ศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการใช้แมกนีไทต์

นาย สุรวุฒิ ศิราธรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# STUDY OF COAGULATION PROCESS BY MAGNETITE

Mister Surawut Siratham

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการใช้แมกนีไทต์ |
| โดย | นาย สุรวุฒิ ศิราธรรม |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | อาจารย์ ดร. ชัยพร ภู่ประเสริฐ |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ ดร. ชัยพร ภู่ประเสริฐ)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีมา ศรลัมพ์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุรวุฒิ ศิราธรรม : ศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการใช้แมกนีไทต์ (STUDY OF COAGULATION PROCESS BY MAGNETITE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ. ดร. ชัยพร ภู่ประเสริฐ, 120 หน้า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยแมกนีไทต์กับน้ำเสียชนิดต่าง ๆ อันได้แก่พีเอช ปริมาณแมกนีไทต์ และความเร็วรอบการกวน รวมถึงความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนและการนำกลับมาใช้ใหม่ การทดลองใช้น้ำเสียที่มีความขุ่น 30 และ 100 NTU น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำเสียโลหะหนักที่มีความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเริ่มต้นศึกษาหาพีเอชที่เหมาะสม หาปริมาณแมกนีไทต์ที่เหมาะสม และหาความเร็วรอบ การกวนเร็วที่เหมาะสม จากนั้นนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ไปใช้เพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีส่วนผสมของความขุ่น แอมโมเนีย และโลหะหนัก

ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์ คือ พีเอช 3 ปริมาณแมกนีไทต์ 2 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียของแมกนีไทต์ คือ พีเอช 7 ปริมาณแมกนีไทต์ 2 กรัมต่อลิตร และความเร็วรอบการกวนเร็ว 150 รอบต่อนาที สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโลหะหนักของแมกนีไทต์ คือ พีเอช 3 ปริมาณแมกนีไทต์ 2.5 กรัมต่อลิตร และความเร็วรอบการกวนเร็ว 150 รอบต่อนาที เมื่อทดลองกับน้ำเสียผสม พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นเท่ากับ 83% ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 17.46% ประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียมเท่ากับ 29.76% และประสิทธิภาพในการบำบัดอาร์เซนิกเท่ากับ 14.42%

เมื่อนำค่าที่ได้ไปทำการทดลองกับน้ำเสียจริง พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นเท่ากับ 77.27% ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 31.03% ประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียมเท่ากับ 41.67% และประสิทธิภาพในการบำบัดอาร์เซนิกเท่ากับ 37.90%

ในส่วนการหาความเร็วตกตะกอนและการนำกลับมาใช้ใหม่ ผลการทดลอง พบว่า แมกนีไทต์มีความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้น 3 เซนติเมตรต่อวินาที (10.8 เมตรต่อชั่วโมง) การนำแมกนีไทต์มาใช้บำบัดความขุ่นทั้งหมด 5 ครั้ง พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง 16.28% จากการใช้งานครั้งแรก

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต สุรวุฒิ ศิราธรรม
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ปีการศึกษา 2551 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

## 4970658421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: MAGNETITE / ALUM / COAGULATION

SURAWUT SIRATHAM: STUDY OF COAGULATION PROCESS BY MAGNETITE. ADVISOR: ASST. PROF. KHEMARATH OSATAPHAN, Ph.D., CO-ADVISOR: CHAIYAPORN PUPRASERT, Ph.D., 120 pp.

The purpose of this study is to investigate the optimum conditions which are pH, magnetite dose, mixing velocity, initial settling velocity, and regeneration of magnetite. This study uses 30 and 100 NTU turbidity wastewater, 500 mg/l of ammonia wastewater, and 50 mg/l of chromium and arsenic wastewater. The method starts with investigating optimum pH, then optimum dose of magnetite, and mixing velocity. According to the method, we get optimum conditions to test with the mixed wastewater and real wastewater.

The result with synthetic wastewater found that the optimum conditions for turbidity wastewater are pH 3, magnetite dose 2 g/l, and mixing velocity 100 rpm. The optimum conditions for ammonia wastewater are pH 7, magnetite dose 2 g/l, and mixing velocity 150 rpm. The optimum conditions for chromium and arsenic wastewater are pH 3, magnetite dose 2.5 g/l, and mixing velocity 150 rpm. The result with mixed wastewater found that treatment efficiency of turbidity was equal to 83%, treatment efficiency of ammonia was equal to 17.46%, treatment efficiency of chromium was equal to 29.76%, and treatment efficiency of arsenic was equal to 14.42%

The result with real wastewater found that treatment efficiency of turbidity was equal to 77.27%, treatment efficiency of ammonia was equal to 31.03%, treatment efficiency of chromium was equal to 41.67%, and treatment efficiency of arsenic was equal to 37.90%

The initial settling velocity of magnetite was at 3 cm/s. Five-cycle regeneration of turbidity wastewater found that the treatment efficiency decreased 16.28% from the first used.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| | |
|---|---|
| Department : Environmental Engineering | Student's Signature Surawut Siratham |
| Field of Study : Environmental Engineering | Advisor's Signature K. Osataphan |
| Academic Year : 2008 | Co-Advisor's Signature Chaiyaporn P. |

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อ.ดร. ชัยพร ภู่ประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้แนวทางและคำแนะนำ ตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูล และตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ อ.ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล และ อ.ดร.จีมา ชมสุรินทร์ ที่สละเวลาตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์และร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สุธา ขาวเธียร ที่อนุญาตให้ใช้ห้องปฏิบัติการ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ของอาจารย์ทุกท่านช่วยเหลือในการตรวจวัดน้ำเสีย

ขอขอบคุณ อ.ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำและเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการสังเคราะห์แมกนีไทต์

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ของภาควิชาทั้งหมด

ขอขอบพระคุณครูจันทรวรรณ ครูอนันต์ ครูจิรายุ ครูมนต์ชัย และครูวรรณธนาที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการใช้สถานที่ รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบพระคุณคุณวิไล ที่เอื้อเฟื้อน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆในห้องปฏิบัติการวิจัยบัณฑิตทุกคนที่คอยช่วยเหลือในการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ฎ
สารบัญรูป..... ฑ
บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4
2.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน..... 4
2.1.1 เสถียรภาพของคอลลอยด์..... 4
2.1.2 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์..... 4
2.1.3 โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม..... 10
2.2 แมกนีไทต์..... 14
2.2.1 สมบัติของแมกนีไทต์..... 14
2.2.2 การนำแมกนีไทต์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย..... 14
2.3 กระบวนการซิโรฟล็อค..... 15
2.4 การกวนผสม..... 18
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 19



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย..... 22
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....22
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....22
3.1.2 สารเคมี.....22
3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....23
3.3 ลักษณะของน้ำเสียจริง..... 24
3.3.1 ลักษณะของน้ำที่มีความขุ่น.....24
3.3.2 ลักษณะของน้ำที่มีแอมโมเนีย.....24
3.3.3 ลักษณะของน้ำที่มีโลหะหนัก..... 25
3.4 การเตรียมแมกนีไทต์.....25
3.4.1 สารเคมี.....25
3.4.2 วิธีการสังเคราะห์แมกนีไทต์..... 26
3.5 วิธีดำเนินการวิจัย..... 26
3.5.1 การทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ในน้ำเสียที่มีความขุ่น.....28
3.5.2 การทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย..... 32
3.5.3 การทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก.....36
3.5.4 การทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาประสิทธิภาพ ในการบำบัดน้ำเสียผสม.....40
3.5.5 การทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาประสิทธิภาพ ในการบำบัดน้ำเสียจริง..... 42
3.5.6 การหาความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนของแมกนีไทต์และสารส้ม.....44
3.5.7 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์..... 45

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์..... 46
4.1 สภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น..... 47
4.1.1 พีเอชที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น.....47
4.1.1.1 พีเอชที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีความขุ่น.....47
4.1.1.2 พีเอชที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีความขุ่น..... 49
4.1.2 ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น.....49
4.1.2.1 ปริมาณที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีความขุ่น..... 50
4.1.2.2 ปริมาณที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีความขุ่น..... 52
4.1.3 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น..... 55
4.1.3.1 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์
ในน้ำเสียที่มีความขุ่น..... 55
4.1.3.2 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมกับสารส้ม
ในน้ำเสียที่มีความขุ่น..... 57
4.2 สภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย..... 58
4.2.1 พีเอชที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย..... 58
4.2.1.1 พีเอชที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย..... 58
4.2.1.2 พีเอชที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย.....60
4.2.2 ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย.....61
4.2.2.1 ปริมาณที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย..... 61
4.2.2.2 ปริมาณที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย..... 62
4.2.3 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย.....63
4.2.3.1 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์
ในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย.....63
4.2.3.2 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมกับสารส้ม
ในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย.....64
4.3 สภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก..... 66
4.3.1 พีเอชที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก..... 66
4.3.1.1 พีเอชที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก..... 66
4.3.1.2 พีเอชที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก.....70

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

4.3.2 ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก..... 72
4.3.2.1 ปริมาณที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก..... 72
4.3.3.2 ปริมาณที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก..... 73
4.3.3 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก..... 75
4.3.3.1 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์
ในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก.....76
4.3.3.2 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมกับสารส้ม
ในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก.....78
4.4 สรุปสภาวะที่เหมาะสมของแมกนีไทต์และสารส้มในการบำบัดน้ำเสีย..... 80
4.4.1 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่น.....80
4.4.2 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนีย..... 80
4.4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโลหะหนัก.....80
4.5 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียผสม..... 81
4.6 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริง.....83
4.7 ความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้น.....85
4.7.1 ความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นของแมกนีไทต์..... 86
4.7.2 ความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นของสารส้ม.....87
4.8 ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่.....89
4.9 การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น..... 91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....92
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 92
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 93
รายการอ้างอิง..... 94
ภาคผนวก..... 96
ภาคผนวก ก ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง..... 97
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณและตัวอย่างการคำนวณ..... 112
ภาคผนวก ค มาตรฐานน้ำทิ้ง.....119

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....120

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูป


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | แสดงชั้นต่างๆที่ล้อมรอบอนุภาคและอิทธิพลของระยะห่างระหว่างอนุภาคที่มีอิทธิพลต่อแรงที่กระทำระหว่างอนุภาค | 5 |
| 2.2 | แสดงผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์ก่อนและหลังการเติมไอออน | 6 |
| 2.3 | แสดงกลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบเชื่อมต่อด้วยโพลิเมอร์ | 9 |
| 2.4 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความเข้มข้นของไอออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่างๆ | 11 |
| 2.5 | แสดงไดอะแกรมที่ใช้ควบคุมและออกแบบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม | 13 |
| 2.6 | แสดงแผนผังกระบวนการทำงานของกระบวนการซิโรฟล็อค | 15 |
| 2.7 | แสดงแผนผังภาพรวมของกระบวนการซิโรฟล็อค | 17 |
| 3.1 | แสดงแผนผังภาพรวมของการทำวิจัย | 27 |
| 3.2 | แสดงแผนผังการทดลองของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น | 29 |
| 3.3 | แสดงแผนผังการทดลองของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย | 33 |
| 3.4 | แสดงแผนผังการทดลองของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก | 37 |
| 3.5 | แสดงแผนผังการทดลองของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียผสม | 41 |
| 3.6 | แสดงแผนผังการทดลองของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียจริง | 43 |
| 4.1 | แสดงผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู | 47 |
| 4.2 | แสดงผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู | 48 |
| 4.3 | แสดงผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู | 50 |


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ หน้า

4.4 แสดงผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสีย ที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู……51
4.5 แสดงผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสีย ที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู…… 52
4.6 แสดงผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสีย ที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู…….. 53
4.7 แสดงผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์ กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู…..55
4.8 แสดงผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์ กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู……...…… 56
4.9 แสดงผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสีย ที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร…….……...58
4.10 แสดงผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสีย ที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 60
4.11 แสดงผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสีย ที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร.....61
4.12 แสดงผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสีย ที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร.....62
4.13 แสดงผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์ กับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร…….... 63
4.14 แสดงผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม กับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร…….... 65
4.15 แสดงผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสีย ที่มีโครเมียมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร…….……...66
4.16 แสดงผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสีย ที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 68

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ หน้า

4.17 แสดงผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสีย ที่มีโครเมียมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 70
4.18 แสดงผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสีย ที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 71
4.19 แสดงผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสีย ที่มีโครเมียมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....72
4.20 แสดงผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสีย ที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 73
4.21 แสดงผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสีย ที่มีโครเมียมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 74
4.22 แสดงผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสีย ที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 75
4.23 แสดงผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์ กับน้ำเสียที่มีโครเมียมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 76
4.24 แสดงผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์ กับน้ำเสียที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 77
4.25 แสดงผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม กับน้ำเสียที่มีโครเมียมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 78
4.26 แสดงผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้ม กับน้ำเสียที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 79
4.27 ตะกอนของแมกนีไทต์ที่นำมาใช้ทดลอง..... 86
4.28 แสดงระยะทางที่ตกตะกอนของแมกนีไทต์เมื่อเวลาต่าง ๆ..... 86
4.29 ตะกอนของสารส้มที่นำมาใช้ทดลอง..... 87
4.30 แสดงระยะทางที่ตกตะกอนของสารส้มเมื่อเวลาต่าง ๆ..... 88
4.31 ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่..... 90

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญตาราง


ตารางที่ หน้า

3.1 สมบัติของน้ำเสียที่มีความขุ่น..... 24

3.2 สมบัติของน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย..... 24

3.3 สมบัติของน้ำเสียที่มีโลหะหนัก.....25

3.4 ตัวแปรในการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น..... 30

3.5 ตัวแปรในการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย.....34

3.6 ตัวแปรในการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก.....38

3.7 ตัวแปรในการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียผสม.....40

3.8 ตัวแปรในการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียจริง.....42

3.9 ตัวแปรการหาความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นของแมกนีไทต์และสารส้ม..... 44

3.10 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดของแมกนีไทต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่..... 45

4.1 สรุปสภาวะที่เหมาะสมของแมกนีไทต์และสารส้มในการบำบัดน้ำเสีย.....81

4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดของแมกนีไทต์และสารส้มในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์...82

4.3 ประสิทธิภาพในการบำบัดของแมกนีไทต์และสารส้มในการบำบัดน้ำเสียจริง..... 84

4.4 เปรียบเทียบน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง..... 85

4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดลงแต่ละครั้ง..... 90

ก.1 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู..... 98

ก.2 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู.....98

ก.3 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู.....99

ก.4 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู.....99

ตารางที่ หน้า

ก.5 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู....100
ก.6 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู....100
ก.7 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสีย ที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู....101
ก.8 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสีย ที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู....101
ก.9 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร....102
ก.10 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร....102
ก.11 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร....103
ก.12 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร....103
ก.13 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสีย ที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร....104
ก.14 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสีย ที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร....104
ก.15 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีโครเมียม และอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร....105
ก.16 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีโครเมียมและ อาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร....105
ก.17 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีโครเมียม และอาร์เซนิก ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร....106
ก.18 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีโครเมียม และอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร....106

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ หน้า

ก.19 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีโครเมียมและอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ..... 107
ก.20 ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีโครเมียมและอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ..... 107
ก.21 ผลการบำบัดของแมกนีไทต์ในน้ำเสียผสมที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู ความเข้มข้นแอมโมเนีย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ..... 108
ก.22 ผลการบำบัดของสารส้มในน้ำเสียผสมที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู ความเข้มข้นแอมโมเนีย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ..... 108
ก.23 ผลการบำบัดของแมกนีไทต์ในน้ำเสียจริง ..... 109
ก.24 ผลในการบำบัดของสารส้มในน้ำเสียจริง ..... 109
ก.25 ระยะทางที่ตกตะกอนของแมกนีไทต์เมื่อเวลาต่างๆ ..... 110
ก.26 ระยะทางที่ตกตะกอนของสารส้มเมื่อเวลาต่างๆ ..... 110
ก.27 ผลในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ..... 111
ค.1 มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ..... 119

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้การบำบัดน้ำเสียมีความสำคัญและมีบทบาทต่อโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นอย่างมากเนื่องจากมนุษย์เริ่มตระหนักในความสำคัญของการรักษาสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยมีทั้งกฎหมายและมาตรฐานการรับประกันจากหน่วยงานต่าง ๆ จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีของการบำบัดน้ำเสียเป็นอย่างมาก

กระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการฟล็อคคูเลชันเป็นทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียโดยมุ่งเน้นในการกำจัดอนุภาคของสารแขวนลอยและอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำเสียมีสีและความขุ่น โดยที่กระบวนการโคแอกกูเลชันจะทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และทำให้คอลลอยด์มารวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่หรือฟล็อค ส่วนกระบวนการ ฟล็อคคูเลชันจะทำให้ฟล็อคเคลื่อนที่มาสัมผัสหรือกระทบกันเพื่อให้เกิดฟล็อคที่ใหญ่มากพอที่จะตกตกตะกอนได้

ในปัจจุบันนี้กระบวนการโคแอกกูเลชันมักนิยมใช้สารส้มเนื่องจากสามารถใช้งานได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่าง ๆ และหาซื้อได้ง่ายในราคาพอสมควร สารส้มสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จนเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันได้ด้วยกลไกหลัก 2 ประการคือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ และ กลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึก

กระบวนการโคแอกกูเลชันได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในปี ค.ศ. 1985 นักวิทยาศาสตร์ชาวออสเตรเลียได้นำแมกนีไทต์มาทดลองใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันแทนสารส้ม เรียกว่ากระบวนการซิโรฟล็อค (Sirofloc Process) โดยแมกนีไทต์ผงจะทำหน้าที่เป็นสารชักนำ (Seed) คือเป็นแกนกลางทำให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจึงสามารถทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันได้ดีและเร็วกว่าสารส้มซึ่งไม่มีแกนกลางสำหรับให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะ

ข้อดีของการใช้แมกนีไทต์คือ แมกนีไทต์จะเปลี่ยนประจุรวมบนพื้นผิวอนุภาคไปตามค่าพีเอชของน้ำเสีย โดยดูได้จากค่าพีเอชที่ทำให้ประจุรวมบนพื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์มีค่ารวมเป็นศูนย์หรือค่า $pH_{pzc}$ โดย $pH_{pzc}$ ของแมกนีไทต์มีค่า 6.5 (Benjamin, 2002) ดังนั้นเมื่อน้ำอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด พื้นผิวของแมกนีไทต์จะมีประจุบวกจึงสามารถจับกับอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีประจุลบในน้ำได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้อุปกรณ์ที่มีสนามแม่เหล็กมาร่วมซึ่งช่วยทำให้เกิดการตกตะกอนได้ดีมากขึ้นและแยกฟล็อคที่มีแมกนีไทต์เป็นแกนกลางออกจากน้ำได้ในระยะเวลาอันสั้นซึ่งเปรียบเทียบกับกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มธรรมดาจะใช้เวลานาน

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แมกนีไทต์มาใช้แทนกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มธรรมดา ซึ่งมีข้อดีกว่าสารส้มคือสามารถตกตะกอนได้ดีขึ้น สามารถกำจัดไอออนของโลหะหนักได้เป็นอย่างดี และ สามารถเร่งและแยกฟล็อคออกมาด้วยการผ่านสนามแม่เหล็ก โดยจะพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการทดลองคือ ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยคอลลอยด์ และไอออนในน้ำ ระยะเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน และการนำแมกนีไทต์กลับมาใช้ใหม่ โดยงานวิจัยช่วงแรกจะทำการใช้น้ำเสียสังเคราะห์และงานวิจัยช่วงหลังจะใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยจะใช้น้ำเสีย 3 ประเภทคือ น้ำเสียที่มีความขุ่น น้ำเสียที่มีแอมโมเนีย และน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

**1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย**

1.2.1 ศึกษาความสามารถของการทำโคแอกกูเลชันโดยแมกนีไทต์กับน้ำเสีย 4 ชนิด
1.2.2 ศึกษาปริมาณแมกนีไทต์ พีเอช และรอบการกวนที่เหมาะสมของการทำโคแอกกูเลชันโดยแมกนีไทต์
1.2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มและแมกนีไทต์
1.2.4 ศึกษาความสามารถในการนำแมกนีไทต์กลับมาใช้ในการบำบัดความขุ่น

**1.3 ขอบเขตของการวิจัย**

การทดลองนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัยปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.1 การวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบทีละเท (batch) ทั้งหมด
1.3.2 แมกนีไทต์ที่ใช้ในการทดลองมาจากการสังเคราะห์เอง
1.3.3 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำกลั่นแบ่งเป็น 4 ชนิดคือ
   1. น้ำเสียที่มีความขุ่น 100 และ 30 เอ็นทียู เตรียมจากดินขาวคาโอลิไนท์
   2. น้ำเสียที่มีปริมาณแอมโมเนีย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมจากแอมโมเนียมคลอไรด์
   3. น้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เตรียมจากโปตัสเซียมไดโครเมตและไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซเนต
   4. น้ำเสียผสมที่มีความขุ่น ปริมาณแอมโมเนีย และโลหะหนัก

1.3.4 แหล่งที่มาของน้ำเสียมี 2 แหล่งคือ

1. น้ำเสียสังเคราะห์

2. น้ำเสียจริง

2.1 น้ำเสียที่มีความขุ่น นำมาจากสระน้ำหน้าพระรูปสองรัชกาล จุฬาลงกร์มหาวิทยาลัย

2.2 น้ำเสียที่มีแอมโมเนีย นำมาจากน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งของนิสิตคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 น้ำเสียที่มีโลหะหนัก นำมาจากน้ำเสียโรงฟอกหนังแห่งหนึ่ง

ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดและสมบัติของน้ำเสียในบทที่ 3 ต่อไป

**1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1.4.1 เกิดความก้าวหน้าทางวิชาการและแนวทางในการพัฒนารูปแบบและปรับปรุงการออกแบบกระบวนการโคแอกกูเลชันของถังกวนเร็ว

1.4.2 ได้กระบวนการที่สามารถกำจัดอนุภาคและไอออนในน้ำได้ดีกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันแบบธรรมดา

1.4.3 ลดเวลาของการทำกระบวนการโคแอกกูเลชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.4 ลดค่าใช้จ่ายของการทำกระบวนการโคแอกกูเลชัน

1.4.5 พัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมได้

1.4.6 พัฒนาระบบผลิตน้ำประปาได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

### 2.1.1 เสถียรภาพของระบบคอลลอยด์

เสถียรภาพของคอลลอยด์เกิดจากผลของแรงทั้งหมด 2 แรงคือ แรงผลักและแรงดูด ในส่วนของแรงผลักของอนุภาคคอลลอยด์เกิดจากแรงทางประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกันเอง เรียกว่าซีตาโพเทนเชียล (Zeta potential) ซึ่งอนุภาคคอลลอยด์ส่วนใหญ่จะมีประจุลบ ส่วนแรงดูดของอนุภาคคอลลอยด์เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals forces) ซึ่งเป็นแรงอ่อนๆที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคคอลลอยด์อยู่ใกล้กัน ผลต่างของแรงทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาคทั้งสอง ดังรูปที่ 2.1 แสดงชั้นต่าง ๆ ที่ล้อมอนุภาคและอิทธิพลของระยะห่างระหว่างอนุภาคที่มีอิทธิพลต่อแรงที่กระทำระหว่างอนุภาค (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538) ถ้าแรงผลักมากกว่าแรงดูดอนุภาคคอลลอยด์จะไม่สามารถเข้ามารวมตัวกันได้มีผลให้อนุภาคคอลลอยด์สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอน เรียกได้ว่า คอลลอยด์มีเสถียรภาพสูง ถ้าแรงดูดมากกว่าแรงผลัก อนุภาคคอลลอยด์จะสามารถรวมตัวกันได้มีผลให้เกิดเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคคอลลอยด์หรือฟล็อค (floc) ได้

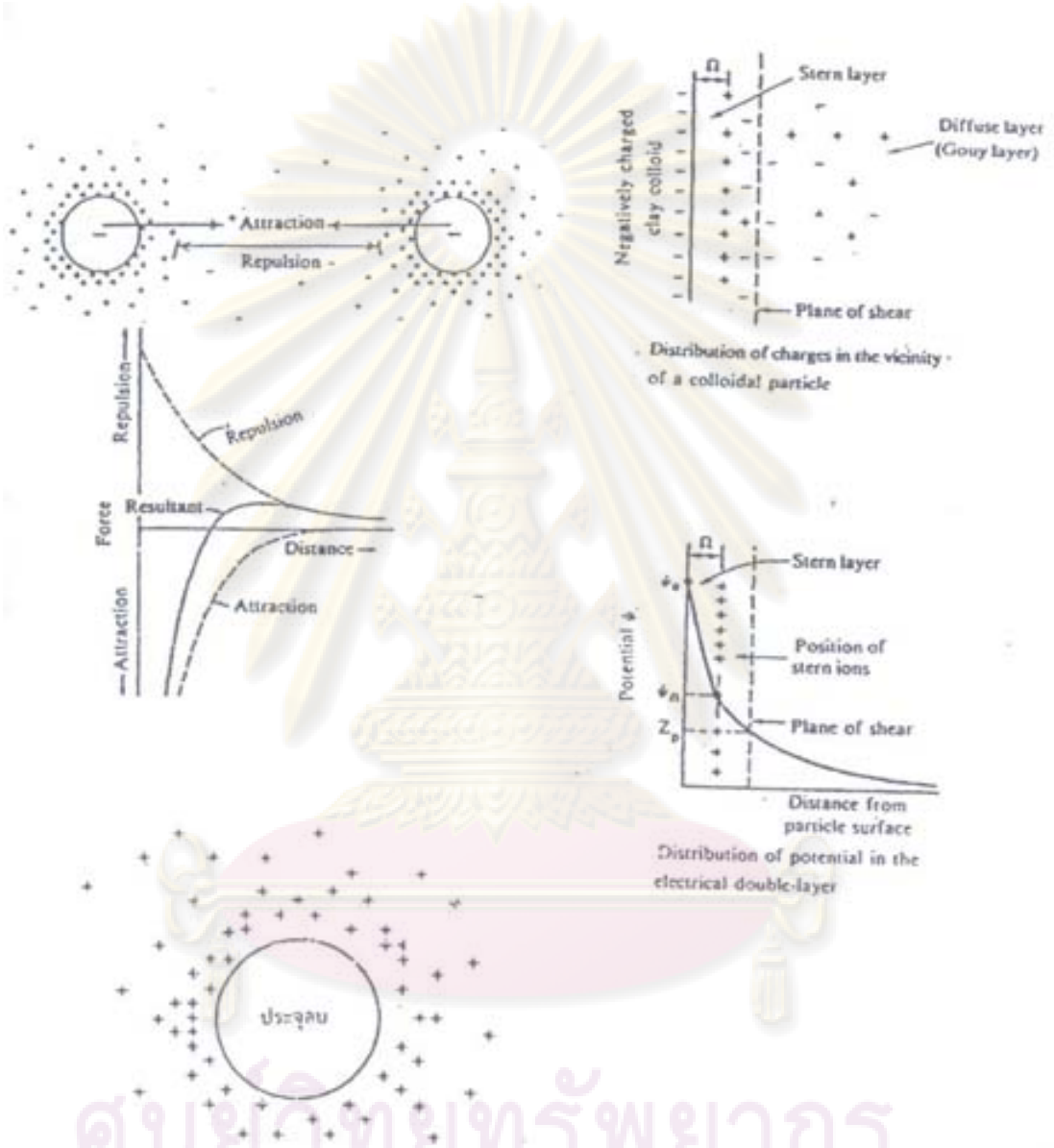
### 2.1.2 การทำลายเสถียรภาพของระบบคอลลอยด์

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถกระทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบคือ

1. การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer)

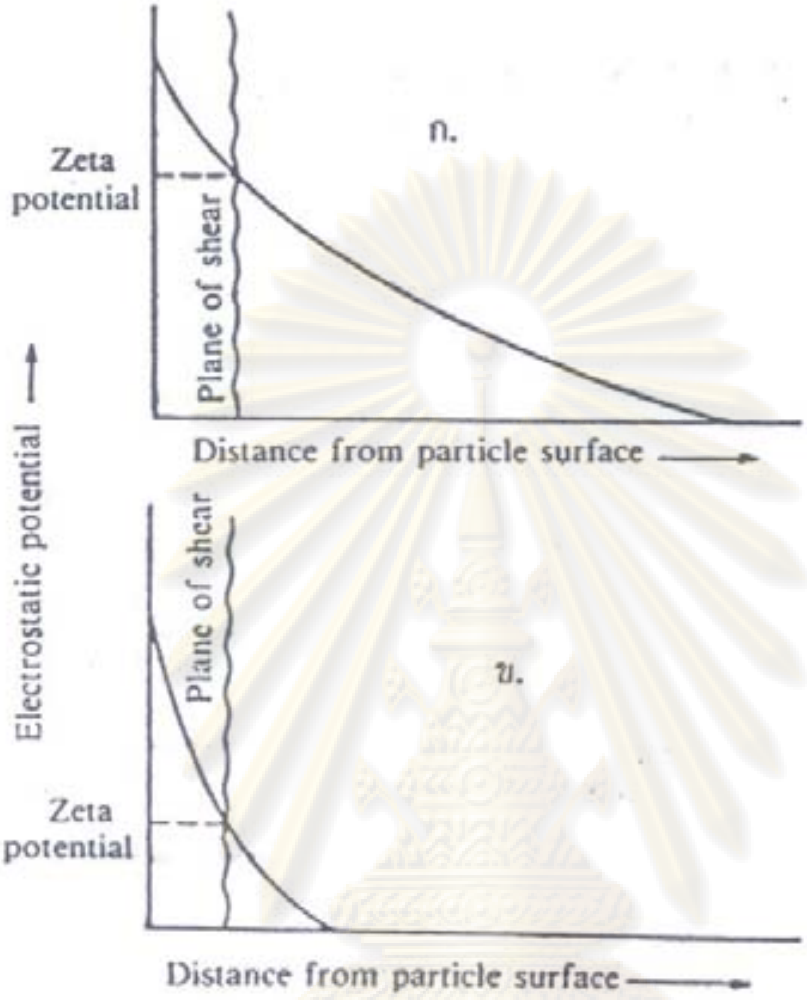
การเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงข้าม (Counter Ion) กับประจุของอนุภาคคอลลอยด์สามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ โดยมีผลทำให้ชั้นกระจายและซีตาโพเทนเชียลลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แสดงผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับอนุภาคคอลลอยด์ก่อนและหลังเติมไอออน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538) เช่นถ้าอนุภาคคอลลอยด์มีประจุลบ การเติมประจุบวกทำให้อำนาจของประจุลบมีผลลดลงเนื่องจากประจุบวกที่เติมลงไปจะไปอยู่ใกล้กับผิวอนุภาคคอลลอยด์จึงทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์มีค่าลดลงและทำให้สามารถรวมตัวกันได้มากขึ้น

ปริมาณการเติมไอออนที่มีประจุไม่เท่ากันจะให้ผลแตกต่างกันไปตามประจุของไอออนนั้น ไอออนที่มีประจุ +1 จะมีผลน้อยกว่าไอออนที่มีประจุ +2 เป็น 10 เท่าและจะมีผลน้อยกว่าไอออนที่มีประจุ +3 เป็น 1000 เท่า หรืออาจกล่าวได้ว่าอำนาจดังกล่าวของประจุ +1 +2 และ +3 มีสัดส่วนเป็น 1 : 10 : 1000




**รูปที่ 2.1** แสดงชั้นต่างๆ ที่ล้อมอนุภาคและอิทธิพลของระยะห่างระหว่างอนุภาคที่มีอิทธิพลต่อแรงที่กระทำระหว่างอนุภาค (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 2.2** แสดงผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์ก่อนและหลังเติมไอออน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

หลักการของการเติมสารละลายมีดังนี้

1. ปริมาณไอออนที่เติมลงไปเพื่อลดความหนาของชั้นกระจายไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์

2. แม้ว่าจะเติมไอออนมากขึ้น ก็ไม่สามารถทำให้คอลลอยด์เปลี่ยนประจุไปจากเดิมได้ (Charge Reversal)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. การดูดติดผิวและการทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์

สารเคมีซึ่งมีประจุตรงข้ามกับคอลลอยด์ ถ้าสามารถดูดติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้จะสามารถทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ได้ โดยการดูดติดผิวจะลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กลไกการดูดติดผิวสามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ จึงมีประสิทธิภาพในการทำลายประจุได้ดีกว่าการลดความหนาของชั้นกระจาย และต้องการปริมาณไอออนในการดูดติดผิวน้อยกว่า ปริมาณของสารเคมีจะแปรผันตามความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการสตอยชิโอเมตริค (Stoichiometric)

การเติมสารเคมีในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้เกิดโคแอกกูเลชันได้ดีที่สุด แต่ถ้าเติมในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ประจุของอนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนเป็นตรงข้ามกับของเดิมได้ และเสถียรภาพของคอลลอยด์จะกลับคืนมาใหม่เนื่องจากมีการเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์เกิดขึ้น

3. การใช้ผลึกสารอนินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์

สารประกอบของโลหะบางชนิดเมื่อลงไปในน้ำในปริมาณที่เพียงพอจะสามารถสร้างผลึกกับน้ำได้ดี โดยผลึกที่เกิดขึ้นนี้จะไปจับกับอนุภาคอลลอยด์ซึ่งตัวอนุภาคคอลลอยด์จะทำหน้าที่เป็นแกนของผลึกทำให้เกิดผลึกขนาดใหญ่ขึ้น การเกิดผลึกขนาดใหญ่ขึ้นเป็นการเพิ่มทั้งขนาดและน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์และทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพจึงสามารถตกตะกอนลงมาได้ การกำจัดคอลลอยด์โดยกลไกแบบนี้เรียกว่า กลไกแบบห่อหุ้มด้วยอนุภาคผลึก โดยสารประกอบ เช่น สารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) แมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) และปูนขาว สามารถทำให้เกิดโคแอกกูเลชันได้โดยสร้างผลึก $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_3$, $Mg(OH)_2$ และ $CaCO_3$ ซึ่งเป็นตะกอนผลึก (Precipitate) ที่ไม่ละลายน้ำ

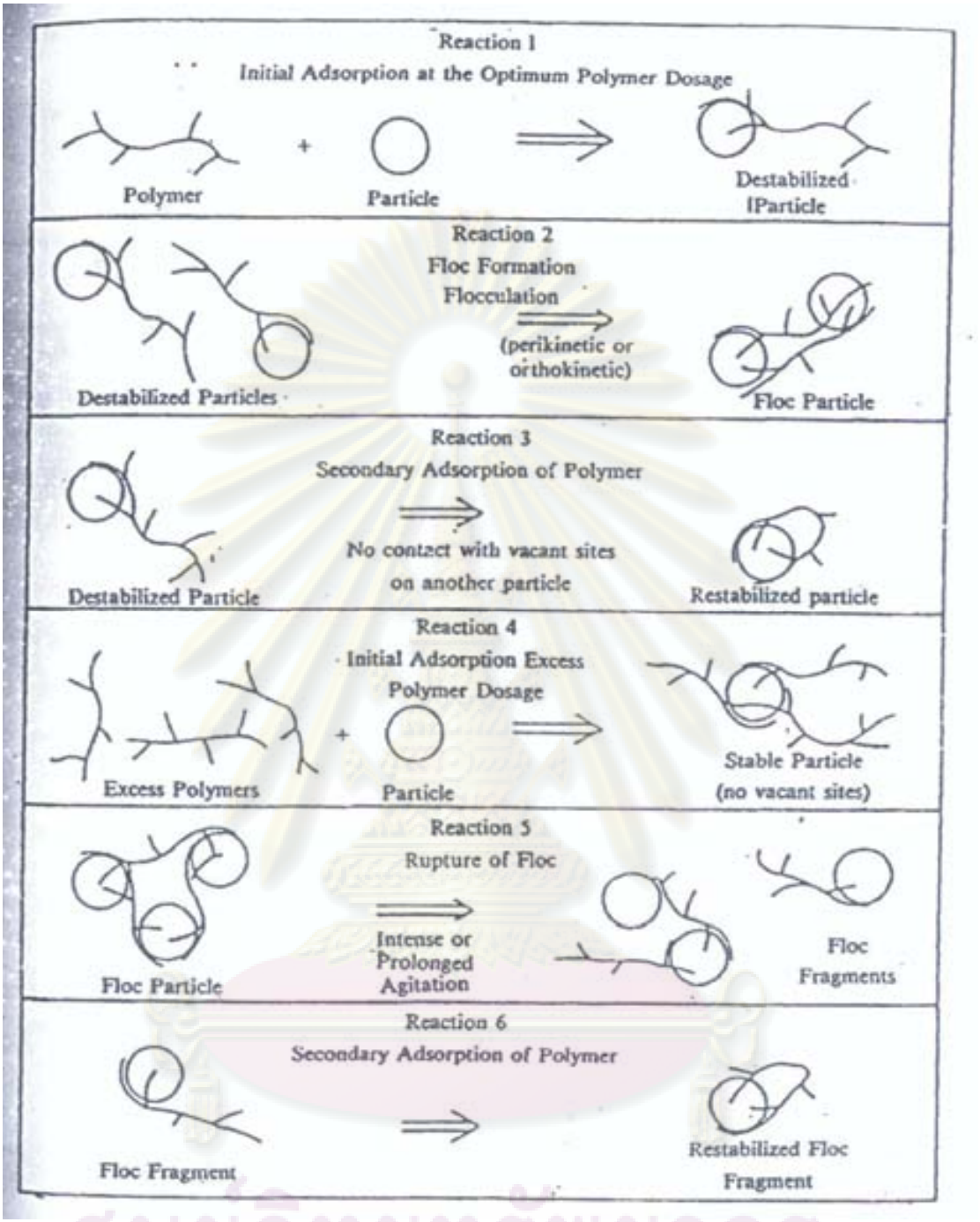
ปริมาณสารประกอบโลหะที่เติมจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ คือถ้ามีความขุ่นน้อยจะต้องใช้ปริมาณสารเคมีจำนวนมาก แต่ถ้ามีความขุ่นมากจะต้องใช้ปริมาณสารเคมีที่น้อย เนื่องจากว่าน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสน้อยที่อนุภาคคอลลอยด์จะสัมผัสกับผลึกของโลหะดังนั้นจึงต้องเติมสารเคมีในปริมาณมากเพื่อให้เป็นเป้าสัมผัสให้อนุภาคคอลลอยด์มาสัมผัสกับผลึก ในขณะที่น้ำที่มีความขุ่นสูงมีโอกาสมากที่อนุภาคคอลลอยด์จะสัมผัสกับผลึกของโลหะอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีมากเท่ากับในกรณีความขุ่นน้อย

กลไกการเกิดผลึกขึ้นกับค่าพีเอชของน้ำเป็นอย่างมากเนื่องจากความสามารถในการตกผลึกของสารต่างๆจะมีระดับพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามกลไกนี้ไม่ขึ้นกับประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ค่าซีตาโพเทนเชียลจึงไม่มีความเกี่ยวข้องกับกลไกนี้

4. การใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging)

โพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลสูงสามารถทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ได้ เช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาล และโปรตีนบางชนิดรวมทั้งสารอินทรีย์โพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น โมเลกุลของสารโพลิเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่ 1 และอนุภาคที่มีโพลิเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะอนุภาคได้ถือว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (Destabilized Particle) อนุภาคดังกล่าวนี้สามารถจับตัวกับอนุภาคอื่นๆได้โดยมีโพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่ 2 แต่ถ้าปลายอิสระของโพลิเมอร์เกาะจับบนอนุภาคเดิมทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับอนุภาคอื่นและทำให้มีตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะน้อยลงหรืออาจเรียกได้ว่าอนุภาคมีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized Particle) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่ 3 อย่างไรก็ตามการใช้โพลิเมอร์มากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้เพราะโพลิเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะอยู่บนอนุภาคของคอลลอยด์จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่ 4 และการกวนน้ำแรงเกินไปก็ทำให้ฟล็อคที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็นส่วนๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่ 5 และทำให้ปลายอิสระของโพลิเมอร์เกาะจับบนอนุภาคเดิมอีกดังแสดงในรูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่ 6 (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 2.3** แสดงกลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบเชื่อมต่อด้วยโพลิเมอร์ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**2.1.3 โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม**

สารส้ม (Alum) เป็นโคแอกกูแลนท์ที่นิยมใช้กันทั่วไปมากที่สุด โดยมีสูตรโมเลกุล $Al_2(SO_4)_3$ x $18H_2O$ ในประเทศไทยสารส้มเป็นที่นิยมเนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่าง ๆ และหาซื้อได้ง่ายในราคาพอสมควร

1. เคมีของสารส้มในน้ำ

เมื่อสารส้มละลายน้ำจะมีการแตกตัวดังสมการ

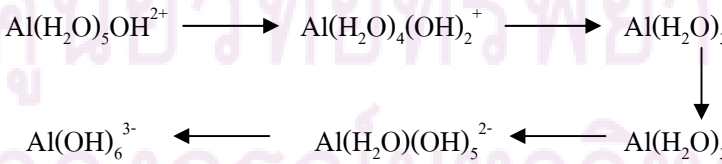
$$Al_2(SO_4)_3 \rightarrow 2Al^{3+} + 3\ SO_4^{2-}$$

ในความเป็นจริงแล้วอะลูมินัมไอออนไม่ได้อยู่ในรูปของ $Al^{3+}$ เพราะโดยปกติแล้วไอออนของโลหะจะไปอยู่ร่วมกับน้ำ โดยอะลูมินัมไอออนจะอยู่รวมกับน้ำ 6 โมเลกุล ดังนั้นความจริงแล้วจะเป็น $Al(H_2O)_6^{3+}$ ไอออนของโลหะที่อยู่รวมกับน้ำ โมเลกุลของน้ำเรียกว่า ลิแกนด์ (Ligand) แต่เพื่อความสะดวกในการสื่อสารจึงไม่เขียนโมเลกุลของน้ำ และเข้าใจกันเพียง $Al^{3+}$

ไอออนของอะลูมินัมในรูป $Al(H_2O)_6^{3+}$ เป็นไอออนที่สามารถให้โปรตอนกับน้ำได้จึงพร้อมที่จะไฮโดรไลซ์ (Hydrolyzed) ให้เป็นไอออนต่าง ๆ ของอะลูมินัมซึ่งมี $OH^-$ เป็นลิแกนด์ ดังสมการต่อไปนี้

$$Al(H_2O)_6^{3+} + H_2O \rightarrow Al(H_2O)_5OH^{2+} + H_3O^+$$

ไอออนของอะลูมินัมสามารถให้โปรตอนได้ทั้งหมด 6 ครั้งเนื่องจากมีน้ำล้อมรอบ 6 โมเลกุลโดยโปรตอนที่อยู่ในน้ำซึ่งล้อมรอบไอออนของอะลูมิเนียมอยู่จะหลุดมาเรื่อย ๆ ประจุของไอออนของอะลูมิเนียมจะค่อย ๆ ลดลงจาก +3 ไปเป็น -3 ดังนี้



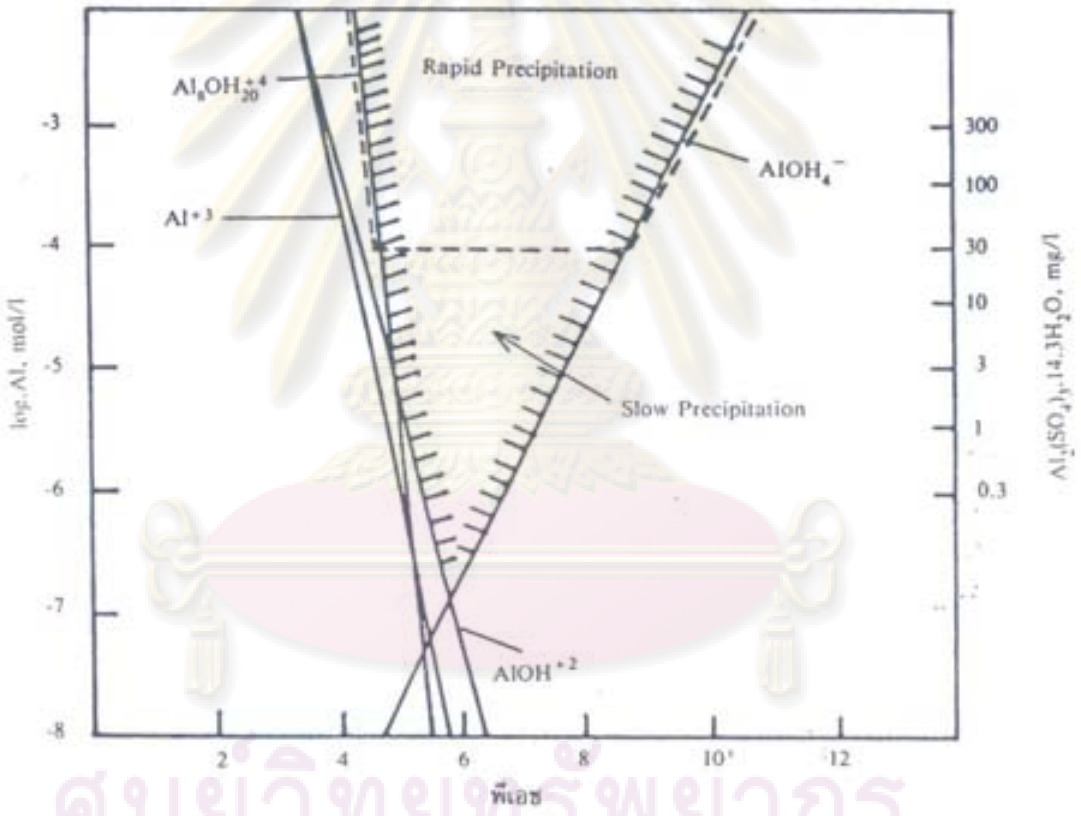

นอกจากนี้ไอออนของอะลูมิเนียมยังสามารถรวมกันโดยมีอะลูมิเนียมมากกว่า 1 อะตอมได้ เช่น $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ โดยปัจจุบันนี้พบไอออนของอะลูมิเนียม 4 ชนิดคือ $Al^{3+}$, $Al(OH)^{2+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ และ $Al(OH)_4^-$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลักการใช้สารส้มในการทำโคแอกกูเลชันคือ

1. สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักจะดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์และหักล้างประจุคอลลอยด์ได้ ฉะนั้นถ้าไอออนมีประจุตรงกันข้ามและมากกว่าประจุของอนุภาคคอลลอยด์ อนุภาคคอลลอยด์จะแสดงประจุเป็นตรงกันข้ามกับของเดิม

2. พีเอชมีผลต่อสารส้มเป็นอย่างมากโดยจะเป็นปัจจัยที่กำหนดความเข้มข้นแต่ละชนิดของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักต่างๆซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดังแสดงในรูปที่ 2.4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักชนิดต่างๆซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยไดอะแกรม (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)




**รูปที่ 2.4** แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักชนิดต่างๆ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

น้ำที่มีพีเอชต่ำจะพบอะลูมิเนียมไอออนในรูปของ $Al^{3+}$ มากที่สุด เมื่อพีเอชค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ประจุบวกในน้ำจะค่อย ๆ น้อยลง เมื่อพีเอชใกล้ความเป็นกลางจะเกิด $Al(OH)_3$ มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการเกิดผลึกอาจเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากไม่มีสารชักนำ (Seed) เพื่อเป็นแกนกลางให้เกาะ ดังนั้นในทางปฏิบัติควรใช้สารส้มไม่ต่ำกว่า 30 มก./ล. จึงจะมีผลึก $Al(OH)_3$ เกิดขึ้นในอัตราเร็วพอสมควร เมื่อพีเอชเป็นด่างจะเกิดไอออนประจุลบ ด้วยเหตุนี้การทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มกับน้ำธรรมชาติจึงควรมีพีเอชเป็นกลางหรือกรดเล็กน้อย แต่ไม่ควรมีพีเอชต่ำเกินไปเนื่องจากไอออน $Al^{3+}$ ไม่ดูดติดผิวคอลลอยด์ และไม่ควรมีพีเอชสูงเกินไปเนื่องจากจะมีไอออนลบซึ่งไม่มีประโยชน์ในการทำโคแอกกูเลชัน

2. กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มสามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยกลไก 2 ชนิดคือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ และ กลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึก (Sweep Coagulation) ซึ่งจะเกิดกลไกแบบใดขึ้นอยู่กับปริมาณโคแอกกูแลนท์และพีเอชของน้ำหลังเกิดโคแอกกูเลชัน โดยปกติการทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มในน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่มักเป็นกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึกเป็นกลไกหลัก โดยอาจมีกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุเป็นกลไกร่วมซึ่งมีบทบาทด้อยกว่า

2.1 กลไกโคแอกกูเลชันแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ

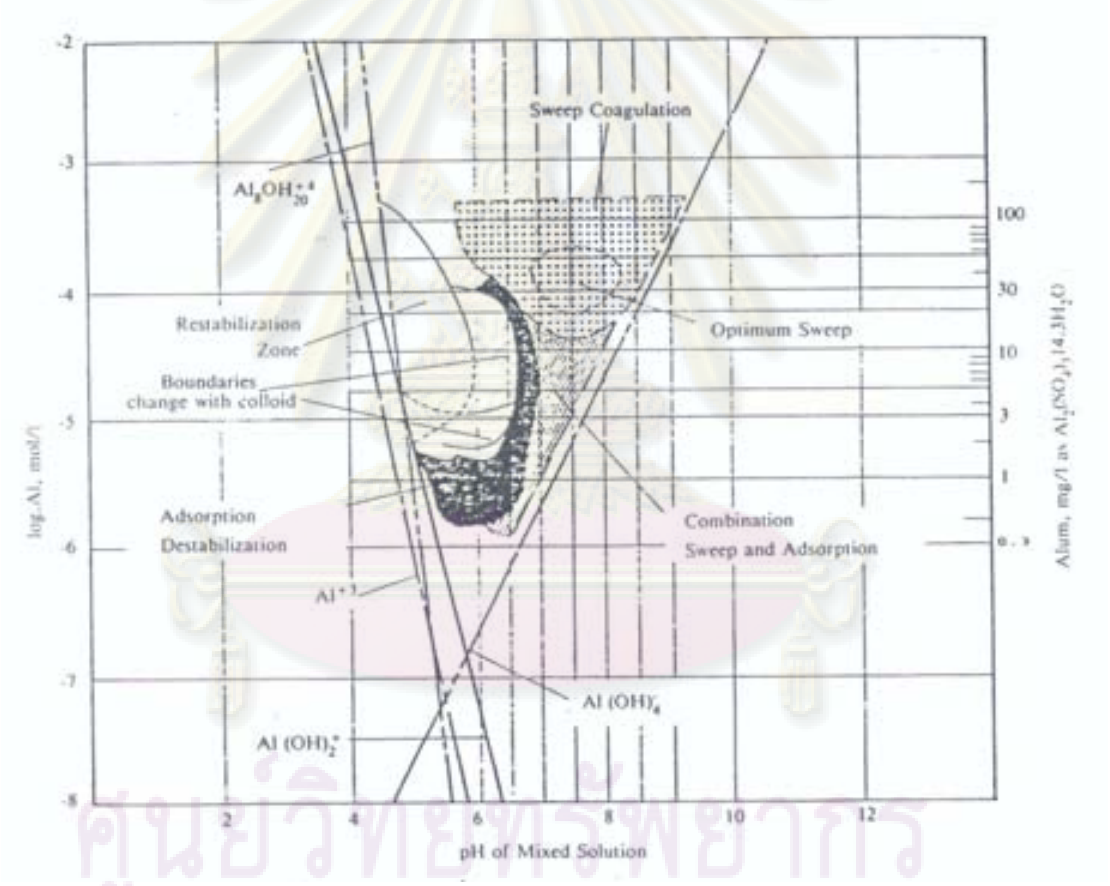
กลไกแบบการดูดติดผิวและทำลายประจุจะแตกตัวให้ไอออนของอะลูมิเนียมชนิดต่างๆ เช่น $Al(OH)^{2+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ ซึ่งสามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุลบของคอลลอยด์ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและพร้อมที่จะรวมตัวกันหลายๆอนุภาคจนกลายเป็นฟล็อค ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นไดอะแกรมที่ใช้ควบคุมและออกแบบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538) กลไกนี้เกิดขึ้นได้ต่อเมื่อปริมาณของสารส้มมีน้อยจนกระทั่งผลคูณของ $[Al^{3+}]$ และ $[OH^-]$ ต่ำกว่า $K_{sp}$ และพีเอชต้องไม่สูงหรือต่ำเกินไป ข้อดีคือประหยัดสารส้มและเกิดสลัดจ์ที่มีคุณสมบัติดีคืออัดตัวได้แน่นและทำให้แห้งหรือดึงเอาน้ำออกจากสลัดจ์ได้ง่าย แต่ในทางปฏิบัติมักไม่เกิดกลไกนี้เนื่องจากไอออนที่มีประจุบวกจะต้องดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์ภายในเวลา $10^{-4}$ – 1 วินาทีซึ่งยากที่จะทำให้เกิดการสัมผัสได้ภายในเวลาอันสั้น และความสามารถในการละลายของ $Al(OH)_3$ อยู่ในระดับต่ำ โดยที่ $Al(OH)_3$ จะตกผลึกเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า $7.8x10^{-5.6}$ มก./ล. ที่พีเอช 7 )

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 กลไกโคแอกกูเลชันแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก

กลไกแบบห่อหุ้มผลึกเกิดขึ้นโดยการสร้างผลึก $Al(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นปุย เมื่ออนุภาคคอลลอยด์สัมผัสกับผลึก $Al(OH)_3$ ก็จะเกาะตัวจับอยู่บนผลึกนั้นกลายเป็นฟล็อค เมื่อเกิดผลึกขึ้นมากๆจะได้ฟล็อคขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนง่าย แต่สารส้มที่ใช้ต้องมีปริมาณสูงพอจนทำให้ผลคูณของ $[Al^{3+}]$ และ $[OH^-]$ สูงกว่า $K_{sp}$ จึงจะทำให้เกิดผลึก พีเอชควรอยู่ประมาณ 6-7.5 จึงจะได้ผลดีที่สุด แต่ข้อเสียคือเปลืองสารส้มมากและเกิดสลัดจ์ที่มีคุณสมบัติไม่ดีคืออัดตัวไม่แน่นและดึงน้ำออกจากสลัดจ์ได้ยาก

เราสามารถควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มดังแสดงในรูปที่ 2.5 แสดงไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)




**รูปที่ 2.5** ไดอะแกรมที่ใช้ควบคุมและออกแบบกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

เห็นได้ว่าโคแอกกูเลชันแบบ Sweep Flocculation จะได้ผลดีที่สุดที่พีเอช 6.8-8.2 โดยจะใช้สารส้ม 20-50 มก./ล. กลไกแบบเกาะติดผิวและทำลายประจุ รวมทั้งแบบผสมจะทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันได้ด้วยสารส้มน้อยกว่า 10 มก./ล.

## 2.2 แมกนีไทต์

### 2.2.1 สมบัติของแมกนีไทต์ (Barthelmy, 2005)

แมกนีไทต์เป็นแร่ของเหล็ก มีสมบัติต่างๆดังนี้

- สูตรทางเคมีคือ $Fe_3O_4$ หรือ เฟอรัส-เฟอริกออกไซด์
- มีสีเทาเข้มถึงดำ
- ความหนาแน่น 5.1 - 5.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- มีความทึบแสง มันวาว
- ความแข็ง 5.5 – 6
- มีคุณสมบัติเป็นทั้งพาราแมกเนติค (ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก) และเป็นเฟอริแมกเนติค (เป็นแม่เหล็ก) ขึ้นกับแหล่งที่พบ
- $pH_{pzc}$ (ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุรวมบนพื้นผิวอนุภาคมีค่ารวมเป็นศูนย์) เท่ากับ 6.5

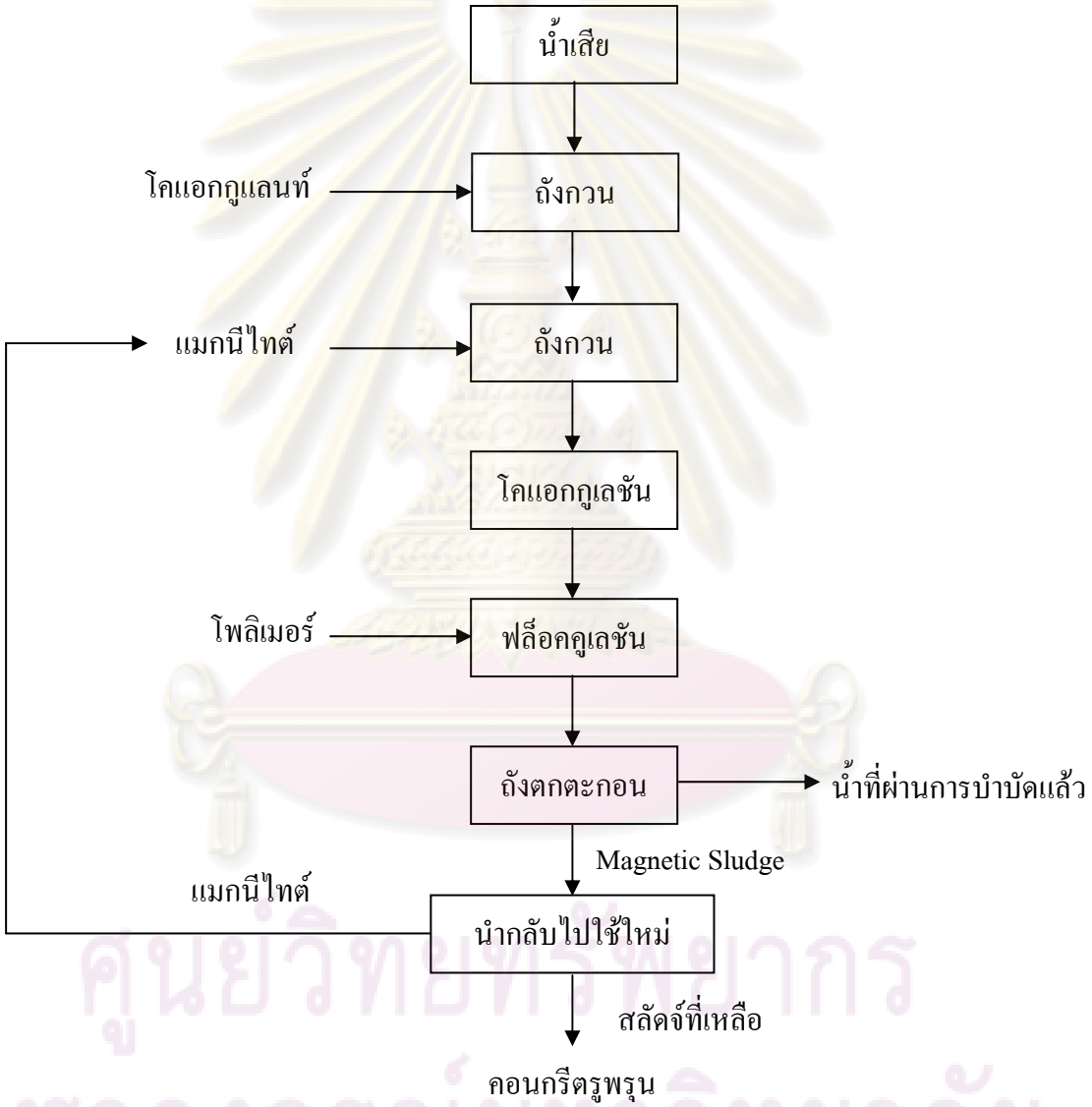
### 2.2.2 การนำแมกนีไทต์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

จากสมบัติของแมกนีไทต์ที่มีค่า $pH_{pzc}$ เท่ากับ 6.5 ทำให้เราทราบว่า เมื่อแมกนีไทต์อยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดที่มีพีเอชต่ำกว่า 6.5 ประจุรวมบนพื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะเป็นประจุบวก อนุภาคคอลลอยด์ หรืออนุภาคอื่น ๆ ซึ่งมีประจุลบ จะเกิดกระบวนการดูดติดผิวกับพื้นผิวของแมกนีไทต์ จึงเป็นวิธีหนึ่งในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แต่เมื่อแมกนีไทต์อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีพีเอชสูงกว่า 6.5 ประจุรวมบนพื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะเป็นประจุลบ ก็จะเกิดกระบวนการดูดติดผิวกับอนุภาคที่เป็นบวกเช่นเดียวกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**2.3 กระบวนการซิโรฟล็อค (Sirofloc Process)** (Booker, 2000)

กระบวนการซิโรฟล็อคคือกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ใช้แมกนีไทต์ ($Fe_3O_4$) และโพลิเมอร์มาช่วยในการกำจัดอนุภาคต่างๆ ในน้ำเสีย โดยแมกนีไทต์จะจับกับอนุภาคต่างๆที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันมาแล้วทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแล้ว จากนั้นจะถูกจับโดยโพลิเมอร์และถูกแยกออกจากระบบด้วยกระบวนการแยกทางแม่เหล็ก (Magnetic Separation)



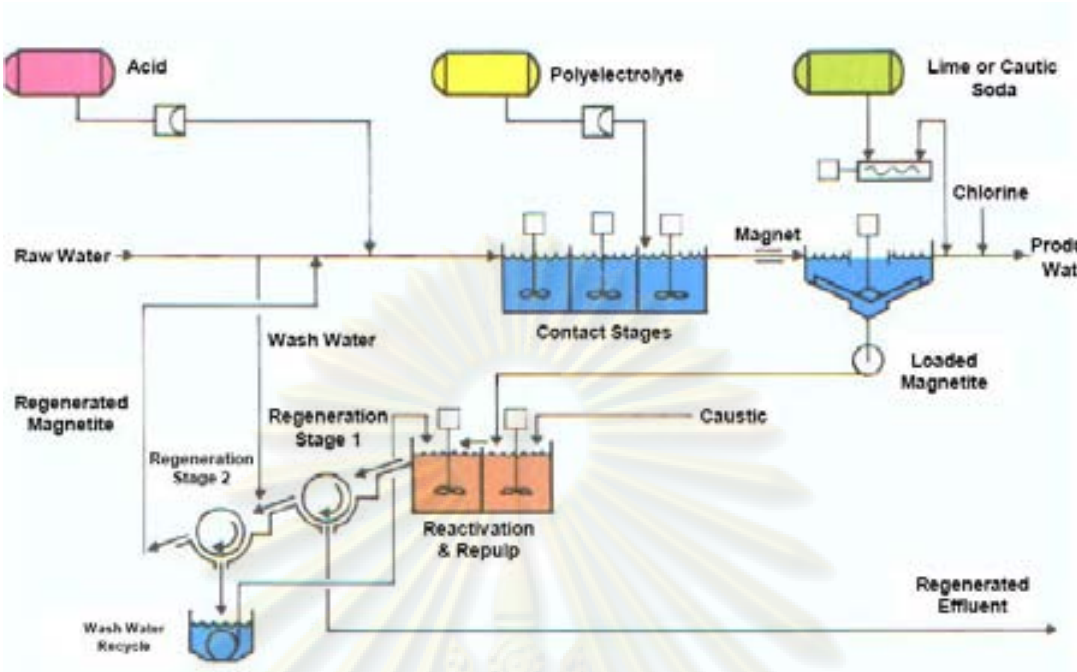

**รูปที่ 2.6** แผนผังกระบวนการทำงานของกระบวนการซิโรฟล็อค (Sirofloc Process) (ดัดแปลงจาก Booker, 2000)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระบวนการในการทำงานของระบบซิโรฟล็อคมีขั้นตอนดังนี้

1. น้ำเสียที่จะนำมาบำบัดจะถูกกักเก็บไว้ในบ่อปรับสภาพน้ำ (Equalization Tank) เพื่อให้น้ำเสียที่จะเข้าระบบเป็นเนื้อเดียวกัน
2. นำน้ำเสียมาวิเคราะห์และวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อหาปริมาณการใช้สารเคมีที่เหมาะสม (Optimum dose)
3. น้ำเสียที่เป็นเนื้อเดียวกันจะเข้าสู่ถังกวนช้าซึ่งมีใบพัดกวนอย่างช้าๆ
4. เติมสารโคแอกกูแลนท์ลงไป เช่น สารส้ม (Alum) หรือโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminium Chloride : P.A.C.)
5. น้ำเสียที่เติมโคแอกกูแลนท์ไปแล้วจะเริ่มเกิดฟล็อคขนาดเล็กในถังกวนช้าและจะถูกส่งเข้าสู่ถังกวนช้าอีกถัง
6. เมื่อเข้าสู่ถังกวนช้าถังที่ 2 จะมีการเติมแมกนีไทต์ลงไปเพื่อเป็นตัวกระตุ้นให้ ฟล็อคขนาดเล็กที่กระจายอยู่ในน้ำเกิดการรวมตัวกันเกิดฟล็อคที่ขนาดใหญ่ขึ้น
7. หลังจากที่มีการเติมโคแอกกูแลนท์และ Magnetic Seed แล้วจึงเติมสารโพลิเมอร์ที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสัมผัสสูง (High porous/High surface area) เช่นไคโตซาน (Chitosan) หรือโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyninyl Alcohol : PVA) โดยโพลิเมอร์ที่มีรูพรุนจะทำการดูดฟล็อคที่อยู่ในน้ำเสียเข้าสู่รูพรุนในโพลิเมอร์ โดยขนาดของรูพรุนของโพลิเมอร์จะต้องมีขนาดที่สมดุลกับขนาดของฟล็อคที่อยู่ในน้ำเสีย
8. น้ำเสียจะเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยก Magnetic Sludge ออกจากน้ำที่บำบัดแล้ว
9. Magnetic Sludge ที่เกิดขึ้นในน้ำเสียสามารถแยกออกจากน้ำโดยการใช้แท่งหรือจานแม่เหล็กดูดสาร Magnetic Sludge ที่อยู่ในน้ำออกมาได้
10. Magnetic Sludge ที่แยกออกจากน้ำแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการใช้สารละลายด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ หรือน้ำปูนใสมาทำการชะล้าง Magnetic Sludge ให้กลายเป็น Magnetic Seed อีกครั้งเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่อีกครั้ง
11. สลัดจ์ที่เหลืออยู่สามารถนำไปผสมกับซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตรูพรุน(Porous Concrete)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 2.7** แผนผังแสดงภาพรวมทั้งหมดของระบบซิโรฟล็อค (Sirofloc Process)
(Aker Kvaerner Engineering Services Ltd., 2005)

จากการที่โพลิเมอร์ดูดฟล็อคที่อยู่ในน้ำและฟล็อคไม่สามารถออกจากรูพรุนของโพลิเมอร์ ได้ทำให้น้ำเสียที่ผ่านระบบนี้มีความใสมากกว่าระบบเดิม และกำจัดสิ่งเจือปนต่าง ๆ เช่น ค่าซีโอดี ค่าบีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และสี รวมทั้งประหยัดเวลาในการตกตะกอนและแยกตะกอน

ข้อดีของกระบวนการซิโรฟล็อคมีดังนี้ (Aker Kvaerner Engineering Services Ltd., 2005)

1. ค่าลงทุนและค่าการดำเนินการถูกกว่าระบบเดิม
2. ออกแบบแปลนได้ขนาดกระทัดรัด ใช้พื้นที่น้อย
3. น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพสูงทำให้ลดความจำเป็นในการผ่านการกรอง
4. ลดอันตรายที่เกิดจากเหล็กและอะลูมิเนียมซึ่งเกิดจากโคแอกกูแลนท์
5. ไม่มีผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช
6. สามารถเริ่มและหยุดกระบวนการได้อย่างรวดเร็วโดยเวลาที่น้ำอยู่ในระบบน้อยกว่า 30 นาที
7. สามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำเสียได้ทันที
8. สามารถเดินระบบได้โดยไม่ต้องอาศัยคนควบคุม

9. น้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าผ่านมาตรฐาน
10. ใช้ได้ดีกับน้ำเสียที่มีสี
11. เกิดสลัดจ์น้อยและไม่ต้องการการบำบัดสลัดจ์
12. สามารถนำแมกนีไทต์กลับมาใช้ใหม่ได้

**2.4 การกวนผสม**

การกวนเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนให้กับน้ำซึ่งมีบทบาทสำคัญในกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ อุปกรณ์กวนจะเป็นการทำให้น้ำเกิดการหมุนด้วยตัวเครื่อง เช่น ใบพัด ซึ่งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกวนประเภทนี้ ได้แก่ ความเร็วแกรเดียนท์(G) ที่บ่งบอกถึงระดับความปั่นป่วนว่ามากน้อยเพียงใด ซึ่งความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นเป็นการถ่ายเทพลังงานให้แก่น้ำในรูปการกวนน้ำ โดยสามารถคำนวณค่าพลังงานนี้ได้ดังนี้ (Metcalf และ Eddy, 2004)

สามารถนำมาคำนวณพลังงานในรูปของความเร็วแกรเดียนท์(G) จากสมการของแคมท์และสไตน์ ดังนี้

$$G = (P / \mu V)^{1/2} \qquad (2\text{-}1)$$

เมื่อ $G$ = ความเร็วแกรเดียนท์ (วินาที$^{-1}$)
$P$ = พลังงานที่ใช้ (วัตต์)
$\mu$ = ความหนืดของน้ำ (นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร)
$V$ = ปริมาตรของน้ำในถังกวน (ลูกบาศก์เมตร)

โดยสามารถหาพลังงาน (P) จาก

$$P = N_P \rho N^3 d_I^5 \qquad (2\text{-}2)$$

เมื่อ $P$ = พลังงาน (วัตต์)
$N_P$ = จำนวนใบพัด
$\rho$ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$N$ = ความเร็วรอบการหมุน(รอบต่อวินาที)
$d_I$ = เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด (เมตร)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

**Bolto (1996)** ได้ศึกษาการใช้การแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซินที่มีแมกนีไทต์ร่วมกับหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ในการบำบัดน้ำเพื่อผลิตน้ำดื่มพบว่าสามารถกำจัดแคลเซียมไบคาร์บอเนต ($Ca(HCO_3)_2$) ได้และยังสามารถนำนิกเกิลที่อยู่ในน้ำล้างแผ่นขั้วไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย และจากสมบัติทางเคมีของแม่เหล็กที่มีประจุที่พื้นผิวเป็นบวกเมื่อพีเอชต่ำ สามารถเปลี่ยนประจุเป็นลบได้เมื่อพีเอชสูงขึ้นทำให้มีการพัฒนาเป็นระบบซิโรฟลอคขึ้นมาโดยใช้แมกนีไทต์ที่มีขนาดอนุภาค 1-10 นาโนเมตร ที่พีเอช 5-6 เพื่อใช้ในกระบวนการทำให้น้ำใสและกระบวนการกำจัดสี จากนั้นจึงเร่งการตกตะกอนด้วยแม่เหล็กและนำกลับมาใช้ใหม่โดยสารละลายด่างที่พีเอช 12 ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาและการตกตะกอนเร็วกว่าการทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มธรรมดาอย่างน้อย 3 เท่า หลักการกำจัดอนุภาคคือ โดยปกติอนุภาคต่าง ๆ เป็นประจุลบ แมกนีไทต์ที่พีเอช 5-6 แมกนีไทต์จะมีประจุบวกซึ่งจะดูดติดผิวอนุภาคต่างๆ โดยถ้ายังมีความขุ่นเหลืออยู่จะใช้โคแอกกูเลชันเอดช่วยด้วยเพื่อเป็นตัวเชื่อมระหว่างความขุ่นและพื้นผิวแมกนีไทต์ จากที่กล่าวมานี้จึงมีการนำไปปรับปรุงเพื่อใช้กับน้ำเสียจากสิ่งปฏิกูลโดยมีของแข็งแขวนลอย 250 มก./ล., น้ำมันและไขมัน 30 มก./ล. และค่าซีโอดี 440 มก./ล. โดยใช้แมกนีไทต์ 0.5% slurry และสารส้ม 8 มก./ล. เพื่อช่วยในการจับอนุภาคต่างๆที่พีเอช 6 ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอย 87% น้ำมันและไขมัน 90% ซีโอดี 60% บีโอดี 50% แบคทีเรีย 99% ฟอสเฟต 89% และโลหะหนัก 74-89% โดยทั้งหมดใช้เวลา 15 นาที

**Sakai และคณะ (1997)** ได้ศึกษาการบำบัดแบบใช้ตะกอนเร่งควบคู่กับ การบำบัดไนโตรเจน โดยใส่แมกนีไทต์ผงลงไปในตะกอนเร่งเปรียบเทียบกับระบบตะกอนเร่งแบบธรรมดา โดยระบบตะกอนเร่งที่มีแมกนีไทต์มีการให้อากาศเป็นช่วงๆ โดยให้อากาศ 40 นาทีและไม่ให้อากาศ 20 นาทีสลับกัน ลักษณะของน้ำเสียมีค่าซีโอดี 0.92 ก./ล.-วัน และมีค่าทีเคเอ็น 0.1 ก./ล.-วัน ผลการทดลองคือสามารถบำบัดค่าซีโอดีและไนโตรเจนได้พร้อมกันโดยกำจัดซีโอดีได้ 89% และทีเคเอ็นได้ 92% นอกจากนี้จะพบว่าปริมาณจุลชีพในระบบตะกอนเร่งที่มีแมกนีไทต์จะมากกว่าระบบตะกอนเร่งธรรมดาประมาณ 3 เท่า และ HRT ในระบบตะกอนเร่งที่มีแมกนีไทต์มีค่า 5 นาที ในขณะที่ระบบตะกอนเร่งธรรมดามีค่า 1-3 ชั่วโมง

**Sakai และคณะ (1994)** ได้ศึกษาการสร้างเครื่องมือซึ่งสามารถแยกตะกอนซึ่งมีแมกนีไทต์ออกจากน้ำที่ถูกบำบัดแล้วซึ่งมีการไหลแบบต่อ เนื่องหลังจากออกจากถังตกตะกอนและน้ำตะกอนกลับมาใส่ในถังเติมอากาศ นอกจากนี้ยังสามารถรักษาสภาพความเข้มข้นของตะกอนเพื่อให้สัดส่วนระหว่างการเจริญเติบโตของจุลชีพและสลายตัวของจุลชีพสมดุลกัน ซึ่งทำการทดลองโดย

สร้างเครื่องมือที่มีจานหมุนแม่เหล็กใส่เข้าไปในถังเติมอากาศ ใช้เวลาการทดลอง 100 วันโดยไม่มีการนำตะกอนส่วนเกินออกจากถังเติมอากาศ อัตราการเติมอากาศ 2 ล./นาที อุณหภูมิคงที่ 25°ซ ผลปรากฏว่าปริมาณซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีละลายน้ำจะลดลงอย่างช่วง 10 วันแรกอยู่ที่ 16 และ 11 มก./ล. ตามลำดับและเริ่มคงที่หลังจากวันที่ 10 เป็นต้นไป ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีทั้งหมดอยู่ที่ประมาณ 92% โดยน้ำเสียขาออกไม่มีปริมาณตะกอนที่มีแมกนีไทต์อยู่เลยทั้งที่ใช้เวลาในการตกตะกอนเพียง 14 นาทีและหมุนจานแม่เหล็กด้วยความเร็ว 1 รอบต่อนาที โดยจะให้ผลดีที่สุดที่ 3 รอบต่อนาที และไม่มีปัญหาการแยกตะกอนออกจากน้ำเลย และสรุปได้ว่ากระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กับน้ำเสียที่ไหลอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณตะกอนสูงได้

**Anderson และคณะ (1980)** ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการกำจัดความกระด้างและความขุ่นซึ่งมีประมาณอะลูมิเนียมไอออน ($Al^{3+}$) สูงโดยใช้การแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งมีหมู่ซัลโฟนิก ($-SO_3H$) ผลปรากฏว่าถ้าเรซินมีขนาดละเอียดมากพอ เรซินจะทำหน้าที่เป็นแกนกลางในการต่อตัวของฟล็อคและเร่งการตกตะกอนและการรวมเหล็กออกไซด์ซึ่งมีสมบัติแม่เหล็กเข้าไปในเรซินจะสามารถแยกเรซินออกจากน้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วได้ง่ายโดยวิธีการทางแม่เหล็กและสามารถนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยกระบวนการที่ทำให้เกิดกรด

**Pavlova และ Dobrevsky (2005)** ได้ศึกษาการใช้ทรายดำ (black sand) ซึ่งมีแมกนีไทต์ในปริมาณมากมาใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันแทนกระบวนการโคแอกกูเลชันแบบเดิมโดยเทียบเคียงกับกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) และมีการเปรียบเทียบทรายดำธรรมดาและทรายดำที่ถูกกระตุ้นโดยศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดของพารามิเตอร์ 3 ตัวคือ ปริมาณกรดฮิวมิก ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการของโพแทสเซียมเปอแมงกาเนต และปริมาณสารแขวนลอย ผลปรากฏว่าทรายดำธรรมดาและทรายดำที่ถูกกระตุ้นให้ปริมาณที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าไม่จำเป็นต้องมีการกระตุ้นทรายดำแต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของทรายดำทั้งสองน้อยกว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของเฟอริกคลอไรด์ จึงทำการศึกษาต่อโดยใช้ทรายดำคู่กับฟล็อคคูแลนท์ ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าสามารถนำมาแทนกระบวนการโคแอกกูเลชันแบบเดิมได้เนื่องจากได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของทรายดำโดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารชะล้างโดยใช้ 3 วิธีคือ ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 ครั้ง ใช้น้ำ 5 ครั้ง และใช้น้ำ 4 ครั้งและโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 ครั้ง พบว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จะได้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้น้ำ

**Gupta และ Ghosh (2009)** ได้ศึกษาการใช้โลหะผสมออกไซด์ระดับโครงสร้างนาโนระหว่าง Fe (III) และ Ti (IV) เพื่อนำมาใช้ในการกำจัด As (III) และ As (V) ที่พีเอช 7 ที่อุณหภูมิต่างๆกัน ผลการศึกษาพบว่าเมื่อทำเป็น Fluidized bed จะเป็นการดูดติดผิวแบบ Langmuir และเป็นกระบวนการแบบดูดความร้อนและเกิดขึ้นได้เองด้วยการเพิ่มเอนโทรปีของระบบ ความเข้มข้นของ As (V) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในขณะที่ As (III) ลดลงเล็กน้อย โดยเมื่อใช้โลหะผสมปริมาณ 2 กรัมต่อลิตรจะได้ประสิทธิภาพในการบำบัด 87.4% และเมื่อใช้โลหะผสมปริมาณ 40 กรัมต่อลิตรจะได้ประสิทธิภาพในการบำบัดถึง 100%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 3

## ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

การทดลองนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัยปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

#### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4 Digits Balance)
2. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
3. เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (ICP)
4. เครื่องทำจาร์เทสต์ (Jar Test)
5. เครื่องวัดความขุ่น (Turbidimeter)
6. เครื่องกลั่นแอมโมเนีย

#### 3.1.2 สารเคมี

1. แอมโมเนียมคลอไรด์ ($NH_4Cl$)
2. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
3. คาโอลิไนท์ (Kaolinite)
4. ไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซเนต ($Na_2HAsO_4$)
5. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
7. เฟอร์ริกคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$)
8. เฟอรัสคลอไรด์ เตตระไฮเดรต ($FeCl_2 \cdot 4H_2O$)
9. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ($NH_4OH$)
10. สารส้ม (Alum)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์**

เตรียมได้โดยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. น้ำเสียที่มีความขุ่นต่ำ เตรียมโดยใช้คาโอลิไนท์ใส่ในน้ำกลั่นให้มีความขุ่น 30 เอ็นทียู
2. น้ำเสียที่มีความขุ่นสูง เตรียมโดยใช้คาโอลิไนท์ใส่ในน้ำกลั่นให้มีความขุ่น 100 เอ็นทียู
3. น้ำเสียที่มีแอมโมเนีย เตรียมโดยใช้แอมโมเนียมคลอไรด์ละลายน้ำให้มีความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. น้ำเสียที่มีโลหะหนัก เตรียมโดยใช้ไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซเนตละลายน้ำหรือใช้โพแทสเซียมไดโครเมตละลายน้ำให้มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
5. น้ำเสียทีผสมที่มีความขุ่น แอมโมเนีย และโลหะหนัก เตรียมโดยใช้น้ำเสียที่มีความขุ่น น้ำเสียที่มีแอมโมเนีย และน้ำเสียที่มีโลหะหนักมารวมกัน

น้ำเสียที่มีความขุ่นต่ำและความขุ่นสูง นำมาใช้แทนน้ำดิบที่ทำน้ำประปาจากข้อมูลความขุ่นต่ำสุดและความขุ่นสูงสุดของน้ำดิบที่ใช้ทำน้ำประปาจากโรงประปาสามเสนตั้งแต่ปีพ.ศ. 2544 - 2549

น้ำเสียที่มีปริมาณแอมโมเนีย นำมาใช้แทนน้ำเสียจากสะพานปลาจากผลการวิเคราะห์ปริมาณทีเคเอ็นของน้ำเสียจากสะพานปลา (ภูคำ พิมจักร, 2546)

น้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนัก (โครเมียมและอาร์เซนิก) มาใช้แทนน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ จากผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะขนาดเล็กและขนาดกลาง ครั้งที่ 2 เดือนเมษายน พ.ศ. 2547 (ธนกาญจน์ บุญพิทักษ์, 2547)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.3 ลักษณะของน้ำเสียจริง

#### 3.3.1 ลักษณะของน้ำเสียที่มีความขุ่น

น้ำเสียที่มีความขุ่นเก็บจากสระน้ำหน้าพระรูปสองรัชกาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วันที่ 24 มกราคม 2552 โดยมีสมบัติดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 3.1** สมบัติของน้ำเสียที่มีความขุ่น

| พารามิเตอร์ | ค่าที่ได้ |
|---|---|
| พีเอช | 5.6 |
| ความขุ่น | 132 เอ็นทียู |
| การนำไฟฟ้า | 447 ไมโครซีเมนต์ |

#### 3.3.2 ลักษณะของน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย

น้ำเสียที่มีแอมโมเนียเก็บจากน้ำเสียที่ใช้เลี้ยงกุ้ง จากการทดลองของนิสิตคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วันที่ 25 มกราคม 2552 โดยมีสมบัติดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 3.2** สมบัติของน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย

| พารามิเตอร์ | ค่าที่ได้ |
|---|---|
| พีเอช | 7.37 |
| แอมโมเนีย | 24.3 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ค่าดีโอ | 5.29 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ค่าซีโอดี | 418.2 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| ความขุ่น | 0.466 เอ็นทียู |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.3.3 ลักษณะของน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

น้ำเสียที่มีโลหะหนักเก็บจากน้ำเสียที่โรงฟอกหนังแห่งหนึ่งที่นิคมอุตสาหกรรมบางปู กิโลเมตรที่ 30 วันที่ 29 มกราคม 2552 โดยมีสมบัติดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 3.3** สมบัติของน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

| พารามิเตอร์ | ค่าที่ได้ |
|---|---|
| พีเอช | 8.2 |
| โครเมียม | 17.88 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| อาร์เซนิก | 3.14 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| การนำไฟฟ้า | 1838 ไมโครซีเมนต์ |
| ความขุ่น | 320 เอ็นทียู |

### 3.4 การเตรียมแมกนีไทต์

### 3.4.1 สารเคมี

1. เฟอรัสคลอไรด์ เตตระไฮเดรต ($FeCl_2 \cdot 4H_2O$)
2. เฟอร์ริกคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$)
3. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ($NH_4OH$)
4. น้ำกลั่น (Deionized water)
5. ก๊าซไนโตรเจน 99.99%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.4.2 วิธีการสังเคราะห์แมกนีไทต์**

แมกนีไทต์สามารถสังเคราะห์จากการตกตะกอนร่วม การตกตะกอนของแมกนีไทต์จะเกิดขึ้นในสภาวะที่เป็นด่าง อัตราส่วนโดยมวลของ เฟอรัสไอออนต่อเฟอริกไอออนอยู่ที่ 1 : 2 ภายใต้สภาวะที่มีก๊าซไนโตรเจนเพื่อป้องการกระบวนการออกซิเดชัน

การสังเคราะห์แมกนีไทต์ 1 กรัม ทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้ (Ma และคณะ, 2006)

1. นำเฟอรัสคลอไรด์เตตระไฮเดรต 0.86 กรัมและเฟอรริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต 2.36 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 40 มิลลิลิตร อยู่ในสภาวะที่มีก๊าซไนโตรเจน
2. เพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส
3. เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 5 มิลลิลิตร
4. กวนด้วยความเร็ว 1000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
5. นำภาชนะวางบนแม่เหล็ก จากนั้นรินน้ำส่วนที่เหนือตะกอนออก
6. นำตะกอนที่เหลือมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน 6 ครั้ง ครั้งละ 50 มิลลิลิตร เพื่อล้างส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกไป

**3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย**

งานวิจัยนี้จะใช้น้ำเสียทั้งหมด 3 ประเภทคือ น้ำเสียที่มีความขุ่น น้ำเสียที่มีปริมาณแอมโมเนีย น้ำเสียที่มีปริมาณโละหนัก โดยงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 7 ส่วน

ส่วนที่ 1 เป็นการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์ และการทำจาร์เทสต์ของสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น

ส่วนที่ 2 เป็นการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์ และการทำจาร์เทสต์ของสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย

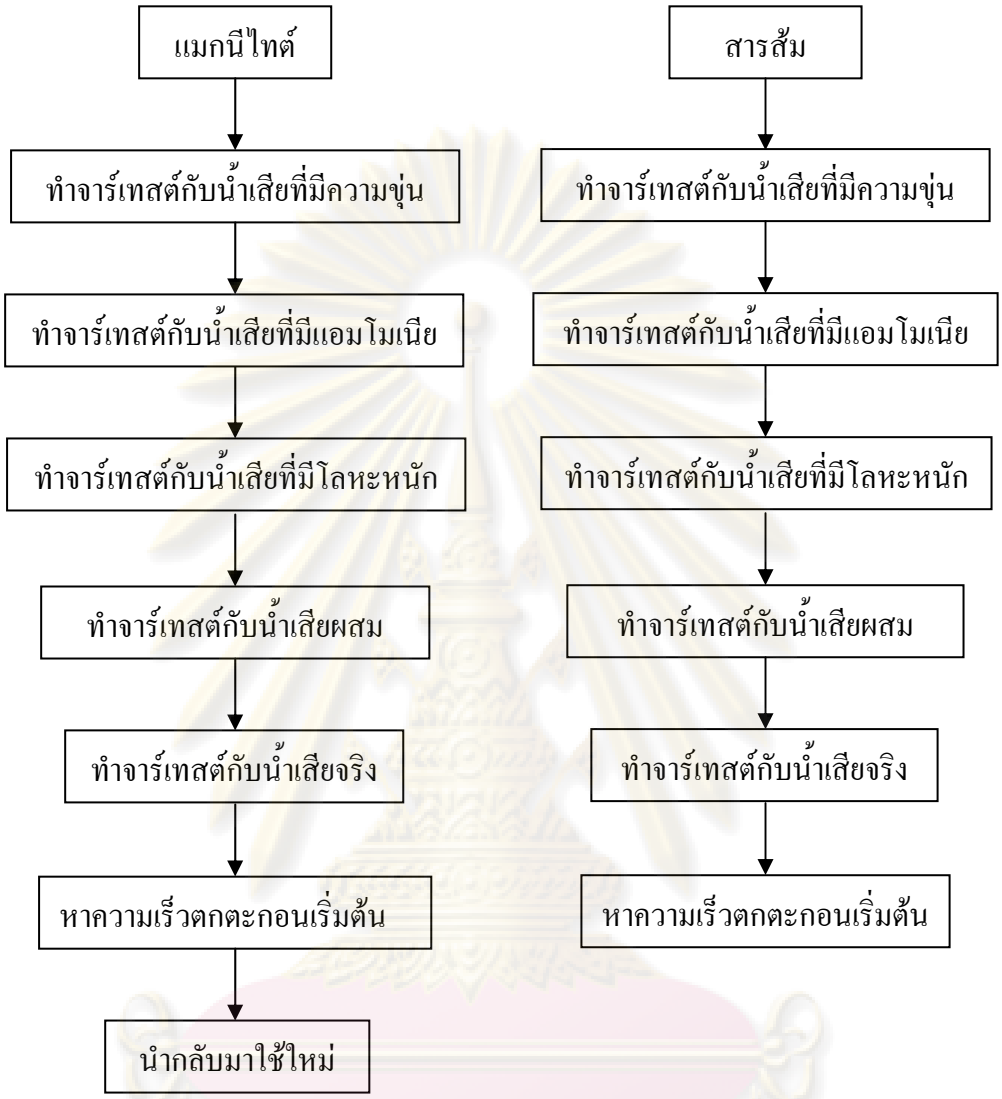
ส่วนที่ 3 เป็นการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์ และการทำจาร์เทสต์ของสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนัก

ส่วนที่ 4 เป็นการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์ และการทำจาร์เทสต์ของสารส้มเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียผสม

ส่วนที่ 5 เป็นการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์ และการทำจาร์เทสต์ของสารส้มเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียจริง

ส่วนที่ 6 เป็นการหาความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนของแมกนีไทต์และสารส้ม

ส่วนที่ 7 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์ที่นำกลับมาใช้




**รูปที่ 3.1** แผนผังแสดงภาพรวมของการทำวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.5.1 การทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น**

1. นำน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 หรือ 30 เอ็นทียู ใส่บีกเกอร์ 12 ใบ ใบละ 1 ลิตร

2. เติมแมกนีไทต์ในปริมาณ 2 กรัมต่อลิตรลงในบีกเกอร์ 6 ใบ ปรับพีเอชเป็น 3 5 6.5 7 9 และ 11 และเติมสารส้มในปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตรลงในบีกเกอร์อีก 6 ใบ ปรับพีเอชเป็น 3 5 6.5 7 9 และ 11 เช่นกัน

3. กวนน้ำและสารเคมีอย่างรวดเร็วด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาที

4. ลดความเร็วให้เหลือประมาณ 30 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที

5. สังเกตดูและจดบันทึกเวลาที่เกิดฟล็อคปรากฏให้เห็นเป็นครั้งแรกในแต่ละบีกเกอร์ตลอดจนขนาดและปริมาณของฟล็อค

6. ปิดเครื่องกวนน้ำและตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที สังเกตดูการจมตัวของตะกอนและตะกอนที่นอนก้นตลอดจนฟล็อคที่เหลือซึ่งไม่นอนก้นในบีกเกอร์ทั้ง 12 ใบ

7. ดูดเอาน้ำใสข้างบนโดยไม่ให้กระเทือนถึงตะกอนที่จมอยู่ก้นบีกเกอร์ นำไปวิเคราะห์หาความขุ่น

8. สร้างกราฟระหว่างพีเอชกับความขุ่นที่เหลือในแมกนีไทต์ และพีเอชกับความขุ่นที่เหลือในสารส้มเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์และสารส้ม และหาพีเอชที่เหมาะสมทั้งสองค่าเพื่อนำมาใช้ต่อ

9. เตรียมน้ำเสียเหมือนข้อ 1 อีกครั้ง แต่ปรับพีเอชของน้ำเสีย 6 ใบตามพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์จากข้อ 8 และอีก 6 ใบตามพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มจากข้อ 8

10. เติมแมกนีไทต์ในปริมาณ 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 กรัม สารส้มในปริมาณ 10 20 30 40 50 และ 60 มิลลิกรัมลงในบีกเกอร์ตามข้อ 10

11. ดำเนินการตามข้อ 3-7 อีกครั้ง และสร้างกราฟ ระหว่างปริมาณแมกนีไทต์กับความขุ่นที่เหลือและปริมาณสารส้มกับความขุ่นที่เหลือ และหาปริมาณที่เหมาะสมทั้งสองค่าเพื่อนำมาใช้ต่อ

12. เตรียมน้ำเสียเหมือนข้อ 1 อีกครั้ง ปรับพีเอชของน้ำเสียตามข้อ 9 อีกครั้ง และดำเนินการตามข้อ 3 แต่ใช้รอบการกวนเร็วที่ 50 100 150 200 250 และ 270 รอบต่อนาที

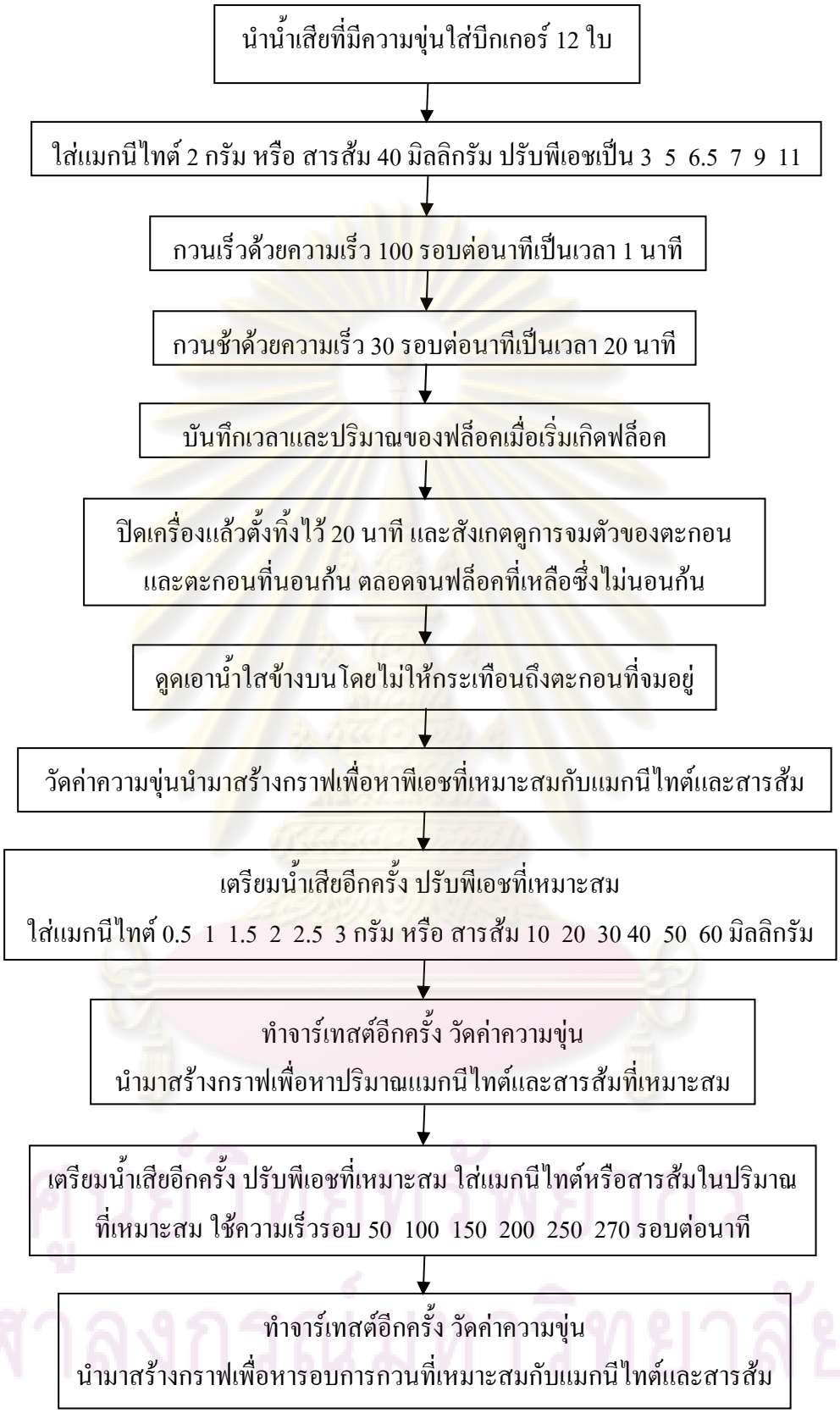
13. ดำเนินการตามข้อ 4-7 อีกครั้ง และสร้างกราฟระหว่างรอบการกวนเร็วกับความขุ่นที่เหลือ และหาความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมทั้งสองค่า

การทดลองความขุ่นทำซ้ำ 3 ครั้ง

โดยประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นหาได้จากสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น} = \frac{\text{ความขุ่นเริ่มต้น} - \text{ความขุ่นที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 3.2** แผนผังการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น

**ตารางที่ 3.4** ตัวแปรการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น

| **ช่วงการทดลอง** | **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
|---|---|---|
| การหาพีเอชที่เหมาะสม | 1. อุณหภูมิ | 1. อุณหภูมิห้อง |
| | 2. ปริมาณแมกนีไทต์ที่ใช้ | 2. 2 กรัม |
| | 3. ปริมาณสารส้มที่ใช้ | 3. 40 มิลลิกรัม |
| | 4. ความเร็วในการกวนเร็ว | 4. 100 รอบต่อนาที |
| | 5. ความเร็วในการกวนช้า | 5. 30 รอบต่อนาที |
| | **ตัวแปรอิสระ** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| | 1. พีเอช | 1. พีเอช 3 5 6.5 7 9 และ 11 |
| | **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| | 1. อนุภาคในน้ำ | 1. ความขุ่น |
| | **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| การหาปริมาณโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสม | 1. อุณหภูมิ | 1. อุณหภูมิห้อง |
| | 2. พีเอช | 2. พีเอชที่เหมาะสม |
| | 3. ความเร็วในการกวนเร็ว | 3. 100 รอบต่อนาที |
| | 4. ความเร็วในการกวนช้า | 4. 30 รอบต่อนาที |
| | **ตัวแปรอิสระ** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| | 1. ปริมาณแมกนีไทต์ที่ใช้ | 1. 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 กรัม |
| | 2. ปริมาณสารส้มที่ใช้ | 2. 10 20 30 40 50 และ 60 มิลลิกรัม |
| | **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| | 1. อนุภาคในน้ำ | 1. ความขุ่น |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 3.4** ตัวแปรการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมใน น้ำเสียที่มีความขุ่น (ต่อ)

| **ช่วงการทดลอง** | **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
|---|---|---|
| การหาความเร็วรอบการกวนเร็วที่เหมาะสม | 1. อุณหภูมิ<br>2. พีเอช<br>3. ปริมาณแมกนีไทต์ที่ใช้<br>4. ปริมาณสารส้มที่ใช้<br>5. ความเร็วในการกวนช้า | 1. อุณหภูมิห้อง<br>2. พีเอชที่เหมาะสม<br>3. ปริมาณที่เหมาะสม<br>4. ปริมาณที่เหมาะสม<br>5. 30 รอบต่อนาที |
| | **ตัวแปรอิสระ** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| | 1. ความเร็วในการกวนเร็ว | 1. 50 100 150 200 250 และ 270 รอบต่อนาที |
| | **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| | 1. อนุภาคในน้ำ | 1. ความขุ่น |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.5.2 การทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย**

1. นำน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่บีกเกอร์ 12 ใบ ใบละ 1 ลิตร

2. เติมแมกนีไทต์ในปริมาณ 2 กรัมต่อลิตรลงในบีกเกอร์ 6 ใบ ปรับพีเอชเป็น 3 5 6.5 7 9 และ 11 และเติมสารส้มในปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตรลงในบีกเกอร์อีก 6 ใบ ปรับพีเอชเป็น 3 5 6.5 7 9 และ 11 เช่นกัน

3. กวนน้ำและสารเคมีอย่างรวดเร็วด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาที

4. ลดความเร็วให้เหลือประมาณ 30 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที

5. สังเกตดูและจดบันทึกเวลาที่เกิดฟล็อคปรากฏให้เห็นเป็นครั้งแรก ในแต่ละบีกเกอร์ตลอดจนขนาดและปริมาณของฟล็อค

6. ปิดเครื่องกวนน้ำและตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที สังเกตดูการจมตัวของตะกอนและตะกอนที่นอนก้นตลอดจนฟล็อคที่เหลือซึ่งไม่นอนก้นในบีกเกอร์ทั้ง 12 ใบ

7. ดูดเอาน้ำใสข้างบนโดยไม่ให้กระเทือนถึงตะกอนที่จมอยู่ก้นบีกเกอร์ นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแอมโมเนีย

8. สร้างกราฟระหว่างพีเอชกับแอมโมเนียที่เหลือในแมกนีไทต์ และพีเอชกับแอมโมเนียที่เหลือในสารส้มเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์และสารส้ม และหาพีเอชที่เหมาะสมทั้งสองค่าเพื่อนำมาใช้ต่อ

9. เตรียมน้ำเสียเหมือนข้อ 1 อีกครั้ง แต่ปรับพีเอชของน้ำเสีย 6 ใบตามพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์จากข้อ 8 และอีก 6 ใบตามพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มจากข้อ 8

10. เติมแมกนีไทต์ในปริมาณ 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 กรัม สารส้มในปริมาณ 10 20 30 40 50 และ 60 มิลลิกรัมลงในบีกเกอร์ตามข้อ 10

11. ดำเนินการตามข้อ 3-7 อีกครั้ง สร้างกราฟระหว่างปริมาณแมกนีไทต์กับแอมโมเนียที่เหลือและปริมาณสารส้มกับแอมโมเนียที่เหลือ และหาปริมาณที่เหมาะสมทั้งสองค่าเพื่อนำมาใช้ต่อ

12. เตรียมน้ำเสียเหมือนข้อ 1 อีกครั้ง ปรับพีเอชของน้ำเสียตามข้อ 9 อีกครั้ง และดำเนินการตามข้อ 3 แต่ใช้รอบการกวนเร็วที่ 50 100 150 200 250 และ 270 รอบต่อนาที

13. ดำเนินการตามข้อ 4-7 อีกครั้ง และสร้างกราฟระหว่างรอบการกวนเร็วกับแอมโมเนียที่เหลือ และหาความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมทั้งสองค่า

โดยประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียหาได้จากสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย} = \frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น - ความเข้มข้นที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**รูปที่ 3.3** แผนผังการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย

**ตารางที่ 3.5** ตัวแปรการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย

| **ช่วงการทดลอง** | **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
|---|---|---|
| การหาพีเอชที่เหมาะสม | 1. อุณหภูมิ | 1. อุณหภูมิห้อง |
| | 2. ปริมาณแมกนีไทต์ที่ใช้ | 2. 2 กรัม |
| | 3. ปริมาณสารส้มที่ใช้ | 3. 40 มิลลิกรัม |
| | 4. ความเร็วในการกวนเร็ว | 4. 100 รอบต่อนาที |
| | 5. ความเร็วในการกวนช้า | 5. 30 รอบต่อนาที |
| | **ตัวแปรอิสระ** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| | 1. พีเอช | 1. พีเอช 3 5 6.5 7 9 และ 11 |
| | **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| | 1. อนุภาคในน้ำ | 1. ความเข้มข้นของแอมโมเนีย |
| | **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| การหาปริมาณโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสม | 1. อุณหภูมิ | 1. อุณหภูมิห้อง |
| | 2. พีเอช | 2. พีเอชที่เหมาะสม |
| | 3. ความเร็วในการกวนเร็ว | 3. 100 รอบต่อนาที |
| | 4. ความเร็วในการกวนช้า | 4. 30 รอบต่อนาที |
| | **ตัวแปรอิสระ** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| | 1. ปริมาณแมกนีไทต์ที่ใช้ | 1. 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 กรัม |
| | 2. ปริมาณสารส้มที่ใช้ | 2. 20 40 60 80 100 และ 120 มิลลิกรัม |
| | **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| | 1. ไอออนในน้ำ | 1. ความเข้มข้นของแอมโมเนีย |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 3.5** ตัวแปรการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย (ต่อ)

| **ช่วงการทดลอง** | **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
|---|---|---|
| การหาความเร็วรอบการกวนเร็วที่เหมาะสม | 1. อุณหภูมิ<br>2. พีเอช<br>3. ปริมาณแมกนีไทต์ที่ใช้<br>4. ปริมาณสารส้มที่ใช้<br>5. ความเร็วในการกวนช้า | 1. อุณหภูมิห้อง<br>2. พีเอชที่เหมาะสม<br>3. ปริมาณที่เหมาะสม<br>4. ปริมาณที่เหมาะสม<br>5. 30 รอบต่อนาที |
| | **ตัวแปรอิสระ** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| | 1. ความเร็วในการกวนเร็ว | 1. 50 100 150 200 250 และ 270 รอบต่อนาที |
| | **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| | 1. ไอออนในน้ำ | 1. ความเข้มข้นของแอมโมเนีย |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.5.3 การทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก**

1. นำน้ำเสียที่มีโครเมียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตรใส่บีกเกอร์ 12 ใบ ใบละ 1 ลิตร

2. เติมแมกนีไทต์ในปริมาณ 2 กรัมต่อลิตรลงในบีกเกอร์ 6 ใบ ปรับพีเอชเป็น 3 5 6.5 7 9 และ 11 และเติมสารส้มในปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตรลงในบีกเกอร์อีก 6 ใบ ปรับพีเอชเป็น 3 5 6.5 7 9 และ 11 เช่นกัน

3. กวนน้ำและสารเคมีอย่างรวดเร็วด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาที

4. ลดความเร็วให้เหลือประมาณ 30 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที

5. สังเกตดูและจดบันทึกเวลาที่เกิดฟล็อคปรากฏให้เห็นเป็นครั้งแรกในแต่ละบีกเกอร์ตลอดจนขนาดและปริมาณของฟล็อค

6. ปิดเครื่องกวนน้ำและตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที สังเกตดูการจมตัวของตะกอนและตะกอนที่นอนก้นตลอดจนฟล็อคที่เหลือซึ่งไม่นอนก้นในบีกเกอร์ทั้ง 12 ใบ

7. ดูดเอาน้ำใสข้างบนโดยไม่ให้กระเทือนถึงตะกอนที่จมอยู่ก้นบีกเกอร์ นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียม

8. สร้างกราฟระหว่างพีเอชกับโครเมียมที่เหลือในแมกนีไทต์ และพีเอชกับโครเมียมที่เหลือในสารส้มเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์และสารส้ม และหาพีเอชที่เหมาะสมทั้งสองค่าเพื่อนำมาใช้ต่อ

9. เตรียมน้ำเสียเหมือนข้อ 1 อีกครั้ง แต่ปรับพีเอชของน้ำเสีย 6 ใบตามพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์จากข้อ 8 และอีก 6 ใบตามพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มจากข้อ 8

10. เติมแมกนีไทต์ในปริมาณ 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 กรัม สารส้มในปริมาณ 20 40 60 80 100 และ 120 มิลลิกรัมลงในบีกเกอร์ตามข้อ 10

11. ดำเนินการตามข้อ 3-7 อีกครั้ง และสร้างกราฟระหว่างปริมาณแมกนีไทต์กับโครเมียมที่เหลือและปริมาณสารส้มกับโครเมียมที่เหลือ และหาปริมาณที่เหมาะสมทั้งสองค่าเพื่อนำมาใช้ต่อ

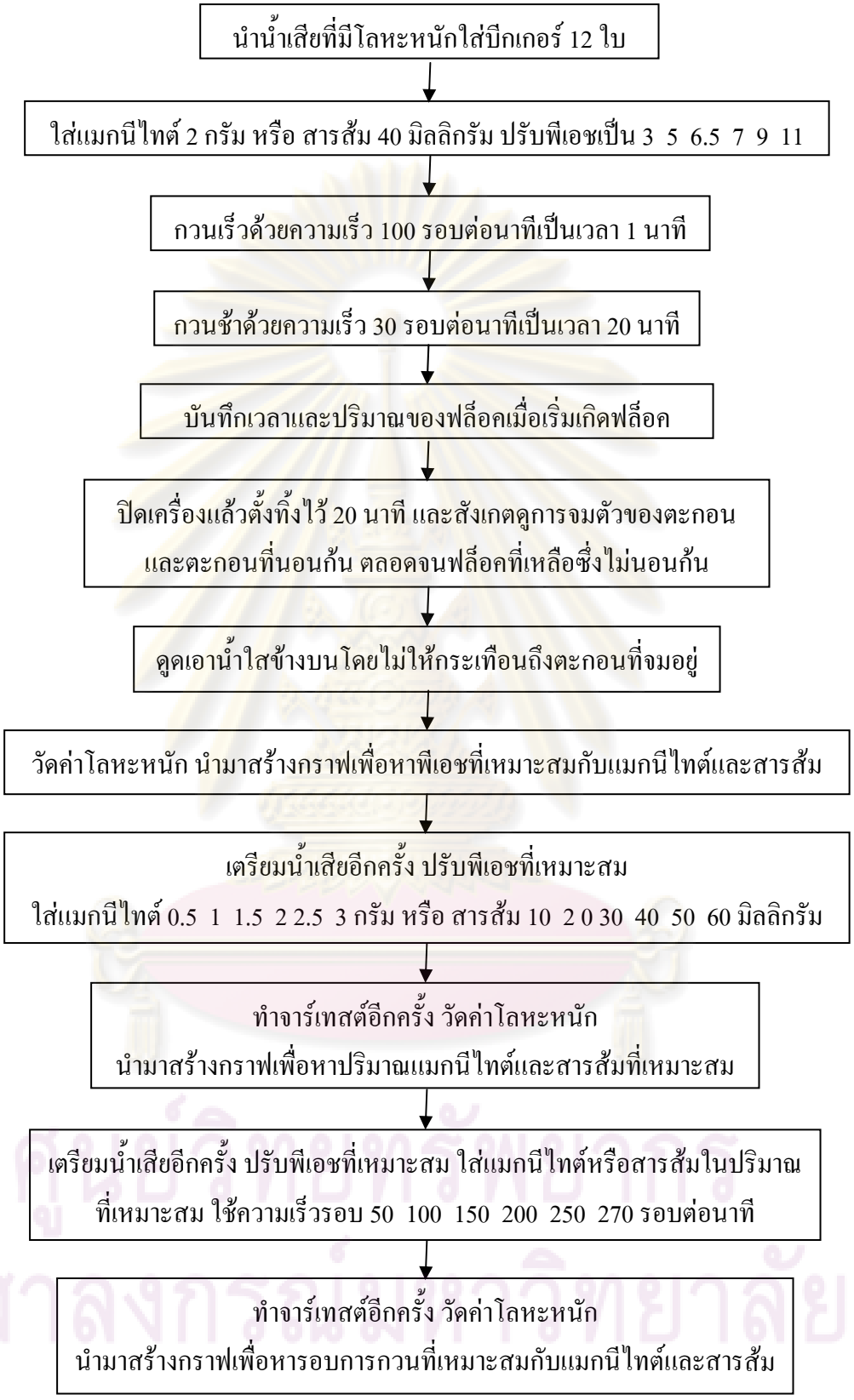
12. เตรียมน้ำเสียเหมือนข้อ 1 อีกครั้ง ปรับพีเอชของน้ำเสียตามข้อ 9 อีกครั้ง และดำเนินการตามข้อ 3 แต่ใช้รอบการกวนเร็วที่ 50 100 150 200 250 และ 270 รอบต่อนาที

13. ดำเนินการตามข้อ 4-7 อีกครั้ง และสร้างกราฟระหว่างรอบการกวนเร็วกับโครเมียมที่เหลือ และหาความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมทั้งสองค่า

14. เปลี่ยนจากโครเมียมเป็นอาร์เซนิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตรและดำเนินการทั้งหมดอีกครั้ง

โดยประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียหาได้จากสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนัก} = \frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น - ความเข้มข้นที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100$$




**รูปที่ 3.4** แผนผังการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

**ตารางที่ 3.6** ตัวแปรการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

| **ช่วงการทดลอง** | **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
|---|---|---|
| การหาพีเอชที่เหมาะสม | 1. อุณหภูมิ | 1. อุณหภูมิห้อง |
| | 2. ปริมาณแมกนีไทต์ที่ใช้ | 2. 2 กรัม |
| | 3. ปริมาณสารส้มที่ใช้ | 3. 40 มิลลิกรัม |
| | 4. ความเร็วในการกวนเร็ว | 4. 100 รอบต่อนาที |
| | 5. ความเร็วในการกวนช้า | 5. 30 รอบต่อนาที |
| | **ตัวแปรอิสระ** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| | 1. พีเอช | 1. พีเอช 3 5 6.5 7 9 และ 11 |
| | **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| | 1. อนุภาคในน้ำ | 1. ความเข้มข้นของโลหะหนัก |
| | **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| การหาปริมาณโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสม | 1. อุณหภูมิ | 1. อุณหภูมิห้อง |
| | 2. พีเอช | 2. พีเอชที่เหมาะสม |
| | 3. ความเร็วในการกวนเร็ว | 3. 100 รอบต่อนาที |
| | 4. ความเร็วในการกวนช้า | 4. 30 รอบต่อนาที |
| | **ตัวแปรอิสระ** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| | 1. ปริมาณแมกนีไทต์ที่ใช้ | 1. 0.5 1 1.5 2 2.5 และ 3 กรัม |
| | 2. ปริมาณสารส้มที่ใช้ | 2. 20 40 60 80 100 และ 120 มิลลิกรัม |
| | **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| | 1. ไอออนในน้ำ | 1. ความเข้มข้นของโลหะหนัก |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 3.6** ตัวแปรการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก (ต่อ)

| **ช่วงการทดลอง** | **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
|---|---|---|
| การหาความเร็วรอบการกวนเร็วที่เหมาะสม | 1. อุณหภูมิ | 1. อุณหภูมิห้อง |
| | 2. พีเอช | 2. พีเอชที่เหมาะสม |
| | 3. ปริมาณแมกนีไทต์ที่ใช้ | 3. ปริมาณที่เหมาะสม |
| | 4. ปริมาณสารส้มที่ใช้ | 4. ปริมาณที่เหมาะสม |
| | 5. ความเร็วในการกวนช้า | 5. 30 รอบต่อนาที |
| | **ตัวแปรอิสระ** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| | 1. ความเร็วในการกวนเร็ว | 1. 50 100 150 200 250 และ 270 รอบต่อนาที |
| | **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| | 1. ไอออนในน้ำ | 1. ความเข้มข้นของโลหะหนัก |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.5.4 การทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียผสม**

1. นำน้ำเสียผสม ซึ่งประกอบด้วยความขุ่น 100 เอ็นทียู แอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมและอาร์เซนิกอย่างละ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรใส่ในบีกเกอร์ 2 ใบ

2. ปรับพีเอชที่เหมาะสม ใส่แมกนีไทต์หรือสารส้มในปริมาณที่เหมาะสม

3. กวนน้ำและสารเคมีอย่างรวดเร็วด้วยความเร็วที่เหมาะสม

4. ลดความเร็วให้เหลือประมาณ 30 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที

5. สังเกตดูและจดบันทึกเวลาที่เกิดฟล็อคปรากฏให้เห็นเป็นครั้งแรกในแต่ละบีกเกอร์ ตลอดจนขนาดและปริมาณของฟล็อค

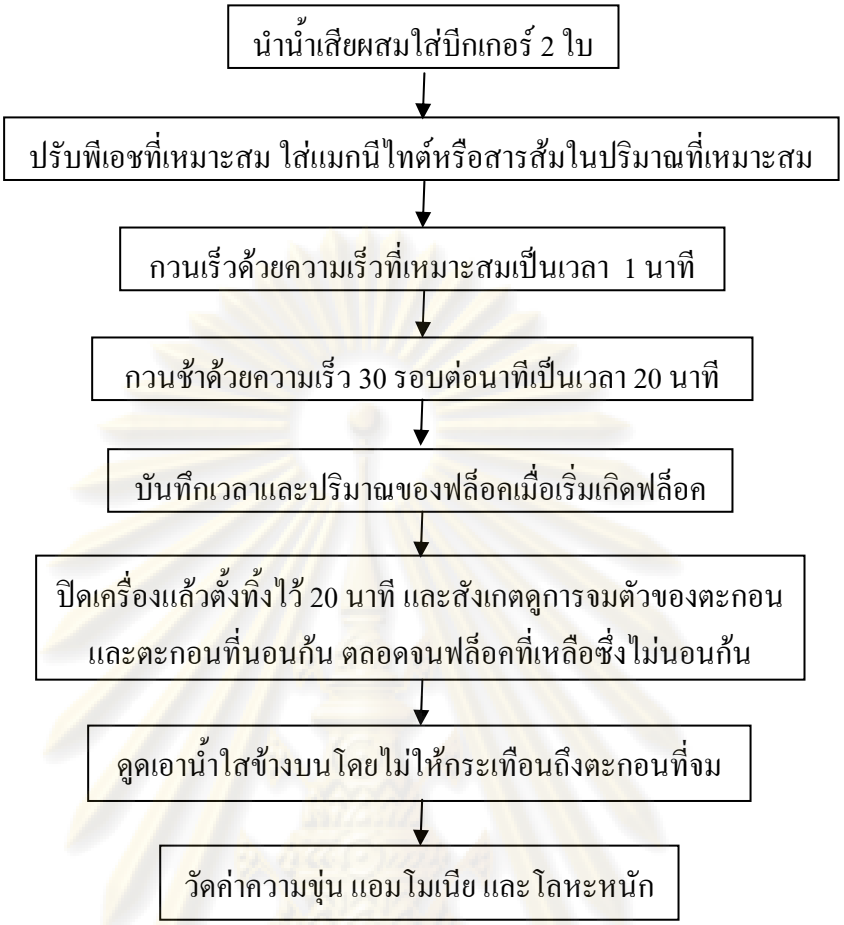
6. ปิดเครื่องกวนน้ำและตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที สังเกตดูการจมตัวของตะกอนและตะกอนที่นอนก้นตลอดจนฟล็อคที่เหลือซึ่งไม่นอนก้นในบีกเกอร์ทั้ง 2 ใบ

7. ดูดเอาน้ำใสข้างบนโดยไม่ให้กระเทือนถึงตะกอนที่จมอยู่ก้นบีกเกอร์ นำไปวิเคราะห์หาค่าความขุ่น ความเข้มข้นของแอมโมเนีย และโลหะหนัก

**ตารางที่ 3.7** ตัวแปรในการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียผสม

| **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
|---|---|
| 1. อุณหภูมิ | 1. อุณหภูมิห้อง |
| 2. พีเอช | 2. พีเอชที่เหมาะสม |
| 3. ปริมาณแมกนีไทต์ที่ใช้ | 3. ปริมาณที่เหมาะสม |
| 4. ปริมาณสารส้มที่ใช้ | 4. ปริมาณที่เหมาะสม |
| 5. ความเร็วในการกวนเร็ว | 5. ความเร็วที่เหมาะสม |
| 6. ความเร็วในการกวนช้า | 6. 30 รอบต่อนาที |
| **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| 1. อนุภาคและไอออนในน้ำ | 1. ความขุ่น |
| | 2. ความเข้มข้นของแอมโมเนีย |
| | 3. ความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิก |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 3.5** แผนผังการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียผสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.5.5 การทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียจริง**

1. นำน้ำเสียจริงที่มีความขุ่น ใส่ในบีกเกอร์ 2 ใบ

2. ปรับพีเอชที่เหมาะสม ใส่แมกนีไทต์หรือสารส้มในปริมาณที่เหมาะสม

3. กวนน้ำและสารเคมีอย่างรวดเร็วด้วยความเร็วที่เหมาะสม

4. ลดความเร็วให้เหลือประมาณ 30 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที

5. สังเกตดูและจดบันทึกเวลาที่เกิดฟล็อคปรากฏให้เห็นเป็นครั้งแรกในแต่ละบีกเกอร์ ตลอดจนขนาดและปริมาณของฟล็อค

6. ปิดเครื่องกวนน้ำและตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที สังเกตดูการจมตัวของตะกอนและตะกอนที่นอนก้นตลอดจนฟล็อคที่เหลือซึ่งไม่นอนก้นในบีกเกอร์ทั้ง 2 ใบ

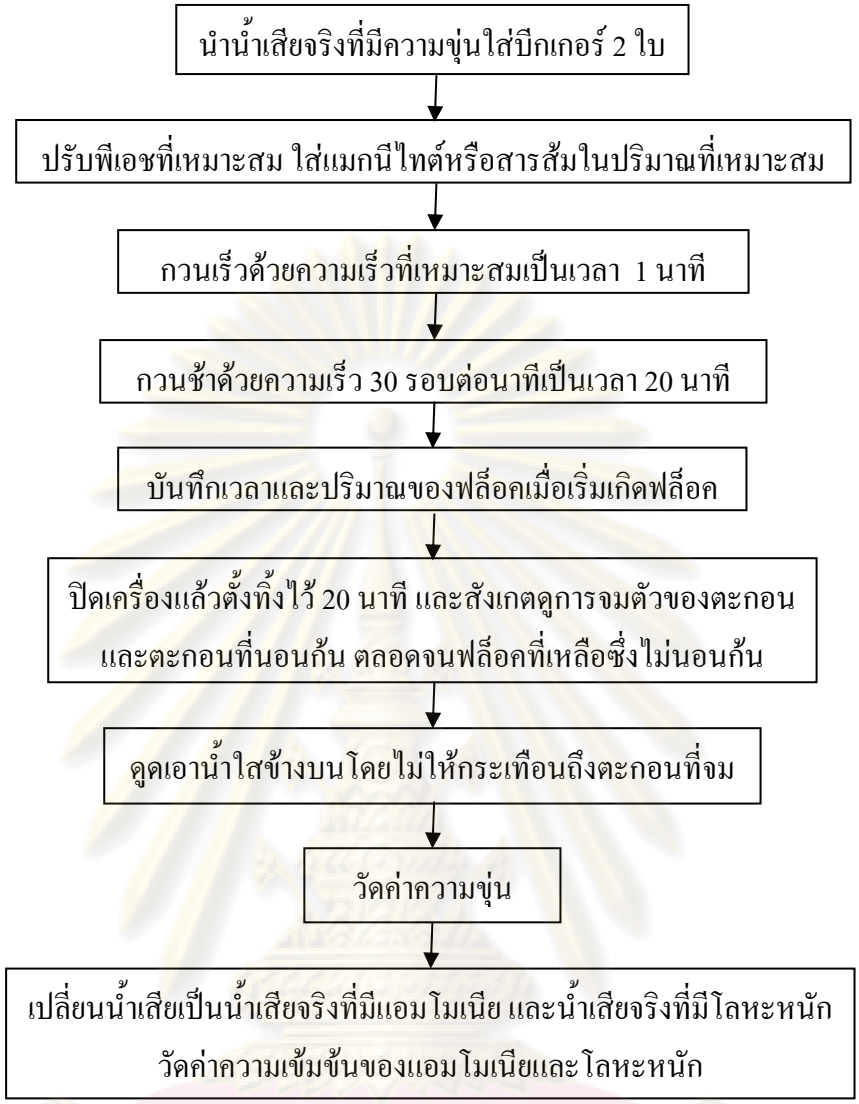
7. ดูดเอาน้ำใสข้างบนโดยไม่ให้กระเทือนถึงตะกอนที่จมอยู่ก้นบีกเกอร์ นำไปวิเคราะห์หาค่าความขุ่น

8. เปลี่ยนน้ำเสียจริงที่มีความขุ่นเป็นน้ำเสียจริงที่มีแอมโมเนีย และน้ำเสียจริงที่มีโลหะหนัก วัดค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียและโลหะหนัก

**ตารางที่ 3.8** ตัวแปรในการทำจาร์เทสต์ของแมกนีไทต์และสารส้มเพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียจริง

| **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
|---|---|
| 1. อุณหภูมิ<br>2. พีเอช<br>3. ปริมาณแมกนีไทต์ที่ใช้<br>4. ปริมาณสารส้มที่ใช้<br>5. ความเร็วในการกวนเร็ว<br>6. ความเร็วในการกวนช้า | 1. อุณหภูมิห้อง<br>2. พีเอชที่เหมาะสม<br>3. ปริมาณที่เหมาะสม<br>4. ปริมาณที่เหมาะสม<br>5. ความเร็วที่เหมาะสม<br>6. 30 รอบต่อนาที |
| **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| 1. อนุภาคและไอออนในน้ำ | 1. ความขุ่น<br>2. ความเข้มข้นของแอมโมเนีย<br>3. ความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิก |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 3.6** แผนผังการทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดของน้ำเสียจริง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.5.6 การหาความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนของแมกนีไทต์และสารส้ม**

1. นำแมกนีไทต์ในปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1 ทำการทดลองที่ 1 อีกครั้ง นำตะกอนที่ได้มาใส่ในกระบวกตวงขนาด 1 ลิตร

2. นำตะกอนที่ได้มาวัดความสูงของน้ำส่วนที่ใสและจับเวลา บันทึกค่าของความสูงของน้ำส่วนที่ใสและเวลา

3. นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความสูงของน้ำส่วนที่ใส

4. หาค่าความชันในช่วงแรกของกราฟที่เป็นเส้นตรง

5. เปลี่ยนจากแมกนีไทต์เป็นสารส้ม โดยใช้ปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 1 และพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 2 โดยทดลองข้อที่ 1-4 ซ้ำอีกครั้ง

**ตารางที่ 3.9** ตัวแปรการหาความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นของแมกนีไทต์และสารส้ม

| **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
|---|---|
| 1. อุณหภูมิ | 1. อุณหภูมิห้อง |
| 2. ปริมาณสารส้มที่ใช้ | 2. ปริมาณที่เหมาะสม |
| 3. พีเอช | 3.1 พีเอชที่เหมาะสม (แมกนีไทต์) |
| | 3.2 พีเอช 7 (สารส้ม) |
| 4. ความเร็วในการกวนเร็ว | 4.1 ความเร็วที่เหมาะสม (แมกนีไทต์) |
| | 4.2 100 รอบต่อนาที (สารส้ม) |
| 5. ความเร็วในการกวนช้า | 5. 30 รอบต่อนาที |
| **ตัวแปรอิสระ** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| 1. ความสูงของน้ำส่วนที่ใส | 1. ครั้งละ 5 เซนติเมตร |
| **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| 1. ความเร็วในการตกตะกอน | 1. เวลา |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**3.5.7 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่**

1. นำแมกนีไทต์ที่ใช้แล้วจากการทดลองที่ 3.5.1 มาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2. นำไปทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีความขุ่น โดยนำกลับไปทดลองกับการทดลองที่ 3.5.1 อีกครั้งหนึ่ง

3. ทดลองข้อที่ 1 และ 2 ทั้งหมด 5 ครั้ง และวัดค่าความขุ่น

**ตารางที่ 3.10** ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดของแมกนีไทต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่

| **ตัวแปรคงที่** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
|---|---|
| 1. อุณหภูมิ<br>2. พีเอช | 1. อุณหภูมิห้อง<br>2. พีเอช 7 |
| **ตัวแปรอิสระ** | **ช่วงที่ทำการควบคุม** |
| 1. จำนวนครั้งที่ใช้ของแมกนีไทต์ | 1. 1-5 ครั้ง |
| **ตัวแปรตาม** | **ค่าที่ทำการวัด** |
| 1. อนุภาคในน้ำ | 1. ความขุ่น |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 4

## ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการนำแมกนีไทต์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับสารส้ม โดยในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 4 ชนิดคือ น้ำเสียที่มีความขุ่น น้ำเสียที่มีแอมโมเนีย และน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

การศึกษาครอบคลุมถึงสภาวะที่เหมาะสม (พีเอช ปริมาณ และรอบการกวนเร็ว) รวมทั้งประสิทธิภาพในการบำบัด ความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้น และการนำกลับมาใช้บำบัดความขุ่น

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการนำแมกนีไทต์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียและสารส้ม แบ่งออกเป็น 5 ช่วงการทดลองดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1 สภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่นของแมกนีไทต์และสารส้ม

การทดลองที่ 2 สภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนียของแมกนีไทต์และสารส้ม

การทดลองที่ 3 สภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนักของแมกนีไทต์และสารส้ม

การทดลองที่ 4 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียผสม

การทดลองที่ 5 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริง

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการตกตะกอนและการนำกลับมาใช้ใหม่แบ่งออกเป็น 2 ช่วงการทดลองดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 6 ความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นของแมกนีไทต์และสารส้ม

การทดลองที่ 7 ประสิทธิภาพในการบำบัดของแมกนีไทต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 4.1 สภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น

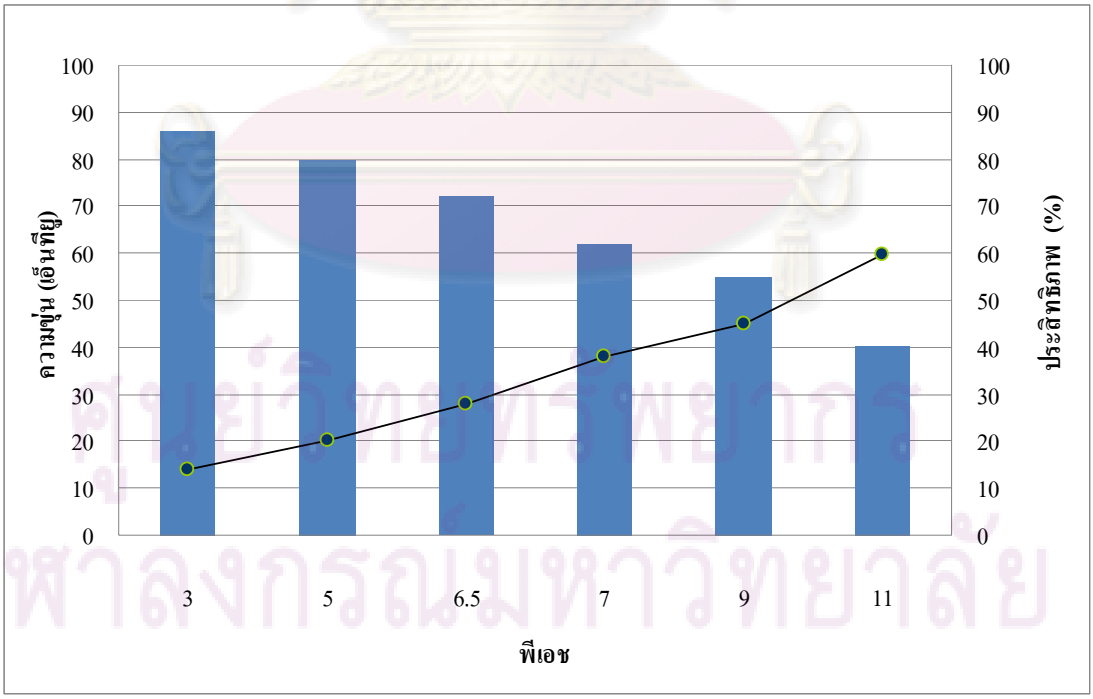
ในช่วงการทดลองนี้เป็นการแปรเปลี่ยนปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีความขุ่น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีทำจาร์เทสต์ โดยเริ่มจากการหาพีเอชที่เหมาะสม และนำค่าพีเอชที่ได้ไปใช้เพื่อหาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม จากนั้นนำค่าพีเอชและปริมาณสารเคมีที่ได้เพื่อนำมาหาความเร็วรอบการกวนเร็วที่เหมาะสม

#### 4.1.1 พีเอชที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น

การทดลองส่วนนี้เป็นการแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียที่ใช้กับแมกนีไทต์และสารส้ม โดยทดลองกับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู และ 30 เอ็นทียู แล้วตรวจวัดความขุ่นของน้ำเสีย

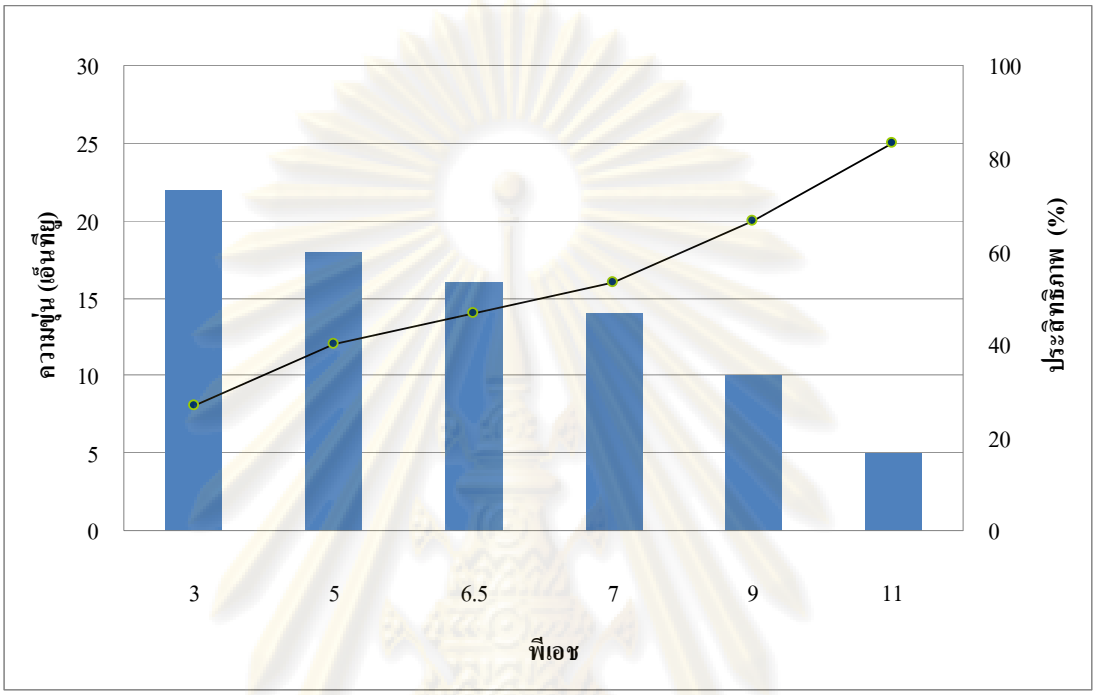
#### 4.1.1.1 พีเอชที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีความขุ่น

เมื่อแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียที่มีความขุ่น โดยใช้แมกนีไทต์คงที่ที่ 2 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2




**รูปที่ 4.1** ผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดความขุ่น 100 เอ็นทียูได้ดีที่สุดที่พีเอช 3 โดยความขุ่นลดลงเหลือ 14 เอ็นทียู คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 86% เมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์จะลดลง




**รูปที่ 4.2** ผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดความขุ่น 30 เอ็นทียูได้ดีที่สุดที่พีเอช 3 เช่นกัน โดยความขุ่นลดลงเหลือ 8 เอ็นทียู คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 73.33% เมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์จะลดลงเช่นเดียวกับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีที่สุดที่พีเอช 3 และเมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์จะลดลง

เมื่อพิจารณาถึงอนุภาคของความขุ่นที่นำมาใช้ในการทดลองคือดินขาวหรือคาโอลิไนท์ พบว่าดินขาวมีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นยาว เป็นผลให้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อแรงดึงดูดผิวของอนุภาคมีค่าต่ำ ส่งผลให้เกิดประจุลบที่พื้นผิวอนุภาคของดินขาว

เมื่อพิจารณาถึงอนุภาคของแมกนีไทต์ที่ทำมาใช้ในการทดลอง พบว่าพื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์มีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยมี $pH_{pzc}$ ที่ 6.5 กล่าวคือเมื่อน้ำเสียมีค่าพีเอชต่ำกว่า 6.5 ที่พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าบวกเกิดขึ้น ในทางกลับกันเมื่อน้ำเสียมีค่าพีเอชสูงกว่า 6.5 พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น จึงอาจสรุปได้ว่าที่พีเอชลดลง พื้นผิว

อนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าบวกมากขึ้น และที่พีเอชเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าลบมากขึ้น

จากผลการทดลองจะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดความขุ่น 100 เอ็นทียู และ 30 เอ็นทียู ได้ดีที่สุดที่พีเอช 3 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลทางทฤษฎีของประจุที่พื้นผิวอนุภาคของคอลลอยด์และประจุที่พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์ กล่าวคือที่พีเอช 3 (พีเอชที่ต่ำที่สุดในการทดลอง) พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าบวกสูง ประกอบกับอนุภาคความขุ่นในน้ำเสียมีประจุเป็นลบ กลไกที่ทำลายเสถียรภาพของความขุ่นในน้ำเสียจึงเป็นแบบดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้า เนื่องจากประจุของอนุภาคแมกนีไทต์เป็นประจุตรงข้ามกับความขุ่น จึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด ในขณะที่พีเอช 11 (พีเอชที่สูงที่สุดในการทดลอง) พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าลบสูง จึงผลักกับอนุภาคความขุ่น เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด

ในส่วนของกระบวนการดูดติดผิวและทำลายประจุนั้น ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเป็นกลไกการดูดติดผิวแบบกายภาพหรือเคมี โดยอาจจะต้องมีการทำการทดลองไอโซเทอร์ม (isotherm) เพื่อทดสอบการดูดติดผิวต่อไป

ในส่วนของกระบวนการสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เพื่อให้เกิดฟล็อคคูเลชันในการทดลองเป็นการทำจาร์เทสต์ซึ่งมีการใช้ใบพัดกวนสม่ำเสมอ กลไกในการสัมผัสจึงเป็นแบบออร์โธไคเนติค (Orthokinetics)

#### 4.1.1.2 พีเอชที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีความขุ่น

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มอย่างแพร่หลาย พบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการใช้สารส้มอยู่ที่พีเอช 6.8 ถึง 7.2 (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538) จึงเลือกใช้พีเอช 7 เป็นพีเอชที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดลองต่อไป

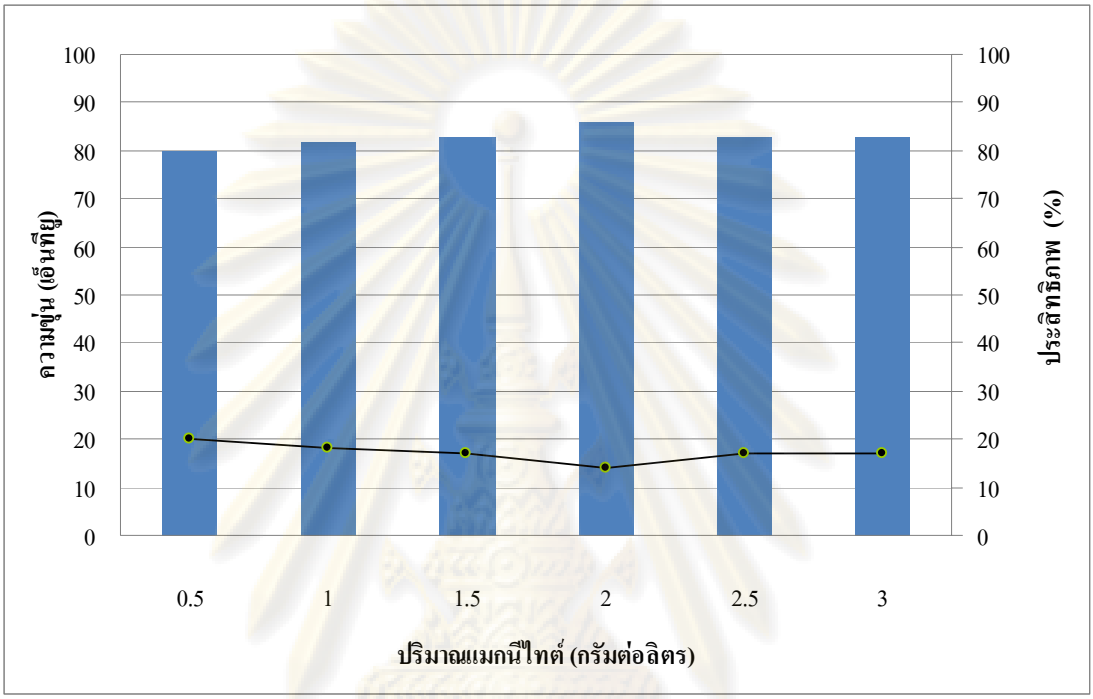
ในส่วนของกลไกในการทำลายเสถียรภาพของความขุ่นและกระบวนการสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์จะขอกล่าวในช่วงการทดลองของการหาปริมาณที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีความขุ่นในหัวข้อ 4.1.2.2 ต่อไป

### 4.1.2 ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น

การทดลองส่วนนี้เป็นการแปรเปลี่ยนปริมาณแมกนีไทต์และสารส้ม โดยทดลองกับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู และ 30 เอ็นทียู แล้วตรวจวัดความขุ่นของน้ำเสีย

**4.1.2.1 ปริมาณแมกนีไทต์ที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น**

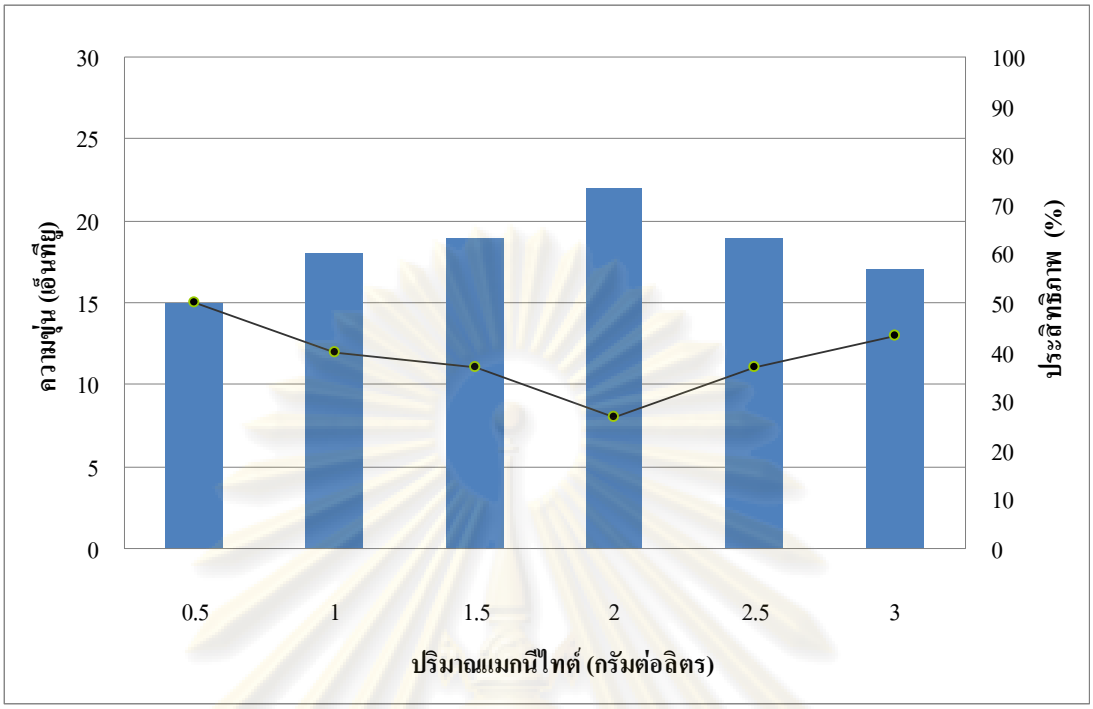
เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีความขุ่น โดยควบคุมพีเอชในน้ำเสียให้คงที่ที่พีเอช 3 ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4




**รูปที่ 4.3** ผลทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู ที่พีเอช 3

จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดความขุ่น 100 เอ็นทียูได้ดีที่สุดเมื่อใช้แมกนีไทต์ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น 86% ที่พีเอช 3 (พีเอชที่เหมาะสม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.4** ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู ที่พีเอช 3

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดความขุ่น 30 เอ็นทียูได้ดีที่สุดเมื่อใช้แมกนีไทต์ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตรเช่นกัน โดยเป็นปริมาณเดียวกับที่ใช้ในการทดลองที่ 4.1.1.1 ประสิทธิภาพในการบำบัด 73.33% ที่พีเอช 3 (พีเอชที่เหมาะสม)

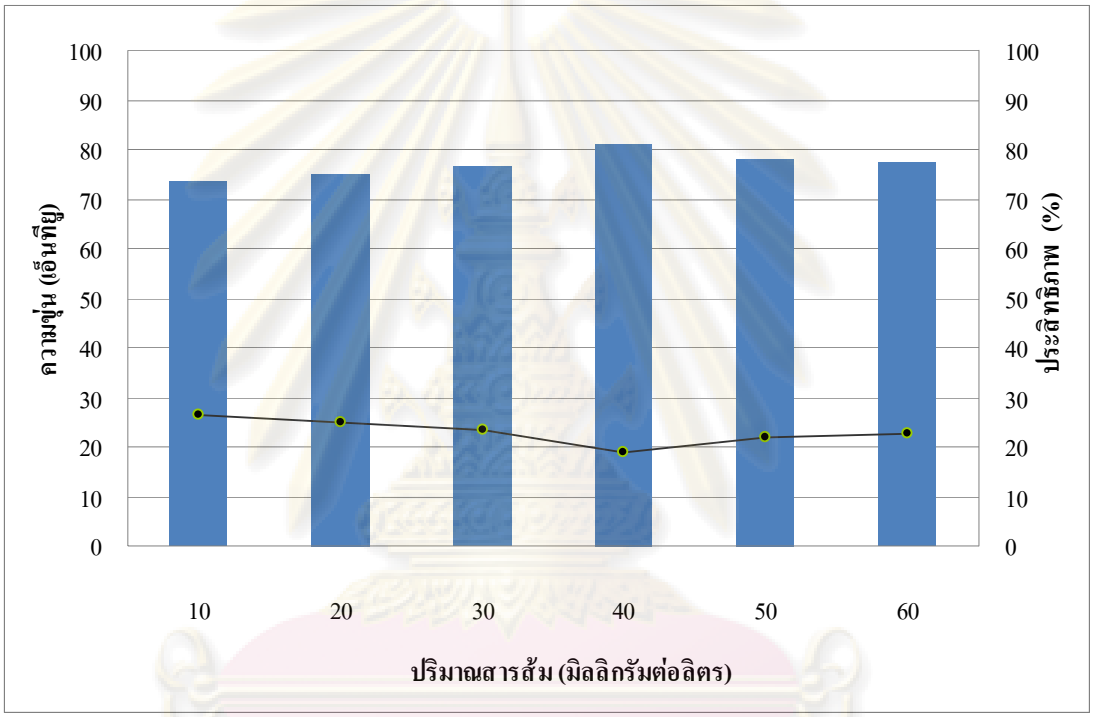
จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีที่สุดเมื่อใช้แมกนีไทต์ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร โดยประสิทธิภาพในการบำบัดมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู และ 30 เอ็นทียู และจากการทดลองที่ 4.1.1.1 จะสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมของแมกนีไทต์ในการบำบัดความขุ่นคือ พีเอชที่เหมาะสมคือพีเอช 3 และปริมาณแมกนีไทต์ที่เหมาะสมคือปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าปริมาณแมกนีไทต์ 2 กรัมต่อลิตรจะเป็นปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียที่มีความขุ่น แต่ในเชิงของประสิทธิภาพจะพบว่าการแปรเปลี่ยนปริมาณแมกนีไทต์ทั้งหมด ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดได้ใกล้เคียงกัน ในน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ 86% ที่ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร แต่ที่ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตรมีประสิทธิภาพสูงถึง 80% ในน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู แต่ประสิทธิภาพจะลดลงมากกว่าเล็กน้อยเนื่องจากความขุ่นค่อนข้างน้อย น่าจะมีผลทำให้เกิดกลไกทั้งทางด้านการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์เกิดได้ยากขึ้น แต่ไม่มีผล

กับการสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคของคอลลอยด์เนื่องจากปริมาณคอลลอยด์ไม่ได้เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อออร์โธไคเนติค ในส่วนของการตกตะกอนพบว่าเป็นการตกตะกอนแบบโดด

**4.1.2.2 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น**

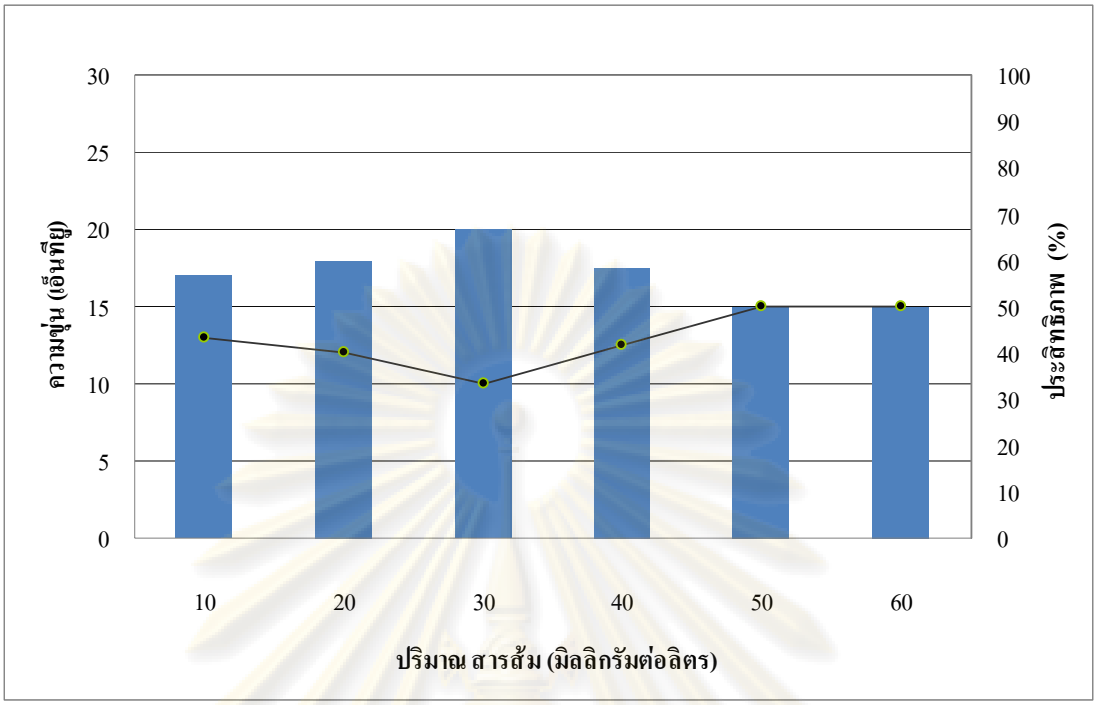
เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณสารส้มในน้ำเสียที่มีความขุ่น โดยควบคุมพีเอชในน้ำเสียให้คงที่ที่พีเอช 7 ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6




**รูปที่ 4.5** ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู ที่พีเอช 7

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าสารส้มสามารถบำบัดความขุ่น 100 เอ็นทียูได้ดีที่สุดเมื่อใช้สารส้มปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความขุ่นลดลงเหลือ 19 เอ็นทียู คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 81% ที่พีเอช 7 (พีเอชที่เหมาะสม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.6** ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู ที่พีเอช 7

จากรูปที่ 4.6 จะพบว่าสารส้มสามารถบำบัดความขุ่น 30 เอ็นทียู ได้ดีที่สุดเมื่อใช้สารส้มปริมาณ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความขุ่นลดลงเหลือ 10 เอ็นทียู คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 66.67% ที่พีเอช 7 (พีเอชที่เหมาะสม)

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะพบว่า สารส้มสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียูได้ดีที่สุดเมื่อใช้สารส้มปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่บำบัดน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียูได้ดีที่สุดเมื่อใช้สารส้มปริมาณ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการทดลองต่อไปเลือกใช้น้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู จึงเลือกใช้ปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร สรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมของสารส้มในการบำบัดความขุ่นคือพีเอชที่เหมาะสมคือ พีเอช 7 และปริมาณสารส้มที่เหมาะสมคือปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณาถึงกลไกในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ของสารส้ม พบว่าเมื่อสารส้มลงไปในน้ำจะแตกตัวตามสมการการแตกตัวของอะลูมินัมซัลเฟต

$$Al_2(SO_4)_3 \longrightarrow 2Al^{3+} + 3SO_4^{2-} \qquad (4\text{-}1)$$

เมื่ออะลูมินัมไอออนอยู่ในน้ำจึงพิจารณาการละลายของอะลูมินัมไอออนตามสมการการละลายของอะลูมินัมไฮดรอกไซด์

$$Al(OH)_3 \rightleftharpoons Al^{3+} + OH^- \qquad K_{sp} = 10^{-34} \qquad (4\text{-}2)$$

เมื่อพิจารณาจากค่าคงที่สมดุลของการละลายของอะลูมินัมไฮดรอกไซด์จะพบว่าผลคูณของผลิตภัณฑ์จะเท่ากับค่าคงที่สมดุลของการละลายเมื่อมีสารส้มปริมาณ $2x10^{-5}$ มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 7

เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณสารส้มที่ใช้ในการทดลองซึ่งแปรเปลี่ยนในระดับ 10 ถึง 60 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าผลคูณของผลิตภัณฑ์สูงกว่าค่าคงที่สมดุลของการละลายอยู่มาก มีผลทำให้เกิดการตกผลึกของอะลูมินัมไฮดรอกไซด์ขึ้นในปริมาณมาก

จากข้อมูลข้างต้น จึงอาจสรุปได้ว่ากลไกที่ทำลายเสถียรภาพของความขุ่นในน้ำเสียเป็นแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก เนื่องจากเมื่อสารส้มลงไปในน้ำ จะเกิดผลึกของอะลูมินัมไฮดรอกไซด์ในปริมาณมาก โดยผลึกของอะลูมินัมไฮดรอกไซด์มีลักษณะคล้ายเป็นปุย เมื่ออนุภาคความขุ่นสัมผัสกับผลึกอะลูมินัมไฮดรอกไซด์ก็จะจับอยู่บนผลึกนั้น เมื่อเกิดการจับตัวมากขึ้น ฟล็อคที่เกิดขึ้นก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนกระทั่งมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนลงมาเอง และไม่น่าจะเกิดกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าได้ เนื่องจากกลไกนี้ต้องเกิดขึ้นภายในเวลาที่น้อยกว่า 1 วินาที

อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารส้มที่ได้จากการทดลอง (40 มิลลิกรัมต่อลิตร) ได้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538) โดยกล่าวว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มโดยกลไกแบบห่อหุ้มด้วยอนุภาคด้วยผลึกจะได้ผลดีที่สุดที่พีเอช 6.8 ถึง 8.2 และปริมาณสารส้มที่เหมาะสมอยู่ที่ 20 ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในส่วนของกระบวนการสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เพื่อให้เกิดฟล็อคคูเลชันในการทดลองเป็นการทำจาร์เทสต์ซึ่งมีการใช้ใบพัดกวน กลไกในการสัมผัสจึงเป็นแบบออร์โธไคเนติค ในส่วนของการตกตะกอนเป็นแบบรวมกลุ่มเนื่องจากฟล็อคของสารส้มจะรวมตัวกันจึงจะมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนลงมา

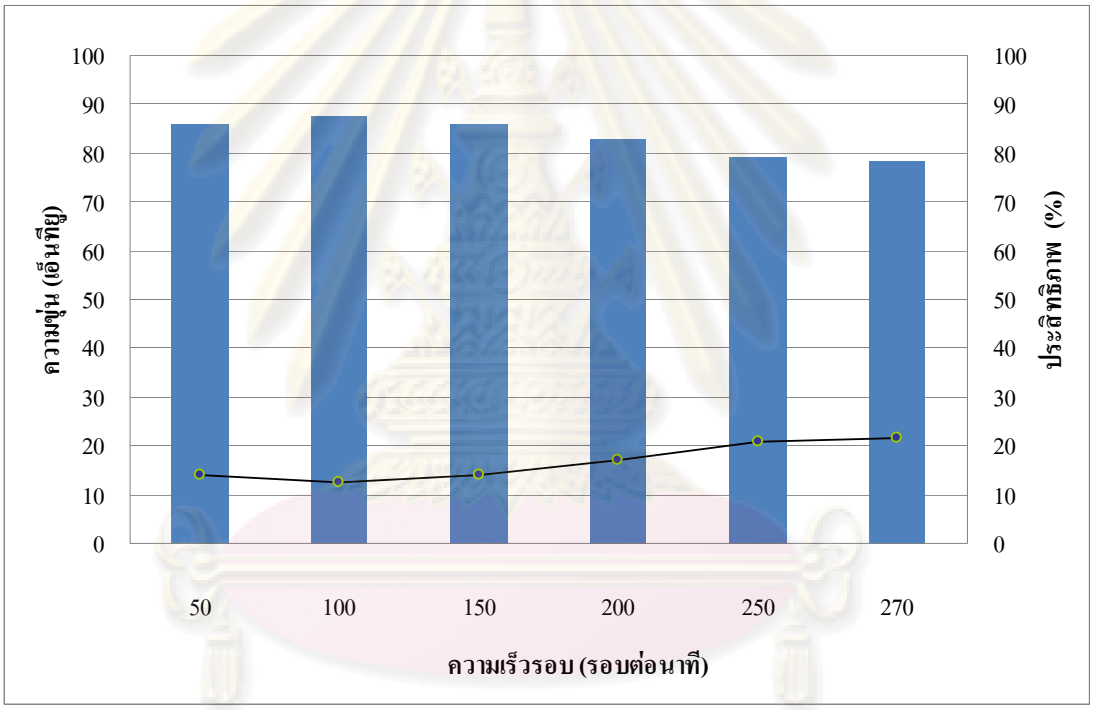
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 4.1.3 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีความขุ่น

การทดลองส่วนนี้เป็นการแปรเปลี่ยนความเร็วรอบการกวนเร็ว โดยทดลองกับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู และ 30 เอ็นทียู แล้วตรวจวัดความขุ่นของน้ำเสีย

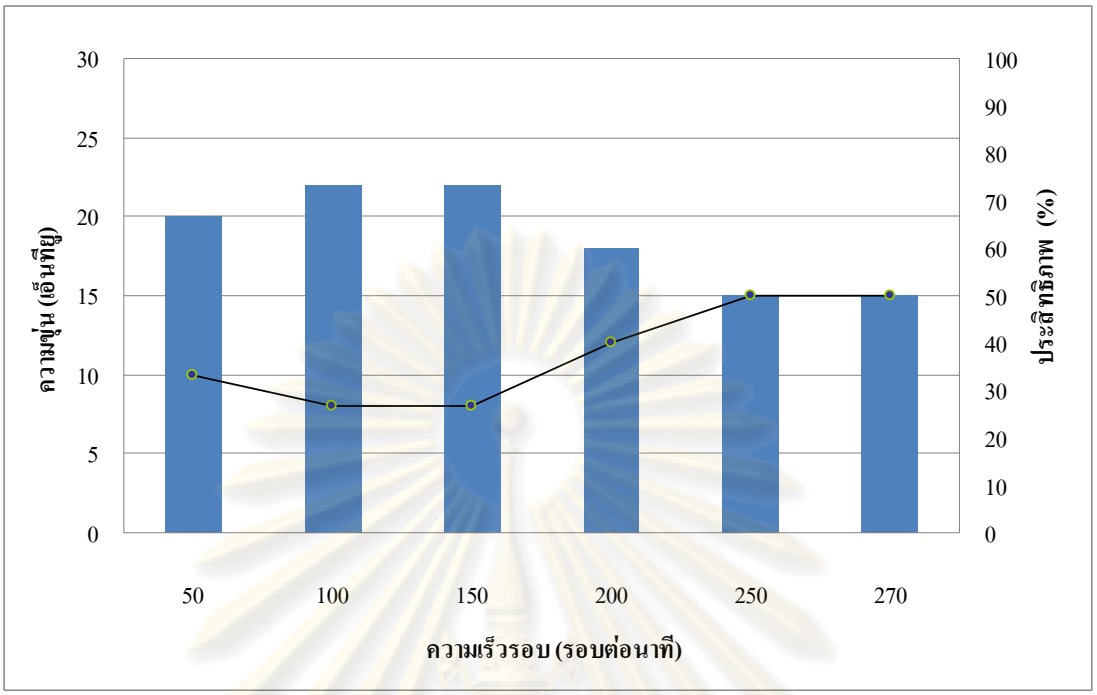
#### 4.1.3.1 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีความขุ่น

เมื่อแปรเปลี่ยนความเร็วรอบการกวนการเร็ว โดยควบคุมพีเอชในน้ำเสียให้คงที่ที่พีเอช 3 และปริมาณแมกนีไทต์ที่ 2 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8




**รูปที่ 4.7** ผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู ที่พีเอช 3 ปริมาณแมกนีไทต์ 2 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.7 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดความขุ่น 100 เอ็นทียูได้ดีที่สุดเมื่อใช้ความเร็วรอบการกวนเร็วที่ 100 รอบต่อนาที โดยเป็นความเร็วรอบเดียวกับที่ใช้ในการทดลองที่ 4.1.1.1 และ 4.1.2.1 ประสิทธิภาพในการบำบัด 86% ที่ปริมาณแมกแมกนีไทต์ 2 กรัมต่อลิตร (ปริมาณที่เหมาะสม) และพีเอช 3 (พีเอชที่เหมาะสม)




**รูปที่ 4.8** ผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู ที่พีเอช 3 ปริมาณแมกนีไทต์ 2 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.8 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดความขุ่น 30 เอ็นทียู ได้ดีที่สุดเมื่อใช้ความเร็วรอบการกวนเร็วที่ 100 รอบต่อนาที โดยเป็นความเร็วรอบเดียวกับที่ใช้ในการทดลองที่ 4.1.1.1 และ 4.1.2.1 ประสิทธิภาพในการบำบัด 73.33% ที่ปริมาณแมกแมกนีไทต์ 2 กรัมต่อลิตร (ปริมาณที่เหมาะสม) และพีเอช 3 (พีเอชที่เหมาะสม)

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีที่สุดเมื่อใช้ความเร็วรอบการกวนเร็วที่ 100 รอบต่อนาที เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์จะลดลง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที จะเป็นความเร็วที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียที่มีความขุ่น แต่ในเชิงของประสิทธิภาพจะพบว่าการแปรเปลี่ยนความเร็วรอบการกวนเร็วทั้งหมดให้ประสิทธิภาพในการบำบัดได้ใกล้เคียงกันมาก ในช่วง 50 100 และ 150 รอบต่อนาที เมื่อพิจารณาถึงความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาทีเป็นความเร็วที่ใกล้เคียงกับความเร็วรอบการกวนช้า จึงไม่นำค่ามาใช้ ส่วนความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีนั้นให้ประสิทธิภาพที่เท่ากับ 100 รอบต่อนาที จึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้ความเร็วรอบการกวนถึง 150 รอบต่อนาที และสรุปได้ว่าความเร็ว 100 รอบต่อนาทีน่าจะเป็นความเร็วการกวนที่เหมาะสม และเมื่อพิจารณาถึงความเร็วรอบการกวนสูงจะพบว่าความขุ่นกลับมาสูงขึ้น คาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการที่ความเร็วรอบการกวนสูงเกินไปทำให้ฟล็อคแตกออกเป็นส่วน ๆ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของการกวนเร็วต่อกลไกในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และการสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ พบว่าการกวนเร็วมีผลต่อกลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์เนื่องจากกลไกการกำจัดความขุ่นของแมกนีไทต์เป็นแบบดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้า การสัมผัสกันของอนุภาคความขุ่นและอนุภาคของแมกนีไทต์จึงมีความสำคัญ การกวนเร็วเป็นผลทำให้อนุภาคของแมกนีไทต์กระจายในน้ำอย่างทั่วถึงและสัมผัสกับอนุภาคของความขุ่นอย่างรวดเร็ว แต่จะไม่มีผลกับกลไกการสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เนื่องจากเป็นกลไกที่เกี่ยวข้องกับการกวนช้า

จากการทดลองทั้งหมดอาจสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมของแมกนีไทต์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความขุ่นคือพีเอช 3 ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตรและความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที ความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที

ในส่วนของความเร็วแกรเดียนท์พบว่า เมื่อคำนวณพลังงานที่ใช้ในการกวนหาได้จากสมการ (2-2) โดยที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีจะคำนวณพลังงานที่ใช้ได้ค่า 0.015 วัตต์ และเมื่อนำพลังงานที่ได้ไปคำนวณต่อเพื่อหาค่าความเร็วแกรเดียนท์จากสมการ (2-1) จะได้ความเร็วแกรเดียนท์ 130 วินาที$^{-1}$

**4.1.3.2 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีความขุ่น**

เนื่องจากมีการทดลองและวิจัยเรื่องกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มอย่างแพร่หลายและสรุปได้ว่าความเร็วรอบการกวนเร็วที่เหมาะสมกับสารส้มคือ 100 รอบต่อนาที จากการวิจารณ์ผลการทดลองที่ 4.1.1.2 และผลการทดลองที่ 4.1.2.2 จะสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมของสารส้มในการบำบัดความขุ่นคือพีเอชที่เหมาะสมคือพีเอช 7 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมคือปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วรอบการกวนเร็วที่เหมาะสมคือ 100 รอบต่อนาที

ผลกระทบของการกวนเร็วต่อกลไกในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และการสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เป็นไปในทิศทางเดียวกับการวิจารณ์ผลการทดลองที่ 4.1.3.1

จากการทดลองทั้งหมดจะสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมของของสารส้มในการบำบัดน้ำเสียที่มีความขุ่นคือพีเอช 7 ปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตรและความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที ความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที

ในส่วนของความเร็วแกรเดียนท์พบว่าสารส้มใช้ความเร็วเท่ากับแมกนีไทต์ โดยความเร็วแกรเดียนท์อยู่ที่ 130 วินาที$^{-1}$ เช่นเดียวกัน

### 4.2 สภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย

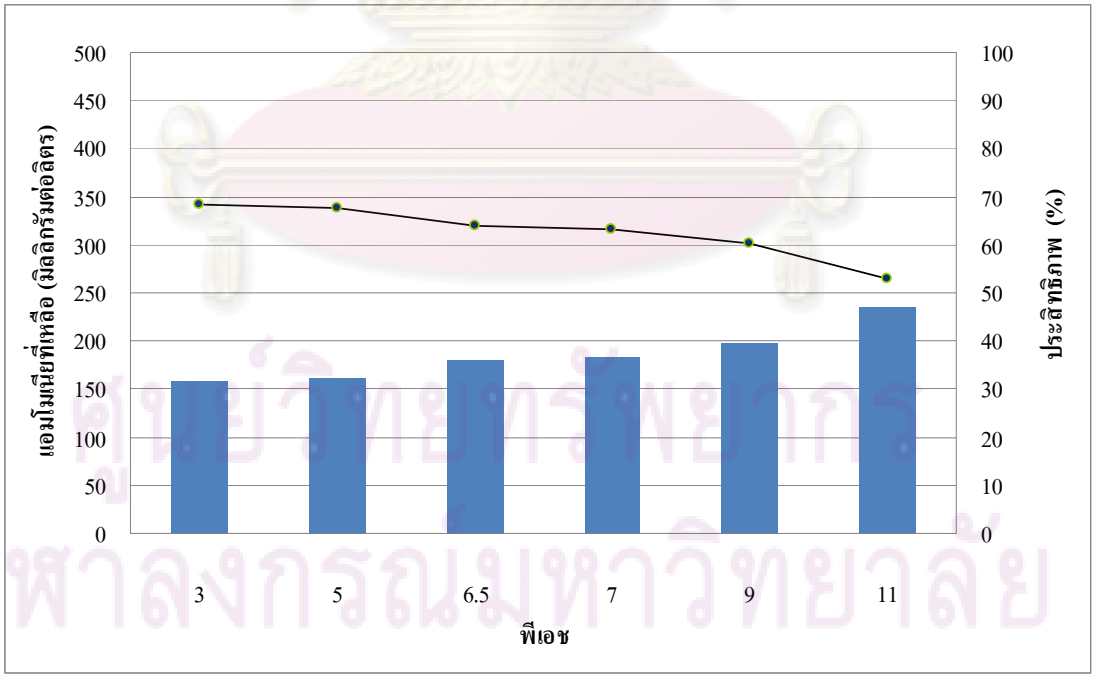
ในช่วงการทดลองนี้เป็นการแปรเปลี่ยนปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีแอมโมเนียเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีทำจาร์เทสต์ โดยเริ่มจากการหาพีเอชที่เหมาะสม และนำค่าพีเอชที่ได้ไปใช้เพื่อหาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม จากนั้นนำค่าพีเอชและปริมาณสารเคมีที่ได้เพื่อนำมาหาความเร็วรอบการกวนเร็วที่เหมาะสม

#### 4.2.1 พีเอชที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย

การทดลองส่วนนี้เป็นการแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียที่ใช้กับแมกนีไทต์และสารส้ม โดยทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วจึงตรวจวัดความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเสีย

##### 4.2.1.1 พีเอชที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย

เมื่อแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย โดยใช้แมกนีไทต์คงที่ที่ 2 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.9




**รูปที่ 4.9** ผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณแมกนีไทต์ 2 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.9 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีแอมโมเนียได้ดีที่สุดที่พีเอช 11 ความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงเหลือ 265 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 47% เมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของแมกนีไทต์จะลดลง

เมื่อพิจารณาถึงแอมโมเนียที่อยู่ในน้ำเสียพบว่าแอมโมเนียอยู่ในรูปของแอมโมเนียโมเลกุล ($NH_3$) และแอมโมเนียมไอออน ($NH_4^+$) ซึ่งการวิจารณ์ผลการทดลอง 4.1.1.1 สรุปได้ว่ากลไกการทำลายเสถียรภาพของความขุ่นในน้ำเสียเป็นแบบดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้า ดังนั้นแอมโมเนียที่ถูกกำจัดออกจึงอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวก ซึ่งเมื่อน้ำเสียมีพีเอช 11 (พีเอชที่สูงที่สุดในการทดลอง) พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์เป็นประจุลบมาก ส่วนแอมโมเนียมไอออนมีประจุบวกจึงเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด

แต่ในความเป็นจริงพบว่าแอมโมเนียมไอออนทั้งหมดไม่ได้ถูกกำจัดโดยกลไกแบบดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว แต่แอมโมเนียมไอออนบางส่วนในน้ำเสียจะถูกเปลี่ยนให้เป็นก๊าซแอมโมเนียในที่พีเอช 9.23 ตามสมการการแตกตัวของแอมโมเนียมไอออน

$$NH_4^+ \rightleftharpoons NH_3 + H^+ \qquad pKa = 9.23 \qquad (4\text{-}3)$$

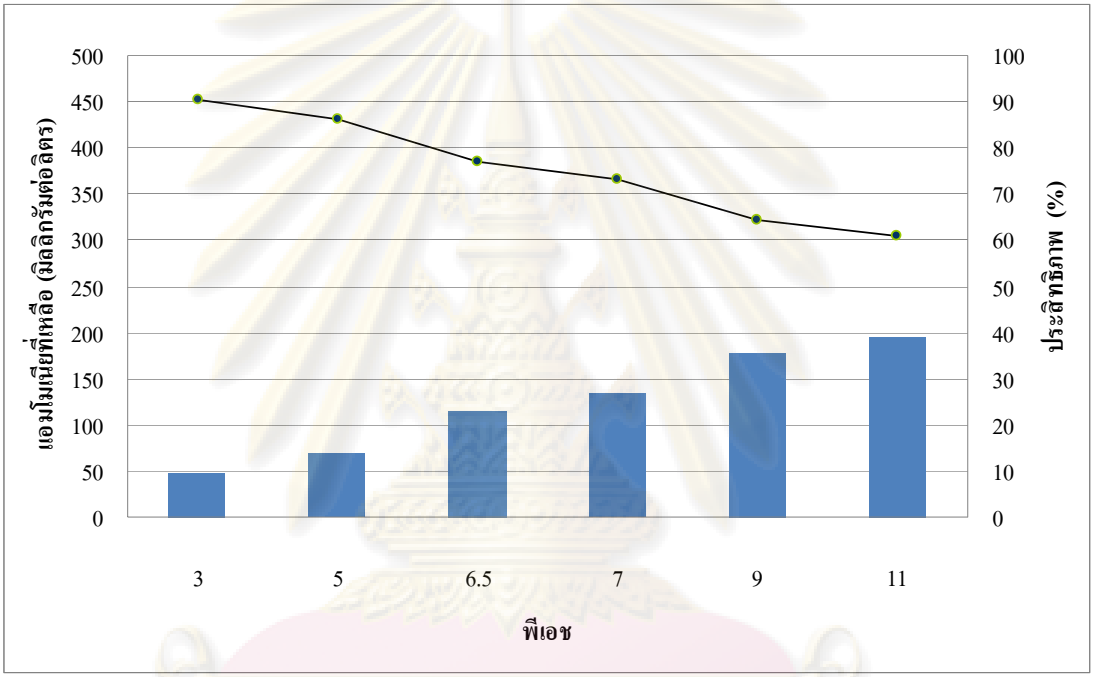
เมื่อพิจารณาจากพีเอชที่แปรเปลี่ยนในการทดลองจะพบว่าการทดลองที่พีเอช 9 และ 11 นั้นจะเกิดการเปลี่ยนสถานะของแอมโมเนียมไอออนในน้ำเสียเป็นก๊าซในปริมาณที่สูงมาก เนื่องจากที่พีเอช 9 ซึ่งเป็นพีเอชที่ใกล้เคียงกับค่า pKa ปริมาณแอมโมเนียทั้งหมดที่อยู่ในน้ำเสียจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซแอมโมเนียประมาณครึ่งหนึ่ง และที่พีเอช 11 ซึ่งเป็นพีเอชที่สูงกว่าค่า pKa ปริมาณแอมโมเนียทั้งหมดที่อยู่ในน้ำเสียจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซแอมโมเนียเกือบทั้งหมด และเมื่อพิจารณาถึงผลการทดลองที่พีเอช 9 และ 11 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างสูง แม้ว่าจะได้กล่าวข้างต้นแล้วว่าในช่วงพีเอชสูงจะมีปริมาณแอมโมเนียมไอออนน้อย ซึ่งกลไกการดูดติดผิวจะกำจัดแอมโมเนียเฉพาะในรูปของแอมโมเนียมไอออนเท่านั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าผลการทดลองอาจจะคลาดเคลื่อนเนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียบางส่วนเป็นการเปลี่ยนไปเป็นก๊าซแอมโมเนีย และไม่นำผลการทดลองนี้มาพิจารณาในการหาพีเอชที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่เหลือทั้งหมด (พีเอช 3 5 6.5 และ 7) จะพบว่าพีเอชต่ำกว่าค่า pKa พอสมควร มีผลให้แอมโมเนียทั้งหมดจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตาม ที่พีเอช 3 พื้นผิวของอนุภาคแมกนีไทต์เป็นประจุบวกสูงประกอบกับแอมโมเนียมไอออนมีประจุเป็นบวกเช่นกัน แมกนีไทต์และแอมโมเนียมไอออนจึงผลักกันเป็นส่วนใหญ่ มีผลให้ที่พีเอช 3 มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำที่สุด เมื่อพีเอชสูงขึ้น พื้นผิวของอนุภาคแมกนีไทต์จะมีประจุบวกลดลงเรื่อย ๆ พีเอชจึงสูงกว่า 6.5 พื้นผิวของอนุภาคแมกนีไทต์จะเริ่มเป็นประจุลบ มีผลให้ที่พีเอช 7 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด จึงสรุปได้ว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดน้ำเสียที่มี

แอมโมเนียได้ดีที่สุดที่พีเอช 7 ซึ่งน่าจะเป็นพีเอชที่เหมาะสมกับน้ำเสียจริง โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงเหลือ 315.8 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 36.84%

**4.2.1.2 พีเอชที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย**

เมื่อแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย โดยใช้สารส้มคงที่ที่ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.10




**รูปที่ 4.10** ผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณสารส้ม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.10 จะพบว่าสารส้มสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีแอมโมเนียได้ดีที่สุดที่พีเอช 11 โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงเหลือ 303.8 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 39.24% เมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของสารส้มจะเพิ่มขึ้น

จากการวิจารณ์ผลการทดลองที่ 4.2.1.1 จะพบว่าผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับการทดลองของแมกนีไทต์คือที่พีเอช 9 และ 11 จะเกิดก๊าซแอมโมเนียในปริมาณมาก อย่างไรก็ตาม ที่พีเอช 3 สารส้มจะอยู่ในรูปของอะลูมินัมไอออนมากที่สุดซึ่งไม่มีความสามารถในการบำบัดแอมโมเนีย ที่พีเอชเป็นกลาง สารส้มจะอยู่ในรูปของผลึกอะลูมินัมไฮดรอกไซด์ซึ่งสามารถบำบัดแอมโมเนียออกจากน้ำได้ ที่พีเอชสูงสารส้มจะอยู่ในรูปของไอออน $AlOH^-$ ซึ่งไม่มี

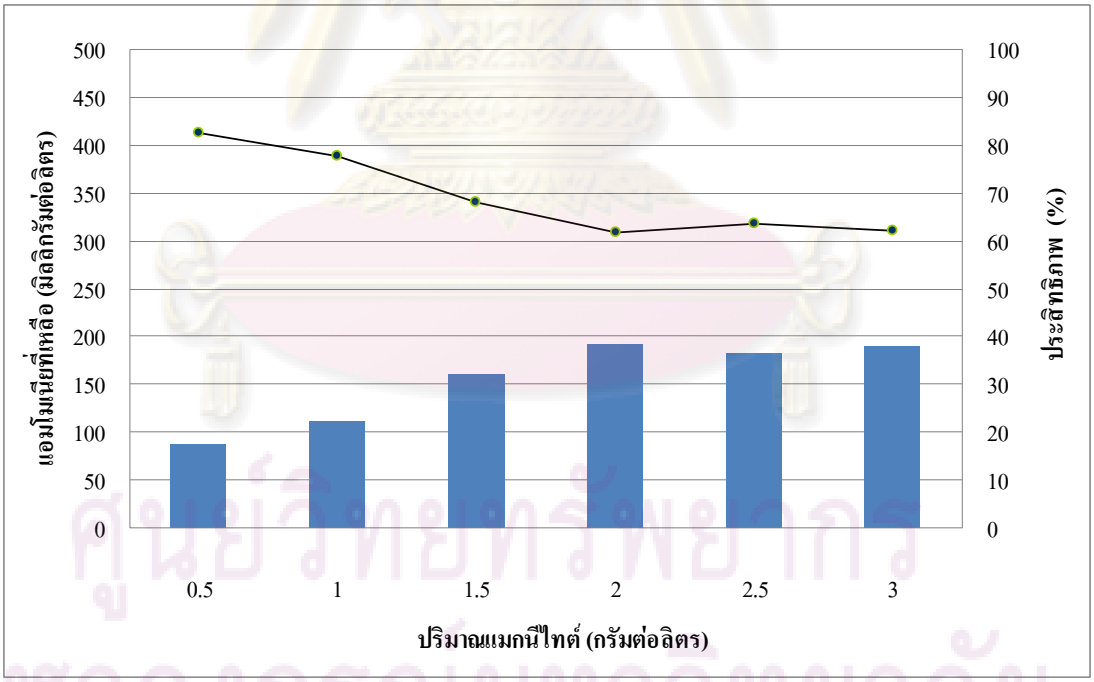
ความสามารถในการบำบัดแอมโมเนียเช่นกัน ดังรูปที่ 2.4 จึงสรุปได้ว่าสารส้มสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีแอมโมเนียได้ดีที่สุดที่พีเอช 7 ซึ่งน่าจะเป็นพีเอชที่เหมาะสมกับน้ำเสียจริง โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงเหลือ 365.2 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 26.96%

### 4.2.2 ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย

การทดลองส่วนนี้เป็นการแปรเปลี่ยนปริมาณแมกนีไทต์และสารส้ม โดยทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเสีย

#### 4.2.2.1 ปริมาณแมกนีไทต์ที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย

เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย โดยควบคุมพีเอชในน้ำเสียให้คงที่ที่พีเอช 7 ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.11

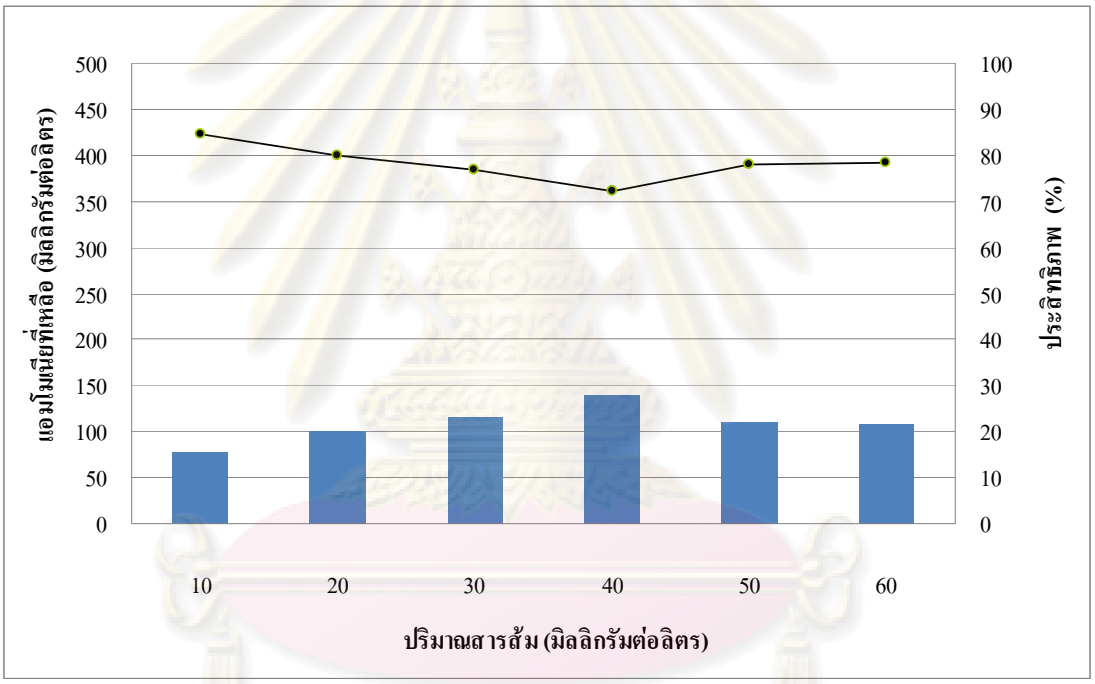



**รูปที่ 4.11** ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7

จากรูปที่ 4.11 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดแอมโมเนียได้ดีที่สุดเมื่อใช้แมกนีไทต์ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร โดยเป็นปริมาณเดียวกับที่ใช้ในการทดลองที่ 4.2.1.1 ประสิทธิภาพในการบำบัด 36.84% ที่พีเอช 7 (พีเอชที่เหมาะสม) และเมื่อปริมาณแมกนีไทต์มากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะใกล้เคียงกัน

**4.2.2.2 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย**

เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณสารส้มในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย โดยควบคุมพีเอชในน้ำเสียให้คงที่ที่พีเอช 7 ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.12




**รูปที่ 4.12** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7

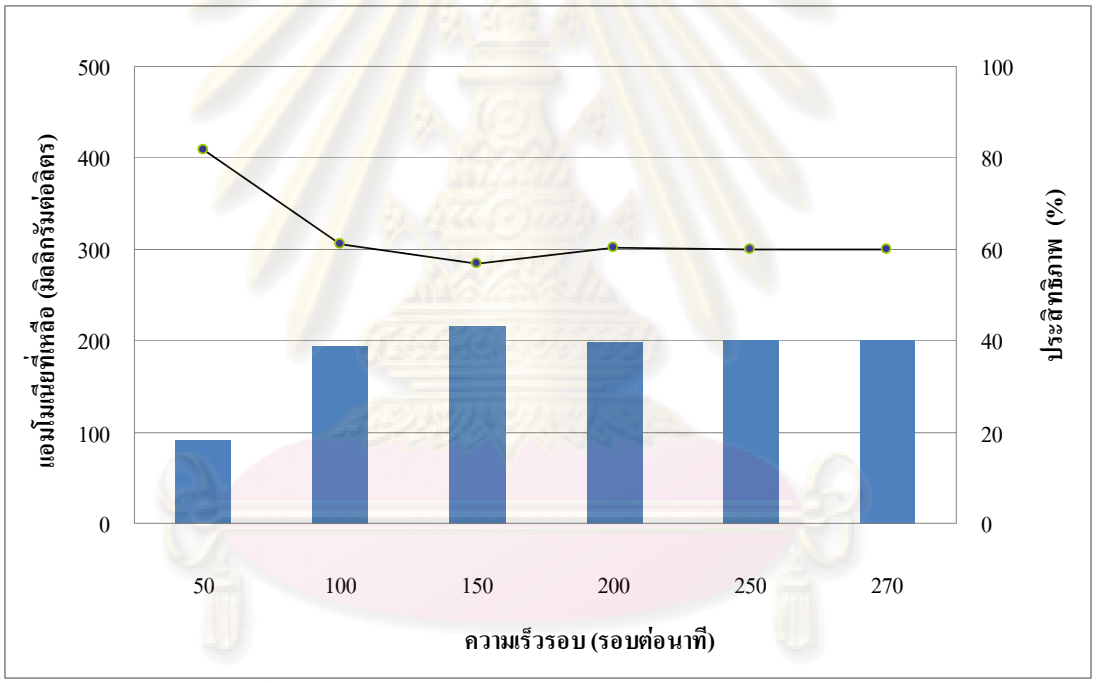
จากรูปที่ 4.12 จะพบว่าสารส้มสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ดีที่สุดเมื่อใช้สารส้มปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเป็นปริมาณเดียวกับที่ใช้ในการทดลองที่ 4.2.1.2 ประสิทธิภาพในการบำบัด 26.96% ที่พีเอช 7 (พีเอชที่เหมาะสม)

### 4.2.3 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย

การทดลองส่วนนี้เป็นการแปรเปลี่ยนความเร็วรอบการกวนเร็ว โดยทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วจึงตรวจวัดความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเสีย

#### 4.2.3.1 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย

เมื่อแปรเปลี่ยนความเร็วรอบการกวนเร็ว โดยควบคุมพีเอชในน้ำเสียให้คงที่ที่พีเอช 7 และปริมาณแมกนีไทต์ที่ 2 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.13




**รูปที่ 4.13** ผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7 ปริมาณแมกนีไทต์ 2 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.13 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดแอมโมเนียได้ดีที่สุดเมื่อใช้ความเร็วรอบการกวนเร็วที่ 150 รอบต่อนาที โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงเหลือ 283.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัด 43.38% ที่ปริมาณแมกแมกนีไทต์ 2 กรัมต่อลิตร (ปริมาณที่เหมาะสม) และพีเอช 7 (พีเอชที่เหมาะสม)

เมื่อพิจารณาผลการทดลองทั้งหมดจะพบว่าที่ความเร็วรอบการกวน 50 รอบต่อนาทีจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ต่ำ คาดว่าน่าจะเป็นเพราะเป็นความเร็วที่ใกล้เคียงกับความเร็วรอบการกวนช้า ซึ่งทำให้การสัมผัสกันเพื่อเกิดกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ยาก เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ความเร็วรอบการกวนตั้งแต่ 100 รอบต่อนาทีขึ้นไปจะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน คาดว่าความเร็วรอบการกวน 100 รอบต่อนาทีน่าจะเป็นความเร็วเพียงพอที่ทำให้อนุภาคของแมกนีไทต์สัมผัสกับแอมโมเนียมไอออนได้ดี ต่างกับความขุ่นที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์ จึงอาจสรุปได้ว่า ความเร็วรอบการกวน 100 รอบต่อนาทีเป็นความเร็วรอบที่เร็วเพียงพอในการทำให้อนุภาคแมกนีไทต์และแอมโมเนียมไอออนมาสัมผัสและเกิดกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้า แต่จะได้ผลดีที่สุดที่ความเร็วรอบการกวน 150 รอบต่อนาที เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะคงที่ จึงไม่มีความจำเป็นในการเพิ่มความเร็วรอบมากกว่านี้

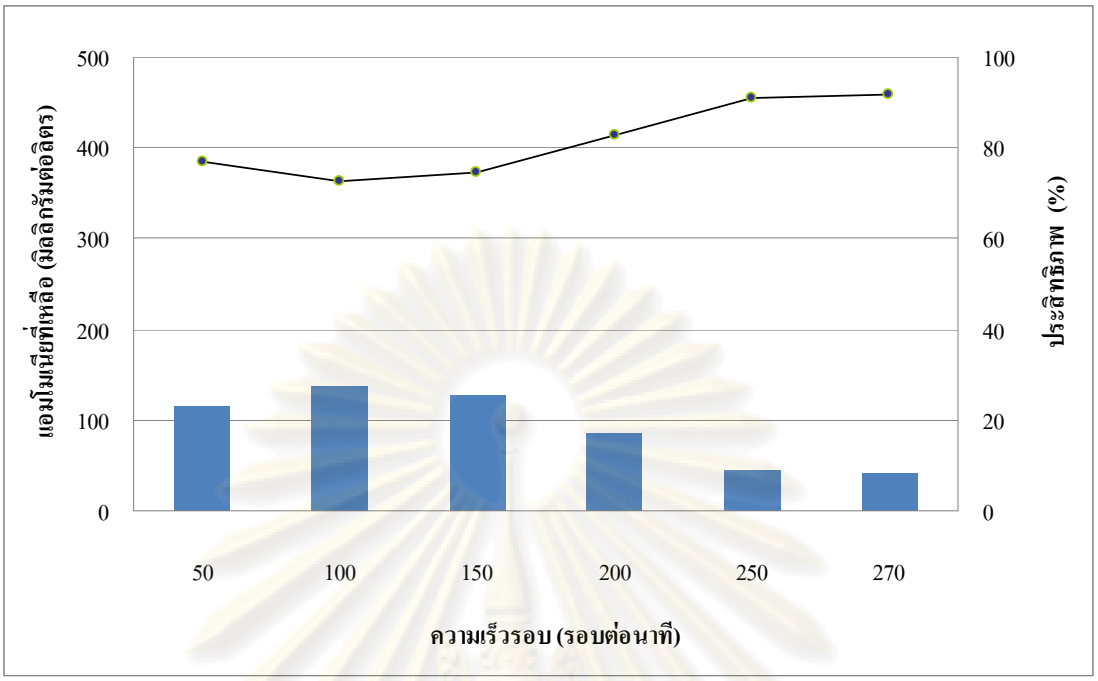
จากการทดลองทั้งหมดจะสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมของของแมกนีไทต์ในการบำบัดน้ำเสียที่มีแอมโมเนียคือพีเอช 7 ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตรและความเร็วรอบการกวนเร็ว 150 รอบต่อนาที ความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที

ในส่วนของความเร็วแกรเดียนท์พบว่า เมื่อคำนวณพลังงานที่ใช้ในการกวนหาได้จากสมการ (2-2) โดยที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีจะคำนวณพลังงานที่ใช้ได้ค่า 0.05 วัตต์ และเมื่อนำพลังงานที่ได้ไปคำนวณต่อเพื่อหาค่าความเร็วแกรเดียนท์จากสมการ (2-1) จะได้ความเร็วแกรเดียนท์ 237 วินาที$^{-1}$

**4.2.3.2 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย**

เมื่อแปรเปลี่ยนความเร็วรอบการกวนการเร็ว โดยควบคุมพีเอชในน้ำเสียให้คงที่ที่พีเอช 7 และปริมาณสารส้ม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.14** ผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7 ปริมาณสารส้ม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.14 จะพบว่าสารส้มสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ดีที่สุดเมื่อใช้ความเร็วรอบการกวนเร็วที่ 100 รอบต่อนาที โดยเป็นความเร็วรอบเดียวกับที่ใช้ในการทดลองที่ 4.2.1.2 และ 4.2.2.2 ประสิทธิภาพในการบำบัด 26.40% ที่ปริมาณสารส้ม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร (ปริมาณที่เหมาะสม) และพีเอช 7 (พีเอชที่เหมาะสม)

เมื่อพิจารณาถึงผลการทดลองทั้งหมดจะพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบมากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียจะลดลงอย่างมาก คาดว่าจะเกิดจากการที่ใช้ความเร็วรอบสูงจะมีผลทำให้ผลึกอะลูมินัมไฮดรอกไซด์ไม่จับตัวกันเป็นฟล็อค ซึ่งอนุภาคของแอมโมเนียมไอออนมีขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการสัมผัสได้ยาก ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่ดีเท่าที่ควร

จากการทดลองทั้งหมดจะสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมของของสารส้มในการบำบัดน้ำเสียที่มีแอมโมเนียคือพีเอช 7 ปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตรและความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที ความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที

ในส่วนของความเร็วแกรเดียนท์พบว่าสารส้มใช้ความเร็วเท่ากับการทดลองที่ 4.1 โดยความเร็วแกรเดียนท์อยู่ที่ 130 วินาที$^{-1}$ เช่นเดียวกัน

### 4.3 สภาวะที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

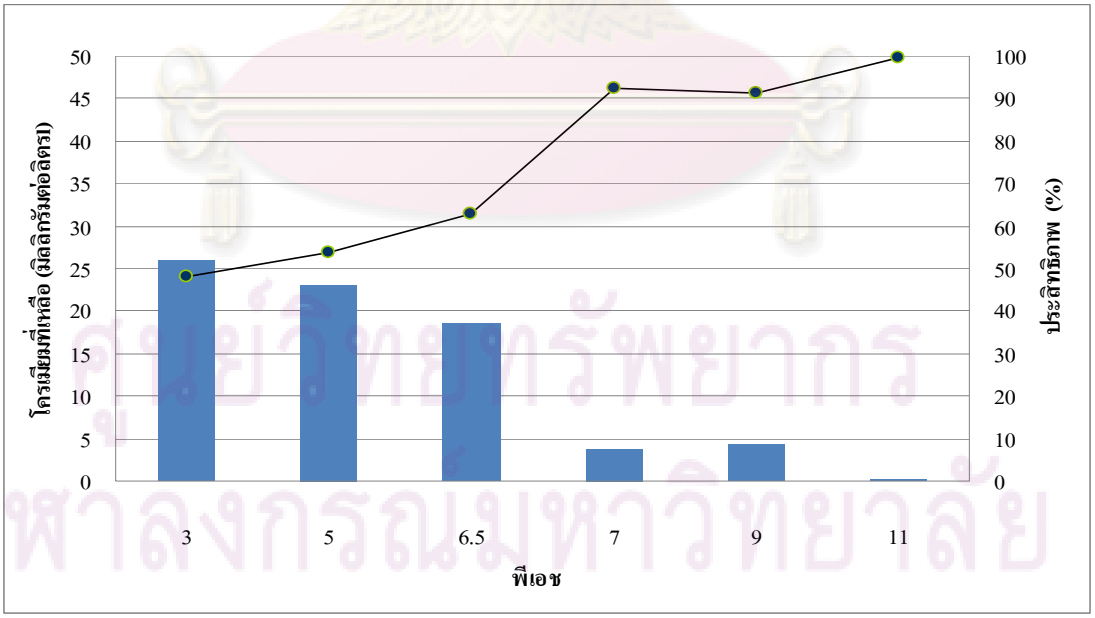
ในช่วงการทดลองนี้เป็นการแปรเปลี่ยนปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีการทำจาร์เทสต์ โดยเริ่มจากการหาพีเอชที่เหมาะสมและนำค่าพีเอชที่ได้ไปใช้เพื่อหาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม จากนั้นนำค่าพีเอชและปริมาณสารเคมีที่ได้เพื่อนำมาหาความเร็วรอบการกวนเร็วที่เหมาะสม

#### 4.3.1 พีเอชที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

การทดลองส่วนนี้เป็นการแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียที่ใช้กับแมกนีไทต์และสารส้ม โดยทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโครเมียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของอาร์เซนิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิกในน้ำเสีย

##### 4.3.1.1 พีเอชที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

เมื่อแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียที่มีโลหะหนัก โดยใช้แมกนีไทต์คงที่ที่ 2 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16




**รูปที่ 4.15** ผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีโครเมียมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.15 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียมได้ดีที่สุดที่พีเอช 3 โดยความเข้มข้นของโครเมียมลดลงเหลือ 24.13 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 51.74% เมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมของแมกนีไทต์จะลดลง

เมื่อพิจารณาถึงโครเมียมที่ใช้ในการทดลองพบว่ามาจากโปตัสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เมื่อโปตัสเซียมไดโครเมตลงในน้ำจะแตกตัวตามสมการการแตกตัวของโปตัสเซียมไดโครเมต

$$K_2Cr_2O_7 \longrightarrow 2K^+ + Cr_2O_7^{2-} \qquad (4\text{-}4)$$

เมื่อไดโครเมตไอออนอยู่ในน้ำจึงพิจารณาสมดุลของไดโครเมตไอออนและโครเมตไอออนตามสมการสมดุลของไดโครเมตและโครเมต

$$Cr_2O_7^{2-} + H_2O \rightleftharpoons 2CrO_4^{2-} + 2H^+ \qquad K = 2.38 \times 10^{-15} \qquad (4\text{-}5)$$

เมื่อพิจารณาจากค่าคงที่ของสมดุลของไดโครเมตและโครเมตจะพบว่าที่พีเอชต่ำกว่า 3 จะมีอัตราส่วนความเข้มข้นของโครเมตไอออนต่อไดโครเมตไอออนจะมีค่าต่ำมาก กล่าวคือปริมาณของไดโครเมตไอออนมีปริมาณสูงกว่าปริมาณของโครเมตไอออนมาก ในขณะที่พีเอชสูงกว่า 3 จะมีอัตราส่วนความเข้มข้นของโครเมตไอออนต่อไดโครเมตไอออนจะมีค่าสูงมาก กล่าวคือปริมาณของโครเมตไอออนมีปริมาณสูงกว่าปริมาณของไดโครเมตไอออนมาก

เมื่อพิจารณาถึงพีเอชที่ใช้ในการทดลองพบว่าเป็นพีเอชที่ไม่ต่ำกว่าพีเอช 3 จึงอาจสรุปได้ว่าโครเมียมที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดได้เปลี่ยนจากไดโครเมตไอออนเป็นโครเมตไอออน ดังนั้นจะขอกล่าวถึงโครเมียมในน้ำเสียในรูปของโครเมตไอออน

เมื่อโครเมตไอออนอยู่ในน้ำจึงพิจารณาสมดุลของการแตกตัวของกรดโครมิกตามสมการการแตกตัวของกรดโครมิก

$$H_2CrO_4 \rightleftharpoons HCrO_4^- + H^+ \qquad pK_{a1} = 0.86 \qquad (4\text{-}6)$$

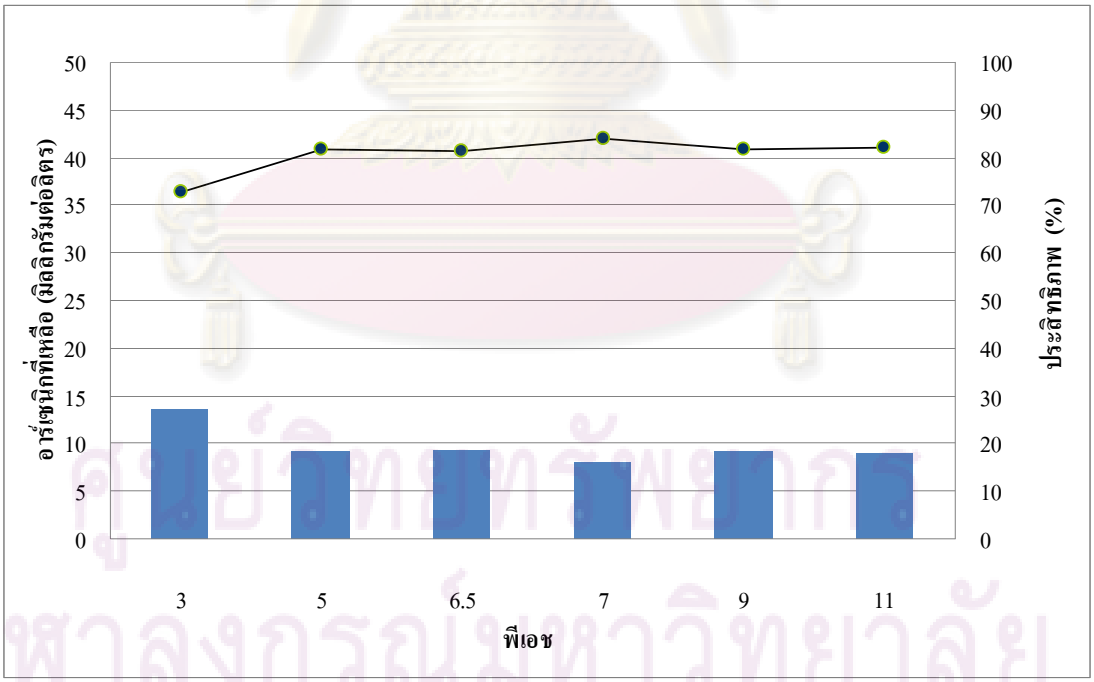
$$HCrO_4^- \rightleftharpoons CrO_4^{2-} + H^+ \qquad pK_{a2} = 6.51 \qquad (4\text{-}7)$$

เมื่อพิจารณาจากค่าคงที่ในการแตกตัวของกรดโครมิกพบว่าที่พีเอชต่ำ โครเมียมทั้งหมดจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนโครเมตไอออน เมื่อพีเอชเป็นกลาง โครเมียมทั้งหมดจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนโครเมตไอออนและโครเมตไอออน และเมื่อพีเอชสูง โครเมียมทั้งหมดจะอยู่ในรูปของโครเมตไอออน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของโครเมียมและพีเอชที่ใช้ในการทดลองพบว่าที่พีเอช 3 และ 5 โครเมียมจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนโครเมตไอออน ที่พีเอช 6.5 และ 7 จะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนโครเมตไอออนและโครเมตไอออน ที่พีเอช 9 และ 11 โครเมียมจะอยู่ในรูปของโครเมตไอออน อย่างไรก็ตามพบว่าโครเมียมทั้งหมดจะอยู่ในรูปของไอออนลบทั้งหมด

จากผลการทดลองจะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดโครเมียมได้ดีที่สุดที่พีเอช 3 ซึ่งจากผลการวิจารณ์ผลการทดลองที่ 4.1.1.1 จะทราบว่าที่พีเอชต่ำ พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าบวกสูง ที่พีเอชสูง พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าลบสูง ในขณะที่โครเมียมจะอยู่ในรูปของไอออนลบทั้งหมด ผลการทดลองทั้งหมดจึงสอดคล้องกับทฤษฎีของประจุที่พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์และประจุไฟฟ้าของไอออนของโครเมียม กล่าวคือที่พีเอช 3 (พีเอชที่ต่ำที่สุดในการทดลอง) พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าบวกสูง ประกอบกับไอออนของโครเมียมในน้ำเสียมีประจุเป็นลบ กลไกที่ทำลายเสถียรภาพของความขุ่นในน้ำเสียจึงคาดว่าเป็นแบบดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้า เนื่องจากประจุของอนุภาคแมกนีไทต์เป็นประจุตรงข้ามกับไอออนของโครเมียม มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด ในขณะที่พีเอช 11 (พีเอชที่สูงที่สุดในการทดลอง) พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าลบสูง จึงผลักกับไอออนของโครเมียม เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด




**รูปที่ 4.16** ผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.16 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีอาร์เซนิกได้ดีที่สุดที่พีเอช 3 เช่นเดียวกับน้ำเสียที่มีโครเมียม โดยความเข้มข้นของอาร์เซนิกลดลงเหลือ 36.31 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 27.38% เมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดอาร์เซนิกของแมกนีไทต์จะลดลงเช่นกัน

เมื่อพิจารณาถึงอาร์เซนิกที่ใช้ในการทดลองพบว่ามาจากโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซเนต ($Na_2HAsO_4$) โซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซเนตในน้ำจะแตกตัวตามสมการการแตกตัวของโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซเนต

$$Na_2HAsO_4 \longrightarrow 2Na^+ + H^+ + AsO_4^{3-} \qquad (4\text{-}8)$$

เมื่ออาร์เซเนตไอออนอยู่ในน้ำจึงพิจารณาสมดุลของการแตกตัวของกรดอาร์เซนิกตามสมการของการแตกตัวของกรดอาร์เซนิก

$$H_3AsO_4 \rightleftharpoons H_2AsO_4^- + H^+ \qquad pK_{a1} = 2.24 \qquad (4\text{-}9)$$

$$H_2AsO_4^- \rightleftharpoons HAsO_4^{2-} + H^+ \qquad pK_{a2} = 6.76 \qquad (4\text{-}10)$$

$$HAsO_4^{2-} \rightleftharpoons AsO_4^{3-} + H^+ \qquad pK_{a2} = 11.60 \qquad (4\text{-}11)$$

เมื่อพิจารณาจากค่าคงที่ในการแตกตัวของกรดอาร์เซนิกพบว่าที่พีเอชต่ำ (ในที่นี้กล่าวถึงพีเอชไม่ต่ำกว่า 0) อาร์เซนิกทั้งหมดจะอยู่ในรูปของกรดอาร์เซนิกและไดไฮโดรเจนอาร์เซเนต เมื่อพีเอชเป็นกลาง อาร์เซนิกทั้งหมดจะอยู่ในรูปของไดไฮโดรเจนอาร์เซเนตไอออนและไฮโดรเจนอาร์เซเนตไอออน และเมื่อพีเอชสูงอาร์เซนิกทั้งหมดจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนอาร์เซเนตไอออนและอาร์เซเนตไอออน

เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของอาร์เซนิกและพีเอชที่ใช้ในการทดลองพบว่าที่พีเอช 3 และ 5 อาร์เซนิกจะอยู่ในรูปของไดไฮโดรเจนอาร์เซเนตไอออน ที่พีเอช 6.5 7 9 และ 11 อาร์เซนิกจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนอาร์เซเนตไอออน อย่างไรก็ตามพบว่าอาร์เซนิกทั้งหมดจะอยู่ในรูปของไอออนลบทั้งหมด

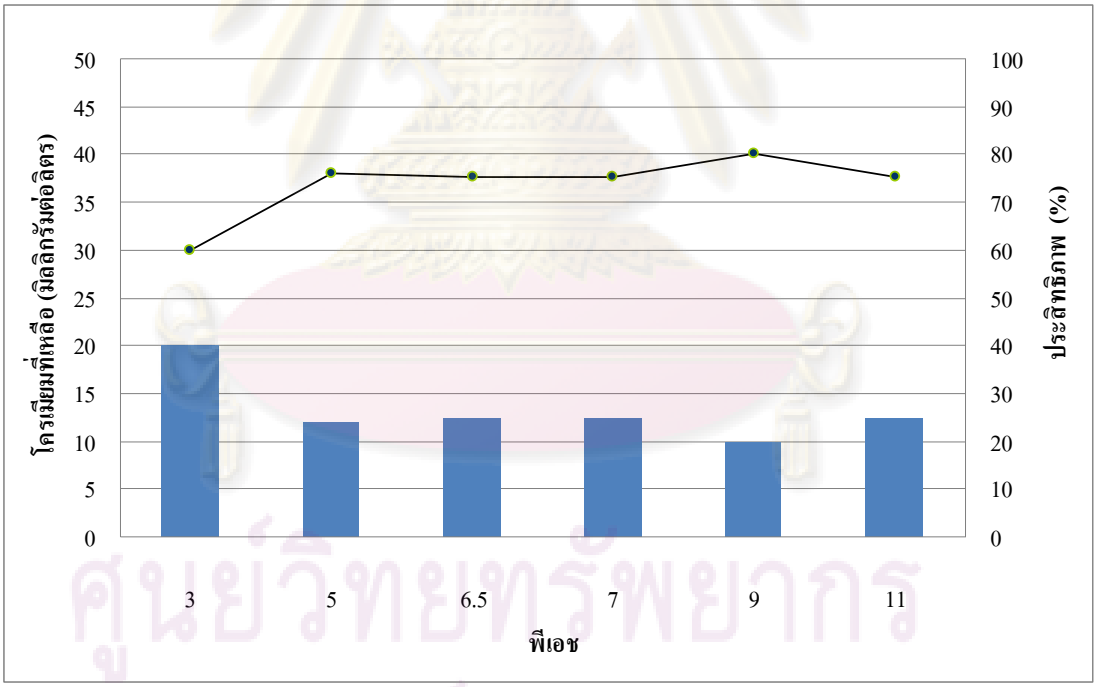
จากผลการทดลองจะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดอาร์เซนิกได้ดีที่สุดที่พีเอช 3 ซึ่งจากผลการวิจารณ์ผลการทดลองที่ 4.1.1.1 จะทราบว่าที่พีเอชต่ำ พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าบวกสูง แต่เมื่อพีเอชสูง พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าลบสูง ในขณะที่อาร์เซนิกจะอยู่ในรูปของไอออนลบทั้งหมด ผลการทดลองทั้งหมดจึงสอดคล้องกับทฤษฎีของประจุที่พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์และประจุไฟฟ้าของไอออนของอาร์เซนิกกล่าวคือที่พีเอช 3 (พีเอชที่ต่ำที่สุดในการทดลอง) พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าบวกสูง ประกอบกับ

ไอออนของอาร์เซนิกในน้ำเสียมีประจุเป็นลบ กลไกที่ทำลายเสถียรภาพของความขุ่นในน้ำเสียจึงเป็นแบบดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้า เนื่องจากประจุของอนุภาคแมกนีไทต์เป็นประจุตรงข้ามกับไอออนของอาร์เซนิก มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด ในขณะที่พีเอช 11 (พีเอชที่สูงที่สุดในการทดลอง) พื้นผิวอนุภาคของแมกนีไทต์จะมีประจุไฟฟ้าลบสูง จึงผลักกับไอออนของอาร์เซนิก เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดต่ำที่สุด

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 จะพบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีโครเมียมและอาร์เซนิกเป็นพีเอชเดียวกันคือ พีเอช 3 จึงสรุปได้ว่าที่พีเอช 3 แมกนีไทต์สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักได้ดีที่สุด

### 4.3.1.2 พีเอชที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

เมื่อแปรเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำเสียที่มีโลหะหนัก โดยใช้สารส้มคงที่ที่ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18

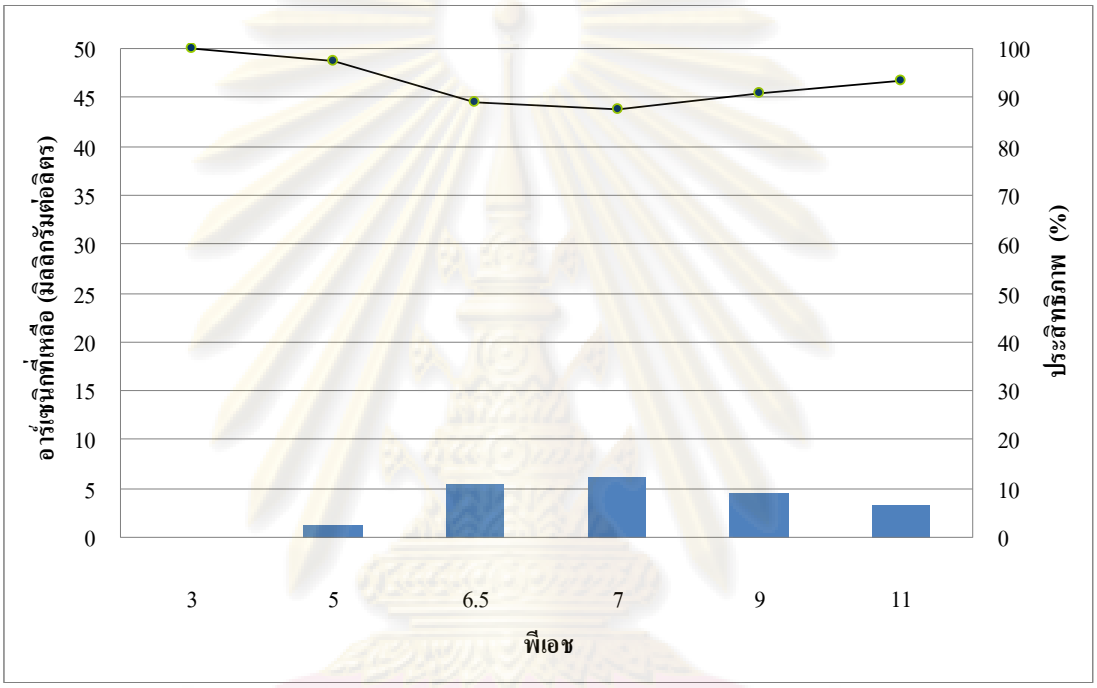



**รูปที่ 4.17** ผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม กับน้ำเสียที่มีโครเมียมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.17 จะพบว่าสารส้มสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียมได้ดีที่สุดที่พีเอช 3 โดยความเข้มข้นของโครเมียมลดลงเหลือ 30.01 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 39.98% เมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมของสารส้มจะลดลง เช่นเดียวกับแมกนีไทต์

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของสารส้มที่เกิดขึ้นเมื่อแปรเปลี่ยนพีเอชของน้ำเสียพบว่าที่พีเอชต่ำจะเกิดผลึกของอะลูมินัมไฮดรอกไซด์ขึ้น จึงสามารถกำจัดไอออนของโครเมียมซึ่งอยู่ในรูปของไอออนลบได้ ดังนั้นที่พีเอช 3 จึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียมสูงที่สุด




**รูปที่ 4.18** ผลการทดลองเพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม กับน้ำเสียที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.18 จะพบว่าสารส้มสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีอาร์เซนิกได้ดีที่สุดที่พีเอช 7 ซึ่งแตกต่างจากผลการทดลองกับน้ำเสียที่มีโครเมียม โดยความเข้มข้นของอาร์เซนิกลดลงเหลือ 43.83 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 12.33% เมื่อน้ำเสียเป็นกรดหรือด่างมากขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดอาร์เซนิกของสารส้มจะลดลง

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 จะพบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดของสารส้มกับน้ำเสียที่มีโครเมียมและอาร์เซนิกต่างกัน คือน้ำเสียที่มีโครเมียมมีพีเอชที่เหมาะสมอยู่ที่พีเอช 3 ส่วนน้ำเสียที่มีอาร์เซนิกมีพีเอชที่เหมาะสมที่ 7 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักทั้งสองที่พีเอช 3 พบว่า สามารถบำบัดโครเมียมได้ดีที่สุดแต่จะไม่สามารถบำบัดอาร์เซนิกได้เลย ในขณะที่พีเอช 7

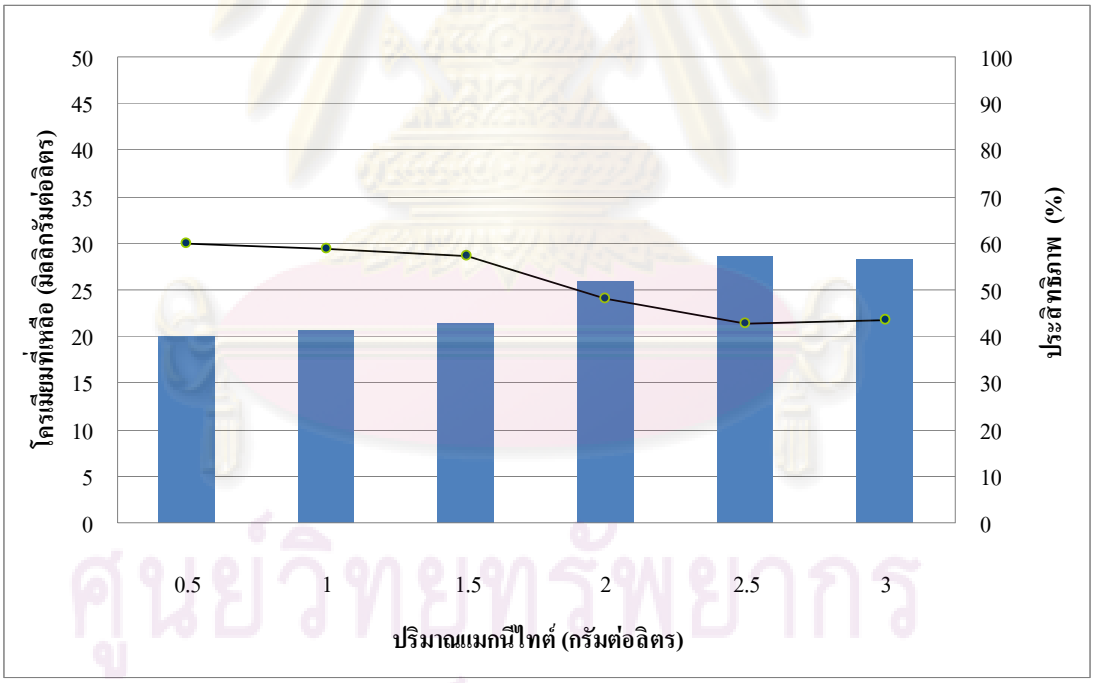
พบว่า สามารถบำบัดอาร์เซนิกได้ดีที่สุดแต่จะบำบัดโครเมียมได้บ้าง จึงเลือกพีเอช 7 เป็นพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

### 4.3.2 ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

การทดลองส่วนนี้เป็นการแปรเปลี่ยนปริมาณแมกนีไทต์และสารส้ม โดยทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโครเมียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของอาร์เซนิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิกในน้ำเสีย

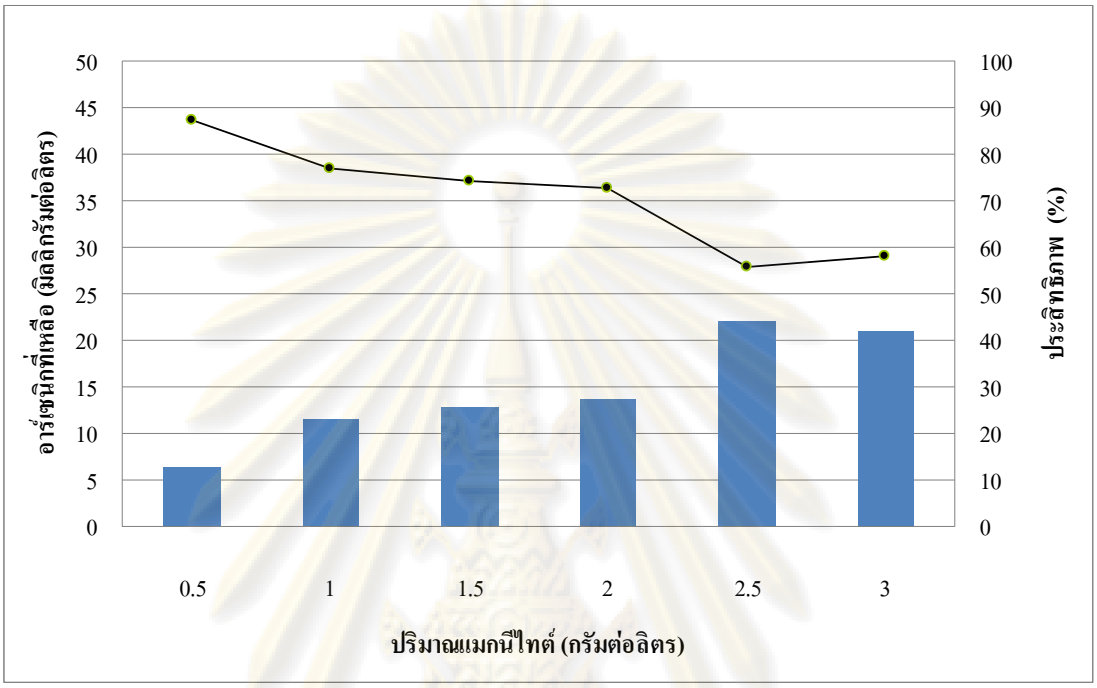
#### 4.3.2.1 ปริมาณแมกนีไทต์ที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก โดยควบคุมพีเอชในน้ำเสียให้คงที่ที่พีเอช 7 ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20




**รูปที่ 4.19** ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีโครเมียมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 3

จากรูปที่ 4.19 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดโครเมียมได้ดีที่สุดเมื่อใช้แมกนีไทต์ปริมาณ 2.5 กรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นของโครเมียมลดลงเหลือ 21.32 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 57.36% ที่พีเอช 3 (พีเอชที่เหมาะสม)

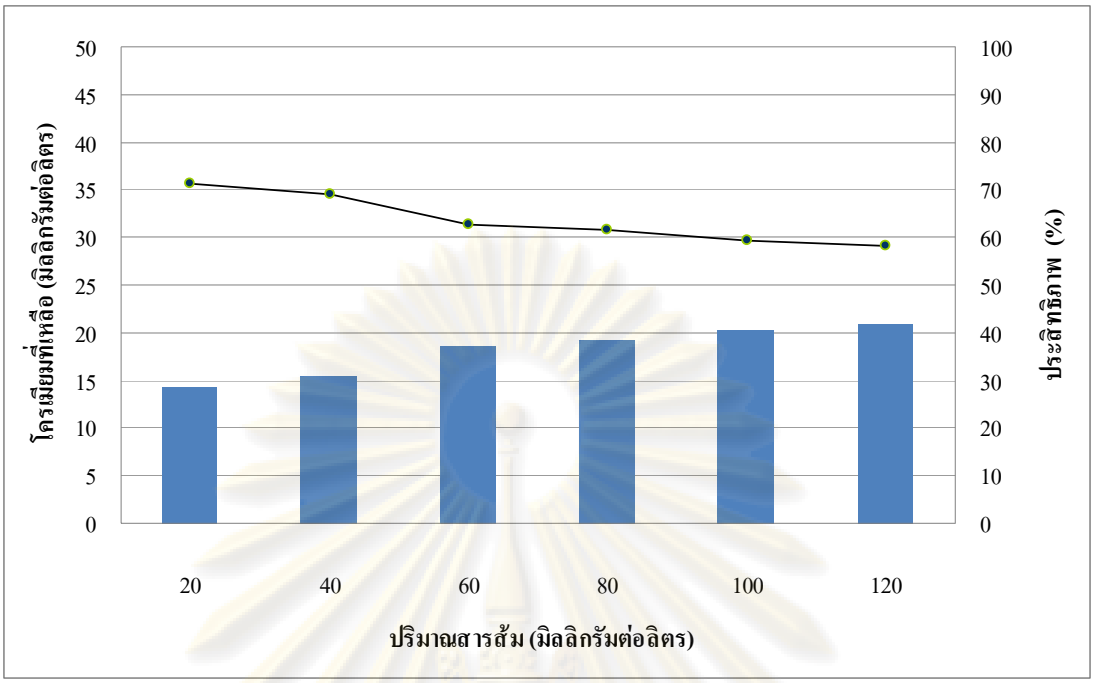



**รูปที่ 4.20** ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 3

จากรูปที่ 4.20 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดอาร์เซนิกได้ดีที่สุดเมื่อใช้แมกนีไทต์ปริมาณ 2.5 กรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นของอาร์เซนิกลดลงเหลือ 27.9 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 44.20% ที่พีเอช 3 (พีเอชที่เหมาะสม)

#### 4.3.2.2 ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณสารส้มในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก โดยควบคุมพีเอชในน้ำเสียให้คงที่ที่พีเอช 7 ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22

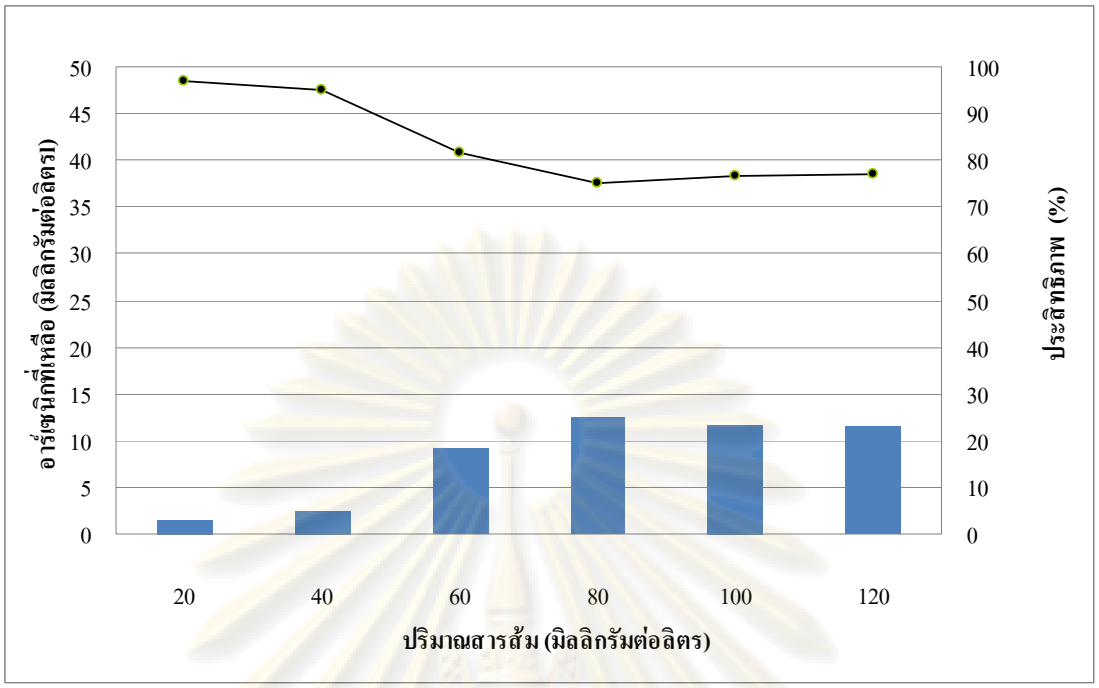



**รูปที่ 4.21** ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีโครเมียมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7

จากรูปที่ 4.21 จะพบว่าสารส้มสามารถบำบัดโครเมียมได้ดีที่สุดเมื่อใช้สารส้มปริมาณ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นของโครเมียมลดลงเหลือ 29.08 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 41.84% ที่พีเอช 3 (พีเอชที่เหมาะสม)

อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.21 จะพบว่ากราฟมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีจุดวกกลับซึ่งโดยทั่วไปการทำจาร์เทสต์จะต้องมีจุดวกกลับซึ่งเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองนั้น ในกรณีนี้จึงไม่อาจสรุปได้ว่าปริมาณ 120 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.22** ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7

จากรูปที่ 4.22 จะพบว่าสารส้มสามารถบำบัดอาร์เซนิกได้ดีที่สุดเมื่อใช้สารส้มปริมาณ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยความเข้มข้นของอาร์เซนิกลดลงเหลือ 37.55 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 24.9% ที่พีเอช 7 (พีเอชที่เหมาะสม)

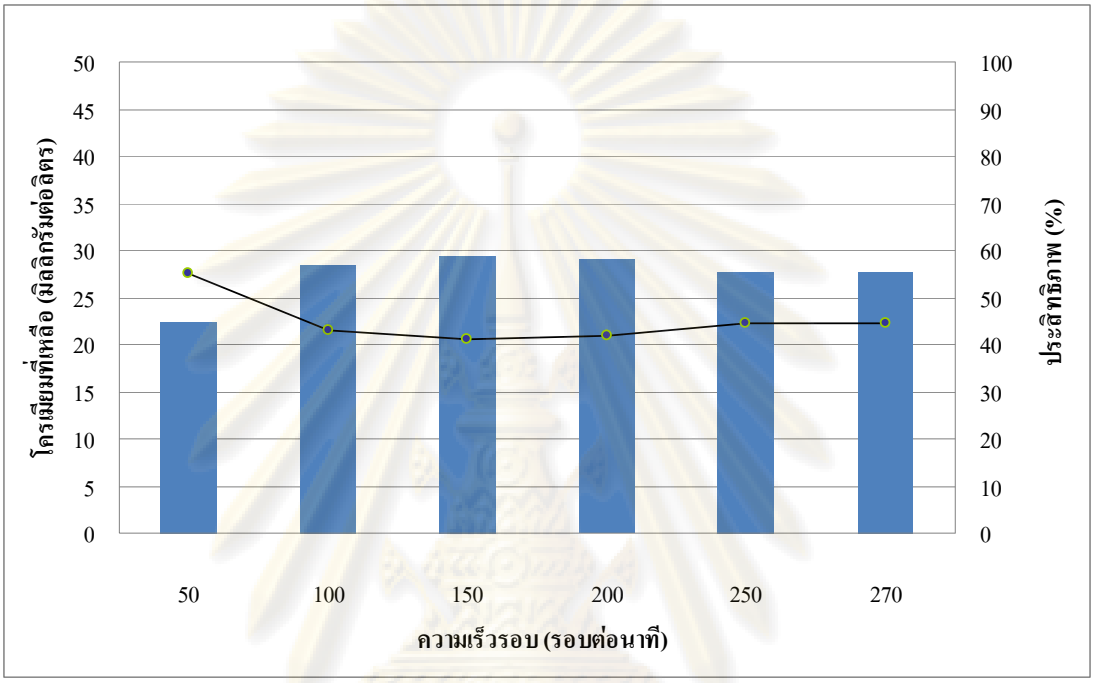
จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 จะพบว่าไม่สามารถหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีโครเมียมได้ แต่อย่างไรก็ตาม สามารถหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีอาร์เซนิกได้ที่ปริมาณ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงสรุปได้ว่าปริมาณ 80 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการบำบัดโลหะหนัก

### 4.3.3 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

การทดลองส่วนนี้เป็นการแปรเปลี่ยนความเร็วรอบการกวนเร็ว โดยทดลองกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโครเมียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของอาร์เซนิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิกในน้ำเสีย

**4.3.3.1 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมกับแมกนีไทต์ในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก**

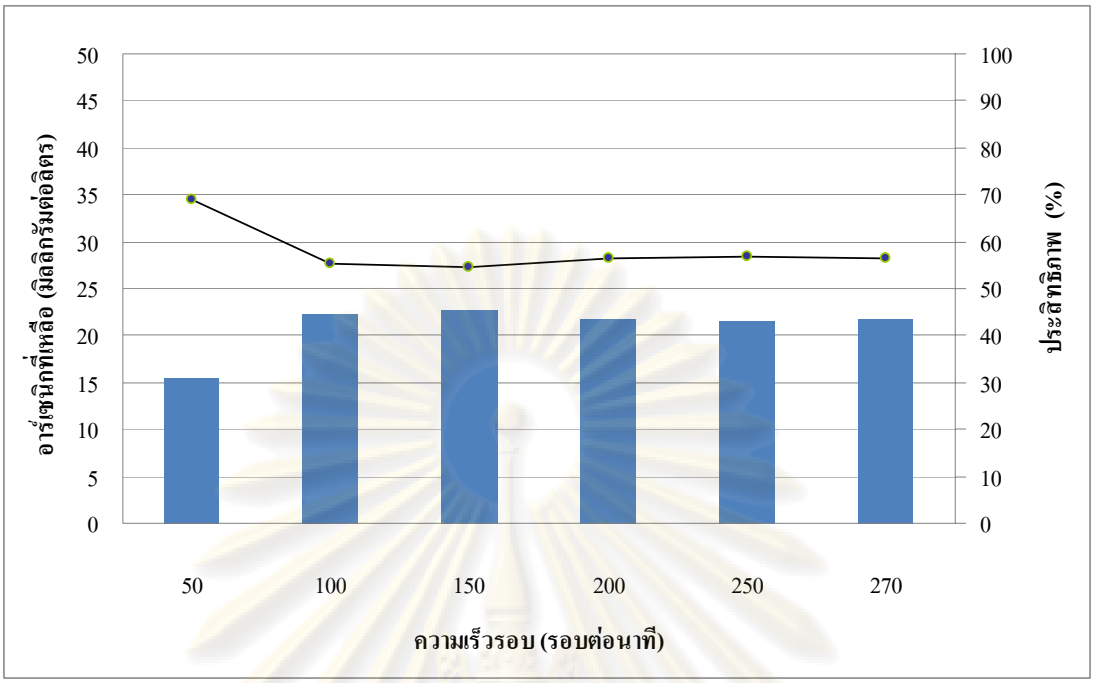
เมื่อแปรเปลี่ยนความเร็วรอบการกวนเร็ว โดยควบคุมพีเอชในน้ำเสียให้คงที่ที่พีเอช 3 และปริมาณแมกนีไทต์ที่ 2.5 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24




**รูปที่ 4.23** ผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีโครเมียมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 3 ปริมาณแมกนีไทต์ 2.5 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.23 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดโครเมียมได้ดีที่สุดเมื่อใช้ความเร็วรอบการกวนเร็วที่ 200 รอบต่อนาที โดยความเข้มข้นของโครเมียมลดลงเหลือ 20.62 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 58.76% ที่ปริมาณแมกแมกนีไทต์ 2.5 กรัมต่อลิตร (ปริมาณที่เหมาะสม) และพีเอช 3 (พีเอชที่เหมาะสม)

อย่างไรก็ตามผลการทดลองจากรูปที่ 4.23 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดที่รอบการกวน 150 รอบต่อนาทีอยู่ที่ 58.08% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพในการบำบัดที่รอบการกวน 200 รอบต่อนาที โดยอาจพิจารณารอบการกวนในเชิงของค่าไฟฟ้าซึ่งเป็นค่าใช้จ่าย แม้ว่าการเพิ่มรอบการกวนจาก 150 เป็น 200 รอบต่อวินาทีมีผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นเล็กน้อยในขณะที่ต้องเพิ่มรอบการกวนสูงขึ้น (ซึ่งมีผลให้ค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้น) จึงสรุปว่าความเร็วรอบการกวน 150 รอบต่อนาทีเป็นความเร็วรอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์ในการบำบัดโครเมียม




**รูปที่ 4.24** ผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 3 ปริมาณแมกนีไทต์ 2.5 กรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.24 จะพบว่าแมกนีไทต์สามารถบำบัดอาร์เซนิกได้ดีที่สุดเมื่อใช้ความเร็วรอบการกวนเร็วที่ 150 รอบต่อนาที โดยความเข้มข้นของอาร์เซนิกลดลงเหลือ 27.25 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด 45.5% ที่ปริมาณแมกแมกนีไทต์ 2.5 กรัมต่อลิตร (ปริมาณที่เหมาะสม) และพีเอช 3 (พีเอชที่เหมาะสม)

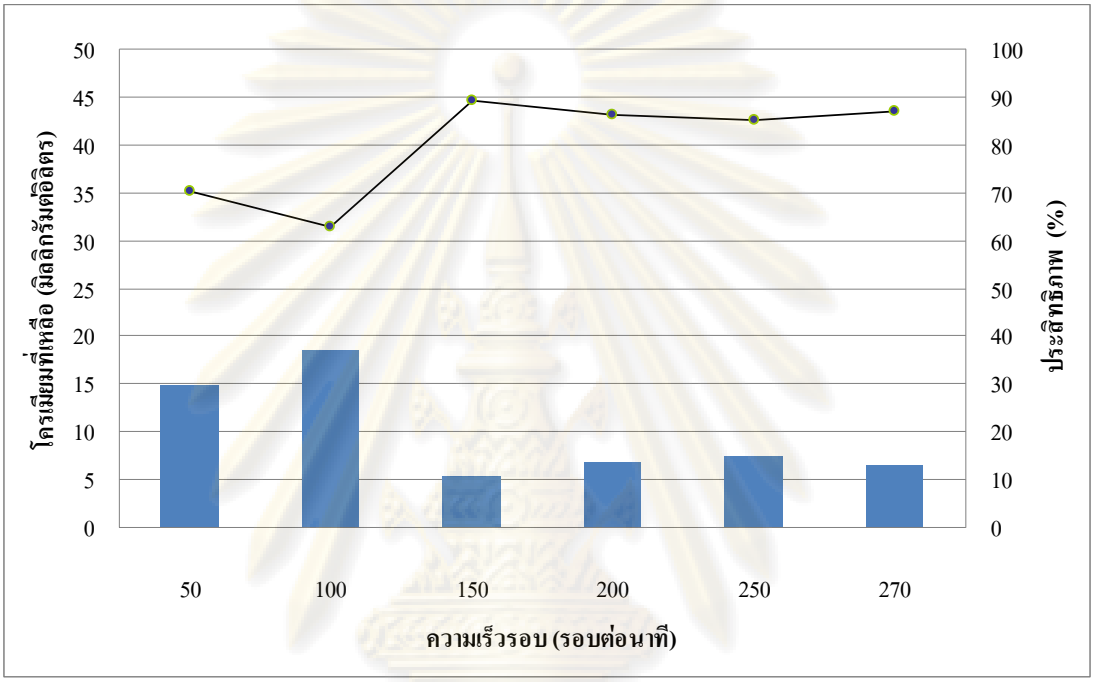
อย่างไรก็ตาม ความเร็วรอบการกวนตั้งแต่ 150 รอบต่อนาที ขึ้นไปจะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน คาดว่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีน่าจะเป็นความเร็วเพียงพอที่ทำให้อนุภาคของแมกนีไทต์และไอออนของโลหะหนักมาสัมผัสและเกิดกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าเช่นเดียวกับแอมโมเนียมไอออนจากการวิจารณ์ผลการทดลองที่ 4.2.3.1

จากการทดลองทั้งหมดจะสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมของแมกนีไทต์ในการบำบัดโลหะหนักคือพีเอช 3 ปริมาณแมกนีไทต์ 2.5 กรัมต่อลิตร และความเร็วรอบการกวนเร็ว 150 รอบต่อนาที ความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที

ในส่วนของความเร็วแกรเดียนท์พบว่า เมื่อคำนวณพลังงานที่ใช้ในการกวนหาได้จากสมการ (2-2) โดยที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีจะคำนวณพลังงานที่ใช้ได้ค่า 0.05 วัตต์ และเมื่อนำพลังงานที่ได้ไปคำนวณต่อเพื่อหาค่าความเร็วแกรเดียนท์จากสมการ (2-1) จะได้ความเร็วแกรเดียนท์ 237 วินาที$^{-1}$

**4.3.3.2 ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมกับสารส้มในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก**

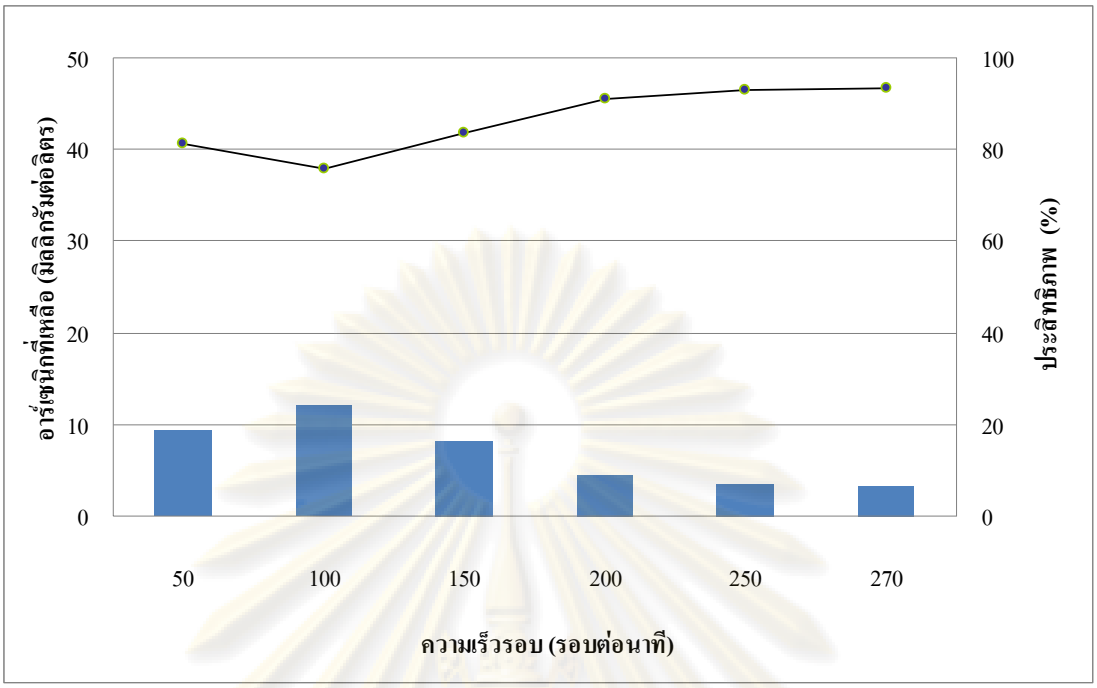
เมื่อแปรเปลี่ยนความเร็วรอบการกวนเร็ว โดยควบคุมพีเอชในน้ำเสียให้คงที่ที่พีเอช 3 และปริมาณสารส้มที่ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร(สำหรับน้ำเสียที่มีอาร์เซนิก) โดยผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26




**รูปที่ 4.25** ผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีโครเมียมความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7 ปริมาณสารส้ม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.25 จะพบว่าสารส้มสามารถบำบัดโครเมียมได้ดีที่สุด เมื่อใช้ความเร็วรอบการกวนเร็วที่ 100 รอบต่อนาที โดยเป็นความเร็วรอบเดียวกับที่ใช้ในการทดลอง 4.3.1.2 และ 4.3.2.2 ประสิทธิภาพในการบำบัด 37.1% ที่ปริมาณสารส้ม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร (ปริมาณที่เหมาะสม) และพีเอช 7 (พีเอชที่เหมาะสม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.26** ผลการทดลองเพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7 ปริมาณสารส้ม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.26 จะพบว่าสารส้มสามารถบำบัดอาร์เซนิกได้ดีที่สุด เมื่อใช้ความเร็วรอบการกวนเร็วที่ 100 รอบต่อนาที โดยเป็นความเร็วรอบเดียวกับที่ใช้ในการทดลอง 4.3.1.2 และ 4.3.2.2 ประสิทธิภาพในการบำบัด 24.90% ที่ปริมาณสารส้ม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร (ปริมาณที่เหมาะสม) และพีเอช 7 (พีเอชที่เหมาะสม)

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงความเร็วรอบการกวนสูงจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักของสารส้มลดลง คาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการที่ความเร็วรอบการกวนสูงเกินไปทำให้ฟล็อคของผลึกอะลูมินัมไฮดรอกไซด์แตกออกเป็นส่วน ๆ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538) ทำให้ไอออนของโลหะหนักลอยอยู่ในน้ำซึ่งต่างจากแมกนีไทต์ที่แม้ว่าจะเพิ่มรอบการกวนก็จะได้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงเดิม

จากการทดลองทั้งหมดจะสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมของสารส้มในการบำบัดโลหะหนักคือพีเอช 7 ปริมาณสารส้ม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที ความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที

ในส่วนของความเร็วแกรเดียนท์พบว่าสารส้มใช้ความเร็วเท่ากับการทดลองที่ 4.1 และ 4.2 โดยความเร็วแกรเดียนท์อยู่ที่ 130 วินาที$^{-1}$ เช่นเดียวกัน

## 4.4 สรุปสภาวะที่เหมาะสมของแมกนีไทต์และสารส้มในการบำบัดน้ำเสีย

### 4.4.1 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่น

สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์คือ พีเอช 3 ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที และความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที และค่าความเร็วแกรเดียนท์ในการกวนเร็วคือ 130 วินาที$^{-1}$

สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นของสารส้มคือ พีเอช 7 ปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที และความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที และค่าความเร็วแกรเดียนท์ในการกวนเร็วคือ 130 วินาที$^{-1}$

### 4.4.2 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนีย

สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียของแมกนีไทต์คือ พีเอช 7 ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 150 รอบต่อนาที และความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที และค่าความเร็วแกรเดียนท์ในการกวนเร็วคือ 237 วินาที$^{-1}$

สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียของสารส้มคือ พีเอช 7 ปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาทีและความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที และค่าความเร็วแกรเดียนท์ในการกวนเร็วคือ 130 วินาที$^{-1}$

### 4.4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโลหะหนัก

สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโลหะหนักของแมกนีไทต์คือ พีเอช 3 ปริมาณ 2.5 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 150 รอบต่อนาที และความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที และค่าความเร็วแกรเดียนท์ในการกวนเร็วคือ 237 วินาที$^{-1}$

สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโลหะหนักของสารส้มคือ พีเอช 7 ปริมาณ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที และความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที และค่าความเร็วแกรเดียนท์ในการกวนเร็วคือ 130 วินาที$^{-1}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** สรุปสภาวะที่เหมาะสมของแมกนีไทต์และสารส้มในการบำบัดน้ำเสีย

| โคแอกกูแลนท์ | ชนิดของน้ำเสีย | พีเอชที่เหมาะสม | ปริมาณโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสม | รอบการกวนเร็วที่เหมาะสม |
|---|---|---|---|---|
| แมกนีไทต์ | ความขุ่นสูง | 3 | 2 กรัมต่อลิตร | 100 รอบต่อนาที |
| | ความขุ่นต่ำ | 3 | 2 กรัมต่อลิตร | 100 รอบต่อนาที |
| | แอมโมเนีย | 7 | 2 กรัมต่อลิตร | 150 รอบต่อนาที |
| | โครเมียม | 3 | 2.5 กรัมต่อลิตร | 100 รอบต่อนาที |
| | อาร์เซนิก | 3 | 2.5 กรัมต่อลิตร | 100 รอบต่อนาที |
| สารส้ม | ความขุ่นสูง | 7 | 40 มิลลิกรัมต่อลิตร | 100 รอบต่อนาที |
| | ความขุ่นต่ำ | 7 | 30 มิลลิกรัมต่อลิตร | 100 รอบต่อนาที |
| | แอมโมเนีย | 7 | 40 มิลลิกรัมต่อลิตร | 100 รอบต่อนาที |
| | โครเมียม | 7 | 80 มิลลิกรัมต่อลิตร | 100 รอบต่อนาที |
| | อาร์เซนิก | 7 | 80 มิลลิกรัมต่อลิตร | 100 รอบต่อนาที |

**4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแมกนีไทต์และสารส้มในการบำบัดน้ำเสียผสม**

ในการทดลองนี้เป็นการหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียผสมที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู แอมโมเนีย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมและอาร์เซนิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมจากน้ำเสียสังเคราะห์ทุกชนิด

เมื่อใช้แมกนีไทต์ปริมาณ 2.5 กรัมต่อลิตร ที่พีเอช 3 ความเร็วรอบการกวนเร็ว 150 รอบต่อนาที ผลการทดลองพบว่าความขุ่นลดลงเหลือ 17 เอ็นทียู คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น 83% ความเข้มข้นแอมโมเนียลดลงเหลือ 412.71 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย 17.46% ความเข้มข้นโครเมียมลดลงเหลือ 35.12 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียม 29.76% ความเข้มข้นอาร์เซนิกลดลงเหลือ 42.79 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดอาร์เซนิก 14.42%

เมื่อใช้ปริมาณสารส้ม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7 ความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที ผลการทดลองพบว่าความขุ่นลดลงเหลือ 21 เอ็นทียู คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น 79% ความเข้มข้นแอมโมเนียลดลงเหลือ 407.52 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย 18.50% ความเข้มข้นโครเมียมลดลงเหลือ 41.88 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียม 16.24% ความเข้มข้นอาร์เซนิกลดลงเหลือ 45.97 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดอาร์เซนิก 8.06% ผลการหาประสิทธิภาพในการบำบัดของแมกนีไทต์และสารส้มในการบำบัดน้ำเสียเพียงชนิดเดียวและน้ำเสียผสมแสดงในตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** ประสิทธิภาพในการบำบัดของแมกนีไทต์และสารส้มในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

| Coagulant | ชนิดของน้ำเสีย | ประสิทธิภาพในการบำบัด | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ความขุ่น | แอมโมเนีย | โครเมียม | อาร์เซนิก |
| แมกนีไทต์ | ชนิดเดียว | 86.00% | 43.38% | 58.76% | 45.50% |
| | ผสม | 83.00% | 17.46% | 29.76% | 14.42% |
| สารส้ม | ชนิดเดียว | 81.00% | 26.40% | 37.10% | 24.90% |
| | ผสม | 79.00% | 18.50% | 16.24% | 8.06% |

หมายเหตุ น้ำเสียชนิดเดียวคือการทดลองโดยใช้น้ำเสียที่มีมลพิษเพียงชนิดเดียวในน้ำเสีย
น้ำเสียผสมคือการทดลองโดยใช้น้ำเสียที่มีมลพิษหลายชนิดรวมกันในน้ำเสีย

จากตารางที่ 4.2 จะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของแมกนีไทต์ในน้ำเสียผสมต่ำกว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแยกชนิดกันทุกกรณี คาดว่าเกิดจากการเลือกปริมาณที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียเพียงชนิดเดียวซึ่งแมกนีไทต์มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสและทำลายประจุเท่าเดิมในขณะที่นำไปใช้กับน้ำเสียผสมซึ่งมีสิ่งเจือปนรวมกันในปริมาณสูง จึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสิ่งเจือปนในแต่ละชนิดมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ในขณะเดียวกันจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของสารส้มในน้ำเสียผสมต่ำกว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแยกชนิดกันทุกกรณีเช่นกัน คาดว่าอาจเกิดจากการเลือกปริมาณที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียเพียงชนิดเดียวซึ่งสารส้มอยู่ในรูปผลึกของอะลูมินัมไฮดรอกไซด์เท่าเดิมในขณะที่นำไปใช้กับน้ำเสียผสมซึ่งมีสิ่งเจือปนรวมกันในปริมาณสูง มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสิ่งเจือปนในแต่ละชนิดมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเช่นเดียวกับในกรณีของแมกนีไทต์

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียทุกชนิดของแมกนีไทต์และสารส้มจะพบว่าแมกนีไทต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงกว่าสารส้มเกือบทุกชนิดยกเว้นแอมโมเนียในน้ำเสียผสมจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าประสิทธิภาพของสารส้มเล็กน้อย อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการบำบัดเฉพาะแอมโมเนียเพียงอย่างเดียวของแมกนีไทต์ก็ยังสูงกว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของสารส้ม จึงอาจสรุปได้ว่าแมกนีไทต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียทุกชนิดได้ดีกว่าสารส้ม

**4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแมกนีไทต์และสารส้มในการบำบัดน้ำเสียจริง**

ในการทดลองนี้เป็นการหาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริงทุกชนิด โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละชนิด

เมื่อใช้สภาวะที่เหมาะสมต่าง ๆ ของแมกนีไทต์ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละชนิดมาบำบัดน้ำเสียจริง ผลการทดลองพบว่าความขุ่นลดลงเหลือ 30 เอ็นทียู คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น 77.27% ความเข้มข้นแอมโมเนียลดลงเหลือ 16.76 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย 31.03% ความเข้มข้นโครเมียมลดลงเหลือ 10.43 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียม 41.67% ความเข้มข้นอาร์เซนิกลดลงเหลือ 1.85 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดอาร์เซนิก 37.90%

เมื่อใช้สภาวะที่เหมาะสมต่าง ๆ ของสารส้มในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละชนิดมาบำบัดน้ำเสียจริง ผลการทดลองพบว่าความขุ่นลดลงเหลือ 37 เอ็นทียู คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น 71.97% ความเข้มข้นแอมโมเนียลดลงเหลือ 18.44 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย 24.12% ความเข้มข้นโครเมียมลดลงเหลือ 15.43 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียม 13.70% ความเข้มข้นอาร์เซนิกลดลงเหลือ 2.35 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดอาร์เซนิก 25.16% โดยผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการบำบัดของแมกนีไทต์และสารส้มในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงแสดงในตารางที่ 4.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 4.3** ประสิทธิภาพในการบำบัดของแมกนีไทต์และสารส้มในการบำบัดน้ำเสียจริง

| โคแอกกูแลนท์ | ชนิดของน้ำเสีย | ประสิทธิภาพในการบำบัด | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ความขุ่น | แอมโมเนีย | โครเมียม | อาร์เซนิก |
| แมกนีไทต์ | สังเคราะห์ | 86.00% | 43.38% | 58.76% | 45.50% |
| | จริง | 77.27% | 31.03% | 41.66% | 37.90% |
| สารส้ม | สังเคราะห์ | 81.00% | 26.40% | 37.10% | 24.90% |
| | จริง | 71.97% | 24.12% | 13.70% | 25.16% |

หมายเหตุ น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงเป็นน้ำเสียที่มีมลพิษเพียงชนิดเดียวในน้ำเสีย

จากตารางที่ 4.3 จะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริงทุกชนิดต่ำกว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เนื่องจากในน้ำเสียจริงมีสารอินทรีย์ชนิดอื่นปนอยู่ด้วย โดยสังเกตได้จากสีและตะกอนของน้ำเสียจริง ในน้ำเสียที่มีความขุ่นจะมีสีน้ำตาล มีความขุ่นสูง ในน้ำเสียที่มีแอมโมเนียก็มีความขุ่นและตะกอนบ้าง ในน้ำเสียที่มีโลหะหนักจะมีสีเทาเข้ม ความขุ่นสูงและมีตะกอนสีเทา จึงอาจสรุปได้ว่าพื้นผิวของอนุภาคแมกนีไทต์บางส่วนจะไปบำบัดสิ่งเจือปนอื่นในน้ำเสียด้วย จึงได้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ลดลงจากประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

ในขณะเดียวกันจะพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริงทุกชนิดต่ำกว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์เช่นกัน คาดว่าน่าจะเป็นสิ่งเจือปนในน้ำเสียจริงเช่นเดียวกันจึงอาจสรุปได้ว่าผลึกของอะลูมินัมไฮดรอกไซด์บางส่วนจะไปบำบัดสิ่งเจือปนอื่นในน้ำเสียด้วย จึงได้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่ลดลงจากประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียทุกชนิดของแมกนีไทต์และสารส้มจะพบว่าแมกนีไทต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงกว่าสารส้มทุกชนิด และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแต่ละชนิดพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและแอมโมเนียมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียมและอาร์เซนิกของแมกนีไทต์สูงกว่าสารส้มอย่างเห็นได้ชัด จึงอาจสรุปได้ว่าทางด้านของประสิทธิภาพในการบำบัดแมกนีไทต์สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนท์แทนสารส้มในกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดของแมกนีไทต์สูงกว่าสารส้มในน้ำเสียทุกชนิด

เมื่อนำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยแมกนีไทต์มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) ในภาคผนวก ค. จะได้ดังตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** เปรียบเทียบน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง

| น้ำเสีย | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) | |
|---|---|---|
| | น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด | ค่ามาตรฐาน |
| ความขุ่น | 37 เอ็นทียู | ไม่มี |
| แอมโมเนีย | 16.76 | ไม่มี |
| โครเมียม | 10.43 | 0.25 |
| อาร์เซนิก | 1.85 | 0.25 |

เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม จะพบว่าน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยแมกนีไทต์ยังไม่ผ่านมาตรฐานของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม แมกนีไทต์จึงไม่สามารถนำไปใช้เป็นกระบวนการสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสียได้ (ในส่วนของความขุ่น ไม่มีในมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนแอมโมเนียจะมีมาตรฐานในรูปทีเคเอ็น) แต่อย่างไรก็ตามแมกนีไทต์สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนท์แทนสารส้มเพื่อลดอัตราภาระบรรทุกของน้ำเสียก่อนที่จะเข้าไปในกระบวนการบำบัดต่อไปได้ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียทุกชนิดสูงกว่าสารส้มเมื่ออยู่ในหน่วยกระบวนการเดียวกัน

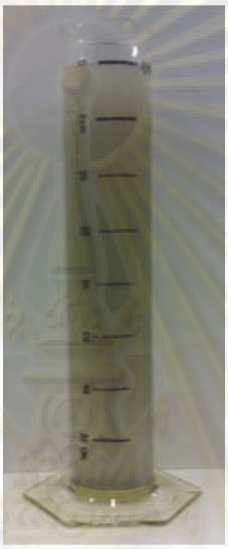
### 4.7 ความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้น (Initial Settling Velocity : ISV)

ในช่วงการทดลองนี้เป็นการหาความเร็วตกตะกอนเริ่มต้นโดยให้ตะกอนของแมกนีไทต์และสารส้มตกตะกอนลงมา จากนั้นวัดระยะทางและจับเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนที่ระยะต่าง ๆ แล้วนำมาสร้างกราฟเพื่อหาความเร็วของการตกตะกอน

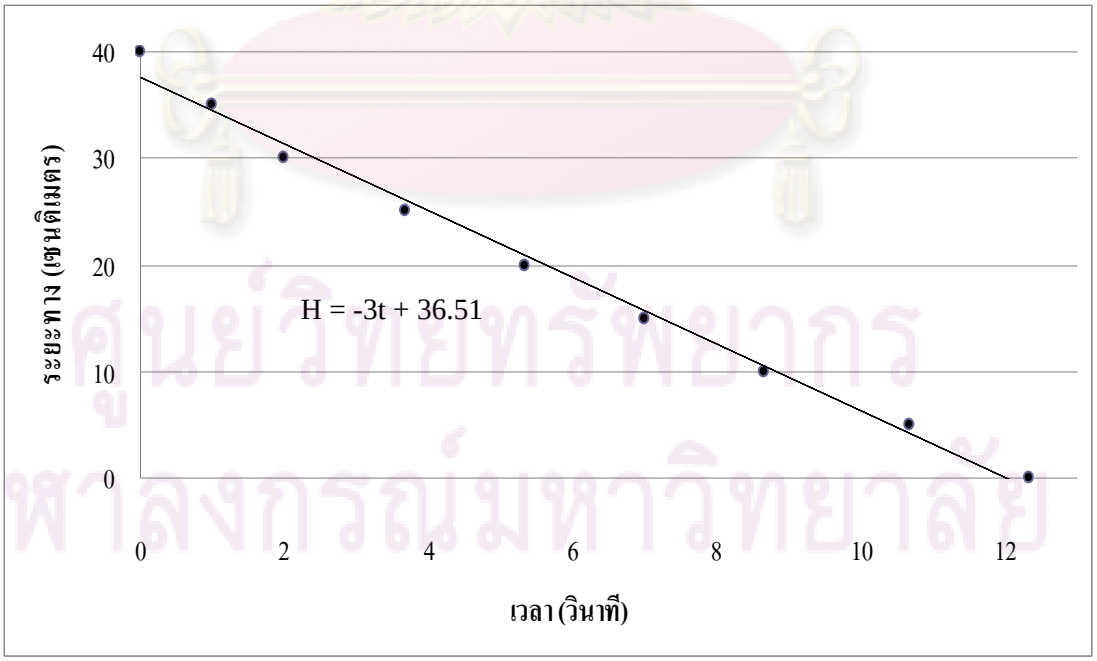
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**4.7.1 ความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นของแมกนีไทต์**

เมื่อให้ตะกอนจากน้ำเสียที่มีความขุ่นที่ได้จากการทดลองที่ 4.1 ของแมกนีไทต์ตกลงมาในกระบอกตวง วัดระยะทางและจับเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนที่ระยะต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.27 แล้วนำมาสร้างกราฟ ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.28



**รูปที่ 4.27** ตะกอนของแมกนีไทต์ที่นำมาใช้ทดลอง



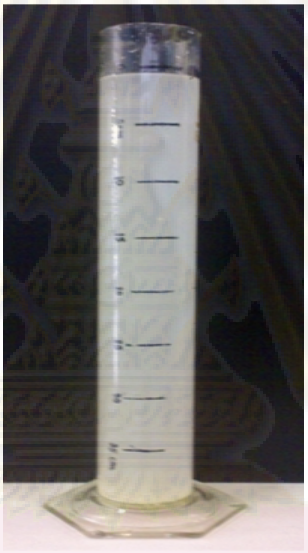

**รูปที่ 4.28** ระยะทางที่ตกตะกอนของแมกนีไทต์เมื่อเวลาต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.28 จะพบว่าแมกนีไทต์ตกตะกอนเป็นระยะทาง 40 เซนติเมตร โดยใช้เวลาทั้งหมด 12.33 วินาที เมื่อหาเส้นแนวโน้มและหาความชันจะได้ว่าความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นของแมกนีไทต์คือ 3 เซนติเมตรต่อวินาทีหรือ 10.8 เมตรต่อชั่วโมง

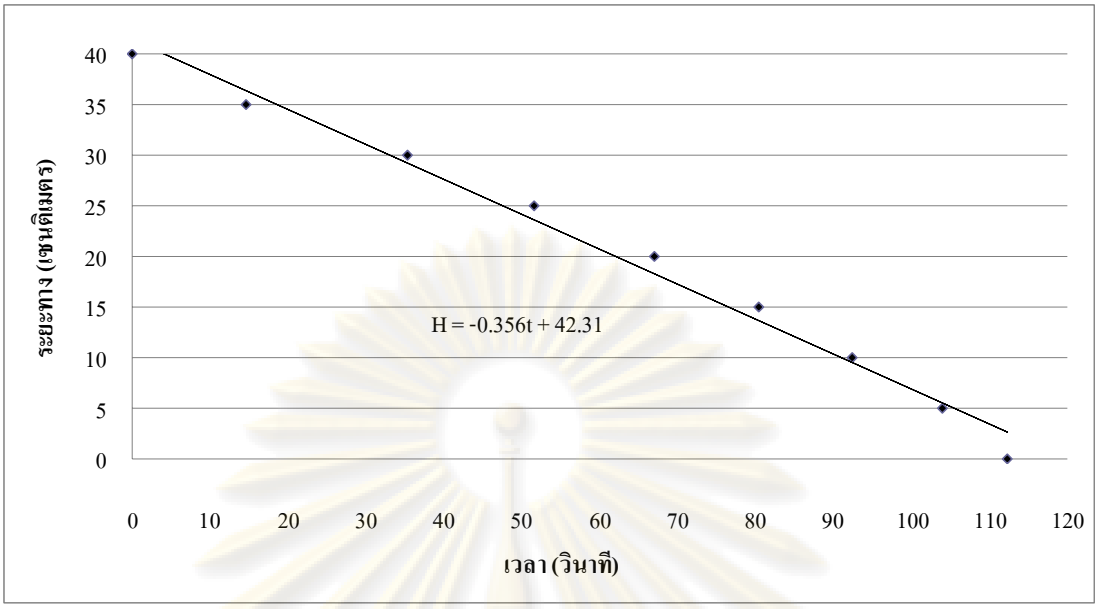
**4.7.2 ความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นของสารส้ม**

เมื่อให้ตะกอนจากน้ำเสียที่มีความขุ่นที่ได้จากการทดลองที่ 4.1 ของสารส้มตกลงมาในกระบอกตวง วัดระยะทางและจับเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนที่ระยะต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.29 แล้วนำมาสร้างกราฟ ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.30



**รูปที่ 4.29** ตะกอนของสารส้มที่นำมาใช้ทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.30** ระยะทางที่ตกตะกอนของสารส้มเมื่อเวลาต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.30 จะพบว่าสารส้มตกตะกอนเป็นระยะทาง 40 เซนติเมตร โดยใช้เวลาทั้งหมด 112.33 วินาที เมื่อหาเส้นแนวโน้มและหาความชันจะได้ว่าความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นของสารส้มคือ 0.356 เซนติเมตรต่อวินาทีหรือ 1.28 เมตรต่อชั่วโมง

**Prakash (1997)** ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยสารส้มพบว่าความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นของสารส้มเมื่อแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่างกันจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.115 – 0.536 เซนติเมตรต่อวินาที

เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วเริ่มต้นจากผลที่ได้จากการทดลองพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยข้างต้น ความเร็วที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วงความเร็วที่ได้จากวิจัยที่ผ่านมา

โดยทั่วไปการสร้างกราฟความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้น เมื่อปล่อยให้มีการตกตะกอนในกระบอกใสและวัดระดับของตะกอนที่ระยะต่าง ๆ และนำความสูงของชั้นตะกอนมาสร้างกราฟเทียบกับเวลาที่ใช้ จะได้กราฟที่ในช่วงแรกมีลักษณะเป็นเส้นตรงและในช่วงหลังมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ตะกอนจะตกตะกอนลงมาด้วยอัตราเร็วคงที่และสูงสุดในระยะแรก จากนั้นจะตกตะกอนช้าลงเรื่อย ๆ จนในที่สุดเกือบไม่มีการตกตะกอนเกิดขึ้นเลย ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงของอัตรเร็วในการตกตะกอนจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นตะกอน ในระยะแรกอนุภาคต่าง ๆ แขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างหลวม ดังนั้นถึงแม้ว่าการตกตะกอนจะเป็นแบบมีอุปสรรคแต่ก็อาจจะยังมีช่องว่างในการตกตะกอนได้อีกบ้าง การตกตะกอนในช่วงแรกจะมีค่าคงที่ เรียกว่าความเร็วในการตกตะกอนเริ่มต้น (Initial Settling Velocity : ISV) ความเร็วในตกตะกอนเริ่มต้นเป็นดัชนีที่สามารถบอกถึงความสามารถในการตกตะกอน การตกตะกอนได้ดีย่อมมีค่าความเร็วใน

การตกตะกอนเริ่มต้นที่สูง เมื่อการตกตะกอนผ่านไปเรื่อย ๆ ช่องว่างที่อยู่ในน้ำจะเหลือน้อยลงเรื่อย ๆ เมื่อถึงจุดหนึ่ง ความเร็วในการตกตะกอนจะมีค่าลดลง กล่าวได้ว่าตะกอนอยู่ในระยะเปลี่ยนแปลง (Transition Zone) ซึ่งเป็นระยะที่อนุภาคบางส่วนเคลื่อนที่เข้ามาใกล้จนสัมผัสกันพอดี ความเร็วในการตกตะกอนจะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งอนุภาคทั้งหมดสัมผัสกันพอดี แล้วจะเข้าสู่ระยะอัดตัว (Compression Zone) ซึ่งความเร็วในการตกตะกอนมีค่าต่ำมาก

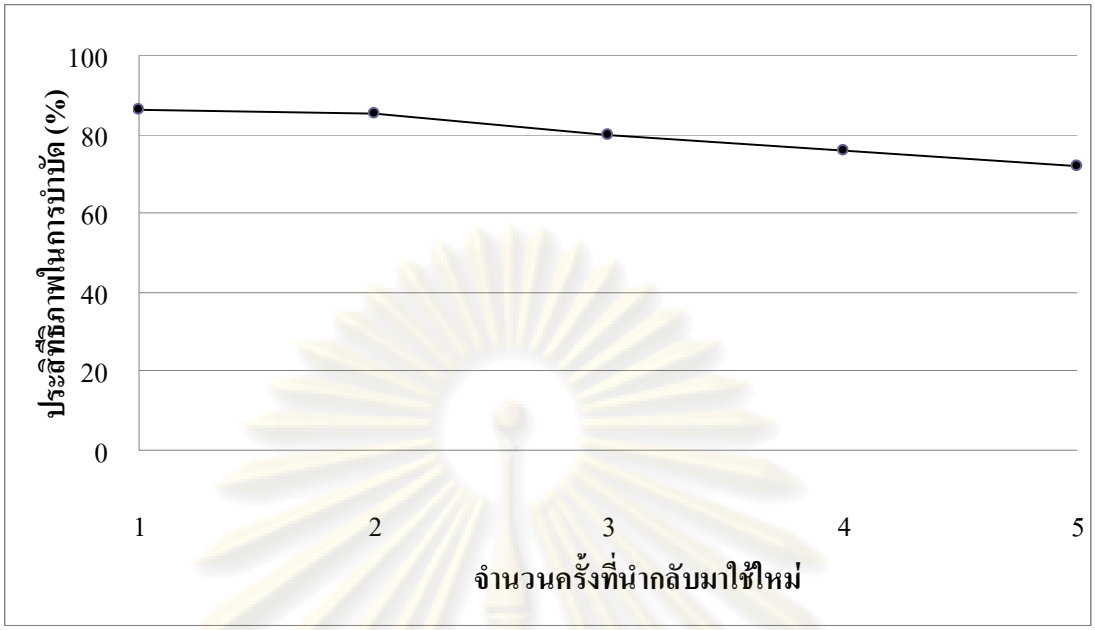
จากรูปที่ 4.28 และ 4.30 จะพบว่ากราฟมีแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงโดยไม่มีส่วนของเส้นโค้งประกอบกับตะกอนของแมกนีไทต์และตะกอนของสารส้มเป็นตะกอนเคมีซึ่งน่าจะมีความเร็วในการตกตะกอนสูงอยู่แล้ว จึงอาจสรุปได้ว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดจะอยู่ในช่วงของการตกตะกอนเริ่มต้น จากนั้นจึงนำค่าทั้งหมดมาสร้างกราฟและหาเส้นแนวโน้มเพื่อหาความเร็วในการตกตะกอนเริ่มต้นต่อไป

อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองในรูปที่ 4.28 และ 4.30 เมื่อพิจารณาถึงความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นของแมกนีไทต์ที่ 10.8 เมตรต่อชั่วโมง และความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นของสารส้มที่ 1.28 เมตรต่อชั่วโมง พบว่าแมกนีไทต์ตกตะกอนได้เร็วกว่าสารส้ม 8.44 เท่า จึงอาจสรุปได้ว่าแมกนีไทต์ตกตะกอนได้ดีกว่าสารส้ม ประกอบกับตะกอนของสารส้มเป็นผลึกของอะลูมินัมไฮดรอกไซด์ซึ่งรีดน้ำออกยาก ดังนั้นจึงสามารถแยกตะกอนของแมกนีไทต์ออกจากน้ำได้เร็วกว่าและง่ายกว่าตะกอนของสารส้มซึ่งมีผลต่อเวลาในการบำบัด

### 4.8 ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่

ในช่วงการทดลองนี้เป็นการหาประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์ที่จะนำกลับมาใช้ใหม่รวมทั้งสิ้น 5 ครั้งต่อเนื่อง โดยการนำแมกนีไทต์ที่ใช้บำบัดความขุ่นแล้วมาแช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลต่อลิตร เพื่อให้พื้นผิวของอนุภาคแมกนีไทต์เป็นประจุลบซึ่งจะผลักกับอนุภาคความขุ่นที่มีประจุลบเช่นกัน และนำไปใช้ในการบำบัดความขุ่น ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 4.31

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.31** ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่

**ตารางที่ 4.5** เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดลงแต่ละครั้ง

| ครั้งที่ | ประสิทธิภาพ | ประสิทธิภาพที่ลดลงแต่ละครั้ง | ประสิทธิภาพที่ลดลงเทียบครั้งแรก |
|---|---|---|---|
| 1 | 86% | - | - |
| 2 | 85% | 1.16% | 1.16% |
| 3 | 80% | 5.89% | 6.98% |
| 4 | 76% | 5.00% | 11.63% |
| 5 | 72% | 5.26% | 16.28% |

จากรูปที่ 4.29 และ ตารางที่ 4.5 จะพบว่าแมกนีไทต์ที่ใช้ครั้งแรกมีประสิทธิภาพในการบำบัด 86% เมื่อนำกลับมาใช้ใหม่พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่อยๆลดลง เมื่อใช้ทั้งหมด 5 ครั้งพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเหลือ 72% เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพในการบำบัดที่ลดลงพบว่าลดลง 16.28%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**Povlova และ Dobrevsky (2005)** ได้ศึกษาการนำทรายดำที่มีแมกนีไทต์กลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด 5 ครั้งพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดในครั้งแรก 24.2% และในการนำกลับมาใช้ใหม่ 5 ครั้ง ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเหลือ 20% เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพในการบำบัดที่ลดลงพบว่าลดลง 17.36%

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดที่ลดลงในการทดลองพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยการทดลองนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการลดลงของประสิทธิภาพมีค่าใกล้เคียงกันมาก คาดว่าเนื่องจากกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ใช้วิธีการเดียวกันคือการนำตะกอนมาแช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 5 ครั้ง

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพที่ลดลงจากการนำกลับมาใช้ใหม่คาดว่าเกิดจากสาเหตุ 2 ประการคือ ความขุ่นบางส่วนติดกับแมกนีไทต์ที่ไม่สามารถผลักให้หลุดจากพื้นผิวของอนุภาคแมกนีไทต์ได้ อีกสาเหตุหนึ่งคือแมกนีไทต์บางส่วนละลายไปกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ขณะเตรียมนำกลับมาใช้ใหม่ทำให้มีปริมาณลดลงส่งผลให้มีประสิทธิภาพลดลง

อย่างไรก็ตาม แมกนีไทต์ที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกหลายครั้งเนื่องจากเมื่อนำกลับมาใช้ 5 ครั้ง ประสิทธิภาพในการบำบัดยังสูงถึง 72% โดยอาจนำมาใช้ร่วมกับแมกนีไทต์ใหม่เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดได้

**4.9 การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น**

การประเมินค่าใช้จ่ายคำนวณจากราคาสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง โดยแบ่งเป็นราคาของแมกนีไทต์และสารส้ม

- แมกนีไทต์ คิดจากราคาของเฟอรัสเตตระไฮเดรต เฟอริกเฮกซะไฮเดรต และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โดยแมกนีไทต์ 1 กรัม คิดเป็นราคา 10.43 บาท
- สารส้ม คิดจากราคาของอะลูมินัมซัลเฟต โดยสารส้ม 1 กรัมคิดเป็นราคา 1.92 บาท

ที่ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น 81% เท่ากันพบว่าใช้แมกนีไทต์ 1 กรัมต่อลิตร คิดเป็นเงิน 10.43 บาท และใช้สารส้ม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นเงิน 0.08 บาท

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 5

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่น

1.1 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์คือ พีเอช 3 ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที ความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที

1.2 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นของสารส้มคือ พีเอช 7 ปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที และความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที

2. สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนีย

2.1 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียของแมกนีไทต์คือ พีเอช 7 ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 150 รอบต่อนาที ความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที

2.2 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดแอมโมเนียของสารส้มคือ พีเอช 7 ปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที และความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที

3. สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโลหะหนัก

3.1 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโลหะหนักของแมกนีไทต์คือ พีเอช 3 ปริมาณ 2.5 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 150 รอบต่อนาที ความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที

3.2 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดโลหะหนักของสารส้มคือ พีเอช 3 ปริมาณ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที และความเร็วรอบการกวนช้า 30 รอบต่อนาที

4. ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจริงมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากในน้ำเสียจริงมีสิ่งเจือปนในปริมาณสูง (สี ตะกอนและสารอินทรีย์ต่าง ๆ) ทำให้แมกนีไทต์และสารส้มบางส่วนต้องไปบำบัดสิ่งเจือปนอื่น ๆ จึงได้ปริมาณที่ต่ำกว่าปริมาณที่เหมาะสม เป็นสาเหตุให้ได้ประสิทธิภาพไม่เต็มที่เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

5. ความเร็วเริ่มต้นในการตกตะกอน (ISV : Initial Settling Velocity) ของแมกนีไทต์สูงกว่าสารส้ม 8 เท่า จึงสามารถแยกตะกอนออกจากน้ำเสียได้เร็วกว่าและง่ายกว่าสารส้ม มีผลให้ใช้เวลาในการบำบัดลดลง

6. การนำแมกนีไทต์กลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด 5 ครั้งทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์ลดลง โดยครั้งแรกประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น 86% เมื่อนำไปใช้ใหม่ทั้งหมด 5 ครั้ง ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นลดลงเหลือ 72%

**5.2 ข้อเสนอแนะ**

1. แมกนีไทต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียต่าง ๆ ได้ดี แต่ควรนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสิ่งเจือปนเพียงชนิดเดียวเท่านั้น ไม่ควรใช้กับน้ำเสียที่มีสิ่งเจือปนหลายชนิด
2. ในการบำบัดน้ำเสียจริง ควรใช้ปริมาณแมกนีไทต์มากกว่าปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากน้ำเสียจริงอาจมีสิ่งเจือปนอื่น เช่น สี ตะกอน และสารอินทรีย์อื่น ๆ ด้วย
3. การแยกตะกอนแมกนีไทต์ด้วยสนามแม่เหล็กจะสามารถแยกตะกอนได้รวดเร็วกว่าการทำจาร์เทสต์แบบทั่วไป
4. แมกนีไทต์สามารถนำมาใช้ใหม่ได้มากกว่า 5 ครั้งเนื่องจากเมื่อผ่านการใช้งานถึง 5 ครั้งแต่ประสิทธิภาพยังสูงถึง 72% โดยอาจใช้แมกนีไทต์ที่ใช้แล้วร่วมกับแมกนีไทต์ใหม่ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้ประสิทธิภาพสูงสุดและสิ้นเปลืองปริมาณแมกนีไทต์น้อยที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# รายการอ้างอิง


ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2539. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคม [online]. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th [10 มีนาคม 2551]

ธนกาญจน์ บุญพิทักษ์. การกำจัดไซยาไนด์และโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน : กรณีของคอลัมน์แบบเรซิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ภูคำ พิมจักร. การใช้กระบวนการยูเอเอสบี-แอน็อกซิก-แอโรบิกในการกำจัดน้ำเสียที่มีความเค็มและมีไนโตรเจนสูงจากน้ำเสียสะพานปลา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. วิศวกรรมการประปาเล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538

ภาษาอังกฤษ

Aker Kvaerner Engineering Services Ltd. Sirofloc process [online]. [July, 2005]. Available from: http://www.akerkvaerner.com/NR/rdonlyres/7A3CB7CB-F342-4CED-B810-15805533073F/12468/SiroflocProcess July2 005.pdf [2006, October 20]

Anderson, N. J., Eldridge, R. J., Kolarik, L. O., Swinton E. A. and Weiss, D. E. Colour and turbidity removal reusable magnetic particles – I. Use of magnetic cation exchange resins to introduce aluminum ions Wat. Res. 14 (1980) : 959-966

Barthelmy, D. Magnetite [online] [2005]. Available from: http://webmineral.com/data/Magnetite.shtml [2007, March 18]

Benjamin, M. M. Water chemistry. Singapore: McGraw Hill Book, 2002.

Bolto, B. A. Magnetic particle technology : Desalination and water reuse applications. Desalination 106 (1996) : 137-143

Booker, N. Sirofloc for sewage water treatment [online]. [2000]. Available from: http://www.industry.gov.au/asset/documents/itrinternet/eiaawater2.html [2006 ,October 19]

Gupta, K. and Ghosh, U.C. Arsenic removal using hydrous nanostructure iron(III)–titanium(IV) binary mixed oxide from aqueous solution. Journal of Hazardous Material 161 (2009) : 884-892

Ma, Z., Guan, Y. and Liu, H. Superparamagnetic silica nanoparticles with immobilized metal affinity ligands for protein adsorption. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 301 (2006) : 469–477

Metcalf and Eddy. Wastewater engineering treatment and reuse. Singapore : McGraw Hill Book, 2004.

Pavlova, S. and Dobrevsky, I. Modified Sirofloc process for natural water treatment. Desalination 173 (2005) : 55-59

Prakash, R. L. The influence of natural organic substances on coagulation and flocculation Process. Thesis for Master Degree Engineering Program in Asian Instituite of Technology School of Environment, Resources and Development, 1997

Sakai, Y., Miami, T. and Takahashi, F. A sewage treatment process using highly condensed activated sludge with an apparatus for magnetic separation. Journal of fermentation and bioengineering 78 (1994) : 120-122

Sakai, Y., Miami, T. and Takahashi, F. Simultaneous removal of organic and nitrogen compounds in intermittently aerated activated sludge process using magnetic separation. Wat. Res. 8 (1997) : 2113-2116

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ก

## ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.1** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู

| พีเอช | ความขุ่นที่วัดได้ (เอ็นทียู) | | | ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู) |
|---|---|---|---|---|
| | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | |
| 3 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| 5 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 6.5 | 28 | 29 | 27 | 28 |
| 7 | 38 | 38 | 38 | 38 |
| 9 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| 11 | 59 | 60 | 60 | 59.7 |

**ตารางที่ ก.2** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู

| พีเอช | ความขุ่นที่วัดได้ (เอ็นทียู) | | | ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู) |
|---|---|---|---|---|
| | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | |
| 3 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| 5 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 6.5 | 28 | 29 | 27 | 28 |
| 7 | 38 | 38 | 38 | 38 |
| 9 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| 11 | 59 | 60 | 60 | 59.7 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.3** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู

| ปริมาณแมกนีไทต์ (กรัมต่อลิตร) | ความขุ่นที่วัดได้ (เอ็นทียู) | | | ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู) |
|---|---|---|---|---|
| | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | |
| 0.5 | 20 | 20 | 21 | 20.3 |
| 1 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| 1.5 | 18 | 17 | 17 | 17.3 |
| 2 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| 2.5 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| 3 | 19 | 17 | 16 | 17.3 |

**ตารางที่ ก.4** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู

| ปริมาณแมกนีไทต์ (กรัมต่อลิตร) | ความขุ่นที่วัดได้ (เอ็นทียู) | | | ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู) |
|---|---|---|---|---|
| | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | |
| 0.5 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 1 | 12 | 13 | 12 | 12.3 |
| 1.5 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| 2 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 2.5 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| 3 | 13 | 13 | 13 | 13 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.5** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู

| ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ความขุ่นที่วัดได้ (เอ็นทียู) | | | ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู) |
|---|---|---|---|---|
| | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | |
| 10 | 27 | 26 | 27 | 26.7 |
| 20 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 30 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 40 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| 50 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| 60 | 22 | 23 | 22 | 22.3 |

**ตารางที่ ก.6** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู

| ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ความขุ่นที่วัดได้ (เอ็นทียู) | | | ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู) |
|---|---|---|---|---|
| | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | |
| 10 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| 20 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| 30 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 40 | 13 | 12 | 13 | 13.7 |
| 50 | 15 | 15 | 16 | 15.3 |
| 60 | 15 | 15 | 15 | 15 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.7** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู

| ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) | ความขุ่นที่วัดได้ (เอ็นทียู) | | | ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู) |
|---|---|---|---|---|
| | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | |
| 50 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 100 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| 150 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| 200 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| 250 | 22 | 21 | 21 | 21.3 |
| 270 | 22 | 22 | 22 | 22 |

**ตารางที่ ก.8** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีความขุ่น 30 เอ็นทียู

| ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) | ความขุ่นที่วัดได้ (เอ็นทียู) | | | ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู) |
|---|---|---|---|---|
| | ตัวอย่างที่ 1 | ตัวอย่างที่ 2 | ตัวอย่างที่ 3 | |
| 50 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 100 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 150 | 9 | 8 | 8 | 8.3 |
| 200 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| 250 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 270 | 15 | 15 | 15 | 15 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.9** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

| พีเอช | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|
| 3 | 342.3 |
| 5 | 338.0 |
| 6.5 | 320.5 |
| 7 | 315.8 |
| 9 | 300.5 |
| 11 | 265.0 |

**ตารางที่ ก.10** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

| พีเอช | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|
| 3 | 452.0 |
| 5 | 430.7 |
| 6.5 | 385.0 |
| 7 | 362.2 |
| 9 | 322.0 |
| 11 | 303.8 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.11** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

| ปริมาณแมกนีไทต์ (กรัมต่อลิตร) | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|
| 0.5 | 412.6 |
| 1 | 387.8 |
| 1.5 | 340.8 |
| 2 | 308.1 |
| 2.5 | 317.7 |
| 3 | 310.8 |

**ตารางที่ ก.12** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีแอมโมเนีย ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

| ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|
| 10 | 423.5 |
| 20 | 399.5 |
| 30 | 384.1 |
| 40 | 360.8 |
| 50 | 390.4 |
| 60 | 392.7 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.13** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

| ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|
| 50 | 408.6 |
| 100 | 305.5 |
| 150 | 283.1 |
| 200 | 302.1 |
| 250 | 300.2 |
| 270 | 298.7 |

**ตารางที่ ก.14** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

| ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|
| 50 | 384.4 |
| 100 | 362.5 |
| 150 | 372.4 |
| 200 | 414.8 |
| 250 | 454.2 |
| 270 | 459.9 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.15** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีโครเมียมและอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

| พีเอช | ความเข้มข้นโครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ความเข้มข้นอาร์เซนิก (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|---|
| 3 | 24.13 | 36.31 |
| 5 | 26.88 | 40.84 |
| 6.5 | 31.36 | 40.68 |
| 7 | 46.17 | 41.89 |
| 9 | 45.56 | 40.78 |
| 11 | 49.83 | 40.96 |

**ตารางที่ ก.16** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีโครเมียมและอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

| พีเอช | ความเข้มข้นโครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ความเข้มข้นอาร์เซนิก (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|---|
| 3 | 30.01 | 49.91 |
| 5 | 38.06 | 48.80 |
| 6.5 | 37.59 | 44.57 |
| 7 | 37.68 | 43.83 |
| 9 | 39.99 | 45.35 |
| 11 | 37.55 | 46.77 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.17** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีโครเมียมและอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

| ปริมาณแมกนีไทต์ (กรัมต่อลิตร) | ความเข้มข้นโครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ความเข้มข้นอาร์เซนิก (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|---|
| 0.5 | 29.99 | 43.71 |
| 1 | 29.44 | 38.38 |
| 1.5 | 28.54 | 37.11 |
| 2 | 24.13 | 36.29 |
| 2.5 | 21.32 | 27.90 |
| 3 | 21.70 | 28.95 |

**ตารางที่ ก.18** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีโครเมียมและอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

| ปริมาณสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ความเข้มข้นโครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ความเข้มข้นอาร์เซนิก (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|---|
| 20 | 35.57 | 48.56 |
| 40 | 34.44 | 47.55 |
| 60 | 31.25 | 40.86 |
| 80 | 30.77 | 37.55 |
| 100 | 29.76 | 38.40 |
| 120 | 29.08 | 38.58 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.19** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของแมกนีไทต์กับน้ำเสียที่มีโครเมียมและอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

| ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) | โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | อาร์เซนิก (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|---|
| 50 | 27.49 | 34.49 |
| 100 | 21.42 | 27.65 |
| 150 | 20.62 | 27.25 |
| 200 | 20.96 | 28.15 |
| 250 | 22.29 | 28.36 |
| 270 | 22.25 | 28.28 |

**ตารางที่ ก.20** ผลการทำจาร์เทสต์เพื่อหารอบการกวนเร็วที่เหมาะสมของสารส้มกับน้ำเสียที่มีโครเมียมและอาร์เซนิกความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

| ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) | โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร) | อาร์เซนิก (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|---|
| 50 | 35.25 | 40.54 |
| 100 | 31.45 | 37.86 |
| 150 | 44.55 | 41.86 |
| 200 | 43.13 | 45.59 |
| 250 | 42.47 | 46.39 |
| 270 | 43.51 | 46.63 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.21** ผลการบำบัดของแมกนีไทต์ในน้ำเสียผสมที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู ความเข้มข้นแอมโมเนีย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

| สิ่งปนเปื้อน | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|
| ความขุ่น | 17* |
| แอมโมเนีย | 412.71 |
| โครเมียม | 35.12 |
| อาร์เซนิก | 42.79 |

*ความขุ่นมีหน่วยเป็นเอ็นทียู

**ตารางที่ ก.22** ผลการบำบัดของสารส้มในน้ำเสียผสมที่มีความขุ่น 100 เอ็นทียู ความเข้มข้นแอมโมเนีย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของโครเมียมและอาร์เซนิก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

| สิ่งปนเปื้อน | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|
| ความขุ่น | 21* |
| แอมโมเนีย | 407.52 |
| โครเมียม | 41.88 |
| อาร์เซนิก | 45.97 |

*ความขุ่นมีหน่วยเป็นเอ็นทียู

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.23** ผลการบำบัดของแมกนีไทต์ในน้ำเสียจริง

| ชนิดน้ำเสีย | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|
| ความขุ่น | 30* |
| แอมโมเนีย | 16.76 |
| โครเมียม | 10.43 |
| อาร์เซนิก | 1.85 |

*ความขุ่นมีหน่วยเป็นเอ็นทียู

**ตารางที่ ก.24** ผลในการบำบัดของสารส้มในน้ำเสียจริง

| ชนิดน้ำเสีย | ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
|---|---|
| ความขุ่น | 37* |
| แอมโมเนีย | 18.44 |
| โครเมียม | 15.43 |
| อาร์เซนิก | 2.35 |

*ความขุ่นมีหน่วยเป็นเอ็นทียู

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.25** ระยะทางที่ตกตะกอนของแมกนีไทต์เมื่อเวลาต่างๆ

| ระยะทาง (เซนติเมตร) | เวลาที่วัดได้ (วินาที) | | | เวลาเฉลี่ย (วินาที) |
|---|---|---|---|---|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | |
| 40 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| 35 | 1 | 1 | 1 | 1.00 |
| 30 | 2 | 2 | 2 | 2.00 |
| 25 | 3 | 4 | 4 | 3.67 |
| 20 | 5 | 6 | 5 | 5.33 |
| 15 | 6 | 8 | 7 | 7.00 |
| 10 | 8 | 10 | 8 | 8.67 |
| 5 | 10 | 12 | 10 | 10.67 |
| 0 | 12 | 13 | 12 | 12.33 |

**ตารางที่ ก.26** ระยะทางที่ตกตะกอนของสารส้มเมื่อเวลาต่างๆ

| ระยะทาง (เซนติเมตร) | เวลาที่วัดได้ (วินาที) | | | เวลาเฉลี่ย (วินาที) |
|---|---|---|---|---|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | |
| 40 | 0 | 0 | 0 | 0.00 |
| 35 | 15 | 13 | 16 | 14.67 |
| 30 | 35 | 35 | 36 | 35.33 |
| 25 | 52 | 50 | 53 | 51.67 |
| 20 | 67 | 65 | 69 | 67.00 |
| 15 | 80 | 79 | 82 | 80.33 |
| 10 | 92 | 90 | 95 | 92.33 |
| 5 | 103 | 102 | 107 | 104.00 |
| 0 | 112 | 111 | 114 | 112.33 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ก.27** ผลในการบำบัดความขุ่นของแมกนีไทต์ที่นำกลับมาใช้ใหม่

| ครั้งที่ | ความขุ่นที่วัดได้ (เอ็นทียู) | | ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู) |
|---|---|---|---|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | |
| 1 | 14 | 14 | 14 |
| 2 | 15 | 15 | 15 |
| 3 | 20 | 20 | 20 |
| 4 | 24 | 24 | 24 |
| 5 | 28 | 28 | 28 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ข

## วิธีการคำนวณและตัวอย่างการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ข.1 วิธีคำนวณและตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น

### ข.1.1 สมการในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น} = \frac{\text{ความขุ่นเริ่มต้น - ความขุ่นที่เหลือ}}{\text{ความขุ่นเริ่มต้น}} \times 100$$

### ข.1.2 ตัวอย่างในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น

ในที่นี้นำบางส่วนของผลการทดลองเพื่อเป็นตัวอย่างในการคำนวณจากตาราง ก.1 ซึ่งมีความขุ่นเริ่มต้น 100 เอ็นทียู ความขุ่นที่เหลือ 14 เอ็นทียู

จากสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น} = \frac{\text{ความขุ่นเริ่มต้น - ความขุ่นที่เหลือ}}{\text{ความขุ่นเริ่มต้น}} \times 100$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น} = \frac{100 - 14}{100} \times 100$$

$$= 86\%$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ข.2 วิธีคำนวณและตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย

### ข.2.1 สมการในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย} = \frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น - ความเข้มข้นที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100$$

### ข.2.2 ตัวอย่างในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย

ในที่นี้นำบางส่วนของผลการทดลองเพื่อเป็นตัวอย่างในการคำนวณจากตาราง ก.9 ซึ่งมีความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นแอมโมเนียที่เหลือ 342.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย} = \frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น - ความเข้มข้นที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย} = \frac{500 - 342.3}{500} \times 100$$

$$= 31.54\%$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ข.3 วิธีคำนวณและตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนัก**

โดยวิธีการคำนวณนี้ใช้ทั้งการคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียมและอาร์เซนิก

**ข.2.1 สมการในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนัก**

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนัก} = \frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น - ความเข้มข้นที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100$$

**ข.2.2 ตัวอย่างในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนัก**

ในที่นี้นำบางส่วนของผลการทดลองเพื่อเป็นตัวอย่างในการคำนวณจากตาราง ก.15 ซึ่งมีความเข้มข้นโครเมียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ 24.13 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนัก} = \frac{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น - ความเข้มข้นที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$\text{ประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียม} = \frac{50 - 24.13}{50} \times 100$$

$$= 51.74\%$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ข.4 วิธีคำนวณและตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วแกรเดียนท์

### ข.4.1 สมการในการคำนวณหาพลังงานที่ใช้

จากสมการ (2-2)

$$P = N_P \rho N^3 d_I^5 \qquad (2\text{-}2)$$

$P$ = พลังงาน (วัตต์)

$N_P$ = จำนวนใบพัด

$\rho$ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$N$ = ความเร็วรอบการหมุน(รอบต่อวินาที)

$d_I$ = เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด (เมตร)

### ข.4.2 สมการในการคำนวณหาความเร็วแกรเดียนท์

จากสมการ (2-1)

$$G = (P / \mu V)^{1/2} \qquad (2\text{-}1)$$

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

$P$ = พลังงานที่ใช้ (วัตต์)

$\mu$ = ความหนืดของน้ำ (นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร)

$V$ = ปริมาตรของน้ำในถังกวน (ลูกบาศก์เมตร)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการทดลองเพื่อหาที่ความเร็วรอบของการกวนเร็วของน้ำเสียที่มีความขุ่นพบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมคือ 100 รอบต่อนาที (1.67 รอบต่อวินาที) โดยใช้ใบพัด 1 ใบ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 เมตร ความหนาแน่นของน้ำ 997 กิโลเมตรต่อลูกบาศก์เมตร

แทนค่าลงในสมการ (2-2) จะได้

พลังงานที่ใช้ = $1 \times 997 \times (1.67)^3 \times (0.08)^5$

= 0.05 วัตต์

นำค่าพลังงานที่ใช้ ไปคำนวณหาความเร็วแกรเดียนท์ ความหนืดของน้ำคือ 0.00089 นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร ปริมาตรของน้ำ 0.001 ลูกบาศก์เมตร

แทนค่าลงในสมการ (2-1) จะได้

ความเร็วแกรเดียนท์ = $( 0.05 / (0.0089 \times 0.001))^{1/2}$

= 130 วินาที$^{-1}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ค

# มาตรฐานน้ำทิ้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ค.1** มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2539)

| **ดรรชนีคุณภาพน้ำ** | **ค่ามาตรฐาน** | **วิธีวิเคราะห์** |
|---|---|---|
| 1. ความเป็นกรดและด่าง | 5.5-9.0 | พีเอชมิเตอร์ |
| 2. ค่าทีดีเอส | ไม่เกิน 3000 มก./ล. | ระเหยแห้งที่ 103-105 °ซ |
| 3. ค่าสารแขวนลอย | ไม่เกิน 50 มก./ล. | กรองผ่านกระดาษใยแก้ว |
| 4. อุณหภูมิ | ไม่เกิน 40 °ซ | เครื่องวัดอุณหภูมิ |
| 5. สีหรือกลิ่น | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ | |
| 6. ซัลไฟด์ (as $H_2S$) | ไม่เกิน 1.0 มก./ล. | ไตเตรต |
| 7. ไซยาไนด์ (as HCN) | ไม่เกิน 0.2 มก./ล. | กลั่นและ Pyridine Barbituric Acid |
| 8. น้ำมันและไขมัน | ไม่เกิน 5.0 มก./ล. | สกัดด้วยตัวทำละลายและหาน้ำหนัก |
| 9. ฟอร์มัลดีไฮด์ | ไม่เกิน 1.0 มก./ล. | สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ |
| 10. สารประกอบฟีนอล | ไม่เกิน 1.0 มก./ล. | กลั่นและ 4-Aminoantipyrine |
| 11. คลอรีนอิสระ | ไม่เกิน 1.0 มก./ล. | วิธีไอโอโดเมตริก |
| 12. สารกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ | ต้องตรวจไม่พบตามวิธีที่กำหนด | แก๊สโครมาโตกราฟี |
| 13. ค่าบีโอดี 5 วัน ที่ 20 °ซ | ไม่เกิน 20 มก./ล. | Azide Modification |
| 14. ค่าทีเคเอ็น | ไม่เกิน 100 มก./ล. | เจลดาห์ |
| 15. ค่าซีโอดี | ไม่เกิน 120 มก./ล. | วิธีย่อยด้วยโพแทสเซียมไดโครเมต |
| 16.1 สังกะสี | ไม่เกิน 5.0 มก./ล. | Atomic Adsorption Spectrophotometry หรือ Plasma Emission Spectroscopy Inductively Coupled Plasma |
| 16.2 โครเมียม (VI) | ไม่เกิน 0.25 มก./ล. | |
| 16.3 โครเมียม (III) | ไม่เกิน 0.75 มก./ล. | |
| 16.4 ทองแดง | ไม่เกิน 2.0 มก./ล. | |
| 16.5 แคดเมียม | ไม่เกิน 0.03 มก./ล. | |
| 16.6 แบเรียม | ไม่เกิน 1.0 มก./ล. | |
| 16.7 ตะกั่ว | ไม่เกิน 0.2 มก./ล. | |
| 16.8 นิกเกิล | ไม่เกิน 1.0 มก./ล. | |
| 16.9 แมงกานีส | ไม่เกิน 5.0 มก./ล. | |
| 16.10 อาร์เซนิก | ไม่เกิน 0.25 มก./ล. | |
| 16.11 เซเลเนียม | ไม่เกิน 0.02 มก./ล. | Atomic Adsorption Cold Vapour |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุรวุฒิ ศิราธรรม เกิดวันที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2548 จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย