

การบำบัดกรดน้ำส้มในน้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร  
โดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน



สุริพร ช่างทองแก่ง

การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองเสนอเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

พฤษภาคม 2555

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

อาจารย์ที่ปรึกษาและคณบดีวิทยาลัยการศึกษาคณะศึกษาศาสตร์  
ด้วยตนเอง เรื่อง “การบำบัดกรดน้ำส้มในน้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร โดย  
กระบวนการโคแอกกูเลชัน” เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมของมหาวิทยาลัยพะเยา


.....  
(ดร.เนติยา กรีธาชาติ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ นพรัก)

คณบดีวิทยาลัยการศึกษาคณะศึกษาศาสตร์

พฤษภาคม 2555



## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากอาจารย์ ดร.เนติยา กรีธาชาติ อาจารย์ที่ปรึกษา และคณาจารย์จากวิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยาทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง จนการศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองสำเร็จสมบูรณ์ได้ ผู้ศึกษาค้นคว้า ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยพะเยาที่สนับสนุนทุนวิจัยผ่านงบประมาณรายได้ ประจำปี 2553 และขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม (School of Energy and Environment ; SEEN) มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัทแอกโกร-ออน (ไทยแลนด์) จำกัด จังหวัดพะเยา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บข้อมูลและตัวอย่างน้ำเสีย เพื่อใช้ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ และเหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน อย่างดีที่สุดเสมอมา

คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขออุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่องานบำบัดน้ำเสียในประเทศ และผู้ที่สนใจบ้างไม่มากก็น้อย

สุริพร ช่างทองแก่ง

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การบำบัดกรดน้ำส้มในน้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร โดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน
<b>ผู้ศึกษาค้นคว้า</b>	สุริพร ช่างทองเก่ง
<b>ที่ปรึกษา</b>	ดร.เนติยา กรีธาชาติ
<b>ประเภทสารนิพนธ์</b>	การศึกษาค้นคว้าด้วยตัวเอง วศ.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยพะเยา, 2555
<b>คำสำคัญ</b>	การบำบัดขั้นต้น กระบวนการโคแอกกูเลชันน้ำเสียกรดน้ำส้ม

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดกรดน้ำส้มในน้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรโดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยน้ำเสียกรดน้ำส้มที่ศึกษาเป็นน้ำทิ้งที่เหลือจากการดองพริก ซึ่งมีค่าความเป็นกรดและค่าซีไอที่สูงมาก คือ พีเอช  $2.94 \pm 0.30$  และซีไอ  $54,400 \pm 5,000$  มก./ล. อีกทั้งไม่สามารถวิเคราะห์ค่าบีโอดีได้เลย

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยการทดสอบด้วยวิธี Jar test พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอไม่ดีเท่าที่ควร (45%) ณ สภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ พีเอชที่ 7.0 สารส้มที่ความเข้มข้น 2,500 มก./ล. โดยบำบัดซีไอจาก 54,000 มก./ล. เหลือ 30,000 มก./ล. ทั้งนี้เมื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการใช้สารส้มร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ พบว่าสามารถบำบัดซีไอได้ดีขึ้นเป็น 54% ณ สภาวะที่เหมาะสม คือ พีเอชที่ 7.0 สารส้มที่ความเข้มข้น 1,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ 100 มก./ล. เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่า การใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่า โดยการใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์เพียงอย่างเดียวมีค่าใช้จ่ายทั้งหมดสำหรับสารเคมี (สารส้ม และ NaOH) เท่ากับ 97 บาท/ลบ.ม. ในขณะที่การใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ มีค่าเท่ากับ 85 บาท/ลบ.ม.

นอกจากนี้ยังพบปัญหาในการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มนอกจากการรับมือกับตะกอนเคมีที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแล้ว คือ ลักษณะสีของน้ำเสียที่เข้มข้น (สีน้ำตาล) หลังจากการปรับพีเอชด้วยสาร NaOH ซึ่งจากผลการทดสอบของคณะผู้วิจัยชี้ชัดให้เห็นว่าน่าจะมาจากสารตกค้างจากพริก ไม่ใช้การทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำดองกับสาร NaOH

<b>Title</b>	TREATMENT OF ACETIC ACID WASTEWATER FROM AGRO-FOOD MANUFACTURING BY COAGULATION PROCESS
<b>Author</b>	Sureeporn Changthongkeng
<b>Advisor</b>	Dr.Nathiya Kreetachat
<b>Academic Paper</b>	Independent Study M.Eng in Environmental Engineering, University of Phayao, 2012
<b>Keywords</b>	Coagulation Process, Acetic Acid Wastewater

### ABSTRACT

This study attempted to examine the optimum conditions of coagulation process for treated acetic acid wastewater from agro-food manufacturing. Acetic acid wastewater using in this research was the effluent from chili pickle process. The characteristics of this acetic acid wastewater were high acidity and COD i.e. pH  $2.94 \pm 0.30$  and COD  $54,400 \pm 5,000$  mg/L. Moreover, BOD could not able to analyze.

The results of the coagulation investigation by jar test experiment showed unsatisfied COD removal efficiency (45%) which treated COD from 54,000 mg/L to 30,000 mg/L. These optimal operations were pH 7.0 and 2,500 mg/L alum. Consequently, the higher efficiency of coagulation process was performed by using alum with coagulant aid (polyelectrolyte). The Latest optimum conditions for coagulation process with coagulant aid were pH 7.0, 1,500 mg/L alum and 100 mg/L polyelectrolyte which could stimulate the efficiency of COD removal to 54%. Furthermore, the economic determination revealed the total cost of chemicals (alum and NaOH) for treating  $1 \text{ m}^3$  of acetic acid wastewater was 97 Baht, while using polyelectrolyte in combination with alum for treating  $1 \text{ m}^3$  of acetic acid wastewater was 85 Baht.

In addition to the typical problem of chemical sludge occurrence, the intense color (brown color) of acetic acid wastewater was also found after the pH adjustment by NaOH. The additional test was performed for confirming this color problem. Its result indicated that the color was produced by the reaction of the chili residue and NaOH, not the reaction of acetic acid and NaOH.

## สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ .....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
สมมติฐานของการวิจัย .....	2
ขอบเขตของการวิจัย .....	2
ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย .....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
กรตนำส้ม .....	4
กระบวนการผลิตของโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร .....	5
กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรตัวอย่าง ..	7
หลักการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน .....	8
สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน .....	13
การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน .....	15
การบำบัดและกำจัดตะกอนสลัดจ์ .....	18
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	19
3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	21
น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา .....	21
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย .....	22
สารเคมีที่ใช้ทำการวิจัย .....	22
การดำเนินการศึกษา .....	23
สรุปแผนการศึกษาวิจัย .....	25

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย .....	27
ลักษณะสมบัติน้ำเสียกรดน้ำส้ม.....	27
ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	28
ผลการศึกษาหาชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับ กระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	32
การศึกษาการเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างตะกอน ด้วยการใส่ สารรวมตะกอน.....	35
ความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์.....	39
5 บทสรุป.....	41
ข้อเสนอแนะ.....	42
บรรณานุกรม .....	43
ภาคผนวก.....	46
ประวัติผู้วิจัย.....	56

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	การใช้งานของสารโคเอกกุลแลนต์.....	16
2	วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียในการวิจัย .....	21
3	ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย.....	27
4	การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของสารเคมีกับประสิทธิภาพการบำบัดด้วย กระบวนการโคเอกกุลแลชั่น.....	39





## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 ส่วนการผลิตข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋อง .....	5
2 ส่วนการผลิตพริกคองในน้ำส้มสายชูบรรจุขวดแก้ว.....	6
3 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร .....	7
4 ทฤษฎี Electrical Double Layer ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค .....	11
5 ปฏิกริยาของคอลลอยด์และกระบวนการรวมตะกอน.....	12
6 รูปแบบการทำงานของถังกวนเร็วและถังกวนช้า .....	13
7 เครื่องมือ Jar Testing.....	17
8 น้ำเสียกรดน้ำส้มจากกระบวนการคองพริก .....	21
9 ลักษณะการตกตะกอนของน้ำเสียกรดน้ำส้มหลังจากการปรับพีเอชที่ค่าต่างๆ ....	27
10 ลักษณะการตกตะกอนของน้ำเสียกรดน้ำส้มหลังจากการปรับค่า pH (ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 11.0).....	27
11 ค่าซีโอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มจากการปรับค่าพีเอชต่างๆ ก่อนทำ Jar Test .....	28
12 ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียกรดน้ำส้มจากการปรับค่าพีเอชต่าง ๆ.....	28
13 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มที่ค่าพีเอชต่าง ๆ.....	29
14 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ค่าพีเอชต่าง ๆ.....	30
15 การตกตะกอนที่ค่าพีเอชต่างๆ หลังการทำ Jar test .....	30
16 ประสิทธิภาพในการบำบัด COD ในน้ำเสียกรดน้ำส้มของสารโคแอกกูแลนต์ที่ ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	32
17 ปริมาณ TSS ในน้ำเสียกรดน้ำส้มของสารโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	33
18 การเสริมประสิทธิภาพในการบำบัด COD โดยใช้สารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับสาร โพลีอิเล็กโทรไลต์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	34
19 ปริมาณ TSS ในน้ำเสียกรดน้ำส้มโดยใช้สารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับสารโพลีอิเล็ก โทรไลต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ .....	35
20 ลักษณะสีของน้ำคองพริก ก่อนทำการปรับค่า pH .....	36
21 น้ำเสียกรดน้ำส้มเมื่อปรับค่าพีเอชต่าง ๆ ด้วย NaOH หลังทำ Jar test.....	37

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การหมักคองผักและผลไม้ มักมีสภาพความเป็นกรดสูงจากการใช้กรดน้ำส้ม (Acetic acid) ในปริมาณมาก และมีความเค็มสูงจากการใช้เกลืออีกด้วย โดยน้ำเสียกรดน้ำส้มที่เหลือจากกระบวนการแปรรูปดังกล่าวมีกลิ่นฉุนและส่งผลกระทบอย่างยิ่งต่อสิ่งแวดล้อมหากไม่มีการบำบัดอย่างเหมาะสมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน เช่น หากปล่อยลงสู่พื้นดินจะทำให้พื้นดินบริเวณนั้นมีสภาพเป็นกรดไม่สามารถที่จะทำการเพาะปลูกพืชได้ หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้แหล่งน้ำนั้นมีสภาพเป็นกรด ไม่เหมาะสำหรับการวางไข่ของปลา ทำให้ปลาไม่อาจจะขยายพันธุ์ได้ นอกจากนี้น้ำเสียดังกล่าวยังเป็นปัญหาอย่างยิ่งต่อระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งส่วนใหญ่ใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment processes) โดยน้ำเสียที่มีความเป็นกรด และมีความเค็มสูงจะไปยับยั้งความสามารถของจุลินทรีย์ในระบบบำบัด ทำให้ไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว น้ำเสียกรดน้ำส้มจากกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจำเป็นต้องบำบัดแยกกับน้ำเสียในส่วนอื่นของโรงงาน และจำเป็นต้องทำการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพ โดยวิธีที่นิยมในการบำบัดขั้นต้น และเหมาะกับน้ำเสียที่มีกรดหรือด่างสูงเกินไป (pH ต่ำหรือสูงเกินไป) ได้แก่ กระบวนการทางเคมี (Chemical treatment processes)

ทั้งนี้ระบบบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีมีหลากหลายระบบด้วยกัน โดยระบบมีความเป็นไปได้ในการบำบัดกรดน้ำส้มที่เลือกใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation process) เนื่องจากเป็นวิธีที่ค่อนข้างง่ายในการจัดการดูแลระบบ อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการกำจัดดี และค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก เป็นระบบที่นิยมใช้ระบบหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพโดยตรง แต่ปัญหาที่มักพบในกระบวนการดังกล่าว คือ การเติมสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ที่ใช้ในการตกตะกอนเคมีมากเกินไปทำให้เกิดตะกอนส่วนเกินของสารเคมีเป็นปริมาณมาก ซึ่งจำเป็นต้องแยกไปกำจัดต่อ อีกทั้งเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในส่วนของสารเคมีที่เติมไปเกินความจำเป็น และค่าใช้จ่ายในการบำบัดตะกอนที่เกิดจากสารเคมีดังกล่าว

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีกรดน้ำส้มและมีความเค็มสูงจากกระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยพิจารณาถึงชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการบำบัด รวมถึงสภาวะอื่น ๆ ที่เหมาะสมในการบำบัด เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบและปรับปรุงระบบการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มจากกระบวนการหมักของผลผลิตทางการเกษตร โดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน
2. เพื่อหาสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม และการเสริมประสิทธิภาพด้วยสารโคแอกกูแลนต์เอดในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มจากกระบวนการหมักของผลผลิตทางการเกษตร
3. เพื่อเป็นแนวทางการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียที่มีกรดน้ำส้มจากกระบวนการหมักของผลผลิตทางการเกษตรให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

### สมมติฐานของการวิจัย

การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มจากกระบวนการหมักของโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และช่วยเพิ่มค่าความสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) (Karthik, 2007) ของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพต่อไป

### ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษากการบำบัดกรดน้ำส้มในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1. น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียจริงจากกระบวนการหมักของผักและผลไม้ของโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร
2. ศึกษาลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของน้ำเสียกรดน้ำส้ม ได้แก่ ค่าพีเอช ซีโอดี บีโอดี ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ความเค็ม (Salinity)
3. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยวิธี Jar Test โดยสภาวะที่ศึกษา ได้แก่ ชนิด ปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ และพีเอชที่เหมาะสมและเสริมประสิทธิภาพการสร้างและรวมตะกอนด้วยสารโคแอกกูแลนต์เอด

4. สารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ที่ศึกษา 3 ชนิด ได้แก่ สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl, Polyaluminium chloride:  $18\%\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และปูนขาว ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )
5. สารโคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulant aid) ที่ศึกษา ได้แก่ สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ชนิด non-ionic polyacrylamide

### ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1. สามารถบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มที่เกิดจากกระบวนการหมักของผลผลิตทางการเกษตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน เพื่อเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียในขั้นต้นก่อนเข้าสู่การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพต่อไป
2. ได้แนวทางปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มจากกระบวนการหมักของผลผลิตทางการเกษตรให้กับทางผู้ประกอบการ



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การแปรรูปอาหารและผลิตผลทางการเกษตรเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญในลำดับต้น ๆ ของประเทศไทยและยังนำรายได้เข้าประเทศด้วยการส่งออกปีละหลายแสนล้านบาทประเทศไทยมีข้อได้เปรียบในเรื่องภูมิอากาศและภูมิประเทศ ทำให้สามารถผลิตผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นข้าวพืชผัก-ผลไม้ และอื่น ๆ ซึ่งในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในโรงงานส่วนใหญ่ มักจะต้องมีกระบวนการดองผลิตภัณฑ์ด้วยกรดน้ำส้มหรือน้ำส้มสายชู โดยกรดน้ำส้มที่เหลือจากกระบวนการดองนี้ จำเป็นต้องมีระบบบำบัดแยกจากระบบบำบัดน้ำเสียในส่วนอื่นของโรงงาน เนื่องจากไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพที่นิยมใช้บำบัดน้ำเสียทั่วไป สภาพกรดอย่างรุนแรงของกรดน้ำส้ม ทำให้จุลินทรีย์ในระบบบำบัดทางชีวภาพไม่สามารถดำเนินกิจกรรมหรือย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การศึกษาหาวิธีการที่เหมาะสมในการบำบัดกรดน้ำส้มจึงเป็นแนวทางที่จำเป็นอย่างยิ่ง รวมถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพการบำบัดที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

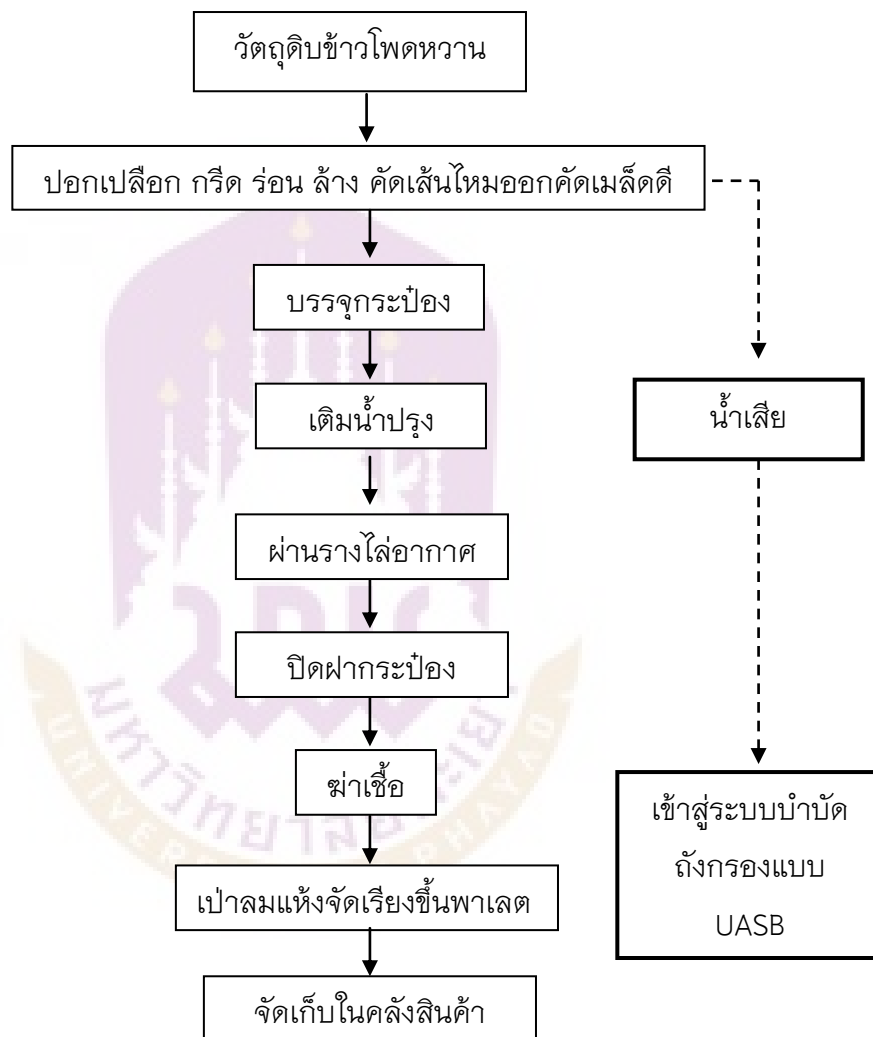
โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาถึง การบำบัดกรดน้ำส้มในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยได้ทำการศึกษาโรงงานตัวอย่างซึ่งเป็นโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร ได้แก่ ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดฝักอ่อนและพริกดองน้ำส้ม โดยทางโรงงานมีระบบบำบัดน้ำเสียอยู่แล้ว คือ ระบบ UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) ซึ่งเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment processes)

#### กรดน้ำส้ม

กรดน้ำส้ม (Acetic acid) เป็นกรดอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในน้ำส้มสายชู ซึ่งให้รสเปรี้ยวและมีกลิ่นฉุน ในอุตสาหกรรมอาหารมักมีการใช้กรดน้ำส้มนี้ในกระบวนการดองผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เพื่อเป็นการแปรรูปผลิตภัณฑ์และถนอมผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เนื่องจากเป็นกรดที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกายทำให้เหมาะต่อการรักษาคุณภาพอาหารกว่ากรดชนิดอื่นโดยน้ำส้มสายชูที่ใช้ในการดองดังกล่าวมักมีความเข้มข้นของกรดน้ำส้มสูง และหลังจากการดองแล้วกรดน้ำส้มส่วนใหญ่จะเหลือกลายเป็นของเสียที่จำเป็นต้องบำบัด

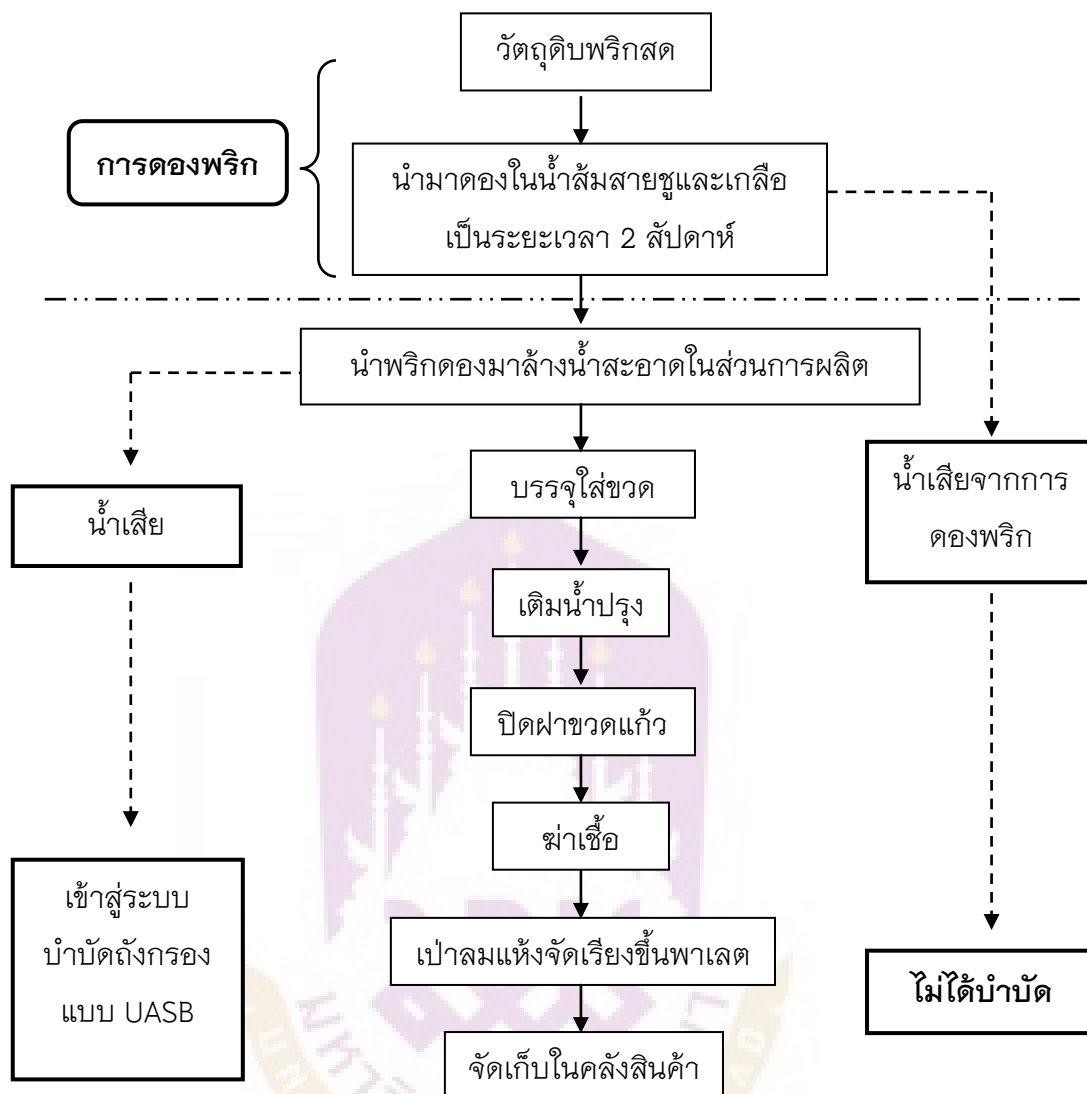
### กระบวนการผลิตของโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร

โรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรที่เลือกมาศึกษานี้ประกอบด้วยส่วนการผลิต 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนการผลิตข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋อง และส่วนการผลิตพริกคองในน้ำส้มสายชูบรรจุขวดแก้วโดยขั้นตอนของแต่ละการผลิตแสดงดังภาพ 1 และ 2



ภาพ 1 ส่วนการผลิตข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋อง

ในส่วนการผลิตข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋องจะเกิดน้ำเสียจากการล้างทำความสะอาดและเตรียมข้าวโพดหวาน ซึ่งเป็นน้ำเสียจากการผลิตโดยทั่วไปที่ความสกปรกไม่สูงมากนัก โดยน้ำเสียส่วนนี้จะเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพแบบ UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)



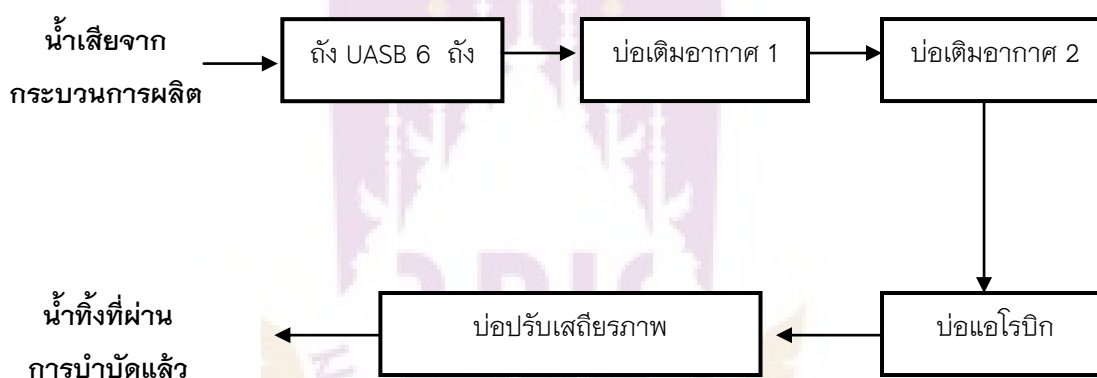
ภาพ 2 ส่วนการผลิตพริกคองในน้ำส้มสายชูบรรจุขวดแก้ว

ในส่วนการผลิตพริกคองในน้ำส้มสายชูบรรจุขวดแก้วจะเกิดน้ำเสียจากการคองพริก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำส้มสายชูหรือกรดน้ำส้ม โดยน้ำเสียส่วนนี้ทางโรงงานเก็บไว้ในถังไม่ได้มีการบำบัด ส่วนน้ำเสียจากการล้างและเตรียมพริกจะเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพแบบถังกรอง UASB เช่นเดียวกับน้ำเสียในส่วนการผลิตข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋อง

### กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรตัวอย่าง

ปริมาณน้ำเสียสูงสุดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตของโรงงานที่ศึกษา มีปริมาณเท่ากับ 150 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยน้ำเสียที่ต้องนำไปบำบัดด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียจะเป็นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการล้างวัตถุดิบ จากกระบวนการผลิตข้าวโพดหวานและข้าวโพดฝักอ่อน และการทำความสะอาดเป็นส่วนใหญ่ ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน ในปัจจุบันประกอบด้วย (ภาพ 3)

1. ระบบ UASB จำนวน 6 ถัง
2. บ่อเติมอากาศ จำนวน 2 บ่อ
3. บ่อแอโรบิก จำนวน 1 บ่อ
4. บ่อปรับเสถียรภาพ จำนวน 1 บ่อ



ภาพ 3 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร

ปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีของโรงงานตัวอย่างนี้คือ ปัญหาน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการดองพริก ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีสภาพความเป็นกรดสูงจากการใช้กรดน้ำส้ม (Acetic acid) ในปริมาณมาก และมีความเค็มสูงอีกด้วย น้ำเสียจากส่วนนี้จึงไม่สามารถที่จะนำไปบำบัดรวมกับระบบถังกรองแบบ UASB ได้ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment processes) โดยน้ำเสียที่มีความเป็นกรดและมีความเค็มสูงจะไปยับยั้งความสามารถของจุลินทรีย์ในระบบบำบัด ทำให้ไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว น้ำเสียจากกระบวนการดองพริกจำเป็นต้องบำบัดแยกกับน้ำเสียในส่วนอื่นของโรงงาน และจำเป็นต้องทำการบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพต่อไป โดยวิธีที่นิยมในการบำบัดขั้นต้น ซึ่งเหมาะกับน้ำเสียที่มีกรดหรือด่างสูงเกินไป (พีเอชต่ำหรือสูงเกินไป) ได้แก่ กระบวนการทางเคมี (Chemical treatment processes)



ทั้งนี้ระบบบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมี มีหลากหลายระบบด้วยกัน โดยระบบมีความเป็นไปได้ในการบำบัดครดน้ำส้มที่เลือกใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation Process) เนื่องจากเป็นวิธีที่ค่อนข้างง่ายในการจัดการดูแลระบบ อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการกำจัดดี และค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก เป็นระบบที่นิยมใช้อีกระบบหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ทั้งนี้จึงได้อธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการโคแอกกูเลชันในหัวข้อต่อไป

### หลักการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation)

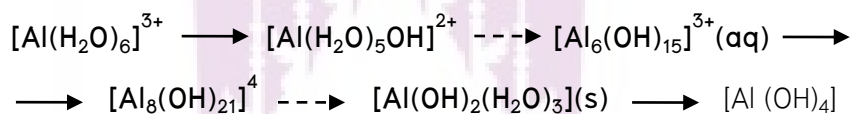
กระบวนการโคแอกกูเลชัน หมายถึง การเติมสารเคมีกับสารแขวนลอย ซึ่งส่วนมากเป็นประเภทคอลลอยด์เพื่อทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) โดยการลดแรงที่ผลักกันระหว่างอนุภาคต่าง ๆ ลงและจับตัวกันเกิดเป็นมวลรวมที่ใหญ่ขึ้น (Larger aggregates) การสร้างตะกอนจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมสารเคมีและกวนอย่างรวดเร็วเพื่อช่วยกระจายสารเคมีและทำให้อนุภาคเล็ก ๆ ในน้ำรวมตัวกัน (Flocculation) เป็นการรวมตัวของตะกอนซึ่งเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการสร้างตะกอน โดยทำการกวนช้าทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนมีการสัมผัสกันเกิดขึ้น อนุภาคที่สัมผัสกันจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (floc) พร้อมทั้งจะตกตะกอนกระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) เป็นกระบวนการแยกของแข็งออกจากของเหลว โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงในการตกตะกอนเพื่อแยกของแข็งในส่วนที่ตกตะกอนได้โคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการที่ใช้ในระบบผลิตน้ำประปา โดยสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ที่นิยมใช้ตัวอย่างเช่น สารส้ม ferric chloride และ ferrous sulfate เป็นต้นกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยทั่วไปแล้วจะช่วยลดสารแขวนลอยในน้ำ แต่ในขณะเดียวกันก็สามารถลดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ละลายน้ำได้อีกด้วย การลดสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น pH ความเป็นต่างชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ รวมถึงชนิดและความเข้มข้นของสารอินทรีย์เป็นต้น (อัศวินท์ พุ่มไพศาลชัย, 2548)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน เป็นวิธีการบำบัดทางเคมีที่เป็นที่นิยมในการบำบัดน้ำเสียที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการทางชีวภาพ เช่น น้ำเสียมีความเป็นกรดหรือด่างสูงเกินไปมีโลหะหนักที่เป็นพิษหรือสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบทางชีวภาพ นอกจากนี้ระบบตกตะกอนเคมีเป็นระบบที่ไม่ยุ่งยากในเดินระบบและดูแลระบบบำบัด โดยหลักการสำคัญของระบบ คือ การเติมสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) เช่น สารส้ม (Alum หรือ Aluminium sulfate) ลงในน้ำเสียเพื่อให้เกิดการจับตัวกันของอนุภาคต่าง ๆ เป็นกลุ่มที่เรียกว่า ฟล็อก (Floc) และเมื่อ floc มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักมากขึ้น จะสามารถตกตะกอนลงมาได้ โดยสารโคแอกกูแลนต์ที่เติมลงไปเปรียบเสมือนเป็นตัวประสานในอนุภาคต่าง ๆ มารวมตัวกันเป็น floc (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน (มันลีน ตันทุลเวคม์, 2538) ดังนี้

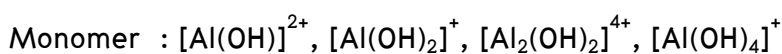
**1. การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization)** ของคอลลอยด์โดยการลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในถังกวนเร็ว โดยการเติมสารเคมีลงไปใต้น้ำ แล้วทำการกวนอย่างรวดเร็ว เพื่อให้สารเคมีไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคคอลลอยด์หรืออิออนต่างๆ ในน้ำอย่างทั่วถึง และทำลายเสถียรภาพของอนุภาคหรืออิออนเหล่านั้นทำให้เคลื่อนที่เข้าหากันจนรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนลงมาได้หรือสามารถกรองได้ หรือทั้งสองอย่าง

สารสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันมากในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ คือ เกลืออลูมิเนียม Al(III) ซึ่งเมื่ออยู่ในน้ำจะละลายอย่างรวดเร็วได้เป็นอลูมิเนียมเชิงซ้อนต่าง ๆ โดยพีเอชเริ่มต้นของสารละลายนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นตัวกำหนดว่าอลูมิเนียมเชิงซ้อนตัวใดจะเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ในน้ำ ปฏิกิริยาแสดงการใช้ Al(III) เป็นสารสร้างและรวมตะกอนเป็นดังนี้ (Rebhun and Lurie, 1993)



โดยเกลืออลูมิเนียม Al(III) เมื่อละลายน้ำจะอยู่ในรูป  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$  และสามารถทำปฏิกิริยากับ alkaline ion ( $\text{HCO}_3^-$ ) ที่อยู่ในน้ำ ทำให้สามารถเปลี่ยนรูปสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมได้หลากหลาย เช่น  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}]^{2+}$ ,  $[\text{Al}_6(\text{OH})_{15}]^{3+}$  และ  $[\text{Al}_8(\text{OH})_{21}]^{4+}$  ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมที่มีประจุบวกเหล่านี้ เช่น  $[\text{Al}_8(\text{OH})_{21}]^{4+}$  จะมีประสิทธิภาพในการสร้างตะกอน และรวมตะกอนมากที่ พีเอชในช่วง 4-7 จนเกิดเป็น  $[\text{Al}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_3]$  จับตัวกับอนุภาคและตกตะกอนลงมา นอกจากนี้ยังเกิดฟล็อกของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide floc) ได้แก่  $[\text{Al}(\text{OH})_4]$  ซึ่งมีลักษณะคล้ายวุ้น และสามารถจับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้เกิดการตกตะกอนดีขึ้น

รูปแบบ Monomer และ Polymer ของสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมประจุบวกที่เกิดขึ้น แสดงดังนี้

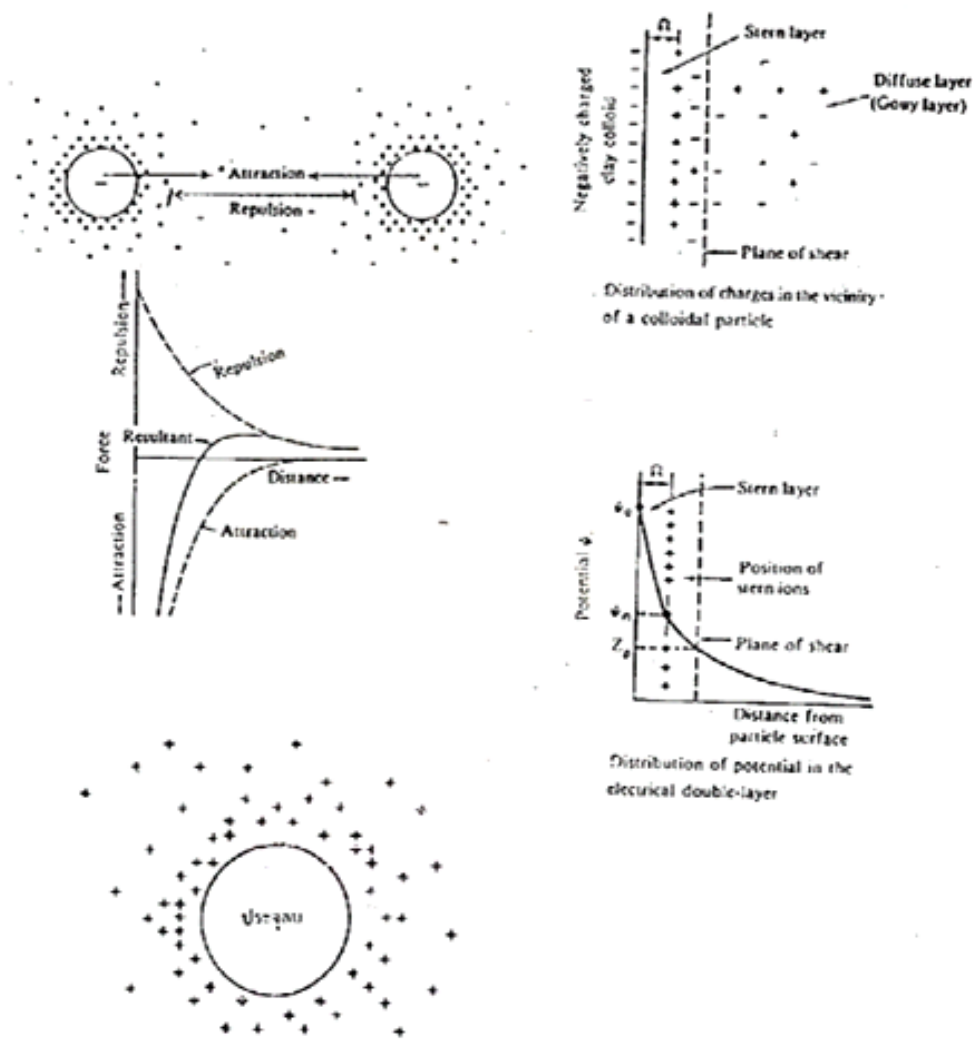


การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคโดยเกลืออลูมิเนียมนั้นเกิดขึ้นได้ด้วยกลไก 2 กลไก (ภาพ 4) คือ (Narkis et al., 1991)

1.1 กลไกการดูดติดผิวและการทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization) เมื่อเกลืออลูมิเนียมละลายน้ำจะเกิดอลูมิเนียมเชิงซ้อนสำคัญ คือ  $[Al_8(OH)_{20}]^{4+}$  ซึ่งจะไปดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาค อีกทั้งยังสามารถเกาะกับอนุภาคได้หลายตัวทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาค โดยกลไกการดูดติดผิว และการทำลายประจุ เป็นกลไกที่เกิดขึ้นภายในเวลา  $10^{-4}$ -1 วินาที ซึ่งถ้าเกินกว่านี้สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะเปลี่ยนรูปไปเป็นผลึก  $Al(OH)_3$  ทำให้เกิดกลไกแบบที่ 2 คือ กลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (มันลิน ตันซุลเวตม์, 2538)

1.2 ห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (Sweep Coagulation) เกิดขึ้นเมื่อมีการเติมสารสร้างตะกอนในปริมาณมากเกินไปจนปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนได้  $Al(OH)_3$  ซึ่งมีลักษณะเป็น絮เหนียว และห่อหุ้มอนุภาคไว้ภายใน ทำให้ไม่สามารถแสดงประจุทางไฟฟ้าได้ จึงเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ในขั้นการรวมตัวของตะกอน (Flocculation) และสามารถตกตะกอนลงได้ง่าย

**2. การรวมอนุภาคคอลลอยด์ (Flocculation)** เป็นการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว เคลื่อนที่มากกระทบ หรือสัมผัสกันให้มากที่สุด (Transport of Colloidal Particles) และได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ และตกตะกอนลงมาได้โดยง่ายเมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้วการสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคย่อมเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเดิม สิ่งที่เป็นความต้องการอีกอย่างหนึ่งคือ เมื่ออนุภาคต่าง ๆ สัมผัสกันแล้วควรเกาะติดกันแน่นและหลุดออกจากกันน้อยที่สุดความสำคัญของขั้นตอนทั้งสองเท่าเทียมกันและต้องมีทั้งสองขั้นจึงจะเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันที่สมบูรณ์

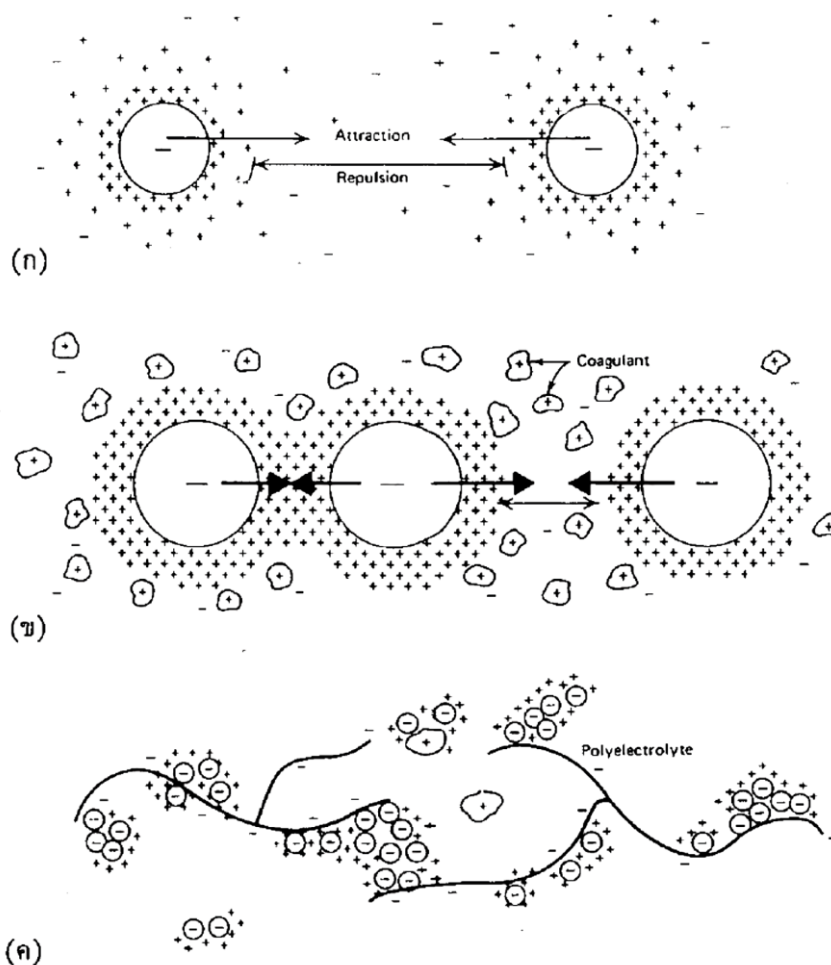


ภาพ 4 ทฤษฎี Electrical Double Layer ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค

ความสำคัญของชั้นตอนทั้งสองเท่าเทียมกันและต้องมีทั้งสองชั้นจึงจะเกิดกระบวนการรวมตะกอนที่สมบูรณ์

คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพ จะสามารถแขวนลอยในน้ำได้ โดยไม่ตกตะกอนภายในระยะเวลาอันสั้น เสถียรภาพของคอลลอยด์จะขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงผลักระหว่างอนุภาคจะสูงกว่าแรงดึงดูด จึงทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดึงดูดมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ สามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟลอคได้ ทำให้คอลลอยด์ไม่มีเสถียรภาพ แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า Van der Waals Force เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค ดังแสดงในภาพ 5 (ก)

การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย(Diffuse Layer) ดังแสดงในภาพ 5 (ข) ทำได้โดยการเติมสารรวมตะกอนลงไปทำให้ประจุบวกเข้าไปออกันอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์หนาแน่นขึ้น เป็นผลทำให้แรงผลักรวมตะกอนลดลง ดังนั้นอนุภาคคอลลอยด์ จะสามารถเข้ามาจับกันเป็นกลุ่มก้อนได้และถ้ามีการเติมสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ลงไปเพื่อเป็นสะพานเชื่อมฟลอคจะทำให้ฟลอคมีขนาดใหญ่ขึ้น และตกตะกอนได้ง่ายขึ้น ดังแสดงในภาพ 5 (ค)

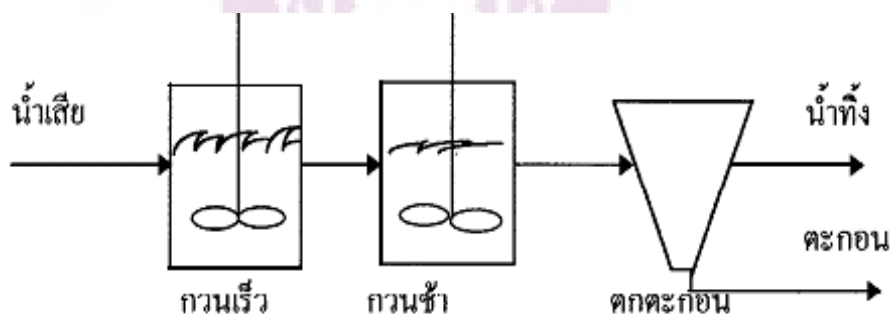


ภาพ 5 ปฏิกริยาของคอลลอยด์และกระบวนการรวมตะกอน (ก) แรงผลักรวมตะกอนระหว่างคอลลอยด์ (ข) การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์โดยการเติมสารรวมตะกอนเพื่อลดความหนาของชั้นกระจาย (ค) การเติมสารโพลีอิเล็กโทรไลต์เพื่อเป็นสะพานเชื่อมก้อนของคอลลอยด์ (Hammer, 1986)

นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาส่วนประกอบของกระบวนการโคแอกกูเลชันมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน (Eckenfelder, 1989) ได้แก่ การกวนเร็ว (Rapid mix) และการกวนช้า (Slow mix) ภาพ 6 แสดงรูปแบบการทำงานของกระบวนการโคแอกกูเลชันในถังกวนเร็วและถังกวนช้า

1. การกวนเร็ว หลังจากการเติมสารรวมตะกอนจะทำการกวนเร็ว ซึ่งจะทำหน้าที่กระจายสารเคมีไปให้ส่วนต่าง ๆ ของน้ำอย่างรวดเร็ว เพื่อให้มีการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์เกิดขึ้น (กระบวนการโคแอกกูเลชันขั้นที่ 1 ดังกล่าวข้างต้น) กระบวนการนี้จะเกิดในถังกวนเร็วซึ่งเป็นถังที่ใช้เติมสารโคแอกกูแลนต์ในน้ำเสียเพื่อให้ผสมเข้ากันอย่างรวดเร็ว โดยที่การกวนเร็วใช้เวลา 1-3 นาที

2. การกวนช้าจะทำหน้าที่สร้างสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ (ซึ่งถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว) เพื่อให้รวมตัวกันเป็นฟล็อก (กระบวนการโคแอกกูเลชันขั้นที่ 2 ดังกล่าวข้างต้น) โดยที่การกวนช้าใช้เวลา 20-30 นาที



ภาพ 6 รูปแบบการทำงานของถังกวนเร็วและถังกวนช้า

### สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

สารเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน เรียกว่า สารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) การใช้งานของสารโคแอกกูแลนต์ แสดงไว้ในตารางที่ 1 สารโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ สารส้ม ซึ่งเป็นสารประกอบของอลูมิเนียมที่มีสูตรเคมีดังนี้  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  (Aluminium Sulfate) สารเคมีที่ได้รับความนิยมรองลงมา ได้แก่ สารประกอบของเหล็ก เช่น  $FeCl_3$  และ  $Fe_2(SO_4)_3$  สารโคแอกกูแลนต์ที่เป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน ได้แก่ โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า โพลีเมอร์ (Polymer) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่น้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ ช่วยทำให้เกิดเม็ดตะกอนขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนได้เร็วขึ้น มีทั้งแบบประจุบวก ประจุ

ลบ และไม่มีประจุ มักนิยมใช้แบบประจุลบสำหรับกระบวนการทำให้น้ำใส แต่จะใช้แบบประจุบวกสำหรับการรีดน้ำออกจากสลัดจ์ (Sludge) ปริมาณที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0.5–2.0 มก./ล. สารโพสเฟอริกไตรไฮดรอกไซด์เป็นสารที่ละลายน้ำได้ยาก มีความหนืดสูง อาจไม่สะดวกในการใช้งานในบางโรงงานที่ไม่มีอุปกรณ์ในการเติมสารเคมี (Feeder) วิธีการที่ใช้ละลายคือ ต้องละลายในน้ำอุ่นและกวนอย่างช้า ๆ ทำเป็น Stock Solution เข้มข้นประมาณ 0.2–20% แล้วค่อยสูบไปใช้งาน อายุการใช้งานของโพสเฟอริกไตรไฮดรอกไซด์ถ้าอยู่ในรูปผงใช้งานไม่เกิน 1 ปี ถ้าเป็นสารละลายใช้งานไม่เกิน 1–2 สัปดาห์ (คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537)

### 1. โคแอกกูแลนต์ (Coagulant) คือ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน ได้แก่

1.1 สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) โดยปกติสารส้มให้ผลดีในการกำจัดความขุ่นเมื่อน้ำมีพีเอชอยู่ในช่วง 6–7 เหมาะกับน้ำดิบที่มีความขุ่นและความเป็นด่างในระดับสูง ซึ่งเป็นน้ำที่สร้างโคแอกกูเลชันได้ง่าย

1.2 เพอริคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์แทนสารส้มได้ เหมาะกับน้ำที่มีพีเอชในช่วง 5–7 เหมาะกับน้ำดิบที่มีความขุ่นและความเป็นด่างในระดับสูง ปฏิกริยาระหว่างเพอริคลอไรด์กับน้ำจะได้ผลึกเพอริไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) ตรงข้ามกับสารส้มจะให้ผลึกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้เพอริคลอไรด์ยังเหมาะที่จะใช้กับน้ำอ่อนที่มีสีเข้ม ซึ่งการใช้สารส้มจะไม่ได้ผลดี

1.3 สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) ร่วมกับปูนขาว ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) สำหรับกรณีที่น้ำดิบมีความเป็นด่างต่ำเกินไป จึงจำเป็นต้องเติมปูนขาวเพื่อเพิ่มความเป็นด่างให้กับน้ำ เพื่อสะเทินความเป็นกรดที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อใส่สารส้มลงไป หากไม่ใช้ปูนขาวจะใช้โซดาแอช ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) แทนก็ได้

1.4 เพอร์ซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) ร่วมกับปูนขาว ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) เพอร์ซัลเฟตสามารถใช้แทนสารส้มได้ ปฏิกริยาระหว่างเพอร์ซัลเฟตและปูนขาวจะได้ ผลึกเพอริไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) มีเนื้อแน่น และตกตะกอนดี

1.5 แมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) และปูนขาว ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ปฏิกริยาระหว่างแมกนีเซียมคาร์บอเนตและปูนขาวจะได้ผลึก  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ลักษณะคล้ายปูน  $\text{Al}(\text{OH})_3$  แต่มีน้ำหนักมากกว่า ลดปัญหาการกำจัดกากตะกอนเลน

2. โคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulant aid) เป็นสารเคมีที่เติมร่วมกับโคแอกกูแลนต์ เพื่อช่วยให้เกิดโคแอกกูเลชันได้ดียิ่งขึ้น ได้แก่

2.1 โพลีเมอร์เป็นสารโคแอกกูแลนต์เอ็ดที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน แบ่งเป็น โพลีเมอร์แบบประจุบวก แบบประจุลบ และแบบไม่มีประจุ โดยโพลีเมอร์แบบประจุลบและแบบไม่มีประจุนิยมใช้ร่วมกับสารส้มเพื่อให้เกิดการเกาะกันระหว่างฟล็อกได้ดียิ่งขึ้น โดยเติมหลังการ



เติมสารส้ม โพลีเมอร์ยังช่วยลดการใช้สารส้มลงได้มาก ตะกอนสลัดจ์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลง และกำจัดน้ำออกได้ง่าย

2.2 แอ็คติเวตเต็ดซิลิกา (Activated silica) นิยมใช้กับน้ำดิบที่มีความขุ่นน้อยเพื่อให้เกิดโคแอกกูเลชันได้ดี แอ็คติเวตเต็ดซิลิกาจะเป็นเป้าสัมผัสเพิ่มเติมให้กับน้ำ และช่วยลดปริมาณสารส้ม ฟล็อกที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ ตกตะกอนได้ง่าย

2.3 ดินเหนียว ดินกาสิโน เป็นโคแอกกูแลนต์เอดที่ช่วยเพิ่มเป้าสัมผัสให้กับน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำเช่นเดียวกับแอ็คติเวตเต็ดซิลิกา โดยสารเหล่านี้ต้องเติมก่อนการเติมสารส้ม

### **การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน**

การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันให้ได้ผลดี จะต้องควบคุมสภาวะต่าง ๆ ให้เหมาะสมปัจจัยที่ต้องควบคุม ได้แก่ ปริมาณ และชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ ระดับพีเอชของน้ำ ความเร็วเกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาทวนน้ำ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความเร็วเกรเดียนท์ และระยะเวลาทวนน้ำ มักกำหนดไว้ก่อนแล้วในต่อนอกแบบและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันจึงมุ่งหมายในการควบคุมปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมและระดับพีเอชของน้ำ เพื่อให้เกิดการรวมตะกอนที่ดีที่สุด การควบคุมสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถทำได้ 2 วิธี โดยวิธีจาร์เทสต์ (Jar Test) และโดยวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าซีต้าโพเทนเชียล (Zeta Potential)



### ตาราง 1 การใช้งานของสารโคแอกกูแลนต์

Chemical	Dosage		
Process	range (mg/L)	pH	Comments
Lime	150 – 500	9.0 – 11.0	For colloid coagulation and P remove Wastewater with low alkalinity, and High and variable P Basic reactions: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Ca(HCO}_3)_2 \text{ ----> } 2\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{MgCO}_3 + \text{Ca(OH)}_2 \text{ ----> } \text{Mg(OH)}_2 + \text{CaCO}_3$
Alum	75 – 250	4.5 – 7.0	For colloid coagulation and P removal Wastewater With high alkalinity, and low and stable P Basic reactions: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O} \text{ ----> } 2\text{Al(OH)}_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4$
FeCl <sub>3</sub> , FeCl <sub>2</sub>	35 – 150	4.0 – 7.0	For colloid coagulation and P removal
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	70 – 200	4.0 – 7.0	Wastewater with high alkalinity, and low and stable P Where leaching of iron in the effluent is allowable Or can be controlled Where economical source of waste iron is available (steelmifls, etc) Basic reactions : $\text{FeCl}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \text{ ----> } \text{Fe(OH)}_3 + 3\text{HCl}$
Cationic	2 – 5	No change	For colloid coagulation or to aid coagulation with Polymers A metal Where the buildup of an inert chemical is to be avoided
Anionic and Nonionic polymers	0.25 – 1.0	No change	Use as a flocculation aid to speed flocculation and Some settling and to toughen floc for filtration
Weighting aid	3 – 20	No change	Used for very dilute colloidal suspensions for and clays weighting

ที่มา : Eckenfelder (1989)

### 1. การควบคุมด้วยวิธีจาร์เทสต์

วิธีควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันที่ได้รับความนิยมและใช้กันมานานแล้ว คือ วิธีจาร์เทสต์ (Jar Test) ซึ่งเป็นวิธีทดสอบในบีกเกอร์ (Beaker) เครื่องมือทดสอบเป็นเครื่องกวนที่ปรับความเร็วรอบได้ ซึ่งส่วนมากมักมีใบพัดกวนน้ำ 6 ใบ ดังแสดงในภาพ 7 ในการทดลองแต่ละครั้งจะเลือกชนิดของสารเคมีและกำหนดสภาวะต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง ความเร็วรอบ และระยะเวลากวนน้ำ (ทั้งกวนเร็วและกวนช้า) และระยะเวลาตกตะกอน จากนั้นจึงทดลองโดยเติมสารเคมีในปริมาณต่างๆ ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ ระดับพีเอชอาจรักษาให้คงที่หรือแปรเปลี่ยน ทั้งนี้แล้วแต่ความมุ่งหมายของการทำจาร์เทสต์



ภาพ 7 เครื่องมือ Jar Test

### 2. การควบคุมโดยวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าซีต้าโพเทนเชียล

การควบคุมโดยวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าซีต้าโพเทนเชียล สามารถนำมาใช้ควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันได้โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Zeta Meter ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคคอลลอยด์ในสนามไฟฟ้า (Electrophoretic Mobility) การควบคุมโดยการวัดศักย์ไฟฟ้านี้ ไม่ได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากอุปกรณ์มีราคาแพง และการวัดต้องอาศัยความชำนาญมาก (ชัยวัฒน์ บัญญัติศิริสกุล, 2540)

## การบำบัดและกำจัดตะกอนสลัดจ์

การเติมสารเคมีในกระบวนการโคแอกกูเลชันส่งผลกระทบต่อปริมาณการผลิตกากตะกอนจากการตกตะกอนทางเคมีซึ่งประกอบด้วยตะกอนของสารโคแอกกูแลนต์ที่เติมลงไปพร้อมกับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียซึ่งจะต้องได้รับการบำบัดและกำจัดให้ถูกต้องมิฉะนั้นอาจก่อให้เกิดปัญหาการเน่าเหม็นในภายหลังโดยทั่วไปการบำบัดและกำจัดตะกอนสลัดจ์มีขั้นตอนต่างๆดังนี้

### 1. การทำชั้นสลัดจ์(sludge thickening)

การทำชั้นสลัดจ์เป็นการเพิ่มความเข้มข้นเพื่อให้เหมาะสมหรือเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดขั้นต่อไปเช่นการปรับเสถียรสลัดจ์การแยกน้ำจากสลัดจ์เป็นต้นการทำชั้นสลัดจ์มีหลายแบบได้แก่ถังทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วง (gravity thickener) การลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือดีเอเอฟ (dissolved air flotation; DAF) และเครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge)

### 2. การปรับเสถียรสลัดจ์(sludge stabilization)

การปรับเสถียรสลัดจ์เป็นการปรับให้สลัดจ์มีสภาพเสถียรหรือเป็นการย่อยสลายสลัดจ์ให้มีความคงตัวเพื่อป้องกันการเน่าเหม็น (เมื่อนำไปทิ้ง) การปรับเสถียรสลัดจ์มีหลายวิธีเช่นการย่อยสลัดจ์แบบแอนแอโรบิก (anaerobic digestion) การย่อยสลัดจ์แบบแอโรบิก (aerobic digestion) และการหมักทำปุ๋ย (composting) เป็นต้น

### 3. การแยกน้ำจากสลัดจ์(sludge dewatering)

การแยกน้ำจากสลัดจ์เป็นการลดปริมาตรสลัดจ์ก่อนนำไปกำจัดเพื่อความสะดวกในการขนย้ายลดค่าใช้จ่ายสำหรับการขนส่งและการกำจัดการแยกน้ำมีหลายวิธีได้แก่สายพานรีดน้ำ (belt press) เครื่องอัดกรอง(filter press) และเครื่องหมุนเหวี่ยง

### 4. การกำจัดสลัดจ์

การกำจัดสลัดจ์เป็นการนำสลัดจ์ที่ผ่านการปรับเสถียรและการแยกน้ำจากสลัดจ์แล้วไปกำจัดในขั้นตอนสุดท้ายเช่นการฝังกลบและปรับปรุงดินสำหรับการเกษตรเป็นต้น นอกจากนี้ก็นำสลัดจ์ไปทำลายจนสิ้นสภาพด้วยการเผา (incineration) แต่เป็นวิธีที่มีการลงทุนสูงมาก (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Karthik et al.(2008) ศึกษาการบำบัดกรด Purified Terephthalic Acid (PTA) ซึ่งมีลักษณะสมบัติของน้ำเสียเริ่มต้น คือ พีเอชในช่วง 4.7–6.2 และ ซีโอดีเท่ากับ 7,402–10,800 มก./ล. โดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นวิธีในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นด้วยการใช้สารโพลีออลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) ร่วมกับปูนขาว (lime) เป็นสารสร้างตะกอนและเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนโดยใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ ชนิด Anionic พบว่าสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความเป็นกรดได้ดี และเพิ่มค่า Biodegradability ของน้ำเสีย โดยสามารถบำบัดซีโอดีได้ถึง 63.1% และสามารถบำบัดบีโอดีได้ 45.2% และสัดส่วน BOD/COD เพิ่มขึ้นเป็น 0.45–0.67

Amuda (2006) ที่ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเครื่องดื่มโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันผลการศึกษาพบว่า การบำบัดด้วยเพอร์ริคคอลลอยด์ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์สภาวะที่เหมาะสม คือ  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  100 มก./ล. และโพลีอิเล็กโทรไลต์ 25 มก./ล. สามารถกำจัดซีโอดี ฟอสฟอรัสทั้งหมดและของแข็งแขวนลอยทั้งหมดได้ 91%, 99% และ 97% ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณของตะกอนสลัดจ์ลดลงถึง 60% เมื่อเทียบกับการใช้เพอร์ริคคอลลอยด์เพียงอย่างเดียว

Tatsi et al. (2003) ศึกษาการบำบัดน้ำชะขยะใหม่ ซึ่งมีค่าพีเอชต่ำในช่วง 4.9–6.7 ค่าซีโอดีเท่ากับ 44,000–115,000 มก./ล. และค่าบีโอดีเท่ากับ 95,000–80,800 มก./ล. ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (ใช้สารเพอร์ริคคอลลอยด์ร่วมกับสารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ ปริมาณ 3.0ก./ล. และพีเอชเท่ากับ 10.0) ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างต่ำ (25–38% COD removal)

Jimenez and Chavez (2000) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาปริมาณและชนิดของสารโคแอกกูแลนต์และสารช่วยรวมตะกอนที่เหมาะสมซึ่งพบว่าปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมคือ เพอร์ริคคอลลอยด์ 50 มก./ล. สารส้ม 100 มก./ล. และปูนขาว 250 มก./ล. แล้วเติมโพลีเมอร์ประจุลบยี่ห้อ Procifloc A 252 เป็นสารช่วยรวมตะกอนปริมาณ 0.2 – 0.4 มก./ล. พบว่า สารส้มสามารถกำจัดซีโอดีได้ 28.36% และยังพบอีกว่าปูนขาวมักมีปัญหาในเรื่องการดำเนินการในระบบบำบัดจริง พร้อมทั้งทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นและเกิดปริมาณตะกอนมากส่วนเพอร์ริคคอลลอยด์มักจะมีอนุภาคไม่ตกตะกอนและมีปริมาณของซัลไฟด์สูง ทำให้น้ำที่ได้มีสีดำไม่น่าใช้

โอบาส แสงทองประกาย (2546) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่า สารส้มน้ำและโพลีออลูมิเนียมคลอไรด์ไม่จำเป็นต้องปรับพีเอชก่อนการบำบัดยกเว้นปูนขาวจำเป็นต้องปรับพีเอชของน้ำเสียก่อนการบำบัดเมื่อเปรียบเทียบกับสารสร้างตะกอนทั้งสามแล้วสามารถสรุปได้ว่าโพลีออลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) มีความเหมาะสมเป็นสารสร้างตะกอนมากที่สุดส่วนค่าใช้จ่ายของสารเคมีในการบำบัดคือ 10.24 บาท/ลบ.ม.

กุลภัทร์ พิธิษฐ์กุล และ จักรกฤษ เรืองการ (2543) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยวิธีการทางเคมี จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เพอริคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งทั้งหมดได้ดีที่สุด 91% ที่ความเข้มข้น 220 มก./ล. ขณะที่โพสโซลูมิเนียมคลอไรด์ จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและให้ปริมาณตะกอนสูงสุด โดยสรุปแล้วสารโคแอกกูแลนต์ทั้งสามชนิดคือ สารส้ม โพสโซลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) และเพอริคลอไรด์ ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารสูงสุดที่ความเข้มข้น 140 มก./ล., 25 มก./ล. และ 180 มก./ล. ตามลำดับ



### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการศึกษา การบำบัดกรดน้ำส้มในน้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการของวิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา ซึ่งมีรายละเอียดในการดำเนินการวิจัยดังนี้

#### น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา

น้ำเสียที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ เป็นน้ำเสียจากกระบวนการดองพริกของโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร โดยเป็นน้ำเสียที่มีความเป็นกรดสูงจากกรดน้ำส้มและมีความเค็ม โดยจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำด้วยวิธีตักจ้วง (Grab sampling) ลักษณะน้ำเสียแสดงดังภาพ 8 และตาราง 2 แสดงวิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย



ภาพ 8 น้ำเสียกรดน้ำส้มจากกระบวนการดองพริก

## ตาราง 2 วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียในการวิจัย

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	Gravimetric method
ซีโอดี (มก./ล.)	Close reflux method
ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์/ซม.)	Conductivity meter
พีเอช (pH)	pH meter

### เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียในการดำเนินการวิจัยนี้เป็นไปตามรายละเอียดของการวิเคราะห์พารามิเตอร์แต่ละค่าตามที่กำหนดไว้ใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA,1992) และคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2545)

2. อุปกรณ์ทำจาร์เทสต์ (Jar Test) สำหรับวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูเลชัน

### สารเคมีที่ใช้ทำการวิจัย

1. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้เป็นไปตามรายละเอียดในการวิเคราะห์พารามิเตอร์แต่ละค่าตามที่กำหนดไว้ใน Standard Methods for the Examination of Water and Waste water (APHA, 1992) และคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2545)

2. สารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ได้แก่ สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl, Polyaluminium chloride 18% $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และปูนขาว ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )

3. สารโคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulant aid) ได้แก่ สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ชนิด non-ionic polyacrylamide



## การดำเนินการศึกษา

ทำการทดลองด้วยวิธี Jar Test เพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์ และการเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูแลชันด้วยสารโคแอกกูแลนต์เอ็ด

การดำเนินการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทดลองดังนี้

### 1. การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูแลชัน

การหาสภาวะค่าพีเอชที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูแลชันของน้ำเสียจะทำการศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดของสารโคแอกกูแลนต์ทั้ง 3 ชนิด โดยทดลองด้วยวิธี Jar Test โดยใช้น้ำเสียดัวอย่าง 500 มล. ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มล. จำนวน 8 ใบ หลังจากนั้นเติมสารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ ) ที่มีความเข้มข้น 1,000 มก./ล. ปริมาตร 50 มล. ทำการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียในการทดลอง โดยมีการควบคุมค่าพีเอชต่างๆ ดังนี้คือ 3.0 (ไม่ปรับพีเอช), 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0 และ 11.0 ด้วยสาร 6.0N NaOH ไปพร้อมกระบวนการกวนเร็วที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นทำการกวนช้าที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วปิดเครื่องกวน และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นดูตุน้ำส่วนที่ใสในบีกเกอร์โดยเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึก 2 ซม. จากระดับผิวน้ำ ไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ซีโอดี และค่าของแข็งแขวนลอยเพื่อหาค่า Optimum pH ที่เหมาะสมในกระบวนการโคแอกกูแลชัน ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนชนิดของสารโคแอกกูแลนต์เป็นชนิดโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl, Polyaluminium chloride 18%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และปูนขาว ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ตามลำดับ ที่ค่าความเข้มข้นและปริมาตรเท่ากัน

### 2. การศึกษาชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูแลชัน

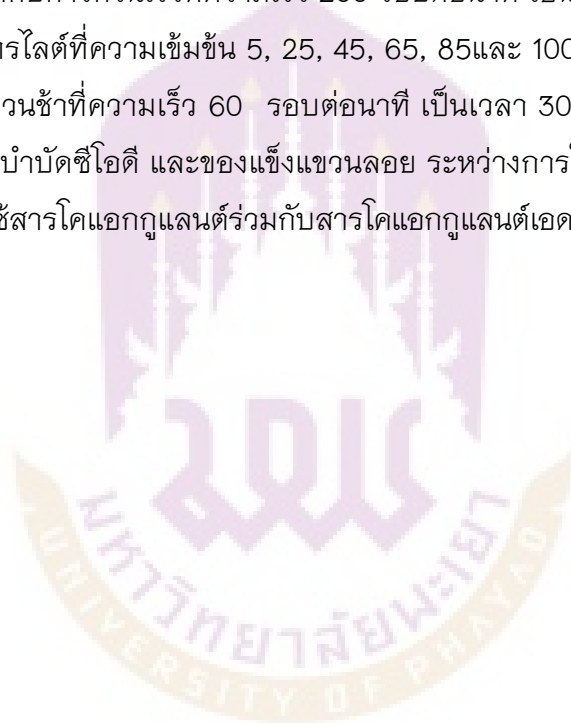
การหาชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูแลชันในการศึกษาในครั้งนี้ โดยทดลองด้วยวิธี Jar Test โดยใช้น้ำเสียดัวอย่าง 500 มล. พร้อมกับทำการปรับค่าพีเอชให้มีค่าเหมาะสมที่สุดตามผลการทดลองในข้อ 1 ใส่น้ำตัวอย่างลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มล. จำนวน 6 ใบ หลังจากนั้นนำน้ำตัวอย่างไปกวนเร็วที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที พร้อมกับเติมสารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ ) ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 0, 500, 1,000, 1,500, 2,000 และ 2,500 มก./ล. ปริมาตร 100 มล. แล้วจึงทำการกวนช้าที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วปิดเครื่องกวน และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นดูตุน้ำส่วนที่ใสในบีกเกอร์โดยเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึก 2 ซม. จากระดับผิวน้ำ ไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ซีโอดี และค่าของแข็งแขวนลอยเพื่อหาค่า Optimum dose ของสารโคแอกกูแลนต์ ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนชนิด



ของสารโคแอกกูแลนต์เป็นโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl, Polyaluminium chloride 18%  $Al_2O_3$ ) และปูนขาว ( $Ca(OH)_2$ ) ตามลำดับจากนั้นเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดที่ค่า Optimum dose เพื่อหาชนิดสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน

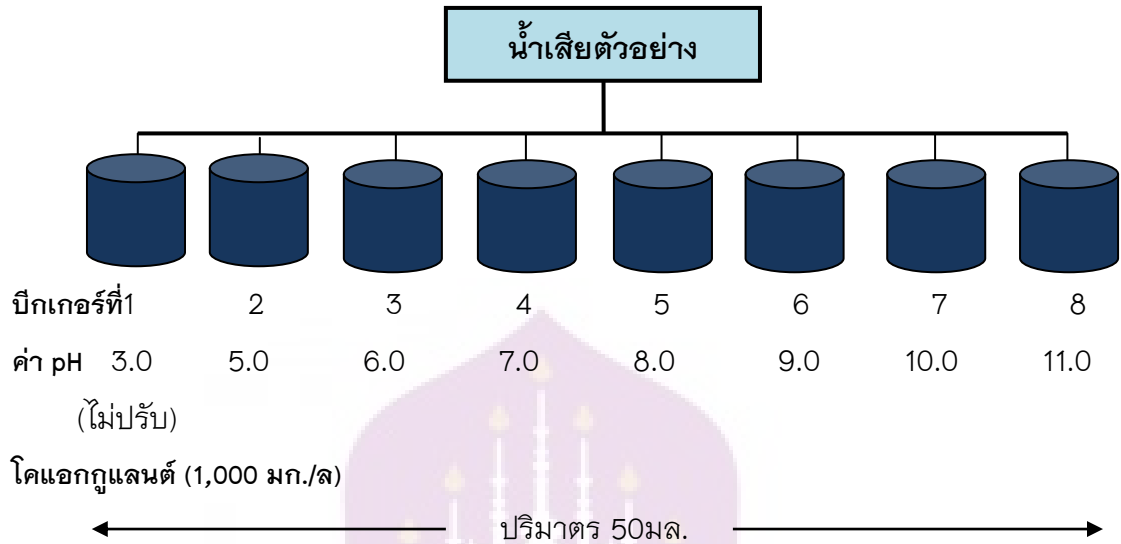
### 3. การศึกษาการเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์

ทำการศึกษาโดยใช้สารโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้น 1,500 และ 2,500 มก./ล.ทำการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับค่า Optimum pH โดยใช้ 6.0 N NaOH จากนั้นทำการเติมสารโคแอกกูแลนต์พร้อมกับการกวนเร็วที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นเติมสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้น 5, 25, 45, 65, 85 และ 100 มก./ล. ปริมาตร 50 มล. ตามลำดับ ทำการกวนช้าที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาทีทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี และของแข็งแขวนลอย ระหว่างการใช้สารโคแอกกูแลนต์เพียงอย่างเดียว กับการใช้สารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับสารโคแอกกูแลนต์เฮด (โพลีอิเล็กโทรไลต์)

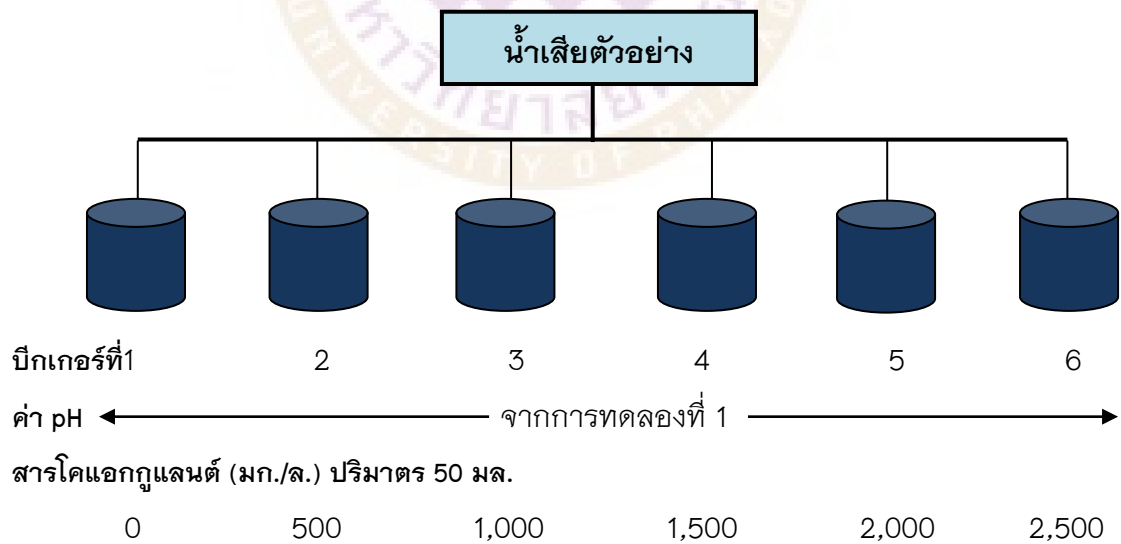


สรุปแผนการศึกษาวิจัย

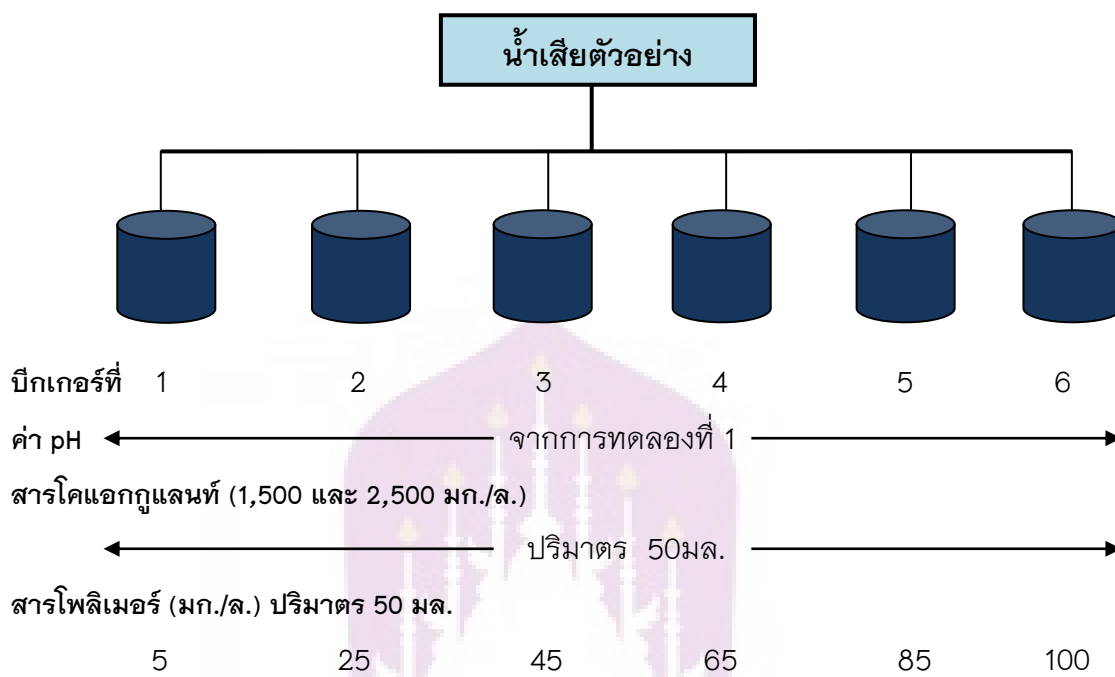
แผนการทดลองที่ 1 : ศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน



แผนการทดลองที่ 2 : ศึกษาชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน



**แผนการทดลองที่ 3 :** ศึกษาการเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชัน  
ด้วยการใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

การศึกษากำบัตการรดน้ำส้มในน้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ทำการทดลองด้วยวิธี Jar Test เพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์ และการเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารโคแอกกูแลนต์เอด แสดงผลการศึกษาดังนี้

#### ลักษณะสมบัติน้ำเสียกรดน้ำส้ม

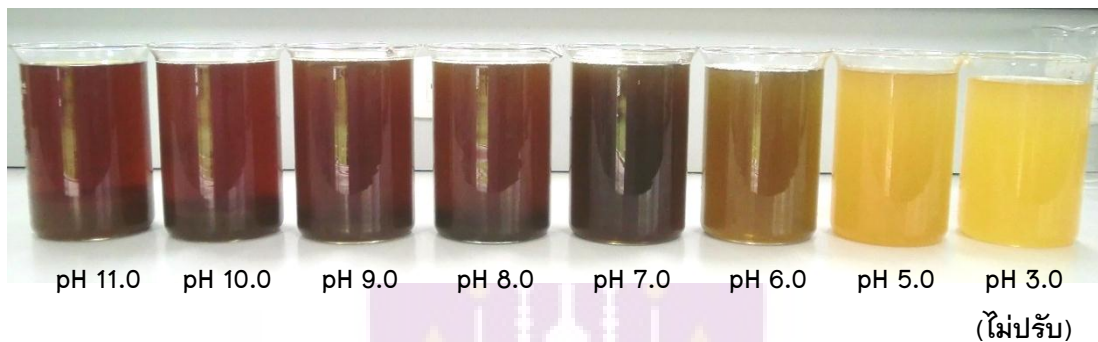
น้ำเสียกรดน้ำส้มที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นน้ำทิ้งที่เหลือจากการดองพริกโดยน้ำดองพริกจะประกอบด้วยส่วนผสมของน้ำส้มสายชูเข้มข้น (99%) ร้อยละ 5 และเกลือบริสุทธิ์ (97%) ร้อยละ 5 ซึ่งเมื่อทำการดองเสร็จแล้ว จะนำพริกที่ดองได้ที่ออกไปใช้ในการผลิต น้ำดองพริกส่วนที่เหลือจะถือว่าเป็นน้ำทิ้งไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ปริมาณน้ำเสียดังกล่าวจากการดองพริกมีประมาณ 5-10 ลบ.ม./วัน หรือประมาณ 150-300 ลบ.ม./เดือน ลักษณะของน้ำเสียกรดน้ำส้มแสดงในตาราง 3 โดยมีความเป็นกรดและค่าซีไอดีสูงมาก คือค่าพีเอช  $2.94 \pm 0.30$  และค่าซีไอดี  $54,400 \pm 5,000$  มก./ล. โดยไม่สามารถวิเคราะห์หาค่าบีไอดีได้เลย นอกจากนี้ยังมีค่าของแข็งแขวนลอย  $264 \pm 50$  มก./ล.

#### ตาราง 3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย

พารามิเตอร์	ช่วงค่า	ค่าเฉลี่ย
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	256.6 – 270.0	263.3
ซีไอดี (มก./ล.)	44,800 – 60,000	54,400
ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์/ซม.)	34.35 – 34.55	34.45
พีเอช (pH)	2.94 – 2.96	2.95

### ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน

จากการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่าหลังจากการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียกรดน้ำส้มด้วยสาร NaOH ก่อนการทำ Jar Test เพื่อให้ได้ค่าพีเอชเริ่มต้นการทดลองที่ค่าต่าง ๆ อันได้แก่ 3.0 (ไม่ปรับ), 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0 และ 11.0 นั้นเกิดการตกตะกอนขึ้นและน้ำเสียกรดน้ำส้มมีสีเข้มขึ้นดังแสดงในภาพ 9 และ 10

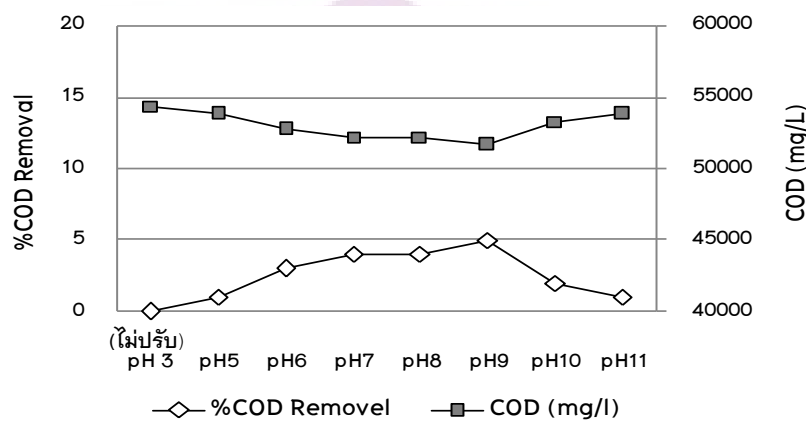


ภาพ 9 ลักษณะการตกตะกอนของน้ำเสียกรดน้ำส้มหลังจากการปรับพีเอชที่ค่าต่าง ๆ

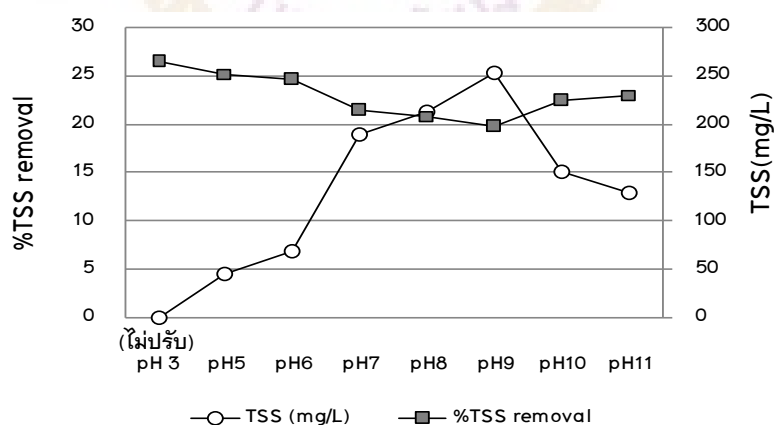


ภาพ 10 ลักษณะการตกตะกอนของน้ำเสียกรดน้ำส้มหลังจากการปรับค่า pH (ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 11.0)

เมื่อพิจารณาค่าซีไอดีและของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียหลังการปรับพีเอช (ก่อนทำ Jar Test) พบว่าสามารถบำบัดซีไอดีและของแข็งแขวนลอยได้เล็กน้อย (ภาพ 11 และ 12 ตามลำดับ) การปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 5.0–11.0 สามารถบำบัดซีไอดีได้ประมาณ 1–5% จากค่าซีไอดีเริ่มต้น 54,4000 มก./ล. (ลดซีไอดีได้ประมาณ 500–2,700 มก./ล.) และสามารถลดของแข็งแขวนลอยได้เหลือประมาณ 200–240 มก./ล. จากค่าของแข็งแขวนลอยเริ่มต้น 260 มก./ล. ซึ่งสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอยได้ประมาณ 4–25% ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการปรับพีเอชโดยการเติมต่าง NaOH ช่วยลดค่าซีไอดีและของแข็งแขวนลอยได้เล็กน้อยจากการตกตะกอนทางเคมีที่เกิดขึ้น

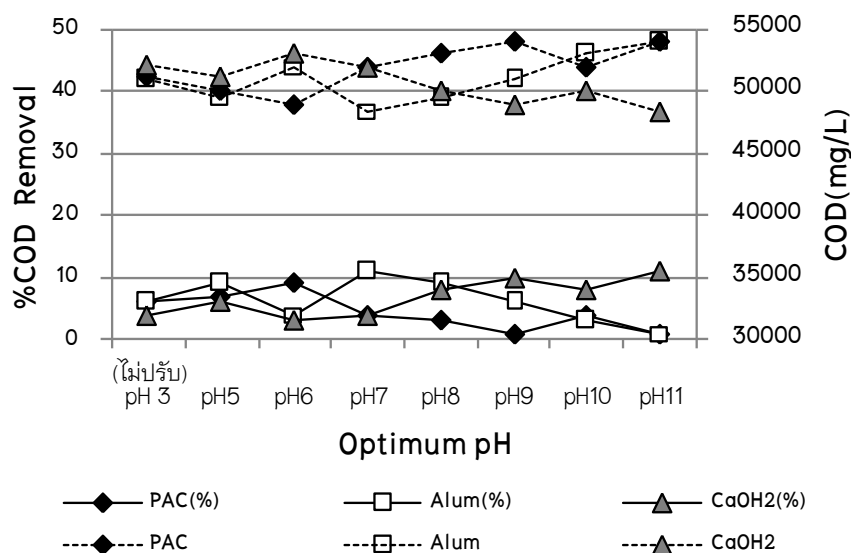


ภาพ 11 ค่าซีไอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มจากการปรับค่าพีเอชต่าง ๆ ก่อนทำ Jar Test

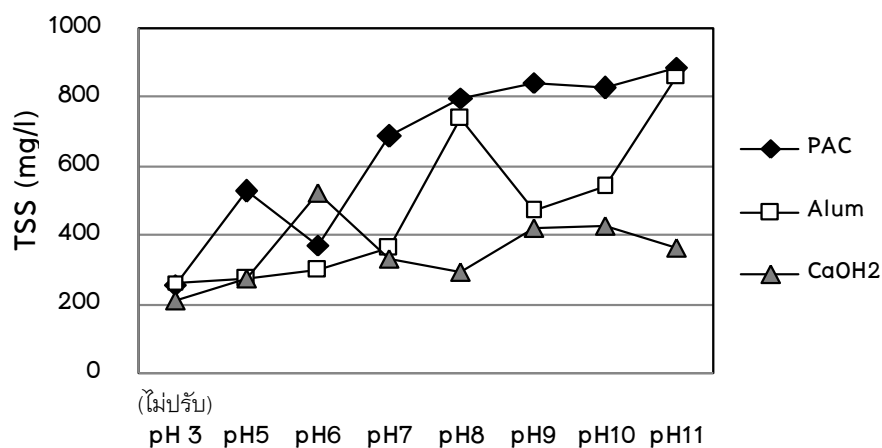


ภาพ 12 ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียกรดน้ำส้มจากการปรับค่าพีเอชต่าง ๆ ก่อนทำ Jar Test

การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยทำการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดของสารโคแอกกูแลนต์ ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACI) และปูนขาว ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ซึ่งควบคุมความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากัน คือ 1,000 มก./ล. ทำการทดลองด้วยวิธี Jar Test และควบคุมค่าพีเอชต่าง ๆ ดังนี้ 3.0 (ไม่ปรับพีเอช), 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0 และ 11.0 ทำการกวนเร็ว (200 รอบต่อนาที) 2 นาที กวนช้าที่ (60 รอบต่อนาที) 30 นาที และตกตะกอน 60 นาที ได้ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับบำบัดค่าซีโอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มดังแสดงในภาพ 13 พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์ทั้งสามชนิด (สารส้ม โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ และปูนขาว) โดยสามารถบำบัดซีโอดีได้ดีที่สุด (11% COD removal) คือ สารส้ม ที่ค่าพีเอช 7.0 และปูนขาวที่ค่าพีเอช 11.0 ส่วนโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ ที่ค่าพีเอช 6.0 บำบัดซีโอดีได้ 9% และค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียเมื่อเติมสารโคแอกกูแลนต์ทั้งสามชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปรับค่าพีเอชเพิ่มขึ้น (ภาพ 14) ซึ่งถือว่าเป็นข้อจำกัดหนึ่งของการบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมี คือ มีตะกอนเกิดขึ้นในระบบ ส่วนค่าบีโอดีไม่สามารถวิเคราะห์ได้เลยทั้งก่อนและหลังการทดลองปรับพีเอชและการทำ Jar test เป็นไปได้ว่าสภาพความเป็นกรดและความเค็มที่สูงของน้ำเสียกรดน้ำส้มทำให้จุลินทรีย์ตายไม่สามารถวัดความสกปรกของน้ำเสียในรูปบีโอดีได้ ดังนั้นในการติดตามประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันที่สภาวะต่าง ๆ จึงพิจารณาจากประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเป็นหลัก



ภาพ 13 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มที่ค่าพีเอชต่าง ๆ



ภาพ 14 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

ในการกำหนดค่าพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการโคแอกกูเลชันนั้น ต้องพิจารณาปัจจัยหลายด้าน ได้แก่ ความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ ความเหมาะสมในด้านค่าใช้จ่ายและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น (ภาพ 15 แสดงลักษณะการเกิดตะกอนหลังทำ Jar Test สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน) ทั้งนี้การควบคุมหรือการปรับค่าพีเอชให้สูงขึ้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีขึ้นนั้น ต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในส่วนของสารเคมีที่ใช้ รวมถึงปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นการกำหนดค่าพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการโคแอกกูเลชันในการศึกษานี้ จึงพิจารณาโดยเลือกสภาวะ (ค่าพีเอช) ที่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีพอสมควร ใช้สารเคมีในปริมาณน้อย และเกิดตะกอนไม่มากเกินไป อันได้แก่ สภาวะการบำบัดที่พีเอช 7.0 ถือเป็นพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้ม เพื่อนำไปศึกษาต่อในการหาชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมต่อไป

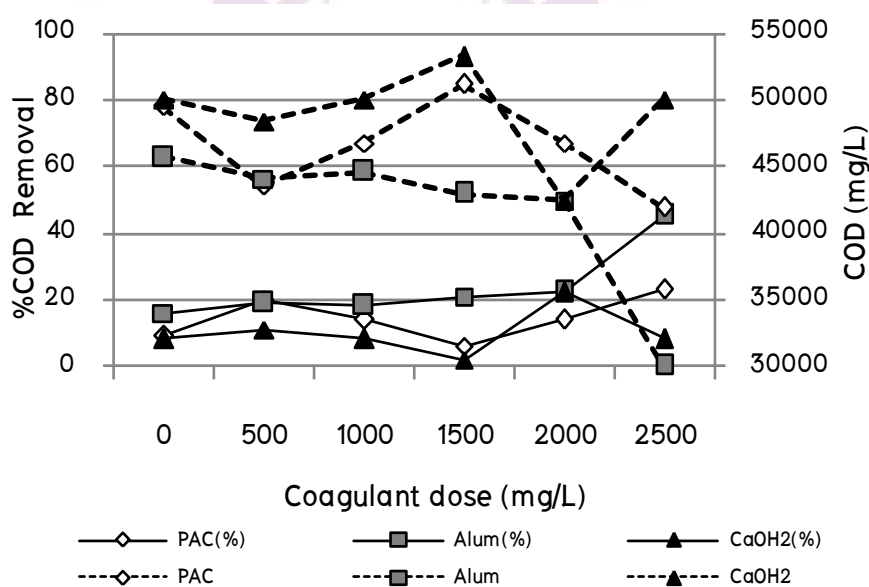


ภาพ 15 การตกตะกอนหลังการทำ Jar test ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

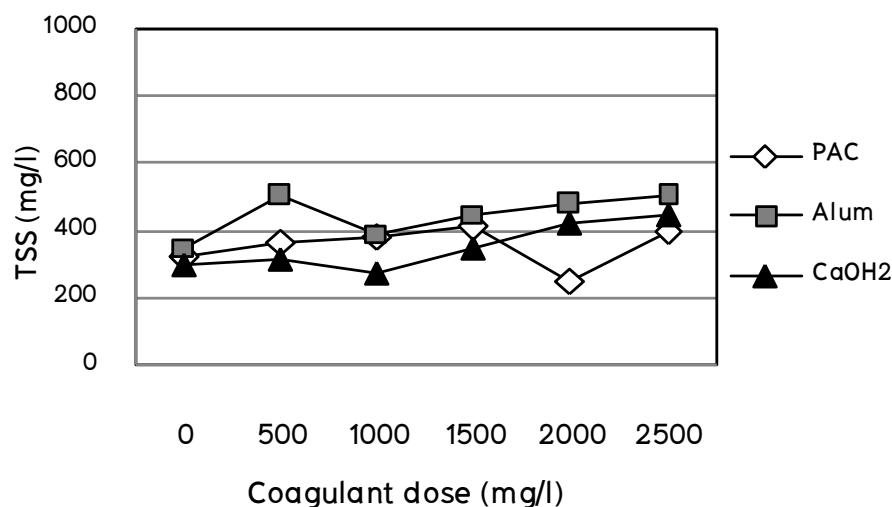


## ผลการศึกษาหาชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน

การศึกษาหาชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยทำการควบคุมพีเอชเท่ากับ 7.0 และปรับปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 0, 500, 1,000, 1,500, 2,000 และ 2,500 มก./ล. จากนั้นเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดในการบำบัดซีโอดี (ภาพ 16) พบว่า สารส้มที่ความเข้มข้น 2,500 มก./ล. สามารถบำบัดค่าซีโอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีเท่ากับ 45% และแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารส้มที่เพิ่มขึ้น โดยค่าซีโอดีหลังการบำบัดยังคงค่อนข้างสูง (30,000 มก./ล.) แต่อย่างไรก็ตามถือว่าบำบัดซีโอดีลงได้พอสมควรจากค่าซีโอดีเริ่มต้นประมาณ 54,000 มก./ล. เหลือ 30,000 มก./ล. นอกจากนี้แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าของแข็งแขวนลอยไม่สูงมากนัก เมื่อเพิ่มปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ทั้งสามชนิด (ภาพ 17) โดยปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงของแข็งแขวนลอยประมาณ 300–500 มก./ล.



ภาพ 16 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มของสารโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



ภาพ 17 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียกรดน้ำส้มของสารโคแอกกูแลนต์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มทั้งหมดข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า การใช้สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ ) ที่ความเข้มข้น 2,500 มก./ล. ที่ค่าพีเอช 7.0 ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในการบำบัดซีไอดี (45% COD removal) จากการทดสอบด้วยวิธี Jar test โดยทำการกวนเร็ว (200 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 2 นาที กวนช้า (60 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 นาที และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที แต่อย่างไรก็ตามปริมาณซีไอดีที่เหลือหลังจากการบำบัดยังคงค่อนข้างสูง (30,000 มก./ล.) และยังคงไม่สามารถวิเคราะห์ค่าซีไอดีได้

ดังนั้นจากสมมติฐานและการทบทวนวรรณกรรมต่าง ๆ ที่แสดงความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเป็นกรดก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดทางชีวภาพนั้น ผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันที่ค่อนข้างจำกัดสำหรับน้ำเสียกรดน้ำส้มที่มีความเป็นกรดสูงมาก (pH 2.94 – 2.96)

เช่นเดียวกับกรณีศึกษาของ Tatsi et al. (2003) ซึ่งบำบัดน้ำชะขยะใหม่จากหลุมฝังกลบขยะตามหลักสุขาภิบาล โดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น น้ำเสียจากน้ำชะขยะใหม่จะมีค่าพีเอชค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 4.9–6.7 และมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์หรือค่าความสกปรกค่อนข้างสูง โดยมีค่าซีไอดี 44,000–115,000 มก./ล. และค่าบีโอดี 95,000–80,800 มก./ล. กระบวนการโคแอกกูเลชัน (ใช้สารเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับสารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ปริมาณ 3.0 ก./ล. และพีเอชเท่ากับ 10.0) มีประสิทธิภาพการ

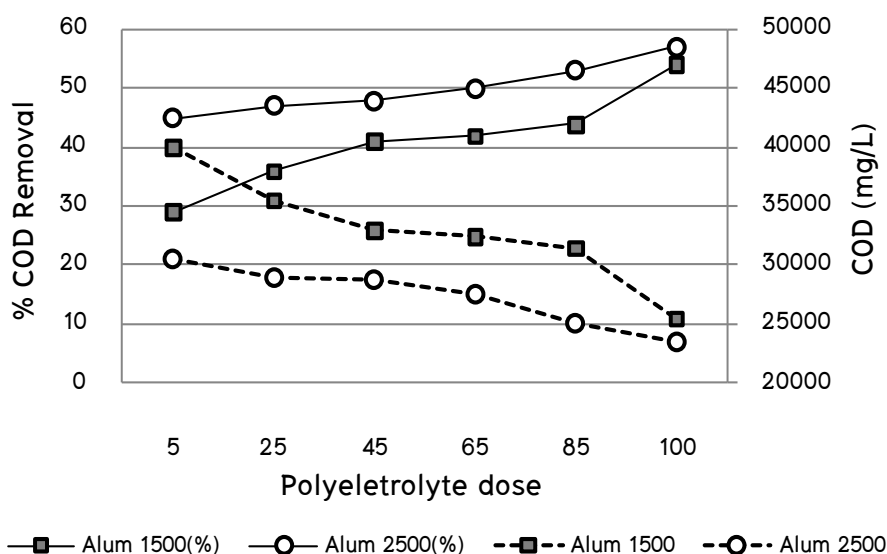
บำบัดค่อนข้างต่ำเช่นกัน (25–38% COD removal) ซึ่งก็ยังคงเหลือค่าซีโอดีหลังการบำบัดที่ค่อนข้างสูงอยู่เช่นกัน

ส่วนผลการศึกษาของ Karthik (2007) ที่ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีความเป็นกรดจาก Purified terephthalic acid (PTA) สมบัติของน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4.7–6.2 และค่าซีโอดี 7,402–10,800 มก./ล. โดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นวิธีในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นและใช้สารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับปูนขาวเป็นสารสร้างตะกอนและเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนโดยใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ ชนิด Anionic พบว่าสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความเป็นกรดและเพิ่มค่าความสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) ของน้ำเสียได้ โดยสามารถบำบัดซีโอดีได้ถึง 63.1% และสามารถบำบัดบีโอดีได้ 45.2% โดยสัดส่วนบีโอดีต่อซีโอดีเพิ่มขึ้นเป็น 0.45 – 0.67

ในการกำหนดค่าปริมาณสารโคแอกกูแลนต์และค่าพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการโคแอกกูเลชันนั้น ต้องใช้สองปัจจัยในการพิจารณา คือ ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์และความเหมาะสมทางด้านค่าใช้จ่าย ทั้งนี้เนื่องจากการที่เราเพิ่มปริมาณสารโคแอกกูแลนต์และควบคุมค่าพีเอชให้มีค่าสูงขึ้นนั้น ต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในส่วนของสารเคมีที่ใช้ ดังนั้นการกำหนดค่าปริมาณสารโคแอกกูแลนต์และควบคุมค่าพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการโคแอกกูเลชันนั้นทำได้โดยเลือกสภาวะที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดีพอสมควรและใช้สารเคมีในปริมาณน้อย

### **ผลการศึกษาการเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์**

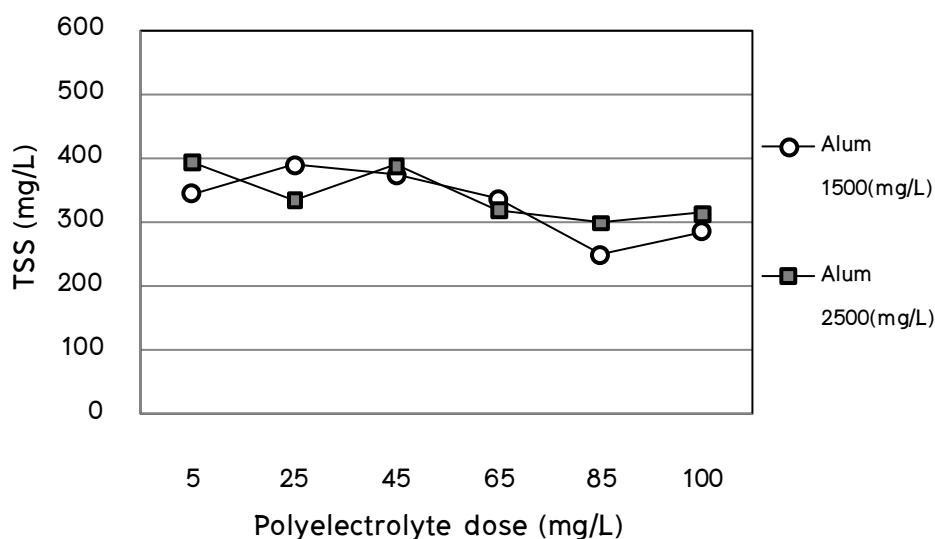
สารโพลีอิเล็กโทรไลต์นิยมใช้เป็นสารเคมีที่เติมร่วมกับสารโคแอกกูแลนต์เพื่อช่วยให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันได้ดียิ่งขึ้นจากการศึกษาพบว่า การใช้ความเข้มข้นของสารโพลีอิเล็กโทรไลต์เริ่มต้นเท่ากับ 5, 25, 45, 65, 85 และ 100 มก./ล. ร่วมกับสารโคแอกกูแลนต์ สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ความเข้มข้น 1,500 และ 2,500 มก./ล. ที่ค่าพีเอช 7.0 สามารถบำบัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียกรดน้ำส้มได้มีประสิทธิภาพกว่าการใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์เพียงอย่างเดียว (ภาพ 18)



ภาพ 18 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยใช้สารส้มร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

การใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 2,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจะสูงกว่าการใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 1,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้นเดียวกัน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสารโพลีอิเล็กโทรไลต์มากขึ้นจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของกรณีสารส้มที่ความเข้มข้น 1,500 มก./ล. จะสูงกว่ากรณีสารส้มที่ความเข้มข้น 2,500 มก./ล. จะเห็นได้ว่ากรณีสารส้มที่ความเข้มข้น 1,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้น 100 มก./ล. (54% COD removal) จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงใกล้เคียงกับกรณีสารส้มที่ความเข้มข้น 2,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้น 85 และ 100 มก./ล. (53% และ 57% COD removal ตามลำดับ)

เมื่อพิจารณาจากค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่บำบัดนั้น (ภาพ 19) พบว่ากรณีสารส้มที่ความเข้มข้น 1,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ 85 และ 100 มก./ล. มีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำที่บำบัดน้อยกว่ากรณีสารส้มที่ความเข้มข้น 2,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้นเดียวกัน



ภาพ 19 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียกรดน้ำส้มที่มีการใช้สารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ

จากการหาสภาวะที่ดีที่สุดของกระบวนการโคแอกกูแลชั่นที่มีการใช้สารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ นั้น ผลการทดลองหาปริมาณสารนั้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะเห็นว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงสุด 57% COD removal ได้แก่ กรณีใช้สารส้มที่มีความเข้มข้น 2,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ 100 มก./ล. ส่วนการใช้สารส้มที่มีความเข้มข้น 1,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ 100 มก./ล. ซึ่งให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าเล็กน้อย (54% COD removal) แต่มีตะกอนของแข็งแขวนลอยน้อยกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้สารส้มที่มีความเข้มข้น 1,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ 100 มก./ล. เนื่องจากมีการใช้สารในปริมาณที่น้อยกว่าและประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีไม่แตกต่างกันมากนัก อีกทั้งทั้งตะกอนของแข็งแขวนลอยที่มีน้อยกว่าอีกด้วย

การใช้สารส้มที่มีความเข้มข้น 1,500 มก./ล. และ 2,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ปริมาณต่าง ๆ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีจะต่างกันไม่มาก โดยการใช้สารส้มที่มีความเข้มข้น 1,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ปริมาณต่าง ๆ จะมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 29 – 54% ส่วนการใช้สารส้มที่มีความเข้มข้น 2,500 มก./ล. ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีจะอยู่ในช่วง 45 – 57% ซึ่งค่าซีโอดีถือเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้ม แต่เมื่อพิจารณาพร้อมกับประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยการใช้สารส้มที่มีความเข้มข้น 1,500 มก./ล. จะบำบัดของแข็งแขวนลอยได้ดีกว่าการใช้สารส้มที่มีความเข้มข้น 2,500 มก./ล.

ซึ่งคล้ายกับผลการศึกษาของ Amuda (2006) ที่ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม โดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งระบุว่า การบำบัดด้วยเพอร์ริคลอไรด์ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ ณ สภาวะที่เหมาะสม (เพอร์ริคลอไรด์ 100 มก./ล. และโพลีอิเล็กโทรไลต์ 25 มก./ล.) สามารถบำบัดซีไอดี ฟอสฟอรัส และของแข็งแขวนลอยได้ 91%, 99% และ 97% ตามลำดับ เกิดตะกอนสลัดจ์ลดลงถึง 60% เมื่อเทียบกับการใช้เพอร์ริคลอไรด์เพียงอย่างเดียว

นอกจากนี้ยังมีประเด็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับข้อจำกัดของกระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัดกรดน้ำส้ม คือ เมื่อน้ำเสียกรดน้ำส้มผ่านการปรับพีเอชด้วย NaOH เพื่อให้ได้พีเอชต่างๆ (3.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0 และ 11.0) ก่อนทำ Jar test พบว่าเมื่อปรับค่าพีเอชเพิ่มขึ้นทำให้น้ำเสียเกิดสีเข้มขึ้นตามลำดับเมื่อเทียบกับที่ระดับ pH 3.0 ซึ่งไม่มีการปรับพีเอชเป็นลักษณะสีของน้ำดองพริกที่เก็บมาจากโรงงานศึกษา (ภาพ 20)



ภาพ 20 น้ำเสียกรดน้ำส้มเมื่อปรับค่าพีเอชต่าง ๆ ด้วย NaOH หลังทำ Jar test



เมื่อผ่านการทำ Jar test ทิ้งให้ตกตะกอน พบว่า สีของน้ำยังคงเข้มอยู่โดยเฉพาะน้ำที่มีความเป็นด่าง (ภาพ 21) ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบหาสาเหตุของสีที่เกิดขึ้นจากการเติมต่าง NaOH ในน้ำเสียกรดน้ำส้ม โดยนำน้ำดองที่ยังไม่ได้ทำการดองฟริก ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบของน้ำส้มสายชูเข้มข้น (99%) ร้อยละ 5 และเกลือบริสุทธ์ (97%) ร้อยละ 5 ลักษณะสีของน้ำดองดังกล่าวจะมีลักษณะใส ไม่มีสี เมื่อนำมาทำการปรับค่าพีเอชด้วยสาร NaOH ที่ค่าพีเอชควบคุมต่าง ๆ (3.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0 และ 11.0) พบว่าไม่เกิดสีน้ำดองที่พีเอชต่าง ๆ ยังคงลักษณะใส ไม่มีสี เช่นเดียวกับน้ำดองเริ่มต้น ดังนั้นจึงสามารถอนุมานได้ว่าสีของน้ำเสียกรดน้ำส้มที่เกิดขึ้นหลังการปรับพีเอชด้วยสาร NaOH น่าจะมาจากสารบางชนิดจากฟริกตกค้างอยู่หลังจากนำฟริกออกไปแล้วทำให้กระบวนการโคแอกกูเลชันไม่สามารถบำบัดได้ประสิทธิภาพดีเท่าที่ควรและยังเกิดปัญหาสีของน้ำที่เข้มขึ้นอีกด้วย



ภาพ 22 น้ำเสียกรดน้ำส้มเมื่อปรับค่าพีเอชต่าง ๆ ด้วย NaOH หลังทำ Jar test

#### ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

ในการพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ (ตาราง 4) พบว่าเมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายสำหรับสารส้มเพียงอย่างเดียว ณ สภาวะที่เหมาะสม (สารส้ม 2,500 มก./ล.) สำหรับการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้ม 1 ลบ.ม. ประกอบด้วย (1) ค่าใช้จ่ายของสาร NaOH ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชน้ำเสียให้เป็น 7.0 (NaOH แบบเกล็ดราคา 16.50 บาท/กก. อ้างอิงเมื่อเดือน มีนาคม 2555) มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 59.50 บาท/ลบ.ม. และ (2) ค่าใช้จ่ายของสารส้ม (ราคา 15 บาท/กก. อ้างอิงเมื่อเดือน มีนาคม 2555) มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 37.50 บาท/ลบ.ม. รวมเป็นค่าใช้จ่ายสารเคมีทั้งหมด (1)+(2) สำหรับการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้ม 1 ลบ.ม. ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 97 บาท ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีไม่สูงมาก (45% COD removal)

ตาราง 4 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของสารเคมีต่อการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้ม 1 ลบ.ม. กับประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

สภาวะการทดลอง	ค่าใช้จ่ายสารเคมี (บาท)			รวมทั้งหมด (บาท)	% COD Removal
	NaOH	Alum	Polyelectrolyte		
<b>Alum 1,500 มก./ล.</b>					
Polyelectrolyte 0 มก./ล. (ไม่เติม)	59.40	22.50	-	81.90	21.0%
Polyelectrolyte 5 มก./ล.	59.40	22.50	0.15	82.05	29.0%
Polyelectrolyte 25 มก./ล.	59.40	22.50	0.75	82.65	36.0%
Polyelectrolyte 45 มก./ล.	59.40	22.50	1.35	83.25	41.0%
Polyelectrolyte 65 มก./ล.	59.40	22.50	1.95	83.85	42.0%
Polyelectrolyte 85 มก./ล.	59.40	22.50	2.55	84.45	44.0%
Polyelectrolyte 100 มก./ล.	59.40	22.50	3.00	84.90	54.0%
<b>Alum 2,500 มก./ล.</b>					
Polyelectrolyte 0 มก./ล. (ไม่เติม)	59.40	37.50	-	96.90	45.0%
Polyelectrolyte 5 มก./ล.	59.40	37.50	0.15	97.05	45.0%
Polyelectrolyte 25 มก./ล.	59.40	37.50	0.75	97.25	47.0%
Polyelectrolyte 45 มก./ล.	59.40	37.50	1.35	98.25	48.0%
Polyelectrolyte 65 มก./ล.	59.40	37.50	1.95	98.85	50.0%
Polyelectrolyte 85 มก./ล.	59.40	37.50	2.55	99.45	53.0%
Polyelectrolyte 100 มก./ล.	59.40	37.50	3.00	99.90	57.0%

**หมายเหตุ :** สาร NaOH แบบเกล็ด ราคา 16.50 บาท/กิโลกรัม  
 สารส้ม ราคา 15.00 บาท/กิโลกรัม  
 สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ ราคา 30.00 บาท/กิโลกรัม  
 (อ้างอิงเมื่อเดือน มีนาคม 2555)

แต่เมื่อพิจารณาใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่สภาวะที่เหมาะสม คือ สารส้มที่ความเข้มข้น 1,500 มก./ล. ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ 100 มก./ล. คิดเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับ (1) สาร NaOH ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชคิดเป็น 59.50 บาท/ ลบ.ม. (2) สารส้มคิดเป็น 22.50 บาท/ลบ.ม. ร่วมกับ (3) สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ (ราคา 30 บาท/กก. อ้างอิงเมื่อเดือน มีนาคม 2555) คิดเป็น 3 บาท/ลบ.ม. รวมเป็นค่าใช้จ่ายสารเคมีทั้งหมด (1)+(2)+(3) สำหรับการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้ม 1 ลบ.ม. ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันเท่ากับ 85 บาท ซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีสูงขึ้นไปเป็น 54% COD removal



เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่าการใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มน้อยกว่าการใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์เพียงอย่างเดียว ดังนั้นการใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์จึงมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่า อีกทั้งประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าอีกด้วย



## บทที่ 5

### บทสรุป

ผลการศึกษาการบำบัดกรดน้ำส้มในน้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร โดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. สภาพที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีกรดน้ำส้มและมีความเค็มสูงจากกระบวนการหมักของผลผลิตทางการเกษตรโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารโคแอกกูแลนต์ทั้งสามชนิด (สารส้ม โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์และปูนขาว) ได้แก่ พีเอช 7.0 จากการพิจารณาโดยเลือกสภาวะที่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีพอสมควรใช้สารเคมีในปริมาณน้อย และเกิดตะกอนไม่มากเกินไป และเมื่อทำการทดสอบหาชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม พบว่า สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ความเข้มข้น 2,500 มก./ล.สามารถบำบัดซีไอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มได้ดีที่สุด เท่ากับ 45% โดยบำบัดซีไอดีจาก 54,000 มก./ล.เหลือ 30,000 มก./ล. ซึ่งถือว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มของกระบวนการโคแอกกูเลชันไม่ดีเท่าที่ควร

2. การเสริมประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการใช้สารโคแอกกูแลนต์เอด (โพลีอิเล็กโทรไลต์) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีได้เป็น 54% ที่สภาวะพีเอช 7.0 สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) ความเข้มข้น 1,500 มก./ล.ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ 100 มก./ล. นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ถือว่าประหยัดกว่าการใช้สารส้มเพียงอย่างเดียว

3. ปัญหาในการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้ม นอกจากการรับมือกับตะกอนเคมีที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแล้ว กรณีน้ำเสียกรดน้ำส้มจากการดอกพริกยังพบปัญหาเฉพาะจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน คือ ลักษณะสีของน้ำเสียที่เข้มข้น (สีน้ำตาล) หลังจากการปรับพีเอชด้วยสาร NaOH ซึ่งจากผลการทดสอบของผู้วิจัยชี้ชัดให้เห็นว่าน่าจะมาจากสารตกค้างจากพริกไม่ใช้การทำปฏิกิริยากันระหว่างน้ำดองกับสาร NaOH

4. แนวทางการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียที่มีกรดน้ำส้มและมีความเค็มสูงจากกระบวนการหมักของผลผลิตทางการเกษตร โดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในกรณีศึกษา นี้จึงไม่น่าจะเป็นทางเลือกอันดับแรก ๆ สำหรับการปรับปรุงกระบวนการบำบัดขั้นต้นของโรงงาน อันเนื่องจากปัญหาเรื่องสีและตะกอนที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้น

### ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1. หากต้องใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มจากโรงงานแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเป็นการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น ควรทำการศึกษาาระบบบำบัดน้ำเสียอื่นเพิ่มเติมเพื่อบำบัดต่อในขั้นต่อไป

2. เพื่อให้ทราบถึงสาเหตุที่ชัดเจน ควรศึกษาว่าสารชนิดใดในพริกที่ตกค้างในน้ำเสียกรดน้ำส้มและเป็นสาเหตุให้เกิดสีเข้มขึ้นเมื่อทำการปรับพีเอชด้วยสาร NaOH เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิธีการกำจัดสีที่เกิดขึ้นต่อไป

3. การใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มจะต้องรับมือกับตะกอนเคมีที่เกิดขึ้นการเติมสารเคมีลงไปเพื่อช่วยในการตกตะกอน ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาวิธีการกำจัดตะกอนเคมีที่เกิดขึ้นอย่างถูกต้องด้วย



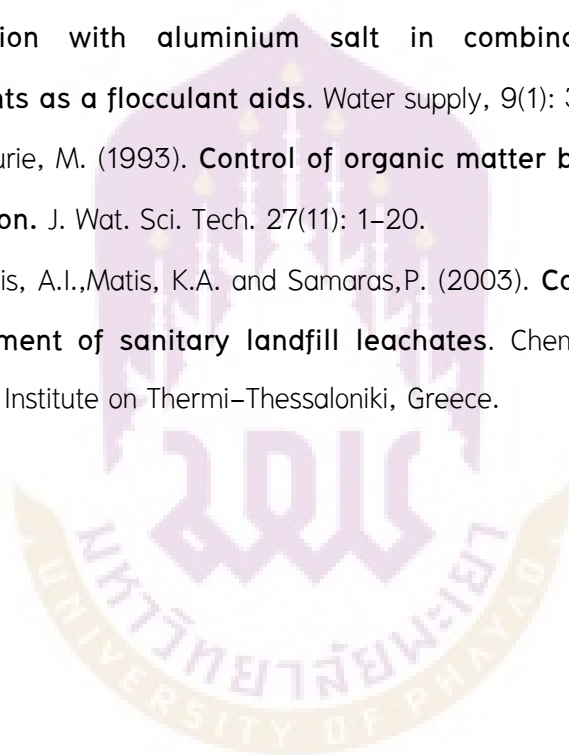


บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

- กุลภัทร์ พิสิษฐ์กุล และ จักรกฤษ เรืองการ. (2543). **การบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยกระบวนการทางเคมี**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2553). **เกณฑ์การออกแบบระบบรวบรวมน้ำเสียและระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน**. กรุงเทพฯ.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2545). **ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ**. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2537). **การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชัยวัฒน์ บุญญติศรีสกุล. (2540). **การกำจัดทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการสร้างและการรวมตะกอนด้วยสารรวมตะกอนชนิดต่าง ๆ**. วิทยานิพนธ์. วศ.ม., มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. (2538). **วิศวกรรมการประปา เล่ม 1**. พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัศวินท์ พุ่มไพศาลชัย. (2548). **การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติชนิดชอบน้ำและไม่ชอบน้ำในอ่างเก็บน้ำโดยโคแอกกูเลชันที่ใช้สารส้ม**. วิทยานิพนธ์. วศ.ม., มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.
- โอภาส แสงทองประกาย. (2546). **การบำบัดน้ำเสียจากชุมชนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน**. วิทยานิพนธ์. วศ.ม., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- APHA, AWWA and WEF., (1992). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 18<sup>th</sup> Edition. Maryland : Victor Graphic , Inc.
- Amuda, O.S., Amoo, I.A. (2006). **Coagulation/flocculation process and sludge conditioning in beverage industrial wastewater treatment**. Nigeria.
- Eckenfelder, W.W.Jr. (1989). **Industrial Water Pollution Control**. 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Hammer, M.J. (1986). **Water and Wastewater Technology**. SI Version, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Jimenez B., C.A., Leyva A., Techobanoglous.G. (2000). **Sand and synthetic medium**

- filtration of advanced primary treatment effluent.** Water Research. Mexico.
- Karthik, M. (2007). **Biodegradability enhancement of purified terephthalic acid wastewater by coagulation–flocculation process as pretreatment.** National Environmental Engineering Research Institute on Nehru Marg, India.
- Karthik, M., Dafale, N., Pathe, P. and Nandy, T. (2008). **Biodegradability enhancement of purified terephthalic acid wastewater by coagulation–flocculation process as pretreatment.** Journal of Hazardous Materials. 154(1–3): 721–730.
- Narkis, N., Ghattas, B., Rebhun, M. and Rubin, A.J. (1991). **The mechanism of flocculation with aluminium salt in combination with polymeric flocculants as a flocculant aids.** Water supply, 9(1): 37–44.
- Rebhun, M. and Lurie, M. (1993). **Control of organic matter by coagulation and floc separation.** J. Wat. Sci. Tech. 27(11): 1–20.
- Tatsi, A.A., Zouboulis, A.I., Matis, K.A. and Samaras, P. (2003). **Coagulation–flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates.** Chemical Process Engineering Research Institute on Themi–Thessaloniki, Greece.



ภาคผนวก



## ภาคผนวก ก การคำนวณค่าใช้จ่ายในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

### ตัวอย่างการคำนวณ

#### 1. ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายในกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับการใช้สารโพสลิอิเล็กโตรไลต์เป็นสารรวมตะกอน ในการทดลอง Jar test

การคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้ม โดยใช้สารโคแอกกูแลนต์ชนิดสารส้มพีเอช 7.0 โดยพิจารณาค่า สารส้มราคาเท่ากับ 15 บ./กก. (มีนาคม 2555)

ค่าสารโคแอกกูแลนต์ชนิด สารส้ม

เท่ากับ  $1,500/1,000 = 1.5$  กก./ลบ.ม.

คิดเป็นเงินเท่ากับ  $1.5 \times 15 = 22.50$  บาท/ลบ.ม.

การปรับค่าพีเอชของน้ำเสีย จากค่าพีเอช 2.9 เป็นพีเอช 7.0 ใช้สาร NaOH เข้มข้น 6 นอร์มัลปริมาตร 15 มล./ล. โดยพิจารณาค่า NaOHราคาเท่ากับ 16.50 บ./กก. (มีนาคม 2555)

โดยใช้สูตร 
$$\frac{g}{m} = \frac{CV}{1000}$$

แทนค่า

$g$  = กรัมของสารเคมีที่ใช้

$M$  = มวลโมเลกุลของสารเคมีที่ใช้

$C$  = ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้

$V$  = ปริมาตรของสารเคมีที่ใช้

แทนค่าในสูตร 
$$\frac{g}{40} = \frac{6 \times 15}{1000}$$

ดังนั้น  $g = 3.6$  กรัม

การปรับค่าพีเอชของน้ำเสียกรดน้ำส้ม  $1 \text{ m}^3$

ต้องใช้สาร NaOHเท่ากับ  $3.6 \times 1,000 = 3.6$  กิโลกรัม

คิดเป็นเงินเท่ากับ  $3.6 \times 16.50 = 59.40$  บาท/ลบ.ม.



การคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้ม โดยใช้สารโคแอกกูแลนต์เอเดชันด  
โพลีอิเล็กโทรไลต์โดยพิจารณาค่า สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ราคาเท่ากับ 30บ./กก.  
(มีนาคม 2555)

ค่าสารโคแอกกูแลนต์เอเดชันด โพลีอิเล็กโทรไลต์

เท่ากับ  $100/1,000 = 0.1$  กก./ลบ.ม.

คิดเป็นเงินเท่ากับ  $0.1 \times 30 = 3$  บาท/ลบ.ม.

**หมายเหตุ :** สาร NaOHแบบเกล็ด ราคา 16.50 บาท/กิโลกรัม  
สารส้ม ราคา 15.00 บาท/กิโลกรัม  
สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ ราคา 30.00 บาท/กิโลกรัม  
(อ้างอิงเมื่อเดือน มีนาคม 2555)



ภาคผนวก ข ภาพประกอบการวิจัย



ภาพผนวก 1 ลักษณะของพริกแดงที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพผนวก 2 ลักษณะของน้ำเสี้ยวจากการดองพริกที่ใช้ในงานวิจัย

ภาคผนวก ค ข้อมูลการบำบัดน้ำเสียกรดน้ำส้มโดยใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน

ตารางผนวก 1 ค่าซีโอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มจากการปรับค่าพีเอชต่าง ๆ ก่อนทำ Jar Test

pH	%COD Removal	COD(mg/L)
pH 3 (ไม่ปรับ pH)	0%	54,400
PH 5	1%	53,856
PH 6	3%	52,768
PH 7	4%	52,224
PH 8	4%	52,224
PH 9	5%	51,680
PH 10	2%	53,312
pH 1	1%	53,856

ตารางผนวก 2 ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียกรดน้ำส้มหลังจากการปรับค่าพีเอชต่าง ๆ ก่อนทำ Jar Test

pH	TSS(mg/L)
pH 3 (ไม่ปรับ pH)	264
PH 5	252
PH 6	246
PH 7	214
PH 8	208
PH 9	197
PH 10	224
pH 1	230

ตารางผนวก 3 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

Optimum pH	%COD Removal		
	Alum	CaOH <sub>2</sub>	PACI
pH 3 (ไม่ปรับ pH)	6%	4%	6%
PH 5	9%	6%	7%
PH 6	4%	3%	9%
PH 7	11%	4%	4%
PH 8	9%	8%	3%
PH 9	6%	10%	1%
PH 10	3%	8%	4%
PH 11	1%	11%	1%

ตารางผนวก 4 ค่าซีโอดีที่เหลือหลังการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

Optimum pH	COD (mg/L)		
	Alum	CaOH <sub>2</sub>	PACI
pH 3 (ไม่ปรับ pH)	51,000	52,224	51,136
PH 5	49,504	51,136	50,000
PH 6	52,000	53,000	48,959
PH 7	48,416	52,000	52,000
PH 8	49,504	50,000	53,000
PH 9	51,000	48,960	54,000
PH 10	53,000	50,000	52,000
PH 11	54,000	48,416	54,000

ตารางผนวก 5 ปริมาณของแข็งแขวนลอยหลังการบำบัดในน้ำเสียกรดน้ำส้มที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

Optimum pH	TSS (mg/L)		
	Alum	CaOH <sub>2</sub>	PACl
pH 3 (ไม่ปรับ pH)	260	206	255
PH 5	270	270	525
PH 6	295	520	370
PH 7	360	330	685
PH 8	735	290	795
PH 9	470	420	840
PH 10	540	425	825
PH 11	860	360	885

ตารางผนวก 6 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มของสารโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Coagulant dose (mg/L)	%COD Removal		
	Alum	CaOH <sub>2</sub>	PACl
0	16%	8%	9%
500	19%	11%	20%
1,000	18%	8%	14%
1,500	21%	2%	6%
2,000	22%	22%	14%
2,500	45%	8%	23%

ตารางผนวก 7 ค่าซีโอดีที่เหลือหลังการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มของสารโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Coagulant dose (mg/L)	COD (mg/L)		
	Alum	CaOH <sub>2</sub>	PACl
0	45,696	50,048	49,504
500	44,064	48,416	43,520
1,000	44,608	50,048	46,784
1,500	42,976	53,312	51,136
2,000	42,432	42,432	46,784
2,500	30,000	50,048	41,888

ตารางผนวก 8 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียกรดน้ำส้มของสารโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ หลังการบำบัด

Coagulant dose (mg/L)	TSS (mg/L)		
	Alum	CaOH <sub>2</sub>	PACl
0	350	300	320
500	500	315	365
1,000	390	270	380
1,500	450	350	410
2,000	480	420	250
2,500	500	450	400

ตารางผนวก 9 การเสริมประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยใช้สารโคแอกกูแลนต์  
ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Coagulant aid dose (mg/L)	%COD Removal	
	Alum 1,500 mg/L	Alum 2,500 mg/L
5	29	45
25	36	47
45	41	48
65	42	50
85	44	53
100	54	57

ตารางผนวก 10 ค่าซีโอดีที่เหลือหลังการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียกรดน้ำส้มโดยใช้สารโค  
แอกกูแลนต์ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Coagulant aid dose (mg/L)	COD (mg/L)	
	Alum 1,500 mg/L	Alum 2,500 mg/L
5	40,000	30,500
25	35,500	29,000
45	33,000	28,750
65	32,500	27,500
85	31,500	25,000
100	25,500	23,500

ตารางผนวก 11 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลือหลังการบำบัดในน้ำเสียกรดน้ำส้มโดย  
ใช้สารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Coagulant aid dose (mg/L)	TSS (mg/L)	
	Alum 1,500 mg/L	Alum 2,500 mg/L
5	345	395
25	390	335
45	375	390
65	338	320
85	250	300
100	285	315







ประวัติผู้ศึกษาค้นคว้า

## ประวัติผู้ศึกษาค้นคว้า

ชื่อ นามสกุล	สุรีพร ช่างทองเก่ง
วัน เดือน ปี เกิด	12 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527
ที่อยู่ปัจจุบัน	339 หมู่ 6 ต.ห้วยหม้าย อ.สอง จ.แพร่ 54120
ที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท เกรซฟู้ดส์ จำกัด จังหวัดเชียงราย
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	หัวหน้าฝ่ายผลิต (Production Supervisor)
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2550-2554	บริษัท แอกริ-ออน(ไทยแลนด์) จำกัด จังหวัดพะเยา ตำแหน่ง หัวหน้าฝ่ายวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ ประสบการณ์ทำงาน 4 ปี
พ.ศ. 2554-ปัจจุบัน	บริษัท เกรซฟู้ดส์ จำกัด จังหวัดเชียงราย ตำแหน่ง หัวหน้าฝ่ายผลิต (Production Supervisor)
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2550	(วท.บ.) วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดลำปาง