

ประสิทธิภาพของโพลีอะลูมิเนียมเพอร์ริคซิลิเกตคอลลอยด์ในกระบวนการ
โคแอกกูเลชันสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้น



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
กุมภาพันธ์ 2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

ประสิทธิภาพของโพลีอะลูมิเนียมเพอร์ริคซิลิเกตคอลลอยด์ในกระบวนการ
โคแอกกูเลชันสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้น



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
กุมภาพันธ์ 2565
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

EFFICIENCY OF POLY ALUMINUM FERRIC SILICATE CHLORIDE IN COAGULATION PROCESS
FOR WATER PURIFICATION AS PRE-TREATMENT



A Thesis Submitted to University of Phayao
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Engineering Degree in Environmental Engineering
February 2022
Copyright 2022 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ประสิทธิภาพของโพลีอะลูมิเนียมเพอร์ริคซิลิเกตเคลือบไรต์ในระบบการ
โคแอกกูเลชันสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำขุ่นต้น

ของ ชีรภัทร์ วาใจทอง

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โกวิท สุวรรณหงษ์)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กวีธาดา)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร. เรวดี อนุวัฒน์นา)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศักดิ์สิทธิ์ อิมแมน)

..... คณบดีคณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กวีธาดา)

เรื่อง:	ประสิทธิภาพของโพลีอะลูมิเนียมเฟอร์ริคซิลิเกตคอลลอยด์ในกระบวนการโคแอกกูเลชันสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำขุ่นต้น
ผู้วิจัย:	ธีรภัทร์ วาใจทอง, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2564
อาจารย์ที่ปรึกษา:	รองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กรีธาชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.เรวดี อนุวัฒน์นา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน
คำสำคัญ:	ปรับปรุงคุณภาพน้ำ, โพลีอะลูมิเนียมเฟอร์ริคซิลิเกตคอลลอยด์, สารส้ม, เฟอร์ริคคอลลอยด์, โพลีอะลูมิเนียมคอลลอยด์, ของแข็งละลายน้ำ

บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติ และประสิทธิภาพของโพลีอะลูมิเนียมเฟอร์ริคซิลิเกตคอลลอยด์ (Poly Aluminum Ferric Silicate Chloride, PAFSIC) ในกระบวนการโคแอกกูเลชันสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำขุ่นต้นจากอ่างเก็บน้ำห้วยเบ็ด จังหวัดลำปาง สำหรับเป็นแหล่งน้ำสำรองของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids, TDS) โดยทำการทดสอบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้า 3 ชนิด ได้แก่ สารส้ม (Alum) เฟอร์ริคคอลลอยด์ (Ferric chloride, $FeCl_3$) โพลีอะลูมิเนียมคอลลอยด์ (Polyaluminium chloride, PAC) ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เพิ่มเติม ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซัลเฟต และค่าความกระด้าง โดยผลการศึกษาพบว่า PAFSIC มีความสามารถในการลดค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมาได้โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยตกตะกอน หากเทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้าที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสารบางตัวจำเป็นต้องมีการเติมสารช่วยตกตะกอนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และมีการใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนองในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตกตะกอนในการกำจัดความขุ่นที่ต่ำของ PAFSIC พบว่าในภาวะที่เหมาะสมที่สุดของ PAFSIC มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ต่ำของน้ำตัวอย่างได้ร้อยละ 94.4 โดยกำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ปริมาณความเข้มข้นของ PAFSIC และปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยตกตะกอนชนิดประจุลบ

Title: EFFICIENCY OF POLY ALUMINUM FERRIC SILICATE CHLORIDE IN COAGULATION PROCESS FOR WATER PURIFICATION AS PRE-TREATMENT

Author: Theerapat Wajaitong, Thesis: M.Eng. (Environmental Engineering), University of Phayao, 2021

Advisor: Associate Professor Torpong Kreetachat , D.Eng. Co–advisor Rewadee Anuwattana , Ph.D. Assistant Professor Saksit Imman , Ph.D.

Keywords: Coagulation, Poly Aluminum Ferric Silicate Chloride, Alum, Poly Aluminum Chloride, Ferric chloride, Total Dissolved Solids

ABSTRACT

The main objectives of this research were characterized the properties and efficacy of Poly Aluminum Ferric Silicate Chloride (PAFSiC) in coagulation process. The quality water was compared to low turbidity and total dissolved solid, respectively. The water sampling was Hui Pet Reservoir, Lampang Province. The 3 commercial chemical coagulants were Alum, Poly Aluminum Chloride (PAC) Ferric chloride (FeCl_3). Additional factors such as conductivity, sulphate and hardness were studied. The results showed that PAFSiC has the ability to reduce the above values without the need to add coagulant aid compared to the commercial chemical coagulants mentioned above. Some commercial chemicals require the addition of coagulant aid for higher efficiency. In this study, the response surface methodology (RSM) was used to optimize process condition in coagulant process. The experimental found that the low turbidity removal efficiency of the sample was 94.4%. Three factors were determined: pH, PAFSiC concentration, and anionic polymer concentration.



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ให้ความอนุเคราะห์สารตกตะกอนโพลีอะลูมิเนียมเพอร์ริคซิลิเกตคลอไรด์ (PAFSiC) ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยสำหรับข้อมูลต่าง ๆ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ตัวอย่างสำหรับใช้ในวิจัยนี้ ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ต่อพงศ์ กริธาชาติ อาจารย์ที่ปรึกษา และดร. เรวดี อนุวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยจนทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณครอบครัวที่สนับสนุน และให้โอกาส ตลอดการศึกษา และขอขอบคุณงานวิจัย วารสาร และบทความที่ผู้ศึกษานำมาอ้างอิงในการทำวิจัยฉบับนี้ไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ธีรภัทร์ วาใจทอง



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย	4
ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ	6
กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้น.....	9
โพลีอะลูมิเนียมเพอร์ริคซิลิเกตคอลลอยด์ (PAFSIC).....	28
การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange).....	30
เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง	30
สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	40
วิธีการศึกษา.....	40
การวิเคราะห์.....	44

บทที่ 4 อภิปรายผลการวิจัย.....	48
คุณสมบัติของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง.....	48
ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด อ.แม่เมาะ จ. ลำปาง	48
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของสาร PAFSiC ในกำจัดความขุ่นต่ำของน้ำตัวอย่างจากอ่าง เก็บน้ำห้วยเป็ดโดยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM).....	56
บทที่ 5 บทสรุป.....	61
สรุปผลการวิจัย	61
อภิปรายผลการวิจัย.....	61
บรรณานุกรม	63
ประวัติผู้วิจัย	66



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ขนาดทางคูตของเครื่องสูบน้ำและอัตราการสูบน้ำ.....	13
ตาราง 2 เกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบถังตกตะกอนแบบ Conventional Type.....	13
ตาราง 3 ความเร็วในเส้นท่อจ่ายน้ำประปา	13
ตาราง 4 เกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ พ.ศ 2563 ตามประกาศกรมอนามัย เรื่อง เกณฑ์ คุณภาพน้ำประปาดื่มได้	15
ตาราง 5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
ตาราง 6 การกำหนดตัวแปรของปัจจัยแต่ละระดับ	43
ตาราง 7 ชุดการทดลองที่ได้จากโปรแกรมพื้นผิวตอบสนองจำนวน 20 ชุด	44
ตาราง 8 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด อำเภอแม่ เมาะ จังหวัดลำปาง.....	48
ตาราง 9 ความสามารถในการค่า TDS ของน้ำตัวอย่างน้ำของ PAFSiC กับสารตกตะกอนเคมีทาง การค้าแต่ละชนิด.....	52
ตาราง 10 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA).....	57
ตาราง 11 แสดงผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสอง.....	58

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 สถานที่ตั้งอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด ตำบลแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง	7
ภาพ 2 กระบวนการจัดการน้ำทิ้งจากเหมืองแม่เมาะ.....	8
ภาพ 3 กระบวนการจัดการน้ำทิ้งจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ.....	9
ภาพ 4 กระบวนการอัตโนมัติไอออนไนเซชันของน้ำ	11
ภาพ 5 กระบวนการผลิตน้ำประปาจากแหล่งน้ำผิวดินหรือแหล่งน้ำดิบ	14
ภาพ 6 การทำงานของระบบ RO	17
ภาพ 7 แสดงการจำแนกสารต่าง ๆ ในน้ำ	18
ภาพ 8 ความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวสเตรอร์นกับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย	22
ภาพ 9 เสถียรภาพของสารส้มในน้ำที่ไม่มี ความขุ่นพื้นที่ภายในเส้นประเป็นบริเวณที่มีการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ เกิดขึ้นได้เร็ว ส่วนพื้นที่ภายนอกเส้นประแต่ยังแรงอาจมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ	24
ภาพ 10 กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มทั้งสองประเภท	25
ภาพ 11 รูปร่างของโพลีเมอร์ที่รวมตัวกันเป็นสายยาว.....	27
ภาพ 12 ลักษณะทางกายภาพของสาร PAFSIC ได้รับการสังเคราะห์มาจากเจ้าหน้าที่จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง	29
ภาพ 13 การลดลงของความขุ่น สี และปริมาตรสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC)	29
ภาพ 14 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design หรือ CCD).....	31
ภาพ 15 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)	32
ภาพ 16 เปรียบเทียบปฏิกิริยาของตัวกรดฮิวมิก และอนุภาคดินขาวในน้ำสังเคราะห์	33
ภาพ 17 อิทธิพลของกรดซัลฟิวริกกับความขุ่นที่เหลือ	34
ภาพ 18 อิทธิพลของกรดฮิวมิกต่อความขุ่นที่เหลืออยู่	34

ภาพ 19 แสดงผลค่า pH ต่อความสามารถในการกำจัดตะกอนของ PASiC และ PAC	35
ภาพ 20 ปริมาณของการตกตะกอน ต่อค่าต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า การกำจัดความขุ่น และประสิทธิภาพการกำจัด COD	36
ภาพ 21 แผนการดำเนินงานวิจัยการบำบัดน้ำขั้นต้นด้วยสาร PAFSiC	40
ภาพ 22 การหาปริมาณสาร Coagulant ที่เหมาะสมที่ใช้กับน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด	42
ภาพ 23 ขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด	45
ภาพ 24 ความสามารถในการกำจัดความขุ่นของ PAFSiC เทียบกับตัวของ $FeCl_3$	49
ภาพ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ในการกำจัดความขุ่นที่ความขุ่นเริ่มต้น 4.33 NTU	50
ภาพ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ในการกำจัด TDS ที่ TDS เริ่มต้น 746.00 mg/L	51
ภาพ 27 ความสามารถในการลดค่าการนำไฟฟ้าของ PAFSiC เทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้า	53
ภาพ 28 ความสามารถในการลดค่าซัลเฟตในน้ำตัวอย่างของ PAFSiC เทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้า	55
ภาพ 29 ความสามารถในการลดค่าความกระด้างในน้ำตัวอย่างของ PAFSiC เทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้า	55
ภาพ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการทำนายกับผลที่แท้จริง	58
ภาพ 31 แผนภาพ 2 มิติ และ 3 มิติ แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการลดความขุ่นที่ต่ำของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด	59

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อใช้ในการอุปโภค และบริโภคคุณภาพน้ำต้องเป็นน้ำที่ปราศจากสี กลิ่น รส และจุลินทรีย์ต่าง ๆ โดยทั่วไปแหล่งน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาประกอบด้วย 2 แหล่ง ได้แก่ น้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะน้ำผิวดินในบริเวณเขตพื้นที่สูง หรือพื้นที่ประสบภัยแล้งจำเป็นต้องใช้น้ำดิบจากแหล่งน้ำผิวดิน ซึ่งมักประสบปัญหาจากสิ่งเจือปนต่าง ๆ เช่น สี ความขุ่น ความกระด้าง เป็นต้น โรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์ที่มีอัตราการใช้ถ่านหินผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มีการใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ เช่น น้ำสำหรับหอหล่อเย็น (Cooling tower) น้ำบริสุทธิ์สำหรับหม้อต้มน้ำ (Boiler) ในปัจจุบันโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีการใช้น้ำดิบจากแหล่งน้ำสำคัญ 2 แหล่ง ได้แก่ อ่างเก็บน้ำแม่จาง และอ่างเก็บน้ำแม่ขาม ซึ่งเป็นน้ำผิวดินตามธรรมชาตินำมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เนื่องจากการชะละลายของถ่านหินเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำจึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำผิวดินในบริเวณอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ที่อยู่บริเวณนั้น เช่น ปัญหาจากความกระด้าง สารแขวนลอย ซัลเฟต สี และความขุ่น เป็นต้น ก่อให้เกิดผลเสียในการนำน้ำผิวดินเหล่านี้มาใช้ประโยชน์

จากวิกฤตการณ์ภัยแล้งปี พ.ศ.2559 ทำให้โรงไฟฟ้าแม่เมาะมีความเสี่ยงในการลดกำลังการผลิตจากกรณีขาดแคลนน้ำสำหรับการผลิตไฟฟ้าเป็นอย่างมากจึงจำเป็นต้องหาแนวทางป้องกันเพื่อรองรับสถานการณ์ดังกล่าวที่อาจเกิดขึ้นอีกในการแก้ไขปัญหาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนั้นโรงไฟฟ้าแม่เมาะได้ใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด โดยเป็นอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่มีความจุ 1.027 hm³ รองรับน้ำจากกิจกรรมการเปิดหน้าดินทำเหมืองมีคุณภาพน้ำไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานในระบบผลิตน้ำ และปัจจุบันยังไม่ได้นำน้ำจากส่วนนี้มาใช้ประโยชน์เท่าที่ควร แต่อย่างไรก็ตามการแก้ไขปัญหาวิกฤตภัยแล้งได้นำน้ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดมาผสมกับน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำแม่จาง และอ่างเก็บน้ำแม่ขามในสัดส่วนไม่เกินร้อยละ 10 ทำให้สามารถยืดระยะเวลาการใช้น้ำในแหล่งน้ำดิบได้เพียงพอ

จากข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดปี พ.ศ. 2559 พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ประมาณ 2000.00 $\mu\text{mhos/cm}$ ค่าความขุ่น (Turbidity) 4.00–9.00 NTU ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) 15.00–20.00 mg/L ปริมาณซัลเฟต (Sulphate) 1000.00–1200.00 mg/L และค่าความกระด้าง (Total Hardness) 800.00–1000.00 mg/L CaCO_3 ตามลำดับ ทั้งนี้หากเกิดสภาวะฉุกเฉินจำเป็นต้องนำน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดมาใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องผ่านการบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) ด้วยกระบวนการต่าง ๆ ก่อนเพื่อลดค่าใช้จ่ายของสารเคมีในการผลิตน้ำ

การบำบัดคุณภาพน้ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดเพื่อที่จะเตรียมเป็นน้ำดิบสำหรับระบบผลิตน้ำใส่นั้นจะต้องมีขั้นตอนปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้น ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความขุ่น ค่าของแข็งแขวนลอย ค่าซัลเฟต และค่าความกระด้างที่มีค่าสูงให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งกระบวนการบำบัดคุณภาพน้ำนั้นมีหลายกระบวนการ เช่น การใช้ระบบเยื่อกรอง (Membrane) กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน เพื่อมาศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้นจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด

กระบวนการนำน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินเหล่านี้มาผลิตเป็นน้ำประปา คือ ขั้นตอนการลดสารแขวนลอย ความขุ่นของน้ำด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยสารเคมีที่เพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการโคแอกกูเลชันเรียกว่า โคแอกกูเลชันเอ็ด (Coagulation Aid) ในปัจจุบันพบว่ามีการใช้สารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เช่น สารส้ม หรือโพลีเมอร์ จึงก่อให้เกิดปัญหาการตกค้างของสารเคมีก่อให้เกิดปัญหาของแข็งละลายน้ำสูง เนื่องจากค่าของแข็งละลายน้ำนี้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการบำบัดน้ำในขั้นตอนต่อไปของการปรับปรุงคุณภาพน้ำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จึงส่งผลกระทบต่อนักวิจัยในการหาแนวทางลดค่าของแข็งละลายน้ำ

กระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งให้น้ำกลับมาใช้ใหม่ได้เนื่องจากสามารถกำจัดสารอินทรีย์ออกจากปริมาณสารแขวนลอย โดยทั่วไปสารตกตะกอนที่นิยมใช้มักมีองค์ประกอบของอลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และอลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) อลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) โพลีอลูมิเนียมซัลเฟต โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ เพอริกคลอไรด์ (FeCl_3) เพอริกซัลเฟต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) โพลีเพอริกซัลเฟต และโพลีอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณการใช้สารเร่งตกตะกอนมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารประกอบในน้ำโดยโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีการใช้สารประกอบชนิดเพอริกคลอไรด์ในปริมาณค่อนข้างสูง และต้องใช้ปูนขาวช่วยในการปรับสภาพน้ำด้วย โดยหลังจากเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันน้ำที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่บ่อพักเพื่อให้เกิดการตกตะกอนในขั้นตอนนี้เรียกว่ากระบวนการฟลอคคูลูเลชัน ดังนั้นการปรับสภาพ

น้ำเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่จึงมีภาระการใช้สารเคมีที่มีแนวโน้มเพิ่มปริมาณมากขึ้นเพื่อให้ได้ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วงที่ให้สารตกตะกอนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่อย่างไรก็ตามสารที่ปรับความเป็นกรดต่างจำเป็นต้องมีการเติมสารเพิ่มเติม เช่น ปูนขาวเพื่อให้น้ำเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งซึ่งส่งผลต่อปริมาณของแข็งละลายน้ำก่อให้เกิดปัญหาต่ออายุการใช้งานของเมมเบรนได้

โดยทั่วไปสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมมักนิยมวัตถุดิบประเภทสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ จากปัญหาการอุดตันของเมมเบรนต่ออายุการใช้งานสารโคแอกกูแลนต์ชนิดสารอินทรีย์มักไม่ได้รับความนิยม (Ghanem, 2002) ซึ่งสารโคแอกกูแลนต์ชนิดสารอนินทรีย์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ได้แก่ สารประกอบอะลูมิเนียม (Al) หรือเหล็ก (Fe) และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) (Bratby, Fevig and Jimenez, 2012) ส่วนสารโคแอกกูแลนต์ชนิดเหล็กที่นิยมใช้ ได้แก่ เพอร์ริกซัลเฟต เพอร์รัสซัลเฟต เพอร์ริกคลอไรด์ และในปัจจุบันพบสารเร่งตกตะกอนชนิดใหม่เป็นสารประกอบคอมโพสิต เช่น โพลีอะลูมิเนียมเพอร์ริกซิลิเกตคลอไรด์ (Tolkou and Zouboulis, 2016) จากการศึกษาพบว่า กรรมวิธีการผลิตสารเร่งตกตะกอนมีหลายรูปแบบหนึ่งในนั้นคือ การผลิตสารประกอบคอมโพสิตโพลีอะลูมิเนียมเพอร์ริกซิลิเกตคลอไรด์ (PAFSiC) ซึ่งสามารถเตรียมได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันระหว่างซิลิเกตอลูมินา และเหล็ก นอกจากนี้ยังเตรียมได้จากของเสียที่มีสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกตได้ และของเสียที่มีองค์ประกอบของซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และแคลเซียม (Ca) เป็นต้น โดยเจ้าหน้าที่ได้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะนั้นมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกอน และอะลูมิเนียมอยู่จำนวนมาก จึงได้เสือกนำเอาตัวของเจ้าหน้าที่เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารคอมโพสิตโคแอกกูแลนต์ ได้แก่ โพลีอะลูมิเนียมเพอร์ริกซิลิเกตคลอไรด์

จากที่มา และความสำคัญที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาวิทยานิพนธ์ เรื่อง “ประสิทธิภาพของโพลีอะลูมิเนียมเพอร์ริกซิลิเกตคลอไรด์ในกระบวนการโคแอกกูแลชันสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้น” โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาประสิทธิภาพของสารโพลีอะลูมิเนียมเพอร์ริกซิลิเกตคลอไรด์ (PAFSiC) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว) สำหรับใช้เป็นสารโคแอกกูแลนต์แทนสารส้ม เพอร์ริกคลอไรด์ และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้เป็นสารโคแอกกูแลนต์ในปัจจุบันที่ส่งผลให้ปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS) เพิ่มสูงขึ้นหลังจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้น ทั้งนี้การวิจัยครั้งนี้จะทำการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารโพลีอะลูมิเนียมเพอร์ริกซิลิเกตคลอไรด์ (PAFSiC) ในกระบวนการโคแอกกูแลชัน และพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์จากเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ในการทดสอบดังกล่าวได้ทำการศึกษา ปริมาณสารตกตะกอน ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ปริมาณ

สารช่วยตกตะกอนเคมีทางการค้า โดยทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำก่อนเข้าสู่ระบบ Reverse osmosis (RO) ของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด จังหวัดลำปาง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งละลายน้ำ (TDS) ค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และความกระด้าง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมเพอร์ริคซิลิเกตคลอไรด์ (PAFSiC) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว) เป็นสารโคแอกกูแลนต์ซึ่งได้รับการพัฒนามาจากเจ้าหน้าที่ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณ PAFSiC ค่า pH และปริมาณสารช่วยตกตะกอนเคมีในการกำจัดความขุ่นจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด

2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และความกระด้าง ของน้ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดโดยเทียบระหว่าง PAFSiC กับสารตกตะกอนเคมีทางการค้า เช่น สารส้ม เพอร์ริคคลอไรด์ และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้ในงานในปัจจุบันสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้น

3. เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM) สำหรับหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบาย และทำนายสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยสาร PAFSiC ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ขอบเขตของการวิจัย

1. สภาวะที่เหมาะสมในการใช้สาร PAFSiC ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว) ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้น ค่า pH และปริมาณสารช่วยตกตะกอนเคมี (Coagulation aids) ในการกำจัดความขุ่นต่ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด

2. เพื่อศึกษาการใช้สารเร่งตกตะกอนกับสาร PAFSiC เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้า ได้แก่ สารส้ม เพอร์ริคคลอไรด์ และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด ได้แก่ ค่าความขุ่น ค่าของแข็งแขวนลอย (TDS) ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซัลเฟต และความกระด้าง

3. พัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์จากเทคนิคพื้นผิวตอบสนองเพื่อจำลอง และวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ เพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดในการกำจัดความขุ่น หรือเหมาะสมที่สุดแสดงผลในรูปแบบกราฟ และสมการทางคณิตศาสตร์

ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1. ได้สถานะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมเพอร์ฟลูออโรซัลเฟต (PAFSiC) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว) เป็นสารโคแอกกูแลนต์
2. เป็นแนวทางสำหรับการเลือกใช้สารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีในปัจจุบัน
3. เพื่อให้ได้สมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Method) ของประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ

1. แหล่งที่มาของน้ำ

แหล่งน้ำธรรมชาติผิวของโลกแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

1.1 แหล่งน้ำในบรรยากาศ (Atmospheric Water) ได้แก่ สถานะไอน้ำ เช่น เมฆ หมอก เป็นต้น

1.2 สถานะที่เป็นของเหลว ได้แก่ ฝน และน้ำค้าง สถานะที่เป็นของแข็ง ได้แก่ หิมะ และลูกเห็บ เป็นต้น

1.3 แหล่งน้ำผิวดิน (Surface Water) เกิดจากน้ำในบรรยากาศที่กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ และตกลงสู่ผิวโลกไหลลงมาซึ่งตามแอ่งที่ต่ำ เช่น หนอง บึง แม่น้ำ ทะเล ทะเลสาบ เป็นต้น

1.4 แหล่งน้ำใต้ดิน (Ground Water) เป็นน้ำที่ไหลซึมผ่านชั้นดิน และหิน ลงไปสะสมตัวอยู่ตามช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน และหิน น้ำชนิดนี้มีประโยชน์มากทั้งยังเป็นตัวการสำคัญ ในการควบคุมการแพร่กระจายพรรณพืชตลอดจนเป็นตัวทำลาย และตกตะกอน เป็นสารประกอบหลายอย่างใต้พื้นดิน

น้ำที่เป็นส่วนประกอบทางเคมี (Chemical Water) ได้แก่ น้ำที่เป็นองค์ประกอบทางเคมี หรือเป็นองค์ประกอบในแร่ หิน ดิน และแหล่งน้ำในบรรยากาศ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่เป็นส่วนประกอบทางเคมี เช่น การเย็นตัวของหินอัคนี การพองตัวของแร่ การเปลี่ยนแปลงจนมีปริมาณน้ำมากบนผิวโลกซึ่งใช้ระยะเวลายาวนานมาก น้ำผิวดิน (Surface Water) เป็นองค์ประกอบหนึ่งของวัฏจักรของน้ำเกิดจากน้ำฝนที่ตกลงมาที่มีการสะสมตัวกันอยู่บริเวณพื้นผิวดินซึ่งฝนที่ตกลงมาในระยะแรกน้ำมักจะซึมลงไปใต้ดินก่อนจนกระทั่งดินอิ่มตัวแล้วจึงมีน้ำแช่แข็งอยู่ตามลุ่มน้ำ หรือแหล่งน้ำขนาดเล็ก ลักษณะการไหลของน้ำผิวดินบนโลกแบ่งเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

1.4.1 ประเภทที่ 1 คือ ลักษณะการไหลแบบแผ่ซ่าน (Sheet Flow) โดยไหลไปตามความลาดเอียงของพื้นผิว และมีระดับความลึกไม่มาก

1.4.2 ประเภทที่ 2 คือ การไหลตามร่อง (Channel Flow) หรือเป็นลักษณะการไหลของน้ำไปตามลำธาร ซึ่งเป็นน้ำผิวดินที่ตื้นที่ได้ศึกษามาแล้วน้ำผิวดินนับเป็นแหล่งน้ำที่มีประโยชน์มากต่อมนุษย์ในด้านการดำรงชีวิต แหล่งน้ำผิวดินนอกจากจะเป็นส่วนของน้ำฝนที่

ตกลงสู่ผิวดินแล้วยังรวมถึงส่วนของน้ำที่ไหลล้นออกจากใต้ดินเข้ามาสมทบด้วยปริมาณของน้ำผิวดินจะมาก หรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมายังพื้นที่นั้น ๆ ด้วยสำหรับลักษณะน้ำผิวดินทั่วไปสามารถแยกพิจารณาได้ ดังนี้

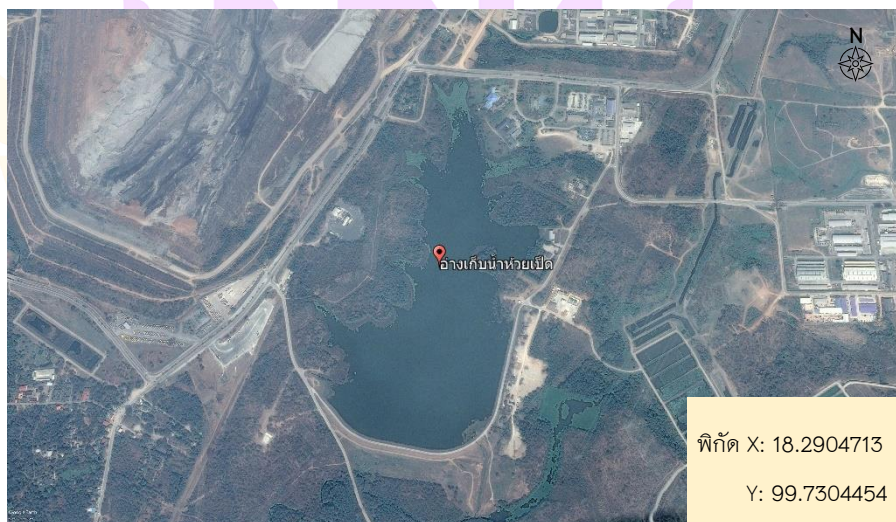
1) อ่างเก็บน้ำ (Reservoir) คือ แหล่งน้ำผิวดินประเภทที่รองรับน้ำจากน้ำฝนที่ไหลจากพื้นที่ที่สูงกว่าลงมารวมกันในอ่างเก็บน้ำ โดยอ่างเก็บน้ำหมายถึง ทะเลสาบน้ำจืดที่สร้างขึ้นโดยการก่อสร้างเขื่อนขวางปิดกั้นลำน้ำธรรมชาตินั่นเอง

2) แม่น้ำ หรือลำคลอง (Mativenga and Marnewick, 2018)

ในการทำการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแหล่งน้ำใกล้กิจกรรมการทำเหมืองแร่เพื่อนำไปใช้การผลิตกระแสไฟฟ้าพบว่าในการทำเหมืองถ่านหินมีผลกระทบต่อแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติ

2. อ่างเก็บน้ำห้วยเบ็ด

อ่างเก็บน้ำห้วยเบ็ด ตั้งอยู่ ตำบลแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ มีความจุ 1.027 hm³ รองรับน้ำจากกิจกรรมการเปิดหน้าดินทำเหมืองมีคุณภาพน้ำไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานในระบบผลิตน้ำ และปัจจุบันยังไม่ได้นำน้ำจากส่วนนี้มาใช้ประโยชน์เท่าที่ควร จุดที่ตั้ง และภาพอ่างเก็บน้ำห้วยเบ็ดห้วยเบ็ดแสดงได้ดังภาพ 1



ภาพ 1 สถานที่ตั้งอ่างเก็บน้ำห้วยเบ็ด ตำบลแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3. การจัดการน้ำจากกระบวนการผลิตโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

น้ำเป็นปัจจัยหลักสำคัญในการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้า และการทำงานภายในเหมืองถ่านหินแต่การดูแลรักษาแหล่งน้ำเพื่อชุมชนทั้งในการอุปโภค บริโภค และรักษา สภาพแวดล้อมยิ่งเป็นเรื่องที่มีความสำคัญกว่า โดยน้ำที่เกิดขึ้นในกิจกรรมต่าง ๆ แบ่งได้ 2 แหล่งโดยมีวิธีการบริหารจัดการตามหลักวิชาการ ดังนี้

3.1 น้ำจากกระบวนการทำเหมือง คือ น้ำที่เกิดในกิจกรรมการทำเหมือง เช่น ระบบฉีดควบคุมฝุ่นที่บ่อดิน ถนน ล้างรถ และสายพานลำเลียง เป็นต้น จะนำน้ำมาจากแหล่งต่าง ๆ ได้แก่ บ่อพักน้ำฝนในชุมเหมือง บ่อพักน้ำบริเวณที่ทิ้งดินนอกชุมเหมือง และบ่อดกตะกอน ในกรณีน้ำจากชุมเหมืองมีมากเกินไป จะสูบไปพักไว้ในบ่อดกตะกอน เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ หรือส่งต่อไปยังระบบบำบัดทางชีววิถี เพื่อบำบัดน้ำให้ได้ค่ามาตรฐานตามกฎหมายของน้ำทิ้งโรงงาน อุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม ก่อนจะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต่อไปดังภาพ 2



ภาพ 2 กระบวนการจัดการน้ำทิ้งจากเหมืองแม่เมาะ

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2016

3.2 น้ำจากกระบวนการผลิตไฟฟ้า คือ การใช้น้ำของโรงไฟฟ้าโดยจะเกิดน้ำทิ้ง 2 รูปแบบ ได้แก่ น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต และน้ำทิ้งทั่วไป ซึ่งน้ำทิ้งทั้ง 2 แบบ นั้นจำเป็นต้องผ่านระบบบำบัดน้ำทิ้งหลายขั้นตอน ไม่ว่าจะเป็นบ่อบำบัดน้ำชี้เถ้า บ่อบำบัดตะกอน บ่อบำบัดชีวภาพ ผ่านบ่อบำบัดน้ำ ก่อนจะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ เพื่อให้ประชาชนในพื้นที่โดยรอบมั่นใจต่อคุณภาพน้ำที่ดีตามมาตรฐานสิ่งแวดล้อมแสดงดังภาพ 3



ภาพ 3 กระบวนการจัดการน้ำทิ้งจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2016

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้น

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้น หรือระบบประปา คือ วิธีการทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้นโดยกำจัดสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ เช่น สารแขวนลอย ความกระด้าง ซัลเฟต เป็นต้น สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การต้ม การเติมสารเคมี และกระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส เป็นต้น

1. การตรวจสอบคุณภาพน้ำดิบ

ก่อนที่จะนำน้ำดิบมาใช้ในการกระบวนการผลิตจะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพน้ำก่อน โดยความเหมาะสมต่อการรวมตะกอนของน้ำดิบโดยการเติมสารเคมีในน้ำดิบเพื่อให้เกิดกระบวนการสร้างตะกอน และรวมตะกอนขึ้นอยู่กับระดับ pH และความเบี่ยงต่าง (Alkalinity) ของน้ำดิบ หากน้ำดิบมีค่าความเบี่ยงต่างเพียงพอก็เติมสารส้มเพียงอย่างเดียวไม่จำเป็นต้องใช้ปูนขาว ถ้าหากค่าความเบี่ยงต่างน้อยการเติมสารส้มเพียงชนิดเดียวไม่สามารถทำให้เกิดการรวมตะกอนได้ และพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับตรวจสอบคุณภาพน้ำดิบดังนี้

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) คือ ค่าที่แสดงถึงค่าความเป็นกรดต่างในน้ำดิบ ค่า pH ขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮโดรเจนไอออนที่แตกตัวในน้ำโดยมีค่าตั้งแต่ 0.00 จนถึง 14.00 โดยค่า pH เท่ากับ 0.00 หมายถึงน้ำจะมีสภาพเป็นกรดแก่ pH เท่ากับ 14.00 หมายถึงน้ำมีสภาพเป็นด่างแก่ และค่า pH เท่ากับ 7.00 หมายถึงน้ำที่มีสภาพเป็นกลาง ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นคุณสมบัติของน้ำที่สามารถตรวจสอบ และวัดได้ง่ายที่สุดมีบทบาทสำคัญต่อการทำงานในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เช่น กระบวนการสร้างและรวมตะกอน กระบวนการเติมอากาศของระบบเติมอากาศ ระบบการกำจัดความกระด้างโดยวิธีการตกผลึก รูปการปรับปรุงน้ำเพื่อการป้องกันการกัดกร่อน หรือการตกผลึก ตลอดจนระบบบำบัดน้ำเสียในรูปแบบต่าง ๆ โดยวิธีการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำจากแหล่งน้ำต่าง ๆ สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือที่เรียกว่า pH Meter การใช้เครื่องมือวิเคราะห์ด้วยวิธีการเทียบสี

ค่าความขุ่น (Turbidity) คือ สารที่ไม่ละลายน้ำขนาดเล็กแขวนลอยในน้ำ เช่น ดินโคลน ทรายละเอียด หรือสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กจำพวกสาหร่ายแต่ไม่มีผลต่อสุขภาพอนามัยมากนัก ส่งผลทำให้น้ำนั้นไม่สามารถดื่มได้มีผลต่อระบบการกรองในเครื่องกรองน้ำ และมีผลต่อระบบการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน เนื่องจากคอลลอยด์จะห่อหุ้มจุลินทรีย์ไว้ทำให้คลอรีนไม่สามารถทำลายจุลินทรีย์ได้จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อให้คลอรีนมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีขึ้น

1.1 กระบวนการแตกตัวเป็นไอออนของน้ำ

น้ำเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่อ่อนมากส่งผลให้แตกตัวได้น้อยดังนั้นการนำไฟฟ้าของน้ำจะน้อยจนไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยการนำไฟฟ้าผ่านหลอดไฟแต่ตรวจได้ด้วยเครื่องวัดกระแส (แอมมิเตอร์) ตามทฤษฎีกรด-เบสของโยฮันเนส นิโคลัส เบรินสเตด (Johannes Nicolaus Brønsted) และทอมัส มาร์ติน ลาวรี (Thomas Martin Lowry) กล่าวว่าน้ำทำหน้าที่เป็นทั้งกรดและเบสไอออนที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของน้ำ มีการถ่ายเทโปรตอนกันเองได้ (ออโตไอออนไนเซชัน) ตามภาพ 4



ภาพ 4 กระบวนการออโตไอออนไนเซชันของน้ำ

โมเลกุลของน้ำที่เสีย H^+ จะเปลี่ยนเป็น OH^- ซึ่งมีประจุลบ และโมเลกุลของน้ำที่ได้รับ H^+ จะเปลี่ยนเป็น H_3O^+ ซึ่งมีประจุบวกอาจเขียนสมการกรด-เบส ได้ง่าย ๆ ดังสมการ (1)



เนื่องจากระบบนี้อยู่ในภาวะสมดุลจึงสามารถเขียนสมการค่าคงที่สมดุลของ H_2O ได้ดังสมการ (2)

$$K_w = K [\text{H}_2\text{O}]^2 = [\text{H}_3\text{O}^+] [\text{OH}^-] = 1 \times 10^{-14} \quad (2)$$

ค่า K_w คือ ค่าการแตกตัวของน้ำมีค่าเท่ากับ 1×10^{-14} ที่ 25 องศาเซลเซียสเนื่องจากน้ำบริสุทธิ์แตกตัวเป็นไอออนจะให้ความเข้มข้นของ H_3O^+ และ OH^- เท่ากัน คือ 1×10^{-7}

2. กระบวนการผลิตน้ำประปา

2.1 เป้าหมายในการผลิตน้ำประปา

โดยกระบวนการผลิตน้ำประปานั้นในการจะนำน้ำจากแหล่งน้ำดิบตามธรรมชาติมาใช้งานนั้นจำเป็นต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีคุณภาพดีก่อนที่จะส่งต่อไปยังผู้บริโภค เนื่องจากน้ำจากแหล่งน้ำดิบตามธรรมชาติไม่เหมาะสมในการนำมาใช้โดยตรงเพราะอาจจะยังมีเชื้อโรคต่าง ๆ ประปนอยู่จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อป้องกันสาเหตุต่อการเกิดโรคและเป็นอันตรายต่อชีวิตของมนุษย์ซึ่งทางองค์การอนามัยโลกได้ให้นิยามของวัตถุประสงค์ในการทำน้ำประปาไว้ 3 ประการ ดังนี้

2.1.1 ผลิตน้ำสะอาดเพื่อใช้ในการอุปโภคได้โดยปลอดภัย (Safe and wholesome)

2.1.2 ผลิตน้ำให้พอกับความต้องการของผู้ใช้น้ำ (Adequate quantity)

2.1.3 ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ และพร้อมที่จะจ่ายน้ำให้แก่ผู้ต้องการใช้น้ำได้อย่าง

ทั่วถึง (Readily available to the users) (มันลิน ตันทูลเวศม์, 2537)

2.2 ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา

ในกระบวนการผลิตน้ำประปาจากแหล่งน้ำผิวดิน หรือน้ำดิบเข้าสู่กระบวนการผลิตเพื่อให้ได้น้ำประปาซึ่งน้ำที่ได้จะนำไปใช้เพื่อการอุปโภคบริโภค เกษตรกรรม และอุตสาหกรรมบางประเภทที่ไม่ต้องใช้น้ำที่มีคุณภาพสูง ขั้นตอนการผลิตน้ำประปามี ดังนี้

2.2.1 สูบน้ำผิวดิน หรือน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ หรือแหล่งน้ำอื่นที่จัดหาหรือจัดเตรียมไว้ ซึ่งน้ำดังกล่าวจะมีความขุ่น และมีสารละลายต่าง ๆ รวมถึงโลหะหนักเจือปนอยู่โดยอัตราการสูบน้ำมาตรฐานตามตาราง 1

2.2.2 ปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบโดยการใส่สารส้ม หรือปูนขาวลงไปลงในน้ำ เพื่อช่วยให้เกิดการตกตะกอน และปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำดิบโดยกระบวนการนี้จะทำได้โดยการทำการทดลอง Jar test

2.2.3 การตกตะกอนโดยน้ำที่ผสมสารส้ม หรือปูนขาวแล้วจะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อให้ตะกอนที่มีขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ และตกลงสู่ก้นถังจนได้น้ำที่มีความใสสะอาดโดยมีเกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบถังตกตะกอนแบบ Conventional Type ตามตาราง 2

2.2.4 กรองเพื่อกำจัดตะกอน หรือสิ่งปนเปื้อนที่มีขนาดเล็กมากอีกครั้งโดยการกรองด้วยทรายกรอง กรวดกรอง เพื่อให้ได้น้ำที่มีความใสสะอาดอย่างแท้จริง หากเป็นถังกรองประเภทกรองเร็ว อัตราการกรองประมาณ $5.00-7.50 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-hr}$

2.2.5 ฆ่าเชื้อโดยการใส่คลอรีนในอัตราส่วนที่พอเหมาะ และไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายแล้วนำไปเก็บไว้ในถังน้ำใสเพื่อรอการสูบจ่าย การใส่คลอรีนในน้ำที่กรองแล้วจะใส่วัเป็นเวลาประมาณอย่างน้อย 30 นาที โดยทั้งนี้จะต้องมีคลอรีนเหลืออยู่ไม่น้อยกว่า $0.1-0.2 \text{ mg/L}$

2.2.6 ตรวจสอบ และควบคุมคุณภาพน้ำประปาที่ผลิตได้

2.2.7 ปล่อยน้ำจากหอถังสูงหรือสูบน้ำเข้าไปในระบบท่อจ่ายน้ำเพื่อเพิ่มแรงดันน้ำโดยการออกแบบความจุหอสูงเท่ากับ 10%–20% ของอัตราการใช้น้ำทั้งหมดในวันที่ใช้น้ำสูงสุดโดยความเร็วในเส้นท่อจ่ายน้ำประปาเป็นไปตามตาราง 3

โดยขั้นตอนการผลิตน้ำประปาขั้นต้นนี้แสดงได้ตามภาพ 5 และในประเทศไทยได้มีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาที่ดื่มได้ซึ่งมีการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไว้แสดงได้ ดังตาราง 4

ตาราง 1 ขนาดทางดูดของเครื่องสูบน้ำและอัตราการสูบน้ำ

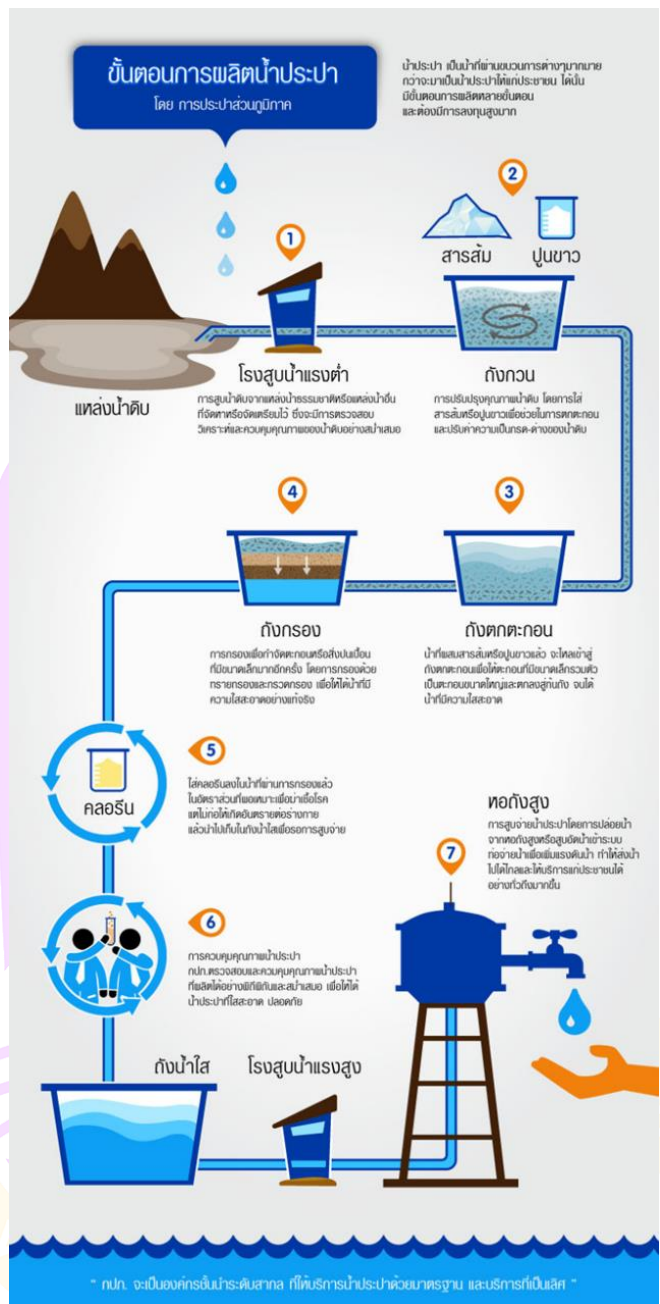
ขนาดทางดูดของเครื่องสูบน้ำ (Suction Mouth, mm.)	อัตราการสูบน้ำ (Discharge capacity, m ³ /min)	
40.00	0.10-0.20	6.00-12.00
50.00	0.16-0.32	9.60-19.20
65.00	0.25-0.52	15.00-30.00
80.00	0.40-0.80	24.00-48.00
100.00	0.63-1.25	37.80-75.00
125.00	1.00-2.00	60.00-120.00
150.00	1.60-3.15	96.00-189.00
200.00	2.50-5.00	150.00-300.00
250.00	4.00-8.00	240.00-480.00
300.00	6.30-12.50	378.00-750.00

ตาราง 2 เกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบถังตกตะกอนแบบ Conventional Type

รายการ	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ
Surface Loading	14.00 - 36.00 m ³ /day/m ²
Horizontal Velocity	0.15 - 0.90 m/min
Detention Time	120.00 - 240.00 min

ตาราง 3 ความเร็วในเส้นท่อจ่ายน้ำประปา

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (mm.)	ความเร็วของน้ำในเส้นท่อ (m/s)
50.00-75.00	0.60-0.80
75.00-150.00	0.70-1.00
200.00-300.00	0.80-1.20
350.00-600.00	0.90-1.40



ภาพ 5 กระบวนการผลิตน้ำประปาจากแหล่งน้ำผิวดินหรือแหล่งน้ำดิบ

ที่มา: การประปาส่วนภูมิภาค, 2020

ตาราง 4 เกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ พ.ศ 2563 ตามประกาศกรมอนามัย เรื่อง
เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้

พารามิเตอร์	หน่วย	เกณฑ์	เกณฑ์	เกณฑ์คุณภาพ	
		คุณภาพฯ	คุณภาพฯ	น้ำบริโภคมอก.(เก่า)	
		กรมอนามัย พ.ศ. 2563	มอก. (ใหม่)	กำหนดสูงสุด	อนุโลมให้ สูงสุด
1. ความเป็นกรด-ด่าง	(pH at 25°C)	6.50-8.50	6.50-8.50	6.50-8.50	9.20
2. สี (Colour)	(PCU)	ไม่เกิน 15	5.00	5.00	15.00
3. ความขุ่น (Turbidity)	(NTU)	ไม่เกิน 5*	5.00	5.00	20.00
4. ความกระด้าง (Hardness)	(mg/L)	ไม่เกิน 300.00	100.00	-	-
5. ปริมาณสารทั้งหมด ที่เหลือจากการระเหย (TDS)	(mg/L)	ไม่เกิน 500.00	500.00	500.00	1,500.00
6. เหล็ก (Fe)	(mg/L)	ไม่เกิน 0.50		0.50	1.00
7. แมงกานีส (Mn)	(mg/L)	ไม่เกิน 0.30	0.05	0.50	1.00
8. ทองแดง (Cu)	(mg/L)	ไม่เกิน 1.00	1.00	1.00	1.50
9. สังกะสี (Zn)	(mg/L)	ไม่เกิน 3.00	3.00	5.00	150
10. ตะกั่ว (Pb)	(mg/L)	ไม่เกิน 0.01*	100.00	0.05	-
11. โครเมียม (Cr)	(mg/L)	ไม่เกิน 0.05	200.00	0.05	-
12. แคดเมียม (Cd)	(mg/L)	ไม่เกิน 0.003	0.003	0.01	
13. สารหนู (As)	(mg/L)	ไม่เกิน 0.01	0.01	-	-
14. ปรอท (Hg)	(mg/L)	ไม่เกิน 0.001	0.001	0.001	
15. ซัลเฟต (Sulfate)	(mg/L)	ไม่เกิน 250	200.00	200.00	250.00
16. คลอไรด์ (Chloride)	(mg/L)	ไม่เกิน 250	250.00	250.00	600.00
17. ไนเตรท (Nitrate as Nitrate)	(mg/L)	ไม่เกิน 50.00	4.00	45.00	45.00
18. ฟลูออไรด์ (Fluoride)	(mg/L)	ไม่เกิน 0.70	0.70	0.70	1.00
19. โคลิฟอร์ม แบคทีเรีย (Coliform Bacteria)	(MPN/100 ml)	<1.10	< 1.10	<2.20	-

ตาราง 4(ต่อ)

พารามิเตอร์	หน่วย	เกณฑ์	เกณฑ์	เกณฑ์คุณภาพ	
		คุณภาพ	คุณภาพ	น้ำบริโภคหมอก.(เก่า)	
		กรัม	หมอก.	กำหนดสูงสุด	อนุโลมให้สูงสุด
		อนามัย	(ใหม่)		
		พ.ศ. 2563			
20. พีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Faecal Coliform Bacteria)	(MPN/100 ml)		-	-	-
21. อีโคไล (E. coli)	โคโลนี	-	ไม่พบ	ไม่มี	-
22. สแตฟฟีโลคอคคัส ออเรียส (Staphylococcus aureus)	โคโลนี	-	ไม่พบ	-	-
23. ซัลโมเนลลา (Salmonella)	โคโลนี	-	ไม่พบ	-	-
24. คลอสทริเดียม เพอร์ฟริงเจนส์ (Clostridium perfringens)	โคโลนี	-	ไม่พบ	-	-
25. สแตนด์พลาตเคานต์ (Standard Plate Count)	โคโลนี	-	-	500.00	-
26. กลิ่น (Odor)		-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ	-
27. รส (Taste)		-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ	-

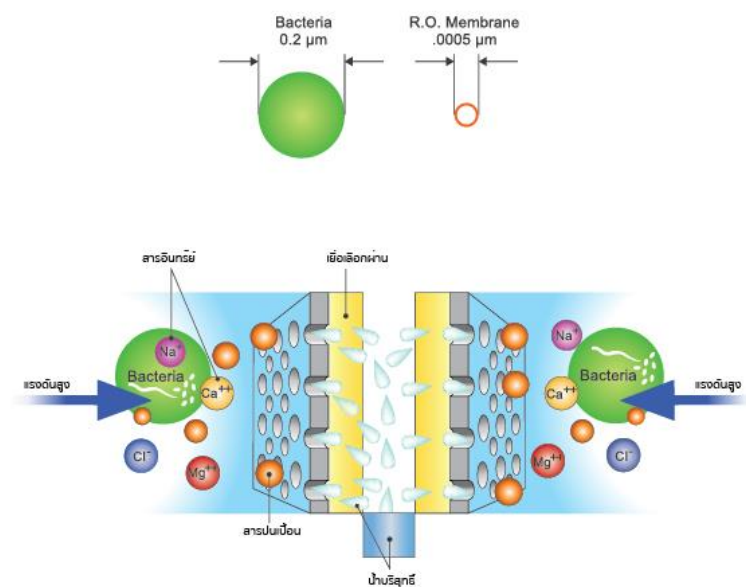
ที่มา: กรมอนามัย, 2563

3. ระบบรีเวอร์ส ออสโมซิส (Reverse Osmosis)

ระบบรีเวอร์ส ออสโมซิส (Reverse Osmosis) หรือระบบ RO คือ กระบวนการที่ทำให้ให้น้ำบริสุทธิ์โดยใช้เมมเบรนในการดูดซึมโมเลกุลที่ไม่ต้องการ และอนุภาคขนาดใหญ่เกิดขึ้นเมื่อเราให้ความดันกับสารละลายจนความดันของน้ำสูงกว่าความดันออสโมติส (Osmotic pressure) โดยโมเลกุลของเหลว หรือน้ำจะถูกดันให้ผ่านเยื่อเมมเบรนที่เต็มไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กที่มีความสามารถในการกรองได้ละเอียด ถึง 10^{-6} m หรือเล็กกว่าเส้นผม 500,000 เท่า น้ำที่ได้หลังจากกระบวนการนี้จึงมีความบริสุทธิ์สูงแสดงดังภาพ 6 โดยคุณภาพน้ำดิบก่อนเข้าระบบ RO นั้นควรมีคุณภาพดังนี้

- 3.1 ไม่มีสิ่งแขวนลอยที่จะเข้าไปอุดตันเยื่อเมมเบรน
- 3.2 ไม่มีเชื้อแบคทีเรียที่จะเข้าไปตกค้าง และเจริญเติบโตจนทำลายเยื่อเมมเบรน
- 3.3 ไม่มีธาตุเหล็กสูง
- 3.4 ไม่มีคลอรีนตกค้าง
- 3.5 ไม่มีสารประเภทไขมัน
- 3.6 ไม่มีเกลือ หรือแร่ธาตุที่ส่งผลให้เกิดตะกอนเคลือบผิวหน้าของเยื่อเมมเบรนส่งผลให้

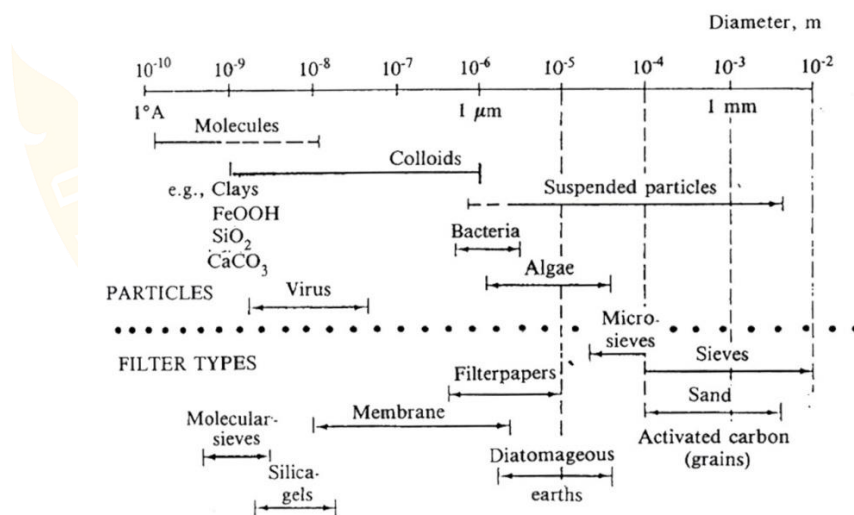
เกิดการอุดตัน (กระทรวงสาธารณสุข, 2562)



ภาพ 6 การทำงานของระบบ RO

กระบวนการตกตะกอน

กระบวนการตกตะกอน คือ การแยกเอาของแข็งซึ่งอยู่ในรูปของสารแขวนลอย ออกจากของเหลว ของแข็งนี้อาจเป็น ดิน ทราย สารแขวนลอย ตะกอนเคมี ตะกอนชีวภาพ หรือพวกจุลินทรีย์ต่าง ๆ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้น้ำผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำสำหรับนำไปใช้ ประโยชน์ และแยกตะกอนออกจากน้ำโดยอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์นั้น โดยทั่วไปมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10^{-6} mm จนถึง 10^{-3} mm แสดงดังภาพ 7 เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กมากจึงไม่สามารถที่จะตกตะกอนได้ด้วยตัวของอนุภาคเอง นอกจากนี้ อนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำมักจะมีประจุ ได้แก่ พวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีประจุเป็นบวก ยกตัวอย่าง เช่น สบู่ สารอินทรีย์ สารซักฟอก เป็นต้น สำหรับพวกที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มักจะมีประจุเป็นลบ เช่น อนุภาคของดินเหนียวเนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีประจุทำให้อนุภาคที่มีประจุเดียวกันดินแรงผลักกันระหว่างกันระหว่างอนุภาคซึ่งส่งผลให้อนุภาคเหล่านี้มีเสถียรภาพจึงทำให้อนุภาครวมตัวกัน และจับตัวเป็นก้อนซึ่งกระบวนการสร้าง และรวมตะกอน คือ การทำให้ออลลอยด์ หรือสารแขวนลอยขนาดเล็กรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดตะกอนได้ง่าย และถูกกำจัดออกจากระบบโดยตกตะกอน หรือการกรองต่อไป ซึ่งจะมี 2 ขั้นตอน ได้แก่ การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) และทำให้อนุภาคคอลลอยด์ทั้งหมดเสถียรภาพมาสัมผัสกัน



ภาพ 7 แสดงการจำแนกสารต่าง ๆ ในน้ำ

ที่มา: มั่นสิน ตันกุลเวศม์, 2537

1. กระบวนการสร้าง และรวมตะกอน

กระบวนการสร้าง และรวมตะกอนที่ส่งผลให้คอลลอยด์ หรือสารแขวนลอยรวมตัวกัน หรือการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ สามารถกระทำโดยอาศัยกลไก 4 แบบ ดังนี้

1.1 การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer)

กลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ทำให้ชั้นกระจายมี ความหนาลดลง และมีผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ซึ่งเป็น ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์มีค่าลดลงไปด้วย เนื่องจากมีประจุบวกเข้าไปรวมตัวกันที่บริเวณใกล้เคียงผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้นทำให้ อนุภาคของประจุลบของคอลลอยด์ไม่สามารถแยกตัวออกไปได้ไกล ในการทำลาย เสถียรภาพโดยกลไกนี้ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้าที่มีไอออนบวกที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของ คอลลอยด์จะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์นอกจากนี้ไม่ว่าจะเติมไอออนชนิด ประจุบวกมากเพียงใดจะไม่สามารถทำให้อนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากชนิดประจุ ลบไปเป็นประจุบวก (Charge Reversal)

1.2 การดูดติดผิว และทำลายประจุ (Adsorption & Charge Neutralization) คือ กลไก การดูดติด และการทำลายเสถียรภาพเกิดจากการเติมสารเคมีบางชนิดที่สามารถแตกตัว หรือทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วให้ไอออนแตกประจุ ซึ่งสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ทำ ให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคลดลง จนอนุภาคสามารถสัมผัส และเกาะติดกันได้ กลไกการ ดูดติดผิวนี้จึงแตกต่างจากกลไกแบบแรก (ซึ่งไอออนต่างประจุ หรือไอออนดูลประจุอยู่ในชั้น กระจายโดยไม่ดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์) มี 3 กลไก ดังนี้

1.2.1 กลไกการดูดติดผิว ต้องการไอออนต่างชนิดน้อยกว่าแบบแรก เนื่องจาก ไอออนต่างประจุสามารถเข้าถึงผิวอนุภาคคอลลอยด์การทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์จึง ได้ผลดีกว่าไอออนต่างประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคได้

1.2.2 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกการดูดติดผิวเป็นแบบ สโตยชิโอเมตริก (Stoichiometric) ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ใช้จะมาก หรือน้อยตามปริมาณ ของอนุภาคคอลลอยด์แต่การทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่เป็นไป ตามสโตยชิโอเมตริก

1.2.3 กลไกการดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็น ตรงข้ามกับของเดิมทั้งนี้โดยการใช้สารสร้างตะกอนให้มากเกินไปยกตัวอย่าง เช่น เมื่อใช้ Dodecylammonium พอเหมาะทำให้โคแอกกูเลชันเกิดได้ดีที่สุด (ความขุ่นเหลือน้อยที่สุด) แต่เมื่อเติม Dodecylammonium มากกว่าระดับที่เหมาะสมเสถียรภาพของคอลลอยด์จะเกิด

ขึ้นมาใหม่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น

1.3 การจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น (Sweep Coagulation) คือ การเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดในน้ำในปริมาณที่มากเพียงพอจะทำให้การตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกที่เกิดขึ้น หรืออาจจับตัวรวมกับผลึกอื่น ๆ ด้วยกลไกนี้ก็จะถือว่าเป็นการเพิ่มขนาด และน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ โดยทำให้รวมตัวกันขนาดใหญ่ ส่งผลให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพ และสามารถตกตะกอนได้ ซึ่งสารตกตะกอนเคมี เช่น สารส้ม เพอริคลอไรด์ แมกนีเซียมคาร์บอเนต และปูนขาว สามารถทำให้เกิดการโคแอกกูเลชันได้โดยการสร้าง $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_3$, $Mg(OH)_2$ และ $CaCO_3$ ซึ่งล้วนแต่เป็นผลึกสาร (Precipitate) ที่ไม่ละลายน้ำ การกำจัดคอลลอยด์โดยกลไกแบบนี้เรียกว่า Sweep Floe Coagulation หรือ Sweep Coagulation กลไกที่ใช้ผลึกสารอินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรก คือ ปริมาณสารเร่งตกตะกอนที่เหมาะสม (Optimum Dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ น้ำที่มีปริมาณมวลสารน้อยต้องใช้สารเร่งตกตะกอนเป็นจำนวนมากจึงจะเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันกลไก แบบที่ 3 นี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ กระบวนการโคแอกกูเลชันนี้จึงไม่จำเป็นต้องเกิดในขณะที่ยึดค่าพีเอชที่ค่าต่ำที่สุด แต่ค่าที่มีบทบาทต่อกลไกนี้คือ ค่า pH เนื่องจากความสามารถในการเกิดผลึกของสารต่าง ๆ จะมีความสำคัญกับค่า pH ดังนั้นสารเร่งตกตะกอนแต่ละชนิดจะมีระดับ pH ที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน

1.4 การใช้สารอินทรีย์พอลิเมอร์เป็นตัวเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging) คือ เมื่อเติมพอลิเมอร์ลงในน้ำพอลิเมอร์จะเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ การเกาะติดนี้อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของพอลิเมอร์ และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของพอลิเมอร์ และคอลลอยด์ อนุภาคคอลลอยด์ที่มีพอลิเมอร์เกาะอยู่ โดยที่พอลิเมอร์ยังมีปลายอิสระที่สามารถไปเกาะติดกับอนุภาคอื่น ๆ ได้อีกถือว่าเป็นอนุภาคที่เสถียรภาพแล้ว

2. กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation)

กระบวนการโคแอกกูเลชันมีส่วนประกอบสำคัญ 2 ขั้นตอน ได้แก่ การกวนเร็ว (Rapid Mixing) และการกวนช้า (Slow Mixing) ดังนี้

2.1 การกวนเร็ว (Rapid Mixing) คือ การทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์โดยการเติมสารโคแอกกูแลนต์ให้สภาพน้ำที่มีความปั่นป่วนอย่างรุนแรงปัจจัยที่สำคัญที่สุดในกระบวนการโคแอกกูเลชันก็คือ ชนิดของสารตะกอน ปริมาณของสารตกตะกอน

(Coagulant) และสารช่วยตกตะกอนเคมี (Coagulant aid) ที่ใช้แต่โดยทั่วไปปัจจัยที่มีผลต่อการทำงาน of โคแอกกูเลชัน ได้แก่ ความเข้มข้นของเกลือละลายน้ำในน้ำดิบ ค่า pH อุณหภูมิ ชนิด ขนาดของอนุภาค การกวนผสม และความเข้มข้นของสารตกตะกอน สารตกตะกอนที่ได้จากวัสดุธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์พอลิเมอร์ข้อดีของการใช้พอลิเมอร์ (Polymers) เป็นสารตกตะกอนที่สามารถใช้เป็นสารตกตะกอนในปริมาณที่น้อยลง เกิดสลัดจ์น้อย และสลัดจ์ที่ได้สามารถไปแยกออกได้ง่ายนอกจากนั้นยังลดปัญหาเรื่องการปรับค่า pH และสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ซึ่งได้กล่าวว่าการตกตะกอนที่ได้จากวัสดุธรรมชาติจะสามารถใช้กับน้ำที่มีความผันแปรของค่า pH ในช่วงที่กว้างกว่าการใช้สารส้มโดยไม่ทำให้ค่า pH และสภาพความเป็นด่างของน้ำดิบเปลี่ยนแปลง ในการขจัดความขุ่นสามารถทำได้ทั้งในระยะเวลาการกวนเร็ว (ประมาณ 10 s) (Rossini, Garrido and Galluzzo, 1999) อัตราการกวนเร็วที่ 100 rps (Metcalf, Eddy and Tchobanoglous, 1991)

2.2 การกวนช้า (Slow Mixing) คือ ขั้นตอนการกวนช้าเป็นการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วมีโอกาสสัมผัส และรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะตกตะกอนได้ง่ายขึ้นกลไกนี้ ได้แก่ เพอริไคเนติก (Perikinetetic Flocculation)

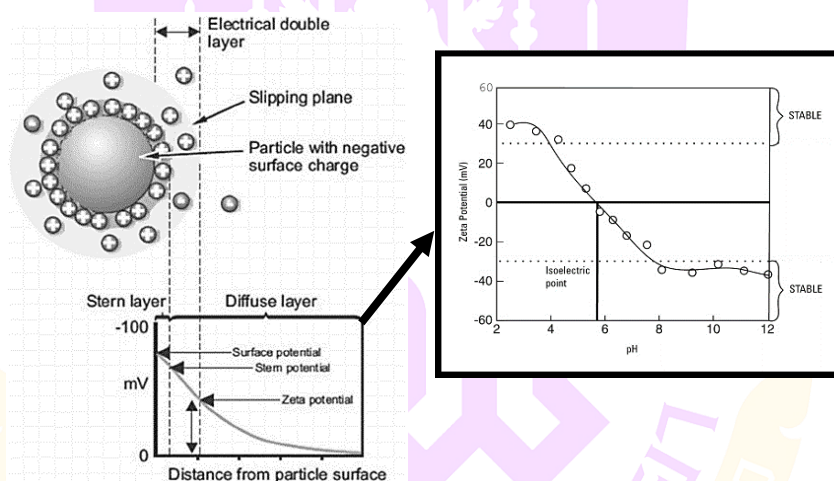
3. กระบวนการฟลอคคูเลชัน (Perikinetetic Flocculation)

เป็นการรวมตะกอนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อนที่มีการแปรรูปเป็นพลังงานทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนอย่างรวดเร็ว และชนอนุภาคความขุ่นที่กระจายอยู่ในน้ำทำให้อนุภาคที่เคลื่อนที่เกิดการสัมผัสจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอุณหภูมิของน้ำส่งผลต่อการรวมตัวกันของตะกอน และจำนวนอนุภาค โดยมีชื่อทางเทคนิคว่าออร์โธไคเนติกฟลอคคูเลชัน (Orthokinetic Flocculation) ซึ่งการรวมตะกอนจะเกิดขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ของน้ำอยู่ในภาวะของการกวนผสมด้วยความเร็วของการเคลื่อนที่ของน้ำแตกต่างกันตามตำแหน่ง และเวลา ดังนั้นอนุภาคความขุ่นที่เคลื่อนที่ไปกับน้ำนั้นจึงต้องมีความเร็วที่แตกต่างกันด้วยจึงจะทำให้เกิดการชน และรวมตัวกันโดยความเร็ว และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกวนช้าที่ 25–35 rpm เป็นเวลา 15–20 นาที และทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30–45 นาที (Hanson and Cleasby, 1990)

4. การเกิดเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพจะสามารถดำรงสถานภาพแขวนลอยอยู่ในน้ำโดยไม่ตกตะกอนอยู่ในระยะเวลาอันสั้นการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ตกตะกอน และแยกตัวออกจากน้ำถือว่าเป็นการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์เสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงดูดซับแรงผลักของอนุภาคเมื่อแรงผลักสูงกว่าแรงดูดอนุภาคก็จะมีเสถียรภาพ แต่ถ้า

แรงดูดสูงกว่าแรงผลักอนุภาคก็สามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน หรือฟล็อกได้แรงคู่ระหว่างอนุภาคเรียกว่า Van der Waals force เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กันส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคนั้นเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาค หรือซีตาโพเทนเชียล (Zeta potential) ค่าซีตาโพเทนเชียล คือ ความแตกต่างของประจุไฟฟ้าระหว่างชั้นความหนาแน่นของไอออนที่อยู่รอบ ๆ อนุภาค และประจุในของเหลวที่อยู่ล้อมรอบอนุภาคเกิดขึ้นในกระบวนการโคแอกกูเลชันฟล็อกคูเลชัน (mV) แสดงได้ดังภาพ 8 เป็นค่าที่ใช้เพื่อบอกแนวโน้มว่าอนุภาคจะมีการเกาะตัวกันเป็นก้อน หรือไม่ เช่น เมื่อมีการปรับค่า pH อนุภาคแขวนลอยจะเริ่มอยู่ตัวไม่สามารถแยกตัวได้เมื่อศักย์ซีตามีค่ามากกว่า +30 mV หรือ น้อยกว่า -30 mV ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่าศักย์ซีตาของอนุภาคเพื่อศึกษาคุณสมบัติการกระจายตัวในระดับคอลลอยด์ของอนุภาค

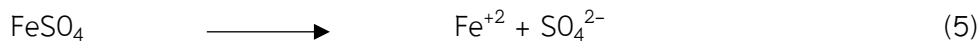
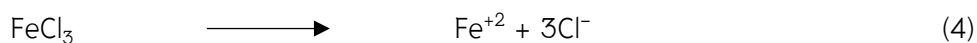


ภาพ 8 ความต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวสเตอร์นกับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลาย

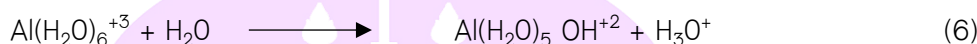
ที่มา: Reynolds and Richards, 1995

5. โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม และสารประกอบเหล็ก

เคมีของสารส้ม และสารประกอบเหล็กในน้ำ คือ เมื่อสารส้ม เพอริคคลอไรด์ และเฟอร์รัสซัลเฟตละลายน้ำจะมีการแตกตัวเป็น ไอออนบวกและลบ เกิดขึ้นดังแสดงในสมการ (3) - (5)

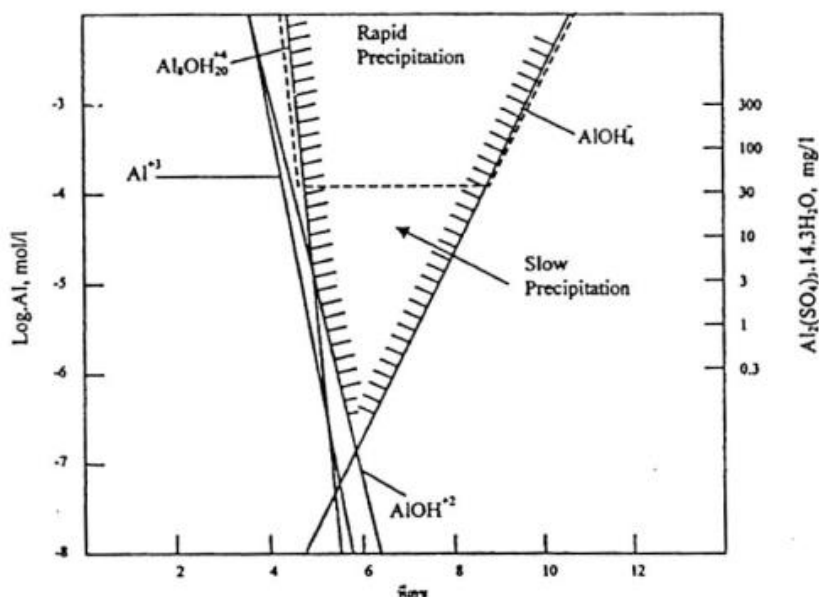


เนื่องจาก Al^{+3} และ Fe^{+3} มีอำนาจเป็นกรดจึงสามารถให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จึงพร้อมที่จะไฮโดรไลซ์ (Hydrolyze) ให้เป็นไอออนต่าง ๆ ของอลูมิเนียม และเหล็กซึ่งมี OH^- เป็น Ligand ดังแสดงในสมการ (6)



ไอออนคอมเพล็กซ์ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นไอออนที่มีอะตอมเดี่ยว และเรียกว่า Monomeric Hydroxo Complex สารดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยา และรวมกันเป็นสารคอมเพล็กซ์ที่มีอะลูมิเนียมมากกว่า 1 อะตอม โดยจะเรียกลักษณะการรวมตัวกันนี้ Polymeric Hydroxo Complex เช่น $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{+4}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{+4}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{+3}$

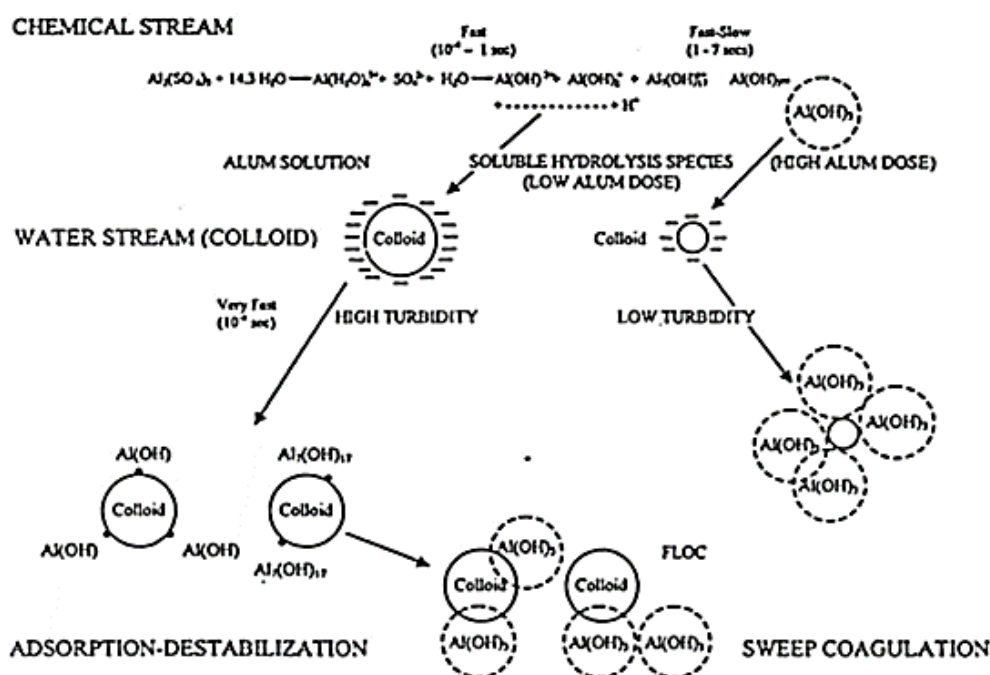
ค่า pH ของน้ำจะเป็นปัจจัยที่กำหนดความเข้มข้น และชนิดของไอออนคอมเพล็กซ์ต่าง ๆ ของสารส้มซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และความเข้มข้นของไอออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่าง ๆ สามารถแสดงได้ด้วยไดอะแกรมที่เรียกว่า Stability Diagram ดังภาพ 9 จากรูปจะเห็นว่าน้ำที่มีค่า pH ต่ำจะมี Al^{+3} มากที่สุด แต่เมื่อค่า pH มากขึ้นก็จะส่งผลให้ไอออนเชิงซ้อนที่มีประจุบวกลดน้อยลง เมื่อค่า pH เข้าใกล้ความเป็นกลางสารประกอบ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ซึ่งเป็นของแข็งจะเกิดมากกว่าไอออนอื่น ๆ พื้นที่บริเวณเขตแรเงาแสดงถึงบริเวณที่เกิดการตกผลึกของตัว $\text{Al}(\text{OH})_3$ ตามทฤษฎี โดยการตกผลึกอาจเกิดขึ้นในอัตราที่ช้ามากเมื่อใช้ปริมาณของสารส้มน้อยลงเนื่องจากไม่มีสารชักนำ (Seed) พื้นที่ในเส้นประจะแสดงถึงบริเวณที่มีการตกผลึกของ $\text{Al}(\text{OH})_3$



ภาพ 9 เสถียรภาพของสารส้มในน้ำที่ไม่มีความขุ่นพื้นที่ภายในเส้นประเป็นบริเวณที่มีการตกผลึกของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ เกิดขึ้นได้เร็ว ส่วนพื้นที่ภายนอกเส้นประแต่ยังแรงเงาอยู่มีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ

ที่มา: Reynolds and Richards, 1995

กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม และสารประกอบเหล็ก โดยตัวของสารส้ม หรือสารประกอบเหล็กนั้นจะมีความสามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์จึงเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยกลไกหลัก 2 ประการ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารเร่งตกตะกอน และค่า pH ของน้ำที่ศึกษา โดยค่า pH ของน้ำต้องเป็นค่า pH ของน้ำภายหลังการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันแล้วกลไกดังกล่าว คือ กลไกแบบดูดติดผิว และทำลายประจุ โดยกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึก หรือ Sweep Coagulation ส่วนใหญ่ในกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม หรือสารประกอบเหล็กในน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีกลไกแบบ Sweep Coagulation เป็นหลัก (Amirtharajah and Mills, 1982) ดังภาพ 10 กลไกแบบดูดติดผิว และทำลายประจุเป็นกลไกร่วมซึ่งมีบทบาทน้อยกว่า



ภาพ 10 กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มทั้งสองประเภท

ที่มา: Amirtharajah and Mills, 1982

6. ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน และกระบวนการฟล็อกคูเลชัน

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน และกระบวนการฟล็อกคูเลชัน โดยแบ่งได้ 5 ปัจจัย ดังนี้

6.1 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ที่เหมาะสมในการตกตะกอน เนื่องจากกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำนั้นประสิทธิภาพของสารที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดจะดีที่สุดในช่วง pH ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจำเป็นต้องมีการหาค่า pH ของน้ำเพื่อปรับสภาพของน้ำให้เหมาะสมต่อสารตกตะกอนเคมีนั้น ๆ โดยค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารส้มนั้นจะอยู่ที่ช่วง pH 6.00-7.00 ตัวของ FeCl_3 ให้ผลที่ดีอยู่ที่ช่วงของ pH 5.00-7.00 (Bratby, 2016) และ PAC พบช่วง pH ที่ 6.00-9.00 มีความสามารถในการกำจัดความขุ่นได้ดีที่สุด (Almatin and Gholipour, 2019)

6.2 ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำเนื่องจากคอลลอยด์ในน้ำเป็นสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ที่มีสภาพเป็นคอลลอยด์ที่ไม่ชอบน้ำซึ่งจะถูกกำจัดออกได้ง่ายกว่าพวกชอบน้ำ มีประจุบวก หรือลบ ดังนั้นหากทราบชนิดของคอลลอยด์จะสามารถเลือกใช้สารตกตะกอนให้

เหมาะสมส่งผลถึงชนิดของสารตกตะกอนสารเร่งตกตะกอนซึ่งแต่ละชนิดมีความเหมาะสมกับคอลลอยด์แต่ละชนิดไม่เหมือนกันตลอดจนคุณสมบัติในการตกตะกอน และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในน้ำนั้นจะต้องมีการเลือกใช้งานให้เหมาะสมระหว่างชนิดของคอลลอยด์ และสารที่ใช้ในการสร้างตะกอน ทั้งยังรวมไปถึงประจุไฟฟ้าของไอออนที่ดูดติดบนพื้นผิวของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งจะเป็นประจุบวก หรือลบก็ได้ โดยอนุภาคคอลลอยด์จำนวนมากได้ประจุไฟฟ้าเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนของหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) บนพื้นผิวของอนุภาค ยกตัวอย่าง เช่น โปรตีนได้รับประจุมาจากการแตกตัวเป็นไอออนของหมู่อะมิโน หรือคาร์บอกซิล โดยจะขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำเมื่อน้ำมีค่า pH ต่ำโปรตีนจะมีประจุบวก และถ้าน้ำมีค่า pH สูงจะมีประจุเป็นลบ หรือโปรตีนอาจไม่มีประจุไฟฟ้าเลยที่ค่า pH เป็นกลาง

6.3 อุณหภูมิ คือ ตัวของปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของน้ำหากอุณหภูมิต่ำความหนืดจะสูงจะทำให้อัตราการตกตะกอนช้าลงเพราะส่งผลถึงความสามารถในการเกิดกลุ่มตะกอนซ้ำ มีงานวิจัยได้ทำการศึกษาความสามารถในการสร้างตะกอนของสารส้ม เพอริคลอไรด์ และโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิระหว่าง 6-29 องศาเซลเซียส พบว่าช่วงอุณหภูมิที่ต่ำส่งผลต่อการรวมตัวของตะกอนเป็นไปได้ช้า (Fitzpatrick, Fradin and Gregory, 2004)

6.4 เวลา และความเร็วของการกวนผสม เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวการทำให้สารเคมีสามารถลอยน้ำอย่างทั่วถึงเพื่อให้เกิดการสร้างตะกอนจึงจำเป็นต้องกวนน้ำอย่างรุนแรงด้วยเวลาอันสั้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง หลังจากนั้นเมื่อต้องการให้เกิดการรวมตัวของตะกอนจึงต้องใช้ความเร็วในการกวนอย่างช้า ๆ เพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสสัมผัสกันมากที่สุด และเพิ่มโอกาสให้กลุ่มก้อนเล็ก ๆ จากกระบวนการกวนเร็วสัมผัสกันเพื่อรวมตัวกันเป็นกลุ่ม

6.5 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำ คือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการสร้างตะกอนต้องอาศัยส่วนประกอบทางเคมีในน้ำที่สำคัญ ได้แก่ สภาพความเป็นด่างในน้ำซึ่งมีหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่า pH สำหรับการสร้างตะกอนบางตัวเพื่อให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ได้ดีขึ้น

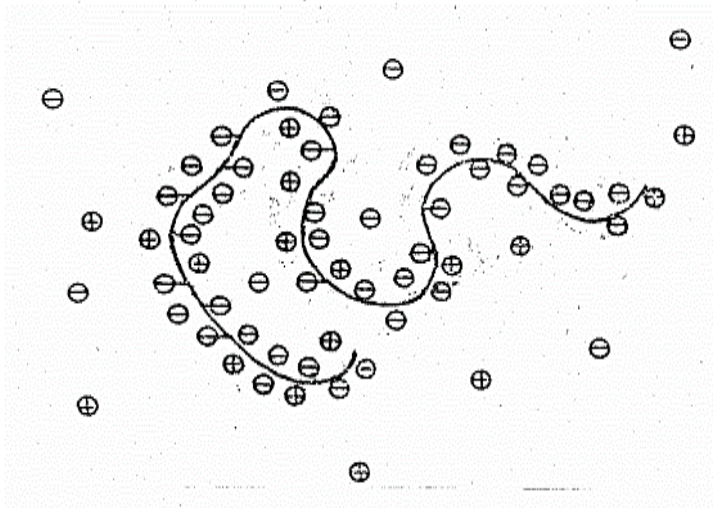
7. สารช่วยตกตะกอน (Coagulation aid)

โพลีเมอร์สามารถแบ่งได้อย่างกว้าง ๆ 2 ชนิด ดังนี้

7.1 โพลีเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติยกตัวอย่าง เช่น เซลลูโลส (Cellulose) เจลาติน (Gelatin) แป้ง (Starch) เป็นต้น

7.2 โพลีเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ซึ่งในปี 1979 ได้มีการสังเคราะห์โพลีเมอร์ขึ้น และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดย โพลีอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) ที่สร้างจากโมโนเมอร์ที่รวมกัน

เป็นสายโซ่ยาวเกิดจากโมโนเมอร์หลาย ๆ ตัวรวมกันดังภาพ 11 สามารถแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ดังนี้



ภาพ 11 รูปร่างของโพลิเมอร์ที่รวมตัวกันเป็นสายยาว

ที่มา: Criteria and Division, 1979

7.2.1 โพลิเมอร์ชนิดประจุบวก (Cationic Polymer) มีประจุบวกบนส่วนของสารอินทรีย์ โดยประจุบวกบนโพลิเมอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนไอออนของไนโตรเจนกรุปซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการปรับสภาพตะกอนที่มีประจุลบยกตัวอย่างของสารช่วยตกตะกอนโพลิเมอร์ชนิดประจุบวก ได้แก่ Polydiallyldimethyl ammonium (PDADMA, cat-floc) สารรวมตะกอนโพลีอะคริลาไมด์ประเภทโพลิเมอร์ชนิดประจุบวก สามารถเตรียมได้โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารเคมีชนิด Non-ionic Polyacrylamide หรือการรวมของ Cationic monomer ด้วย Acrylamide Polymer ชนิด Cationic polymer จะนิยมใช้ในงานปรับสภาพตะกอนจากแหล่งน้ำที่มีประจุเป็นลบ

7.2.2 โพลิเมอร์ชนิดประจุลบ (Anionic Polymer) มีประจุลบบนส่วนของสารอินทรีย์ ซึ่งจำนวนประจุลบ จำนวนประจุลบขึ้นอยู่กับจำนวนกลุ่มของอะคริลาไมด์ที่ละลายอยู่ในกรดอะคริลิก (Acrylic acid) ยกตัวอย่าง เช่น กรดโพลีอะคริลาไมด์ (PAA) ไฮโดรไลซิส โพลีอะคริลาไมด์ (HPAM) เป็นต้น ประเภทของไอออนประจุลบนั้นเมื่อละลายในน้ำจะทำให้เกิดกลุ่มของเอไมด์ (NH_2)

7.2.3 โพลิเมอร์ที่ไม่มีประจุ (Nonionic Polymer) โพลิเมอร์กลุ่มนี้จะไม่ละลายน้ำแต่มีประสิทธิภาพในการเชื่อมอนุภาคของตะกอนให้เกิดการรวมกลุ่มได้ดีในทางปฏิบัติโพลิเมอร์ กลุ่มนี้อาจเกิดการรวมตัวกันของสารอินทรีย์โพลิเมอร์กับสารอินทรีย์โพลิเมอร์ซึ่งจะ

เพิ่มความแข็งแรงของสารแขวนลอย

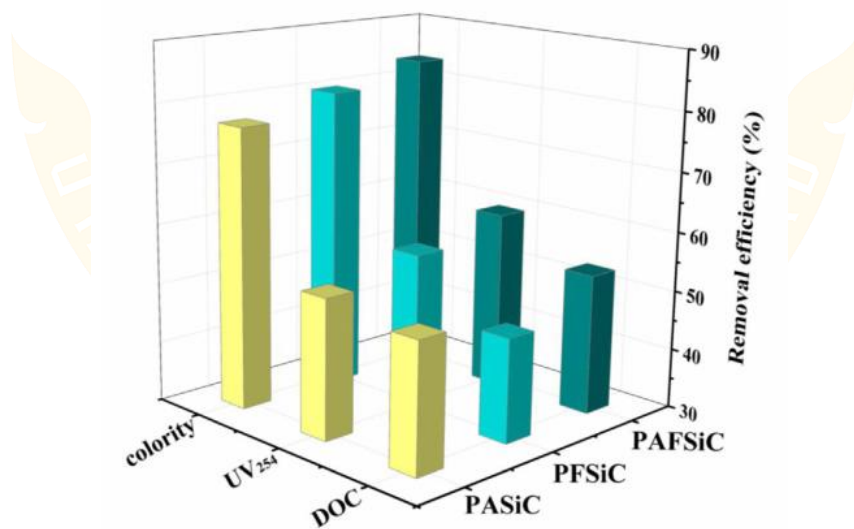
โพลีอะลูมิเนียมเฟอร์ริคซิลิเกตคอลลอยด์ (PAFSiC)

โพลีอะลูมิเนียมเฟอร์ริคซิลิเกตคอลลอยด์ (PAFSiC) เป็นสารซีโอไลต์ที่ได้รับการสังเคราะห์มาจากเถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ได้รับการพัฒนาโดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ภายใต้โครงการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตสารคอมโพสิตโคแอกกูแลนต์จากเถ้าหนักของโรงไฟฟ้าถ่านหินเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำภาพสาร PAFSiC แสดงดังภาพ 12 (เรวดี อนุวัฒนา et.al, 2562) โดยโพลีอะลูมิเนียมเฟอร์ริคซิลิเกตคอลลอยด์เป็นสารซีโอไลต์ที่เป็นโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของหน่วยทรงสี่หน้าของ $[OH]/[Al]$, $[Al]/[Si]$, $[Al+Si]/[Fe]$ จากการก่อตัวที่เป็นระเบียบดังกล่าวทำให้ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์เกิดมีรูพรุน และโพรงที่มีขนาดใหญ่เพียงพอกับการแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้นอกจากนั้นยังสามารถเกิดกระบวนการดูดซับ และคายซับโมเลกุลสารอินทรีย์จากขนาดเล็กจนถึงขนาด 1.00×10^{-9} m ถูกนำไปใช้ในการบวนการที่สำคัญ ได้แก่ การดูดซับ (Adsorption) การเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) และการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) โดยซีโอไลต์ที่มีขนาดผลึกประมาณ 1.00×10^{-6} m จะเหมาะสมในกระบวนการดูดซับ และการเร่งปฏิกิริยา โดยที่ขนาด 3.00×10^{-6} – 4.00×10^{-6} m นั้นเหมาะสมสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Loiha, 2013)

ในงานวิจัยของ (Li, Liu and Cheng, 2017) ศึกษาประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มีค่า pH 7.8 สีที่ 127 AMDI ความขุ่น 38.7 NTU และปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) 35.5 mg/L ด้วยโพลีอะลูมิเนียมซิลิเกตคอลลอยด์ (PASiC), โพลีเฟอร์ริคซิลิเกตคอลลอยด์ (PFSiC) และโพลีอะลูมิเนียมเฟอร์ริคซิลิเกตคอลลอยด์ (PAFSiC) โดยในงานวิจัยนี้มีการใช้สารที่สังเคราะห์ขึ้นมาซึ่งมีสารประกอบที่มีร่วมกัน คือ Si ในการสังเคราะห์สาร PAFSiC ได้มีการเตรียมสารละลาย โพลีอะลูมิเนียมเฟอร์ริคคอลลอยด์ (PAFC) ขึ้นมาเพื่อนำมารวมกับสาร Polysilicic ในอัตราส่วนของ Al / Fe / Si ที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้สาร PAFSiC ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน และหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดโดยหลังจากได้อัตราส่วนที่ดีที่สุดแล้วจะนำไปใช้บำบัดน้ำตัวอย่างข้างต้นซึ่งจากภาพ 13 แสดงให้เห็นว่าตัวของ PAFSiC มีความสามารถในการลดสี ความขุ่น และ DOC ได้สูงกว่าสารตัวอื่น



ภาพ 12 ลักษณะทางกายภาพของสาร PAFSiC ได้รับการสังเคราะห์มาจากถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง



ภาพ 13 การลดลงของความขุ่น สี และปริมาตรสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC)

ที่มา: (Li, Liu and Cheng, 2017)

การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นคุณสมบัติที่แท้จริงของซีโอไลต์ส่วนใหญ่ (Townsend and Coker, 2001) ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนในสารละลายกับไอออนในของแข็งที่สัมผัสกับสารละลายนั้น ซึ่งของแข็งนั้นไม่ละลายในสารละลายของแข็งที่นำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนมีหลายชนิดทั้งที่มีอยู่ตามธรรมชาติ และที่สังเคราะห์ขึ้น สารแลกเปลี่ยนไอออนตามธรรมชาติ คือ อะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicates) ถูกค้นพบโดยนักเคมีเกษตรชาวอังกฤษ 2 ท่าน คือ Thomson และ Way ค้นพบจากการศึกษาการแลกเปลี่ยนไอออนในดิน จากนั้นได้มีการสังเคราะห์สารประเภทนี้ขึ้นโดยไซสารัม และซิลิเกตทำให้เกิดสารประกอบไซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีชื่อเรียกว่า ซีโอไลต์ (Zeolite) สารซีโอไลต์จึงจัดเป็นสารสังเคราะห์ทางอนินทรีย์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งนิยมใช้ในการแก้ปัญหาคาที่ปนเปื้อนในน้ำดื่ม ซึ่งแคลเซียม และแมกนีเซียมที่เป็นสาเหตุของความกระด้างจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับไซเดียมโดยแสดงสมการทางเคมีดังสมการ (7)



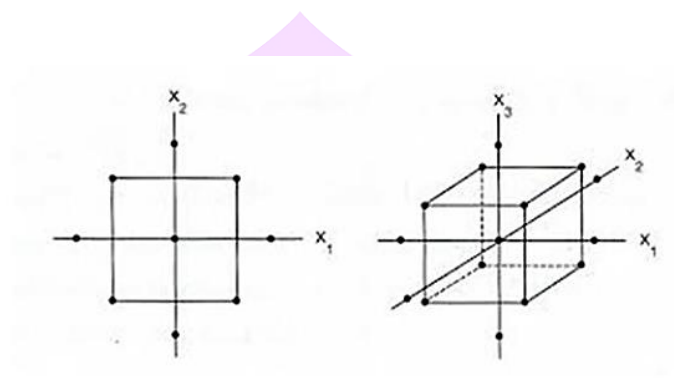
การแลกเปลี่ยนนี้สามารถทำกลับมาให้อยู่ในสภาพเดิมได้ และนำมาใช้ได้อีกโดยนำสารที่ถูกแลกเปลี่ยนไอออนแล้วมาล้างด้วยสารละลายไซเดียมคลอไรด์เข้มข้น

เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง

เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology หรือ RSM) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ หรือสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลอง และวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ เพื่อที่จะได้ค่าที่ดีที่สุด หรือเหมาะสมที่สุดต่อผลนั้นโดยส่วนใหญ่วิธีพื้นผิวตอบสนองจะแสดงผลในรูปของกราฟ อาจจะพล็อตเป็นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง โดยปัญหาส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวตอบสนองกับตัวแปรอิสระ RSM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพกับกระบวนการที่มีความซับซ้อนจึงทำให้ง่ายในการจัดการ และอธิบายผลเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น การออกแบบการทดลองที่ส่วนใหญ่นิยมใช้จะเป็นการออกแบบการทดลองเพื่อหารูปแบบของสมการอันดับสองโดยจะเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดราติก (Quadratic) ของผลตอบสนองซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี ดังนี้

1. การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design หรือ CCD)

เป็นการออกแบบ 5 ระดับ $(-2, -1, 0, 1, 2)$ เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวตอบสนองที่นิยมใช้ เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสมโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 2^k แฟคทอเรียลที่มี k รัน ซึ่ง 2^k รันในแนวแกน หรือแนวรูปตัวดาว และ n_c รันที่จุดศูนย์กลาง (พงษ์ศักดิ์ ขาวอินทร์, 2555) แสดงดังภาพ 14

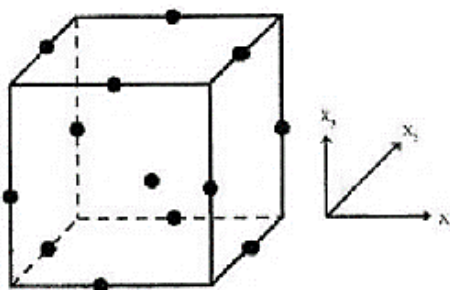


ภาพ 14 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design หรือ CCD)

ที่มา: พงษ์ศักดิ์ ขาวอินทร์, 2555

2. การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

เป็นการออกแบบ 3 ระดับ $(-1, 0, 1)$ สำหรับพิตพื้นผิวตอบสนองการออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟคทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ การออกแบบนี้จึงมีความสามารถในการหมุน หรือเกือบหมุนได้เนื่องจากการออกแบบรูปทรงกลมที่มีจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี 2 (อาภากร อยู่ดี, 2547) แสดงดังภาพ 15



ภาพ 15 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

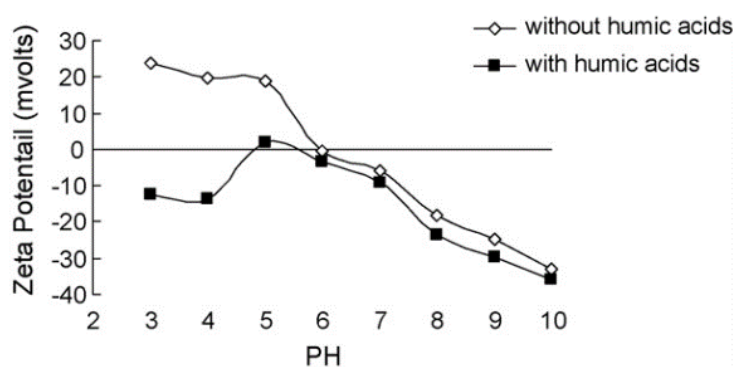
ที่มา: อากาศกร อยู่ดี, 2547

การออกแบบส่วนประสมกลางจะใช้ในกรณีการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนไม่เหมาะสมเนื่องจากการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจะไม่รวมเอาจุดมุมของลูกบาศก์ ส่วนข้อเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบส่วนประสมกลางกับการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับการสร้างแบบการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจะใช้จำนวนน้อยกว่าการออกแบบส่วนประสมกลาง เนื่องจากต้องการปัจจัยเพียง 3 ระดับต่างจากการออกแบบส่วนประสมกลางที่ต้องการถึง 5 ระดับ แต่ในด้านของคุณภาพนั้นการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจะมีคุณภาพต่ำกว่าการออกแบบส่วนประสมกลางเพราะว่าการออกแบบส่วนประสมกลางไม่มีจุดการทดลองที่มุมลูกบาศก์ซึ่งอาจมีประโยชน์เมื่อผู้ทดลองหลีกเลี่ยงปัจจัยที่มีความสำคัญสูงราคาแพงและเป็นไปไม่ได้ เทคนิค RSM มีประโยชน์ที่สำคัญ คือ จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบโดยใช้ RSM จะมีจำนวนชุดการทดลองที่น้อยกว่าเนื่องจาก RSM จะนำเสนอข้อมูลจำนวนมากจากการทดลองเพียงไม่กี่ครั้ง และ RSM มีความเป็นไปได้ที่จะเจอผลกระทบภายในจากตัวแปรอิสระ นอกจากนี้โมเดลสมการอย่างง่ายของ RSM จะเพิ่มความเข้าใจต่อผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่าง ๆ จึงอาจกล่าวได้ว่า RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวเคมี

สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปรับปรุงคุณภาพน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติจากน้ำผิวดินในปัจจุบันมีการใช้สารเคมีเป็นจำนวนมากจึงมีนักวิจัยจำนวนหนึ่งได้คิดค้นสารเคมีที่มีความสามารถในการช่วย

ตกตะกอน โดยสารเคมีที่ใช้ คือ PAFSiC และ PASiC โดย (Cheng et.al, 2008) ได้ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำที่มีความขุ่นต่ำและต่างค่าซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำสังเคราะห์เพื่อดูความสามารถในการลดความขุ่น และมีค่าที่เป็นต่าง โดยชั้นแรกนักวิจัยได้ใช้น้ำการวัดค่าต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวสเตรนกับศักย์ไฟฟ้าในชั้นสารละลายเพื่อให้เข้าใจปฏิกิริยาของตัวกรดฮิวมิก และอนุภาคดินขาวในน้ำสังเคราะห์ที่เติม และไม่เติมกรดฮิวมิกโดยที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มี pH ตั้งแต่ 3.00-10.00 โดยผลของค่าต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าแสดงดังภาพ 16 โดยจะพบว่าที่มี pH ตั้งแต่ 6.00 จะส่งผลทำให้น้ำที่ไม่มีการเติมกรดฮิวมิกเปลี่ยนแปลงค่าจากบวกเป็นลบแต่ที่มีการเติมกรดฮิวมิกมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่หากว่าค่า pH มีค่าสูงกว่า 6.00 การเติมกรดฮิวมิกก็ไม่ส่งผล

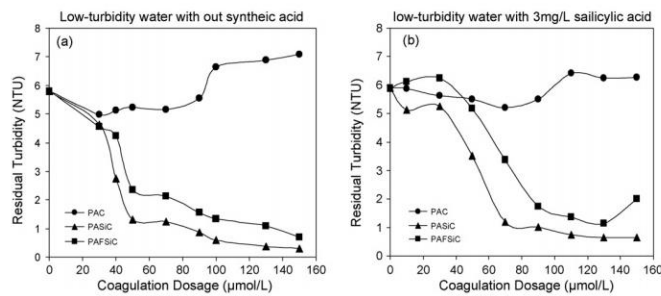


ภาพ 16 เปรียบเทียบปฏิกิริยาของตัวกรดฮิวมิก และอนุภาคดินขาวในน้ำสังเคราะห์

ที่มา: Cheng et.al, 2008

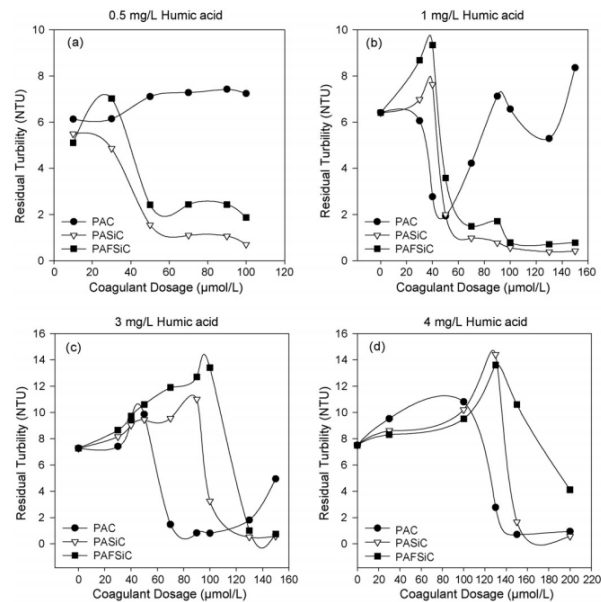
ในการกำจัดความขุ่นโดยใช้ตัวของโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 0- 150 $\mu\text{mol/L}$ ในการกำจัดความขุ่นที่มีการเติมกรดซิลิไซลิก 3 mg/L และไม่เติมกรด พบว่าการเติม หรือไม่เติมกรดซิลิไซลิกไม่ส่งผลในการกำจัดความขุ่นของตัว PAC ซึ่งเทียบกันที่ 50.00 $\mu\text{mol/L}$ กับตัวของ PAFSiC และ PASiC แล้วมีประสิทธิภาพในการลดความขุ่นสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดทั้งที่มีการเติม และไม่มีการเติมกรดซิลิไซลิกซึ่งไม่ได้ส่งผลต่อการกำจัดความขุ่น และอนุภาคดินขาวของ PAFSiC และ PASiC โดยความขุ่นที่เหลือในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วนั้นมีความสามารถในการกำจัดความขุ่นได้ถึง 90% หรือ 0.64 NTU แสดงได้ตามภาพ 17

ประสิทธิภาพการตกตะกอนของโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) ในการตกตะกอนในน้ำที่มีทั้งกรดฮิวมิก และอนุภาคดินขาว จากผลที่ได้จะต่างกับตัวน้ำที่มีกรดซิลิไซลิกข้างบนผลของการตกตะกอนของโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) ที่มีกรดฮิวมิกไม่เพียงพอทำให้ไม่สามารถในการกำจัดความขุ่นได้ดีเท่าตัวของ PAFSIC และ PASiC แสดงได้ดังภาพ 17a ในทางเดียวกันเมื่อความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อปริมาณการใช้ PAFSIC และ PASiC แสดงได้ดังภาพ 18



ภาพ 17 อิทธิพลของกรดซิลิไซลิกกับความขุ่นที่เหลือ

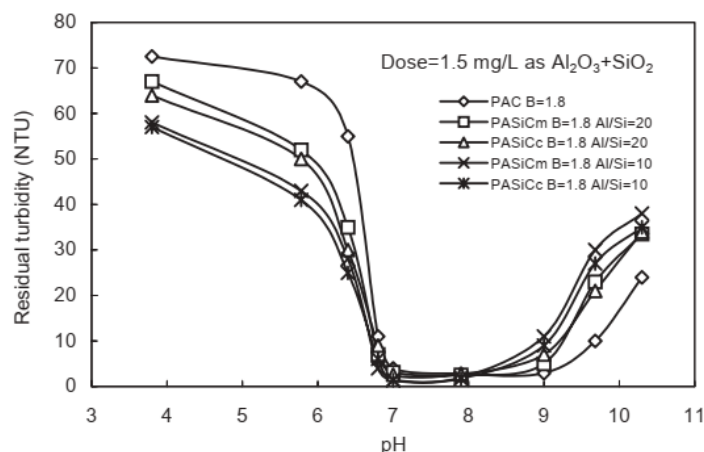
ที่มา: Cheng et.al, 2008



ภาพ 18 อิทธิพลของกรดฮิวมิกต่อความขุ่นที่เหลืออยู่

ที่มา: Cheng et.al, 2008(Cheng et.al, 2008)

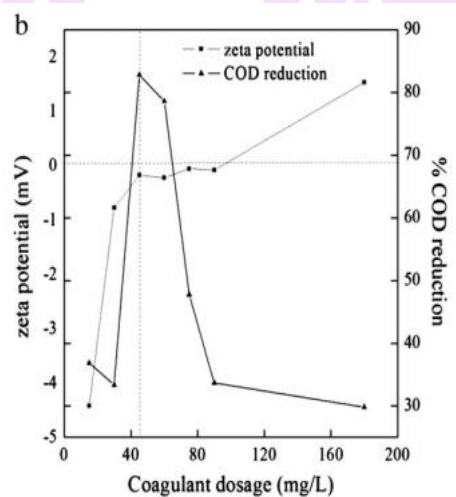
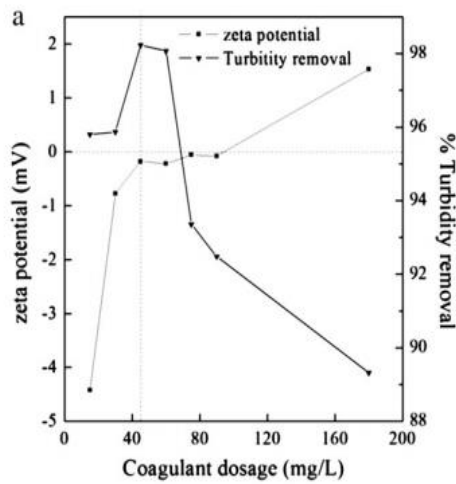
(Gao, Hahn and Hoffmann, 2002) ทำการทดลองหาความสามารถในการกำจัดตะกอนเปรียบเทียบระหว่างตัวของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) และ PASiC พบว่าที่ pH 7.00–9.00 ตัวของ PASiC สูตรต่าง ๆ มีความสามารถในการทำให้ความขุ่นที่เหลืออยู่น้อยกว่าตัวของ PAC แสดงได้ดังภาพ 19



ภาพ 19 แสดงผลค่า pH ต่อความสามารถในการกำจัดตะกอนของ PASiC และ PAC

ที่มา: Gao, Hahn and Hoffmann, 2002

(Zhu et.al, 2012) ทำการทดลองโดยใช้สาร PAFC ให้ความสนใจในการลดความขุ่นของน้ำ และการกำจัด COD ในน้ำตัวอย่างที่มี pH 8.50 โดยให้ความเร็วในการกวนเร็วที่ความเร็วตั้งแต่ 150–400 rpm พบว่าที่ความเร็วรอบที่ 250 rpm ให้ความสามารถในการกำจัด COD ได้ดีที่สุด และที่ 300 rpm มีความสามารถในการกำจัดความขุ่นได้ดีที่สุด ทั้งนี้ตัวของนักวิจัยได้เลือกความเร็วรอบในการกวนเร็วที่ 250 rpm มาใช้เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงค่าต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า และการกำจัด COD เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ PAFC พบว่าค่าที่ดีที่สุดอยู่ที่ความเข้มข้นของ PAFC ที่ 45 mg/L ค่าต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า การกำจัดความขุ่น และประสิทธิภาพการกำจัด COD มีค่าเท่ากับ -0.18mV 82.8% และ 98.2% ตามลำดับ แสดงได้ดังภาพ 20 และมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามตาราง 5



ภาพ 20 ปริมาณของการตกตะกอน ต่อค่าต่างศักย์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า การกำจัด
ความขุ่น และประสิทธิภาพการกำจัด COD

ที่มา : Zhu et.al, 2012

ตาราง 5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	ข้อมูลเบื้องต้น	สารเคมีที่ใช้	สภาวะที่ใช้	ผลที่ได้	ที่มา
1	ใช้น้ำจาก Kaolin มีความขุ่น 100 NTU pH 7.47	PAFC, PAC	pH 4.00-8.00	มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีกว่า PAC ที่ปริมาณเท่ากัน pH ที่ดีที่สุดอยู่ที่ 7.00-8.50 เวลาที่ใช้ในการตกตะกอนเท่ากัน แต่ตัวของ PAFC ตกตะกอนได้ดีกว่า	(Zhang et.al, 2015)
2	น้ำจาก 2 แหล่ง น้ำฝิวดิน มีความขุ่น 16.50 NTU pH 7.65 น้ำเสียมีความขุ่น 13.5 NTU pH 8.00 phosphatch 10.1 mg/L	PACSi, PAC, ALUM, PAC 18, PAC 2, PASiC	pH 7.00	ตัวของ PAC18 PASiC มีความสามารถในการลด phosphat ที่ 30.00 mg/L	(Zouboulis and Tzoupanos, 2009)
3	การทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ (kaolin Turbidity) ที่ความขุ่นที่ 0, 10, 100, 600 NTU จะถูกเติม 3 ppm ของ humic acid ทำการปรับ pH ที่ 4.00, 7.00, 10.00 โดย pH เท่ากับ 4 มีความขุ่นมากที่สุด	PAC, PASiC, PAFSiC	pH 4	ตัวของ PASiC, PAFSiC มีความสามารถในการลดความขุ่นได้ดีกว่าตัวของ PAC เนื่องจากตัวของ PAC หลังจากการเติม humic acid มีแนวโน้มในการทำให้ความขุ่นเพิ่มขึ้น แต่สามารถลดความขุ่นได้ถ้ามีปริมาณมากพอ	(Cheng et.al, 2008)

ตาราง 5(ต่อ)

ลำดับ	ข้อมูลเบื้องต้น	สารเคมีที่ใช้	สภาวะที่ใช้	ผลที่ได้	ที่มา
4	น้ำตัวอย่าง มีความขุ่น 38.70 COD 138 pH 7.80 Colority 127	PASiC, PFSiC, PAFSiC	pH 7.80	มีความสามารถในการลดสีได้เหมือนกันทุกตัว แต่ที่ดีที่สุด คือ PAFSiC เช่นเดียวกับกับ ความขุ่น และ COD	(Li, Liu and Cheng, 2017)
5	ทำการทดลองที่ ความขุ่น 110–150 NTU COD 250–400	PAFSiC	pH 7.00–8.50	มีความสามารถในการตกตะกอนได้ดีที่ $Si/(Fe+Al) = 0.4$ $Al/Fe = 3:70$ $OH/(Fe+Al) = 0.30$ ซึ่งมีความสามารถในการลดความขุ่น ได้ 99.4% และ COD 85.6%	(Chen et.al, 2015)
6	ทำการทดลองที่ pH 7.0 มีความขุ่นที่ 75 NTU	PAC, PASiCm, PASiCc	pH 7.00	ช่วง pH ที่ดีที่สุดคือ 7.00–9.00 มีความสามารถในการลดความขุ่นได้ดีกว่าตัวของ PAC	(Gao, Hahn and Hoffmann, 2002)
7	บำบัดน้ำที่มีค่า COD 492.24 pH 7.00 SS 252.7	Aluminum, iron based	pH 6.00–7.00	สามารถลด COD ได้ต่ำกว่า 70%	(Hu et.al, 2017)
8	บำบัดน้ำที่มีค่า COD 349.00–641.00 pH 7.00–8.00 SS 102.00–162.00	Aluminum, iron based	pH 7.00–8.00	สามารถลด COD ได้ 60% ลด ss ได้เกือบ 100%	KAI HU (Hu et.al, 2016)

ตาราง 5(ต่อ)

ลำดับ	ข้อมูลเบื้องต้น	สารเคมีที่ใช้	สภาวะที่ใช้	ผลที่ได้	ที่มา
9	pH 7.8 ความขุ่น 2.2 EC 357 สี 10 TDS 176	PAFCI	pH 7.70	มีความสามารถในการลดความขุ่น จนเหลือ 0.33 สี 0 Ec เพิ่มขึ้นเล็กน้อย 357.8 TDS เพิ่มขึ้นเล็กน้อย 176.3	(Zouboulis and Tzoupanos, 2009)
10	ความขุ่น 250 NTU และ 500 NTU	PAFCI	pH 7.50- 8.00	ที่ความเข้มข้นของ PAFCI 10 mg/L มีความสามารถในการลดความขุ่นได้ 99.92% และ 99.95%ตามลำดับ	(Mahdavi et.al, 2016)



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้นด้วยสารโพสโอะลูมินัมเพอร์ริคซิลิเกตคลอไรด์ (PAFSiC) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว) เปรียบเทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้าที่ใช้ในปัจจุบัน โดยดำเนินการวิจัยดังภาพ 21

ศึกษาทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนของสาร PAFSiC ด้วยน้ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดด้วยกระบวนการ Jar test



หาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำด้วยสาร PAFSiC โดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM)



วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

ภาพ 21 แผนการดำเนินงานวิจัยการบำบัดน้ำขั้นต้นด้วยสาร PAFSiC

1. ศึกษาคุณสมบัติของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

การศึกษาคุณสมบัติของน้ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด คือ การวิเคราะห์น้ำตัวอย่างเพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติในน้ำตัวอย่างซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพ และการเลือกใช้สารตกตะกอนเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำ ได้แก่ ค่าความขุ่น ค่าของแข็งละลายน้ำ ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซีลเฟต และความกระด้างโดยใช้อุปกรณ์ และสารเคมี ดังนี้

1.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์

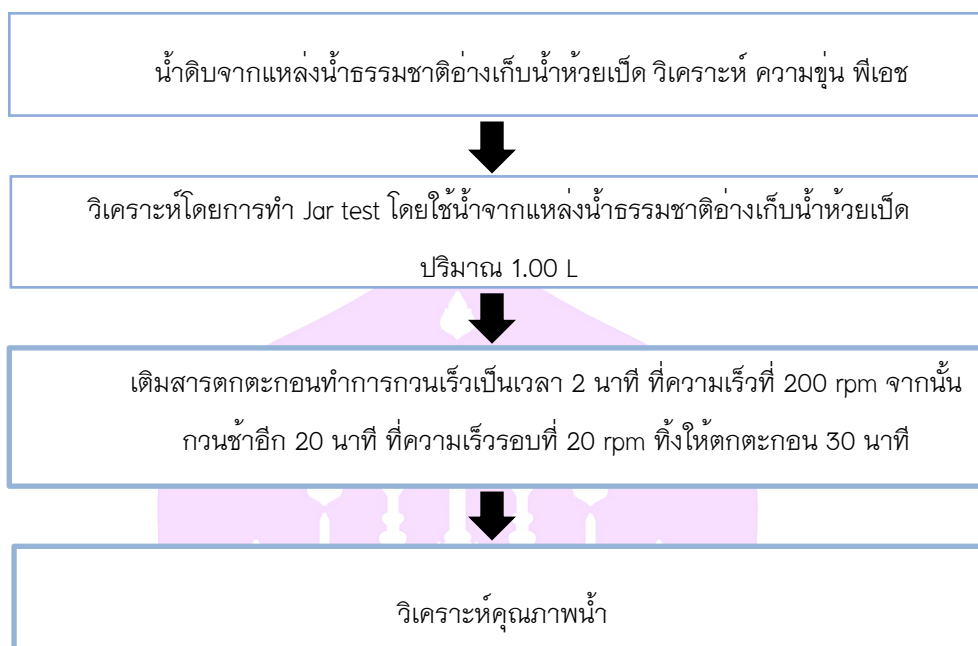
- 1.1.1 บีกเกอร์ ขนาด 1.00–2.00 L จำนวน 6 ใบ
- 1.1.2 เครื่องกวน ที่มีความเร็วรอบตั้งแต่ 0–150 rpm
- 1.1.3 นาฬิกาจับเวลา
- 1.1.4 เครื่องกวนสาร Magnetic stirrer
- 1.1.5 pH meter
- 1.1.6 TDH meter
- 1.1.7 UVVIS Spectrophotometer
- 1.1.8 Turbidity meter
- 1.1.9 เครื่องชั่งไฟฟ้า ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 1.1.10 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
- 1.1.11 Conductivity meter
- 1.1.12 เครื่องอิงไอน้ำ
- 1.1.13 ตู้อบ
- 1.1.14 จานกระเบื้อง
- 1.1.15 กระดาษกรอง

1.2 สารเคมีที่ใช้

- 1.2.1 โพลีอะลูมินัมเฟอร์ริคคลอไรด์ (PAFSiC)
- 1.2.2 สารส้ม (Alum)
- 1.2.3 โพลีอะลูมินาเฟอร์ริคคลอไรด์ (PAC)
- 1.2.4 สารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบ (Anionic Polymer)
- 1.2.5 เฟอร์ริคคลอไรด์ (FeCl_3)

2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด อ.แม่เมาะ จ.ลำปางด้วย PAFSiC

โดยในการทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของสาร PAFSiC ด้วยกระบวนการ Jar test เพื่อให้ทราบถึงค่าสภาวะที่เหมาะสม (Optimum Dose) ของสาร PAFSiC และสารตกตะกอนเคมีทางการค้า โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ปริมาณสารเร่งตกตะกอน ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) และสารช่วยเร่งตกตะกอน เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดค่าความขุ่น ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และ ความกระด้าง สามารถสรุปได้ดังภาพ 22



ภาพ 22 การหาปริมาณสาร Coagulant ที่เหมาะสมที่ใช้กับน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติ อ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด

2.1 ผลของค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าความขุ่น ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และความกระด้าง

ศึกษาผลของค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าความขุ่น ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และความกระด้าง โดยเตรียมน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดที่ทราบคุณสมบัติเบื้องต้นทำการเตรียมสารเร่งตกตะกอน ได้แก่ PAFSIC สารส้ม (Alum) เพอริกคลอไรด์ (FeCl_3) และโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) ที่ความเข้มข้นเท่ากันที่ 1.00 mg/L และทำการปรับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำตัวอย่างด้วยการปรับค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ pH 4.00–9.00

2.2 ผลของค่าความเข้มข้นของสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่า ความขุ่น ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และความกระด้าง

ศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัด ค่าความขุ่น ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และ ความกระด้าง โดยเตรียมน้ำ ตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดที่ทราบคุณสมบัติเบื้องต้นทำการเตรียมสารเร่งตกตะกอน ได้แก่ PAFSIC สารส้ม (Alum) เพอริกคลอไรด์ (FeCl_3) และโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) ที่ความเข้มข้น

ตั้งแต่ 1.00–6.00 mg/L และทำการปรับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำ ห้วยเป็ดให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับสารตกตะกอนแต่ละชนิด

2.3 ผลของค่าความเข้มข้นของสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบต่อ ประสิทธิภาพการกำจัดค่าความขุ่น ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และความกระด้าง

ศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบต่อ ประสิทธิภาพการกำจัดค่าความขุ่น ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และความกระด้าง โดยเตรียมน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดที่ทราบคุณสมบัติเบื้องต้นทำการเตรียมน้ำตกตะกอน ได้แก่ PAFSIC สารส้ม (Alum) เพอริกคลอไรด์ (FeCl_3) และโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่เหมาะสมที่ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ที่เหมาะสมของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำ ห้วยเป็ด และเตรียมน้ำช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่ 1.00–3.00 mg/L

3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้นของอ่างเก็บน้ำ ห้วยเป็ดโดยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM)

การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการบำบัดขั้นต้นในการบำบัดความขุ่นโดยกระบวนการ RSM โดยโปรแกรมทางสถิติ (Design Expert 13) ในการออกแบบการทดลอง และทำนายผลการทดลองจากสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ กำหนดปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่า pH ปริมาณความเข้มข้นของสาร PAFSIC และปริมาณสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบ ซึ่งกำหนดตัวแปรซึ่งเป็นตัวแทนของปัจจัยในแต่ละระดับลงในโปรแกรมทางสถิติเพื่อให้ได้ชุดการทดลองออกมาจำนวน 20 ชุดการทดลอง ทั้งนี้รายละเอียดการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการบำบัดน้ำขั้นต้น แสดงได้ดังตาราง 6 และตาราง 7 โดยการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดความขุ่นต่ำของน้ำตัวอย่างโดยใช้เทคนิค RSM ในรูปแบบ BBD

ตาราง 6 การกำหนดตัวแปรของปัจจัยแต่ละระดับ

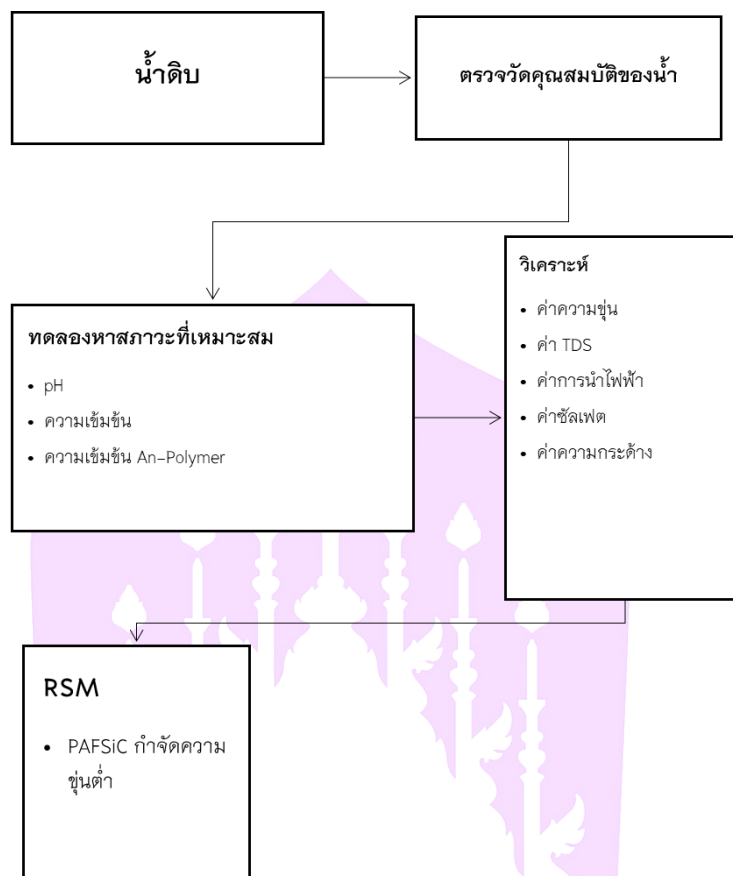
ปัจจัยหลัก	ระดับ		
	-1	0	+1
pH	7.00	8.00	9.00
ปริมาณสาร PAFSIC (mg/L)	4.00	5.00	6.00
ปริมาณสาร Polymer (mg/L)	0.00	1.00	2.00

ตาราง 7 ชุดการทดลองที่ได้จากโปรแกรมพื้นผิวดตอบสนองจำนวน 20 ชุด

ชุดการทดลอง	pH	ปริมาณ PAFSic (mg/L)	ปริมาณสาร An-Polymer (mg/L)
1	8.00	5.00	1.00
2	7.00	4.00	0.00
3	7.00	6.00	0.00
4	8.00	5.00	0.00
5	8.00	4.00	1.00
6	7.00	6.00	2.00
7	8.00	5.00	2.00
8	9.00	6.00	0.00
9	8.00	5.00	1.00
10	8.00	5.00	1.00
11	7.00	4.00	2.00
12	8.00	5.00	1.00
13	8.00	5.00	1.00
14	8.00	6.00	1.00
15	8.00	5.00	1.00
16	7.00	5.00	1.00
17	9.00	4.00	0.00
18	9.00	5.00	1.00
19	9.00	6.00	2.00
20	9.00	4.00	2.00

การวิเคราะห์

การวิเคราะห์ส่วนนี้ คือ การวิเคราะห์หาคุณสมบัติของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง เพื่อหาค่าต่าง ๆ ในน้ำตัวอย่าง ตามขั้นตอนดังภาพ 23 โดยกระบวนการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างมี 4 วิธีดังนี้



ภาพ 23 ขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด

1. การวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย

การวิเคราะห์ของแข็งในรูปแบบต่าง ๆ ทำได้ในตัวอย่างน้ำ และกากตะกอน เช่น น้ำดื่ม น้ำเสีย น้ำทิ้งจากบ้านเรือน และโรงงานอุตสาหกรรม กากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งของแข็งนี้จะประกอบด้วยสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ การวิเคราะห์ของแข็งในรูปแบบต่าง ๆ ส่วนใหญ่จะใช้วิธีซึ่งน้ำหนักวิธีการวิเคราะห์ที่มีขั้นตอนการวิเคราะห์อยู่ 6 ขั้นตอน ดังนี้

1.1 อบกระดาศกรองให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงทิ้งให้เย็นในเดสิคเคเตอร์แล้วชั่งน้ำหนัก (B) เก็บกระดาศกรองไว้ในเดสิคเคเตอร์จนกว่าจะใช้ทดลอง

1.2 วางกระดาศกรองลงในกรวยบุคเนอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดสุญญากาศ

1.3 ใช้น้ำกลั่นฉีดกระดาศกรองให้เปียกแล้วเปิดเครื่องดูดอากาศ เพื่อให้กระดาศกรองแนบติดกับกรวยบุคเนอร์

1.4 ตวงปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ผสมเข้ากันดีแล้ว 50–100 ml แล้วเทน้ำตัวอย่างลงในกรวยบุคเนอร์ และเปิดเครื่องดูดสุญญากาศจนน้ำแห้ง แล้วล้างเครื่องกรองด้วยน้ำกลั่น 1.00 ml เปิดเครื่องทิ้งไว้ 3 นาที

1.5 เมื่อแห้งแล้วนำกระดาษกรองออกวางในภาชนะเดิมอาจใช้ถ้วยระเหยหรือกระดาษอลูมิเนียมก็ได้แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103–105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิเคเตอร์ และชั่งน้ำหนัก (A)

1.6 ของแข็งที่กรองได้นั้นสามารถนำไปวิเคราะห์หาของแข็งแขวนลอยระเหยได้ และของแข็งแขวนลอยคงตัวที่ 550 องศาเซลเซียสต่อไป

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/L)} = \frac{(A-B) \times 10^6}{\text{Volume (mL)}}$$

โดย A = น้ำหนักของกระดาษกรองและของแข็งแขวนลอย (g)

B = น้ำหนักของกระดาษกรอง (g)

2. การวิเคราะห์ความกระด้าง

วิธีการวิเคราะห์ความกระด้างการหาความกระด้างโดยวิธี EDTA Titrimetric Method และใช้ อิริโอโครม แบลค ที (Eriochrome Black T, EBT) เป็นอินดิเคเตอร์ อาศัยหลักการ คือ เมื่อเติม อิริโอโครม แบลค ที ลงไปในตัวอย่างน้ำที่มี Ca^{2+} , Mg^{2+} และไอออนอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดความกระด้างในสภาวะที่เป็นด่าง (pH ประมาณ 10 ± 0.1) Ca^{2+} , Mg^{2+} และไอออนอื่น ๆ จะจับกับ อิริโอโครม แบลค ที เกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีม่วงแดง เมื่อนำไปไตเตรทกับอีดีทีเอ(ethylenediaminetetraacetic acid dihydrate, EDTA) Ca^{2+} , Mg^{2+} และไอออนอื่น ๆ จะรวมตัวกับอีดีทีเอ เกิดเป็น chelated soluble complex ซึ่งคงตัวกว่าสารเชิงซ้อนแรก เมื่ออีดีทีเอรวมตัวกับไอออนดังกล่าวหมดจะปล่อย อิริโอโครม แบลค ที เป็นอิสระ สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีน้ำเงิน แสดงว่า ถึงจุดยุติ (end point)

วิธีการวิเคราะห์แบบ EDTA Titrimetric method

2.1 เลือกปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ทำให้ใช้สารละลายมาตรฐานกรด EDTA ไม่เกิน 15.00 ml ในการไตเตรต ทำการไตเตรตให้เสร็จภายใน 5 นาที ภายหลังจากเติมสารละลายบัฟเฟอร์ โดยปริมาตรที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 25.00–50.00 ml

2.2 ปิเปิดน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดใส่ในขวดรูปชมพู่ ในการทดลองนี้เลือกใช้น้ำตัวอย่างที่ 5.00 ml แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 50.00 ml ด้วยน้ำกลั่น

2.3 เติมสารละลายบัฟเฟอร์ลงไป 1.00 ml แล้วเติมสารละลาย ริโอโครม แบลค ที

ลงไป 1-2 หยด

2.4 ไตรเตรตนํ้าตัวอย่างด้วยสารละลายมาตรฐาน EDTA จนกระทั่งสารละลายสีม่วงแดงเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน จดปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน EDTA ที่ใช้ไปในการไตรเตรต แล้วนำไปคำนวณหาความกระต่างจากสูตร

$$\text{ความกระต่าง (mg/L CaCO}_3\text{)} = \frac{A \times N \times 100 \times 1000}{B}$$

เมื่อ A = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน EDTA ที่ใช้, ml
N = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน EDTA, mol
B = ปริมาตรของนํ้าตัวอย่าง, ml

3. การวิเคราะห์ค่าความขุ่นด้วยเครื่อง Spectrophotometer

การวิเคราะห์ค่าความขุ่นด้วยเครื่อง Spectrophotometer มีขั้นตอนการวิเคราะห์อยู่ 3 ขั้นตอน ดังนี้

3.1 เปิดเครื่อง spectrophotometer เลือกแหล่งกำเนิดแสง และกำหนดความยาวคลื่นแสงที่ต้องการ โดยควรเปิดเครื่องก่อนการใช้งานไม่น้อยกว่า 15 นาที

3.2 เลือก cuvette ให้เหมาะสมกับสารตัวอย่าง ใส่สารตัวอย่างใน cuvette เช็ดด้านข้างของ cuvette ให้แห้ง และสะอาด

3.3 วาง cuvette ในช่องสำหรับใส่ในเครื่อง ปิดฝาเครื่อง และอ่านค่าการดูดกลืนแสงจากจอแสดงผล ในกรณีที่เป็นเครื่องแบบ double beam จะใช้ cuvette 2 อัน คือ blank และสารตัวอย่าง เครื่องจะทำการห้กลับค่าดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง และ blank ให้อ่านผลที่ได้จากจอแสดงผล หลังจากการใช้งาน ทำความสะอาดเครื่อง ล้าง cuvette ให้สะอาด และปิดเครื่อง

4. การวิเคราะห์ค่าโลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP)

การวิเคราะห์ค่าโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP มีขั้นตอนอยู่ 3 ขั้นตอน ดังนี้

4.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานสำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน

4.2 กรองตัวอย่างนํ้าด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42

4.3 นำนํ้าที่ได้จากการกรองไปวัดหาความเข้มข้นของโลหะหนัก ด้วยเครื่อง ICP และนำไปเทียบกราฟมาตรฐาน

บทที่ 4

อภิปรายผลการวิจัย

คุณสมบัติของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

ผลการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด ซึ่งเป็นอ่างเก็บน้ำบริเวณใกล้เคียงโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยน้ำตัวอย่างเป็นที่เก็บช่วงเดือน มีนาคม-พฤษภาคม ตามตาราง 8 ซึ่งพบว่าค่า pH ของน้ำตัวอย่างอยู่ที่ 8.00 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานจัดเป็นแหล่งน้ำประเภทที่ 3 เช่นเดียวกับค่า TDS ผลการวิเคราะห์เท่ากับ 746.00 mg/L ค่าความขุ่นเท่ากับ 4.33 NTU จัดอยู่ในเกณฑ์ใส ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างเท่ากับ 143.00 $\mu\text{mhos/cm}$ ทั้งยังวัดค่าซัลเฟตเท่ากับ 1.16 mg/L SO_4 และค่าความกระด้างเท่ากับ 60.00 mg/L CaCO_3

ตาราง 8 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ชนิดตัวอย่าง	ผลวิเคราะห์	มาตรฐานคุณภาพน้ำ
pH	8.00	แหล่งน้ำประเภทที่ 3 (พอใช้)
TDS (mg/L)	746.00	แหล่งน้ำประเภทที่ 3 (พอใช้)
ความขุ่น (NTU)	4.33	น้ำใส
ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{mhos/cm}$)	143.00	มาตรฐานคุณภาพน้ำระดับ C2
ซัลเฟต (mg/ LSO_4)	1.16	ประเภทน้ำอ่อน
ความกระด้าง (mg/L CaCO_3)	60.00	ผ่านมาตรฐาน

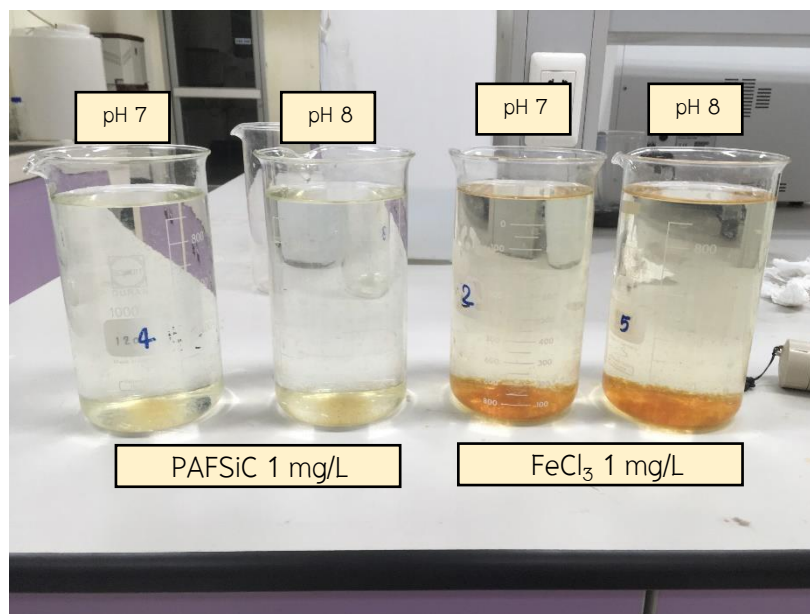
ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด อ.แม่เมาะ

จ.ลำปาง

ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดโดยดูที่ความสามารถในการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างโดยกระบวนการโคเอกูเลชันโดยสาร PAFSIC ศึกษาเปรียบเทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้า 3 ชนิด ได้แก่ สารส้ม เพอริกคลอไรด์ และโพลิออลูมิเนียมคลอไรด์ ทำการทดลองด้วยวิธีการ Jar test ที่ความเร็วในการกวนเร็ว 200 rpm เป็นเวลา 2 นาที กวนช้าที่ความเร็ว 20 rpm ทั้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที

ใช้น้ำตัวอย่างที่ 1000 ml หลังจากนั้นเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำตัวอย่างดังกล่าว

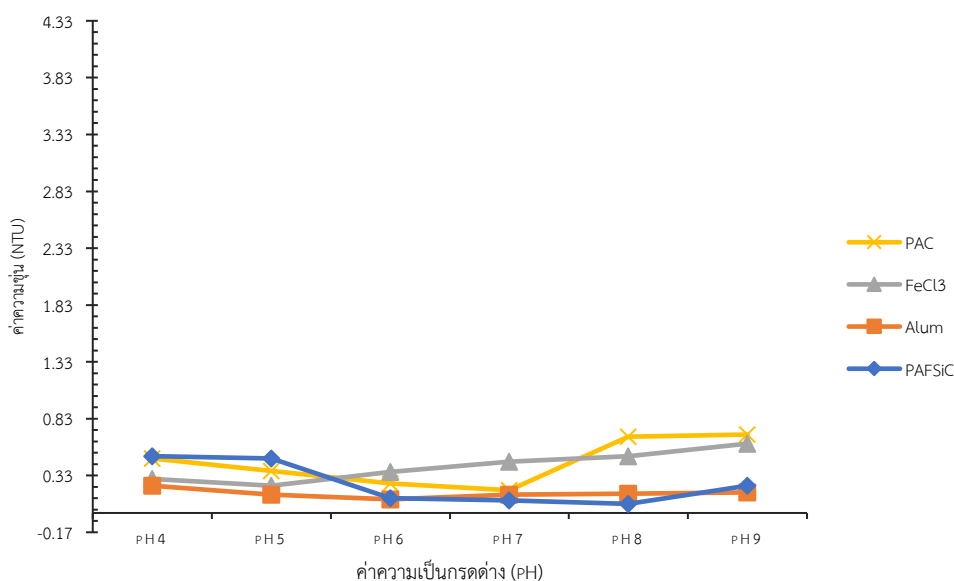
24



ภาพ 24 ความสามารถในการกำจัดความขุ่นของ PAFSiC เทียบกับตัวของ FeCl_3

1. ผลของค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าความขุ่นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และความกระด้าง

เตรียมน้ำตัวอย่างโดยใช้ความเข้มข้นของสารตกตะกอนที่เท่ากันที่ 1.00 mg/L โดยความขุ่นเริ่มต้น 4.33 NTU ปรับค่า pH ตั้งแต่ 4.00–9.00 พบว่าค่า pH ที่ดีที่สุดของสารแต่ละตัว ได้แก่ ตัวของสาร PAFSiC ค่า pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 8.00 มีความสามารถในการกำจัดความขุ่นได้ร้อยละ 98.15 ตัวของสารส้มค่า pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 6.00 มีความสามารถในการกำจัดความขุ่นได้ร้อยละ 97.22 ตัวของสาร FeCl_3 ค่า pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 5.00 มีความสามารถในการกำจัดความขุ่นได้ร้อยละ 94.45 และตัวของ PAC ค่า pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 7.00 มีความสามารถในการกำจัดความขุ่นได้ร้อยละ 95.38 แสดงได้ตามภาพ 25 จากผลการศึกษพบว่าตัวของสารที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ตัวของสาร PAFSiC มีความสามารถในการลดค่าความขุ่นได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 98.15 ความเข้มข้นเท่ากันที่ 1.00 mg/L



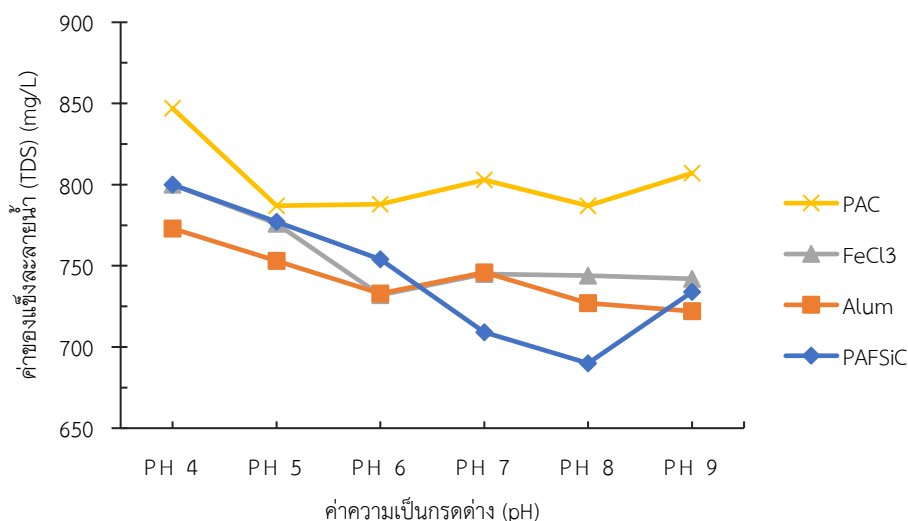
ภาพ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ในการกำจัดความขุ่นที่ความขุ่นเริ่มต้น 4.33 NTU

จากการศึกษาผลของค่า pH ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดค่าของแข็งแขวนลอยที่ช่วง pH 4.00–9.00 โดยใช้สาร PAFSic เปรียบเทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้า 3 ชนิด ได้แก่ สารส้ม เพอริกคลอไรด์ และโพลีลูมิเนียมคลอไรด์พบว่าช่วง pH ที่เหมาะสม คือ 8.00 6.00 5.00 และ 7.00 ตามลำดับ พบว่า PAFSic มีความสามารถในการลดค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) ได้ดีที่สุดในหากเทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้าชนิดอื่น ๆ โดยมีความสามารถในการลดค่า TDS จาก 746.00 mg/L เหลือ 690.00 mg/L ที่ pH เท่ากับ 8.00 โดยหากเทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้าชนิดอื่น ๆ ซึ่งส่วนมากส่งผลให้ค่าของแข็งแขวนลอย (TDS) เพิ่มสูงขึ้นจาก TDS เริ่มต้นของน้ำตัวอย่าง โดยมากที่สุดพบว่าเป็น PAC จากค่า TDS เริ่มต้นของน้ำตัวอย่างที่ 746.00 mg/L เป็น 847.00 mg/L ดังภาพ 26

2. ผลของค่าความเข้มข้นของสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าความขุ่นของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และ ความกระด้าง

ทำการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับสารเคมีแต่ละตัวที่ความเข้มข้นของสารเคมีแต่ละตัวตั้งแต่ 1.00–6.00 mg/L โดยใช้ค่า pH ที่เหมาะสมของสารตกตะกอนทางเคมีแต่ละชนิด เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดค่าของแข็งแขวนลอย (TDS) พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับ PAFSic อยู่ที่ 5.00 mg/L มีความสามารถลดค่า TDS ได้ดีที่สุดในการทดลองโดยสามารถลดค่า

TDS จากเริ่มต้นที่ 746.00 mg/L เหลือ 669.00 mg/L ซึ่งหลังจากทราบปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสม และค่า pH ที่เหมาะสมของสารเคมีแต่ละตัวในการลดค่าความขุ่น และค่า TDS



ภาพ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ในการกำจัด TDS ที่ TDS เริ่มต้น 746.00 mg/L

3. ผลของค่าความเข้มข้นของสารช่วยตกตะกอนชนิดประจุลบต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าความขุ่น ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และ ความกระด้าง

จากผลการทดลองเพิ่มความเข้มข้นมีสารช่วยตกตะกอนทางเคมีชนิดประจุลบ ซึ่งสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบเหมาะสม และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยสารเคมีทางการค้า ได้แก่ สารส้ม เพอริกคลอไรด์ และโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่ค่า pH 6.00 5.00 และ 7.00 ตามลำดับนั้นอยู่ในช่วงที่เป็นกรดส่งผลให้น้ำตัวอย่างในสถานะที่เหมาะสมนั้นมีค่าไอออนส่วนมากเป็นบวกจึงได้เลือกใช้สารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบ เพื่อให้งานวิจัยนี้สามารถเปรียบเทียบความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่เกิดขึ้น โดยจะเพิ่มสามารถช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.00–3.00 mg/L พบว่าสารช่วยตกตะกอนชนิดประจุลบส่งผลให้ความสามารถในการลดค่า TDS ของ PAFSIC ดีขึ้น 10.32% เช่นเดียวกับสารตัวอื่น ๆ ดังตาราง 9

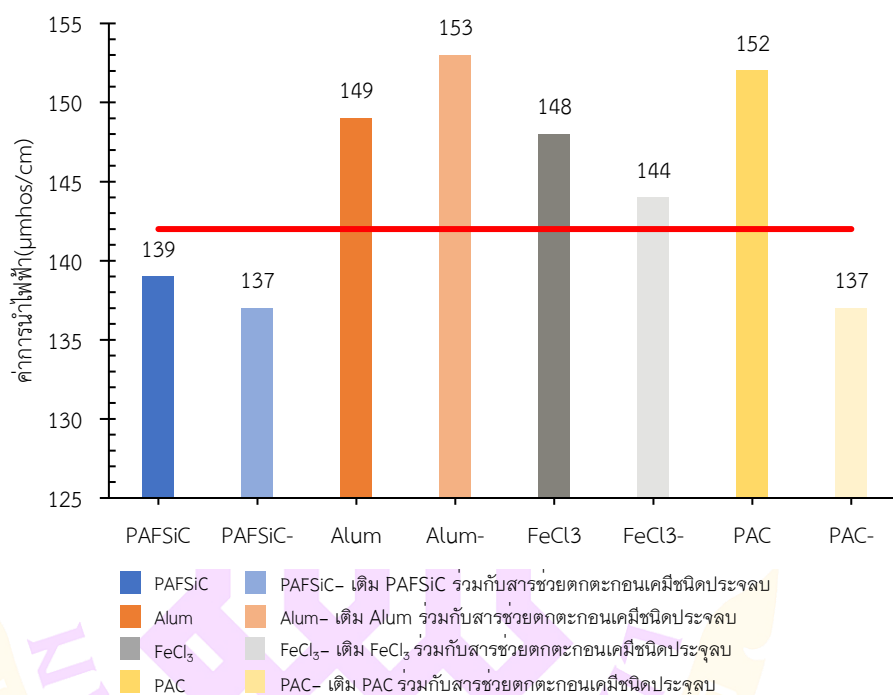
ตาราง 9 ความสามารถในการลดค่า TDS ของน้ำตัวอย่างน้ำของ PAFSiC กับสารตกตะกอนเคมีทางการค้าแต่ละชนิด

ชนิดสารตกตะกอน	สภาวะที่เหมาะสม			TDS (mg/L)
	pH	ความเข้มข้น (mg/L)	Anionic polymer (mg/L)	
PAFSiC	8.00	5.00	-	690.00
Alum	6.00	3.00	-	749.00
FeCl ₃	5.00	6.00	-	759.00
PAC	7.00	4.00	-	756.00
PAFSiC -	8.00	5.00	2.00	669.00
Alum -	6.00	3.00	2.50	710.00
FeCl ₃ -	5.00	6.00	3.00	701.00
PAC -	7.00	4.00	1.00	714.00

จากการศึกษาการใช้สารช่วยตกตะกอนทางเคมีชนิดประจุลบทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย (TDS) จากข้อมูลตามตาราง 9 โดยใช้สารตกตะกอนเคมีทางการค้าทั้ง 3 ชนิด และเติมสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบพบว่าตัวของสารช่วยตกตะกอนทางเคมีชนิดประจุลบมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดค่า TDS ในน้ำตัวอย่างได้หากนำมาเปรียบเทียบกับสารตกตะกอนที่ต้องการศึกษา ได้แก่ สาร PAFSiC จะเห็นได้ว่าสารที่ต้องการศึกษามีความสามารถในการลดค่า TDS ได้ดีมากกว่าสารตกตะกอนเคมีทางการค้าแม้ไม่มีการเติมสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบ

จากผลการทดสอบความสามารถในการลดค่าการนำไฟฟ้า ซัลเฟต และความกระด้างของ PAFSiC ในน้ำตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารเคมีทางการค้าจากข้อมูลของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำ ห้วยเป็ด อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ตามตาราง 8 มีค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างเท่ากับ 143.00 $\mu\text{mhos/cm}$ ค่าซัลเฟต เท่ากับ 1.16 mg/L SO₄ และค่าความกระด้างเท่ากับ 60.00 mg/L CaCO₃ ทำการศึกษาดูความสามารถของ PAFSiC ในการลดค่าที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าตัวของ PAFSiC มีความสามารถในการลดค่าการนำไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับตัวของ

PAFSiC ที่ได้มีการเติมสารช่วยตกตะกอนทางเคมีชนิดประจุลบ ซึ่งมีความสามารถในการลดค่าการนำไฟฟ้าในน้ำตัวอย่างได้ดีที่สุดหากเทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้าชนิดอื่น ๆ พบว่าสารตกตะกอนเคมีทางการค้าบางตัวทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ ทั้งนี้พบว่าตัวของ PAC หลังจากเติมสารช่วยตกตะกอนทางเคมีชนิดประจุลบนั้นช่วยให้ตัวของ PAC มีความสามารถในการลดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวของ PAC ที่ไม่ได้เติมสารช่วยตกตะกอนชนิดประจุลบแสดงได้ดังภาพ 27



ภาพ 27 ความสามารถในการลดค่าการนำไฟฟ้าของ PAFSiC เทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้า

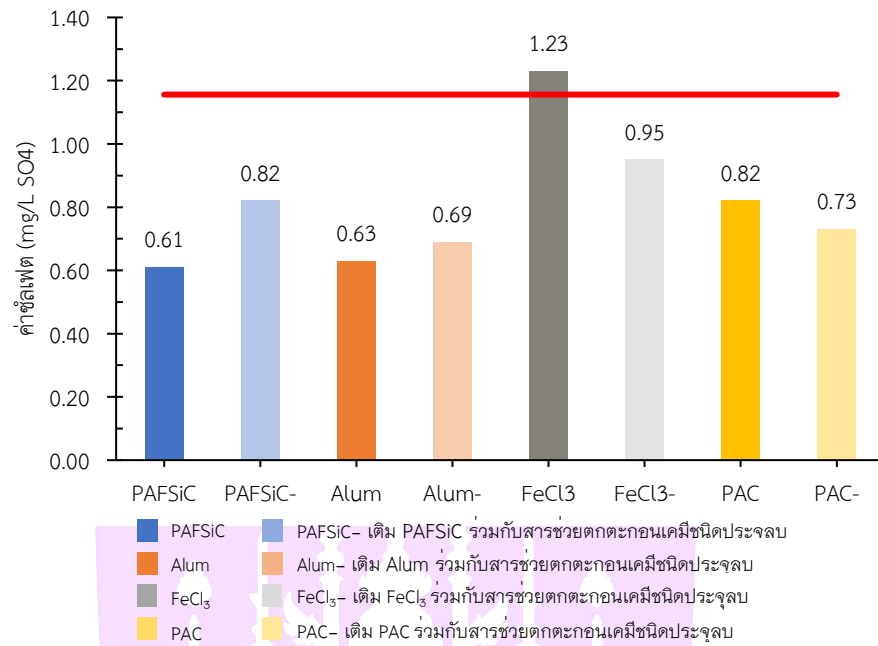
จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำหลังจากการบำบัดขั้นต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าซัลเฟต และความกระด้าง ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวของสารที่ทำการศึกษา คือ ตัวของ PAFSiC มีความสามารถในการลดซัลเฟตได้ดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 47.05 แต่กับพบว่าตัวของ PAFSiC ที่เติมสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบไปนั้นส่งผลทำให้ความสามารถในการลดค่าซัลเฟตลดลงโดยสาร PAFSiC มีความสามารถในการลดค่าซัลเฟตของน้ำตัวอย่างจาก 1.16 mg/L SO₄ เป็น 0.61 mg/L SO₄ แต่หลังจากเติมสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดค่าซัลเฟตเท่ากับ 0.82 mg/L SO₄ จากเดิม 0.61 mg/L SO₄ (ประสิทธิภาพการลดค่าซัลเฟตหลังการ

ปรับปรุงคุณภาพน้ำชั้นด้วยสาร PAFSiC) หากเปรียบเทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้าที่ศึกษาทั้ง 3 ชนิดนั้นตัวของเฟอริกคลอไรด์ทำให้ค่าซัลเฟตเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นของซัลเฟตในน้ำตัวอย่างที่ 1.16 mg/L SO_4 ไปเป็น 1.23 mg/L SO_4 ดังภาพ 28 จึงสรุปได้ว่าตัวของ PAFSiC มีความสามารถในการลดค่าซัลเฟตได้ดีที่สุดโดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยตกตะกอนทางเคมีชนิดประจุลบ

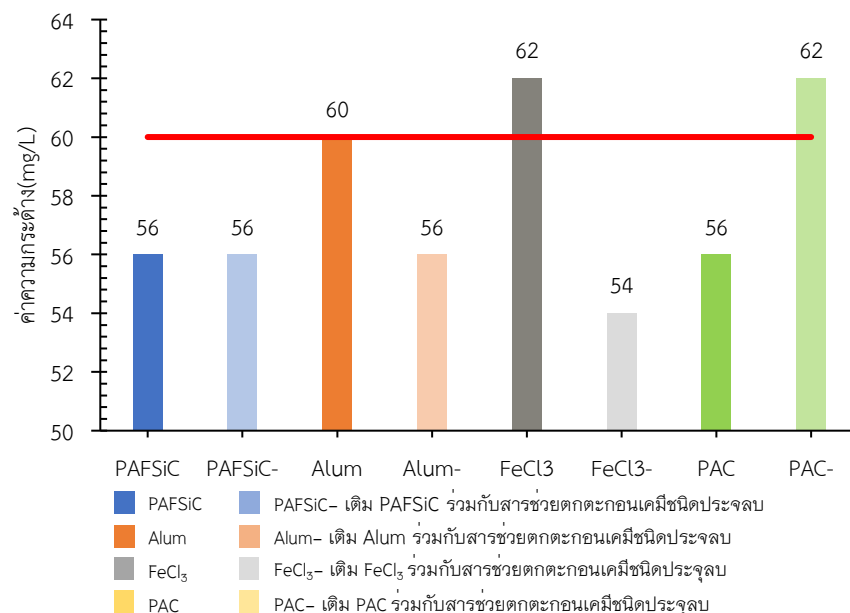
ผลการวิเคราะห์ค่าความกระด้างในน้ำตัวอย่าง พบว่าตัวของสารตกตะกอนทางเคมีที่ลดค่าความกระด้างได้ดีที่สุดได้แก่ เฟอริกคลอไรด์ที่เติมสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบ อยู่ที่ 54.00 mg/L $CaCO_3$ ส่วนสาร PAFSiC ทั้งก่อน และหลังเติมสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบ เช่นเดียวกับตัวสารส้มที่ได้รับการเติมสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบนั้น ค่าความกระด้างที่ได้หลังจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำอยู่ที่ 56.00 mg/L $CaCO_3$ เท่ากันทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมาโดยค่าความกระด้างเริ่มต้นของน้ำตัวอย่างอยู่ที่ 60.00 mg/L $CaCO_3$ ดังภาพ 29

จึงสรุปได้ว่าตัวของ PAFSiC มีความสามารถในการลดค่าต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษา ได้แก่ ค่า TDS ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซัลเฟต และค่าความกระด้างได้โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบหากเทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้าทั้ง 3 ชนิดแล้วสารบางตัวจำเป็นต้องได้รับการเติมสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบเพื่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นในการปรับปรุงคุณภาพน้ำในค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น





ภาพ 28 ความสามารถในการลดค่าซัลเฟตในน้ำตัวอย่างของ PAFSiC เทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้า



ภาพ 29 ความสามารถในการลดค่าความกระด้างในน้ำตัวอย่างของ PAFSiC เทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้า

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของสาร PAFSiC ในการกำจัดความขุ่นต่ำของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดโดยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM)

โดยการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดความขุ่นต่ำของน้ำตัวอย่างโดยใช้เทคนิค RSM ในรูปแบบ BBD ตามข้อมูลการกำหนดปัจจัยในการทดลองตามตาราง 6 ดำเนินการออกแบบการทดลองโดยโปรแกรมทางสถิติ (Design Expert 13) ผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองสมการกำลังสองนั้นเหมาะสมสำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่นต่ำของน้ำตัวอย่างโดยแบบจำลองนี้ให้ค่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ (Standard Deviation: SD) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) แสดงได้จากสมการที่ (8) ซึ่งอยู่ในรูปเข้ารหัส และสมการที่ (9) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ไม่ถูกเข้ารหัส

$$\text{Turbidity} = + 90.88 + 0.6300*B - 1.51*C + 0.5000*AB + 0.2500*AC - 0.2750*BC + 1.42*C^2 \quad (8)$$

$$\text{Turbidity} = + 90.88 + 0.6300*PAFSiC - 1.51* \text{AnPolymer} + 0.5000*pH*PAFSiC + 0.2500*pH*\text{AnPolymer} - 0.2750 * PAFSiC*\text{AnPolymer} + 1.42*\text{AnPolymer}^2 \quad (9)$$

ดำเนินการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนด้วยเทคนิค RSM รูปแบบ BBD โดยโปรแกรม Design Expert ในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดความขุ่นของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโมเดล ซึ่งรวมไปถึงผลของแต่ละปัจจัย และผลระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลที่ต้องการศึกษาในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ระดับความน่าเชื่อถือร้อยละ 95 ($P\text{-value} < 0.05$) แสดงว่าข้อกำหนดของแบบจำลองมีความสำคัญ ในกรณีนี้ ความเข้มข้นของ PAFSiC, ปริมาณสารช่วยตกตะกอนชนิดประจุลบ, ค่า pH ที่ส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นของ PAFSiC, ค่า pH ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณสารช่วยตกตะกอนชนิดประจุลบ และความเข้มข้นของ PAFSiC ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณสารช่วยตกตะกอนชนิดประจุลบ ในส่วนของความสัมพันธ์ในรูปแบบกำลังสองพบตัวของปริมาณของสารช่วยตกตะกอนชนิดประจุลบมีค่า $P\text{-value} < 0.05$ เป็นเงื่อนไขในแบบจำลองที่สำคัญ ส่วนตัวของค่า pH และความเข้มข้นของ PAFSiC ซึ่งมีค่า $P\text{-value}$ ที่มากกว่า 0.05 แสดงว่าเป็นเงื่อนไขของแบบจำลองที่ไม่สำคัญแสดงข้อมูลในตาราง 10

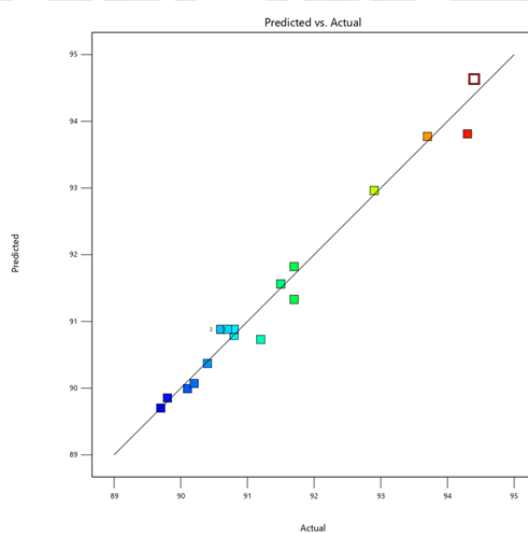
ตาราง 10 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	36.96	9	4.11	44.49	< 0.0001
A-pH	0.3240	1	0.3240	3.51	0.0905
B-PAFSiC	3.97	1	3.97	43.00	< 0.0001
C-An-polymer	22.80	1	22.80	247.01	< 0.0001
AB	2.00	1	2.00	21.67	0.0009
AC	0.5000	1	0.5000	5.42	0.0422
BC	0.6050	1	0.6050	6.55	0.0284
A ²	0.3028	1	0.3028	3.28	0.1002
B ²	0.0909	1	0.0909	0.9848	0.3444
C ²	5.53	1	5.53	59.92	< 0.0001
Residual	0.9231	10	0.0923		
Lack of Fit	0.8748	5	0.1750	18.10	0.0032
Pure Error	0.0483	5	0.0097		

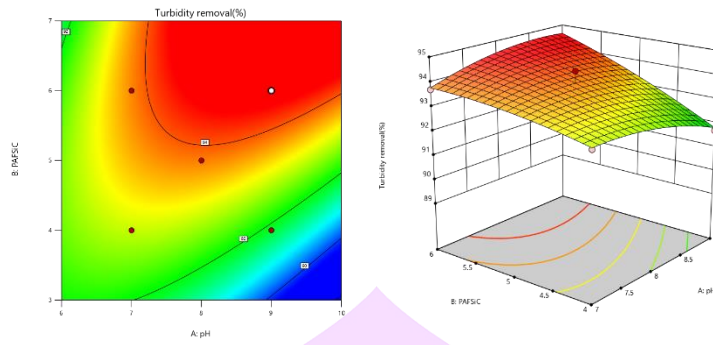
จากข้อมูลเพิ่มเติมที่ได้จากโปรแกรมทางสถิติ (Design Expert 13) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.97 ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของค่าที่คาดการณ์ไว้ (Predicted) อยู่ที่ 0.87 ซึ่งอยู่ในข้อตกลงที่สมเหตุสมผลกับตัวของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของที่ปรับปรุงแล้ว (Adjusted) ที่ 0.95 นั้นความต่างต้องไม่เกิน 0.2 ต่อมาผลของ Adeq Precision ซึ่งวัดค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณการรบกวนหากอัตราส่วนมากกว่า 4 จะเป็นที่ยอมรับได้พบว่าอัตราส่วนที่ได้เท่ากับ 22.94 บ่งชี้ว่ามีสัญญาณเพียงพอซึ่งโมเดลนี้สามารถให้นำทางไปยังพื้นที่การออกแบบได้แสดงข้อมูลดังตาราง 11 และสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลการทำนายกับผลที่แท้จริงได้ดังภาพ 30

ตาราง 11 แสดงผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสอง

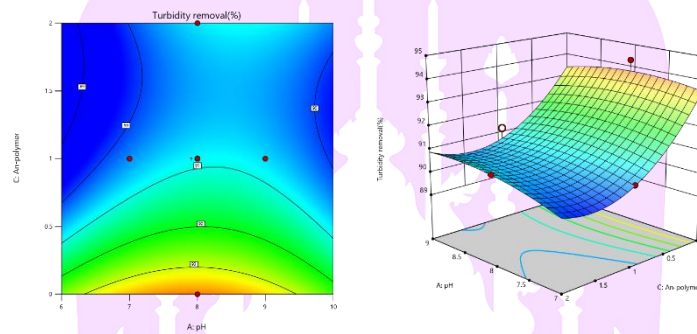
ค่าที่ศึกษา	ผลที่ได้
Std. Dev.	0.3038
Mean	91.33
C.V. %	0.3326
R ²	0.9756
Adjusted R ²	0.9537
Predicted R ²	0.8709
Adeq Precision	22.9477



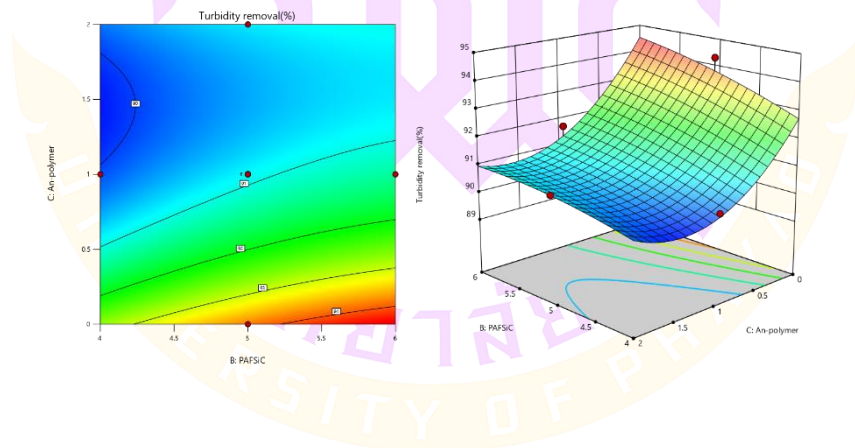
ภาพ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการทำนายกับผลที่แท้จริง



(ก) ความสัมพันธ์ของค่า pH ต่อกความเข้มข้นของ PAFSiC



(ข) ความสัมพันธ์ของค่า pH ต่อ ปริมาณของสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบ



(ค) ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสาร PAFSiC ต่อ ปริมาณสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบ

ภาพ 31 แผนภาพ 2 มิติ และ 3 มิติ แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการลดความขุ่นที่ต่ำของน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด

จากภาพ 31 (ก) ความสัมพันธ์ของค่า pH ต่อความเข้มข้นของ PAFSiC แสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการลดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสูงขึ้นเมื่อตัวของค่า pH และความเข้มข้นของสาร PAFSiC เพิ่มขึ้นโดยจากภาพขวามือของภาพ 31 (ก) ที่ความเข้มข้นของ PAFSiC 5.00 mg/L ที่ค่า pH เท่ากับ 8.00 โดยไม่มีการเติมสารช่วยตกตะกอนทางเคมีชนิดประจุลบตัวของสาร PAFSiC นั้นมีความสามารถในการลดความขุ่นต่ำของน้ำตัวอย่างได้ 94.4% และหากว่าเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสาร PAFSiC และตัวของ pH เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นต่ำได้ดีขึ้น เช่นเดียวกันกับภาพ 31 (ข) ที่ความสัมพันธ์ของค่า pH ต่อปริมาณของสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบ โดยปริมาณสาร PAFSiC ที่ 5.00 mg/L จะเห็นได้ว่าที่ค่า pH เท่ากับ 8.00 ต่อปริมาณสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบเท่ากับ 0.00 mg/L ทำให้ตัวของ PAFSiC มีความสามารถในการกำจัดความขุ่นที่ต่ำของน้ำตัวอย่างได้ดีที่สุดซึ่งจากภาพ 31 (ข) จะแสดงให้เห็นว่าหากมีการเพิ่มเติมสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบมากขึ้นจะส่งผลต่อความสามารถในการลดค่าความขุ่นที่ต่ำของน้ำตัวอย่างได้และจากภาพ 31 (ค) ที่ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสาร PAFSiC ต่อปริมาณสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบโดยค่า pH ที่ 8.00 จะเห็นได้ว่าถึงแม้ไม่เติมสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบแต่หากความเข้มข้นของสาร PAFSiC นั้นเพิ่มขึ้นก็ทำให้ความสามารถในการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นจึงสรุปได้ว่าตัวของสาร PAFSiC มีความสามารถในการกำจัดความขุ่นได้ดีโดยไม่ต้องเติมสารช่วยตกตะกอนเคมีชนิดประจุลบ

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้นได้ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดความขุ่นที่ต่ำ ความสามารถในการลดค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) ความสามารถในการลดค่าการนำไฟฟ้า ค่าซัลเฟต และค่าความกระด้างในน้ำตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ด อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ของสาร PAFSiC แล้วเปรียบเทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้าชนิดอื่น ๆ ทั้งยังศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของสาร PAFSiC ในการกำจัดความขุ่นที่ต่ำในน้ำตัวอย่างโดยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบ Box-Behnken เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการทดลองดังกล่าวให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้นของสาร PAFSiC จะทำการสรุปในตอนต่อไป

อภิปรายผลการวิจัย

ความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้นของสาร PAFSiC จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าตัวของ PAFSiC มีความสามารถในการลดค่าต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษาได้ดีโดยช่วง pH ที่เหมาะสมอยู่ตั้งแต่ 7.00–9.00 ซึ่งมีความสามารถกำจัดความขุ่นที่ต่ำของน้ำตัวอย่างลดค่า TDS โดยไม่ทำให้ค่า TDS เพิ่มสูงขึ้น มีความสามารถในการลดค่าการนำไฟฟ้า ค่าซัลเฟต และความกระด้างได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการปรับค่า pH ของน้ำตัวอย่างซึ่งมี pH เริ่มต้นที่ 8.00หากเทียบกับสารตกตะกอนเคมีทางการค้าชนิดอื่น ๆ โดยสารทุกตัวจำเป็นต้องมีการปรับค่า pH ของน้ำตัวอย่างเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้นให้สูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการปรับสภาพน้ำเพื่อให้เหมาะสมต่อสารตกตะกอนเคมีชนิดนั้น ๆ สารบางตัวจำเป็นต้องมีการเติมสารช่วยตกตะกอนทางเคมีเพื่อให้ได้ความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยผลที่ตามมาส่งผลทำให้ค่า TDS ค่าการนำไฟฟ้า ค่าซัลเฟต และค่าความกระด้างในน้ำตัวอย่างนั้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยสาร PAFSiC มีความสามารถในการลดค่าความขุ่นต่ำ ลดค่า TDS ลดค่าการนำไฟฟ้า ลดค่าซัลเฟต และลดความกระด้างได้ ทั้งยังไม่ทำให้ค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นที่ได้ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้เพิ่มขึ้นอีกด้วย เนื่องจากสารตกตะกอน PAFSiC มีองค์ประกอบของกลุ่มแลกเปลี่ยนไอออนทั้งประจุบวก และประจุลบซึ่งทำให้สารตกตะกอนมีประสิทธิภาพในการลดค่าต่าง ๆ อย่างมีนัยสำคัญหากนำมาเทียบ

ความสามารถในการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพน้ำตัวของ PAFSiC โดยต้นทุนต่อหน่วยการปรับสภาพน้ำของ PAFSiC ที่น้ำ 1.00 m³ คือ 0.16 บาท สามารถลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้นเทียบกับตัวของสารตกตะกอนเคมีทางการค้า ได้แก่ สารส้ม เพอริกคลอไรด์ และโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่ต้นทุนต่อหน่วยของการปรับสภาพน้ำที่ 1.00 m³ คือ 5.50 บาท, 1.79 บาท และ 2.45 บาท ตามลำดับ

จึงสรุปได้ว่าสาร PAFSiC มีความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้นโดยเหมาะสมสำหรับใช้แทนสารตกตะกอนเคมีทางการค้าที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ซึ่งเป็นทางเลือกใหม่ในการนำมาใช้ทดแทนสารตกตะกอนเคมีทางการค้าที่ใช้ในปัจจุบันทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายต้นทุนต่อหน่วยในการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้นในอ่างเก็บน้ำห้วยเป็ดได้ต่ำกว่าสารตกตะกอนเคมีทางการค้าทั้ง 3 ชนิดเฉลี่ยประมาณ 20 เท่า



บรรณานุกรม

- Almatin, E. and Gholipour, A. (2019). Estimating of optimal dose of PACL for turbidity removing from water. **arXiv preprint arXiv:1904.06421**.
- Amirtharajah, A. and Mills, K. M. (1982). Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. **Journal-American Water Works Association**, 74(4), 210–216.
- Bratby, J. (2016). **Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment** (พิมพ์ครั้งที่): IWA publishing.
- Bratby, J., Fevig, S. and Jimenez, J. (2012). The dirty secret of primary sludge prefermenters. **Proceedings of the Water Environment Federation**, 2012(10), 5660–5671.
- Chen, W., Zheng, H., Zhai, J., Wang, Y., Xue, W., Tang, X. et.al. (2015). Characterization and coagulation–flocculation performance of a composite coagulant: poly–ferric–aluminum–silicate–sulfate. **Desalination and Water Treatment**, 56(7), 1776–1786.
- Cheng, W. P., Chi, F. H., Li, C. C. and Yu, R. F. (2008). A study on the removal of organic substances from low–turbidity and low–alkalinity water with metal–polysilicate coagulants. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 312(2–3), 238–244.
- Fitzpatrick, C., Fradin, E. and Gregory, J. (2004). Temperature effects on flocculation, using different coagulants. **Water Science and Technology**, 50(12), 171–175.
- Gao, B., Hahn, H. and Hoffmann, E. (2002). Evaluation of aluminum–silicate polymer composite as a coagulant for water treatment. **Water Research**, 36(14), 3573–3581.
- Ghanem, A. V. (2002). **Fundamentals of ballasted flocculation reactions** (พิมพ์ครั้งที่): University of Arkansas.
- Hanson, A. T. and Cleasby, J. L. (1990). The effects of temperature on turbulent flocculation: fluid dynamics and chemistry. **Journal-American Water Works Association**, 82(11), 56–73.

- Hu, K., Zhao, Q.-I., Chen, W., Tang, F. and Xu, H. (2016). Preparation and performance of fly ash-based coagulants in chemically enhanced primary treatment of domestic wastewater. **Desalination and Water Treatment**, 57(10), 4429–4438.
- Hu, K., Zhao, Q. L., Chen, W. and Tang, F. (2017). Preparation of an Aluminum and Iron-Based Coagulant From Fly Ash for Industrial Wastewater Treatment. **Clean–Soil, Air, Water**, 45(9), 1600437.
- Li, J., Liu, X. and Cheng, F. (2017). Bio-refractory organics removal and floc characteristics of poly-silicic-cation coagulants in tertiary-treatment of coking wastewater. **Chemical Engineering Journal**, 324, 10–18.
- Loiha, S. (2013). Zeolite and zeolite technology. **KKU Science Journal**, 41(1), 56–66.
- Mahdavi, M., Ebrahimi, A., Taheri, E. and Fatehizadeh, A. (2016). High turbid water by polyaluminum ferric chloride (PAFCI).
- Mativenga, P. T. and Marnewick, A. (2018). Water quality in a mining and water-stressed region. **Journal of cleaner production**, 171, 446–456.
- Metcalf, L., Eddy, H. P. and Tchobanoglous, G. (1991). **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse** (พิมพ์ครั้งที่ 4): McGraw–Hill New York.
- Rossini, M., Garrido, J. G. and Galluzzo, M. (1999). Optimization of the coagulation–flocculation treatment: influence of rapid mix parameters. **Water Research**, 33(8), 1817–1826.
- Tolkou, A. and Zouboulis, A. (2016). Effect of climate change in WWTPs with a focus on MBR infrastructure. **Desalination and Water Treatment**, 57(5), 2344–2354.
- Townsend, R. P. and Coker, E. N. (2001). **Ion exchange in zeolites Studies in surface science and catalysis** (Vol. 137, pp. 467–524): Elsevier.
- Zhang, Y., Li, S., Wang, X., Ma, X., Wang, W. and Li, X. (2015). Synthesis, purification and characterization of polyaluminum ferric chloride (PAFC) with high (Al+ Fe) b content. **Separation and Purification Technology**, 146, 311–316.
- Zhu, G., Zheng, H., Chen, W., Fan, W., Zhang, P. and Tshukudu, T. (2012). Preparation of a composite coagulant: Polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS) for wastewater treatment. **Desalination**, 285, 315–323.

Zouboulis, A. and Tzoupanos, N. (2009). Polyaluminium silicate chloride—A systematic study for the preparation and application of an efficient coagulant for water or wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2–3), 1379–1389.

เรวัตี อนุวัฒน์, ตอพงษ์ กรีธาชาติ, ดร.โกวิท สุวรรณหงษ์, บุญณิดา โสตา, วิษณุ ปั้นพันธ์ุ, ทรงเกียรติ รอดแดง et.al. (2562). **โครงการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตสารคอมโพสิตโคแอกกูแลนต์จากเถ้าหนักของโรงไฟฟ้าถ่านหินเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ** : ลำปาง.

กรมอนามัย. **เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้กรมอนามัย พ.ศ. 2563**. สืบค้นเมื่อ 20

กุมภาพันธ์ 2563, จาก <https://rldc.anamai.moph.go.th/th/water-quality-standards>

กระทรวงสาธารณสุข, ก. (2562). **คู่มือมาตรฐานน้ำดื่มประเทศไทย**. นนทบุรี: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. **การจัดการน้ำในกระบวนการผลิตโรงไฟฟ้าแม่เมาะ**.

สืบค้นเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2563, จาก https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=1461&catid=49&Itemid=251

การประปาส่วนภูมิภาค. **ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ของการประปาส่วนภูมิภาค**. สืบค้นเมื่อ

20 กุมภาพันธ์ 2563, จาก <https://www.pwa.co.th/contents/service/treatment>

พงษ์ศักดิ์ ชาวอินทร์. (2555). **การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ปฏิกิริยาชนิดพื้นฟูสภาพได้**. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

มันสิน ตันกุลเวศม์. (2537). **วิศวกรรมประปาเล่ม 1**. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อภากร อยู่ดี. (2547). **การหาสภาวะที่เหมาะสมของสภาวะการพ่นเคลือบด้วยความร้อนสำหรับผิวเคลือบอะลูมิเนียม ร้อยละ 12 โดยน้ำหนักซิลิกอนด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง**. เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ธีรภัทร์ วาใจทอง
วัน เดือน ปี เกิด	21 กุมภาพันธ์ 2538
สถานที่เกิด	อุตรดิตถ์
วุฒิการศึกษา	2559 วศ.บ (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 28/1 หมู่ที่ 8 ตำบลจริม อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ 53150
ผลงานตีพิมพ์	ธีรภัทร์ วาใจทอง เรวดี อนุวัฒนา โกวิท สุวรรณหงษ์ ศักดิ์สิทธิ์ อิ่มแมน และต่อพงศ์ กริธาชาติ (ผู้บรรยาย), (23-24 พฤษภาคม 2564). ประสิทธิภาพของโพลีอะลูมินาเฟอร์ริคซิลิเกตเคลือบไรต์ในกระบวนการโคแอกกูเลชันสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำขั้นต้น ในการประชุมวิชาการเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมประจำปี ครั้งที่ 33 สวสท.'64 และ Mini-APLAS ในรูปแบบ Online Conference (หน้า 90-97).

