



การกำจัดออร์โธพอสเฟตและความขุ่นจากน้ำเสียชุมชนด้วย  
โพลีลูมิเนียมคลอไรด์และตะกอนจากการผลิตน้ำประปา



โดย  
นางสาวสุนันท์ ทันสมัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การกำจัดออร์โทฟอสเฟตและความขุ่นจากน้ำเสียชุมชนด้วย  
โพลีลูมิเนียมคลอไรด์และตะกอนจากการผลิตน้ำประปา



โดย  
นางสาวสุนันท์ ทັນสมัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

REMOVAL OF ORTHOPHOSPHATE AND TURBIDITY FROM MUNICIPAL  
WASTEWATER BY POLYALUMINIUM CHLORIDE  
AND WATER TREATMENT SLUDGE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (ENVIRONMENTAL SCIENCE)  
Department of ENVIRONMENTAL SCIENCE  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2022  
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การกำจัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นจากน้ำเสียชุมชนด้วย  
โพลีลูมิเนียมคลอไรด์และตะกอนจากการผลิตน้ำประปา  
โดย นางสาวสุนันท์ ทันสมัย  
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา  
มหาบัณฑิต  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. มัลลิกา ปัญญาคะโป

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย (ผู้รักษาการแทน)  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาธิต นิรัติศัย)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร. อุมารัจน์ สันติสุขเกษม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. มัลลิกา ปัญญาคะโป)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สร้อยดาว วินิจนันทรรัตน์)

61311306 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : น้ำเสียชุมชน, ฟอสเฟต, การสร้างและรวมตะกอนทางเคมี, การตกตะกอนทางเคมี, ตะกอนประปา

นางสาว สุวนันท์ ทັນสมัย: การกำจัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นจากน้ำเสียชุมชนด้วยโพลีลูมิเนียมคลอไรด์และตะกอนจากการผลิตน้ำประปา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. มัลลิกา ปัญญาคะโป

การปนเปื้อนของฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชนส่งผลต่อคุณภาพน้ำและสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในแหล่งน้ำ จึงต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ การผลิตน้ำประปาทำให้เกิดตะกอนประปาเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ตะกอนเหล่านี้ยังคงมีสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตหลงเหลืออยู่ งานวิจัยนี้จึงศึกษาการนำสาร PACl และตะกอนประปามาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชน ระหว่างการใช้สาร PACl ตะกอนประปา และสาร PACl ร่วมกับตะกอนประปา รวมทั้งศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัด ได้แก่ ความเข้มข้นของสาร PACl ปริมาณตะกอนประปา เวลาในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน ซึ่งทำการทดลองด้วย Jar Test เป็น 2 แบบ ได้แก่ 1) แบบกวนเร็ว เพื่อศึกษาการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอน และ 2) แบบกวนเร็วตามด้วยการกวนช้า เพื่อศึกษาการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมกับกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

ผลการทดลองพบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสม ได้แก่ 1) การใช้สาร PACl ที่ความเข้มข้น 30 มก./ล. โดยทำการกวนเร็ว 1 นาที และกวนช้า 10 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นได้ร้อยละ 96.06 และ 96.03 ตามลำดับ 2) การใช้สาร PACl ร่วมกับตะกอนประปา ที่ความเข้มข้นของสาร PACl 10 มก./ล. ร่วมกับตะกอนประปา 6 ก./ล. โดยทำการกวนเร็ว 1 นาที และกวนช้า 15 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นได้ร้อยละ 93.43 และ 84.95 ตามลำดับ และ 3) การใช้ตะกอนประปาที่ปริมาณ 15 ก./ล. โดยทำการกวนเร็ว 20 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นได้ร้อยละ 81.12 และ 80.47 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัด ค่าสารเคมี และการใช้ประโยชน์ของเสียสรุปได้ว่าการใช้สาร PACl ร่วมกับตะกอนประปาเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ผลการวิจัยยังพบว่าการใช้สาร PACl และตะกอนประปา สามารถบำบัดค่า COD ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียให้คุณภาพน้ำที่ผ่านค่ามาตรฐานของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2553 ด้วย งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าตะกอนประปาสามารถนำกลับมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าของตะกอนประปาและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนอีกด้วย

61311306 : Major (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Keyword : Municipal wastewater, Phosphate, Chemical coagulation and flocculation, Chemical precipitation, Water treatment sludge

MISS SUWANAN TANSAMAI : REMOVAL OF ORTHOPHOSPHATE AND TURBIDITY FROM MUNICIPAL WASTEWATER BY POLYALUMINIUM CHLORIDE AND WATER TREATMENT SLUDGE THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR MALLIKA PANYAKAPO, Ph.D.

Phosphate in municipal wastewater affects water quality and aquatic organisms. Therefore, wastewater must be treated before being discharged into water resources. The water treatment process of tap water production produces large amounts of water treatment sludge (WTS) containing polyaluminium chloride (PACl) used in the process. Therefore, this research studied on the removal municipal wastewater by using PACl and WTS. Therefore, this research studied on the use of PACl and WTS to treat municipal wastewater. The objective was to compare the efficiency of orthophosphate (OP) and turbidity removal in municipal wastewater during the use of PACl, WTS and PACl with WTS. Various factors such as PACl concentration, WTS dosage, reaction time and settling time were studied. The experiments with Jar-test were divided into 2 types: 1) rapid mixing to study the precipitation process and 2) rapid mixing followed by slow mixing to study the precipitation process together with coagulation and flocculation process.

The results showed that the optimum conditions were as follows: 1) OP and turbidity removal under the condition of PACl 30 mg/L by 1 min rapid mixing and 10 min slow mixing were 96.06% and 96.03%, respectively, 2) OP and turbidity removal by using PACl 10 mg/L and WTS 6 g/L with 1 min rapid mixing and 15 min slow mixing were 93.43% and 84.95%, respectively, and 3) OP and turbidity removal under the condition of WTS at 15 g/L by 20 min rapid mixing were 81.12% and 80.47% respectively. When considering the treatment efficiency, the chemical cost and the utilization of waste, it can be concluded that the use of PACl with WTS is the most appropriate condition. Moreover, The results showed that PACl and WTS to treat COD, total suspended solids (TSS) and total phosphorus (TP) in wastewater to produce water that quality conforming to the effluent standards by the Ministry of Natural Resources and Environment (2010). This research indicates that WTS can be recycled for municipal wastewater treatments increasing the value of WTS and to reducing sludge disposal costs.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มัลลิกา ปัญญาคะโป อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คอยแนะนำช่วยเหลือ พร้อมชี้แนะแนวทางการดำเนินงาน และให้กำลังใจตลอดการทำวิจัยทุกขั้นตอน ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อุมารัจน์ สันติสุขเกษม ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สร้อยดาว วินิจนันทรัตน์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำและตรวจทานการเขียนรายงานวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณผ่องศรี เผ่าภูรี ที่คอยให้คำแนะนำช่วยเหลือในการทดลองในห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงาน การจัดทำเอกสารการสอบวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ โรงผลิตน้ำประปาเทศบาลนครนครปฐม จังหวัดนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณกำลังใจและการสนับสนุนจากบิดา มารดา พี่ชาย และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา ส่งผลให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยจนสำเร็จไปได้ด้วยดี

นางสาว สุวนันท์ พันสมัย

## สารบัญ

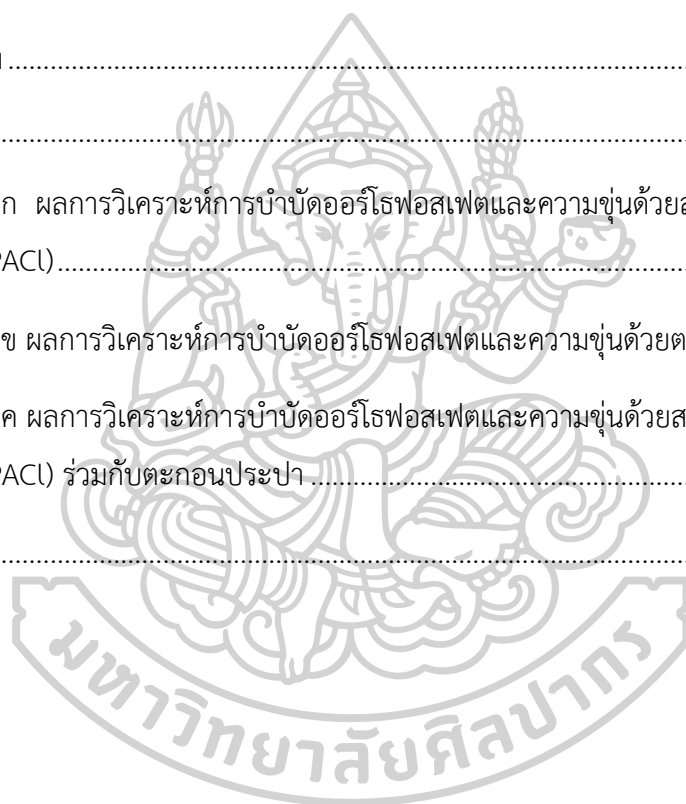
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร.....	4
2.1 ฟอสเฟต.....	4
2.1.1 ประเภทของฟอสเฟตที่พบในแหล่งน้ำ.....	4
2.1.2 แหล่งที่มาของฟอสเฟต.....	4
2.1.3 ผลกระทบของฟอสเฟตต่อแหล่งน้ำ.....	4
2.2 น้ำเสียชุมชน.....	5
2.2.1 ลักษณะของน้ำเสียชุมชน.....	5
2.2.2 การบำบัดน้ำเสียชุมชน.....	7
2.3 การบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชน.....	9



2.3.1 การบำบัดฟอสเฟตโดยวิธีทางชีวภาพ .....	9
2.3.2 การบำบัดฟอสเฟตโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี .....	10
2.4 สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride, PACl) .....	15
2.5 กระบวนการประปาและตะกอนประปา .....	16
2.5.1 กระบวนการประปา.....	16
2.5.2 ตะกอนประปา.....	17
2.6 กระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี (Chemical coagulation and flocculation) .	20
2.6.1 หลักการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี .....	20
2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี .....	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.7.1 การบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชน.....	22
2.7.2 การนำตะกอนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย .....	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	26
3.1 ภาพรวมของงานวิจัย .....	26
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	26
3.2.1 อุปกรณ์ .....	26
3.2.2 เครื่องมือ .....	27
3.3 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	28
3.3.1 สารสร้างตะกอนและตะกอนประปาที่ใช้ในการศึกษา .....	28
3.3.2 น้ำเสียชุมชนที่ใช้ในการศึกษา .....	29
3.4 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียชุมชน .....	29
3.5 วิธีการศึกษา.....	30
3.5.1 การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดขอบเขตของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟต และความขุ่นด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) .....	31

3.5.2 การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดขอบเขตของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มด้วยตะกอนประปา .....	32
3.5.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มในน้ำเสียด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) .....	33
3.5.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มในน้ำเสียด้วยตะกอนประปา .....	33
3.5.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มในน้ำเสียด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา .....	38
3.5.6 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารชนิดต่างๆ ในน้ำเสีย.....	38
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	41
4.1 ลักษณะของตะกอนประปาและน้ำเสียชุมชนที่ใช้ในการศึกษา.....	41
4.2 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มในน้ำเสียด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl).....	41
4.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl).....	41
4.2.2 ผลของเวลาทำปฏิกิริยา.....	43
4.2.3 ผลของเวลาดกตะกอน.....	45
4.3 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยตะกอนประปา.....	47
4.3.1 ผลของปริมาณตะกอนประปา.....	47
4.3.2 ผลของเวลาทำปฏิกิริยา.....	49
4.3.3 ผลของเวลาดกตะกอน.....	51
4.4 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มในน้ำเสียด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา .....	53
4.4.1 ผลของความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl).....	53
4.4.2 ผลของปริมาณตะกอนประปา.....	55
4.4.3 ผลของเวลาทำปฏิกิริยา.....	57

4.4.4 ผลของเวลาตกตะกอน.....	59
4.5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มในน้ำเสีย .....	60
4.6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารชนิดต่างๆ ในน้ำเสีย .....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	64
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	65
รายการอ้างอิง .....	66
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์การบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl).....	71
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์การบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มด้วยตะกอนประปา .....	75
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์การบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา .....	79
ประวัติผู้เขียน.....	84



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะของน้ำเสียชุมชน .....	6
ตารางที่ 2.2 สมการและค่าคงที่ของการละลายของเกลือฟอสเฟต .....	11
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปา.....	18
ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์.....	30
ตารางที่ 3.2 การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดขอบเขตของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) .....	32
ตารางที่ 3.3 การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดขอบเขตของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยตะกอนประปา.....	32
ตารางที่ 3.4 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) (การกวนเร็ว).....	34
ตารางที่ 3.5 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) (การกวนเร็วและกวนช้า).....	35
ตารางที่ 3.6 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยตะกอนประปา (การกวนเร็ว).....	36
ตารางที่ 3.7 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยตะกอนประปา (การกวนเร็วและกวนช้า).....	37
ตารางที่ 3.8 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา (การกวนเร็ว).....	39
ตารางที่ 3.9 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา (การกวนเร็วและกวนช้า) .....	40
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสีย ....	62
ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารชนิดต่างๆ ในน้ำเสีย .....	63

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน .....	8
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ PACL.....	12
ภาพที่ 2.3 ผลของปริมาณของสารที่ช่วยในการตกตะกอนในการกำจัดฟอสเฟต .....	13
ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและ pH.....	14
ภาพที่ 2.5 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟอสเฟตด้วยสารส้ม .....	15
ภาพที่ 2.6 สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride, PACL).....	16
ภาพที่ 2.7 กระบวนการผลิตน้ำประปา .....	17
ภาพที่ 2.8 ตะกอนประปา.....	19
ภาพที่ 2.9 กลไกกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี .....	21
ภาพที่ 3.1 ภาพรวมการดำเนินงานวิจัย.....	27
ภาพที่ 3.2 สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACL).....	28
ภาพที่ 3.3 ตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปาเทศบาลนครนครปฐม.....	29
ภาพที่ 3.4 สถานที่เก็บตัวอย่างน้ำเสียชุมชน .....	29
ภาพที่ 3.5 วิธีดำเนินการทดลอง.....	31
ภาพที่ 4.1 ผลของความเข้มข้นสาร PACL ต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น. 42	
ภาพที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นสาร PACL ต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น. 43	
ภาพที่ 4.3 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น.....	44
ภาพที่ 4.4 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการกำจัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น .....	45
ภาพที่ 4.5 ผลของเวลาดตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น .....	46
ภาพที่ 4.6 ผลของเวลาดตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น .....	46
ภาพที่ 4.7 ผลของปริมาณตะกอนประปาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ..	48

ภาพที่ 4.8 ผลของปริมาณตะกอนประปาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น .. 48

ภาพที่ 4.9 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น..... 50

ภาพที่ 4.10 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น..... 50

ภาพที่ 4.11 ผลของเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ..... 51

ภาพที่ 4.12 ผลของเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ..... 52

ภาพที่ 4.13 ผลของความเข้มข้นสาร PACl ต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
..... 54

ภาพที่ 4.14 ผลของความเข้มข้นสาร PACl ต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
..... 54

ภาพที่ 4.15 ผลของปริมาณตะกอนประปาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น 56

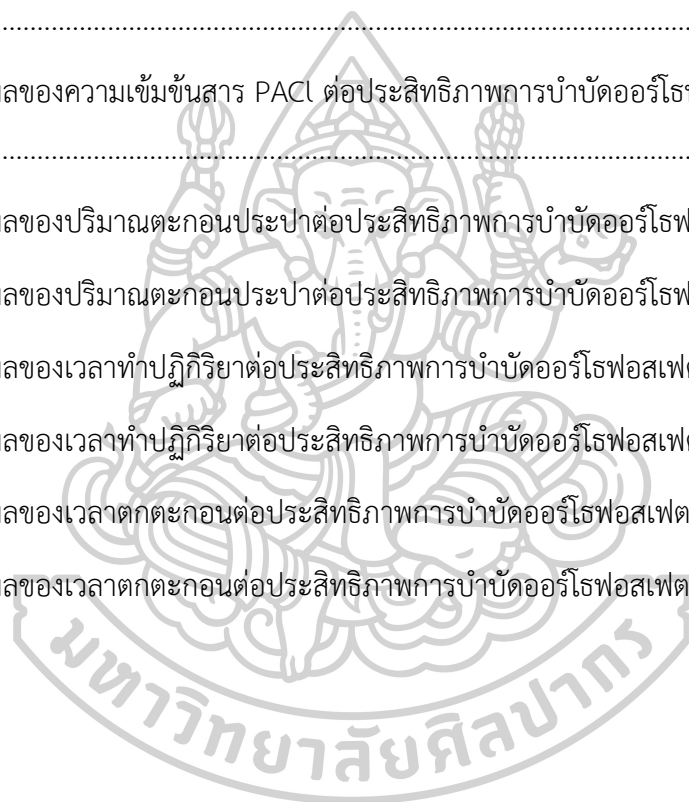
ภาพที่ 4.16 ผลของปริมาณตะกอนประปาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น 56

ภาพที่ 4.17 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น..... 57

ภาพที่ 4.18 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น..... 58

ภาพที่ 4.19 ผลของเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ..... 59

ภาพที่ 4.20 ผลของเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ..... 60





## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดขึ้นในประเทศไทยถือเป็นปัญหาสำคัญของประเทศ โดยมีสาเหตุมาจากน้ำทิ้งจากบ้านเรือน ขยะมูลฝอยและสิ่งปฏิกูลจากแหล่งชุมชน น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และน้ำฝนที่เกิดการพัดพาน้ำที่ปนเปื้อนสารพิษที่ตกค้างจากการทำเกษตรกรรมลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ เกิดผลกระทบต่อวงจรชีวิตของสัตว์น้ำ เป็นแหล่งแพร่ระบาดของเชื้อโรค ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำนั้น อีกทั้งทำให้ไม่สามารถนำน้ำมาใช้ประโยชน์ได้ ทั้งในการอุปโภคบริโภค การเกษตรกรรม และการอุตสาหกรรมอีกด้วย โดยปัญหามลพิษทางน้ำส่วนมากเกิดมาจากน้ำเสียจากแหล่งชุมชน ที่เกิดจากกิจกรรมในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ และกิจกรรมที่เป็นอาชีพของผู้ที่อาศัยอยู่ในชุมชนนั้น ได้แก่ น้ำทิ้งจากการประกอบอาหาร น้ำทิ้งจากการชำระล้างสิ่งสกปรกในครัวเรือนและอาคารประเภทต่างๆ โดยน้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากอาคารบ้านเรือนมีปริมาณร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำใช้หรืออาจคำนวณได้จากปริมาณประชากร (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) ปัญหาการปนเปื้อนของสารประกอบฟอสฟอรัสส่วนมากเกิดจากน้ำเสียชุมชน ซึ่งเกิดจากการใช้สารซักล้าง หรือสารทำความสะอาดต่างๆ ซึ่งทำให้น้ำทิ้งที่เกิดขึ้นมีการปนเปื้อนของฟอสฟอรัสลงไปในน้ำในปริมาณที่สูง ส่งผลให้วัชพืชน้ำหรือแพลงก์ตอนพืชเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และช่วยเพิ่มจำนวนของสาหร่ายสีเขียว ซึ่งใช้ออกซิเจนละลายน้ำในการหายใจช่วงกลางคืน ทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง จึงทำให้สิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำขาดออกซิเจนในการหายใจ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) เป็นปรากฏการณ์ที่แหล่งน้ำมีธาตุอาหารในปริมาณที่มากเกินไป ซึ่งเป็นปัญหาที่พบมากในหลายพื้นที่ของประเทศ ในการกำจัดสารประกอบฟอสเฟตทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี นิยมใช้สารเคมีต่างๆ เช่น ปูนขาว สารส้ม สารโพliosลูมิเนียมคลอไรด์ สารเพอร์ริคคลอไรด์ ในการกำจัดฟอสเฟต ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัด อีกทั้งวิธีการใช้ตัวดูดซับต่างๆ และการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ (วสันต์ ธีระพิทยานนท์, 2556)

น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วยังคงมีปริมาณฟอสเฟตเหลืออยู่ในปริมาณที่สูง หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำนั้น การตกตะกอนทางเคมีเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยการใช้สารเคมีที่เป็นเกลือโลหะที่มีค่าประจุแตกต่างกันเพื่อจับกับฟอสเฟตที่ละลายน้ำแล้วทำให้เกิดการตกตะกอน (เสาวภา ยอดสูงเนิน, 2553) งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชน โดยการใช้สารโพliosลูมิเนียมคลอไรด์และตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด ทั้งนี้

ในระบบผลิตน้ำประปาของเทศบาลนครนครปฐมได้มีการใช้สารโพสฟอรัสคลอรีนเป็นสารสร้างและรวมตะกอนทางเคมี จึงทำให้ยังคงเหลือสารนี้ในตะกอนประปา ดังนั้นหากสามารถนำตะกอนประปามาใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่าตะกอนและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชน โดยใช้สารโพสฟอรัสคลอรีน ตะกอนประปา และสารโพสฟอรัสคลอรีนร่วมกับตะกอนประปา

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นระหว่างสารโพสฟอรัสคลอรีน ตะกอนประปา และสารโพสฟอรัสคลอรีนร่วมกับตะกอนประปา

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารชนิดต่างๆ ในน้ำเสียชุมชนด้วยสารโพสฟอรัสคลอรีน และตะกอนประปา ได้แก่ การบำบัด COD, ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สารโพสฟอรัสคลอรีนและตะกอนประปา สามารถใช้ในการบำบัดออร์โธฟอสเฟต (OP), ความขุ่น, COD, ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ในน้ำเสียชุมชนได้

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษา ดังนี้

1.4.1 ศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมของสารโพสฟอรัสคลอรีน ตะกอนประปา และสารโพสฟอรัสคลอรีนร่วมกับตะกอนประปา ในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชน โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพสฟอรัสคลอรีน ปริมาณตะกอนประปา เวลาในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน

1.4.2 น้ำเสียชุมชนที่ใช้ในการศึกษาเก็บมาจากบ่อสูบน้ำเสียรวมจากกลุ่มหอพักเพชรรัตน์ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

1.4.3 ตะกอนที่ใช้ในการศึกษาเป็นตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาของเทศบาลนครปฐม อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม โดยงานวิจัยนี้จะเรียกว่า ตะกอนประปา

1.4.4 เมื่อได้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชนด้วยสารโพสฟอรัสคลอรีน ตะกอนประปา และสารโพสฟอรัสคลอรีนร่วมกับ



ตะกอนประปาแล้ว จากนั้นทำการศึกษาการบำบัดมลสารชนิดต่างๆ ได้แก่ COD, ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชนด้วยการใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ ตะกอนประปา และสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับตะกอนประปา

1.5.2 ทราบถึงสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชนด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ ตะกอนประปา และสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับตะกอนประปา

1.5.3 ทราบถึงประสิทธิภาพในการบำบัด COD, ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ในน้ำเสียชุมชนด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ และตะกอนประปา

1.5.4 เป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของตะกอนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปา



## บทที่ 2

### ตรวจสอบเอกสาร

#### 2.1 ฟอสเฟต

ฟอสฟอรัสในน้ำธรรมชาติและน้ำเสียนั้นจะอยู่ในรูปของฟอสเฟต และโมเลกุลของฟอสเฟตสามารถจำแนกฟอสเฟตออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ออร์โธฟอสเฟต โพลีฟอสเฟต และสารอินทรีย์ฟอสเฟต ซึ่งอาจพบฟอสเฟตในรูปของสารละลาย สารแขวนลอยในน้ำ ตะกอนดินก้นบ่อ ตลอดจนในตัวของสิ่งมีชีวิตต่างๆ (ยาโก้ ชาเร็มดาเบะ, 2553)

##### 2.1.1 ประเภทของฟอสเฟตที่พบในแหล่งน้ำ

ฟอสเฟตที่พบในแหล่งน้ำ อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

- 1) ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) ได้แก่ ฟอสเฟตที่ละลายน้ำแล้วให้  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  และ  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$
- 2) โพลีฟอสเฟต (Polyphosphate) ได้แก่ สารที่มีฟอสเฟตในโมเลกุลหลายๆ หมู่ เช่น สารประกอบ  $\text{Na}_3(\text{PO}_4)_6$ ,  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  และ  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$
- 3) อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphates) ได้แก่ สารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ เช่น nucleic acid, phospholipids และ sugar phosphate

##### 2.1.2 แหล่งที่มาของฟอสเฟต

แหล่งที่มาของฟอสเฟตมาจาก 2 แหล่ง คือ จากแหล่งธรรมชาติและแหล่งที่มาจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ฟอสเฟตที่มาจากแหล่งธรรมชาติ เช่น การละลายของหินฟอสเฟต ผงฝุ่นฟอสฟอรัสในอากาศที่ถูกฝนพัดพาให้ตกลงสู่แม่น้ำ รวมทั้งฝนที่ตกลงมายังพื้นดินพัดพาเศษซากดินและหินที่มีฟอสเฟตลงสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังอาจมาจากเศษซากพืชซากสัตว์ในแหล่งน้ำ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำได้

2. แหล่งที่มาจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ได้แก่ น้ำทิ้งจากชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม และการเกษตรกรรม แม้ว่าจะมีการบำบัดน้ำทิ้งดังกล่าวแล้ว แต่ยังคงมีฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในปริมาณสูง ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่พบว่าน้ำทิ้งมีปริมาณฟอสฟอรัสสูง ได้แก่ โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โรงงานปุ๋ย เป็นต้น

##### 2.1.3 ผลกระทบของฟอสเฟตต่อแหล่งน้ำ

การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารต่างๆ ในแหล่งน้ำ จากน้ำทิ้งชุมชน น้ำทิ้งจากการเกษตรกรรม รวมไปถึงน้ำชะจากหลุมฝังกลบ ซึ่งพบว่าฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่สำคัญที่ทำให้เกิด

ปัญหามลพิษทางน้ำ โดยจะสะสมอยู่ในรูปของตะกอนต่างๆ เป็นอาหารสำหรับแพลงก์ตอน สาหร่าย และเชื้อโรค มีผลกับสีและกลิ่นของน้ำ ทำให้คุณภาพของแหล่งน้ำตามธรรมชาติลดลง โดยปัญหาที่สำคัญเมื่อแหล่งน้ำมีธาตุอาหารสูง คือ ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ที่เกิดจากการที่แหล่งน้ำ เช่น แม่น้ำ ลำคลอง อ่างเก็บน้ำ ทะเลสาบ มีปริมาณธาตุอาหาร คือ สารประกอบไนโตรเจน และฟอสฟอรัสมากเกินไป ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของสาหร่ายเซลล์เดียวและพืชน้ำ มีส่วนกระตุ้นให้เกิดการสังเคราะห์ด้วยแสง และมีการแพร่พันธุ์ของสาหร่ายและพืชน้ำอย่างรวดเร็วในแหล่งน้ำ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ การปนเปื้อนของธาตุอาหารดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการใช้ผงซักฟอก ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เครื่องใช้ในครัวเรือน ซึ่งมีส่วนผสมของฟอสเฟต น้ำจากการซักล้างก็จะไหลลงสู่แหล่งน้ำ เกิดการปนเปื้อนของฟอสฟอรัส ส่วนการใช้ปุ๋ยทางการเกษตรเป็นสาเหตุให้เกิดการปนเปื้อนของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้โดยฝนที่ตกลงมาจะชะหน้าดิน ทำให้น้ำที่ปนเปื้อนธาตุอาหารเหล่านี้ไหลลงสู่แหล่งน้ำ การปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือแหล่งชุมชนต่างๆ เช่น โรงเรียน โรงพยาบาล ตลาด ภัตตาคาร โรงแรม อาคารที่พักอาศัย อาคารพาณิชย์ ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของธาตุอาหารได้ (นฤตม์ สหนาวิน และจิราวรรณ ตอฤทธิ์, 2555)

## 2.2 น้ำเสียชุมชน

น้ำเสีย (Wastewater) หมายถึง น้ำที่มีสิ่งเจือปนต่างๆ มากมาย จนมีลักษณะกลิ่น สี รส น่ารังเกียจ ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ประโยชน์ ถ้าปล่อยลงสู่ลำน้ำธรรมชาติจะทำให้คุณภาพน้ำเสื่อมโทรมได้

น้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater) หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันและกิจกรรมที่เป็นอาชีพของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหาร และชำระล้างสิ่งสกปรกทั้งหลายภายในครัวเรือน และอาคารประเภทต่างๆ

### 2.2.1 ลักษณะของน้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชนเกิดจากบ้านพักอาศัย ประกอบไปด้วยน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ลักษณะของน้ำเสียชุมชน ดังตารางที่ 2.1 โดยน้ำเสียชุมชนมีองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2563)

1) สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เช่น เศษข้าว ก๋วยเตี๋ยว เศษใบตอง พืชผัก ขึ้นเนื่อ ซึ่งถูกย่อยสลายได้ โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำ นิยมวัดด้วยค่าบีโอดี (BOD) เมื่อค่าบีโอดีในน้ำสูง แสดงว่ามีสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก และจะทำให้ น้ำมีสภาพเน่าเหม็นได้ง่ายขึ้น

2) สารอินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่างๆ ที่อาจไม่ทำให้เกิดน้ำเน่าเหม็น แต่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ คลอไรด์ ซัลเฟต เป็นต้น

3) โลหะหนักและสารพิษ อาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ และสามารถสะสมอยู่ในวงจรอาหาร เกิดเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น พรอท โครเมียม ทองแดง ปกติจะอยู่ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม และสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืชที่ปนมากับน้ำทิ้งจากการเกษตร สำหรับในเขตชุมชนอาจมีสารมลพิษนี้มาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่น ร้านชุบโลหะ อู่ซ่อมรถ และน้ำเสียจากโรงพยาบาล เป็นต้น

4) น้ำมันและสารลอยน้ำต่างๆ เป็นอุปสรรคต่อการสังเคราะห์ด้วยแสง และกีดขวางการกระจายของออกซิเจนจากอากาศลงสู่น้ำ นอกจากนั้นยังทำให้เกิดสภาพไม่น่าดูอีกด้วย

5) ของแข็ง เมื่อจมตัวสู่ก้นลำน้ำ ทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนที่ท้องน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน มีความขุ่นสูง มีผลกระทบต่อการค้ารังสีของสัตว์น้ำ

6) สารก่อให้เกิดฟอง/สารชักฟอง ได้แก่ ผงซักฟอก สบู่ ฟองจะกีดกันการกระจายของออกซิเจนในอากาศสู่แหล่งน้ำ และอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

7) จุลินทรีย์ น้ำเสียจากโรงฟอกหนัง โรงฆ่าสัตว์ หรือโรงงานอาหารกระป๋อง จะมีจุลินทรีย์เป็นจำนวนมาก จุลินทรีย์เหล่านี้ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต สามารถลดระดับของออกซิเจนละลายน้ำ ทำให้เกิดสภาพเน่าเหม็น นอกจากนี้จุลินทรีย์บางชนิดอาจเป็นเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์

8) ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เมื่อมีปริมาณสูงจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วของสาหร่าย (Algae Bloom) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดลงต่ำมากในช่วงกลางคืน อีกทั้งยังทำให้เกิดวัชพืชน้ำ ซึ่งเป็นปัญหาแก่การสัญจรทางน้ำ

9) กลิ่น เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน หรือกลิ่นอื่นๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงงานทำปลาป่น โรงฆ่าสัตว์

#### ตารางที่ 2.1 ลักษณะของน้ำเสียชุมชน

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น		
		น้อย	กลาง	มาก
1. ของแข็งทั้งหมด (Total solids)	mg/L	350	720	1,200
ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved Solids)	mg/L	250	500	850
ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)	mg/L	100	220	350

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของน้ำเสียชุมชน (ต่อ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น		
		น้อย	กลาง	มาก
2. ปริมาณตะกอนหนัก (Settleable Solids)	mg/L	5	10	20
3. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand :BOD)	mg/L	110	220	400
4. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand :COD)	mg/L	250	500	1,000
5. ไนโตรเจนทั้งหมด (Total as N)	mg/L	20	40	85
อินทรีย์ไนโตรเจน (Organic)	mg/L	8	15	35
แอมโมเนีย (Free ammonia)	mg/L	12	25	50
ไนไตรท์ (Nitrites)	mg/L	0	0	0
ไนเตรท (Nitrate)	mg/L	0	0	0
6. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total as P)	mg/L	4	8	15
สารอินทรีย์ (Organic)	mg/L	1	3	5
สารอนินทรีย์ (Inorganic)	mg/L	3	5	10
7. คลอไรด์ (Chloride)*	mg/L	30	50	100
8. ซัลเฟต (Sulfate)*	mg/L	20	30	50
9. สภาพด่าง (Alkalinity as CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	50	100	200
10. ไขมัน (Grease)	mg/L	50	100	150
11. Total Coliform	MPN/ 100ml	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>

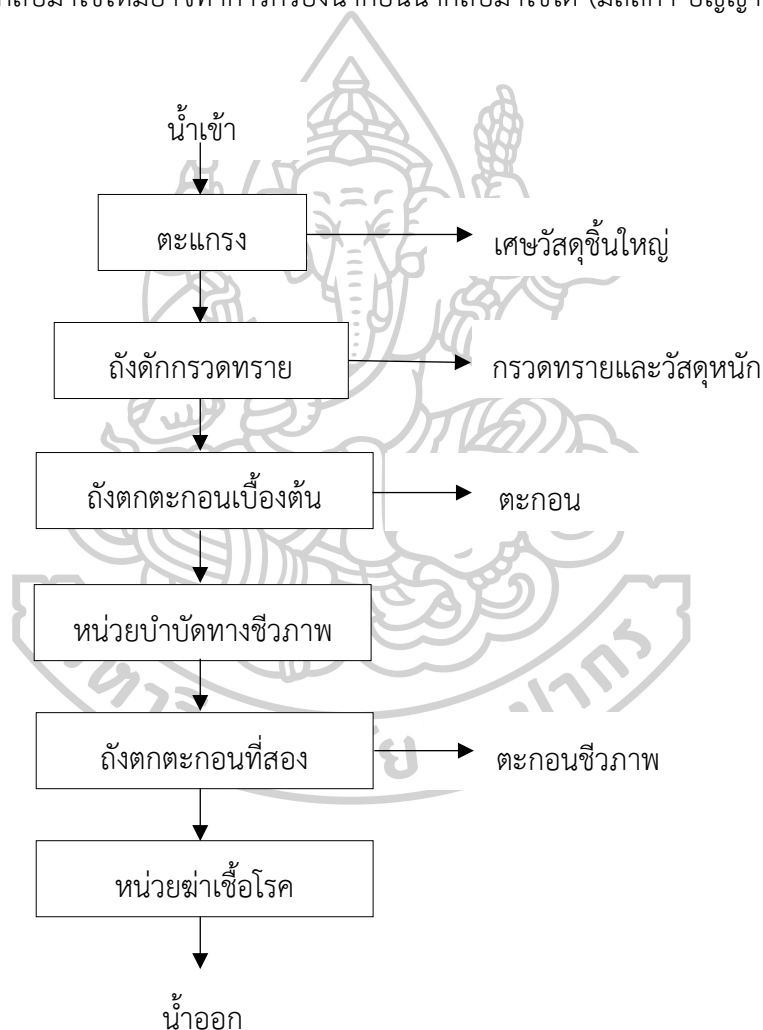
หมายเหตุ : \* เป็นค่าที่เพิ่มจากค่าที่ตรวจพบในน้ำใช้ปกติ

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2563)

### 2.2.2 การบำบัดน้ำเสียชุมชน

มลสารหลักในน้ำเสียชุมชน ได้แก่ เศษวัสดุชิ้นใหญ่ กรวดทราย ของแข็งแขวนลอยในรูปสารอินทรีย์และอนินทรีย์ สารอินทรีย์ละลายน้ำ และเชื้อโรค ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียจึงประกอบด้วยขั้นตอนและหน่วยบำบัดต่างๆ ดังภาพที่ 2.1 การบำบัดขั้นเตรียมการและขั้นต้นประกอบด้วย ตะแกรงกรอง เพื่อดักเศษวัสดุชิ้นใหญ่ ถังดักกรวดทรายใช้ดักกรวดทรายและของแข็ง

หนัก ถังตกตะกอนเบื้องต้นใช้ดักของแข็งที่ตกตะกอนได้ ทั้ง 3 หน่วยบำบัดนี้เป็นหน่วยบำบัดทางกายภาพ เป็นการเตรียมน้ำเพื่อที่จะเข้าสู่หน่วยบำบัดทางชีวภาพซึ่งเป็นหน่วยบำบัดหลัก การบำบัดขั้นที่ 2 เป็นการบำบัดด้วยหน่วยบำบัดทางชีวภาพ เพื่อบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ แล้วจึงตกตะกอนเซลล์จุลินทรีย์แยกจากน้ำด้วยถังตกตะกอนที่สอง สำหรับระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพ น้ำที่ออกจากถังตกตะกอนเป็นน้ำที่ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งสามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำภายนอกได้ อย่างไรก็ตามอาจมีการบำบัดขั้นที่ 3 ต่อไป ถ้าน้ำมีศักยภาพที่จะปะปนเชื้อโรค เช่น น้ำทิ้งจากโรงพยาบาลก็จะบำบัดด้วยหน่วยฆ่าเชื้อโรคก่อนปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำ หรือบางกรณีถ้าต้องการน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่อาจทำการกรองน้ำก่อนนำกลับมาใช้ได้ (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2561)



ภาพที่ 2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

ที่มา: มัลลิกา ปัญญาคะโป (2561)



## 2.3 การบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชน

การปนเปื้อนของฟอสเฟตส่วนมากเกิดจากน้ำเสียชุมชน ที่เกิดจากการใช้สารซักล้าง หรือสารทำความสะอาดต่างๆ โดยเฉพาะผงซักฟอกและน้ำยาล้างจาน ซึ่งทำให้น้ำทิ้งที่เกิดขึ้นมีการปนเปื้อนของฟอสเฟตลงไปในแหล่งน้ำในปริมาณที่สูง ส่งผลให้วัชพืชน้ำหรือแพลงก์ตอนพืชเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) เป็นปรากฏการณ์ที่แหล่งน้ำมีธาตุอาหารในปริมาณที่มากเกินไป ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟอสเฟตก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ โดยการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชนทำได้หลายวิธี เช่น การบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ และการบำบัดด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.3.1 การบำบัดฟอสเฟตโดยวิธีทางชีวภาพ

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้จุลินทรีย์ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย โดยเฉพาะสารคาร์บอนอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยมีสารเหล่านี้จะเป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในถังเลี้ยงเชื้อเพื่อการเจริญเติบโต ทำให้น้ำเสียมีความสกปรกลดลง สามารถแบ่งตามชนิดแบคทีเรียได้เป็น 2 แบบ ดังนี้ แบบที่หนึ่ง ระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศ (Aerobic process) เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียที่ใช้อากาศ ดังนั้นต้องมีการเติมอากาศตลอดเวลา ระบบที่นิยมใช้ ได้แก่ ระบบ Activated sludge, ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon) และระบบบึงประดิษฐ์ (Wetland) และแบบที่ 2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic process) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้แบคทีเรียแบบไม่ใช้อากาศในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ระบบที่นิยมใช้ ได้แก่ ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic filter, AF), ระบบ Covered lagoon, ระบบ Fixed dome และระบบ UASB (Upflow anaerobic sludge blanket) (กรมควบคุมมลพิษ, 2563)

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพนั้นจุลินทรีย์จำเป็นต้องมีสารอาหารเพียงพอในการสร้างเซลล์ สามารถแบ่งอาหารของจุลินทรีย์ได้เป็น 4 จำพวก คือ ก) สารประกอบที่ให้คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ข) สารประกอบที่ให้พลังงานในการดำรงชีวิต ค) สารอินทรีย์ และ ง) สารที่ต้องการเพียงเล็กน้อย โดยทั่วไปจุลินทรีย์ต้องการแร่ธาตุหลัก ได้แก่ โปตัสเซียม แคลเซียม สังกะสี แมงกานีส เหล็ก โคบอล แมกนีเซียม และทองแดง ซึ่งในน้ำเสียชุมชนมีสารอาหารเหล่านี้เพียงพอในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ฟอสฟอรัสจะถูกกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพโดยการดูดซับออร์โธฟอสเฟต โพลีฟอสเฟต และอินทรีย์ฟอสเฟต ให้อยู่ในรูปของเนื้อเยื่อเซลล์ของจุลินทรีย์ ซึ่งปริมาณของฟอสฟอรัสที่ถูกกำจัดในระหว่างการบำบัด มีตั้งแต่ร้อยละ 10-30 ของปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่ไหลเข้าสู่ระบบบำบัด โดยจุลินทรีย์ไม่เพียงแต่ใช้ฟอสฟอรัสในการซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอของเซลล์ สังเคราะห์สารและถ่ายทอดพลังงานในเซลล์เท่านั้น แต่ยังสามารถเก็บฟอสฟอรัสไว้ในเซลล์เป็นพลังงานสะสม (ชีวะวิทยารัตนพันธ์, 2548)

กระบวนการบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพที่นิยมใช้กันมาก มีหลักการคือในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งมีค่ากรด (Acidity) สูง จุลินทรีย์จะใช้พลังงานที่สะสมในรูปสารประกอบโพลีฟอสเฟต และจะปลดปล่อยฟอสเฟตออกมาจากเซลล์ แต่เมื่อจุลินทรีย์ถูกป้อนเข้าสู่บริเวณที่มีออกซิเจน (Aerobic reactor) จุลินทรีย์จะสะสมฟอสฟอรัสในรูปของโพลีฟอสเฟตไว้ในเซลล์ในปริมาณมากกว่าปกติ ฟอสฟอรัสจะถูกกำจัดออกจากน้ำเสียในรูปของตะกอนจุลินทรีย์ โดยใช้หลักการสร้างสภาวะที่เปลี่ยนแปลงระหว่างไร้อากาศและใช้อากาศ การบำบัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพสามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสให้เหลือความเข้มข้น 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำทิ้งจากระบบบำบัด (Effluent) เนื่องจากในตะกอนมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสอยู่ประมาณร้อยละ 5 นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (BOD) ต่อฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ซึ่งควรมีมากกว่า 10:1 ทั้งนี้การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยวิธีทางชีวภาพเป็นวิธีที่ยั่งยืนและซับซ้อน ดังนั้นการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริงนั้นต้องใช้ผู้ที่มีความรู้และความชำนาญสูงในการควบคุมระบบ อีกทั้งเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ต้นทุนสูง ดังนั้นในการเลือกใช้วิธีการกำจัดฟอสฟอรัสทางชีวภาพจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่าง

### 2.3.2 การบำบัดฟอสเฟตโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) หมายถึงการเปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปของสารละลายให้เป็นสารที่อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ โดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเพื่อให้เกิดการตกตะกอน การบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี จึงเป็นการเติมสารเคมีที่เหมาะสม เพื่อทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตที่ละลายน้ำ เพื่อให้เปลี่ยนเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยลง สามารถตกตะกอนหรือกรองออกจากน้ำได้ ข้อมูลที่สำคัญในการพิจารณาเลือกกระบวนการตกตะกอนทางเคมี คือ ค่าคงที่ของการละลาย (Solubility product constant,  $K_{sp}$ ) ของสาร การเลือกกำจัดไอออนที่มีประสิทธิภาพจะต้องเลือกเติมไอออนประจุตรงข้ามที่ทำให้เกิดเกลือที่มีค่า  $K_{sp}$  ต่ำ คือมีการละลายได้น้อย โดยค่าคงที่ของการละลายของเกลือฟอสเฟต ดังตารางที่ 2.2 การตกตะกอนทางเคมีเพื่อกำจัดฟอสเฟต สามารถเกิดขึ้นได้โดยการใช้สารเคมีที่เป็นเกลือโลหะที่มีค่าประจุแตกต่างกัน เพื่อจับกับฟอสเฟตที่ละลายน้ำทำให้เกิดการตกตะกอน โดยทั่วไปสารที่ใช้เติมได้แก่ สารที่ละลายน้ำแตกตัวให้ไอออนแคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) อลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) และเหล็ก ( $Fe^{3+}$ ) (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2561)



ตารางที่ 2.2 สมการและค่าคงที่ของการละลายของเกลือฟอสเฟต

สมการ	$K_{sp}$ ที่ 25 องศาเซลเซียส
$\text{AlPO}_4 (\text{s}) \rightleftharpoons \text{Al}^{3+} + \text{PO}_4^{3-}$	$3.2 \times 10^{-23}$
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 (\text{s}) \rightleftharpoons 3\text{Ca}^{2+} + 2\text{PO}_4^{3-}$	$1 \times 10^{-27}$
$\text{CaHPO}_4 (\text{s}) \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{HPO}_4^{2-}$	$3 \times 10^{-7}$
$\text{Ca}(\text{PO}_4)_3\text{OH} (\text{s}) \rightleftharpoons 5\text{Ca}^{2+} + 3\text{PO}_4^{3-} + \text{OH}^-$	$8 \times 10^{-55}$
$\text{FePO}_4 (\text{s}) \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + \text{PO}_4^{3-}$	$1.3 \times 10^{-22}$
$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 (\text{s}) \rightleftharpoons 3\text{Fe}^{2+} + 2\text{PO}_4^{3-}$	$1 \times 10^{-36}$

ที่มา: มัลลิกา ปัญญาคะโป (2561)

### 1) สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนทางเคมี

สารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการตกตะกอนทางเคมีเพื่อช่วยในการตกตะกอน ได้แก่ สารส้ม (Alum) สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride, PACl) และสารเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride) รายละเอียดแสดงดังนี้ (กฤษดา ทองนาค, 2553)

#### 1.1) สารส้ม (Aluminum sulphate, Alum)

สารส้ม มีสูตรโมเลกุล คือ  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถละลายน้ำได้ดี เมื่อเติมลงในน้ำแตกตัวให้อลูมิเนียมไอออน ( $\text{Al}^{3+}$ ) ซัลเฟตไอออน ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) และสารประกอบเชิงซ้อน (Complex) ซึ่งเกิดจากการไฮโดรไลซิสของอลูมิเนียม ดังสมการที่ (1) ถึง (3)

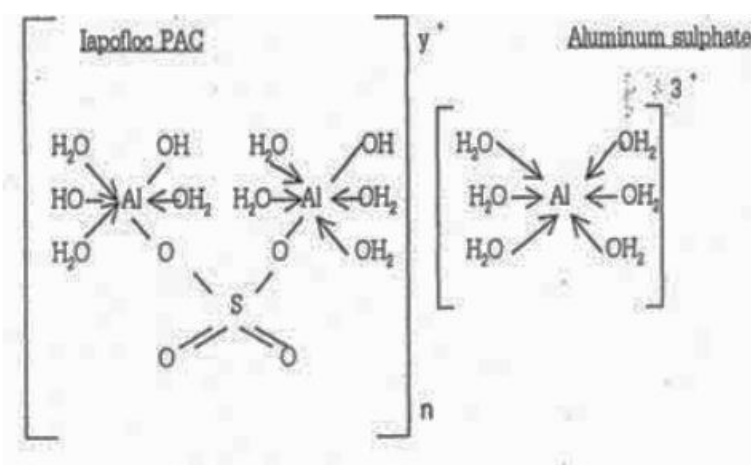


ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ดังสมการที่ (4)



### 1.2) สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride, PACl)

สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ มีสูตรทั่วไปคือ  $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$  เตรียมขึ้นโดยอลูมิเนียมที่เป็น  $Al_2O_3$  ทำปฏิกิริยากับ HCl ที่อุณหภูมิสูงจนเป็น  $AlCl_3$  หลังจากนั้นทำปฏิกิริยากับเบสที่อุณหภูมิและความดันสูง เกิดเป็นอลูมิเนียมโพลีเมอร์ และเมื่อเติม Alum ลงไปจะได้  $Al_2O_3$  ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10-11 จากนั้นเติมซัลเฟตเพื่อเป็นตัวเชื่อมระหว่างอะตอมของอลูมิเนียม ดังภาพที่ 2.2

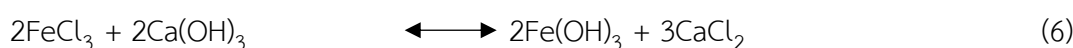
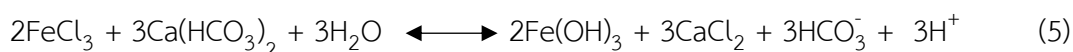


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ PACl

ที่มา: กฤษดา ทองนาค (2553)

### 1.3) สารเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride)

สารเฟอร์ริกคลอไรด์ มีสูตรทั่วไป คือ  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  หรือ  $FeCl_3$  anhydrous เป็นผลึกหรือสารละลายสีน้ำตาลแกมเหลือง สามารถละลายน้ำได้ดี สารประกอบเหล็กที่ละลายน้ำจะได้อประจุบวก ซึ่งไปทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ซึ่งเป็นประจุลบ จนเกิดตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ และทำปฏิกิริยากับ alkalinity ดังสมการที่ (5) และ (6)

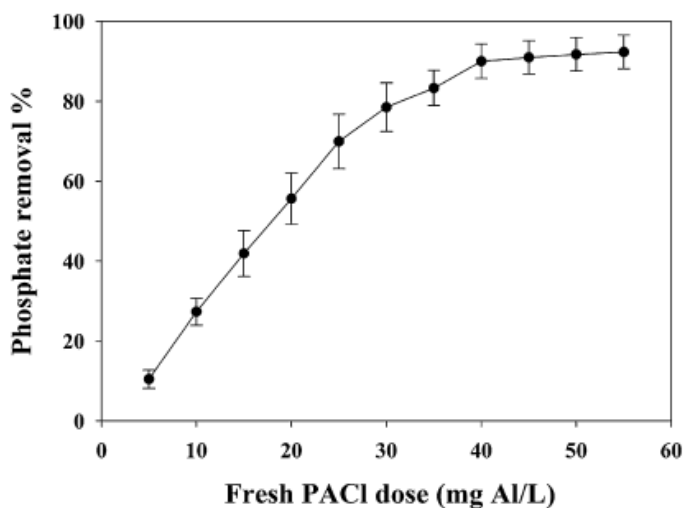


#### 2) ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ได้แก่ ความเข้มข้นของสารที่ช่วยในการตกตะกอน pH เริ่มต้น และเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.1) ความเข้มข้นของสารที่ช่วยในการตกตะกอน

ความเข้มข้นของสารที่ช่วยในการตกตะกอนที่เติม จะส่งผลต่อกระบวนการตกตะกอน โดยความเข้มข้นของสารที่ช่วยในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยาแล้วการกำจัดฟอสเฟตจะคงที่ ดังภาพที่ 2.3 เมื่อเติมสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ในน้ำทิ้ง PACl จะแตกตัวเป็นไอออน  $Al^{3+}$  และถูกไฮโดรไลซ์ให้กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ ซึ่งมีประจุบวก จะทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตที่มีประจุลบ เกิดเป็นสารอะลูมิเนียมฟอสเฟต ( $AlPO_4$ ) ดังสมการที่ (7) (Nair and Ahammed, 2015)

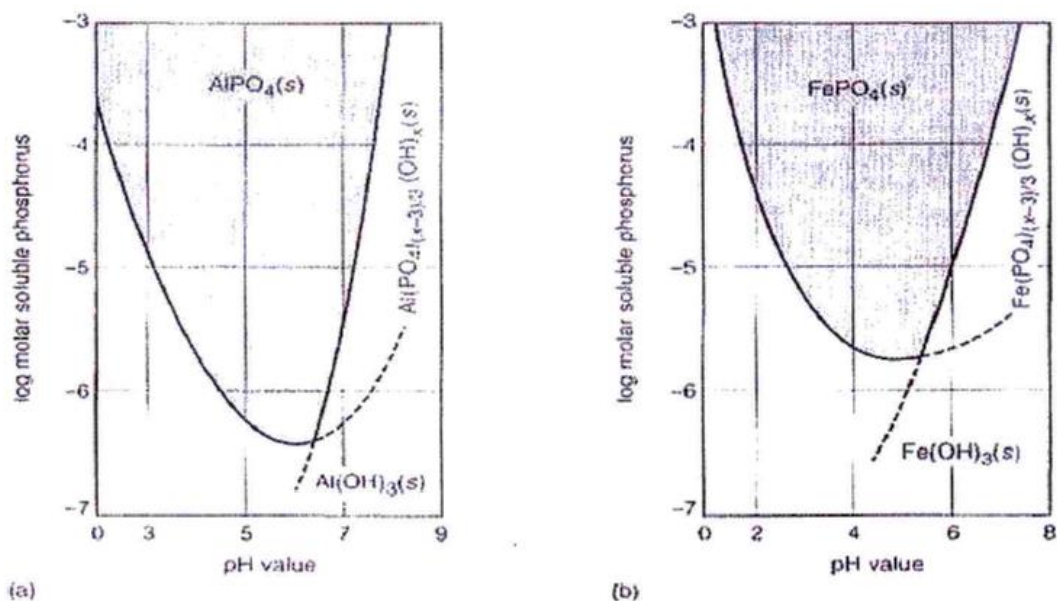


ภาพที่ 2.3 ผลของปริมาณของสารที่ช่วยในการตกตะกอนในการกำจัดฟอสเฟต  
ที่มา: Nair and Ahammed (2015)

### 2.2) pH เริ่มต้น

ค่า pH สำหรับการตกตะกอนในรูปของ  $AlPO_4$  และ  $FePO_4$  โดยการเติมเกลือซึ่งแตกตัวให้  $Al^{3+}$  และ  $Fe^{3+}$  สิ่งสำคัญสำหรับทั้ง 2 กรณี คือ ไอออนทั้ง 2 ชนิดสามารถรวมตัวกับ  $OH^-$  เกิดตะกอน  $Al(OH)_3$  และ  $Fe(OH)_3$  แทนที่จะเกิดสารประกอบ  $AlPO_4$  และ  $FePO_4$  ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับ pH ของน้ำให้ต่ำลง เพื่อลดปริมาณ  $OH^-$  ในน้ำไม่ให้ขัดขวางการตกตะกอนเป็นเกลือฟอสเฟต ค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอน  $AlPO_4$  และ  $FePO_4$  คือ  $\leq 5$  และ  $\leq 3$  ตามลำดับ จากภาพที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำกับ pH บริเวณที่แรงเงา

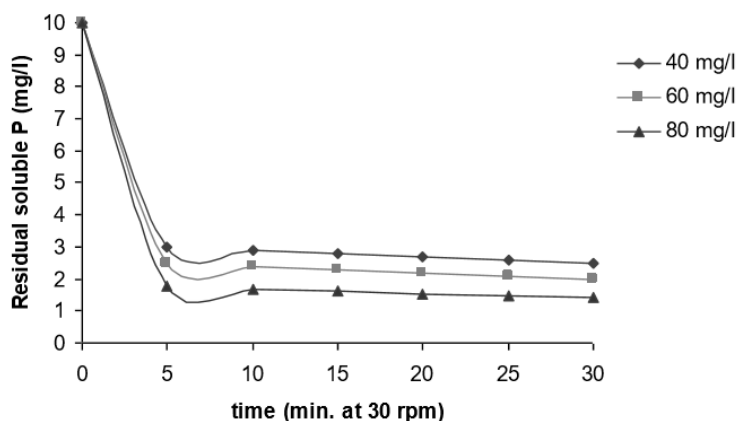
(สีเทา) เป็นบริเวณที่เกิดการตกตะกอนในรูปของ  $\text{AlPO}_4$  และ  $\text{FePO}_4$  นอกเหนือจากบริเวณนี้จะเกิดเป็นสารประกอบ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  และ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  หรือ  $\text{Al}(\text{PO}_4)_x(\text{OH})_y$  ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตต่ำลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมสภาวะการบำบัดให้เกิดการตกตะกอนในบริเวณที่แรเงาในกราฟ (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2561)



ภาพที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและ pH  
ที่มา: มัลลิกา ปัญญาคะโป (2561) อ้างจาก Metcalf & Eddy (2003)

### 2.3) เวลาในการทำปฏิกิริยา

การกำจัดฟอสเฟตโดยใช้สารที่ช่วยในการตะกอน พบว่าในระยะเวลาช่วงแรกของการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของฟอสเฟตจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไอออนของฟอสเฟตและอลูมิเนียม ( $\text{Al}^{3+}$ ) สามารถสัมผัสกันมาก และเมื่อถึงจุดสมดุลแล้วประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตจะลดลงหรือคงที่ ดังภาพที่ 2.5 (Mohammed and Shanshool, 2009)

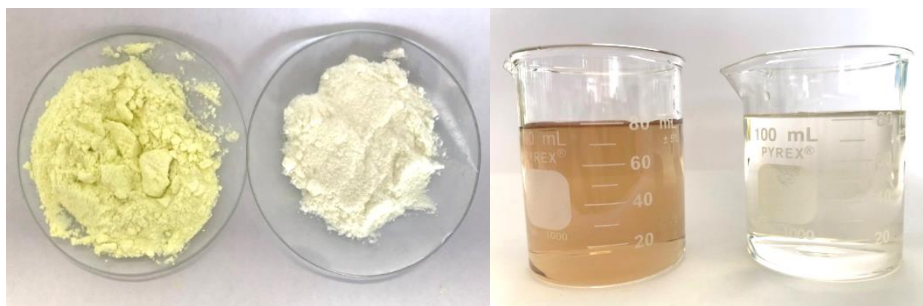


ภาพที่ 2.5 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกำจัดฟอสเฟตด้วยสารส้ม  
ที่มา: Mohammed and Shanshool (2009)

## 2.4 สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride, PACl)

สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride, PACl) หรือ PAC มีสูตรทั่วไป คือ  $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$  เป็นสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งเป็นเกลือสังเคราะห์ของอลูมิเนียมคลอไรด์ สารโพลีอลูมิเนียมดังกล่าวมีความเป็นด่างสูง มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือผงสีเหลือง อาจอยู่ในรูปของสารละลายใสหรือขุ่นเล็กน้อย ดังภาพที่ 2.6 PACl มีคุณสมบัติจับตัวสูงและมีเสถียรภาพมาก ใช้งานในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำ สำหรับเป็นสารเร่งการตกตะกอน (Coagulants) ทำให้สารต่างๆ ที่แขวนลอยในน้ำเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน และตกตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยตะกอนในน้ำที่มีประจุลบจะรวมตัวกับประจุไฟฟ้าบวกของ PACl ซึ่งในทุกขนาดของอนุภาคตะกอน PACl มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่และมีหลายนิวเคลียส ทำให้เกิดตะกอนหนักจึงสามารถตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว (ปฐวิพากย์ ปุ่นอุดม และไพบุลย์ กลมกล่อม, 2559)

PACl สามารถใช้ได้ทั่วไปในทุกกรณีกับน้ำที่ต้องการให้มีการสร้างและรวมตะกอน ยกตัวอย่างกระบวนการที่ได้มีการนำ PACl ไปใช้แล้วได้ผลดี ได้แก่ น้ำประปา โดยใช้น้ำดิบจากแม่น้ำ น้ำบาดาล น้ำเสียในอุตสาหกรรม การแยกของแข็งจากสารแขวนลอยในกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การผลิตน้ำประปาชุมชน การกำจัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อกระดาษ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมไฟฟ้า อุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมอาหาร



ภาพที่ 2.6 สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride, PACl)

ที่มา: Siam Asia Chemical Industry Co., Ltd. (2019)

## 2.5 กระบวนการประปาและตะกอนประปา

กระบวนการผลิตน้ำประปา เป็นการผลิตน้ำประปาจากน้ำดิบเพื่อใช้ในการอุปโภคบริโภค และจากขั้นตอนการผลิตทำให้มีตะกอนประปาเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.5.1 กระบวนการประปา

น้ำประปาเป็นน้ำที่ผ่านกระบวนการต่างๆ มากมาย โดยมีขั้นตอนการผลิตน้ำประปาหลายขั้นตอนและต้องมีการลงทุนที่สูงมาก รายละเอียดขั้นตอนในการผลิตน้ำประปามีดังนี้ (การประปาส่วนภูมิภาค, 2563)

1) การสูบน้ำ การผลิตน้ำประปาเริ่มจากโรงสูบน้ำแรงต่ำทำการสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลำเลียงเข้าสู่ระบบผลิต ซึ่งน้ำดิบที่สามารถนำมาผลิตน้ำประปาได้นั้นต้องเป็นน้ำที่ไม่มีสี ไม่มีรส ไม่มีสิ่งสกปรกปนเปื้อนเกินกว่าที่กำหนด และต้องมีปริมาณมากเพียงพอที่จะนำมาผลิตน้ำประปาได้อย่างต่อเนื่อง

2) การปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ น้ำดิบที่สูบเข้ามาแล้วจะนำมาผสมด้วยสารเคมี เช่น สารส้ม และปูนขาว เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ สารละลายสารส้มจะช่วยให้การตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น และสารละลายปูนขาวจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำ

3) การตกตะกอน ขั้นตอนนี้จะปล่อยน้ำที่ผสมเคมีแล้วเข้าสู่ถังตะกอนที่มีขนาดใหญ่ เพื่อให้เกิต้น้ำนิ่ง ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมากจะตกลงสู่ก้นถังและถูกดูดทิ้ง น้ำใสด้านบนจะไหลตามรางรับน้ำเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

4) การกรอง ในการกรองจะใช้ทรายหยาบและทรายละเอียดเพื่อการกรองตะกอนขนาดเล็กมากในน้ำ และให้มีความใสสะอาดมากขึ้น ซึ่งในขั้นตอนนี้ น้ำที่ผ่านการกรองจะมีความขุ่นเหลืออยู่ประมาณ 0.2-2.0 NTU และทรายกรองจะมีการล้างทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้การกรองมีประสิทธิภาพ

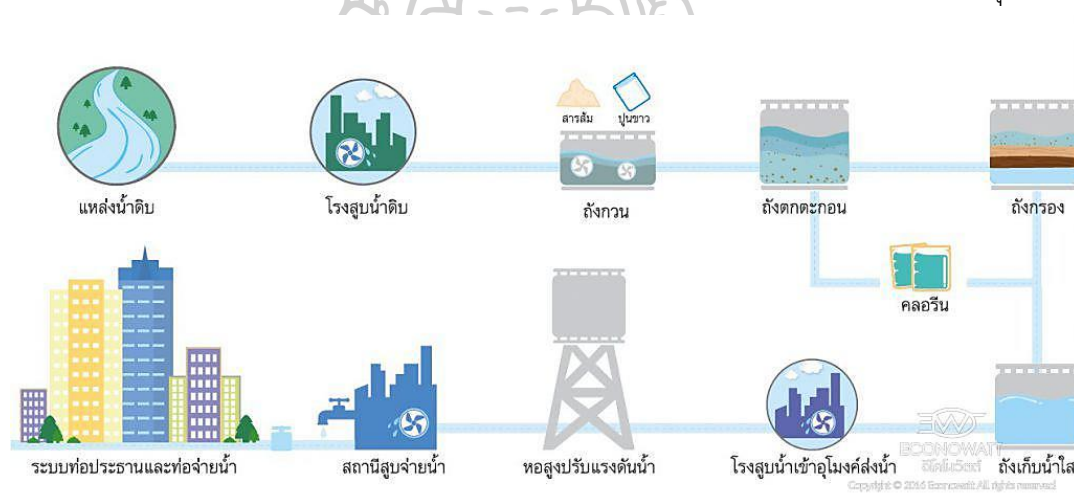


5) การฆ่าเชื้อโรค น้ำที่ผ่านการกรองแล้วอาจมีเชื้อโรคเจือปนมากับน้ำ จึงต้องทำการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้คลอรีน ซึ่งน้ำที่ได้รับการผสมคลอรีนแล้วเรียกว่า น้ำประปา สามารถนำมาใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคได้ และจะจัดเก็บไว้ในถังขนาดใหญ่ เรียกว่า ถังน้ำใส

6) การควบคุมคุณภาพน้ำประปา ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะน้ำประปาที่ทำการผลิตมาแล้วจะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพเพื่อให้ได้น้ำประปาที่ปลอดภัยสำหรับการอุปโภคบริโภค

7) การสูบน้ำ น้ำประปาที่ผลิตมาแล้วจะต้องให้บริการถึงบ้านเรือนของผู้ใช้น้ำ โดยส่งผ่านไปตามเส้นท่อ ด้วยการส่งจากหอดังสูงที่สามารถบริการได้ในพื้นที่ใกล้เคียง และในพื้นที่ที่ไกลออกไป หรือมีความสูงมากจำเป็นต้องใช้เครื่องอัดแรงดันน้ำ เพื่อให้ น้ำประปาบริการได้อย่างทั่วถึง

กระบวนการผลิตน้ำประปา ดังภาพที่ 2.7 ขั้นตอนการตกตะกอนจะมีปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจำนวนมาก ซึ่งเป็นตะกอนประปาที่นำมาใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียชุมชน



ภาพที่ 2.7 กระบวนการผลิตน้ำประปา

ที่มา: อีโคโนวิสต์ (2564)

## 2.5.2 ตะกอนประปา

ตะกอนประปาเป็นตะกอนที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างและรวมตะกอนโดยใช้สารเคมีต่างๆ ของกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยลักษณะของตะกอนประปาและการนำไปใช้ประโยชน์ มีรายละเอียดดังนี้

### 2.5.2.1 ลักษณะของตะกอนประปา

กระบวนการผลิตน้ำประปาจะมีการเติมสารเคมีเพื่อให้สารที่ปนเปื้อนในน้ำเกิดการตกตะกอน สารที่นิยมใช้ เช่น สารส้ม เพอร์ริกคลอไรด์ เพอร์ริกซัลเฟต เป็นต้น โดยจะนิยม

ใช้สารส้มกันมาก เนื่องจากมีราคาถูกกว่าสารชนิดอื่น และจากกระบวนการดังกล่าวข้างต้น ตะกอนที่เกิดขึ้นนั้นยังคงมีสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนหลงเหลืออยู่ในตะกอนประปา ดังภาพที่ 2.8 ตะกอนประปามีธาตุอาหารพืชโดยทั่วไปอยู่ในระดับปานกลางถึงดี มีประจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูง และมีไอออนส่วนเกินเหลืออยู่โดยเฉพาะอลูมิเนียมไอออนและอนุมูลคาร์บอเนต เป็นผลมาจากสารที่เติมลงในน้ำดิบเพื่อการตกตะกอน (รุ่งระวี มาจิต, คณิตา ตั้งคณานุรักษ์, และวัชรพงษ์ วาระรัมย์, 2560) ตะกอนประปามีองค์ประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 2.3 โดยองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปาต่างๆ พบว่ามีปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มากที่สุดตามลำดับ โดยตะกอนประปาที่ได้จะมีสีเทาดำ ปริมาณมวลสารมีความสม่ำเสมอ เป็นเนื้อเดียวกัน อุ่นน้ำ อีกทั้งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในเชิงอุตสาหกรรมได้ โดยจากการผลิตน้ำประปาจะเกิดตะกอนประปาที่ต้องนำไปกำจัดทิ้งในปริมาณ 350 ตันต่อวันโดยเฉลี่ย (พิมศิลป์ จันทร์ประเสริฐ, 2556)

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปา

ต.ย.	ผลการทดสอบคิดเป็นร้อยละ									
	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{MnO}$
A1	47.77	0.74	28.94	6.11	0.52	1.23	0.19	0.14	0.12	0.06
A2	41.78	0.76	37.45	7.38	1.16	4.06	0.14	1.34	-	-
A3	52.62	0.81	24.40	5.90	0.79	0.44	0.24	1.61	-	0.10

หมายเหตุ: A1 คือ ตะกอนดินจากโรงผลิตน้ำประปาธนบุรี

A2 คือ ตะกอนดินจากโรงผลิตน้ำประปamahavithai

A3 คือ ตะกอนดินจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน

ที่มา: ดวงกมล สุริยฉัตร, ภาสสันต์ วิชิตอมรพันธ์ และ วรธนะ เรืองสำเร็จ (2547)





ภาพที่ 2.8 ตะกอนประปา  
ที่มา: เคหการเกษตร (2559)

### 2.5.2.2 การนำตะกอนประปามาใช้ประโยชน์

ตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำประปาเป็นเนื้อดินเบา พองตัวเมื่อชุ่มน้ำ และขาดสารอินทรีย์ ไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการถมที่ดิน แต่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้ดังนี้ (ชัยวัฒน์ วรพิบูลพงศ์, ม.ป.ป.)

- 1) ปรับแต่งด้วยอินทรีย์สาร หรือปุ๋ยในกลุ่มปุ๋ยหมัก เพื่อเพิ่มปริมาณแร่ธาตุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช
- 2) นำมาเป็นสารเติมแต่ง (Additives) ในการปรับปรุงของเสีย ของเสียจากชุมชน หรือโรงงานน้ำตาลให้เป็นดินที่มีคุณภาพ เนื่องจากกากของเสียที่มาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน หรือโรงงานน้ำตาล จะมีปริมาณสารอินทรีย์สูงเกินไปและบางครั้งส่งกลิ่นเหม็น ซึ่งมาจากกระบวนการหมักที่ไม่สมบูรณ์ การนำตะกอนจากการผลิตน้ำประปารวมกับกากของเสียจากชุมชนหรือโรงงานน้ำตาลจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง
- 3) คุณสมบัติของตะกอนประปาที่ขาดสารกลุ่ม Fiber กากใย และขาดสารอินทรีย์ จึงมีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นเครื่องปั้นดินเผา โดยตะกอนประปานี้จะมีปริมาณมวลสารอลูมิเนียมผสมอยู่ด้วย เครื่องปั้นดินเผาที่ได้จึงมีความเฉพาะตัวของมันเอง ซึ่งจะแตกต่างจากการทำเครื่องปั้นดินเผาจากที่อื่นๆ
- 4) นำมาใช้เป็นวัสดุผสมในการทำบล็อกประสานปูพื้นผิวอ่อน และใช้สำหรับงานปูพื้นผิวทางแบบอ่อนที่มีการรับน้ำหนักไม่มากและทางเท้าทั่วไป

5) นำมาใช้เป็นวัสดุพอลิโซลันในงานด้านคอนกรีต และสามารถเพิ่มคุณภาพของอิฐมอญที่ผลิตจากตะกอนประปาโดยใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ได้แก่ เถ้าลอย หินภูเขาไฟ และปูนขาว

## 2.6 กระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี (Chemical coagulation and flocculation)

กระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี (Chemical coagulation and flocculation) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสียชุมชน สามารถกำจัดความขุ่นในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ กำจัดสีแค้นและสีปรากฏ ของแข็งแขวนลอยซึ่งส่วนใหญ่จะมีประจุลบ จึงต้องใช้สารเคมีซึ่งมีเกลือโลหะที่มีค่าประจุบวก เช่น สารส้ม สารโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นต้น เพื่อให้เกิดการจับตัวกันจนกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ง่ายขึ้น (เกียงศักดิ์ อุทมนสินโรจน์, 2541)

### 2.6.1 หลักการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี

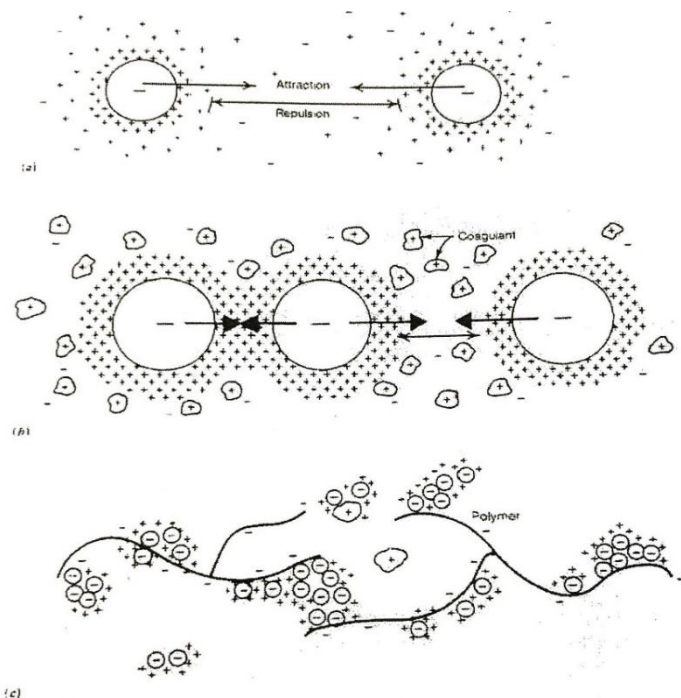
หลักการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี ประกอบด้วย 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) และกระบวนการรวมตะกอน (Flocculation) ดังภาพที่ 2.9 โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 1) กระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation)

กระบวนการสร้างตะกอน เป็นกระบวนการสร้างแกนตะกอน โดยการเติมสารเคมีที่เรียกว่า สารสร้างตะกอน (Coagulant) ซึ่งมีประจุบวก เช่น โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ หรือเฟอร์ริกคลอไรด์ลงไปในน้ำ เพื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์ในน้ำรวมตัวกันเป็นก้อน เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์โดยทั่วไปมีขนาดเล็กไม่สามารถตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วงเองได้ภายในระยะเวลาที่มีอยู่อย่างจำกัด และอนุภาคเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมีประจุลบทำให้แต่ละอนุภาคเกิดการผลักกัน ไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นจึงต้องอาศัยการเติมสารเคมีเพื่อช่วยในการสะเทินประจุที่ผิวของอนุภาคและเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งในขั้นตอนนี้ต้องอาศัยการกวนเร็ว (Rapid mixing) ด้วยเวลาสั้นๆ เพื่อช่วยให้สารเคมีสัมผัสกับคอลลอยด์ในน้ำเสีย (ชมลวรรณ ชูประจง, 2555)

#### 2) กระบวนการรวมตะกอน (Flocculation)

กระบวนการรวมตะกอน เป็นการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจากกระบวนการ Coagulation เกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่า ฟลอค (Floc) ตะกอนวุ้นนี้จะเป็นแกนกลางเพื่อให้อนุภาคต่างๆ ยึดเกาะกันทำให้เกิดการตกตะกอนที่ง่ายขึ้น ในขั้นตอนนี้ต้องอาศัยการกวนช้า (Slow mixing) ด้วยเวลานานเพื่อให้อนุภาคมีการสัมผัสกันและยึดเกาะกับฟลอค ถ้ามีการกวนที่เร็วเกินไปจะทำให้ฟลอคแตกตัวและไม่จับตัวกันเป็นก้อน



ภาพที่ 2.9 กลไกกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี

ที่มา: มัลลิกา ปัญญาคะโป (2561)

## 2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี

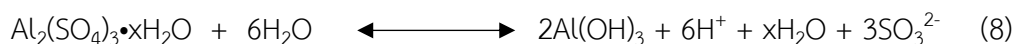
ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี ได้แก่ ชนิดและปริมาณของสาร Coagulant, ค่า pH, ความเร็วในการกวนเร็ว-กวนช้า และเวลาในการตกตะกอน มีรายละเอียดดังนี้ (อัญชลี ตันต้อย, 2556)

### 1) ชนิดและปริมาณสาร Coagulant

สาร Coagulant เป็นสารเคมีที่แตกตัวให้ประจุบวกสูง เพื่อสะเทินประจุลบที่ผิวของแข็งแขวนลอยให้รวมตัวกันและตกตะกอนเองได้ การเลือกชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีมาเป็นสาร Coagulant มักพิจารณาจากคุณสมบัติของน้ำเสีย สารที่นิยมใช้ ได้แก่ สารส้มและสารประกอบเหล็ก เช่น  $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{FeCl}_3$  เป็นต้น

### 2) ค่า pH

น้ำเสียที่มีความขุ่นและ pH สูง เป็นน้ำที่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีได้ง่าย โดยทั่วไปการใช้สารส้มเป็นสาร Coagulant จะให้ผลดีในน้ำที่มี pH อยู่ในช่วง 6.0–7.0 การใช้  $\text{FeCl}_3$  เป็นสาร Coagulant จะให้ผลดีในน้ำที่มี pH อยู่ในช่วง 5.0–7.0 นอกจากนี้การเติมสารส้มลงในน้ำจะทำให้เกิด  $\text{H}^+$  ขึ้น ดังสมการที่ (8) ทำให้ pH ของน้ำลดลง ส่งผลให้ไม่สามารถเกิดตะกอน  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ได้อีก



ตะกอนวุ้น

### 3) ความเร็วและเวลาในการกวนเร็วและกวนช้า

การสร้างตะกอน (Coagulation) ต้องทำการกวนเร็วในระยะเวลาที่สั้นเพื่อให้สารผสมกันได้ดีและเกิดการสะเทินประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ส่วนในขั้นตอนการรวมตะกอน (Flocculation) ต้องทำการกวนช้าในระยะเวลาที่ยาวนานกว่าขั้นตอนการ Coagulation เพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสะเทินได้สัมผัสและรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน หากกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีนี้มีความเร็วและเวลาในการกวนเร็วและกวนช้าที่ไม่เหมาะสมอาจเป็นสาเหตุทำให้การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคเกิดได้ไม่สมบูรณ์และทำให้ฟล็อกไม่เกาะตัวหรือแตกออกจากกัน

### 4) เวลาในการตกตะกอน

เวลาในการตกตะกอนเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี โดยฟล็อกที่ผ่านขั้นตอนการ Coagulation และขั้นตอนการ Flocculation มาแล้ว ต้องปล่อยให้ฟล็อกตกตะกอนตามระยะเวลาที่เหมาะสม

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 การบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชน

จารุวรรณ เกษมทรัพย์ (2538) ศึกษาการกำจัดฟอสเฟตจากน้ำเสียชุมชนโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยผลการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการตกตะกอนฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยอะลูมิเนียมซัลเฟตและเฟอร์รัสซัลเฟต ส่วนที่ 2 เป็นการนำผลที่ได้จากส่วนแรกมาทดสอบกับน้ำเสียจริงจากโรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลศิริราชและโรงบำบัดน้ำเสียสี่พระยา ผลการศึกษาพบว่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนด้วยอะลูมิเนียมซัลเฟต คือ 5-7 สำหรับน้ำเสียที่ฟอสเฟต 5 และ 10 mg/L และอยู่ในช่วง 4-8 สำหรับ 20 mg/L ส่วนการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตจะมีช่วง pH ที่เหมาะสม คือ 7-11 สำหรับน้ำเสีย 5 และ 10 mg/L และอยู่ในช่วง 7-9 สำหรับ 20 mg/L จากการเปรียบเทียบการตกตะกอนของสารสร้างตะกอนทั้ง 2 ชนิด พบว่าในปริมาณสารสร้างตะกอนที่เท่ากัน อะลูมิเนียมซัลเฟตมีผลทำให้ pH เปลี่ยนแปลงไปจากเริ่มต้นมากกว่าเฟอร์รัสซัลเฟต สำหรับน้ำเสียจริงจากโรงบำบัดน้ำเสียศิริราชและโรงบำบัดน้ำเสียสี่พระยาพบว่าร้อยละการกำจัดออร์โธฟอสเฟตโดยอะลูมิเนียมซัลเฟตใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้เฟอร์รัสซัลเฟต โดยมีค่าในชั้ร้อยละ 76.3-94.3 และ 72.8-97.9 สำหรับน้ำเสียก่อนและหลังผ่านการบำบัดตามลำดับ

Mohammed and Shanshool (2009) ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งด้วยสารส้มและแคลเซียมคลอไรด์ โดยปัจจัยที่ศึกษา คือ pH ความเข้มข้นของสารส้มและแคลเซียมคลอไรด์ การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยสารส้ม พบว่า มี pH ที่เหมาะสมคือ 5.7-6.0 ปริมาณสารส้ม 80 mg/L สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 83 ของฟอสฟอรัสทั้งหมด เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไม่มีผลเนื่องจากปฏิกิริยานี้ค่อนข้างเร็ว สำหรับการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม pH และปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสม คือ 60 mg/L การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยสารส้มมีประสิทธิภาพสูงกว่าการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยแคลเซียมคลอไรด์

ชัชวาทย์ รัตนพันธ์ (2548) ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้ถ้ำลอยจากเตาเผาขยะภูเก็ต ซึ่งแบ่งการทดลองเป็น 3 ตอน คือ ตอนแรกเป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสฟอรัส โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของแคลเซียม pH และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งได้ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต 5, 10, 20 mg/L และในแต่ละความเข้มข้นได้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่มี ความขุ่น และมีความขุ่น 80 NTU ในตอนที่สองเป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ้ำลอยจากเตาเผาขยะภูเก็ต และตอนที่สามนำผลที่ได้จากตอนแรกมาทดสอบน้ำเสียดิบจากโรงอาหารทะเลแช่แข็ง ผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตและน้ำเสยรวมของโรงงานมีค่าต่ำกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากน้ำดิบมีความเข้มข้นของสารเจือปนในน้ำมากกว่าน้ำเสียสังเคราะห์

Ebeling, Sibrell, Ogden and Summerfelt (2003) ศึกษาการประเมินสารที่ใช้ในการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีในการกำจัดสารแขวนลอยและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการสร้างและรวมตะกอน ได้แก่ สารส้ม และเพอร์ริกคลอไรด์ โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัด ได้แก่ ความเร็วในการกวนผสม ระยะเวลา และเวลาในการตกตะกอน พบว่า สารส้มและเพอร์ริกคลอไรด์ ที่ปริมาณ 90 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดออร์โธฟอสเฟต ร้อยละ 89 และร้อยละ 93 ตามลำดับ และสารทั้ง 2 ชนิด สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้อย่างดีจากค่า TSS เริ่มต้นที่ 100 เป็น 10 mg/L การใช้สารส้มและเพอร์ริกคลอไรด์ที่ปริมาณ 60 mg/L เหมาะสมที่สุดในการกำจัดความขุ่น สารที่ช่วยในการสร้างและรวมตะกอนทั้ง 2 ชนิด สามารถตกตะกอนได้ดี โดยจะใช้เวลาในการตกตะกอนอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเป็นเวลา 5 นาที

Velasquez, Zipa, Cevallos, Marina-Montes and Anzano (2021) ศึกษาการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี โดยการศึกษาสาร 3 ชนิด ได้แก่ เพอร์ริกซัลเฟต อลูมิเนียมซัลเฟต และเพอร์ริกคลอไรด์ ถูกรวมเข้าด้วยกันที่ความเข้มข้นต่างๆ ผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ ได้มีการนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน Anova ด้วยการ



ทดลองของ Toker พบว่า สามารถกำจัดออร์โธฟอสเฟตได้สูงสุดร้อยละ 99.04 จากนั้นได้นำมาใช้สำหรับการบำบัดน้ำจริงในโรงบำบัดน้ำ พบว่าสามารถกำจัดออร์โธฟอสเฟตได้เฉลี่ยร้อยละ 93.13

### 2.7.2 การนำตะกอนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

Maqbool (2012) ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียเทศบาล โดยใช้กากตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำ 2 แห่งคือ โรงบำบัดน้ำ Rawal และโรงบำบัดน้ำ Simli โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะสมดุล เช่น ปริมาณกากตะกอน เวลาสัมผัส pH และความเข้มข้นเริ่มต้นของ Orthophosphorus และ Condensed phosphorus ผลการศึกษาพบว่า ความสามารถในการดูดซับสูงสุด ( $Q_0$ ) ของตะกอน Simli เท่ากับ 4.5 mg/g ที่ปริมาณ 12 g/L และเวลาสัมผัส 90 นาที ที่  $25 \pm 2$  °c สำหรับ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด ( $Q_0$ ) ของตะกอน Rawal เท่ากับ 1.53 mg/g ที่ปริมาณ 30 g/L และเวลาสัมผัส 80 นาที ที่  $25 \pm 2$  °c และทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ 2 แบบ ได้แก่ Langmuir และ Freundlich พบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกากตะกอนสอดคล้องกับแบบจำลอง Langmuir adsorption isotherm ( $R^2 = 0.99$ ) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า pH มีผลต่อการดูดซับ และการกำจัดฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้น ในช่วงที่เป็นกรด (pH 4.0-5.5) การศึกษานี้สรุปได้ว่าการกำจัดฟอสฟอรัสทำได้โดยการใช้ของเสียจากกากตะกอน ซึ่งเป็นวิธีการนำทรัพยากรกลับมาใช้

อย่างคุ้มค่า และเป็นการลดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและของเสียจากกากตะกอนในปริมาณมากอีกด้วย Wei, Viadero, and Bhojappa (2008) ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากเทศบาลโดยใช้กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียจากเหมืองถ่านหิน โดยทำการศึกษาผลของ pH อุณหภูมิ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส และเวลาสัมผัสในการกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย ผลการทดลองพบว่าการดูดซับออร์โธฟอสเฟตโดยใช้กากตะกอนจากการระบายน้ำที่เป็นกรดของเหมืองถ่านหิน เป็นไปตาม Freundlich isotherm โดยศึกษาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งที่ 0.21-13.61 mg P/L พบว่ามีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 9.89-31.97 mg/g และจากการศึกษา thermodynamic ของการดูดซับ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การดูดซับฟอสฟอรัสจะเพิ่มขึ้น และจากการทดสอบกับน้ำ 3 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์ น้ำจากแม่น้ำ และน้ำทิ้งจากเทศบาล พบว่าการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากเทศบาลมีประสิทธิภาพมากถึงร้อยละ 98

Georgantas and Grigoropoulou (2005) ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียชุมชนโดยใช้กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำของ EYDAP เป็นสารช่วยในการตกตะกอน เปรียบเทียบกับสารส้ม เพอร์ริกคลอไรด์ เพอร์ริกซัลเฟต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ pH 6 โดยน้ำเสียสังเคราะห์ มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัส 10 mg P/L และไนโตรเจน 50 mg N/L ทำการทดลองด้วยเครื่อง Jar-test พบว่าสารส้มปริมาณ 15 mg/L เพอร์ริกคลอไรด์หรือเพอร์ริกซัลเฟต ปริมาณ 30 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟตได้ดีกว่า

การใช้กากตะกอนปริมาณ 75 mg/L และแคลเซียมไฮดรอกไซด์กำจัดฟอสฟอรัสได้น้อยที่สุด พบว่ากากตะกอนมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากเขตเทศบาล อีกทั้งยังสามารถกำจัดความขุ่นและ COD ได้อีกด้วย

Nair and Ahammed (2015) ศึกษาการกำจัดฟอสเฟตในน้ำทิ้งของเครื่องปฏิกรณ์แบบ UASB ที่ทำการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยกากตะกอนจากการบำบัดน้ำ โดยศึกษาปัจจัย 3 ชนิด ได้แก่ ปริมาณตะกอน, pH เริ่มต้น และปริมาณของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 6 ปริมาณตะกอนเท่ากับ 13.8 g/L และปริมาณ PACl เท่ากับ 5.8 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตได้ถึงร้อยละ 87 ซึ่งจากผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่ากากตะกอนจากการบำบัดน้ำสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นสารตกตะกอนสำหรับการกำจัดฟอสเฟตในน้ำทิ้งของเครื่องปฏิกรณ์แบบ UASB ที่ใช้บำบัดน้ำเสียจากชุมชน และถือได้ว่าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการกำจัดฟอสเฟต

รุ่งระวี มาจิต, คณิตา ตั้งคณานุรักษ์ และ วัชรพงษ์ วาระรัมย์ (2560) ศึกษาศักยภาพของตะกอนดินจากการผลิตน้ำประปาในการบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่า ตะกอนประปามีโครงสร้างที่เป็นรูพรุน มีคุณสมบัติของสารอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งองค์ประกอบนี้ทำให้มีความสามารถที่จะไปสะเทินประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์และกำจัดสารแขวนลอยในน้ำเสียได้ จึงมีการนำตะกอนประปามาบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้ตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำบางเขน ทำการทดลองด้วยเครื่องจาร์เทสต์ (Jar test) ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือใช้ปริมาณตะกอนประปา 1 g/น้ำเสีย 0.5 L, pH 7.0 เวลาทวนเร็ว 3 นาที ทวนช้า 20 นาที และเวลาดตกตะกอน 3 วัน สามารถลดความขุ่นได้ถึงร้อยละเท่ากับ 98.02 กำจัดซีโอดีเข้มข้น 50 mg/L และไนเตรทเข้มข้น 10 mg/L ได้ร้อยละ 100 กำจัดแอมโมเนียเข้มข้น 100 mg/L ได้ร้อยละ 46.78 กำจัดออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 10 mg/L ได้ร้อยละ 41.40 และสามารถลดปริมาณน้ำมันและไขมันในน้ำเสียจาก 350 เป็น 100 mg/L และเมื่อศึกษาสมบัติของตะกอนประปาที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียชุมชนแล้ว พบว่ามีปริมาณธาตุอาหารเพิ่มขึ้นและสามารถนำไปเพาะปลูกได้

Kumar and Quaff (2020) ศึกษาการบำบัดฟอสเฟตในน้ำทิ้งจากเครื่องปฏิกรณ์แบบ UASB โดยใช้ตะกอนจากการบำบัดน้ำเป็นสารตกตะกอน โดยมีการบูรณาการระบบบำบัดน้ำแบบ UASB ร่วมกับถังรวมตะกอน (Clariflocculator) ซึ่งศึกษาสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณตะกอนเวลาเก็บกัก (HRT) และ pH พบว่า สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่ คือ การบะบัดแบบระบบ UASB ร่วมกับถังรวมตะกอน (Clariflocculator) มีการใช้ปริมาณตะกอน 20 g/L เวลาเก็บกัก 7.68 hr และที่ pH 9 สามารถกำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 72.50 ในขณะที่การบำบัดน้ำผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบ UASB สามารถกำจัดฟอสเฟตได้เพียงร้อยละ 8-20 เท่านั้น ซึ่งผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าตะกอนสามารถใช้เป็นสารตกตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตได้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ภาพรวมของงานวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชน โดยการใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ตะกอนประปา และสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับตะกอนประปา ซึ่งมีการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ ปริมาณตะกอนประปา เวลาในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน โดยอาศัยกลไกการบำบัดมลสาร 2 กระบวนการ ได้แก่ 1) กระบวนการตกตะกอน (Chemical precipitation) และ 2) กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Chemical coagulation and flocculation) ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิธีการกวนเร็วเพียงขั้นตอนเดียวทำให้เกิดกระบวนการบำบัดแบบการตกตะกอน และศึกษาวิธีการกวนเร็วตามด้วยการกวนช้าทำให้เกิดกระบวนการบำบัดแบบการตกตะกอนรวมกับการสร้างและรวมตะกอน ภาพรวมการดำเนินงานวิจัย ดังภาพที่ 3.1

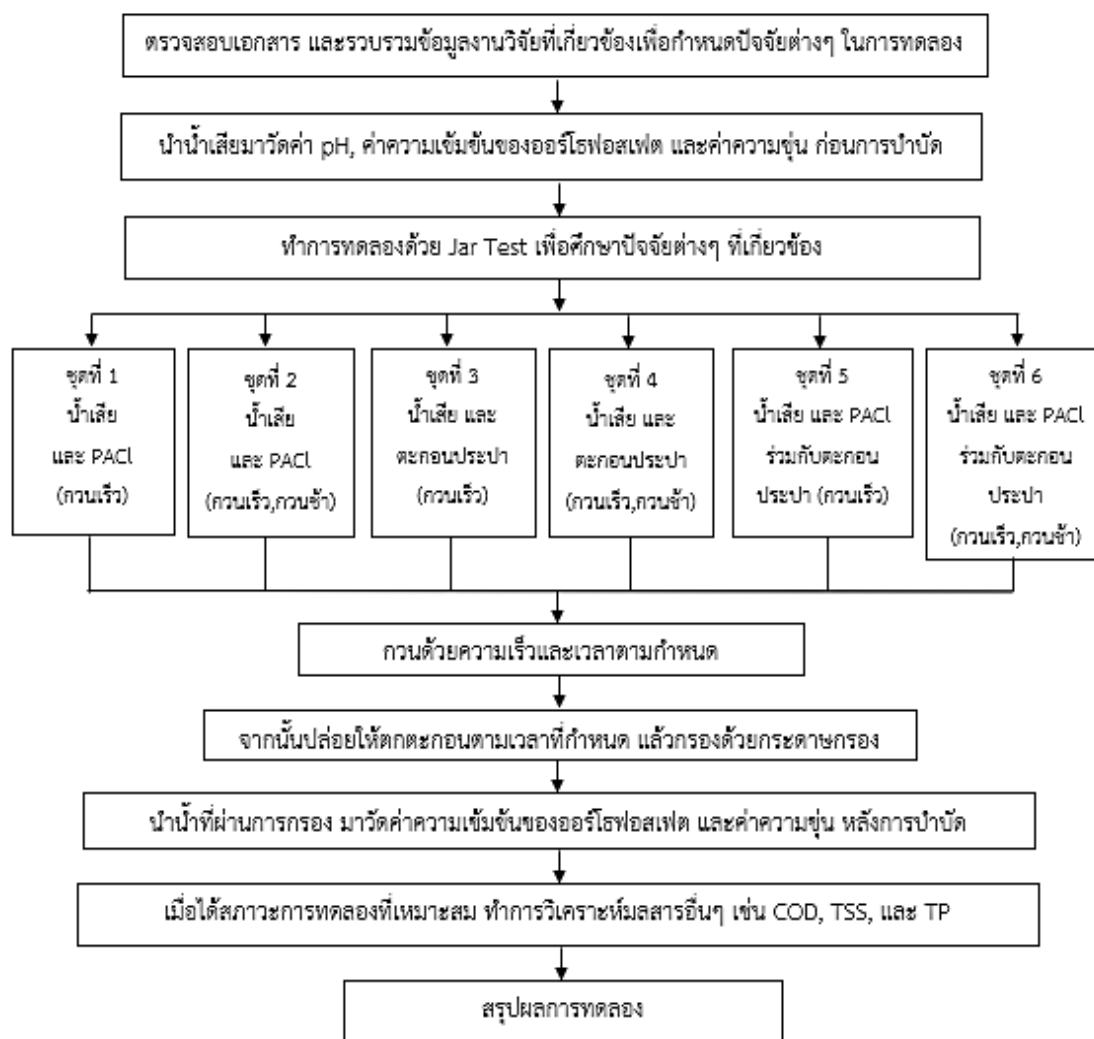
#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

##### 3.2.1 อุปกรณ์

- 1) บีกเกอร์ ขนาด 100, 250, 500 และ 1,000 ml
- 2) ขวดปรับปริมาตร ขนาด 50, 100, 250, 500 และ 1,000 ml
- 3) ขวดรูปกรวย ขนาด 250 ml
- 4) ปิเปต ขนาด 1, 2, 5, 10 และ 50 ml
- 5) ขวดเก็บสารละลาย duran ขนาด 250 และ 500 ml
- 6) ชุดกรอง Buchner
- 7) กระดาษกรอง Whatman no.42
- 8) กระจกตวง, ขวดน้ำกลั่น, หลอดหยด, แท่งแก้ว, ซ้อนตักสาร, magnetic stirrer

และลูกยาง





ภาพที่ 3.1 ภาพรวมการดำเนินงานวิจัย

### 3.2.2 เครื่องมือ

- 1) เครื่อง UV VIS Spectrophotometer, ยี่ห้อ JASCO รุ่น V-530
- 2) เครื่อง Jar Test, ยี่ห้อ VELD รุ่น JLT6
- 3) เครื่อง pH meter, ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI1271
- 4) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง, ยี่ห้อ METTLER รุ่น AB204
- 5) เครื่องวัดความขุ่น ยี่ห้อ JENWAY รุ่น 6035

### 3.3 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

#### 3.3.1 สารสร้างตะกอนและตะกอนประปาที่ใช้ในการศึกษา

##### 1) สารสร้างตะกอน

สารสร้างตะกอนที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ความเข้มข้น 10% W/V ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงผลิตน้ำประปาของเทศบาลนครนครปฐม อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

##### 2) ตะกอนประปา

ตะกอนประปาที่ใช้ในการศึกษา เป็นตะกอนที่เก็บมาจากบ่อทิ้งตะกอนของโรงผลิตน้ำประปาเทศบาลนครนครปฐม อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม ดังภาพที่ 3.3 โรงผลิตน้ำประปาของเทศบาลนครนครปฐมมีการใช้สาร PACl เป็นสารสร้างและรวมตะกอนทางเคมีจึงทำให้ตะกอนประปายังคงมีสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนหลงเหลืออยู่ งานวิจัยนี้ได้รับการเก็บตัวอย่างตะกอนประปา จำนวน 1 ครั้ง ให้เพียงพอที่จะนำมาทำการทดลองทุกการทดลอง ทั้งนี้เพื่อควบคุมปัจจัยเกี่ยวกับสมบัติของตะกอนประปาให้คงที่ จากนั้นวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณความชื้นในตะกอนประปา ซึ่งรูปแบบตะกอนประปาที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นตะกอนแบบเปียกในสภาพที่เก็บจากบ่อทิ้งตะกอน



ภาพที่ 3.3 ตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปาเทศบาลนครนครปฐม

### 3.3.2 น้ำเสียชุมชนที่ใช้ในการศึกษา

น้ำเสียชุมชนที่ใช้ในการศึกษา เป็นน้ำเสียชุมชนที่เก็บมาจากบ่อสูบน้ำเสียรวมจากกลุ่มหอพักเพชรรัตน์และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 สถานที่เก็บตัวอย่างน้ำเสียชุมชน

### 3.4 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียชุมชน

การวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชน เมื่อได้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นทำการศึกษาพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ COD, ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) โดยทุกพารามิเตอร์วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ APHA, AWWA, and WEF (2012) ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 3.1

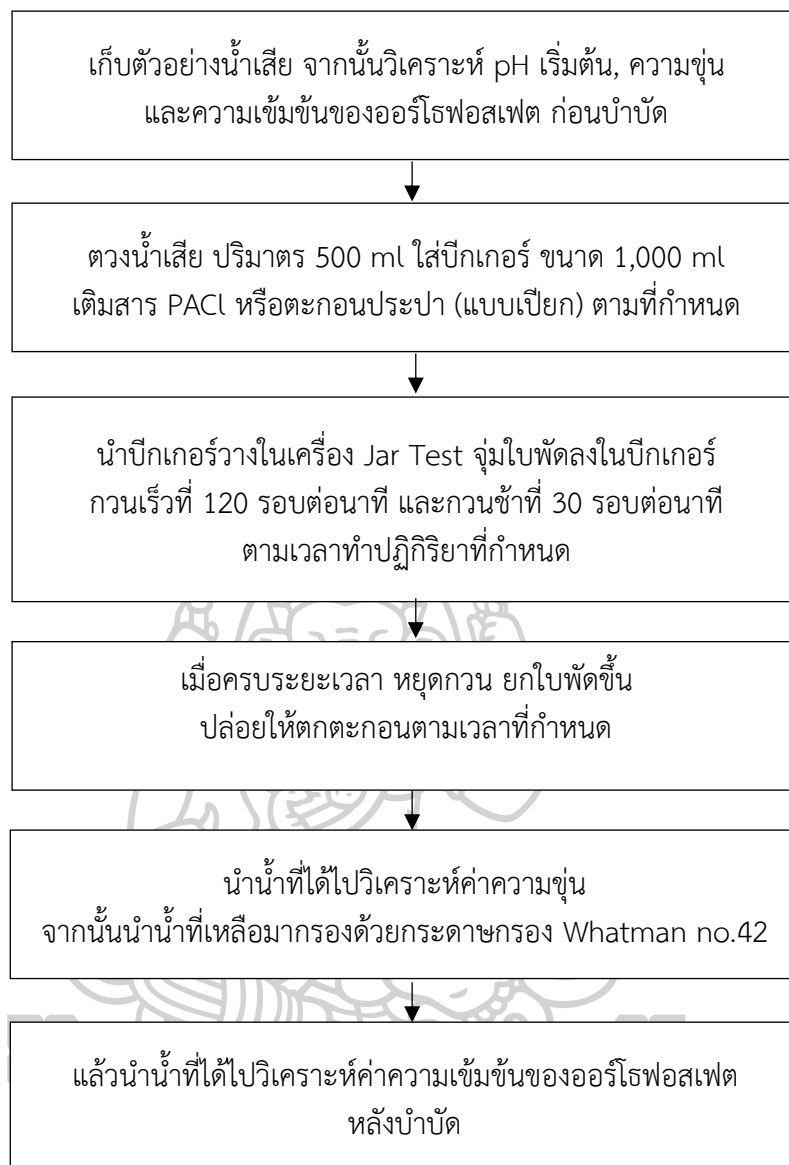
ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์หรือเครื่องมือวิเคราะห์
pH	วิเคราะห์ด้วย pH meter โดยวัดค่า pH เริ่มต้นของน้ำตัวอย่าง ก่อนบำบัด
ออร์โธฟอสเฟต (OP)	วิเคราะห์ด้วยวิธี Colorimetric โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 880 nm
ความขุ่น	วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความขุ่น โดยวัดค่าความขุ่นของน้ำตัวอย่าง ก่อนและหลังบำบัด
COD	วิเคราะห์ด้วยวิธี Closed reflux
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	วิเคราะห์โดยการกรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C แล้วทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	วิเคราะห์โดยย่อน้ำตัวอย่างด้วยกรดไนตริกและกรดซัลฟูริก จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Colorimetric โดยวัดค่าการ ดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 880 nm

ที่มา: APHA, AWWA, and WEF (2012)

### 3.5 วิธีการศึกษา

การวิจัยครั้งนี้ทำการทดลองโดยใช้สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) และตะกอนประปา เป็นสารช่วยตกตะกอนในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชน ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียตัวอย่างนั้นๆ ซึ่งจะมี pH อยู่ในช่วง 5.5 – 9.0 ตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งน้ำเสียชุมชน (ศูนย์ช่วยเหลือให้ปฏิบัติตามกฎหมายสิ่งแวดล้อม, 2565) โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียชุมชนมาวิเคราะห์ค่า pH เริ่มต้น ค่าความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟตและค่าความขุ่น (ก่อนการบำบัด) จากนั้นการทดลองด้วย Jar Test เป็น 2 แบบ ได้แก่ 1) แบบกวนเร็ว เพื่อศึกษาการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอน และ 2) แบบกวนเร็วตามด้วยการกวนช้า เพื่อศึกษาการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมกับกระบวนการสร้างและรวมตะกอน โดยมีวิธีดำเนินการทดลองดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 วิธีดำเนินการทดลอง

### 3.5.1 การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดขอบเขตของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACI)

ทำการทดลองเบื้องต้น (Pre-test) เพื่อกำหนดขอบเขตของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACI) (10-120 mg/L) และเวลาทำปฏิกิริยา (5-30 min) โดยกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm และใช้เวลาในการตกตะกอนที่ 30 min ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดขอบเขตของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

การทดลอง	ผลของ	ปริมาณน้ำเสีย (ml)	pH เริ่มต้น	ความเข้มข้น PACl (mg/L)	เวลาทำปฏิกิริยา สำหรับการกวนเร็ว 120 rpm (min)	เวลาตกตะกอน (min)
Pre1	ความเข้มข้น PACl	500	7.0	10, 20, 50, 70, 100, 120	30	30
Pre2	เวลาทำปฏิกิริยา	500	7.0	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง PT1	5, 10, 15, 20, 25, 30	30

ที่มา: Yang, Wei, Zhang, Wang, and Wang (2014)

### 3.5.2 การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดขอบเขตของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยตะกอนประปะปา

ทำการทดลองเบื้องต้น (Pre-test) เพื่อกำหนดขอบเขตของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ได้แก่ ปริมาณตะกอนประปะปา (0.5-15.0 g/L) และเวลาทำปฏิกิริยา (5-30 min) โดยกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm และใช้เวลาในการตกตะกอนที่ 30 min ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดขอบเขตของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยตะกอนประปะปา

การทดลอง	ผลของ	ปริมาณน้ำเสีย (ml)	pH เริ่มต้น	ปริมาณตะกอนประปะปา (g/L)	เวลาทำปฏิกิริยา สำหรับการกวนเร็ว 120 rpm (min)	เวลาตกตะกอน (min)
Pre3	ปริมาณตะกอนประปะปา	500	7.0	0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 15.0	30	30
Pre4	เวลาทำปฏิกิริยา	500	7.0	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง PT3	5, 10, 15, 20, 25, 30	30

ที่มา: Yang, Wei, Zhang, Wang, and Wang (2014)



### 3.5.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เวลาทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน มีรายละเอียดดังนี้

1) **การกวนเร็ว** ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) (5-120 mg/L) เวลาทำปฏิกิริยา (5-30 min) เวลาในการตกตะกอน (10-35 min) โดยทำการทดลองที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ ดังตารางที่ 3.4

2) **การกวนเร็วและกวนช้า** ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) (5-120 mg/L) เวลาทำปฏิกิริยา (5-30 min) เวลาในการตกตะกอน (10-35 min) โดยทำการทดลองที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย ทำการกวนเร็วที่ 120 rpm 1 min และกวนช้าที่ 30 rpm ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ ดังตารางที่ 3.5

### 3.5.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยตะกอนประปา

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยตะกอนประปา ได้แก่ ปริมาณตะกอนประปา เวลาทำปฏิกิริยา และเวลาตกตะกอน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) **การกวนเร็ว** ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ได้แก่ ปริมาณตะกอนประปา (1.0-35.0 g/L) เวลาทำปฏิกิริยา (5-30 min) เวลาตกตะกอน (10-35 min) โดยทำการทดลองที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ ดังตารางที่ 3.6

2) **การกวนเร็วและกวนช้า** ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ได้แก่ ปริมาณตะกอนประปา (1.0-35.0 g/L) เวลาทำปฏิกิริยา (5-30 min) เวลาตกตะกอน (10-35 min) โดยทำการทดลองที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย ทำการกวนเร็วที่ 120 rpm 1 min และกวนช้าที่ 30 rpm ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.4 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสีย  
ด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) (การกวนเร็ว)

การทดลอง	ผลของ	ปริมาตรน้ำเสีย (ml)	ความเข้มข้น PACl (mg/L)	ความเร็วการกวน (rpm)	เวลาทำปฏิกิริยา (min)	เวลาดกตะกอน (min)
P1	ความเข้มข้น PACl	500	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120	120 (a)	30	30 (b)
P2	เวลาทำปฏิกิริยา	500	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง P1	120 (a)	5, 10, 15, 20, 25, 30	30 (b)
P3	เวลาดกตะกอน	500	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง P1	120 (a)	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง P2	10, 15, 20, 25, 30, 35

ที่มา: (a) Yang, Wei, Zhang, Wang, and Wang (2014)

(b) Nair and Ahammed (2015)

ตารางที่ 3.5 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารฟลิวอูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) (การกวนเร็วและกวนช้า)

การทดลอง	ผลของ	ปริมาตรน้ำเสีย (ml)	ความเข้มข้น PACl (mg/L)	การกวนเร็ว		การกวนช้า		เวลาตกตะกอน (min)
				ความเร็ว (rpm)	เวลา (min)	ความเร็ว (rpm)	เวลา (min)	
P4	ความเข้มข้น PACl	500	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120	120	1	30 (a)	30	30 (b)
P5	เวลาทำปฏิกิริยา	500	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง P4	120	1	30 (a)	5, 10, 15, 20, 25, 30	30 (b)
P6	เวลาดตกตะกอน	500	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง P4	120	1	30 (a)	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง P5	10, 15, 20, 25, 30, 35

ที่มา: (a) Mohammed and Shanshool (2009)

(b) Nair and Ahammed (2015)

ตารางที่ 3.6 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยตะกอนประปา (การกวนเร็ว)

การทดลอง	ผลของ	ปริมาตรน้ำเสีย (ml)	ปริมาณตะกอนประปา (g/L)	ความเร็วในการกวน (rpm)	เวลาทำปฏิกิริยา (min)	เวลาตกตะกอน (min)
S1	ปริมาณตะกอนประปา	500	1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0	120 (a)	30	30 (b)
S2	เวลาทำปฏิกิริยา	500	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง S1	120 (a)	5, 10, 15, 20, 25, 30	30 (b)
S3	เวลาตกตะกอน	500	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง S1	120 (a)	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง S2	10, 15, 20, 25, 30, 35

ที่มา: (a) Yang, Wei, Zhang, Wang, and Wang (2014)

(b) Nair and Ahammed (2015)

ตารางที่ 3.7 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธพอสเฟตและความชุ่มน้ำเสียด้วยตะกอนประปา (การกวนเร็วและกวนช้า)

การทดลอง	ผลของ	ปริมาตรน้ำเสีย (ml)	ปริมาณตะกอน ประปา (g/L)	การกวนเร็ว		การกวนช้า		เวลาตกตะกอน (min)
				ความเร็ว (rpm)	เวลา (min)	ความเร็ว (rpm)	เวลา (min)	
S4	ปริมาณตะกอน ประปา	500	1.0,2.0,4.0,	120	1	30 (a)	30	30 (b)
			6.0,8.0,10.0,					
			12.0,15.0,20.0,					
			25.0,30.0,35.0					
S5	เวลาทำ ปฏิกิริยา	500	ผลที่ดีที่สุด ของการทดลอง S4	120	1	30 (a)	ผลที่ดีที่สุด ของการทดลอง S4	30 (b)
			ผลที่ดีที่สุด					
S6	เวลาตกตะกอน	500	ผลที่ดีที่สุด ของการทดลอง S4	120	1	30 (a)	ผลที่ดีที่สุด ของการทดลอง S5	10, 15, 20, 25, 30, 35

ที่มา: (a) Mohammed and Shanshool (2009)

(b) Nair and Ahammed (2015)

### 3.5.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ปริมาณตะกอนประปา เวลาทำปฏิกิริยา และเวลาดกตะกอน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) **การกวนเร็ว** ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) (10-35 mg/L) ปริมาณตะกอนประปา (5.0-10.0 g/L) เวลาทำปฏิกิริยา (5-30 min) เวลาดกตะกอน (10-35 min) โดยทำการทดลองที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm ดำเนินการทดลอง 3 ชั่วโมง ดังตารางที่ 3.8

2) **การกวนเร็วและกวนช้า** ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) (5-30 mg/L) ปริมาณตะกอนประปา (2.0-13.0 g/L) เวลาทำปฏิกิริยา (5-30 min) เวลาดกตะกอน (10-35 min) โดยทำการทดลองที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสีย ทำการกวนเร็วที่ 120 rpm 1 min และกวนช้าที่ 30 rpm ดำเนินการทดลอง 3 ชั่วโมง ดังตารางที่ 3.9

### 3.5.6 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารชนิดต่างๆ ในน้ำเสีย

เมื่อได้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมจากการศึกษาในข้อ 3.3.4 – 3.3.5 แล้ว จากนั้นนำมาศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารชนิดต่าง ๆ ได้แก่ COD, ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)



ตารางที่ 3.8 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธพอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา (การกวนเร็ว)

การทดลอง	ผลของ	ปริมาตรน้ำเสีย (ml)	ความเข้มข้น PACl (mg/L)	ปริมาณตะกอน	ความเร็วในการกวน (rpm)	เวลาทำปฏิกิริยา (min)	เวลาดกตะกอน (min)
PS1	ความเข้มข้น PACl	500	10, 15, 20, 25, 30, 35	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง S1	120 (a)	30	30 (b)
PS2	ปริมาณตะกอนประปา	500	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง PS1	5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0	120 (a)	30	30 (b)
PS3	เวลาทำปฏิกิริยา	500	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง PS1	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง PS2	120 (a)	5, 10, 15, 20, 25, 30	30 (b)
PS4	เวลาดกตะกอน	500	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง PS1	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง PS2	120 (a)	ผลที่ดีที่สุดของการทดลอง PS3	10, 15, 20, 25, 30, 35

ที่มา: (a) Yang, Wei, Zhang, Wang, and Wang (2014)

(b) Nair and Ahammed (2015)

ตารางที่ 3.9 การทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โทพอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา (การกวนเร็วและกวนช้า)

การทดลอง	ผลของ	ปริมาตร น้ำเสีย (ml)	ความเข้มข้น PACl (mg/L)	ปริมาณตะกอน ประปา (g/L)	การกวนเร็ว		การกวนช้า		เวลา ตกตะกอน (min)
					ความเร็ว (rpm)	เวลา (min)	ความเร็ว (rpm)	เวลา (min)	
PS5	ความเข้มข้น PACl	500	5, 10, 15, 20, 25, 30	ผลที่ดีที่สุด ของการทดลอง S4	120	1	30 (a)	30	30 (b)
PS6	ปริมาณ ตะกอนประปา	500	ผลที่ดีที่สุด ของการทดลอง PS5	2.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0, 13.0	120	1	30 (a)	30	30 (b)
PS7	เวลาทำ ปฏิกิริยา	500	ผลที่ดีที่สุดของ การทดลอง PS5	ผลที่ดีที่สุด ของการทดลอง PS6	120	1	30 (a)	5, 10, 15, 20, 25, 30	30 (b)
PS8	เวลาตก ตะกอน	500	ผลที่ดีที่สุด ของการทดลอง PS5	ผลที่ดีที่สุด ของการทดลอง PS6	120	1	30 (a)	ผลที่ดีที่สุด ของการ ทดลอง PS7	10, 15, 20, 25, 30, 35

ที่มา: (a) Mohammed and Shanshool (2009)

(b) Nair and Ahammed (2015)

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการกำจัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชนด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ตะกอนประปา และ สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัด ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ ปริมาณตะกอนประปา เวลาในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน

#### 4.1 ลักษณะของตะกอนประปาและน้ำเสียชุมชนที่ใช้ในการศึกษา

ตะกอนประปาที่เก็บตัวอย่างมาจากบ่อทิ้งตะกอนของโรงผลิตน้ำประปาเทศบาลนครนครปฐม อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.5 – 8.4 และความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 91.92 สำหรับน้ำเสียชุมชนที่เก็บตัวอย่างมาจากบ่อสูบน้ำเสียรวมจากกลุ่มหอพักเพชรรัตน์และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม พบว่าลักษณะของน้ำเสียก่อนการบำบัดมี pH อยู่ในช่วง 7.3 – 7.9 ความขุ่นอยู่ในช่วง 15.6 – 58.1 NTU COD อยู่ในช่วง 45.33 – 48.00 mg/L TSS อยู่ในช่วง 6.67 - 7.33 mg/L OP อยู่ในช่วง 0.71 – 1.27 mg/L และ TP อยู่ในช่วง 3.17 – 6.29 mg/L

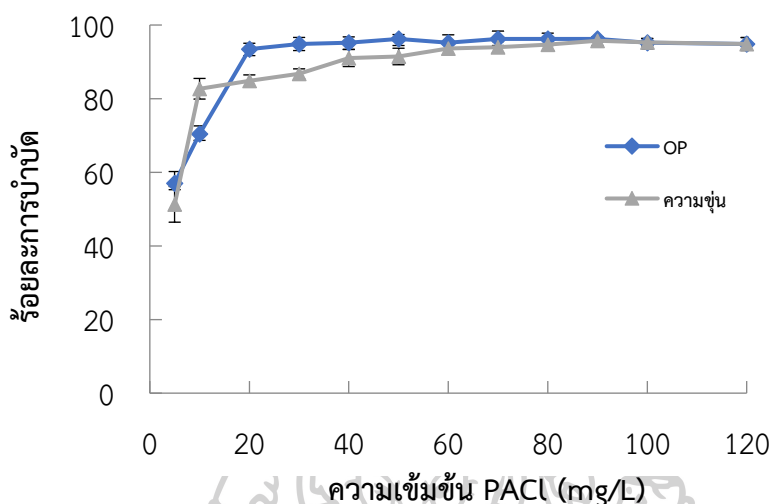
#### 4.2 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เวลาทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน มีรายละเอียดดังนี้

##### 4.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

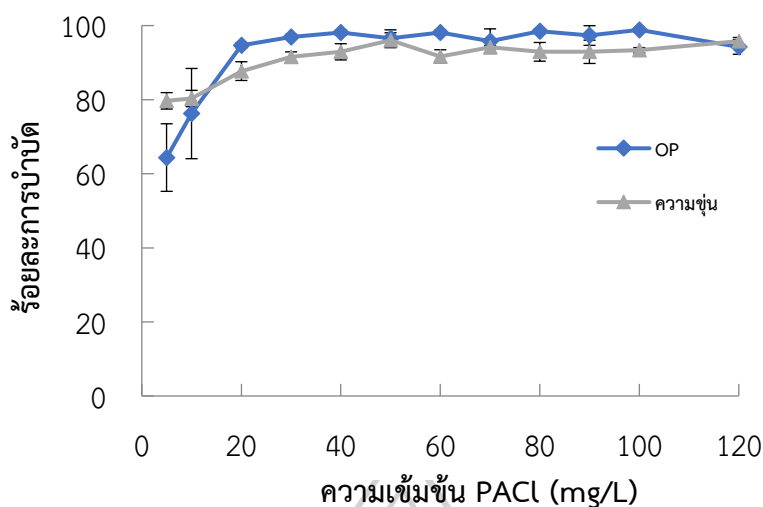
1) การกวนเร็ว ผลของความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสียที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลาทำปฏิกิริยา 30 min และเวลาตกตะกอน 30 min แสดงดังภาพที่ 4.1 เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เพิ่มขึ้นจาก 5 mg/L เป็น 40 mg/L สามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นได้เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 57.04 เป็นร้อยละ 95.19 และจากร้อยละ 51.28 เป็นร้อยละ 91.03 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นสาร PACl 40 - 120 mg/L ปฏิบัติการบำบัดจะเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าคงที่ ดังนั้นจึงเลือกใช้

ความเข้มข้นของสาร PACl ที่เหมาะสมคือ 40 mg/L ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 95.19 และบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 91.03 เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป



ภาพที่ 4.1 ผลของความเข้มข้นสาร PACl ต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm 30 min

**2) การกวนเร็วและกวนช้า** ผลของความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสียที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลา 1 min และกวนช้าที่ 30 rpm เวลา 30 min ใช้เวลาตกตะกอน 30 min แสดงดังภาพที่ 4.2 เมื่อใช้ความเข้มข้นของสาร PACl เพิ่มขึ้นจาก 5 mg/L เป็น 30 mg/L สามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นได้เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 64.37 เป็นร้อยละ 96.93 และจากร้อยละ 79.69 เป็นร้อยละ 91.56 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นของสาร PACl 30 - 120 mg/L ปฏิบัติการบำบัดจะเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าคงที่ ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของสาร PACl ที่เหมาะสมคือ 30 mg/L ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 96.93 และบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 91.56 เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป



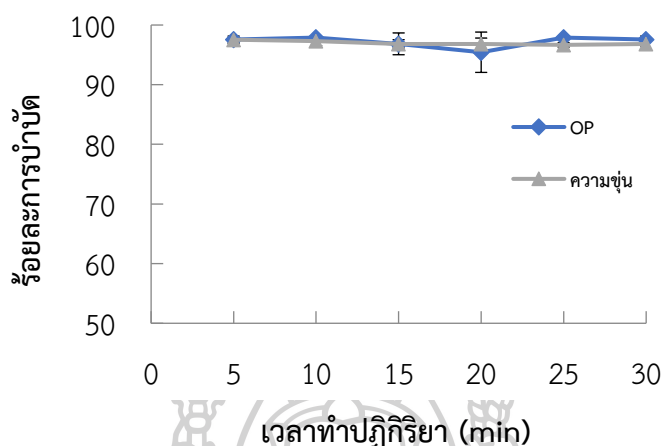
ภาพที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นสาร PACL ต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm 1 min และกวนช้า 30 rpm 30 min

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น (ภาพที่ 4.1 - 4.2) สรุปได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น พบว่าวิธีการกวนเร็ว-กวนช้า มีการใช้สาร PACL ในปริมาณที่น้อยกว่าและยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการบำบัดด้วยวิธีการกวนเร็วเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการกวนเร็ว-กวนช้า ทำให้อนุภาคสัมผัสกันมากเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ เกิดเป็นตะกอนเมือกวุ้น สามารถกวดอนุภาคขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ด้านบน ทำให้ตกตะกอนลงสู่ด้านล่างได้มากขึ้น และจากผลการทดลองทั้ง 2 วิธี พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสาร PACL มากขึ้น จะสามารถบำบัด OP และความขุ่นได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Georgantas and Grigoropoulou (2007) ที่ทำการศึกษาการบำบัดออร์โธฟอสเฟตโดยใช้สารส้มและสารอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารที่ช่วยในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตมากขึ้น

#### 4.2.2 ผลของเวลาทำปฏิกิริยา

1) การกวนเร็ว ผลของเวลาทำปฏิกิริยาในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสถานะการทดลองของน้ำเสียที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 40 mg/L และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm แสดงดังภาพที่ 4.3 พบว่าการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ที่เวลาทำปฏิกิริยา 5 - 30 min มีประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 95.44 - 97.89 และร้อยละ 96.67 - 97.53 ตามลำดับ โดยที่เวลาทำปฏิกิริยา 10 min สามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟต

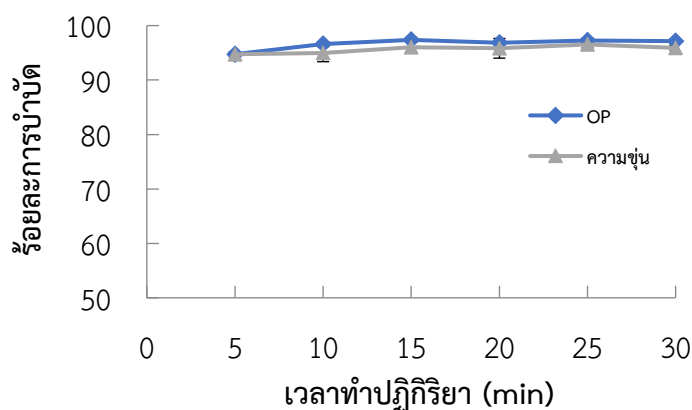
ได้สูงสุดร้อยละ 97.89 และยังสามารถบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 97.30 ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่ 10 min เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป



ภาพที่ 4.3 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ความเข้มข้น PACl 40 mg/L, pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm

**2) การกวนเร็วและกวนช้า** ผลของเวลาทำปฏิกิริยาในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสียที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 30 mg/L และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลา 1 min และกวนช้าที่ 30 rpm แสดงดังภาพที่ 4.4 พบว่าการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ที่เวลาทำปฏิกิริยา 5 - 30 min มีประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 94.75 - 97.38 และร้อยละ 94.74 - 96.53 ตามลำดับ จึงเลือกใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือเวลา 10 min เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 96.59 และสามารถบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 94.94



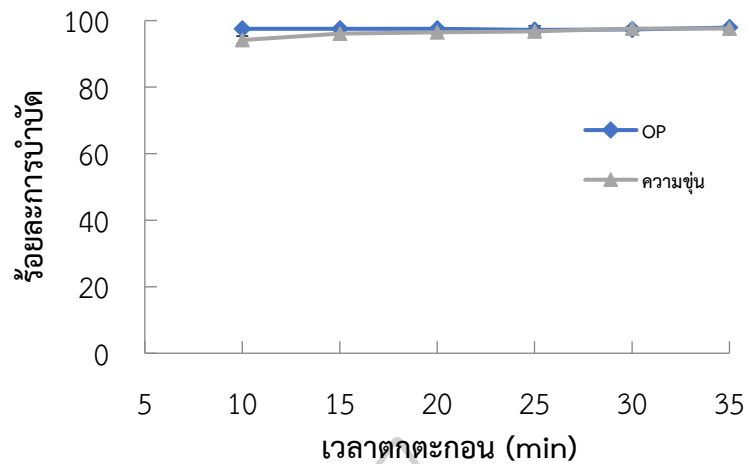


ภาพที่ 4.4 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการกำจัดออร์โทฟอสเฟตและความขุ่น  
 หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ความเข้มข้น PACl 30 mg/L, pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm  
 1 min และกวนช้า 30 rpm

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น (ภาพที่ 4.3 - 4.4) สรุปได้ว่าการบำบัดออร์โทฟอสเฟตและความขุ่นด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างๆ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง และไปในแนวทางเดียวกัน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammed and Shanshool (2009) ศึกษาการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งด้วยสารส้มและแคลเซียมคลอไรด์ พบว่าที่เวลาการทำปฏิกิริยาในช่วงแรก ความเข้มข้นของฟอสเฟตจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไอออนของฟอสเฟตและอลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) สามารถสัมผัสกันมาก และเมื่อถึงจุดสมดุลแล้วประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตจะลดลงหรือคงที่

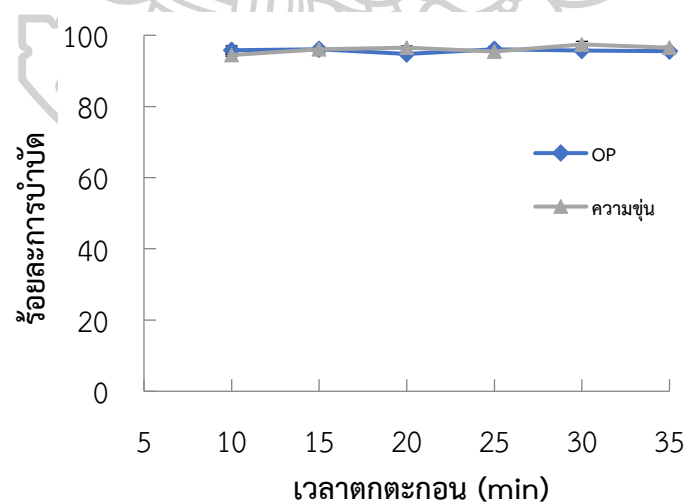
#### 4.2.3 ผลของเวลาดกตะกอน

1) การกวนเร็ว ผลของเวลาดกตะกอนในการบำบัดออร์โทฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสียที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 40 mg/L และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลาทำปฏิกิริยา 10 min แสดงดังภาพที่ 4.5 พบว่าที่เวลาดกตะกอน 10 - 35 min มีประสิทธิภาพการบำบัดออร์โทฟอสเฟตและความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 97.19 - 97.89 และร้อยละ 94.15 - 97.59 ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าเวลาดกตะกอนที่เหมาะสมคือ 15 min สามารถบำบัดออร์โทฟอสเฟตได้สูงสุดร้อยละ 97.54 และบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 96.10



ภาพที่ 4.5 ผลของเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ความเข้มข้น PACl 40 mg/L, pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm  
10 min

2) การกวนเร็วและกวนช้า ผลของเวลาตกตะกอนในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสียที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 30 mg/L และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลา 1 min กวนช้าที่ 30 rpm เวลาทำปฏิกิริยา 10 min แสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ผลของเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ความเข้มข้น PACl 30 mg/L, pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm  
1 min และกวนช้า 30 rpm 10 min

จากภาพที่ 4.6 พบว่าที่เวลาดกตะกอน 10 - 35 min มีประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 94.75 - 96.06 และร้อยละ 94.44 - 97.42 ตามลำดับ โดยเวลาดกตะกอนที่เหมาะสมคือ 15 min สามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้สูงสุดร้อยละ 96.06 และสามารถบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 96.03

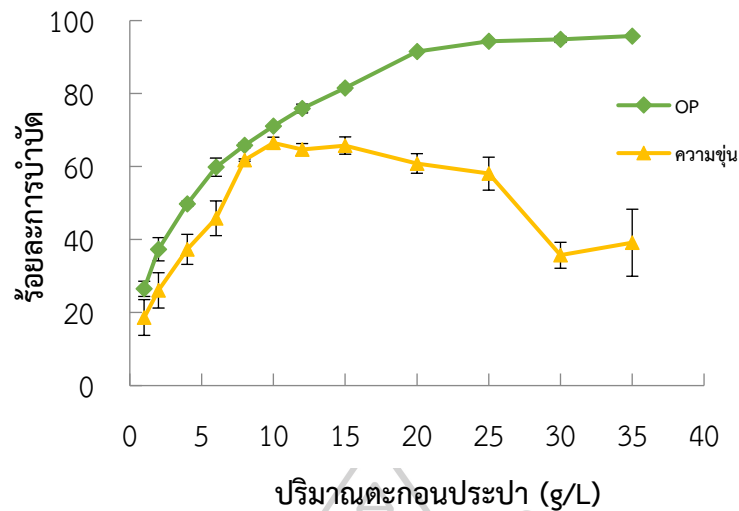
และจากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น (ภาพที่ 4.5 - 4.6) สรุปได้ว่าการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ที่เวลาในการตกตะกอนต่างๆ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง และไปในแนวทางเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ebeling, Sibrell, Ogden, and Summerfelt (2003) ที่ทำการศึกษากการบำบัดของแข็งและฟอสฟอรัสโดยใช้สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิสามารถตกลงสู่ด้านล่างได้มากขึ้น เมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสเฟตจึงมีค่าน้อยลง แต่เมื่อถึง ณ เวลาหนึ่งความเข้มข้นฟอสเฟตจะเปลี่ยนแปลงที่ละน้อยจนคงที่

#### 4.3 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสี้ยวด้วยตะกอนประปะปา

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสี้ยวด้วยตะกอนประปะปา ได้แก่ ปริมาณตะกอนประปะปา เวลาทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน มีรายละเอียดดังนี้

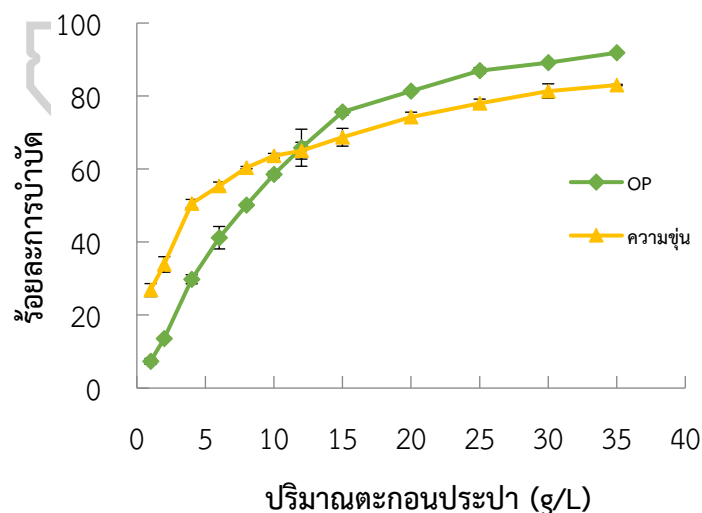
##### 4.3.1 ผลของปริมาณตะกอนประปะปา

1) การกวนเร็ว ผลของปริมาณตะกอนประปะปาในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสี้ยวที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และเวลาดกตะกอน 30 นาที แสดงดังภาพที่ 4.7 เมื่อปริมาณตะกอนประปะปาเพิ่มขึ้น จาก 1 g/L เป็น 35 g/L ความสามารถในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 26.51 เป็นร้อยละ 95.77 แต่การบำบัดความขุ่นจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนประปะปาจาก 1 g/L เป็น 10 g/L สามารถบำบัดความขุ่นได้เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 18.66 เป็นร้อยละ 66.49 และที่ปริมาณตะกอนประปะปาเพิ่มขึ้นจาก 12 g/L เป็น 35 g/L การบำบัดความขุ่นจะค่อยๆ ลดลง ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณตะกอนประปะปาที่เหมาะสม คือ 15 g/L ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 81.53 และบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 65.76 เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป



ภาพที่ 4.7 ผลของปริมาณตะกอนประปาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่ม  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm 30 min

2) การกวนเร็วและกวนช้า ผลของปริมาณตะกอนประปาในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่ม โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสียที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลา 1 min และกวนช้าที่ 30 rpm เวลา 30 min ใช้เวลาตกตะกอน 30 min แสดงดังภาพที่ 4.8



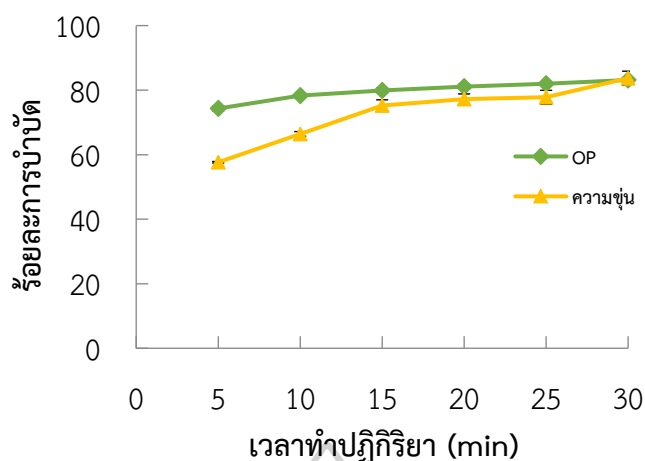
ภาพที่ 4.8 ผลของปริมาณตะกอนประปาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่ม  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm 1 min และกวนช้า 30 rpm 30 min

จากภาพที่ 4.8 พบว่า เมื่อใช้ปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้น จาก 1 g/L เป็น 35 g/L ความสามารถในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 7.32 เป็นร้อยละ 91.87 และจากร้อยละ 26.84 เป็นร้อยละ 83.01 ตามลำดับ โดยที่ปริมาณ 20 g/L ถึง 35 g/L ค่าการบำบัดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนคงที่ ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณตะกอนประปาที่เหมาะสม คือ 20 g/L เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 81.30 และบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 74.24

และจากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น (ภาพที่ 4.7 - 4.8) สรุปได้ว่า เมื่อใช้ปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้น จะสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ รุ่งระวี มาจิต, คณิตา ตังคณานุรักษ์, และวัชรพงษ์ วาระรัมย์ (2560) ที่ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้ตะกอนดิน พบว่าเมื่อปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้น จะสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้มากขึ้น เพราะตะกอนประปามีความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูง เนื่องจากสารอลูมิเนียมออกไซด์ และซิลิกา สำหรับกรณีการกวนเร็ว เมื่อปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการบำบัดความขุ่นเนื่องจากตะกอนประปามีลักษณะเป็นเลนละเอียดสีน้ำตาลซึ่งเกิดจากของแข็งแขวนลอยที่กำจัดออกจากน้ำประปา ดังนั้นเมื่อใช้ตะกอนประปาในปริมาณมากประกอบกับการกวนเร็ว จึงทำให้เลนสีน้ำตาลหลุดจากตะกอนออกมาปะปนกับน้ำเสียทำให้ความขุ่นในน้ำเสียสูงขึ้น

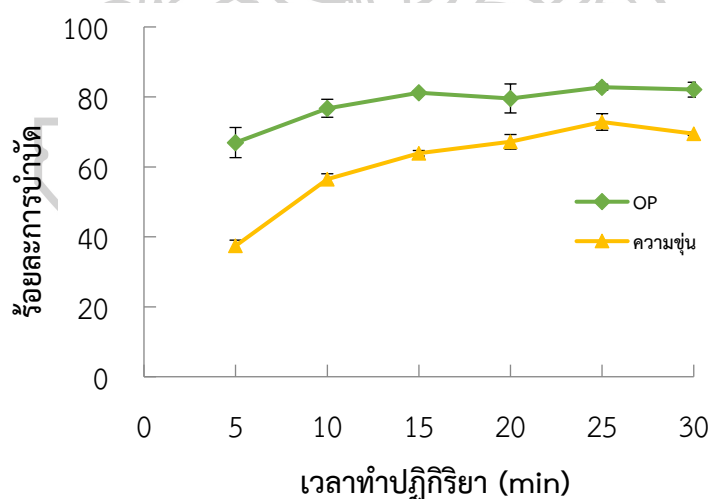
#### 4.3.2 ผลของเวลาทำปฏิกิริยา

1) การกวนเร็ว ผลของเวลาทำปฏิกิริยาในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสียที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ปริมาณตะกอนประปา 15.0 g/L และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm แสดงดังภาพที่ 4.9 พบว่าเมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาจาก 5 min เป็น 30 min การบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยตะกอนประปามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 74.30 เป็นร้อยละ 83.13 และจากร้อยละ 57.65 เป็นร้อยละ 83.69 ตามลำดับ โดยที่เวลา 5 – 15 min ความเข้มข้นของสารจะลดลงอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นเมื่อถึงจุดสมดุลจะเริ่มคงที่ ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ 20 min เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 81.12 และบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 77.18



ภาพที่ 4.9 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ปริมาณตะกอนประปา 15 g/L pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm

2) การกวนเร็วและกวนช้า ผลของเวลาทำปฏิกิริยาในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสียที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ปริมาณตะกอนประปา 20.0 g/L และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลา 1 min และกวนช้าที่ 30 rpm แสดงดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ตะกอนประปา 20 g/L pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm 1 min และกวนช้า 30 rpm

จากภาพที่ 4.10 พบว่าการบำบัดออร์โธฟอสเฟตของตะกอนประปามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 66.95 เป็นร้อยละ 82.77 เมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาจาก 5 นาที เป็น 30 นาที และสามารถ

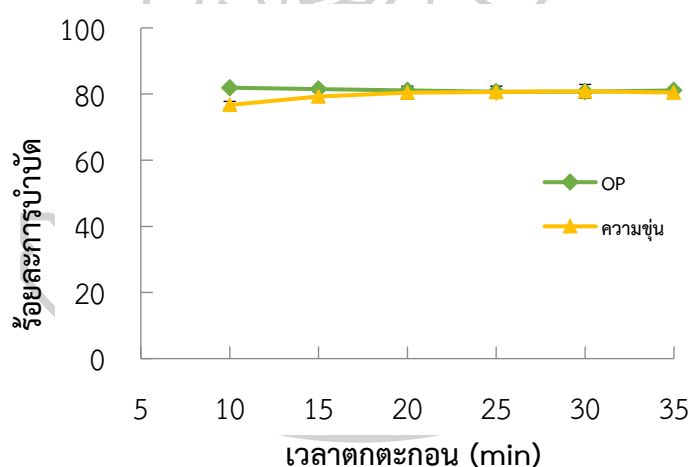


บำบัดความขุ่นได้เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 37.41 เป็นร้อยละ 72.84 ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ 15 min เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 81.23 และกำจัดความขุ่นได้ร้อยละ 63.88

และจากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น (ภาพที่ 4.9 - 4.10) สรุปได้ว่าการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยตะกอนประปา โดยวิธีการกวนเร็ว และวิธีการกวนเร็ว-กวนช้า ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างๆ มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกัน และไปในแนวทางเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Maqbool (2012) ที่ศึกษาการใช้กากตะกอนประปาในการบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียเทศบาล พบว่าที่เวลาการทำปฏิกิริยาในระยะแรก ความเข้มข้นของฟอสเฟตจะลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตจะเริ่มคงที่

#### 4.3.3 ผลของเวลาดกตะกอน

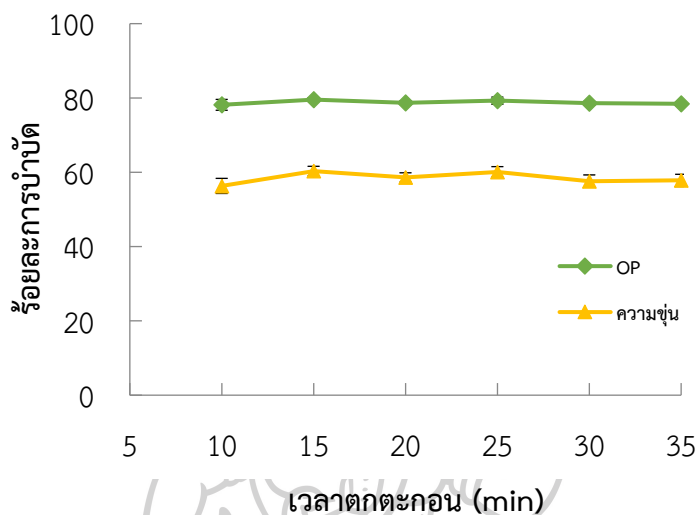
1) การกวนเร็ว ผลของเวลาดกตะกอนในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสียที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ปริมาณตะกอนประปา 15.0 g/L และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลาทำปฏิกิริยา 20 min แสดงดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 ผลของเวลาดกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ปริมาณตะกอนประปา 15 g/L pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm 20 min

จากภาพที่ 4.11 พบว่าที่เวลาดกตะกอน 10 - 35 min มีประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 80.72 - 81.93 และการบำบัดความขุ่นมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 76.71 - 80.86 โดยจะเห็นได้ว่าเวลาดกตะกอนที่เหมาะสมคือ 20 min สามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้สูงสุดร้อยละ 81.12 และสามารถบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 80.47

2) การกวนเร็วและกวนช้า ผลของเวลาตกตะกอนในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสียที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ปริมาณตะกอนประปา 20.0 g/L และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลา 1 min กวนช้าที่ 30 rpm เวลาทำปฏิกิริยา 15 min แสดงดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ผลของเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ปริมาณตะกอนประปา 20 g/L pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm  
1 min และกวนช้า 30 rpm 15 min

จากภาพที่ 4.12 พบว่าที่เวลาตกตะกอน 10 - 35 min มีประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 78.15 - 79.55 และการบำบัดความขุ่นมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 56.32 - 60.30 โดยจะเห็นได้ว่าเวลาตกตะกอนที่เหมาะสมคือ 15 min สามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้สูงสุดร้อยละ 79.55 และสามารถบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 60.30

และจากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น (ภาพที่ 4.11 - 4.12) สรุปได้ว่าการบำบัดด้วยตะกอนประปาที่เวลาในการตกตะกอนต่างๆ ประสิทธิภาพในการบำบัดไปในแนวทางเดียวกัน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ebeling, Sibrell, Ogden, and Summerfelt (2003) ที่ทำการศึกษาการบำบัดของแข็งและฟอสฟอรัสโดยใช้สารส้มและเพอร์ริกคลอไรด์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนมากขึ้น ทำให้อนุภาคสามารถตกลงสู่ด้านล่างได้มากขึ้น เมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสเฟตจึงมีค่าน้อยลง แต่เมื่อถึง ณ เวลาหนึ่ง ความเข้มข้นฟอสเฟตจะเปลี่ยนแปลงที่น้อยจนคงที่ และพบว่าการบำบัดด้วยวิธีกวนเร็ว และวิธีกวนเร็ว-กวนช้า มีค่าการบำบัดออร์โธฟอสเฟตใกล้เคียงกัน แต่การบำบัดความขุ่นด้วยวิธีการกวนเร็วมีค่ามากกว่าวิธีการกวนเร็ว-กวนช้าเพียงเล็กน้อย

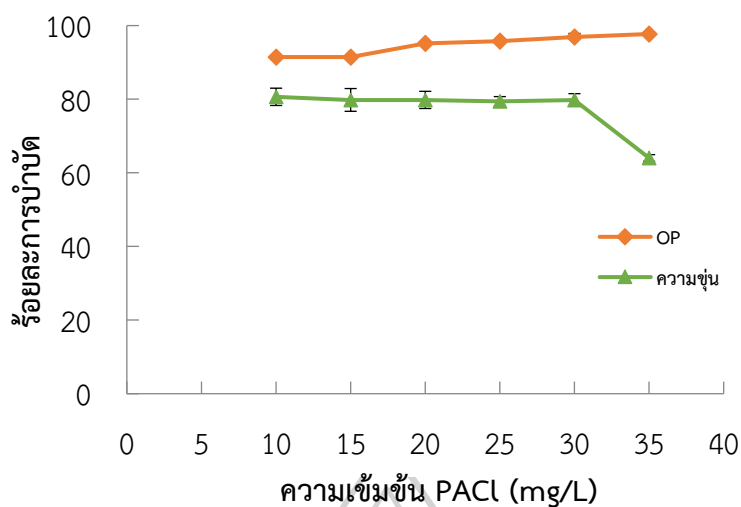
#### 4.4 ผลของปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ปริมาณตะกอนประปา เวลาทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน มีรายละเอียดดังนี้

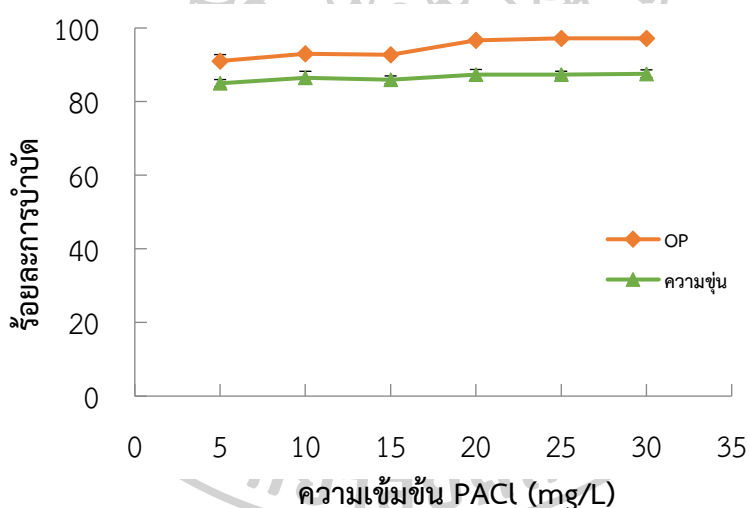
##### 4.4.1 ผลของความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

1) การกวนเร็ว ผลของความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสียด้วยที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลาทำปฏิกิริยา 30 min และเวลาดตกตะกอน 30 min โดยใช้ปริมาณตะกอนประปา 15 g/L ซึ่งได้มาจากผลการทดลองที่เหมาะสมของวิธีการกวนเร็วในข้อ 4.3.1 แสดงดังภาพที่ 4.13 ความเข้มข้นของสาร PACl ที่ 10 - 30 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตมีค่าสูงถึงร้อยละ 91.45 - 96.87 และบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 79.45 - 80.65 แต่การบำบัดความขุ่นมีแนวโน้มลดลงที่ 35 mg/L ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของ PACl ที่ 10 mg/L เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 91.45 และบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 80.65

2) การกวนเร็วและกวนช้า ผลของความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสียด้วยที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลา 1 min และกวนช้าที่ 30 rpm เวลาทำปฏิกิริยา 30 min ใช้เวลาดตกตะกอน 30 min โดยใช้ปริมาณตะกอนประปา 20 g/L ซึ่งได้มาจากผลการทดลองที่เหมาะสมของวิธีการกวนเร็วและกวนช้าในข้อ 4.3.1 แสดงดังภาพที่ 4.14 ความเข้มข้นของสาร PACl ที่ 5 - 30 mg/L ประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นมีค่าสูงและใกล้เคียงกันคือร้อยละ 91.04 - 97.20 และร้อยละ 84.98 - 87.56 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของสาร PACl ที่ 10 mg/L เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 93.00 และบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 86.50



ภาพที่ 4.13 ผลของความเข้มข้นสาร PACL ต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ตะกอนประปา 15 g/L, pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm 30 min



ภาพที่ 4.14 ผลของความเข้มข้นสาร PACL ต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ตะกอนประปา 20 g/L, pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm 1 min  
และกวนช้า 30 rpm 30 min

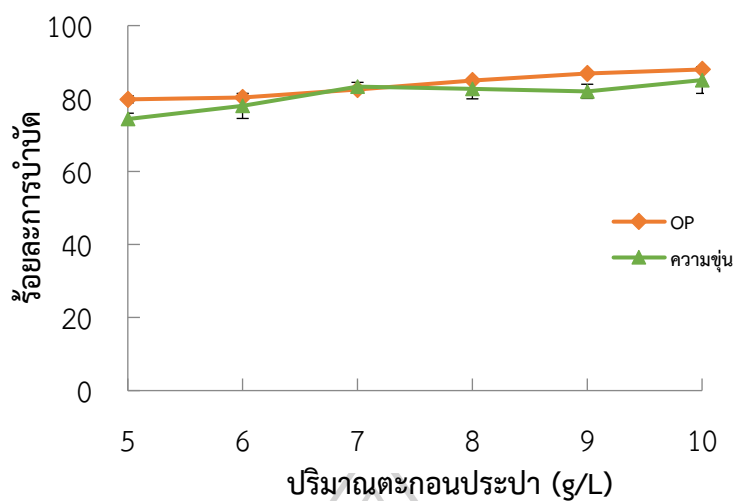
จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น (ภาพที่ 4.13 - 4.14) สรุปได้ว่าวิธีการกวนทั้ง 2 วิธี พบว่าการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ในปริมาณที่เท่ากัน โดยวิธีการกวนเร็ว-กวนช้า สามารถบำบัดได้ดีกว่าวิธีการกวนเร็วเพียงอย่างเดียว เนื่องจากวิธีการกวนเร็ว-กวนช้าเกิดกลไกการบำบัดร่วมกันระหว่างการตกตะกอนร่วมกับการสร้างและรวมตะกอน ขณะที่การกวนเร็วเกิดเพียงกลไกการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว และพบว่าการใช้สาร PACl

ร่วมกับตะกอนประปา ในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าสูง โดยที่มีการใช้สาร PACl ในปริมาณที่ลดลงมาก เมื่อเทียบกับการทดลองใช้สาร PACl เพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nair and Ahammed (2015) ที่ศึกษาการใช้สาร PACl ร่วมกับตะกอนประปาในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 87

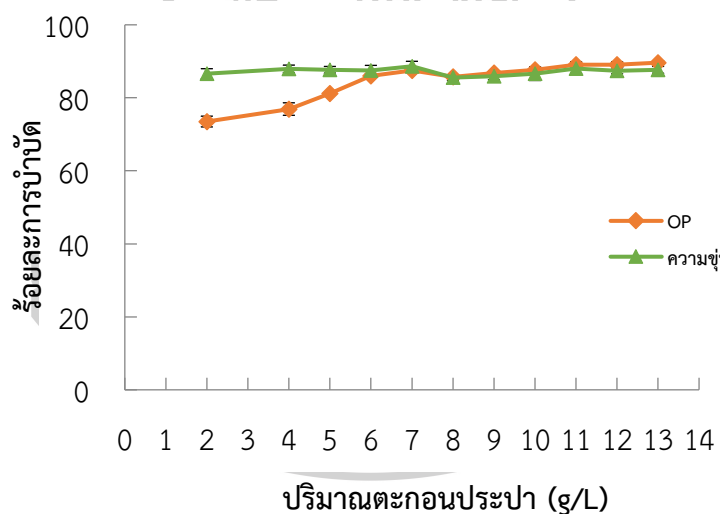
#### 4.4.2 ผลของปริมาณตะกอนประปา

1) การกวนเร็ว ผลของปริมาณตะกอนประปาในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น การทดลองนี้ได้เลือกใช้ความเข้มข้นของ PACl 10 mg/L ที่สภาวะการทดลองของน้ำเสียมี pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และเวลาตกตะกอน 30 นาที แสดงดังภาพที่ 4.15 เมื่อปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้น จาก 5 g/L เป็น 10 g/L ความสามารถในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นจะเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 79.78 เป็นร้อยละ 87.98 และจากร้อยละ 74.39 เป็นร้อยละ 85.07 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณตะกอนประปาที่เหมาะสม คือ 7 g/L ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 82.51 และบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 83.27 เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป

2) การกวนเร็วและกวนช้า ผลของปริมาณตะกอนประปาในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น การทดลองนี้ได้เลือกใช้ความเข้มข้นของ PACl 10 mg/L ที่สภาวะการทดลองของน้ำเสียมี pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลา 1 min และกวนช้าที่ 30 rpm เวลา 30 min ใช้เวลาตกตะกอน 30 min แสดงดังภาพที่ 4.16 เมื่อใช้ปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้น จาก 2 g/L เป็น 13 g/L ความสามารถในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อถึงจุดสมดุลจะเริ่มคงที่ และประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณตะกอนประปาที่เหมาะสม คือ 6 g/L ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 86.04 และบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 87.46 ตามลำดับ เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป



ภาพที่ 4.15 ผลของปริมาณตะกอนประปาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ความเข้มข้น PACl 10 mg/L, pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm 30 min



ภาพที่ 4.16 ผลของปริมาณตะกอนประปาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ความเข้มข้น PACl 10 mg/L, pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm 1 min และกวนช้า 30 rpm 30 min

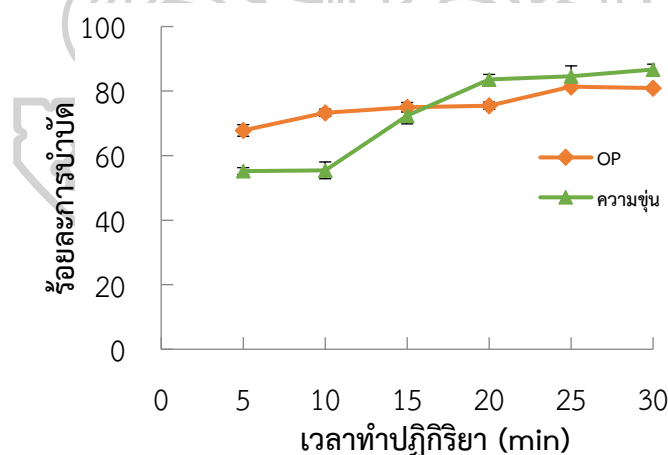
จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น (ภาพที่ 4.15 - 4.16) สรุปได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้นจะสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nair and Ahammed (2015) ที่ทำการศึกษาการใช้กากตะกอนบำบัดฟอสเฟตในน้ำทิ้งจากถัง UASB ที่บำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่าเมื่อใช้สาร PACl ร่วมกับตะกอนประปา จะช่วยเพิ่ม



ประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้มากขึ้น เนื่องจากความสามารถในการทำให้ประจุเป็นกลาง เมื่อเติมกากตะกอนในน้ำทิ้งแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนของโลหะแล้วถูกไฮโดรไลซ์ให้เป็นสารซึ่งมีประจุบวก แล้วทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตที่มีประจุลบ จึงทำให้เกิดการตกตะกอนได้ และจะเห็นได้ว่าการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยวิธีการกวนเร็วและกวนช้ามีประสิทธิภาพบำบัดได้ดีกว่าและใช้ตะกอนประปาในปริมาณที่น้อยกว่าวิธีการกวนเร็วเพียงอย่างเดียว

#### 4.4.3 ผลของเวลาทำปฏิกิริยา

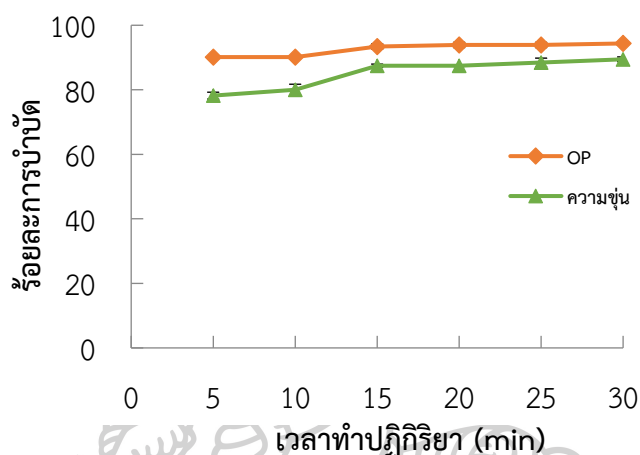
1) การกวนเร็ว ผลของเวลาทำปฏิกิริยาในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสีย pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ที่ความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 10 mg/L ร่วมกับตะกอนประปา 7 g/L และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm แสดงดังภาพที่ 4.17 เมื่อเวลาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 5 min เป็น 30 min ประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 67.81 เป็นร้อยละ 80.88 และจากร้อยละ 55.20 เป็น 86.69 ตามลำดับ โดยในช่วงแรกของปฏิกิริยาที่เวลา 5 min ความสามารถในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อถึงจุดสมดุลจะเริ่มคงที่ ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ 20 min เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 75.49 และบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 83.64



ภาพที่ 4.17 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ความเข้มข้น PACl 10 mg/L ปริมาณตะกอนประปา 7 g/L, pH = 7 ความเร็วในการกวน 120 rpm

2) การกวนเร็วและกวนช้า ผลของเวลาทำปฏิกิริยาในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสีย pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ที่ความเข้มข้นของสาร

โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 10 mg/L ร่วมกับ ปริมาณตะกอนประปา 6 g/L และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลา 1 min และกวนช้าที่ 30 rpm แสดงดังภาพที่ 4.18 พบว่าที่เวลาทำปฏิกิริยา 5 - 30 min ประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 90.14 - 94.37 และร้อยละ 78.20 - 89.45 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ 15 min เพื่อทำการทดลองในขั้นต่อไป ซึ่งสามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 93.43 และกำจัดความขุ่นได้ร้อยละ 87.48

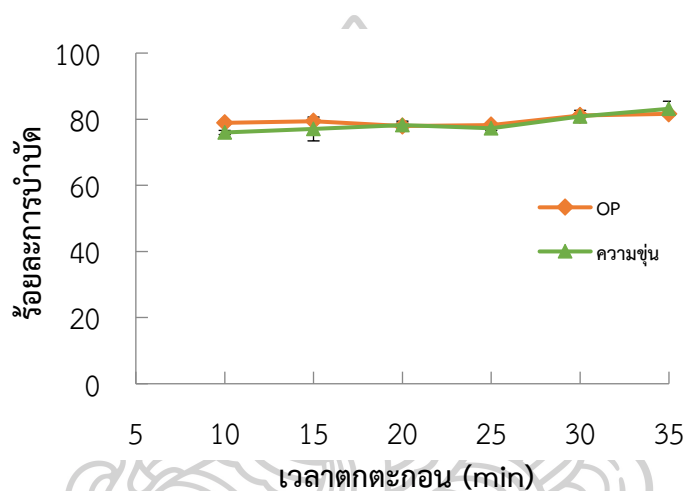


ภาพที่ 4.18 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ความเข้มข้น PACl 10 mg/L ปริมาณตะกอนประปา 6 g/L, pH = 7  
ความเร็วในการกวน 120 rpm 1 min และกวนช้า 30 rpm

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น (ภาพที่ 4.17 - 4.18) สรุปได้ว่าการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างๆ มีประสิทธิภาพในการบำบัดไปในแนวทางเดียวกัน คือในระยะแรกความเข้มข้นของสารจะลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วประสิทธิภาพในการบำบัดจะเริ่มคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammed and Shanshool (2009) ที่ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งด้วยสารส้มและแคลเซียมคลอไรด์ พบว่าเวลาการทำปฏิกิริยาในช่วงแรกความเข้มข้นของฟอสเฟตจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไอออนของฟอสเฟตและอลูมิเนียมสามารถสัมผัสกันมาก และเมื่อถึงจุดสมดุลการบำบัดฟอสเฟตจะลดลงหรือคงที่ และพบว่าการบำบัดโดยวิธีการกวนเร็วและกวนช้าที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างๆ ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่ามากกว่าการใช้วิธีการกวนเร็วเพียงอย่างเดียว

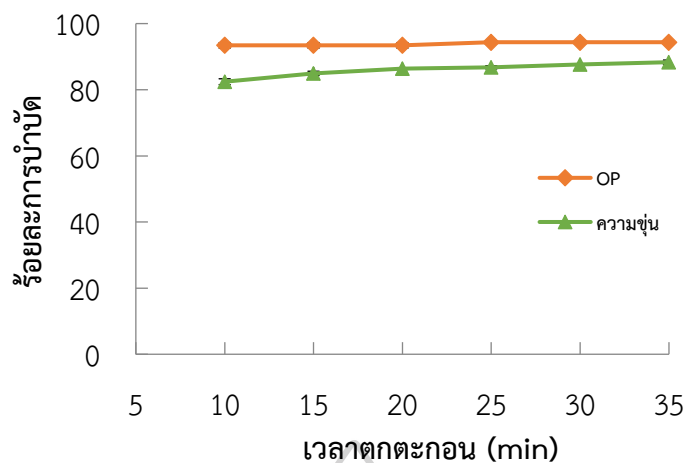
#### 4.4.4 ผลของเวลาดกตะกอน

1) การกวนเร็ว ผลของเวลาดกตะกอนในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสีย pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ที่ความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 10 mg/L ร่วมกับ ปริมาณตะกอนประปา 7 g/L และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลาทำปฏิกิริยา 20 min แสดงดังภาพที่ 4.19 ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เวลาดกตะกอน 10 - 35 min มีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะเห็นได้ว่าเวลาดกตะกอนที่เหมาะสมคือ 15 min สามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 79.41 และสามารถบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 77.05



ภาพที่ 4.19 ผลของเวลาดกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ความเข้มข้น PACl 10 mg/L ปริมาณตะกอนประปา 7 g/L, pH = 7  
ความเร็วในการกวน 120 rpm 20 min

2) การกวนเร็วและกวนช้า ผลของเวลาดกตะกอนในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น โดยมีสภาวะการทดลองของน้ำเสีย pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ที่ความเข้มข้นของสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 10 mg/L ร่วมกับ ปริมาณตะกอนประปา 6 g/L และกวนด้วยความเร็วที่ 120 rpm เวลา 1 min กวนช้าที่ 30 rpm เวลาทำปฏิกิริยา 15 min แสดงดังภาพที่ 4.20 ประสิทธิภาพในการบำบัดที่เวลาดกตะกอน 10 - 35 min มีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะเห็นได้ว่าเวลาดกตะกอนที่เหมาะสมคือ 15 min สามารถบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 93.43 และสามารถบำบัดความขุ่นได้ร้อยละ 84.95



ภาพที่ 4.20 ผลของเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น  
 หมายเหตุ ปัจจัยควบคุม ความเข้มข้น PACl 10 mg/L ปริมาณตะกอนประปา 6 g/L, pH = 7  
 ความเร็วในการกวน 120 rpm 1 min และกวนช้า 30 rpm 15 min

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น (ภาพที่ 4.19 - 4.20) สรุปได้ว่าการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา ที่เวลาในการตกตะกอนต่างๆ มีประสิทธิภาพในการบำบัดไปในแนวทางเดียวกัน พบว่าเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนมากขึ้น ทำให้อนุภาคสามารถตกลงสู่ด้านล่างได้มากขึ้น เมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสเฟตจึงมีค่าน้อยลง แต่เมื่อถึง ณ เวลาหนึ่ง ความเข้มข้นฟอสเฟตจะเปลี่ยนแปลงที่น้อยจนคงที่ และพบว่า การบำบัดโดยวิธีการกวนเร็วและกวนช้า ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่ามากกว่าการใช้วิธีการกวนเร็วเพียงอย่างเดียว

#### 4.5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสีย

ผลการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชนของ 3 การทดลอง ได้แก่ สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ตะกอนประปา และสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา แสดงดังตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสีย สรุปได้ดังนี้ 1) สภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) คือ การใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 30 mg/L ที่เวลาทำปฏิกิริยา 10 min และเวลาตกตะกอน 15 min โดยวิธีการกวนเร็วและกวนช้า ซึ่งอาศัยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับกระบวนการตกตะกอนทางเคมี จะเห็นได้ว่า นอกจากบำบัดออร์โธฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังสามารถบำบัดความขุ่นได้ดีอีกด้วย 2) สภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยตะกอนประปา คือ การใช้ปริมาณตะกอนประปา

15 g/L ที่เวลาทำปฏิกิริยา 20 min และเวลาตกตะกอน 20 min โดยวิธีการกวนเร็วอาศัยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และ 3) สภาพะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา คือ การใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 10 mg/L ร่วมกับตะกอนประปา 6 g/L เวลาทำปฏิกิริยา 15 min และเวลาตกตะกอน 15 min โดยวิธีการกวนเร็วและกวนช้า ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี จากทั้ง 3 สภาพะการทดลองเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดร่วมกับการใช้สารเคมี สรุปได้ว่าการใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปาเป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับสถานะอื่น เนื่องจากมีการใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) และปริมาณตะกอนประปาในปริมาณน้อยลง แต่ยังมีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นสูง ซึ่งจะเป็นการประหยัดค่าสารเคมีและลดค่าใช้จ่ายในการนำตะกอนไปกำจัดด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nair and Ahammed (2015) ที่ได้มีการศึกษาการบำบัดฟอสเฟตในน้ำทิ้งชุมชน โดยใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่ปริมาณ 40 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตสูง และมีการบำบัดโดยใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับตะกอน พบว่าสามารถกำจัดออร์โธฟอสเฟตได้ร้อยละ 87 ซึ่งมีการใช้สารในปริมาณที่ลดลง คือ 5.8 mg/L และ 13.8 g/L ตามลำดับ แต่ยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง

โดยจะเห็นได้ว่าการใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับปริมาณตะกอนประปามีการใช้สารในปริมาณลดลงถึง 3 เท่า เมื่อเทียบกับการใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เพียงอย่างเดียว และเมื่อมีการคำนวณค่าใช้จ่ายของการใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น จากสภาพะการทดลองที่เหมาะสม ดังสมการที่ (9) โดย 1,000,000 คือตัวแปลงหน่วย สำหรับแปลงหน่วยมิลลิกรัมเป็นตันและลิตรเป็นลูกบาศก์เมตร (อมรรัตน์ วงษ์กลม และณัด ษณะฉัตรชัยรัตน์, 2561) และพบว่าราคาสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ตามท้องตลาดใน ปริมาณ 1 kg เท่ากับ 14 บาท ดังนั้นในปริมาณ 1 ตัน จะมีราคาเท่ากับ 14,000 บาท (Jeadsada Enterprise Ltd., Part., 2022)

$$\text{ค่าใช้จ่ายสารเคมี} = \frac{(\text{ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม} \times \text{ราคาสารเคมี})}{1,000,000} \quad (9)$$

(บาท/m<sup>3</sup> น้ำเสีย)                                      (mg/L)                                      (บาท/ตัน)

1) สภาพะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ที่เหมาะสม คือ 30 mg/L คำนวณค่าใช้จ่ายจากสมการข้างต้นได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{ค่าใช้จ่ายสารเคมี} &= (30 \text{ mg/L} \times 14,000 \text{ บาท/ตัน}) / 1,000,000 \\ &= 0.42 \text{ บาท/m}^3\end{aligned}$$

2) สภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ที่เหมาะสม คือ 10 mg/L คำนวณค่าใช้จ่ายจากสมการข้างต้นได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{ค่าใช้จ่ายสารเคมี} &= (10 \text{ mg/L} \times 14,000 \text{ บาท/ตัน}) / 1,000,000 \\ &= 0.14 \text{ บาท/m}^3\end{aligned}$$

จากการคำนวณพบว่าการบำบัดด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 0.42 บาท/m<sup>3</sup> และการบำบัดด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา มีค่าใช้จ่ายของสาร 0.14 บาท/m<sup>3</sup> ซึ่งพบว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ 0.28 บาท/m<sup>3</sup> ของน้ำเสียที่ทำการบำบัด

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสีย

วัสดุที่ใช้	วิธีการ	ความเข้มข้น PACl	ปริมาณตะกอนประปา	เวลาทำปฏิกิริยา	เวลาตกตะกอน	บำบัด OP	บำบัดความขุ่น
PACl	กวนเร็ว กวนช้า	30 mg/L	-	10 min	15 min	96.06%	96.03%
ตะกอนประปา	กวนเร็ว	-	15 g/L	20 min	20 min	81.12%	80.47%
PACl & ตะกอนประปา	กวนเร็ว กวนช้า	10 mg/L	6 g/L	15 min	15 min	93.43%	84.95%

#### 4.6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารชนิดต่างๆ ในน้ำเสีย

ผลการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ตะกอนประปา และสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา ดังตารางที่ 4.1 เมื่อนำมาศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารชนิดต่างๆ ในน้ำเสีย พบว่าสามารถบำบัดค่า COD, ของแข็งแขวนลอย (TSS), และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ได้อีกด้วย ดังตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารชนิดต่างๆ ที่เหลืออยู่หลังการบำบัดเป็นไปตามค่ามาตรฐานของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2553 และสอดคล้องกับงานวิจัย



ของ Nair and Ahammed (2015) ที่ได้มีการศึกษาการใช้กากตะกอนในการบำบัดมลสารในน้ำทิ้งชุมชน ได้แก่ การบำบัด TSS, BOD และ COD ได้ร้อยละ 80, 67 และ 61 ตามลำดับ และงานวิจัยของ Guan, Chen and Shang (2005) ที่ศึกษาการใช้ตะกอนประปาบำบัดมลสารในน้ำเสีย ได้แก่ การบำบัดของ TSS และ COD ได้ร้อยละ 20 และ 15 ตามลำดับ โดยตะกอนประปาที่ผ่านการบำบัดมลสารในน้ำเสียมาแล้วนั้น พบว่าปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ในตะกอนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น สามารถนำไปใช้ในการเพาะปลูก ซึ่งจะช่วยให้ลดการใช้ปุ๋ยได้ (รุ่งระวี มาจิต, คณิตา ตังคณานุรักษ์, และ วัชรพงษ์ วาระรัมย์, 2560)

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารชนิดต่างๆ ในน้ำเสีย

พารามิเตอร์	*ค่ามาตรฐาน	คุณภาพน้ำก่อนบำบัด	สาร PACI		ตะกอนประปา		สาร PACI ร่วมกับตะกอนประปา	
			คุณภาพน้ำหลังบำบัด	% บำบัด	คุณภาพน้ำหลังบำบัด	% บำบัด	คุณภาพน้ำหลังบำบัด	% บำบัด
COD (mg/L)	-	48.00	10.67	77.78	34.67	27.78	4.62	72.22
TSS (mg/L)	≤ 30	7.33	3.33	54.55	4.67	36.36	2.00	72.73
TP (mg/L)	≤ 2	6.29	0.29	90.96	0.19	93.90	0.07	97.90

ที่มา: \*ศูนย์ช่วยเหลือให้ปฏิบัติตามกฎหมายสิ่งแวดล้อม (2565)



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

น้ำเสียชุมชนเกิดจากกิจกรรมในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ที่อยู่อาศัยในชุมชน ได้แก่ น้ำทิ้งจากการประกอบอาหาร น้ำทิ้งจากการชำระล้างสิ่งสกปรกในครัวเรือนและอาคารประเภทต่างๆ ทำให้น้ำทิ้งที่เกิดขึ้นมีการปนเปื้อนของฟอสฟอรัสลงไปในแหล่งน้ำในปริมาณที่สูง จึงก่อให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ในแหล่งน้ำ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยเติมสารเคมีที่เป็นเกลือโลหะที่มีค่าประจุตรงข้ามเพื่อจับกับฟอสเฟตที่ละลายน้ำแล้วทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งสารเคมีที่นิยมนำมาใช้ เช่น สารส้ม สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ หรือสารเพอร์ริคคลอไรด์

ตะกอนประปาที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำประปา จะมีธาตุอาหารพืชอยู่ในระดับปานกลางถึงดี มีประจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูง เป็นผลมาจากสารเคมีที่เติมลงในน้ำดิบเพื่อให้เกิดการตกตะกอน และองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปามีปริมาณของซิลิกาและอลูมิเนียมมากที่สุด งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการนำสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) และตะกอนประปามาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชน ระหว่างการใช้สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ตะกอนประปา และสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา รวมทั้งศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น ได้แก่ ความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ปริมาณตะกอนประปา เวลาในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน เพื่อให้ได้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัด จากนั้นทำการศึกษาการบำบัดมลสารชนิดอื่นๆ ในน้ำเสียชุมชน ได้แก่ COD ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid, TSS) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus, TP)

ผลการศึกษาพบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่

1) การใช้สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ที่ความเข้มข้น 30 mg/L เวลาทำปฏิกิริยา 10 min และเวลาตกตะกอน 15 min โดยวิธีการกวนเร็วและกวนช้า ซึ่งอาศัยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับกระบวนการตกตะกอนทางเคมี มีประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นได้ร้อยละ 96.06 และ 96.03 ตามลำดับ

2) การใช้สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา ที่ความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) 10 mg/L ร่วมกับตะกอนประปา 6 g/L เวลาทำปฏิกิริยา 15 min และเวลาตกตะกอน 15 min โดยวิธีการกวนเร็วและกวนช้า ซึ่งอาศัยกระบวนการสร้างและ

รวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี มีประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นได้ร้อยละ 93.43 และ 84.95 ตามลำดับ และ

3) การใช้ตะกอนประปา ที่ปริมาณ 15 g/L เวลาทำปฏิกิริยา 20 min และเวลาตกตะกอน 20 min โดยวิธีการกวนเร็ว อาศัยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี มีประสิทธิภาพในการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นได้ร้อยละ 81.12 และ 80.47 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดร่วมกับการใช้สารเคมี สรุปได้ว่าการใช้สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปาเป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งพบว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายได้การใช้สารเคมีเหลือเพียง 1 ใน 3 เมื่อเทียบกับการบำบัดโดยใช้สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เพียงชนิดเดียว คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลง 0.28 บาท/m<sup>3</sup> น้ำเสีย

นอกจากการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นแล้ว ผลการวิจัยยังพบว่าการใช้สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) และตะกอนประปา ยังสามารถบำบัดค่า COD ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ในน้ำเสียได้ตามค่ามาตรฐานของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2553 ด้วย งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าตะกอนประปาสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียได้ ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของตะกอนประปาและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนอีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรวิเคราะห์ปริมาณความขุ่น และองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปา เช่น ปริมาณอลูมิเนียม เหล็ก ซิลิกา แคลเซียม และ แมกนีเซียม เป็นต้น ก่อนจะนำมาใช้บำบัดน้ำเสียทุกครั้ง เพื่อให้ทราบถึงลักษณะของตะกอนประปาที่ใช้ในแต่ละครั้งเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นจากลักษณะของตะกอนประปา และเพื่อนำข้อมูลเหล่านี้มาอธิบายผลการทดลองได้ละเอียดมากขึ้น

2) ควรวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปาทั้งก่อนและหลังการนำไปบำบัดน้ำเสีย เพื่อนำข้อมูลไปอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิภาพการบำบัด และการนำตะกอนประปาไปใช้ประโยชน์ภายหลังการบำบัดน้ำเสีย

3) ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการบำบัดมลสารชนิดอื่นในน้ำเสียชุมชนด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ และตะกอนประปา นอกเหนือจากที่ทำการศึกษา ได้แก่ การบำบัด BOD ไนโตรเจนทั้งหมด น้ำมันและไขมัน เพื่อให้ครอบคลุมถึงมลสารที่มีอยู่ในน้ำเสียชุมชน

4) ควรทำการทดลองในระดับ pilot scale เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์จริง

## รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2560). **คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน**. กรุงเทพฯ: สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2563). **ระบบบำบัดน้ำเสีย**. เข้าถึงได้จาก <https://www.pcd.go.th/waters/> ระบบบำบัดน้ำเสีย
- กฤษดา ทองนาค. (2555). "การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในระบบประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน กรณีตัวอย่างแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- การประปาส่วนภูมิภาค. (2563). **ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ของการประปาส่วนภูมิภาค**. เข้าถึงได้จาก <https://www.pwa.co.th/contents/service/treatment>
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2541). **วิศวกรรมประปา (Water Supply Engineering)**. กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์.
- เคหการเกษตร. (2559). **ลดต้นทุนวัสดุปลูกด้วยตะกอนประปา**. เข้าถึงได้จาก [https://www.keha-kaset.com/articles\\_details.php?view\\_item=261](https://www.keha-kaset.com/articles_details.php?view_item=261)
- จารุวรรณ เกษมทรัพย์. (2538). "การกำจัดฟอสเฟตจากน้ำเสียชุมชนโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชัยวัฒน์ วรพิบูลพงศ์. (ม.ป.ป.). **โครงการแนวคิด การทำวิจัยการใช้ตะกอนจากการผลิตน้ำประปาให้เป็นประโยชน์ในทางเศรษฐกิจ**. เข้าถึงได้จาก [https://www.mwa.co.th/ewt\\_dl\\_link.php?nid=469](https://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=469)
- ชีระวิทย์ รัตนพันธ์. (2548). "การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้เถ้าลอยจากเตาเผาขยะภูเก็ต." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ดวงกมล สุริยฉัตร, ภาสสันต์ วิชิตอมรพันธ์ และวรรณนะ เรืองสำเร็จ. (2547). **การประยุกต์ใช้ตะกอนดินจากน้ำประปา**. กรุงเทพฯ: สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- ธมลวรรณ ชูประจง. (2555). "การนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปาล้อมกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นสารช่วยสร้างตะกอนและลดการใช้ปริมาณสารส้ม." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นรุตต์ม สหนาวิน และจิราวรรณ ตอฤทธิ์. (2555). "ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน EUTROPHICATION." **วารสารคณะพลศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**, 15, ธันวาคม: 154-159.

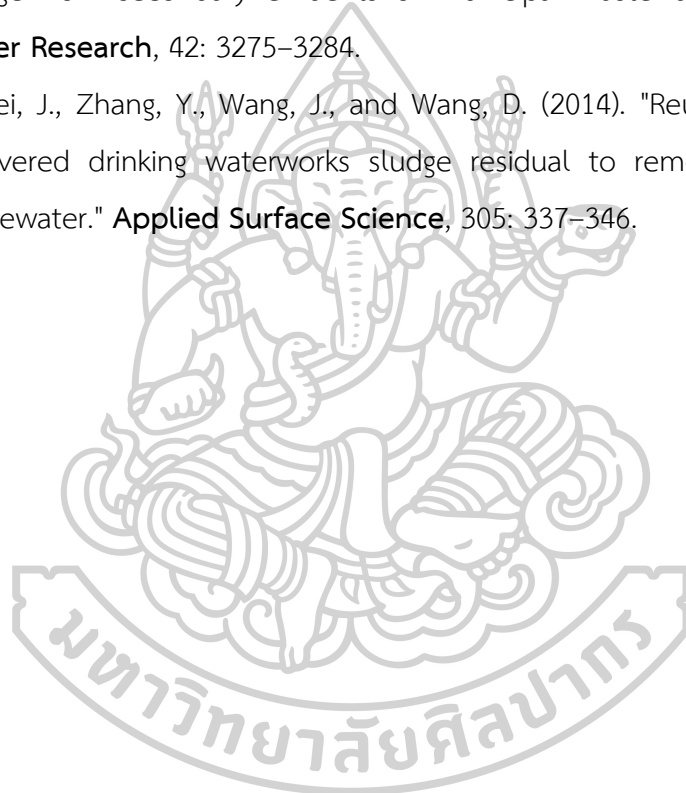
- ปฎิพาภย์ ปุ่นอุดม และไพบูลย์ กลมกล่อม. (2559). "การจัดการของเสียจากการล้างหมึกออฟเซตลิธอกราฟี." สาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- พิมพ์ศิลป์ จันทรประเสริฐ. (2556). "การศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- มัลลิกา ปัญญาคะโป. (2561). **การบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี**. นครปฐม: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ยาโก๊ะ ขาเริ่มดาเบะ. (2553). "การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยซีโอไซด์ธรรมชาติ." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- รุ่งระวี มาจิต, คณิตา ตั้งคณานุรักษ์ และวัชรพงษ์ วาระรัมย์. (2560). "ศึกษาภาพของตะกอนดินจากการผลิตน้ำประปาในการบำบัดน้ำเสียชุมชน." **วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย**, 31, 3: 45-56.
- วสันต์ ธีระพิทยานนท์. (2556). **ผลกระทบของฟอสฟอรัสต่อสิ่งแวดล้อม**. เข้าถึงได้จาก <http://www.dss.go.th/images/st-article/pep-12-2556-impact-envi.pdf>
- ศูนย์ช่วยเหลือให้ปฏิบัติตามกฎหมายสิ่งแวดล้อม. (2565). **กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบน้ำเสยรวมของชุมชน**. เข้าถึงได้จาก <http://cac.pcd.go.th/index.php/our-services/knowledgebased-law/2017-08-08-03-37-21/268-2535-43>
- เสาวภา ยอดสูงเนิน. (2553). "การนำกลับฟอสเฟต โดยใช้โครมาโทกราฟีแบบแลกเปลี่ยนไอออนและการตกตะกอนทางเคมี." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- อมรรัตน์ วงษ์กลม และณัด ณะฉัตรชัยรัตน์. (2561). "การกำจัดความขุ่นและสารคาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายน้ำด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน กรณีศึกษาระบบการผลิตน้ำประปาตำบลทรายมูล อำเภอพิบูลมังสาหาร จังหวัดอุบลราชธานี." **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 23, 2: 1188-1198.
- อัญชลี ต้นดู่. (2556). "การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเคมีภัณฑ์ดูแลรถยนต์ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีและกระบวนการออกซิเดชันทางเคมี." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อีโคโนวัตต์. (2564). **น้ำประปา (Tap water)**. เข้าถึงได้จาก <https://econowatt.co.th/tap-water-th/>
- APHA, A., and WEF. (2012). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22<sup>nd</sup> ed. Washington, DC: American Public Health Association.



- Ebeling, J. A., Sibrell, P. L., Ogden, S. R., and Summerfelt, S. T. (2003). "Evaluation of chemical coagulation-flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge." **Aquacultural Engineering**, 29: 23-42.
- Georgantas, D. A., and Grigoropoulou, H. P. (2005). "Phosphorus removal from synthetic and municipal wastewater using spent alum sludge." **Water Science & Technology**, 52: 525-532.
- Georgantas, D. A., and Grigoropoulou, H. P. (2007). "Orthophosphate and metaphosphate removal from aqueous solution using alum and aluminum hydroxide." **Journal of Colloid and Interface Science**, 1: 70-79.
- Guan, X. H., Chen, G. H., and Shang, C. (2005). "Re-use of water treatment works sludge to enhance particulate pollutant removal from sewage." **Water Research**, 39: 3433-3440.
- Jeadsada Enterprise Ltd., P. (2022). **PAC SOLUTION 10%**. Available from <https://www.jdd-group.com/product-services/item/65-pac-solution>
- Kumar, S., and Quaff, A. R. (2020). "Treatment of domestic wastewater containing phosphate using water treatment sludge through UASB-clariflocculator integrated system." **Environment, Development and Sustainability**, 22: 4537-4550.
- Maqbool Nida. (2012). "Reuse of alum sludge for phosphorus removal from municipal wastewater." Master's thesis, National University of Sciences and Technology (NUST).
- Metcalf and Eddy. (2003). **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill.
- Mohammed, S. A. M., and Shanshool, H. A. (2009). "Phosphorus Removal from Water and Waste Water by Chemical Precipitation Using Alum and Calcium Chloride." **Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering**, 10, 2: 35-42.
- Nair, A. T., and Ahammed, M. M. (2015). "Water treatment sludge for phosphate removal from the effluent of UASB reactor treating municipal wastewater." **Process Safety And Environmental Protection**, 94: 105-112.



- Siam Asia Chemical Industry Co., L. (2019). **Polyaluminium chloride**. Available from <http://www.pacsiam.com/index.aspx?pid=4d494d68-593b-406b-b417-74223a08db0d>
- Velasquez, A. I., Zipa, A. K., Cevallos, S. D., Marina-Montes, C., and Anzano, J. M. (2021). "Precipitation of orthophosphate in a wastewater treatment plant." **Water, Air, & Soil Pollution**, 232: 126.
- Wei, X., Jr., V., R.C., and Bhojappa, S. (2008). "Phosphorus removal by acid mine drainage sludge from secondary effluents of municipal wastewater treatment plants." **Water Research**, 42: 3275–3284.
- Yang, L., Wei, J., Zhang, Y., Wang, J., and Wang, D. (2014). "Reuse of acid coagulant-recovered drinking waterworks sludge residual to remove phosphorus from wastewater." **Applied Surface Science**, 305: 337–346.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์การบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACU)

ตารางที่ ก.1 ร้อยละการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความเข้มข้นของสาร PACI ที่ความเข้มข้นของสาร PACI ต่างๆ

ความเข้มข้น PACI (mg/L)	การกวนเร็ว						การกวนเร็ว-กวนช้า					
	ร้อยละการบำบัดออร์โธฟอสเฟต		ร้อยละการบำบัดความขุ่น		ร้อยละการบำบัดออร์โธฟอสเฟต		ร้อยละการบำบัดออร์โธฟอสเฟต		ร้อยละการบำบัดความขุ่น		ร้อยละการบำบัดออร์โธฟอสเฟต	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5	57.04	3.15	51.28	4.84	64.37	9.12	79.69	2.21				
10	70.45	2.15	82.69	2.79	76.25	12.18	80.31	2.21				
20	93.47	1.57	84.83	1.61	94.64	0.66	87.71	2.53				
30	94.85	1.79	86.75	1.33	96.93	0.66	91.56	1.33				
40	95.19	1.57	91.03	2.31	98.08	0.66	92.92	2.19				
50	96.22	1.19	91.45	2.25	96.55	2.30	96.04	2.01				
60	95.19	2.15	93.59	1.70	98.08	0.66	91.67	1.80				
70	96.22	2.15	94.02	1.48	95.79	3.32	94.17	0.36				
80	96.22	1.57	94.66	1.61	98.47	0.66	92.92	2.53				
90	96.22	0.60	95.73	0.37	97.32	2.65	92.92	3.15				
100	95.19	1.19	95.30	0.98	98.85	0.00	93.33	0.72				
120	94.85	1.79	94.87	1.70	94.25	1.99	95.83	0.95				

ตารางที่ ก.2 ร้อยละการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยสาร PACl ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

เวลาทำ ปฏิกิริยา (min)	การกวนเร็ว				การกวนเร็ว-กวนช้า			
	ร้อยละการบำบัดออร์โธ		ร้อยละการบำบัดความ ขุ่น		ร้อยละการบำบัดออร์โธ		ร้อยละการบำบัดความ ขุ่น	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5	97.54	0.61	97.53	0.36	94.75	0.45	94.74	0.45
10	97.89	0.00	97.30	0.78	96.59	0.45	94.94	1.57
15	96.84	1.82	96.84	0.70	97.38	0.45	96.03	0.96
20	95.44	3.38	96.84	0.98	96.85	0.00	95.83	1.81
25	97.89	0.00	96.67	0.36	97.11	0.45	96.53	0.62
30	97.54	0.61	96.84	0.36	97.11	0.45	95.93	0.45

ตารางที่ ก.3 ร้อยละการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยสาร PACI ที่เวลาตกตะกอนต่างๆ

เวลาตกตะกอน (min)	การกวนเร็ว						การกวนเร็ว-กวนช้า					
	ร้อยละการบำบัดออร์โธ			ร้อยละการบำบัดความขุ่น			ร้อยละการบำบัดออร์โธ			ร้อยละการบำบัดความขุ่น		
	ค่าเฉลี่ย	SD	ฟอสเฟต	ค่าเฉลี่ย	SD	ฟอสเฟต	ค่าเฉลี่ย	SD	ฟอสเฟต	ค่าเฉลี่ย	SD	ฟอสเฟต
10	97.54	0.61		94.15	1.20		95.80	1.20		94.44	0.34	
15	97.54	0.61		96.10	0.20		96.06	0.00		96.03	0.75	
20	97.54	0.61		96.50	0.50		94.75	0.45		96.53	0.45	
25	97.19	1.22		96.79	0.10		96.06	0.00		95.44	1.37	
30	97.54	0.61		97.59	0.62		95.80	0.45		97.42	0.86	
35	97.89	0.00		97.59	0.69		95.54	0.45		96.53	0.34	





ตารางที่ ข.1 ร้อยละการบำบัดออกซิเจนละลายและค่าความเข้มข้นด้วยตะกอนประปา ที่ปริมาณตะกอนประปาต่างๆ

ปริมาณตะกอน ประปา (g/L)	การกวนเร็ว						การกวนเร็ว-กวนช้า					
	ร้อยละการบำบัดออกซิเจนละลาย			ร้อยละการบำบัดความขุ่น			ร้อยละการบำบัดออกซิเจนละลาย			ร้อยละการบำบัดความขุ่น		
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	26.51	2.09	18.66	4.90	7.32	0.81	26.84	1.79				
2	37.35	3.19	26.09	4.83	13.55	0.47	33.87	2.11				
4	49.80	0.70	37.32	4.12	29.81	1.24	50.54	1.14				
6	59.84	2.51	45.83	4.75	41.19	3.08	55.41	1.04				
8	65.86	0.70	61.78	0.31	50.14	0.47	60.39	0.32				
10	71.08	0.00	66.49	1.57	58.54	0.81	63.64	0.65				
12	75.90	1.20	64.67	1.63	65.85	5.08	65.04	2.30				
15	81.53	0.70	65.76	2.37	75.61	0.81	68.72	2.44				
20	91.55	0.00	60.86	2.69	81.30	0.00	74.24	1.35				
25	94.37	0.00	58.06	4.52	86.99	0.81	78.03	1.14				
30	94.84	0.81	35.70	3.55	89.16	0.47	81.39	1.96				
35	95.77	0.00	39.14	9.18	91.87	0.00	83.01	0.19				

ตารางที่ ข.2 ร้อยละการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มด้วยตะกอนประปา ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

เวลาทำ ปฏิกิริยา (min)	การกวนเร็ว						การกวนเร็ว-กวนช้า					
	ร้อยละการบำบัดออร์โธ ฟอสเฟต			ร้อยละการบำบัดความ ชุ่ม			ร้อยละการบำบัดออร์โธ ฟอสเฟต			ร้อยละการบำบัดความ ชุ่ม		
	ค่าเฉลี่ย	SD		ค่าเฉลี่ย	SD		ค่าเฉลี่ย	SD		ค่าเฉลี่ย	SD	
5	74.30	0.70		57.65	0.24		66.95	4.31		37.41	1.64	
10	78.31	0.00		66.43	0.72		76.75	2.57		56.52	1.50	
15	79.92	0.70		75.22	1.77		81.23	0.49		63.88	0.79	
20	81.12	0.70		77.18	1.63		79.55	4.15		67.16	2.09	
25	81.93	0.00		77.80	2.14		82.35	0.84		72.84	2.37	
30	83.13	0.00		83.69	2.19		82.07	2.11		69.45	0.46	

ตารางที่ ข.3 ร้อยละการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มด้วยตะกอนประปาศา ที่เวลาตกตะกอนต่างๆ

เวลาตกตะกอน (min)	การกวนเร็ว						การกวนเร็ว-กวนช้า				
	ร้อยละการบำบัดออร์โธ			ร้อยละการบำบัดความ			ร้อยละการบำบัดออร์โธ		ร้อยละการบำบัดความ		
	ฟอสเฟต		SD	ชุ่ม		SD	ฟอสเฟต		ชุ่ม		
	ค่าเฉลี่ย			ค่าเฉลี่ย			ค่าเฉลี่ย		ค่าเฉลี่ย		
10	81.93		0.00	76.71		1.08	78.15		56.32		2.03
15	81.53		0.70	79.29		1.47	79.55		60.30		1.30
20	81.12		0.70	80.47		1.93	78.71		58.61		1.24
25	80.72		0.00	80.63		1.78	79.27		60.10		1.41
30	80.72		0.00	80.86		2.06	78.43		57.61		1.66
35	81.12		0.70	80.47		0.82	78.43		57.81		1.64



ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์การบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความชุ่มด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACU)

ร่วมกับตะกอนประปา

ตารางที่ ค.1 ร้อยละการบำบัดออร์โธพอสเฟตและความเข้มข้นด้วยสารฟอสฟอริเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับตะกอนประปา ที่สารฟอสฟอริเนียมคลอไรด์ (PACl) ต่างๆ

ความเข้มข้น PACl (mg/L)	การกวนเร็ว						การกวนเร็ว-กวนช้า			
	ร้อยละการบำบัดออร์โธพอสเฟต		ร้อยละการบำบัดความขุ่น		ร้อยละการบำบัดออร์โธพอสเฟต		ร้อยละการบำบัดออร์โธพอสเฟต		ร้อยละการบำบัดความขุ่น	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
5	-	-	-	-	91.04	1.75	84.98	1.02		
10	91.45	0.00	80.65	2.35	93.00	0.49	86.50	1.74		
15	91.45	0.00	79.81	3.09	92.72	0.49	85.92	1.06		
20	95.16	0.49	79.81	2.33	96.64	0.00	87.32	1.41		
25	95.73	0.00	79.45	1.26	97.20	0.49	87.32	0.93		
30	96.87	0.99	79.81	1.69	97.20	0.49	87.56	1.08		
35	97.72	0.49	64.04	0.90	-	-	-	-		



ตารางที่ ค.2 ร้อยละการบำบัดต่อไวรัสเอดส์และความรุนแรงด้วยตัวสารโพลีอิมูโนโคมเพลกซ์ (PACI) ร่วมกับตะกอนประปา ที่ปริมาณตะกอนประปาต่างๆ

ปริมาณตะกอน ประปา (g/L)	การกวนเร็ว						การกวนเร็ว-กวนช้า							
	ร้อยละการบำบัดต่อไวรัสเอดส์		ร้อยละการบำบัดความขุ่น		ร้อยละการบำบัดต่อไวรัสเอดส์		ร้อยละการบำบัดต่อไวรัสเอดส์		ร้อยละการบำบัดความขุ่น		ร้อยละการบำบัดต่อไวรัสเอดส์			
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD		
2	-	-	-	-	73.50	1.48	86.62	1.36	-	-	73.50	1.48	86.62	1.36
4	-	-	-	-	76.92	1.71	87.93	1.03	-	-	76.92	1.71	87.93	1.03
5	79.78	0.95	74.39	1.61	81.20	0.00	87.69	0.90	-	-	81.20	0.00	87.69	0.90
6	80.33	0.00	77.99	3.43	86.04	0.49	87.46	1.43	-	-	86.04	0.49	87.46	1.43
7	82.51	0.47	83.27	1.18	87.46	0.49	88.65	1.36	-	-	87.46	0.49	88.65	1.36
8	84.97	0.47	82.63	2.70	85.75	0.49	85.54	0.75	-	-	85.75	0.49	85.54	0.75
9	86.89	0.00	81.98	1.94	86.83	0.49	85.92	0.93	-	-	86.83	0.49	85.92	0.93
10	87.98	0.47	85.07	3.65	87.68	0.49	86.62	1.86	-	-	87.68	0.49	86.62	1.86
11	-	-	-	-	89.08	0.84	88.03	1.27	-	-	89.08	0.84	88.03	1.27
12	-	-	-	-	89.08	0.84	87.44	0.89	-	-	89.08	0.84	87.44	0.89
13	-	-	-	-	89.64	0.49	87.68	0.93	-	-	89.64	0.49	87.68	0.93

ตารางที่ ค.3 ร้อยละการบำบัดออร์โธพอสเฟตและความชุ่มชื้นด้วยสารโพแตสเซียมคลอไรด์ (PAC) ร่วมกับตะกอนประปา ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

เวลาทำ ปฏิกิริยา (min)	การกวนเร็ว						การกวนเร็ว-กวนช้า					
	ร้อยละการบำบัดออร์โธ			ร้อยละการบำบัดความ			ร้อยละการบำบัดออร์โธ			ร้อยละการบำบัดความ		
	ฟอสเฟต		SD	ฟอสเฟต		SD	ฟอสเฟต		SD	ฟอสเฟต		SD
5	ค่าเฉลี่ย	67.81	1.78	ค่าเฉลี่ย	55.20	1.08	ค่าเฉลี่ย	90.14	0.00	ค่าเฉลี่ย	78.20	1.06
10		73.28	1.12		55.43	2.60		90.14	0.00		80.03	1.71
15		75.00	1.47		72.41	2.57		93.43	0.81		87.48	0.49
20		75.49	1.12		83.64	1.53		93.90	0.81		87.48	0.24
25		81.37	0.42		84.62	3.19		93.90	0.81		88.47	1.36
30		80.88	0.74		86.69	1.65		94.37	0.00		89.45	0.73

ตารางที่ ค.4 ร้อยละการบำบัดออร์โธพอสเฟตและความชุ่มชื้นด้วยสารฟอสฟอริคในนิคมคลองไทร (PACI) ร่วมกับตะกอนประปา ที่เวลาดักตะกอนต่างๆ

เวลาดักตะกอน (min)	การกวนเร็ว				การกวนเร็ว-กวนช้า			
	ร้อยละการบำบัดออร์โธ ฟอสเฟต		ร้อยละการบำบัดความ ชุ่ม		ร้อยละการบำบัดออร์โธ ฟอสเฟต		ร้อยละการบำบัดความ ชุ่ม	
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
10	78.92	0.49	75.99	0.62	93.43	0.81	82.42	0.88
15	79.41	0.00	77.05	3.61	93.43	0.81	84.95	0.64
20	77.94	1.47	78.27	0.56	93.43	0.81	86.36	0.24
25	78.19	0.42	77.29	0.63	94.37	0.00	86.78	0.49
30	81.13	0.42	80.83	1.84	94.37	0.00	87.62	0.24
35	81.62	0.00	83.15	2.29	94.37	0.00	88.33	0.64

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

สุนันท์ ทันสมัย

วุฒิการศึกษา

พ.ศ. 2560 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี  
สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศิลปากร (เกียรตินิยมอันดับ 2)  
พ.ศ. 2561 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท  
สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยศิลปากร

