความขุ่นน้ำดิบสังเคราะห์ (เอ็นทียู)	20-200
ความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	30-50
อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (ลิตรต่อชั่วโมง)	600
ความเร็วเกรเดียนท์ภายในไฮดรอลิกฟล๊อคคูเลเตอร์ (ต่อวินาที)	204.16
ระยะเวลาทักภายในไฮดรอลิกฟล๊อคคูเลเตอร์ (ต่อวินาที)	106.37
ตัวแปร G.T	21,715.57

5.1.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล๊อคคูเลชันภายในเส้นท่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์มิติ (Dimension analysis) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของของไหลด้วยการวิเคราะห์ถึงตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้อง และจัดให้เกิดเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติเพื่อใช้กำหนดคุณลักษณะของการไหล โดยในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์กลุ่มตัวแปรไร้มิติด้วยวิธีตามทฤษฎีบทกึ่งแฮมไพ (Buckingham Pi Theorem) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัด อีกทั้งยังทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองและประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าวอีกด้วย

จากทฤษฎีบทกึ่งแฮมไพ เมื่อพิจารณาจากการทดลอง พบว่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องมีทั้งหมด 7 ตัว ได้แก่ ความเข้มข้นของสารแขวนลอยเริ่มต้น (C_{SS}) ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w) อัตราเร็วของไหล (v) เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D) ความหนืดของน้ำ (μ) ความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาทัก (T) หลังจากนั้นจึงจัดเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติและหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (5-1)

$$\%Re = 0.105755 \left(\frac{C_{SS}}{\rho_w} \right)^{0.365399} (Reynold)^{0.149642} (GT)^{0.004286} \quad (5-1)$$

งานวิจัยนี้พบว่าการทำงานนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยสมการที่ (5-1) จะมีค่าแม่นยำในช่วงที่จำกัด และมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการบำบัดจริงโดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 20

5.1.3 การใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟลื้อคคูเลชัน และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดซึ่งเป็นไฮโดรไซโคลนทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 1.2 เมตร ปริมาตร 9.42 ลิตร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อกลไกที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด ได้แก่ ความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์ ความเข้มข้นฟลื้อคคูแลนต์ ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟลื้อคคูเลชัน อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ อัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายใน ตำแหน่งจุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน โดยทำการทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ซึ่งผลระหว่างน้ำประปากับเบนโทไนท์ให้ความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ซึ่งเป็นความขุ่นเฉลี่ยตลอดปีของโรงผลิตน้ำประปาสามเสน นอกจากนี้ยังทำการทดลองใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสนเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับโรงผลิตน้ำประปาในประเทศไทย

สำหรับการศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด โดยทำการทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ซึ่งมีความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู ผลการศึกษามีดังนี้

1. ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) และสารฟลื้อคคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) และระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟลื้อคคูเลชันเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งส่งผลกระทบต่อการจัดความขุ่น โดยระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟลื้อคคูเลชันที่ลดลงจะส่งผลให้มีความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์และฟลื้อคคูแลนต์เพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้พบว่าความเข้มข้นของอะลูมินัมซัลเฟต 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และโพลีเมอร์ประจุลบ 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการจัดความขุ่นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 96.75 ที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟลื้อคคูเลชัน 30 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟลื้อคคูเลชันที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริดหากเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1200 ลิตรต่อชั่วโมง โดยในกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการฟลื้อคคูเลชัน ความขุ่นจะถูกกำจัดด้วยกลไกการห่อหุ้มอนุภาคด้วย

ผลึก (Sweep coagulation) และกลไกการสร้างสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาค (Polymer bridging) ตามลำดับ

2. อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์จะส่งผลความเร็วของของไหลภายใต้ปฏิกิริยาไฮบริด อีกทั้งยังมีความสำคัญต่อกลไกในการสัมผัสและแยกภายในไฮโดรไซโคลอน ซึ่งหากอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ต่ำเกินไป (ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงต่ำเกินไป) จะส่งผลให้ระบบมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางไม่สูงพอที่จะแยกอนุภาคที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการไหลน้ำดิบด้วยอากาศเท่ากัน อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่สูงเกินไป ยังส่งผลกระทบต่อสัดส่วนอากาศ และอาจส่งผลต่อการสร้างฟล็อกซึ่งมีอากาศแทรกอยู่ภายใน

3. อัตราการไหลน้ำดิบด้วยอากาศมีความสำคัญต่อการสร้างฟล็อกชนิดพิเศษภายใต้ปฏิกิริยาไฮบริด และที่อัตราการไหลดังกล่าวควรมีปริมาณอากาศที่เหมาะสมต่อปริมาณอัตราการไหลเข้าของของเหลวทั้งหมด จึงจะส่งผลให้ระบบสามารถบำบัดและแยกฟล็อกจากน้ำใสได้ โดยในงานวิจัยนี้พบว่าอัตราการไหลน้ำดิบด้วยอากาศที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไฮบริดคือ อัตราการไหลน้ำดิบด้วยอากาศ 120 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 1,000 ลิตรต่อชั่วโมง โดยที่สภาวะดังกล่าวคิดเป็นสัดส่วนอากาศเท่ากับ 0.0059 ทั้งนี้ อาจกล่าวได้ว่าการเดินระบบด้วยปฏิกิริยาไฮบริดต้องการปริมาณน้ำดิบด้วยอากาศหรือปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับเดินระบบอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ค่าหนึ่งๆ

4. สำหรับแนวคิดในการปรับปรุงถึงปฏิกิริยาไฮบริด โดยการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว กลับมาเพิ่มความเร็วในช่วงบนของถังปฏิกิริยา ซึ่งเป็นบริเวณสำหรับการแยกฟล็อกซึ่งมีฟองอากาศขนาดเล็กแทรกอยู่ภายในออกจากน้ำ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสได้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ถังปฏิกิริยาไฮบริดโดยไม่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ผลการศึกษาพบว่าสามารถบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยได้เท่ากับ ร้อยละ 64 และ 61.59 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสโดยการวัดเปอร์เซ็นต์การแยกความขุ่นและสารแขวนลอยเท่ากับร้อยละ 65.71 และ 73.18 ตามลำดับ โดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้ถังปฏิกิริยาไฮบริด ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา แสดงดังตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา โดยทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (ลิตรต่อชั่วโมง)	800
อัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายใน (ลิตรต่อชั่วโมง)	800
จุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายใน (เซนติเมตร)	70
อัตราการไหลน้ำอิมิตัวด้วยอากาศ (ลิตรต่อชั่วโมง)	80
สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าของของเหลวทั้งหมด	0.0059
ความเข้มข้นโคแอกกูแลนต์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	50
ความเข้มข้นฟล็อกคูแลนต์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.3

สำหรับการศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด โดยทำการทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน ผลการศึกษามีดังนี้

1. การใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา สามารถเดินระบบด้วยการไหลอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังสามารถสร้างฟล็อกชนิดพิเศษซึ่งมีฟองอากาศแทรกอยู่ภายใน โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารแขวนลอยเท่ากับ ร้อยละ 54.35 และ 53.43 ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการแยกความขุ่นและสารแขวนลอยเท่ากับ ร้อยละ 60.38 และ 61.09 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำดิบจริงมีความขุ่นต่ำเพียง 20-25 เอ็นทียู จึงอาจส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเมื่อทำการทดลองกับน้ำดิบสังเคราะห์ซึ่งมีความขุ่นเริ่มต้น 50 เอ็นทียู

2. งานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าถังปฏิกริยาไฮบริดสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำธรรมชาติได้จริง อีกทั้งยังพบข้อดีเนื่องจากหากเปรียบเทียบระยะเวลาที่พักระหว่างกระบวนการไฮบริดและกระบวนการผลิตน้ำประปาทั่วไปพบว่า กระบวนการไฮบริดที่เวียนน้ำกลับภายในใช้ระยะเวลาที่พักระหว่าง 40 วินาที ขณะที่กระบวนการผลิตน้ำประปาทั่วไปต้องใช้เวลาน้อย 30 นาที

3. เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดระหว่างกระบวนการไฮบริด และเทคนิคการทำให้อากาศละลายโดยทั่วไป (Conventional dissolved air flotation) พบว่าถึงปฏิริยาไฮบริดใช้สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดเพียง 0.0059 ในขณะที่เทคนิคการทำให้อากาศละลายโดยทั่วไปใช้สัดส่วนอากาศต่ออัตราการไหลเข้าทั้งหมดสูงถึง 0.1500-0.5000

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

- ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะการจับตัวของไฮดรอลิกฟล็อกคูเลเตอร์ ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าลักษณะการจับตัวอาจส่งผลต่อพลศาสตร์ของไหลและการรวมตะกอนภายในเส้นท่อ

- ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับขนาดของตะกอนที่เกิดขึ้นเมื่อเดินระบบที่สภาวะต่างๆ

- ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมแบบแยกส่วนระหว่างการกวนเร็วและกวนช้าด้วยสแตติคмикเซอร์ และไฮดรอลิกฟล็อกคูเลเตอร์ ตามลำดับ

5.2.2 การทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยแบบจำลอง

- ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดด้วยแบบจำลองชนิดอื่น เช่น แบบจำลองซึ่งมีทฤษฎีพื้นฐานมาจากการไหลตามแนวยาว (Plug flow)

5.2.3 การใช้ถังปฏิริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลอน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา

- ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศที่สูงขึ้น เนื่องจากข้อจำกัดในงานวิจัยนี้คือ อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศมีค่าสูงสุดเพียง 120 ลิตรต่อชั่วโมง นอกจากนี้ น้ำอิมตัวด้วยอากาศยังมีลักษณะเป็นน้ำนมขุนขาวไม่คงที่ ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดและประสิทธิภาพการแยกระหว่างฟล็อกและน้ำใสในงานวิจัยนี้

- ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการไหลของของไหลภายในถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน โดยใช้โปรแกรมจำลองพลศาสตร์ของไหล (Computational fluid dynamics, CFD) เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและควบคุมให้ถังปฏิกริยาสามารถเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับขนาดของฟลอคภายในถังปฏิกริยาไฮบริด เพื่อศึกษาขนาดของฟลอคที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลให้สามารถสร้างฟลอคชนิดพิเศษอย่างมีประสิทธิภาพ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

การประปานครหลวง. สถานีสูบน้ำดิบสำแล [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.mwa.co.th/w3c/sam_lae.html [20 ธันวาคม 2551]

พิษณุพล สงวนนวล. 2543. การศึกษากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศที่ละลายน้ำเพื่อกำจัด
สารห่วยออกจากน้ำดิบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันสิน ตัณฑุลเวศน์. 2542. วิศวกรรมประปา. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธัญธรณ์ สวัสดิวงษ์. 2553. การใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพอด
แบบอนุกรมเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

วรศิริ เสียงสนั่น. 2549. กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชัน และการ
ลอยตะกอนในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วรศิริ เสียงสนั่น. 2552. กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชัน และ
การลอยตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- APHA., AWWA., and WEF. 2005. Standard Methods for The Examination of Water & Wastewater. 21st ed. Washington D.C: American Public Health Association.
- Borts, M.A., Ek'Skay, N.S., and Lur'e I.G. 1982. Koks I Khimiya. 6: 8-10. Cited in Roldan-villasana, E.J., and Williams R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering. 12: 1225-1243.
- Bradley, D. 1965. The Hydrocyclone. New York: Pergamon Press Ltd. อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น. 2552. กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชัน และการลอยตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Bratby, J. 2006. Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. 2nd ed. United States of America: IWA publishing.
- Bumrungsri, P. 2008. Hybrid Process: Hydrocyclone, Coagulation-Flocculation and Floatation in water treatment process. Génie des Procédés de l'Environnement. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. Environmental management, Graduate school, Chulalongkorn university.
- Dahlstrom, D. 1949. Cyclone operating factors and capacities on coal and refuse slurries. Trans. Am. Inst. Min. Eng. 184: 331– 344.
- Franks, G.V., Yates, P.D., Lambert, N.W.A., and Jameson, G.J. 2005. Aggregate size and density after shearing, implications for dewatering fine tailings with hydrocyclones. Int. J. Miner. Process. 77: 46-52.
- Kawamura, S. 2000. Integrated design and operation of water treatment facilities. 2nd ed. United States of America: John Wiley & Sons.
- Kelsall, D.F. 1952. A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone. Trans.Inst. Chem.Eng. 30: 87-104. อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น. 2552. กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชัน และการลอยตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- Kreith, F., Berger, S.A., Churchill, S.W., Tullis, J.P., White, F.M., McDonald, A.T., Kumar, A., Chen, J.C., Jr, T.F.I., Capobianchi, M., Kennedy, F.E., Booser, E.R., Wilcock, D.F., Boehm, R.F., Reitz, R.D., Sherif, S.A., and Bhusan, B. 1999. "Fluid Mechanics" Mechanical Engineering Handbook. USA: CRC Press LLC.
- Lawrence, K.W., Yung-Tse, H., and Nazih, K.H. 2005. Physicochemical Treatment Processes. USA: Humana Press Inc.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriott, P. 1993. Unit operations of chemical engineering. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Monod, J. 1991. Water Treatment Handbook. 6th ed. 1 vol. Paris: Degremont.
- Patrick, T.S., Sotiris, E.P., Judy, R., Rose, A., Graeme, B., and Gracie, M. 1998. Effect of shear schedule on particle size, density, and structure during flocculation in stirred tanks. Powder Technology. 97: 26-34.
- Wallace, L.B., Dabir, B., and Petty, C.A. 1980. Che Eng Commun. 7: 27-36. Cited in Roldan-villasana, E.J., and Williams, R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering. 12: 1225-1243.
- Plitt, L.R., and Lilge, E.O. 1967. Trans Soc Mining Eng. Dec: 435-439. Cited in Roldan-villasana, E.J., and Williams, R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering. 12: 1225-1243.
- Puprasert, C. 2004. Contribution a la mise au point d'application spécifique des hydrocyclones en traitement des eaux (In French). Thèse de Doctorat. Sciences des procédés-spécialité: Génie des Procédés de l'Environnement. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- Roldan-villasana, E.J., and Williams, R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering. 12: 1225-1243.
- Rushton, A., Ward, A.S., and Holdich, R.G. 2000. Solid-Liquid Filtration and Separation Technology. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH.
- Shun, D.L. 2007. Water and wastewater calculations manual. 2nd ed. USA: McGraw-Hill Companies, Inc.

- Svarovsky, L. 1980. Hydrocyclone. Pennsylvania: Rinehart and Winston Ltd. 30-43. Cited in Roldan-villasana, E.J., and Williams, R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering. 12: 1225-1243.
- Svarovsky, L. 1984. Hydrocyclone. Pennsylvania: Rinehart and Winston Ltd. 30-43. อ้างถึงใน วรศิริ เสียงสนั่น. 2552. กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟลอกกูเลชัน และการลอยตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., and Stensel, H.D. 2004. Wastewater engineering Treatment and reuse. 4th ed. Singapore: McGraw-Hill.
- Visman, J., and Hamza, H.A. 1973. CIM Bull. Feb. 78-81. Cited in Roldan-villasana, E.J., and Williams, R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering. 12: 1225-1243.
- Wallace, L.B., Dabir, B., and Petty, C.A. 1980. Che Eng Commun. 7: 27-36. Cited in Roldan-villasana, E.J., and Williams, R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering. 12: 1225-1243.
- Williams, R.A., and Roldan-Villasana, E.J. 1991. Advances in Measurement and Control of Colloidal Processes. Butterworth-Heinemann. Oxford. 18-34. Cited in Roldan-villasana, E.J., and Williams, R.A. 1999. Classification and breakage of flocs in hydrocyclones. Minerals Engineering. 12: 1225-1243.
- Woodfield, D., and Bickert, G. 2004. Separation of flocs in hydrocyclones-significance of floc breakage and floc hydrodynamics. Minerals Processing. 73: 239-249.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
เอกสารข้อมูลผลการทดลองของ
กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

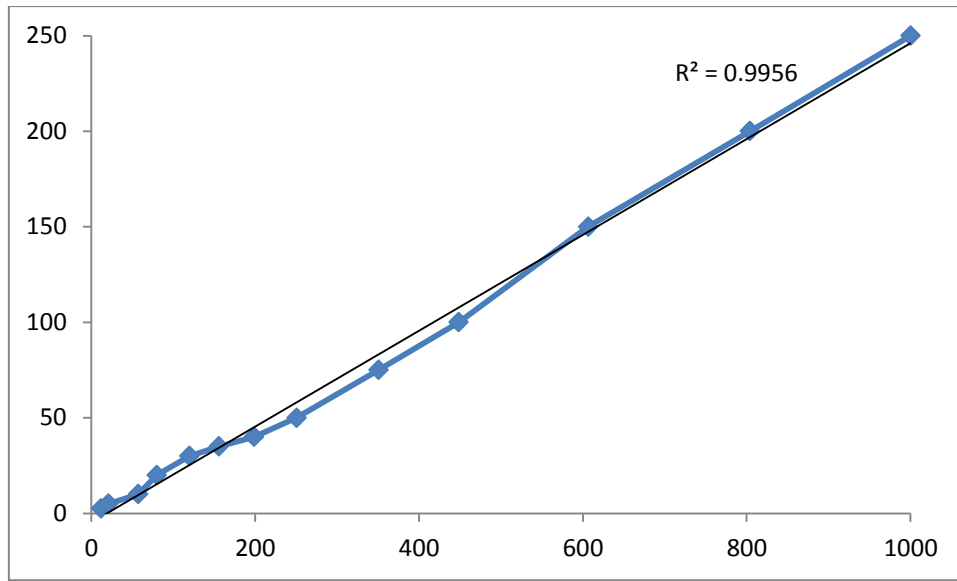
ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก-1 สารเคมีที่ใช้ในการทำการทดลองของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

1. เบนโทไนท์
2. สารโคแอกกูแลนต์ คือ อะลูมินัมซัลเฟต หรือสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$)

ตารางที่ ก-1.1 ผลของกราฟมาตรฐานความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเบนโทไนท์ต่างๆ

ความเข้มข้น (mg/L)	ความขุ่น (NTU)				
	1	2	3	4	ค่าเฉลี่ย
12	2.5	2.4	2.5	2.5	2.5
21	5	5	4.9	5	5
57	10	10	10	10	10
80	19.9	20	19.9	20	20
119.5	30	30	30	29.8	30
155.5	34.9	34.8	35.1	35	35
198.5	40	40	39.9	39.9	40
250.5	49.9	49.9	50.1	50	50
350.5	75.1	74.9	74.9	75	75
448.5	100	99.9	100	100	100
606.5	149.9	149.9	150.1	150.1	150
804	200	199.9	199.9	199.9	200
1000	250.1	249.9	249.9	250.1	250



ภาพที่ ก-1 กราฟมาตรฐานความชื้นของน้ำดิบสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเบนโทไนท์ต่างๆ

ภาคผนวก ก-2 ผลการศึกษาการคุณลักษณะของน้ำดิบสังเคราะห์ด้วยการตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling test)

ตารางที่ ก-2.1 ผลการทดลองการตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling test) ของน้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่นเริ่มต้นค่าต่างๆ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	ระยะเวลา (min)	ความขุ่นสุดท้าย (ความลึก 0.5 cm.) (NTU)	ความขุ่นสุดท้าย (ความลึก 1.8 cm.) (NTU)	ความขุ่นเฉลี่ย (NTU)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
20	0	20	20	20	0
	3	20	20	20	0
	6	20	20	20	0
	9	20	20	20	0
	12	20	20	20	0
	15	19	20	20	2.5
	18	19	20	20	2.5
	21	19	20	20	2.5
	24	19	20	20	2.5
	27	19	20	20	2.5
	30	19	19	19	5
	33	19	19	19	5
	36	19	19	19	5
	39	18	19	19	7.5
	42	18	19	19	7.5
	45	18	19	19	7.5
	48	18	19	19	7.5
	51	18	19	19	7.5
	54	18	19	19	7.5
	57	18	19	19	7.5
	60	18	19	19	7.5

ตารางที่ ก-2.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling test) ของน้ำดิบ
 สังกะระเห้ความขุ่นเริ่มต้นค่าต่างๆ

ความขุ่น เริ่มต้น (NTU)	ระยะเวลา (min)	ความขุ่นสุดท้าย (ความลึก 0.5 cm.) (NTU)	ความขุ่นสุดท้าย (ความลึก 1.8 cm.) (NTU)	ความขุ่น เฉลี่ย (NTU)	ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
50	0	50	50	50	0
	3	45	44	44.5	11
	6	44	42	43	14
	9	42	38	40	20
	12	40	35	37.5	25
	15	38	35	36.5	27
	18	37	35	36	28
	21	36	35	35.5	29
	24	35	35	35	30
	27	35	35	35	30
	30	35	35	35	30
	33	35	35	35	30
	36	35	35	35	30
	39	35	35	35	30
	42	35	35	35	30
	45	35	35	35	30
	48	35	35	35	30
	51	35	35	35	30
	54	35	35	35	30
	57	35	35	35	30
	60	35	35	35	30

ตารางที่ ก-2.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling test) ของน้ำดิบ
 สังกะระห์ความขุ่นเริ่มต้นค่าต่างๆ

ความขุ่น เริ่มต้น (NTU)	ระยะเวลา (min)	ความขุ่นสุดท้าย (ความลึก 0.5 cm.) (NTU)	ความขุ่นสุดท้าย (ความลึก 1.8 cm.) (NTU)	ความขุ่น เฉลี่ย (NTU)	ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
200	0	200	200	200	0
	3	183	163	173	13.5
	6	177	162	169.5	15.25
	9	172	162	167	16.5
	12	167	161	164	18
	15	163	161	162	19
	18	156	153	154.5	22.75
	21	145	151	148	26
	24	135	146	140.5	29.75
	27	133	141	137	31.5
	30	131	140	135.5	32.25
	33	124	136	130	35
	36	123	132	127.5	36.25
	39	123	130	126.5	36.75
	42	123	129	126	37
	45	123	128	125.5	37.25
	48	123	127	125	37.5
	51	123	126	124.5	37.75
	54	123	125	124	38
	57	122	122	122	39
	60	120	120	120	40

**ภาคผนวก ก-3 ผลการศึกษาการกำจัดความขุ่นจากน้ำดิบสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ
โคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยการทำจาร์เทสต์**

**ตารางที่ ก-3.1 ผลการทดลองการกำจัดความขุ่นจากน้ำดิบสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ
โคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยการทำจาร์เทสต์**

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	ความเข้มข้น อะลูมินัมซัลเฟต (mg/L)	ความขุ่นสุดท้าย (NTU)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
20	10	1.63	91.85
	20	1.56	92.2
	30	1.4	93
	40	1.23	93.85
	50	1.1	94.5
	60	1.4	93
50	10	1.94	96.12
	20	1.73	96.54
	30	1.5	97
	40	1.35	97.3
	50	1.51	96.98
	60	1.75	96.5
200	10	3.48	98.26
	20	1.68	99.16
	30	1.22	99.39
	40	1.88	99.06
	50	2.33	98.84
	60	2.61	98.70

ภาคผนวก ก-4 ผลการศึกษาการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จาก
กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยการทำจาร์เทสต์

ตารางที่ ก-4.1 ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่าน
กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันโดยการทำจาร์เทสต์

ความขุ่น เริ่มต้น (NTU)	ระยะเวลา (min)	ความลึกจุดเก็บน้ำ ตัวอย่าง (H) (m)	H/T (m/hr)	ความขุ่น สุดท้าย (NTU)	ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
20	10	0.6	3.6	12.2	39
	20	0.6	1.8	8.94	55.3
	30	0.6	1.2	7.06	64.7
	40	0.6	0.9	5.59	72.05
	50	0.6	0.72	4.98	75.1
	60	0.6	0.6	4.48	77.6
50	10	0.6	3.6	18.6	62.8
	20	0.6	1.8	13.8	72.4
	30	0.6	1.2	10.3	79.4
	40	0.6	0.9	9.03	81.94
	50	0.6	0.72	7.43	85.14
	60	0.6	0.6	6.45	87.1
200	10	0.6	3.6	43.6	78.2
	20	0.6	1.8	21.1	89.45
	30	0.6	1.2	16.5	91.75
	40	0.6	0.9	14.1	92.95
	50	0.6	0.72	10.5	94.75
	60	0.6	0.6	9.24	95.38

ภาคผนวก ก-5 การคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ ระยะเวลาพัก และตัวแปร $G.t$ ของการทำจาร์เทสต์

ตารางที่ ก-5.1 ตารางแสดงผลการคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ ระยะเวลาพัก และตัวแปร $G.t$ ของสำหรับการทำจาร์เทสต์

Rapid mixing (200 รอบต่อนาที)			Slow mixing (60 รอบต่อนาที)		
$G_{\text{rapid}} (s^{-1})$	$t_{\text{rapid}} (s)$	$G.t_{\text{rapid}}$	G_{slow}	t_{slow}	$G.t_{\text{slow}}$
340	60	20,400	45	3600	54,000

วิธีการคำนวณสำหรับการกวนเร็วด้วยจาร์เทสต์

1. ความเร็วเกรเดียนท์ของการกวนเร็วด้วยจาร์เทสต์ (Reynolds และ Richards, 1996; Rushton, 1952; Rushton และคณะ, 1950) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$G_{\text{rapid}} = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

ทำการกวนเร็วด้วยความเร็วรอบ n รอบต่อนาที และเป็นการกวนผสมแบบปั่นป่วนด้วยใบพัด ดังนั้นกำลังที่ใช้ในการกวนผสม (P) จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P = K_T n^3 D_i^5 \rho$$

โดย K_T = ค่าคงที่ของใบพัดชนิด Flat paddle (two blade) สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน = 1.70

n = ความเร็วรอบในการกวนผสม (รอบต่อนาที)

D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (เมตร)

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว

วิธีการคำนวณสำหรับการกวนช้าด้วยจาร์เทสต์

1. ความเร็วเกรเดียนท์ของการกวนช้าด้วยจาร์เทสต์ (Svarovsky, 2000) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$G_{\text{slow}} = \sqrt{\frac{C_D \rho (v_p - v)^3 A_p}{2V\mu}}$$

- โดย C_D = สัมประสิทธิ์แรงต้านทานของใบพัด
 ρ = ความหนาแน่นของของเหลว
 $v_p - v$ = ความสัมพันธ์ระหว่างของเหลวกับใบพัด
 A_p = Projected area
 V = ปริมาตรของของเหลวภายในบีกเกอร์
 μ = ความหนืดของของเหลว

ภาคผนวก ก-6 การคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ ระยะเวลาพัก และตัวแปร G.t ของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ตารางที่ ก-6.1 ตารางแสดงผลการคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ ระยะเวลาพัก และตัวแปร G.t ของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

อัตราการไหล (L/hr)	Static mixer			Hydraulic flocculator		
	G_{static} (s^{-1})	t_{static} (s)	G.t	$G_{\text{hydraulic}}$ (s^{-1})	$t_{\text{hydraulic}}$ (s)	G.t
100	1,548.47	1.64	2,540.88	83.35	638.13	53,189.37
200	2,189.87	0.82	1,796.68	117.88	319.06	37,610.56
400	3,096.94	0.41	1,270.44	166.70	159.53	26,594.69
600	3,792.96	0.27	1,037.31	204.16	106.37	21,715.57
800	4,379.73	0.21	898.34	235.76	79.77	18,805.28

วิธีการคำนวณสำหรับการกวนเร็วด้วยสแตติคมีกเซอร์

1. ความเร็วเกรเดียนท์ภายในสแตติคมีกเซอร์ (Bratby, 2006) สามารถคำนวณได้ตั้งสมการต่อไปนี้

$$G_{static\ mixer} = \sqrt{\frac{\gamma h_L}{T\mu}}$$

โดย h_L สามารถคำนวณได้จากสมการของดาร์ซี-ไวส์บาซ (Darcy-Weisbach) (David, 2011: Amirtharaja และคณะ, 2001) คือ

$$h_L = f_{static\ mixer} \frac{L_{static\ mixer}}{D_{static\ mixer}} \frac{v^2}{2g}$$

โดย f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของสแตติคมิกเซอร์ (Friction factor) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุและค่า Reynold's Number ซึ่งขึ้นกับอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ ค่า f ที่ ชนิดท่อและค่า Reynold's Number ต่างๆ แสดงดังภาพที่ ก-2

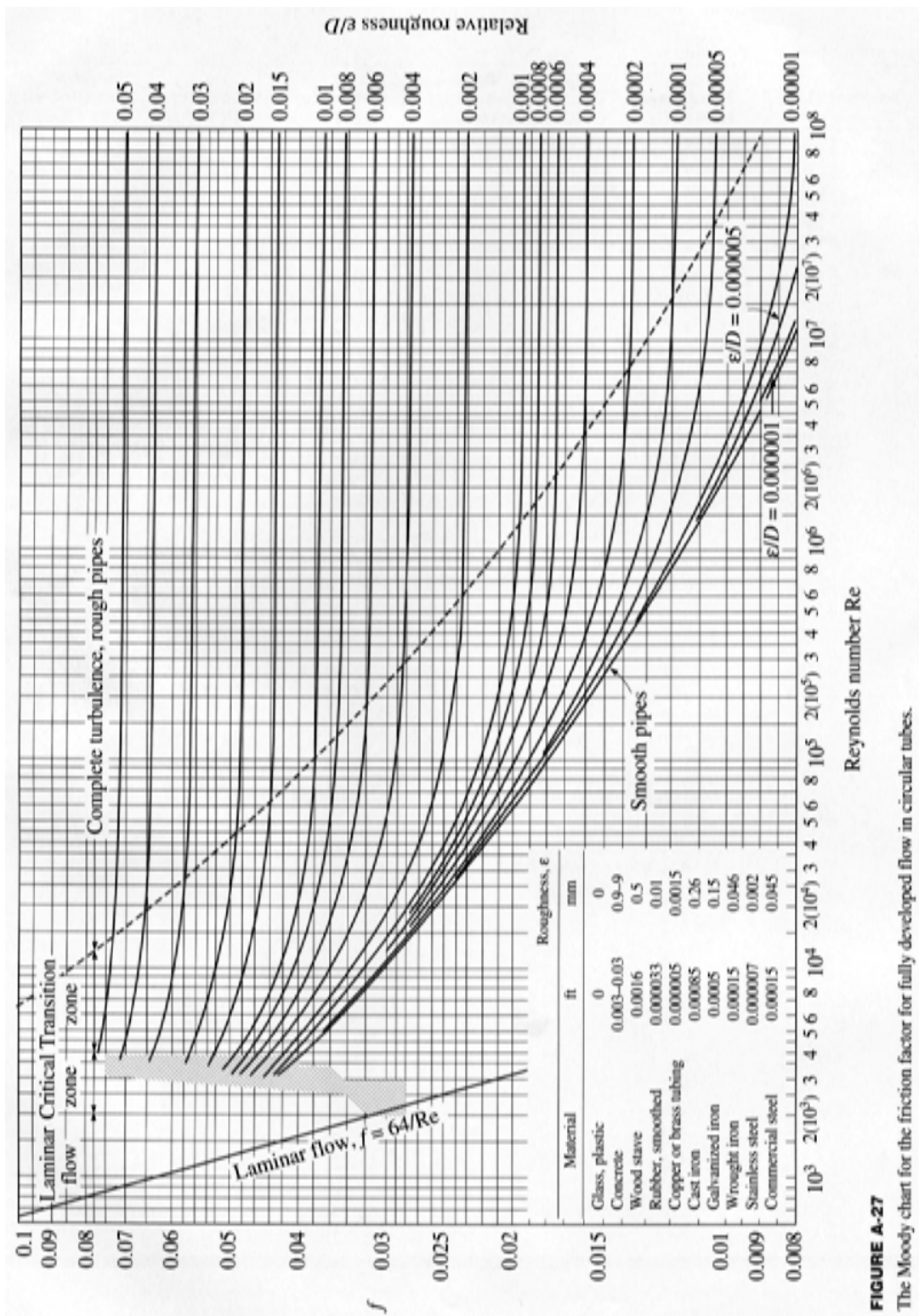


FIGURE A-27

The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

ภาพที่ ก-2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเส้นท่อ

2. ความยาวของสแตติคมิคเซอร์ ($L_{static\ mixer}$) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$L_{static\ mixer} = (1.5 \times D_{static\ mixer} \times N) - \frac{1}{2}(N - 1)D_{static\ mixer}$$

โดย N คือ จำนวนสแตติคมิคเซอร์ที่ขึ้นกับการออกแบบ

3. ระยะเวลาพักของสแตติคมิคเซอร์ ($t_{static\ mixer}$)

$$t_{static\ mixer} = \frac{L_{static\ mixer}}{v_{static\ mixer}}$$

โดย $v_{static\ mixer}$ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของเหลว (Q) กับพื้นที่หน้าตัดของสแตติคมิคเซอร์ (A) ดังนี้

$$v_{static\ mixer} = \frac{Q}{A}$$

วิธีการคำนวณสำหรับการกรวนช้าด้วยไฮดรอลิคฟลื้อคูลเตเตอร์ (Bratby, 2006) สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

1. ความเร็วเกรเดียนท์ภายในไฮดรอลิคฟลื้อคูลเตเตอร์

$$G = \sqrt{\frac{\rho g Q H}{V \mu}}$$

ซึ่ง H สามารถหาได้จากสมการของดาร์ซี-ไวส์บาซ (Darcy-Weisbach) เช่นกัน คือ

$$H = f_{pipe} \frac{L_{pipe}}{D_{pipe}} \frac{v_{pipe}^2}{2g}$$

ซึ่ง f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของเส้นท่อ (Friction factor) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดท่อและค่า Reynold's Number ค่า f ที่ ชนิดท่อและค่า Reynold's Number ต่างๆ แสดงดังภาพที่ ก-2

2. ระยะเวลาที่ภายในไฮดรอลิกฟลักคูเลเตอร์ ($t_{hydraulic}$)

$$t_{hydraulic} = \frac{V}{Q}$$

ซึ่ง Q คือ อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) และ V คือ ปริมาตรของไฮดรอลิกฟลักคูเลเตอร์ (ลูกบาศก์เมตร)

ภาคผนวก ก-7 ผลการศึกษาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ (G) ระยะเวลาพัก (T) และตัวแปร G.t ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ตารางที่ ก-7.1 ผลการทดลองผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์ (G) ระยะเวลาพัก (T) และตัวแปร G.t ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (พิจารณาผลกระทบของความเร็วเกรเดียนท์และระยะเวลาพักภายในไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที)

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ความเร็วเกรเดียนท์ $G_{\text{hydraulic}}$ (s^{-1})	ระยะเวลาพัก $t_{\text{hydraulic}}$ (s)	Camp number G.t	ความขุ่นขาเข้าจริง (NTU)	ความขุ่นขาออก (NTU)	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น (%)
20	100	83.35	638.13	53,189.37	20	4.52	77.40
	200	117.88	319.06	37,610.56	20	5.06	74.73
	400	166.70	159.53	26,594.69	17	3.26	81.03
	600	204.16	106.37	21,715.57	18	3.19	82.31
	800	235.76	79.77	18,805.28	17	3.43	79.84
50	100	83.35	638.13	53,189.37	52	4.62	91.12
	200	117.88	319.06	37,610.56	48	7.86	83.67
	400	166.70	159.53	26,594.69	52.5	6.65	87.34
	600	204.16	106.37	21,715.57	55	5.38	90.23
	800	235.76	79.77	18,805.28	45	5.27	88.30
200	100	83.35	638.13	53,189.37	200	6.67	96.67
	200	117.88	319.06	37,610.56	202	15.9	92.13
	400	166.70	159.53	26,594.69	200	12.1	93.95
	600	204.16	106.37	21,715.57	200	11.5	94.25
	800	235.76	79.77	18,805.28	195	12.1	93.79

ภาคผนวก ก-8 ผลการศึกษาการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ตารางที่ ก-8.1 ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราการน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
20 (ความขุ่นจริง 20 NTU)	100	3	23	5.1	74.5
		6	11.5	5.07	74.65
		9	7.67	5.04	74.8
		12	5.75	4.99	75.05
		15	4.6	4.72	76.4
		18	3.83	4.36	78.2
		21	3.29	4.28	78.6
		24	2.88	4.12	79.4
		27	2.56	4.07	79.65
		30	2.3	4.02	79.9
		33	2.10	3.86	80.7
		36	1.92	3.79	81.05
		39	1.76	3.64	81.5
		42	1.64	3.37	83.15
		45	1.53	3.23	83.85
		48	1.44	3.18	84.1
51	1.35	3.16	84.2		
54	1.28	3.14	84.3		
57	1.21	2.93	85.35		
60	1.15	2.83	85.85		
600		0.11	2.5	87.5	

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
20 (ความขุ่นจริง 20 NTU)	200	3	23	18	10
		6	11.5	15	25
		9	7.67	11.3	43.5
		12	5.75	7.31	63.45
		15	4.6	6.97	65.18
		18	3.83	5.93	70.35
		21	3.29	5.74	71.32
		24	2.88	5	75
		27	2.56	4.73	76.35
		30	2.3	4.61	76.95
		33	2.10	4.21	78.95
		36	1.92	4.1	79.5
		39	1.76	3.87	80.65
		42	1.64	3.82	80.9
		45	1.53	3.02	84.9
		48	1.44	2.96	85.2
51	1.35	2.93	85.35		
54	1.28	2.6	87		
57	1.21	2.56	87.2		
60	1.15	2.47	87.65		

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
20 (ความขุ่นจริง 17 NTU)	400	3	23	11.6	31.76
		6	11.5	8.15	52.06
		9	7.67	6.82	59.88
		12	5.75	5.76	69.12
		15	4.6	4.81	71.71
		18	3.83	4.13	75.71
		21	3.29	3.84	77.41
		24	2.88	3.63	78.64
		27	2.56	3.33	80.41
		30	2.3	2.8	83.53
		33	2.10	2.77	83.71
		36	1.92	2.68	84.24
		39	1.76	2.52	85.18
		42	1.64	2.35	86.18
		45	1.53	2.25	86.76
		48	1.44	2.15	87.35
51	1.35	2.03	88.05		
54	1.28	1.87	89		
57	1.21	1.81	89.35		
60	1.15	1.72	89.88		

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
20 (ความขุ่นจริง 18 NTU)	600	3	23	12	33.33
		6	11.5	7.39	58.94
		9	7.67	6.59	63.39
		12	5.75	5.38	70.11
		15	4.6	4.69	73.94
		18	3.83	4.28	76.22
		21	3.29	3.62	79.91
		24	2.88	3.03	83.17
		27	2.56	2.92	83.78
		30	2.3	2.63	85.39
		33	2.10	2.58	85.67
		36	1.92	2.54	85.89
		39	1.76	2.53	85.94
		42	1.64	2.33	87.98
		45	1.53	2.12	88.22
		48	1.44	2	88.89
51	1.35	1.91	89.40		
54	1.28	1.82	89.92		
57	1.21	1.66	90.78		
60	1.15	1.57	91.28		

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
20 (ความขุ่นจริง 17 NTU)	800	3	23	16.7	1.76
		6	11.5	13	23.53
		9	7.67	9.52	44
		12	5.75	8.34	50.97
		15	4.6	6.24	63.29
		18	3.83	5.995	64.74
		21	3.29	4.56	73.21
		24	2.88	3.9	77.06
		27	2.56	3.62	78.71
		30	2.3	2.93	82.75
		33	2.10	2.8	83.53
		36	1.92	2.795	83.56
		39	1.76	2.475	85.44
		42	1.64	2.42	85.76
		45	1.53	2.335	86.26
		48	1.44	2.26	86.71
51	1.35	2.08	87.76		
54	1.28	1.88	88.97		
57	1.21	1.79	89.5		
60	1.15	1.7	90		

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
50 (ความขุ่นจริง 52 NTU)	100	3	23	6.38	87.73
		6	11.5	6.32	87.85
		9	7.67	5.97	88.51
		12	5.75	5.9	88.65
		15	4.6	5.71	89.02
		18	3.83	5.41	89.60
		21	3.29	5.13	90.13
		24	2.88	4.88	90.62
		27	2.56	4.76	90.85
		30	2.3	4.62	91.12
		33	2.10	4.49	91.37
		36	1.92	4.32	91.69
		39	1.76	4.15	92.01
		42	1.64	3.99	92.33
		45	1.53	3.53	93.21
		48	1.44	3.47	93.33
		51	1.35	3.3	93.65
54	1.28	3.28	93.69		
57	1.21	3.2	93.85		
60	1.15	3.15	93.94		
600		0.11	2.86	94.5	

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
50 (ความขุ่นจริง 48 NTU)	200	3	23	37	22.92
		6	11.5	23.5	51.04
		9	7.67	19.2	60.00
		12	5.75	14.4	70.00
		15	4.6	12.3	74.38
		18	3.83	12.2	74.58
		21	3.29	11.2	76.67
		24	2.88	9.42	80.38
		27	2.56	8.85	81.56
		30	2.3	7.89	83.57
		33	2.10	7.56	84.25
		36	1.92	7.23	84.94
		39	1.76	6.95	85.52
		42	1.64	6.36	86.75
		45	1.53	6.32	86.83
		48	1.44	6.05	87.40
51	1.35	5.78	87.96		
54	1.28	5.4	88.75		
57	1.21	5.4	88.75		
60	1.15	4.69	90.23		

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
50 (ความขุ่นจริง 52.5 NTU)	400	3	23	34.8	33.71
		6	11.5	22.47	57.21
		9	7.67	15	71.43
		12	5.75	12.4	76.38
		15	4.6	10.5	80
		18	3.83	8.89	83.07
		21	3.29	7.55	85.62
		24	2.88	7.28	86.13
		27	2.56	6.3	88
		30	2.3	6.05	88.48
		33	2.10	5.37	89.77
		36	1.92	5.16	90.17
		39	1.76	5.06	90.37
		42	1.64	4.76	90.93
		45	1.53	4.57	91.30
		48	1.44	4.46	91.50
51	1.35	3.94	92.50		
54	1.28	3.6	93.14		
57	1.21	3.59	93.16		
60	1.15	3.48	93.36		

ตารางที่ ก-8 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
50 (ความขุ่นจริง 55 NTU)	600	3	23	19.30	64.91
		6	11.5	13.50	75.45
		9	7.67	11.10	79.82
		12	5.75	8.82	83.96
		15	4.6	7.68	86.04
		18	3.83	7.11	87.07
		21	3.29	6.45	88.28
		24	2.88	6.00	89.09
		27	2.56	5.63	89.76
		30	2.3	5.50	90.00
		33	2.10	5.46	90.07
		36	1.92	5.34	90.29
		39	1.76	4.94	91.02
		42	1.64	4.54	91.75
		45	1.53	4.48	91.85
		48	1.44	4.42	91.96
51	1.35	4.30	92.18		
54	1.28	4.20	92.36		
57	1.21	3.86	92.98		
60	1.15	3.38	93.86		

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
50 (ความขุ่นจริง 45 NTU)	800	3	23	26.27	41.63
		6	11.5	16.35	63.67
		9	7.67	12.80	71.56
		12	5.75	9.85	78.11
		15	4.6	9.55	78.78
		18	3.83	7.33	83.71
		21	3.29	6.50	85.56
		24	2.88	5.82	87.07
		27	2.56	5.02	88.84
		30	2.3	4.80	89.33
		33	2.10	4.33	90.38
		36	1.92	3.99	91.14
		39	1.76	3.81	91.54
		42	1.64	3.68	91.82
		45	1.53	3.47	92.29
		48	1.44	3.21	92.87
51	1.35	2.80	93.78		
54	1.28	2.76	93.87		
57	1.21	2.73	93.93		
60	1.15	2.57	94.29		

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
200 (ความขุ่นจริง 200 NTU)	100	3	23	7.33	96.34
		6	11.5	6.98	96.51
		9	7.67	6.95	96.53
		12	5.75	6.93	96.54
		15	4.6	6.91	96.55
		18	3.83	6.87	96.57
		21	3.29	6.82	96.59
		24	2.88	6.56	96.72
		27	2.56	6.49	96.76
		30	2.3	6.49	96.76
		33	2.10	6.45	96.78
		36	1.92	6.44	96.78
		39	1.76	6.39	96.81
		42	1.64	6.37	96.82
		45	1.53	6.31	96.85
		48	1.44	6.25	96.88
		51	1.35	6.2	96.90
54	1.28	6	97.00		
57	1.21	5.92	97.04		
60	1.15	5.14	97.43		
600		600	0.011	0.2	99.9

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
200 (ความขุ่นจริง 202 NTU)	200	3	23	108	46.53
		6	11.5	44.8	77.82
		9	7.67	31.6	84.36
		12	5.75	25.8	87.23
		15	4.6	21.4	89.41
		18	3.83	19.8	90.20
		21	3.29	19.3	90.45
		24	2.88	17.2	91.49
		27	2.56	17	91.58
		30	2.3	16.5	91.83
		33	2.10	15.3	92.43
		36	1.92	14.1	93.02
		39	1.76	14	93.07
		42	1.64	13.5	93.32
		45	1.53	13.2	93.47
		48	1.44	12.7	93.71
51	1.35	12.3	93.91		
54	1.28	12.1	94.01		
57	1.21	11.2	94.46		
60	1.15	11	94.55		

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
200 (ความขุ่นจริง 200 NTU)	400	3	23	103	48.50
		6	11.5	38.2	80.90
		9	7.67	29.5	85.25
		12	5.75	24.8	87.60
		15	4.6	20.6	89.70
		18	3.83	18.5	90.75
		21	3.29	15.7	92.15
		24	2.88	13.6	93.20
		27	2.56	12.6	93.70
		30	2.3	12.4	93.80
		33	2.10	12.2	93.90
		36	1.92	11.7	94.15
		39	1.76	11.6	94.20
		42	1.64	11.5	94.25
		45	1.53	11	94.50
		48	1.44	9.65	95.18
51	1.35	9.34	95.33		
54	1.28	9.15	95.43		
57	1.21	8.45	95.78		
60	1.15	8.81	95.60		

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
200 (ความขุ่นจริง 200 NTU)	600	3	23	63.2	68.40
		6	11.5	32.7	83.65
		9	7.67	27	86.50
		12	5.75	22	89.00
		15	4.6	18.1	90.95
		18	3.83	14.8	92.60
		21	3.29	13.4	93.30
		24	2.88	12.7	93.65
		27	2.56	11.7	94.15
		30	2.3	11.3	94.35
		33	2.10	10.4	94.80
		36	1.92	9.69	95.16
		39	1.76	8.6	95.70
		42	1.64	8.44	95.78
		45	1.53	8.3	95.85
		48	1.44	7.78	96.11
51	1.35	7.61	96.20		
54	1.28	7.47	96.27		
57	1.21	7.13	96.44		
60	1.15	6.64	96.68		

ตารางที่ ก-8.1 (ต่อ) ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ความสูงเฉลี่ย 1.15 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
200 (ความขุ่นจริง 195 NTU)	800	3	23	75.9	61.08
		6	11.5	35.3	81.90
		9	7.67	27.8	85.74
		12	5.75	24.9	87.23
		15	4.6	19.5	90.00
		18	3.83	16.2	91.69
		21	3.29	15.6	92.00
		24	2.88	12.9	93.38
		27	2.56	12.7	93.49
		30	2.3	11.7	94.00
		33	2.10	10.7	94.51
		36	1.92	9.92	94.91
		39	1.76	9.81	94.97
		42	1.64	9.76	94.99
		45	1.53	9.49	95.13
		48	1.44	9.1	95.33
51	1.35	8.92	95.43		
54	1.28	8.82	95.48		
57	1.21	7.9	95.95		
60	1.15	7.53	96.14		

ตารางที่ ก-8.2 ผลการทดลองการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) จากน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันด้วยวิธีจาร์เทสต์

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	ระยะเวลา (min)	อัตราน้ำล้นผิว (m/hr)	ความขุ่นสุดท้ายเฉลี่ย ที่ ความสูงเฉลี่ย 0.6 ม. (NTU)	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเฉลี่ย (%)
20	10	3.6	12.2	39
	20	1.8	8.94	55.3
	30	1.2	7.06	64.7
	40	0.9	5.59	72.05
	50	0.72	4.98	75.1
	60	0.6	4.48	77.6
50	10	3.6	18.6	62.8
	20	1.8	13.8	72.4
	30	1.2	10.3	79.4
	40	0.9	9.03	81.94
	50	0.72	7.43	85.14
	60	0.6	6.45	87.1
200	10	3.6	43.6	78.2
	20	1.8	21.1	89.45
	30	1.2	16.5	91.75
	40	0.9	14.1	92.95
	50	0.72	10.5	94.75
	60	0.6	9.24	95.38

ภาคผนวก ก-9 ผลการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ค่าต่างๆ แบบไปไหลต่อเนื่อง ผ่านสแตติคมิคเซอร์และไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ แล้วทำการเก็บตัวอย่างซึ่งเป็นน้ำขาออกจากไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ นำมาวัดความขุ่นทันที เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นหลังจากออกจากไฮดรอลิคฟล็อกคูเลเตอร์ และทำนายประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ตารางที่ ก-9.1 ผลการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ (พิจารณาประสิทธิภาพหลังจากออกจากระบบรวมตะกอนภายในเส้นท่อโดยไม่ต้องตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน)

ความขุ่น (NTU)	Q (L/hr)	G(s ⁻¹)	t(s)	C _{ss} (mg/L)	ρ_w (kg/m ³)	Reynol dNumber	G.t	Exp Eff (%)	Model Eff (%)
20	100	83.35	638.13	89	997.1	1550	53189.37	71.11	13.76
	200	117.88	319.06	89	997.1	3100	37610.56	11	15.24
	400	166.70	159.53	89	997.1	6210	26594.69	15	16.88
	600	204.16	106.37	89	997.1	9310	21715.57	18	17.92
	800	235.76	79.77	89	997.1	12400	18805.28	16	18.70
50	100	83.35	638.13	250.5	997.1	1550	53189.37	87.59	20.08
	200	117.88	319.06	250.5	997.1	3100	37610.56	23.96	22.24
	400	166.70	159.53	250.5	997.1	6210	26594.69	29.14	24.64
	600	204.16	106.37	250.5	997.1	9310	21715.57	32.55	26.16
	800	235.76	79.77	250.5	997.1	12400	18805.28	27.22	27.29
200	100	83.35	638.13	804	997.1	1550	53189.37	96.21	30.75
	200	117.88	319.06	804	997.1	3100	37610.56	35.64	34.06
	400	166.70	159.53	804	997.1	6210	26594.69	38	37.73
	600	204.16	106.37	804	997.1	9310	21715.57	41.75	40.05
	800	235.76	79.77	804	997.1	12400	18805.28	35.89	41.78

ที่มาของประสิทธิภาพการทำนาย (Model Eff) เกิดจากการจัดกลุ่มตัวแปรซึ่งวิเคราะห์ถึงตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้อง และจัดให้เกิดเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติเพื่อใช้กำหนดคุณลักษณะของการไหล โดยในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์กลุ่มตัวแปรไร้มิติด้วยวิธีตามทฤษฎีบทกึ่งแฮมไพ (Buckingham Pi Theorem) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัด โดยแบบจำลองการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อมีดังนี้

$$\%Re = A \left(\frac{C_{ss}}{\rho_w} \right)^a (Reynold)^b (GT)^c$$

โดย A a b และ c คือ ค่าคงที่สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

จากนั้นจึงนำประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจริงที่ได้จากการทดลอง (Exp eff) ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยเริ่มต้น (C_{ss}) ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w) ค่าคงที่เรย์โนลด์ (Reynold) ความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาพัก (T) มาแทนค่า จะสามารถแก้สมการหาค่าคงที่ A a b และ c ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่าคงที่ A a b และ c มีค่าเป็น 0.105755 0.365399 0.149642 และ 0.004286 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันภายในเส้นท่อได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\%Re = 0.105755 \left(\frac{C_{ss}}{\rho_w} \right)^{0.365399} (Reynold)^{0.149642} (GT)^{0.004286}$$

ตารางที่ ก-9.2 ผลการทดลองการศึกษาสมมติฐานการตกตะกอนภายในเส้นท่อ เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง (เปรียบเทียบที่อัตราน้ำล้นผิวเดียวกัน)

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	ประสิทธิภาพจริงที่ได้จากการทดลอง (ไม่ได้นำมาตกตะกอน)	ประสิทธิภาพที่ได้จากการตกตะกอนด้วยคอลัมน์
20	79.65	87
50	90.85	94.5
200	96.21	99.9

โดยอัตราการน้ำล้นผิว (Overflow rate, OFR) ของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (Q) 100 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{OFR} &= \frac{Q}{A} \\
 &= \frac{Q \frac{m^3}{s}}{(D \times L) m^2} \\
 &= \frac{\left(100 \frac{L}{hr}\right) \left(\frac{1 m^3}{1000 L}\right)}{(0.0254 \times 35) m^2} \\
 &= 0.11 \frac{m}{hr}
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข

เอกสารข้อมูลผลการทดลองของ

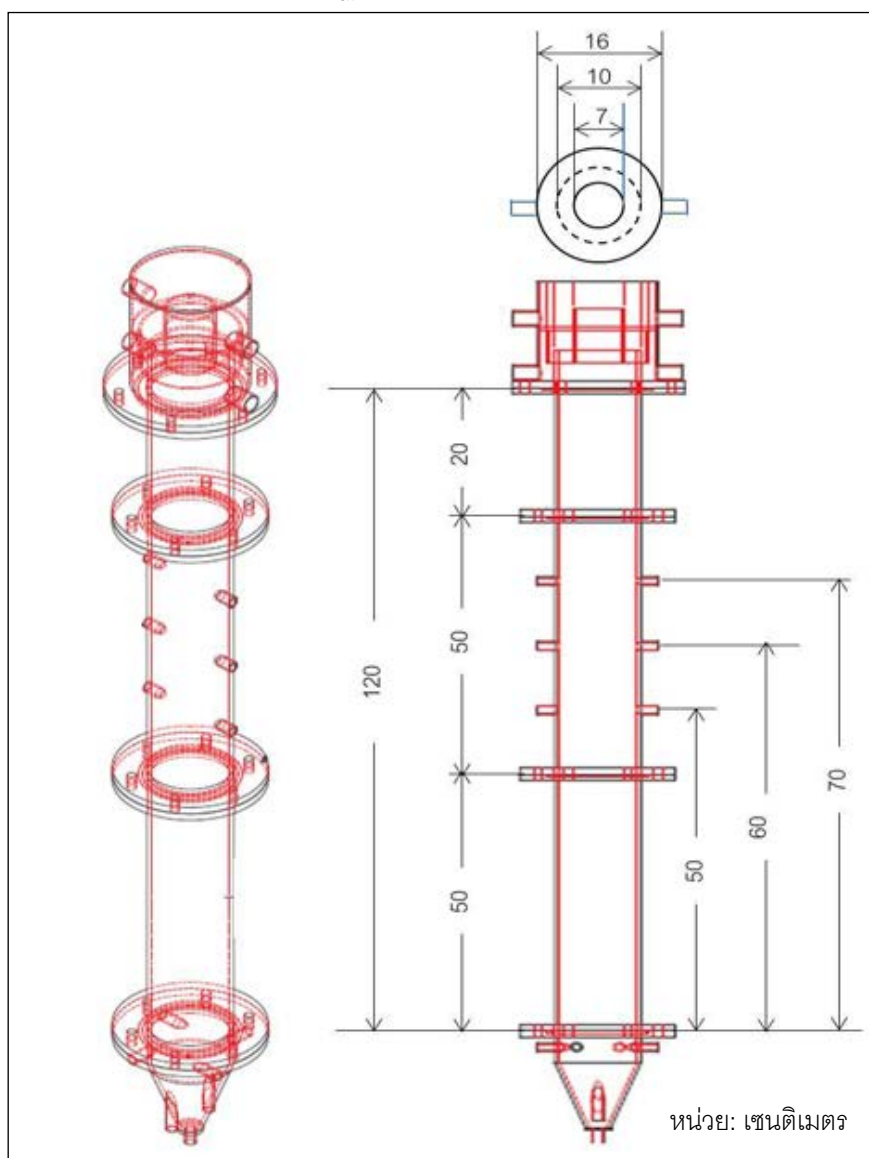
การใช้ถังปฏิกริยาไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน
และการลอยตะกอน ที่มีการเวียนน้ำกลับภายใน ในการผลิตน้ำประปา

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข-1 สารเคมีที่ใช้ในการทำการทดลองจาร์เทสต์

1. เบนโทไนท์
2. สารโคแอกกูแลนต์ คือ อะลูมินัมซัลเฟต หรือสารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)
3. สารฟล็อกคูแลนต์ คือ โพลีเมอร์ชนิดประจุลบ (Superfloc)

ภาคผนวก ข-2 รายละเอียดของถังปฏิกริยาไฮบริด



ภาพที่ ข-1 ลักษณะและขนาดของถังปฏิกริยาไฮบริดทรงกระบอก
ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 1.2 เมตร

ถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 1.2 เมตร โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ช่องจ่ายน้ำดิบสังเคราะห์

$$\begin{aligned} \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} &= 0.8 \text{ เซนติเมตร} \\ \text{พื้นที่หน้าตัด} &= 5.03 \times 10^{-5} \text{ ตารางเซนติเมตร} \end{aligned}$$

2. ช่องจ่ายน้ำอิมิตัวด้วยอากาศ

$$\begin{aligned} \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} &= 0.8 \text{ เซนติเมตร} \\ \text{พื้นที่หน้าตัด} &= 5.03 \times 10^{-5} \text{ ตารางเซนติเมตร} \end{aligned}$$

3. ช่องจ่ายสารละลายฟลิวคูลแลนท์

$$\begin{aligned} \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} &= 0.8 \text{ เซนติเมตร} \\ \text{พื้นที่หน้าตัด} &= 5.03 \times 10^{-5} \text{ ตารางเซนติเมตร} \end{aligned}$$

4. ถังปฏิกิริยาไฮบริด

- บริเวณทรงกระบอกด้านบน

$$\begin{aligned} \text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง} &= 0.1 \text{ เมตร} \\ \text{ความสูง} &= 1.2 \text{ เมตร} \\ \text{ปริมาตรถังปฏิกิริยาไฮบริด} &= \left(\frac{\pi}{4} D^2\right) H \\ &= 9.42 \times 10^{-3} \text{ ลูกบาศก์เมตร} \\ &= 9.42 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข-3 ระยะเวลาพักภายในถังปฏิกิริยาไฮบริด

ระยะเวลาพักภายในถังปฏิกิริยาไฮบริดทรงกระบอก สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาพัก} = \frac{V}{Q}$$

เมื่อ V = ปริมาตรของถังปฏิกิริยาไฮบริด

Q = อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์

ภาคผนวก ข-4 การคำนวณสัดส่วนอากาศ (Air fraction)

สัดส่วนอากาศ (Air fraction) คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับอัตราไหลเข้าของของไหลทั้งหมด โดยอัตราการไหลของอากาศดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นที่คงที่หรืออิมิตัวของแก๊สที่ละลายในของไหลนั้น ขึ้นกับชนิดของแก๊สและความดันย่อยของแก๊สที่สัมผัสกับของไหล โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของแก๊สในบรรยากาศเหนือของไหลและสัดส่วนโมลของแก๊สในของไหลแสดงดังสมการที่ (2-4) ซึ่งเรียกว่า กฎของเฮนรี่ (Tchobanoglous และคณะ, 2004)

$$p_g = \frac{H}{P_T} x_g \quad (2-4)$$

$$\begin{aligned}
 p_g &= \text{สัดส่วนโมลของแก๊สในอากาศ, } \frac{\text{moleGas}}{\text{moleAir}} \\
 H &= \text{ค่าคงที่กฎของเฮนรี่, } \frac{\text{atm}(\text{moleGas}/\text{moleAir})}{(\text{moleGas}/\text{moleWater})} \\
 P_T &= \text{ความดันรวม ซึ่งโดยทั่วไปใช้ 1 บรรยากาศ} \\
 x_g &= \text{สัดส่วนของโมลอากาศในน้ำ, } \frac{\text{moleGas}}{\text{moleWater}} \\
 &= \frac{\text{moleGas}(n_g)}{\text{moleGas}(n_g) + \text{moleWater}(n_w)}
 \end{aligned}$$

พิจารณาสัดส่วนของโมลอากาศในน้ำ

$$\begin{aligned}
 p_g &= 1 \frac{\text{moleGas}}{\text{moleAir}} \\
 H &= 66,400 \frac{\text{atm}(\text{moleGas}/\text{moleAir})}{(\text{moleGas}/\text{moleWater})} \\
 x_g &= \frac{p_g \times P_T}{H} \\
 &= \frac{1 \frac{\text{moleGas}}{\text{moleAir}} \times 1 \text{ atm}}{66,400 \frac{\text{atm}(\text{moleGas}/\text{moleAir})}{(\text{moleGas}/\text{moleWater})}}
 \end{aligned}$$

$$= 1.506 \times 10^{-5} \frac{\text{moleAir}}{\text{moleWater}}$$

การคำนวณโมลอากาศ

สำหรับน้ำ (H₂O) 1 ลิตร จะมีจำนวนโมล เท่ากับ $\frac{1000 \text{ g}}{18 \frac{\text{g}}{\text{mole}}} = 55.6 \text{ mole}$

$$n_T = n_g + n_w \quad (2-4)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} n_g &= \text{โมลก๊าซ (mole)} \\ n_w &= \text{โมลน้ำ (mole)} \\ n_t &= \text{โมลรวม (mole)} \end{aligned}$$

จะได้ว่า

$$\frac{n_g}{n_g + n_w} = 1.506 \times 10^{-5} \frac{\text{moleAir}}{\text{moleWater}}$$

$$\frac{n_g}{n_g + 55.6} = 1.506 \times 10^{-5} \frac{\text{moleAir}}{\text{moleWater}}$$

$$n_g = 8.373 \times 10^{-4} \frac{\text{moleAir}}{\text{L}}$$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ควบคุมให้ความดันภายในถังอัดความดัน (P_T) เท่ากับ 4.5 บาร์ ดังนั้น n_g จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x_g &= \frac{p_g \times P_T}{H} \\ &= \frac{1 \frac{\text{moleGas}}{\text{moleAir}} \times 4.5 \text{ atm}}{66,400 \frac{\text{atm}(\text{moleGas}/\text{moleAir})}{(\text{moleGas}/\text{moleWater})}} \\ &= 6.777 \times 10^{-5} \frac{\text{moleAir}}{\text{moleWater}} \end{aligned}$$

พิจารณาน้ำ 1 ลิตร

$$\text{จะได้ว่า } \frac{n_g}{n_g+n_w} = 6.777 \times 10^{-5} \frac{\text{moleAir}}{\text{moleWater}}$$

$$\frac{n_g}{n_g+55.6} = 6.777 \times 10^{-5} \frac{\text{moleAir}}{\text{moleWater}}$$

$$n_g = 3.768 \times 10^{-3} \frac{\text{moleAir}}{\text{L}}$$

การคำนวณความเข้มข้นของอากาศที่อิ่มตัว

พิจารณาที่ความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศ

$$\text{เนื่องจาก อากาศจะมีน้ำหนักโมเลกุล} = 28.97 \frac{\text{g}}{\text{mole}}$$

$$\text{ความเข้มข้นของอากาศที่อิ่มตัว} = \frac{0.8373 \times 10^{-3} \frac{\text{moleAir}}{\text{L}} \times 28.97 \frac{\text{g}}{\text{moleAir}}}{\frac{1 \text{ g}}{10^3 \text{ mg}}}$$

$$= 24.26 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ควบคุมให้ความดันภายในถังอัดความดัน (P_T) เท่ากับ 4.5 บาร์ ดังนั้น ความเข้มข้นของอากาศที่อิ่มตัว (C_{Air}) จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ความเข้มข้นของอากาศที่อิ่มตัว } (C_{\text{Air}}) = \frac{3.768 \times 10^{-3} \frac{\text{moleAir}}{\text{L}} \times 28.97 \frac{\text{g}}{\text{moleAir}}}{\frac{1 \text{ g}}{10^3 \text{ mg}}}$$

$$= 109.17 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ (Air flow rate)

น้ำอิมิตัวด้วยอากาศ (Pressurized water) เกิดจากการอัดอากาศให้ละลายในน้ำภายใต้ความดันที่ถูกควบคุมภายในถึงอัดความดันสูง เมื่อน้ำอิมิตัวด้วยอากาศถูกปล่อยออกสู่ถังปฏิกิริยาไฮบริดซึ่งมีความดันเท่ากับ 1 ความดันบรรยากาศ อากาศที่ละลายอิมิตัวในน้ำจะแทรกออกมาเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก

อัตราการไหลของน้ำอิมิตัวด้วยอากาศ (Q_{Air}) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่ากับ 40 80 และ 120 ลิตรต่อชั่วโมง ดังนั้น อัตราการไหลของอากาศ เมื่อความดันเท่ากับ 4.5 บรรยากาศ จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{อัตราการไหลของอากาศ (L/hr)} = Q_{Air} \times C_{Air}$$

กรณีอัตราการไหลของน้ำอิมิตัวด้วยอากาศเท่ากับ 120 ลิตรต่อชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของอากาศ (L/hr)} &= Q_{Air} \times C_{Air} \\ &= 120 \frac{\text{L}}{\text{hr}} \times 109.17 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \\ &= 13.10 \frac{\text{g}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของโมลอากาศ (mol/hr)} &= \text{อัตราการไหลมวลอากาศ} \times \text{มวลโมเลกุล} \\ &\quad \text{อากาศ} \\ &= 13.10 \frac{\text{g}}{\text{hr}} \times \frac{1\text{mol}}{28.97\text{g}} \\ &= 0.4522 \frac{\text{mol}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของอากาศ (L/hr)} &= \text{อัตราการไหลโมลอากาศ} \times \text{ปริมาตรอากาศ} \\ &\quad (\text{ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส}) \\ &= 0.4522 \frac{\text{mol}}{\text{hr}} \times \frac{24.45\text{L}}{1\text{mol}} \\ &= 11.0563 \frac{\text{L}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{คิดประสิทธิภาพระบบเท่ากับ 70\%} &= 11.0563 \frac{\text{L}}{\text{hr}} \times 0.7 \\ &= 7.7394 \frac{\text{L}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

ดังนั้น สัดส่วนอากาศสำหรับการเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 100 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลน้ำอัดตัวด้วยอากาศ 120 ลิตรต่อชั่วโมง จะสามารถคำนวณสัดส่วนอากาศได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{สัดส่วนอากาศ} &= \frac{Q_{Air}}{Q_{Raw} + Q_{coagulant} + Q_{flocculant} + Q_p} \\ &= \frac{7.7394 \frac{\text{L}}{\text{hr}}}{1000 \frac{\text{L}}{\text{hr}} + 0.075 + 0.225 + 120} \\ &= 0.00698 \end{aligned}$$

ตารางที่ ข-4.1 ผลการคำนวณสัดส่วนอากาศ

$Q_{\text{raw water}}$ (L/hr)	$Q_{\text{coagulant}}$ (L/hr)	$Q_{\text{flocculant}}$	$Q_{\text{pressurized water}}$ (L/hr)	Air fraction
600	0.075	0.225	40	0.0040
800	0.075	0.225	40	0.0031
1000	0.075	0.225	40	0.0025
1200	0.075	0.225	40	0.0021
600	0.075	0.225	80	0.0076
800	0.075	0.225	80	0.0059
1000	0.075	0.225	80	0.0048
1200	0.075	0.225	80	0.0040
600	0.075	0.225	120	0.0107
800	0.075	0.225	120	0.0084
1000	0.075	0.225	120	0.0069
1200	0.075	0.225	120	0.0059

ภาคผนวก ข-5 ผลการทดลองศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ ฟล็อกคูแลนต์ และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน

ตารางที่ ข-5.1 ผลการทดลองศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) ฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) ที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน 30 วินาที

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	ความเข้มข้นอะลูมินัมซัลเฟต (mg/L)	ความเข้มข้นโพลีเมอร์ประจุลบ (mg/L)	ความขุ่นสุดท้าย (NTU)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
50	10	0.1	1.63	62.57
	20	0.1	1.56	77.89
	30	0.1	1.4	86.75
	40	0.1	1.23	93.04
	50	0.1	1.1	95.08
50	10	0.3	1.94	70.34
	20	0.3	1.73	83.55
	30	0.3	1.5	91.70
	40	0.3	1.35	93.90
	50	0.3	1.51	96.75
50	10	0.5	3.48	66.40
	20	0.5	1.68	79.54
	30	0.5	1.22	89.88
	40	0.5	1.88	94.43
	50	0.5	2.33	96.62

ตารางที่ ข-5.2 ผลการทดลองศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ (อะลูมินัมซัลเฟต) ฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	ความเข้มข้นโพลีเมอร์ประจุลบ (mg/L)	ความเข้มข้นอะลูมินัมซัลเฟต (mg/L)	ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน(min)	ความขุ่นสุดท้าย (NTU)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
50	0.1	10	0.5	18.72	62.57
			1	13.39	73.23
			20	1.65	96.70
	0.1	20	0.5	11.06	77.89
			1	6.93	86.14
			20	0.79	98.43
	0.1	30	0.5	6.63	86.75
			1	4.22	91.55
			20	0.495	99.01
	0.1	40	0.5	3.48	93.04
			1	2.4	95.20
			20	0.36	99.29
0.1	50	0.5	2.46	95.08	
		1	2.02	95.97	
		20	0.49	99.03	
50	0.3	10	0.5	14.83	70.34
			1	14.58	70.85
			20	4.11	91.78
	0.3	20	0.5	8.44	83.12
			1	7.195	85.61
			20	1.18	97.64

ตารางที่ ข-5.2 (ต่อ) ผลการทดลองศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ (อะลูมิเนียมซัลเฟต) ฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) และระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	ความเข้มข้นโพลีเมอร์ประจุลบ (mg/L)	ความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต (mg/L)	ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน(min)	ความขุ่นสุดท้าย (NTU)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
50	0.3	30	0.5	4.16	91.69
			1	4.58	90.85
			20	0.77	98.47
	0.3	40	0.5	3.01	93.89
			1	2.67	94.67
			20	0.61	98.79
	0.3	50	0.5	1.63	96.75
			1	1.57	96.86
			20	0.49	99.03
50	0.5	10	0.5	16.8	66.40
			1	15.49	69.03
			20	3.795	92.41
	0.5	20	0.5	10.23	79.54
			1	15.49	69.03
			20	8.52	82.97
	0.5	30	0.5	5.06	89.88
			1	4.48	91.04
			20	0.81	98.38
	0.5	40	0.5	2.79	94.43
			1	2.61	94.79
			20	0.54	98.92
	0.5	50	0.5	1.69	96.62
			1	1.73	96.54
			20	0.495	99.01

ภาคผนวก ข-6 การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด

ตารางที่ ข-6.1 ผลการทดลองศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์โดยการวัดความขุ่น

อัตราการไหล น้ำดิบ สังเคราะห์ (L/hr)	ความขุ่น (NTU)			ประสิทธิภาพการ บำบัดความขุ่น (%)	ประสิทธิภาพ การแยก (%)
	ความขุ่น เริ่มต้น	ความขุ่น บริเวณ แกนกลาง	ความขุ่น บริเวณผนัง ไฮโดรไซโคลน		
600	50	24	24	52	0
800	53	48	30	43.40	37.5
1000	50	45	41.4	29.83	23.75
1200	51.6	45	40.2	6.59	0

ตารางที่ ข-6.2 ผลการทดลองศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์โดยการวัดสารแขวนลอย

อัตราการ ไหล น้ำดิบ สังเคราะห์ (L/hr)	สารแขวนลอย (mg/L)			ประสิทธิภาพ การบำบัดสาร แขวนลอย (%)	ประสิทธิภาพ การแยก (%)
	สาร แขวนลอย เริ่มต้น	สาร แขวนลอย บริเวณ แกนกลาง	สารแขวนลอย บริเวณผนัง ไฮโดรไซโคลน		
600	259.04	115.89	115.89	55.26	0
800	255.33	237.59	125.02	51.04	47.38
1000	253.77	259.26	181.90	28.32	29.84
1200	250.50	238.09	237.27	5.28	0

ภาคผนวก ข-7 การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด

ตารางที่ ข-7.1 ผลการทดลองศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศโดยการวัดความขุ่น

อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ (L/hr)	ความขุ่น (NTU)			ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น (%)	ประสิทธิภาพการแยก (%)
		ความขุ่นเริ่มต้น	ความขุ่นบริเวณแกนกลาง	ความขุ่นบริเวณผนังไฮโดรไซโคลน		
800	40	50	38.59	35.09	29.82	9.09
	80	50	45.28	28.30	43.40	37.50
	120	50	49.86	32.67	34.48	26.77
1000	40	50	42.97	39.94	20.12	7.05
	80	50	50.72	37.14	25.73	26.77
	120	50	53.30	24.73	50.54	53.60

ตารางที่ ข-7.2 ผลการทดลองศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศโดยการวัดสารแขวนลอย

อัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ (L/hr)	อัตราการไหลน้ำอิมตัวด้วยอากาศ (L/hr)	สารแขวนลอย (mg/L)			ประสิทธิภาพการบำบัดสารแขวนลอย (%)	ประสิทธิภาพการแยก (%)
		สารแขวนลอยเริ่มต้น	สารแขวนลอยบริเวณแกนกลาง	สารแขวนลอยบริเวณผนังไฮโดรไซโคลน		
800	40	254.74	192.45	184.56	27.55	4.10
	80	255.46	213.36	125.07	51.04	41.38
	120	253.22	217.14	176.90	30.14	18.53
1000	40	250.48	206.51	194.02	22.54	6.05
	80	252.37	257.84	180.90	28.32	29.84
	120	250.56	261.14	115.53	53.89	55.76

ภาคผนวก ข-8 การศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายในที่จุดจ่ายน้ำหมุนเวียนภายในต่างๆ ที่มีต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาไฮบริด

ตารางที่ ข-8.1 ผลการทดลองศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายในโดยการวัดความขุ่น

อัตราการไหลน้ำดิบ สังเคราะห์ (L/hr)	อัตราการไหลน้ำ หมุนเวียน ภายใน (L/hr)	จุดจ่ายน้ำ หมุนเวียน ภายใน (cm.)	ความขุ่น (NTU)			ประสิทธิภาพ บำบัด ความขุ่น (%)	ประสิทธิภาพ แยก (%)
			ความ ขุ่น เริ่มต้น	ความขุ่น บริเวณ แกนกลาง	ความขุ่น บริเวณ ผนังไฮโดร ไซโคลน		
800	600	50	50	46	27.5	45	40.23
		60	50	46	25.5	49	44.57
		70	50	48	24.5	51	48.96
	800	50	50	47	25	50	46.81
		60	50	47	22	56	53.19
		70	50	52.5	18	64	65.71
	1000	50	50	46	44	12	4.35
		60	50	45	43	14	4.44
		70	50	43	41	18	4.65

ตารางที่ ข-8.2 ผลการทดลองศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายในโดยการวัดสารแขวนลอย

อัตราการไหลน้ำดิบ สังเคราะห์ (L/hr)	อัตราการไหลน้ำ หมุนเวียน ภายใน (L/hr)	จุดจ่ายน้ำ หมุนเวียน ภายใน (cm.)	สารแขวนลอย (mg/L)			ประสิทธิภาพ บำบัดสาร แขวนลอย (%)	ประสิทธิภาพ แยก (%)
			สาร แขวน ลอย เริ่มต้น	สาร แขวนลอย บริเวณ แกนกลาง	สาร แขวนลอย บริเวณ ผนังไฮโดร ไซโคลน		
800	600	50	253.55	270.91	120.31	52.55	55.59
		60	254.67	293.96	121.20	52.41	58.77
		70	254.89	268.77	119.36	53.17	55.59

ตารางที่ ข-8.2 (ต่อ) ผลการทดลองศึกษาผลของอัตราการไหลน้ำหมุนเวียนภายในโดยการวัดสารแขวนลอย

อัตราการไหลน้ำดิบ สังเคราะห์ (L/hr)	อัตราการไหลน้ำ หมุนเวียน ภายใน (L/hr)	จุดจ่ายน้ำ หมุนเวียน ภายใน (cm.)	สารแขวนลอย (mg/L)			ประสิทธิ ภาพการ บำบัด ความขุ่น (%)	ประสิทธิ ภาพการ แยก (%)
			สาร แขวน ลอย เริ่มต้น	ความขุ่น บริเวณ แกนกลาง	ความขุ่น บริเวณ ผนังไฮโดร ไซโคลน		
	800	50	250.54	289.18	119.23	52.41	58.77
		60	251.47	272.99	105.54	58.03	61.34
		70	250.47	358.72	96.21	61.59	73.18
	1000	50	254.05	231.71	210.86	17.01	9
		60	255.39	237.78	206.87	19	13
		70	252.45	222.75	189.34	25	15

ภาคผนวก ข-9 การศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายในในการผลิตน้ำประปา โดยทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

ตารางที่ ข-9.1 คุณสมบัติ น้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน

ลักษณะของน้ำดิบสังเคราะห์	ค่าพารามิเตอร์
ความขุ่น (เอ็นทียู)	20-25
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	80-100
ค่าพีเอช	8.0
สภาพต่าง (mg/L as CaCO ₃)	70-80

ตารางที่ ข-9.2 ผลการทดลองศึกษาชนิดและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ (อะลูมิเนียมซัลเฟต) ฟล็อกคูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุลบ) สำหรับการกำจัดความขุ่นจากน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน โดยใช้ระยะเวลาสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชันเท่ากับระยะเวลาที่เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำดิบสังเคราะห์ 800 ลิตรต่อชั่วโมง หรือประมาณ 40 วินาที

ความขุ่นเริ่มต้น (NTU)	ความเข้มข้นอะลูมิเนียมซัลเฟต (mg/L)	ความเข้มข้นโพลีเมอร์ประจุลบ (mg/L)	ความขุ่นสุดท้าย (NTU)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)
21.95	30	0.1	1.63	47.38
	40	0.1	1.56	70.93
	50	0.1	1.4	74.26
	60	0.1	1.23	80.73
	70	0.1	1.1	86.51
22.1	30	0.3	6.9	68.78
	40	0.3	4.92	77.76
	50	0.3	4.14	81.27
	60	0.3	3.39	84.66
	70	0.3	2.8	87.33
23	30	0.5	8	65.21
	40	0.5	5.95	74.13
	50	0.5	4.16	81.91
	60	0.5	3.83	83.34
	70	0.5	2.92	87.30

ตารางที่ ข-9.3 ผลการทดลองศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายในในการผลิตน้ำประปา โดยทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน โดยการวัดความขุ่น

อัตราการไหลน้ำดิบ สังเคราะห์ (L/hr)	อัตราการไหลน้ำ หมุนเวียน ภายใน (L/hr)	จุดจ่าย น้ำหมุน เวียน ภายใน (cm.)	ความขุ่น (NTU)			ประสิทธิ ภาพการ บำบัด ความขุ่น (%)	ประสิทธิ ภาพการ แยก (%)
			ความ ขุ่น เริ่มต้น	ความขุ่น เฉลี่ย บริเวณ แกนกลาง	ความขุ่น เฉลี่ย บริเวณผนัง ไฮโดร ไซโคลน		
800	800	70	23	26.5	10.5	54.35	60.38

ตารางที่ ข-9.4 ผลการทดลองศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาไฮบริดที่มีการเวียนน้ำกลับภายในในการผลิตน้ำประปา โดยทดลองกับน้ำดิบจริงจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน โดยการวัดสารแขวนลอย

อัตราการไหลน้ำดิบ สังเคราะห์ (L/hr)	อัตราการไหลน้ำ หมุนเวียน ภายใน (L/hr)	จุดจ่าย น้ำหมุน เวียน ภายใน (cm.)	สารแขวนลอย (mg/L)			ประสิทธิ ภาพการ บำบัด สาร แขวน ลอย (%)	ประสิทธิ ภาพการ แยก (%)
			สาร แขวน ลอย เริ่มต้น	สารแขวน ลอยเฉลี่ย บริเวณ แกนกลาง	สาร แขวนลอย เฉลี่ยบริเวณ ผนังไฮโดร ไซโคลน		
800	800	70	110.56	132.33	51.49	53.43	61.09

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวรัชชนัน ชำนาญหอม เกิดวันที่ 21 มกราคม 2533 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนนครสวรรค์ จ.นครสวรรค์ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา จ.กรุงเทพมหานคร และระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ The 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Global Environment จัดที่โรงแรม Aston Tropicana เมืองบันดุง ประเทศอินโดนีเซีย ในหัวข้อ Study of In-line Coagulation and Flocculation for Turbidity Removal: Experimental Approaches วันที่ 21-22 พฤศจิกายน 2555

งานประชุมวิชาการนานาชาติ Environmental and Hazardous Substance Management towards a Green Economy (ESHM2013) จัดที่โรงแรมอิมพีเรียลควีนส์ปาร์ค จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในหัวข้อ Study of In-line Coagulation and Flocculation for Turbidity Removal: Turbidity Removal Prediction วันที่ 21-23 พฤษภาคม 2556