

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์



นางสาวประไพรัตน์ ผ่องแผ้ว  
นางสาวสมฤทัย รุจิราวโรคม

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2538

2/พ.  
2/335 ก  
เลขหม.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน, เดือน, ปี.....

2538

26205

16 ต.ค. 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Removal of Heavy Metal in Wastewater from Laboratory by Ferrite Process**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the  
Requirement for the Degree of Bachelor of Science**

**Department of Chemistry**

**Faculty of Science**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

**1995**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการด้วยกระบวนการ  
เพอร์ไรท์**

**โดย** นางสาวประไพรัตน์ ผ่องแผ้ว  
นางสาวสมฤทัย รุจิราวโรคม

**ภาควิชา** เคมี

**อาจารย์ที่ปรึกษา** อาจารย์กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์  
อาจารย์พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้นำ โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์  
บัณฑิต

ลายเซ็น



( ผศ.ดร. เพรชัชชัย ไชยสิทธิ์ ) หัวหน้าภาค

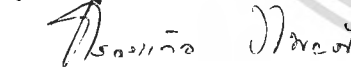
**คณะกรรมการโครงการพิเศษ**



( รศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล ) ประธานกรรมการ



( ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์ ) กรรมการ



( อาจารย์กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ ) กรรมการ



( อาจารย์พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ) กรรมการ

**ลิขสิทธิ์ของภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์	
นักศึกษา	นางสาวประไพรัตน์	ผ่องแผ้ว
	นางสาวสมฤทัย	รุจิราว โรดม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์กรองแก้ว	ทิพย์ศักดิ์
	อาจารย์พิสมัย	ชัยรัตน์อุทัย
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2538	

#### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดซึ่งเป็นโลหะหนักในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์โดยเลือกศึกษาโลหะทองแดง นิกเกิล และตะกั่ว สภาวะเงื่อนไขที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณเกลือเฟอร์รัสซัลเฟต เวลาที่ใช้ในการฟ้นออกซิเจน ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 10 และอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองกับน้ำทิ้ง 3 ตัวอย่างโดยน้ำทิ้งตัวอย่างที่ 1 เก็บมาจากห้องปฏิบัติการ ชั้น 4 ตึกพระเทพ ส่วนน้ำทิ้งตัวอย่างที่ 2 และ 3 เก็บมาจากห้องปฏิบัติการ ชั้น 5 ภาควิชาเคมี โดยใช้ตัวอย่างละ 500 มิลลิลิตร พบว่าสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมในการบำบัด น้ำทิ้งตัวอย่างที่ 1 คือ ใช้ปริมาณเกลือเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 28.8 กรัม เวลาที่ใช้ในการฟ้นออกซิเจน (อัตราการไหล 2 ลิตร ต่อ นาที) เท่ากับ 30 นาที น้ำทิ้งตัวอย่างที่ 2 และ 3 ใช้ปริมาณเกลือเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากันคือ 21.6 กรัม และเวลาที่ใช้ในการฟ้นออกซิเจนเท่ากับ 15 และ 30 นาที ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดโดยเฉลี่ยพบว่ามีค่าเท่ากับ 87%, 81%, และ 78% ตามลำดับ

**Special Project Title**      Removal of Heavy Metal in Wastewater from Laboratory  
by Ferrite Process

**Name**                              Miss.Prapirut              Pongpaew  
Miss.Sumrutai              Rugiravarodom

**Special Project Advisor**      Krongkaew      Tippayasak  
Pitsamai              Chairat-utai

**Department**                      Chemistry

**Academic Year**                  1995

#### **Abstract**

The optimum conditions for removing heavy metal in laboratory wastewater by ferrite process were studied. The conditions were amount of ferrous sulfate salt, flowing oxygen time, constant pH =10 and temperature 30° c. Three samples by the first sample collected wastewater from chemical laboratory on 4th floor at Princess Sirintorn building. The second and the third collected wastewater from chemical laboratory on 5th floor, Chemistry Department , each sample 500 millilitre , were experimented. It was obvious that, the most adequate amount of ferrous sulfate salt, the first was 28.8 grams, the second was 21.6 grams, and the same as the third. The best flowing oxygen times, flow rate is 2 litre per minute, were 30 minutes, 15 minutes, and 30 minutes, respectively. Under these conditions, the efficiency for removing heavy metal were 87%, 81%, and 78%, respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาช่วยเหลือจากอาจารย์หลายท่านได้แก่  
ผศ.ดร.เมษิณชัย ไชยสิทธิ์ รศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ อาจารย์  
กลั่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ อาจารย์กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และ อาจารย์พิสมัย ชัยรัตน์  
อุทัย คณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ นอกจากนี้ต้อง

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมี ทุก  
ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในทุกๆด้าน

สุดท้ายขอขอบคุณ แม่บ้าน ที่ทำให้ห้องปฏิบัติการเคมี มีความสะอาด นำ  
ทำงานทุกวัน และเพื่อนๆ ที่เป็นกำลังใจให้ด้วยดีตลอดมา

คณะผู้วิจัย

# สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 วิธีการดำเนินการโดยย่อ	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการพิเศษนี้	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เทคนิคการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย	3
2.1.1 การทำให้ตกตะกอน	3
2.1.2 ออกซิเดชัน-รีดักชัน	3
2.1.3 การระเหย	4
2.1.4 การสกัดด้วยตัวทำละลาย	4
2.1.5 ไอออนเอ็กซ์เชนจ์	4
2.1.6 อิเล็กโตรโคอะไลซิส	4
2.1.7 รีเวสออสโมซิส	4
2.2 ทฤษฎีและหลักการกระบวนการเพอร์ไรท์	7
2.2.1 กระบวนการเพอร์ไรท์	7
2.2.2 โครงสร้างสารประกอบเพอร์ไรท์	7
2.2.3 กลไกการเกิดสารประกอบเพอร์ไรท์	8
2.3 คุณสมบัติเด่นของกระบวนการเพอร์ไรท์	10
2.4 ตัวอย่างการศึกษากระบวนการเพอร์ไรท์	12
บทที่ 3. วิธีการวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการวิจัย	22
3.2 แหล่งน้ำทิ้ง	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3	สารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์	23
3.4	วิธีการทดลอง	24
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>		
4.1	การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำทิ้ง	29
4.2	การศึกษาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำทิ้ง ด้วยกระบวนการเฟอโรไรต์ในสภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	29
4.3	การศึกษาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำทิ้ง ด้วยกระบวนการเฟอโรไรต์ในสภาวะอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	29
<b>บทที่ 5 สรุปวิจารณ์ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>		
5.1	สรุปวิจารณ์ผลการวิจัย	49
5.2	ข้อเสนอแนะ	50
ภาคผนวก ก	พิมพ์ของตะกั่ว นิกเกิลและทองแดง	51
ภาคผนวก ข	การหาปริมาณของแข็งทั้งหมด	53
ภาคผนวก ค	การหาปริมาณโลหะหนักทั้งหมด	54
ภาคผนวก ง	เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว ทองแดงและนิกเกิล ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรสโคปี	55
ภาคผนวก จ	การหาค่าสภาพการนำไฟฟ้า	56
ภาคผนวก ฉ	ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม	57
ภาคผนวก ช	ตารางและกราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าศักยภาพออกซิเจน	65
ภาคผนวก ซ	ผลการวิเคราะห์ความเป็นแม่เหล็กด้วยเทคนิค เอ็กซ์เรย์ คิฟแฟรคชัน	77
เอกสารอ้างอิง		78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สภาพน้ำทิ้งทางกายภาพและทางเคมี	34
ตารางที่ 2 สรุปการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์ ที่เงื่อนไขต่างๆ ที่พีเอช 10 และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	35
ตารางที่ 3 สรุปการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์ ที่เงื่อนไขต่างๆ ที่พีเอช 10 และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	38
ตารางที่ 4 แสดงค่าความเข้มข้นของโลหะหนักหลังการบำบัด ด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์ที่พีเอช 10 และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	39
ตารางที่ 4 แสดงค่าความเข้มข้นของโลหะหนักหลังการบำบัด ด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์ที่พีเอช 10 และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	39
ตารางที่ 5 แสดงค่าความเข้มข้นของโลหะหนักหลังการบำบัด ด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์ที่พีเอช 10 และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	42
ตารางที่ 6 แสดงผลต่างของความเข้มข้นก่อนและหลังบำบัดและประสิทธิภาพ ในการบำบัดด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์ที่พีเอช 10 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	43
ตารางที่ 7 แสดงผลต่างของความเข้มข้นก่อนและหลังบำบัดและประสิทธิภาพ ในการบำบัดด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์ที่พีเอช 10 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	46
ตารางที่ 8 สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำทิ้ง ด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์ที่พีเอช 10	47
ตารางที่ 9 แสดงผลการชะล้าง(Leaching) ของตะกอน ที่ได้จากสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสม	48
ตาราง ก แสดงผลค่าศักย์ออกซิเดชันของน้ำทิ้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	65
ตาราง ข แสดงผลค่าศักย์ออกซิเดชันของน้ำทิ้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	66
ตาราง ค แสดงผลค่าศักย์ออกซิเดชันของน้ำทิ้งที่ 3 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	67
ตาราง ง แสดงผลค่าศักย์ออกซิเดชันของน้ำทิ้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	68
ตาราง จ แสดงผลค่าศักย์ออกซิเดชันของน้ำทิ้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	69
ตาราง ฉ แสดงผลค่าศักย์ออกซิเดชันของน้ำทิ้งที่ 3 ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	70

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงแผนผังของระบบกำจัดโลหะหนักสำหรับโรงงานชุบ กรมโรงงาน	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างสไปนลของเฟอร์ไรท์	11
รูปที่ 2.3 โครงสร้างเฮกซาโกนอลของเฟอร์ไรท์	11
รูปที่ 2.4 เงื่อนไขการออกซิไดซ์ของการเกิดเฟอร์ไรท์	12
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์	26
รูปที่ 3.2 แสดงการทดลอง	27
รูปที่ 3.3 แสดงการกรองด้วยระบบ suction	28
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำทิ้งที่นำมาศึกษา	30
รูปที่ 4.2 แสดงการตกตะกอนของน้ำทิ้งที่ 2 หลังผ่านกระบวนการเฟอร์ไรท์	31
รูปที่ 4.3 แสดงการตกตะกอนของน้ำทิ้งที่ 3 หลังผ่านกระบวนการเฟอร์ไรท์	31
รูปที่ 4.4 แสดงสภาพน้ำหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์	32
รูปที่ 4.5 แสดงสภาพตะกอนหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์	32
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์กับการบำบัด กับการบำบัดด้วยวิธีธรรมชาติของน้ำทิ้งที่ 2	33
กราฟที่ 1 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชันของน้ำทิ้งที่ 1 ที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	71
กราฟที่ 2 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชันของน้ำทิ้งที่ 2 ที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	72
กราฟที่ 3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชันของน้ำทิ้งที่ 3 ที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	73
กราฟที่ 4 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชันของน้ำทิ้งที่ 1 ที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	74
กราฟที่ 5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชันของน้ำทิ้งที่ 2 ที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	75
กราฟที่ 6 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชันของน้ำทิ้งที่ 3 ที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	76

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตรว่าปัญหาเรื่องน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเป็นเรื่องที่ยากในการแก้ไข เนื่องจากไม่มีระบบการแยกประเภทสารพิษ ดังนั้นในปี 2538 นี้ทางภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงได้เริ่มทำการแยกประเภทการจัดเก็บน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งเป็น 5 ประเภท ได้แก่

- |                                     |                  |
|-------------------------------------|------------------|
| 1. AQUEOUS HEAVY METAL SOLUTIONS    | ใช้รหัส สีชมพู   |
| 2. SOLID WASTE                      | ใช้รหัส สีน้ำตาล |
| 3. NON-HALOGENATED ORGANIC SOLVENTS | ใช้รหัส สีแดง    |
| 4. HALOGENATED ORGANIC SOLVENTS     | ใช้รหัส สีเขียว  |
| 5. OLD OIL                          | ใช้รหัส สีฟ้า    |

ซึ่งสารแต่ละประเภทจะเก็บในถัง พลาสติกขนาด 25 ลิตร เมื่อเต็มถังแล้วก็จะถูกส่งไปบำบัดต่อ ในการทำปัญหาพิเศษครั้งนี้ได้เลือกบำบัด AQUEOUS HEAVY METAL SOLUTIONS เทคนิคในการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งเท่าที่มีผู้ศึกษาไว้ส่วนใหญ่จะเป็นการตกตะกอนในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์หรือซัลไฟด์ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสภาพสารมลพิษในน้ำมาเป็นสารมลพิษในรูปของแข็งเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีปัญหาในเรื่องของตะกอนที่เกิดได้ช้า และไม่สามารถทำการแยกตะกอนกับน้ำทิ้ง หรือละลายกลับไปในน้ำที่จะปล่อยออกสู่ท่อระบายน้ำ เป็นต้น ส่วนตะกอนที่ได้ เมื่อนำไปฝังดิน อาจก่อให้เกิดปัญหาต่อแหล่งน้ำ หรือมีการดูดซึมเอาโลหะหนักเข้าไปสะสมในพืชได้ และประการสุดท้ายอาจมีปัญหาเรื่องที่ดินที่ใช้ฝังตะกอนก็มีราคาแพงไม่คุ้มกับการนำมาใช้ฝังกากตะกอน เป็นต้น

เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการพัฒนาระบบกำจัดน้ำเสียที่เรียกว่า กระบวนการเฟอร์ไรท์ (FERRITE PROCESS) ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนกัน และมีปริมาณความเข้มข้นสูงได้ โดยการควบคุมเงื่อนไขต่าง ๆ ให้เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-เบส เป็นต้น

สำหรับโลหะหนักที่ได้ทำการศึกษาในปัญหาพิเศษนี้คือ ตะกั่ว นิกเกิล และทองแดง ซึ่งเป็นโลหะหนักที่มีมากในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมีชั้น 5 และห้องปฏิบัติการเคมีชั้น 4 ตึกสมเด็จพรเทพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการนี้

1. เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักคือ ตะกั่ว ทองแดง และนิกเกิล ในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมี ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์
2. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่ว ทองแดง และนิกเกิล ในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมี ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์
3. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำกระบวนการเฟอร์ไรท์ มาใช้บำบัดน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมี

## 1.3 วิธีการดำเนินการโดยย่อ

1. นำน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการ มาศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ
2. ออกแบบและทำการทดลองในสภาวะเงื่อนไขต่างๆ
3. บันทึกและรวบรวมผลการทดลองทั้งหมด
4. นำผลที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมในการบำบัด

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการพิเศษนี้

1. ผู้ศึกษาได้รับความรู้ ความเข้าใจและได้รับประสบการณ์ต่างๆ ในการทำงานมากขึ้น
2. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา ปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพในการบำบัด
3. เพื่อเป็นแนวทางนำไปประยุกต์และออกแบบให้เข้ากับระบบบำบัดขนาดปฏิบัติการจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 เทคนิคในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

##### 2.1.1 การทำให้ตกตะกอน (Precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้มานานแล้ว โดยเติมสารละลายเคมีลงไปลงในน้ำทิ้ง เพื่อไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่ เกิดตะกอนแยกออกจากน้ำได้ ทิ้งไปแล้วนิยมตกตะกอนโลหะหนักเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ ด้วยการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีราคาถูกกว่าจึงนิยมใช้มากกว่า สารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่นิยมใช้ถัดมาคือ โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) โลหะหนักแต่ละชนิดสามารถตกตะกอนได้ดีที่ ค่าความเป็นกรด-เบสแตกต่างกัน เช่น แคลเมียม พบว่าสามารถตกตะกอนไฮดรอกไซด์ได้ดีที่ ค่าความเป็นกรด-เบส ระหว่าง 9.5 ถึง 12.5 ตะกั่วตกตะกอนไฮดรอกไซด์ได้ดีที่ ค่าความเป็นกรด-เบสระหว่าง 9.2 ถึง 9.5 (Patterson, 1978) ตะกั่วและสังกะสี ถ้าปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้สูงเกินไปจะเกิดพลัมเบต (plumbate) หรือซิงเกต (zincate) ซึ่งสามารถกลับไปละลายน้ำได้อีก การตกตะกอนไฮดรอกไซด์จึงจะต้องเลือกปรับ ค่าความเป็นกรด-เบสให้เหมาะสมสำหรับโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย

##### 2.1.2 ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction)

วิธีนี้จะใช้มากในโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบโลหะต่างๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไป เพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับโลหะหนักที่ต้องการกำจัดทำให้โลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น ออกซิเจน (oxygen) โอโซน (ozone) คลอรีน (chlorine) ไฮโปคลอไรต์และเปอร์แมงกาเนต (permanganate) ฯลฯ

ตัวอย่างวิธีออกซิเดชัน-รีดักชัน และการทำให้ตกตะกอน ซึ่งใช้ควบคู่กันในระบบการกำจัดโลหะหนักสำหรับโรงงานชุบขนาดเล็กและกลาง กำหนดโดยกรมโรงงาน กระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถทำแบบ Batch Process (ใช้ในงานขจัดเป็นครั้ง ๆ ไม่ต่อเนื่อง) ขึ้นตอนการกำจัดมีดังรูปที่ 2.1

2.1.3 การระเหย (Evaporation) เป็นวิธีง่ายๆ ที่ใช้กันมากวิธีหนึ่ง โดยใช้ วิธีกำจัดน้ำออกจากน้ำเสีย แต่จะใช้ได้ผลดีกรณีที่มีปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียปริมาณเท่ากัน ซึ่งวิธีนี้มีข้อเสียเกี่ยวกับราคาที่ต้องลงทุน

#### 2.1.4 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

เป็นวิธีการแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยการเติมตัวทำละลายซึ่งสามารถละลายโลหะหนักนั้นได้ดีกว่า วิธีนี้มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดค่อนข้างสูง

#### 2.1.5 ไอออนเอ็กซ์เชนจ์ (Ion Exchange)

เทคนิคนี้จะอาศัยเรซิน (resin) เป็นตัวแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายกับไอออนบนผิวเรซิน เรซินที่ใช้เป็น แคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์ เรซิน (Cation Exchange Resin) เป็นพวกอินโซลูเบิล ออแกนิก แอซิด (insoluble organic acid) ซึ่งอาจจะเป็นซัลโฟนิกหรือคาร์บอกซิลิก แอซิด (sulfonic or carboxylic acid) กรณีศึกษาก่อนหน้านี้ของ Nazaki and Hatotani (1967) ทดลองกำจัดตะกั่วที่อยู่ในรูปของเตตระเอทิลเลด (tetraethyl lead) ด้วยการใส่แคทไอออน เอ็กซ์เชนจ์ เรซิน พวกคาร์บอกซิลิกแอซิด พบว่าสามารถลดปริมาณตะกั่วจาก 126.7 ส่วนในล้านส่วน (หรือมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ลงเหลือ 0.02 ส่วนในล้านส่วน สำหรับแคลเซียมก็มีการใช้ วิธีนี้ในการกำจัดด้วย แต่เนื่องจากการกำจัดต้องใช้เรซิน ที่มีความเฉพาะเจาะจงจึงไม่ค่อยนิยมใช้นัก วิธีการนี้จึงเหมาะสำหรับกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้และให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบกำจัดน้ำเสียจากโรงงานชุบไฟฟ้า เนื่องจากวิธีนี้มีข้อจำกัดกับชนิดของน้ำเสีย กล่าวคือถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อความมีประสิทธิภาพสูงสุด เช่นน้ำเสียมีสารอินทรีย์ปนอยู่ก็จะต้องกำจัดออกก่อนโดยผ่านเข้าไปในแอกติเวต คาร์บอน คอลัมน์ (activated carbon column) ก่อนที่จะผ่านน้ำเสียเข้าไปในไอออนเอ็กซ์เชนจ์

#### 2.1.6 อิเล็กโทรไดอะลิซิส (Electrodialysis)

วิธีนี้จะแยกโลหะหนักโดยจะให้น้ำผ่านเพอมีเอเบิล เมมเบรน (permeable membrane) โดยกระแสไฟฟ้า ข้อเสียของวิธีการนี้คือแพงฉะนั้นจึงไม่นิยมใช้

#### 2.1.7 รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

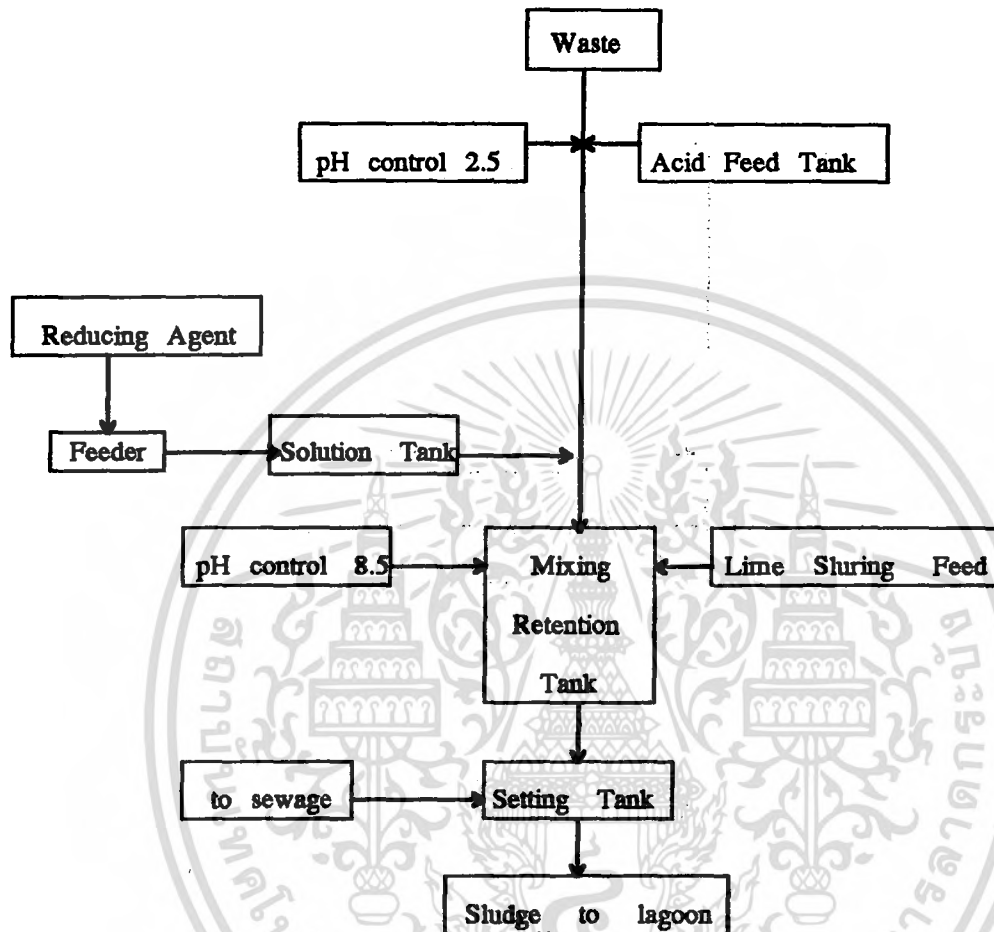
วิธีนี้ใช้กำจัดโลหะหนักโดยใช้ความดันสูงผ่าน เซมิ เพอมีเอเบิล เมมเบรน (semi-permeable membrane) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ยอมให้อิออนบางชนิดเท่านั้นที่แพร่ผ่านได้และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะต้องใช้ความดันสูงมาก โดยอาจจะสูงกว่า 100 บรรยากาศ และจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเลือกเมมเบรนที่จะต้องให้ทนต่อความดัน ความเป็นกรด-ด่าง ตัวอย่างเมมเบรนที่ใช้ได้แก่ เซลลูโลส อะซิเตท (cellulose acetate) โพลีเอมีน (polyamide) โพลีฟูแรน (polyfuran) วิธีนี้ใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมชุบด้วยไฟฟ้า (electroplating waste waters) น้ำเสียจากกระบวนการ การล้างภาพ (photographic processing effluents)

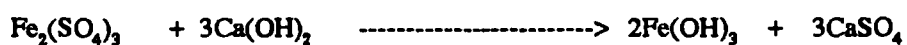
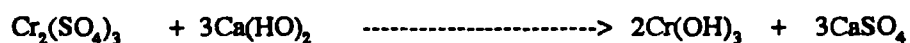
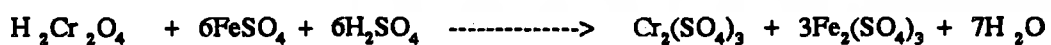
ทั้งวิธีการทำให้ตกตะกอนและวิธีออกซิเดชัน-รีดักชันนี้ เป็นวิธีใช้กันมากในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียในประเทศไทย กล่าวคือในกรณีที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนอยู่ด้วยกันในน้ำเสีย การตกตะกอนโลหะหนักพร้อม ๆ กันหลายชนิดด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีนั้น จำเป็นจะต้องปรับ ค่าความเป็นกรด-เบส ให้ต่างกันไปแล้วแต่นิกของโลหะหนัก ซึ่งจะต้องมีการแยกประเภทของโลหะหนักออกมากำจัดทีละชนิด ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ยังมีข้อเสียเกี่ยวกับการตกตะกอนที่เกิดขึ้นและไม่สามารถแยกตะกอนกับน้ำที่จะทิ้งได้เด็ดขาด กล่าวคืออาจจะมีตะกอนบางส่วนไหลกลับไปกับน้ำ หรือละลายกลับไปในน้ำที่ปล่อยออกสู่ท่อระบายน้ำ และข้อเสียสุดท้ายซึ่งเป็นส่วนที่น่าจะก่อให้เกิดปัญหาต่อไปกับสิ่งแวดล้อมในอนาคตอย่างแน่นอนคือ ตะกอนที่ได้จากการตกตะกอน ซึ่งสามารถละลายได้ใน ค่าความเป็นกรด-เบส ที่เหมาะสมในสิ่งแวดล้อม เมื่อนำไปทิ้งในถังขยะหรือนำไปฝังในที่ดินที่ไม่เหมาะสม อันจะก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อมต่อไปได้อีก โดยถ้าพื้นที่ที่ฝังเป็นพื้นที่ชุ่ม (โดยเฉพาะในกรุงเทพฯ) ก็จะก่อให้เกิดปัญหากระทบต่อคุณภาพน้ำใต้ดิน ยิ่งถ้าจุดที่ฝังนั้นน้ำสามารถท่วมได้ ก็จะเป็นการแพร่กระจายสารพิษสู่สิ่งแวดล้อมออกไปได้ง่าย นั่นคือ การเลือกที่ดินในการฝังกากโลหะหนักนั้นจะต้องพิจารณาอย่างถี่ถ้วนในใจที่ว่า เมื่อฝังแล้วจะต้องไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีก ซึ่งใช้งบประมาณในส่วนนี้มาก เพื่อแก้ไขปัญหานี้อาจจะกระทำได้ 2 ทางคือส่งเสริมการวิจัยให้มีการนำเอาโลหะหนักกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ หรือหาวิธีการกำจัดโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่คงตัวในธรรมชาติเพื่อไม่ให้กลับมาก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต

กระบวนการเพอร์ไธท์นับเป็นวิธีการซึ่งน่าจะแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากกระบวนการเพอร์ไธท์สามารถใช้กำจัดโลหะหนักหลายชนิดที่ปนกันอยู่และมีปริมาณสูงได้ดี ทั้งตะกอนเพอร์ไธท์ที่ได้นั้น จะอยู่ในรูปที่คงตัวทนทานต่อความเป็นกรด-ด่างในธรรมชาติได้ และผลพลอยได้ของตะกอนเพอร์ไธท์ Hayashi (1975) พบว่าสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เนื่องจากเป็นสารแม่เหล็กที่มีแรงดึงดูดสูง ฉะนั้นจึงนำไปเป็นตัวป้องกันการรบกวนของคลื่นไฟฟ้า เป็นสารที่ใช้กำจัดสารพิษจากมลพิษที่เกิดจากน้ำมันในน้ำหรือเป็นวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง ฯลฯ



รูปที่ 2.1 แสดงแผนผังของระบบกำจัดโลหะหนักสำหรับโรงงานทอ โดยกรมโรงงาน

#### ปฏิกิริยาที่เกิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ทฤษฎีและหลักการกระบวนการเฟอร์ไรต์

### 2.2.1 กระบวนการเฟอร์ไรต์

เฟอร์ไรต์เป็นกระบวนการที่ใช้เรียกกลุ่มของสารประกอบที่เป็นแมกเนติกออกไซด์ (magnetic oxide) ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญคือ เหล็กออกไซด์ ตัวอย่างเฟอร์ไรต์ที่รู้จักกันมานานคือ แมกนีไตต์(magnetite) โครงสร้างของกลุ่มสารประกอบเฟอร์ไรต์ ได้แก่ สไปเนล (Spinel) แมกเนโตฟลัมไบต์(magnetophumbite) และการ์เนท(garnet)

### 2.2.2 โครงสร้างเฟอร์ไรต์

โครงสร้างของสารประกอบเฟอร์ไรต์และคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของสารประกอบเฟอร์ไรต์อนุพันธ์(derivative) แปรผันโดยตรงกับการจัดโครงสร้างของอิเล็กตรอนในไอออน(the electron configuration of the ions) และอันตรกิริยา(interaction) ของไอออน แม้ว่าโครงสร้างเฉพาะของเฟอร์ไรต์แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน แต่โครงสร้างหลักจะประกอบด้วย 2 สับแลตทิซ (sublattices) ได้แก่ ริจิด แอนไอออน แลตทิซ(rigid anion lattice) ซึ่งประกอบด้วยออกซิเจนไอออน(oxygen ions) ซึ่งมีขนาดสัมพัทธ์(relative large) เป็น 0.132 นาโนเมตร สับแลตทิซที่สองคือริจิด แคทไอออน แลตทิซ (rigid cation lattice) ซึ่งเกิดโดยการแทรกเข้าไปในช่องว่างด้วยแคทไอออนที่มีขนาดเล็กกว่าโครงสร้างเฟอร์ไรต์แบ่งได้เป็น

1.สไปเนล เฟอร์ไรต์(Spinel Ferrite) เป็นเฟอร์ไรต์ชนิดที่มีความสำคัญ สูตรทั่วไปคือ  $AB_2X_4$  โดยจะมีโครงสร้างเหมือน  $MgAl_2O_4$  เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.3 แอนไอออน(x) จะฟอร์มโครงสร้างเป็นคิวบิกโคลสแพกกิง(cubic close packing) AและB จะเป็นแคทไอออนที่เข้าไปอยู่ในช่องว่างหน่วยเซลล์ที่เล็กที่สุด ของโครงสร้างผลึก ในแต่ละหน่วยย่อยจะประกอบด้วยอินเตอร์สติเชียลไซต์ (interstitial site) แบ่งเป็น 2แบบ คือ แบบ 64 เตตระฮีดรอลไซต์(tetrahedral sites) และ 32 ออกตะฮีดรอล(octahedral sites) ค่ารัศมีของออกตะฮีดรอลและเตตระฮีดรอลไซต์จะมีค่าดังนี้

$$0.055 < \gamma_{tet} < 0.067 \text{ นาโนเมตร}$$

$$0.070 < \gamma_{oct} < 0.075 \text{ นาโนเมตร} \quad \gamma = \text{ค่ารัศมี}$$

เมื่อพิจารณาค่ารัศมีไอออนของโลหะทรานซิชันที่มีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนใน d ออบิตทอลช่วงจาก  $d^0$  ถึง  $d^{10}$  พบว่าสารประกอบเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างแบบสไปเนลสามารถจะเกิดได้อย่างมากมาย คุณสมบัติของความเป็นแม่เหล็กของสารประกอบเฟอร์ไรต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจากความแตกต่างของสิ่งแวดล้อมของอิเล็กตรอนในเตตระฮีดรอลและออกตะฮีดรอล และปฏิกิริยาระหว่างสิ่งที่อยู่แวดล้อมกับ d อิเล็กตรอนของโลหะทรานซิชัน

แอนไอออนของเฟอร์ไรท์ที่มีโครงสร้างแบบสไปเนลนี้ อาจจะเป็นซัลเฟอร์(sulfur) คลอรีน(Chlorine) หรือออกซิเจน(Oxygen) สำหรับแคทไอออนนั้น จะต้องมีความที่พอเหมาะและทำให้ประจุเป็นกลางจึงจะเกิดขึ้นได้ สูตรอย่างง่ายของเฟอร์ไรท์ที่มีโครงสร้างสไปเนลคือ  $A^{m+}B_2^{n+}O_4$  นั่นคือ  $m+2n=8$  โครงสร้างแบบสไปเนลที่ได้รับความสนใจ คือ สารที่เกี่ยวข้องกับทางการค้าซึ่งเป็นออกไซด์ของเหล็ก สูตรโครงสร้างจะเป็น  $M^{2+}Fe_2^{3+}O_4$  โดย  $M^{2+}$  คือโลหะทรานซิชันชนิดที่มีรัศมีไอออนิกขนาดเล็กพอที่จะเข้าไปในช่องว่าง ได้แก่ Mg Mn Fe Co Ni Zn Cu และอื่นๆ

เฟอร์ไรท์ที่มีโครงสร้างแบบสไปเนลเหล่านี้ มักใช้ประโยชน์ในด้านการทำเป็น สารกึ่งตัวนำและหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีความถี่สูง

2. เฮกซะโกนอลเฟอร์ไรท์ (Hexagonal Ferrite) หรือ แมกเนโตพลัมไบท์ (Magnetoplumbite) เป็นกลุ่มออกไซด์ของเฟอร์ไรท์แมกเนติกซึ่งมีองค์ประกอบหลักของ  $Fe_2O_3$  กับไอออนออกไซด์ (BaO SrO หรือ PbO) หรือกับออกไซด์ของโลหะทรานซิชันที่เป็นไอออนที่ เฟอร์ไรท์ประเภทนี้มักจะถูกใช้เป็นสารแม่เหล็กชนิดถาวรดังแสดงในรูปที่ 2.3

3. การ์เน็ต(Garnet) เป็นสารแม่เหล็กที่มี โครงสร้างทั่วไปเป็น  $M_3Al_2Si_3O_{12}$  ซึ่งมีความสลับซับซ้อนมาก เฟอร์ไรท์ชนิดนี้ไม่ได้กล่าวถึงประโยชน์ในการนำไปใช้

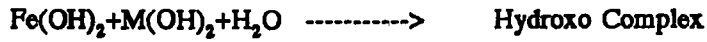
### 2.2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเฟอร์ไรท์

การเกิดสารประกอบเฟอร์ไรท์ สารประกอบเฟอร์ไรท์ที่เป็นผลพลอยได้จากการกำจัดโลหะหนักจะเกิดได้เมื่อผสม  $Fe^{2+}$  กับ  $M^{2+}$  เข้าด้วยกัน จากนั้นปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เป็นเบสแล้วทำการออกซิไดซ์ต่อด้วยอากาศภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสม ( ค่าความเป็นกรด-เบสและอุณหภูมิ) จะเกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งเป็นตะกอนเฟอร์ไรท์ ขั้นตอนการเกิดแสดงดังรูปที่ 3.1

Hayashi(1975) ได้กล่าวถึงกลไกการเกิดสารประกอบเฟอร์ไรท์ ที่คาดว่าจะจะเป็นไปได้โดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

เมื่อผสมเบสในสารผสม  $Fe^{2+}$  และ  $M^{2+}$  ในสารละลายก็จะปรากฏตะกอนสีฟ้าปนขาว ซึ่งเป็นพวกอนเฟอร์ไรท์แมกเนติก(nonferromagnetic) ในสารละลายนี้ไฮดรอกไซด์คอมเพลกซ์ (hydroxo complex) ของ  $M^{2+}$  และ  $Fe^{2+}$  จะถูกละลายได้ในบางส่วนโดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



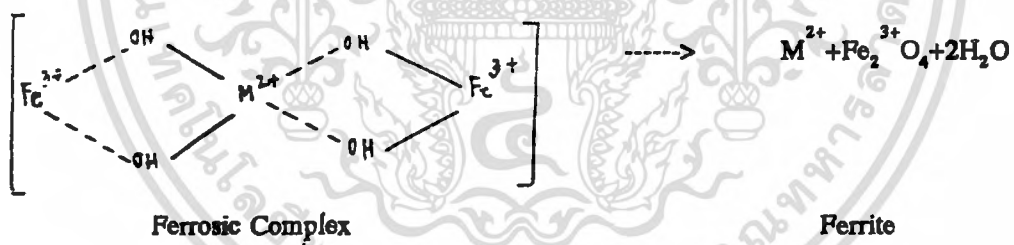
ส่วนของตะกอนนี้จะประกอบด้วยผลึกของสารที่มีโครงสร้างเหมือนกับโครงสร้างของ  $\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_7$  ได้แก่  $\text{MO}$  (เช่น  $\text{Zn}$  และ  $\text{CuO}$ ) ละลายอยู่ใน  $\text{solid solution}$  ของ  $\text{Fe(OH)}_2$  หรือ  $\text{M(OH)}_2$

เมื่อผ่านอากาศซึ่งมีก๊าซออกซิเจนผสมอยู่ลงไปในสารละลายซึ่งมี  $\text{M}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{2+}$  ไฮดรอกไซด์คอมเพล็กซ์ ออกซิเจนจะละลายในสารละลาย

เมื่อออกซิเจนละลายในน้ำแล้วจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์คอมเพล็กซ์ ภายได้สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมก็จะเกิดเฟอร์ไรติก คอมเพล็กซ์



ต่อจากนั้นเฟอร์ไรติก คอมเพล็กซ์ ก็จะถูกโพลิเมอไรซ์ (Polymerized) ต่อด้วยเบส เกิดเป็นสารประกอบเฟอร์ไรท์



สำหรับกลไกที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายพอสังเขปได้ว่า

เมื่อผสม  $\text{Fe}^{2+}$  กับโลหะอื่นๆที่ไม่ใช่เหล็กซึ่งเป็นไอวาเลนต์  $\text{M}^{2+}$  ในสารละลายภายหลังจากใส่เบสปริมาณที่เหมาะสม จะเกิดสารผสมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีสีเขียว ดังสมการต่อไปนี้



เมื่อออกไซด์ต่อด้วยอากาศ ภายได้สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสม จะเกิดสารประกอบสีเขียว มีลักษณะเป็นตะกอนหนัก และถูกดูดซับอย่างแน่นแฟ้นได้ เรียกว่าเฟอร์ไรท์



## 2.8 คุณลักษณะเด่นของกระบวนการเฟอร์ไรท์

กระบวนการเฟอร์ไรท์ได้ถูกนำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนัก ที่มีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการวิจัยหลายแห่ง เนื่องจากกระบวนการนี้ มีลักษณะที่ดีกว่าวิธีอื่นดังนี้

2.3.1 ตะกอนเฟอร์ไรท์ที่ได้จะมีสีดำ มีน้ำหนักสูงและไม่ละลายน้ำ ทำให้สามารถกรองแยกออกจากสารละลายได้ง่ายอีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้สามารถแยกออกได้ด้วยเครื่องแยกแบบแม่เหล็ก(Magnetic Separator)

2.3.2 ของแข็งที่แขวนลอย(Suspended Solids) สามารถกำจัดออกได้ด้วย ในขณะที่เกี่ยวข้องกับกำจัดโลหะหนัก

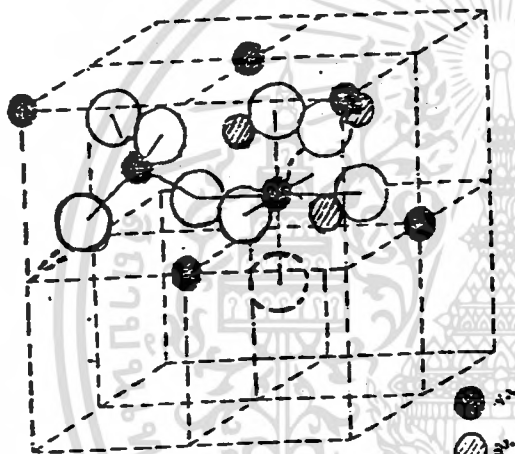
2.3.3 สาร $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  ที่ใช้กำจัดโลหะหนักในกระบวนการเฟอร์ไรท์นี้ เป็นสารที่มีราคาถูกและเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

2.3.4 กระบวนการเฟอร์ไรท์สามารถกำจัดโลหะหนักที่ปนกันอยู่หลายชนิด ในน้ำเสียได้พร้อมๆกัน

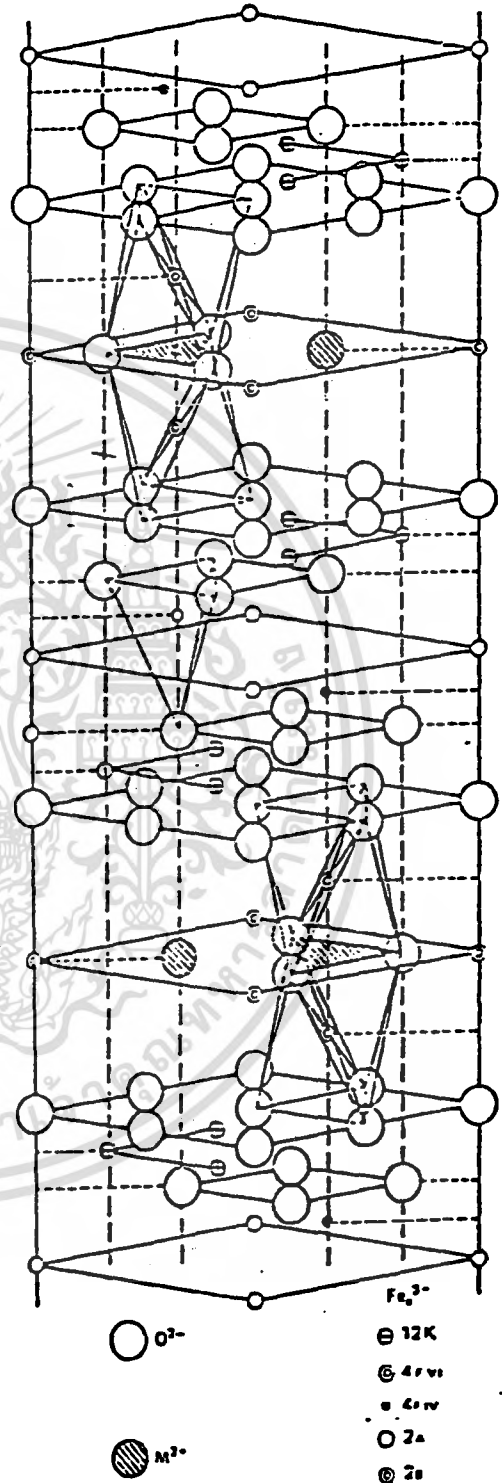
2.3.5 กระบวนการเฟอร์ไรท์สามารถกำจัดโลหะหนักปริมาณมากที่อยู่ในน้ำเสียได้เกือบหมด กล่าวคือ กระบวนการนี้ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง

2.3.6 ตะกอนเฟอร์ไรท์ที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้อีก โดยอาจจะใช้เป็นไมโครเวฟแอบซอร์บเบอร์หรือวัสดุอื่นที่ใช้ในการสื่อสาร หรือนำมาผลิตเป็นแท่งแม่เหล็กเป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของกระบวนการเฟอร์ไรท์นี้จะลดลงเล็กน้อย เมื่อสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำบางชนิดร่วมอยู่ด้วย เช่น Methylisobutylketone (MIBK) มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป หรือ Organic Carboxylic หรือAlkyi Amine หรือAlphatic Alkyl Polyles แต่สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำบางชนิดก็ไม่มีผลเลย เช่น เอทานอล ถึงแม้จะมีความเข้มข้นถึง 10 เปอร์เซ็นต์ก็ตาม



รูปที่ 2.2 โครงสร้างสโตนไฟไนท์เพอร์ไรท์  
( $ABX_3$ )



รูปที่ 2.3 โครงสร้างเฮกซะโกนอลเพอร์ไรท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ตัวอย่างการศึกษากระบวนการเฟอร์ไรท์

สำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเฟอร์ไรท์ ที่ได้มีผู้ทำการศึกษไว้นั้นเท่าที่ได้ทำการสำรวจจากเอกสารต่างๆพบว่า

Kiyama (1978) ได้เป็นผู้ริเริ่มศึกษาการเกิดสารประกอบเฟอร์ไรท์ โดยทำการศึกษาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมการเกิดแมกเนไทต์(magnetite) ซึ่งมีสูตรเป็น  $Fe_3O_4$  โดยการผสมเฟอร์รัสซัลเฟต( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_2$ ) จากนั้นออกซิไดส์ต่อด้วยอากาศ (airial oxidation)

โดยใช้สภาวะเงื่อนไขในการทดลองที่ ค่าความเป็น

กรด-เบส 2.6-12 อุณหภูมิ 10-80 องศาเซลเซียส

พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะเกิดเป็นแมกเนไทต์

คือค่าความเป็นกรด-เบสระหว่าง 9-10 อุณหภูมิ

ระหว่าง 55-80 องศาเซลเซียสและได้ทดสอบเพิ่ม

โดยอิออนของโลหะที่เป็นพวกโควาเลนต์

(divalent metal ions) เช่น  $Mg^{2+}$   $Mn^{2+}$  และ  $Co^{2+}$

ในสารละลายเริ่มต้น โดยใช้วิธีการทดลองวิธีเดียวกัน

นอกจากนั้นได้ศึกษาคุณสมบัติของตะกอนที่ได้

จากการทดลอง โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน

(X-ray diffraction) และอิเล็กตรอนไมโครสโคป

(Electron microscopic) พบว่าตะกอนที่ได้คือ  $Fe_3O_4$

ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (ferromagnetic)

มีสูตรโครงสร้างเป็น  $M_xFe_{3-x}O_4$   $\alpha$ -FeOOH และ

$\gamma$ -FeOOH โดยอาจจะเกิดเป็นสารเดี่ยว ๆ หรือ

สารผสมซึ่งโอกาสที่จะเกิดสารดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับ

สภาวะเงื่อนไขของการทดลองดังสรุปไว้ดังรูปที่ 2.4

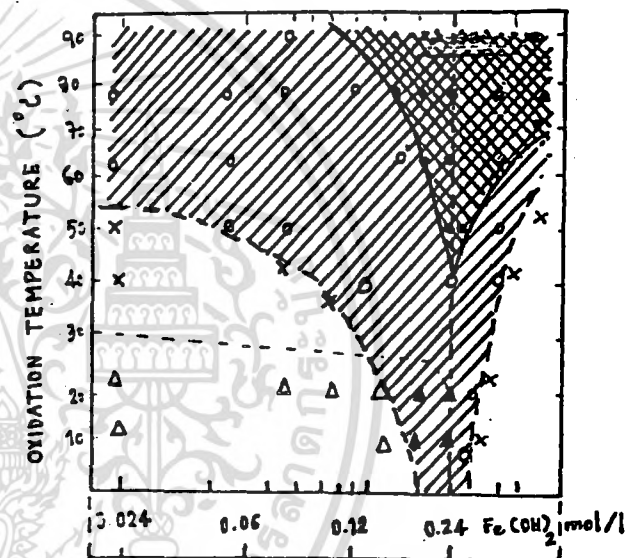
เงื่อนไขการเกิดนี้พบว่าเหมือนกับการเกิดแมกเนไทต์

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าช่วงของอุณหภูมิและ

พีเอชที่จะเกิดแมกเนไทต์ได้มากที่สุดคือช่วงอุณหภูมิ

ระหว่าง 55-57 องศาเซลเซียสและช่วงพีเอชระหว่าง

9-10



●:  $Fe_3O_4$  , X:  $\alpha$ -FeOOH

○: A mixture of  $Fe_3O_4$  and  $\alpha$ -FeOOH

▲: A mixture of  $\alpha$ -FeOOH and  $\gamma$ -FeOOH

△: A mixture of  $\alpha$ -FeOOH and  $\gamma$ -FeOOH

รูปที่ 2.4 เงื่อนไขการออกซิไดส์ของการเกิด  $Fe_3O_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hayashi (1975) รายงานถึงผลการทดลองที่ใช้กระบวนการเฟอร์ไรต์ในการกำจัดโลหะหนักที่สภาวะเงื่อนไข ค่าความเป็นกรด-เบสระหว่าง 9-10 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสโดยใช้วิธีเดียวกับ Kitama กับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสีย้อม อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมชุบโลหะและห้องปฏิบัติการวิจัย พบว่ากระบวนการนี้สามารถใช้ลดโลหะหนักได้ทุกชนิดที่ผสมอยู่ในน้ำเสียโดยลดได้มากกว่า 99%

Nakashima (1977) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย โดยใช้สารละลาย  $Fe^{3+}-Fe^{2+}$  ( $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 2$ ) ปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้อยู่ในช่วง 6-12 เพื่อให้เกิดเฟอร์ไรต์ 1 ลิตรต่ออนาที เติม 10%  $FeCl_2$  ในอัตรา 3.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที และ 10%  $FeCl_3$  ในอัตรา 9.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที และเติม 30% NaOH ในอัตรา 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่ออนาที เพื่อปรับค่าความเป็นกรด-เบสเป็น 11 ได้ตะกอนเฟอร์ไรต์ 6000 ส่วนในล้านส่วน (มีขนาดอนุภาค 100 อังสตรอม) ความเข้มข้นของ Zn, Mn และ Cu ก่อนการบำบัดมีค่า 1000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อบำบัดแล้ววัดได้ 0.01, 0.06 และ 0.08 ตามลำดับ

Goto, Nakazuki (1978) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วย สารละลายเกลือเฟอร์ริก และเฟอร์รัสในสารละลายต่าง ผลการศึกษาได้ active ferrite เฟอร์ไรต์ที่ได้มีคุณสมบัติแม่เหล็กสูงจับโลหะหนักได้ดี ทำการทดลองโดยใช้  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  10 กิโลกรัมละลายในน้ำ 100 ลิตร และ  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  ละลายในน้ำ 100 ลิตร นำสารละลายมาผสมกัน ใช้ 10 % NaOH ปรับ ค่าความเป็นกรด-เบส เป็น 8 เกิด ตะกอนเฟอร์ไรต์ นำตะกอนมาล้างด้วยน้ำ ตามด้วยกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง (ค่าความเป็นกรด-เบส 1.5) ล้างด้วยน้ำอีกครั้ง ได้ตะกอน active ferrite (สีดำ) หนัก 4 กิโลกรัม และเมื่อทำการทดลองกับน้ำเสียที่ประกอบด้วย  $Cr^{6+}$  70 ส่วนในล้านส่วน ปริมาตร 1500 ลิตร ได้เฟอร์ไรต์หนัก 1 กิโลกรัม สารละลายส่วนใสหลังบำบัด (ปริมาตร 1400 ลิตร) ประกอบด้วย  $Cr^{6+}$  0.1 ส่วนในล้านส่วน

Tojo and Nagata (1978) ศึกษาการใช้กระบวนการเฟอร์ไรต์ เช่นบำบัดสารละลายฝุ่น 10% ในน้ำ Cd 20.8 Zn 2400 Pb 4.28 Mn 7.80 Fe 0.05 Cu 0.04 และ Hg น้อยกว่า 0.0005 ส่วนในล้านส่วน หลังจากผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์ แล้วนำส่วนใสไปวิเคราะห์พบ Cd 0.02 Zn 0.015 ส่วนในล้านส่วนและไม่พบโลหะหนักตัวอื่น

Kiyama (1978) ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบเฟอร์ไรต์ โดยการทดลองผสมโลหะหนักที่เป็นไอวาเลนซ์ปกับเกลือเฟอร์รัสซัลเฟต โลหะหนักดังกล่าวได้แก่ แมงกานีส แมกนีเซียม และโคบอลต์ โดยผสมเกลือเฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) และเกลือแมงกานีสซัลเฟต ( $MnSO_4 \cdot 5H_2O$ ) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ค่าความเป็นกรด-เบส ระหว่าง 9-10 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างของสารประกอบ

เฟอร์ไรท์ที่ได้เป็นแบบสไปเนล (spinel) อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กอีกด้วย นอกจากนี้ยังทำการทดลองใช้กระบวนการเฟอร์ไรท์กับเกลือแมงกานีสซัลเฟต และจากผลการทดลองนี้ยังสรุปต่ออีกว่า เงื่อนไขการเกิดสารเฟอร์ไรท์แมกเนติกเป็นเงื่อนไขเดียวกับการเกิดสารแมกเนไตต์

**Kaneko and Katsura (1979)** ศึกษาการเกิดสารประกอบเฟอร์ไรท์กับแมกนีเซียม (magnesium) โดยใช้วิธีเดียวกับ Kiyama พบว่า ค่าความเป็นกรด-เบสที่จะเกิดสารประกอบเฟอร์ไรท์ได้คือ 9-10 และอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส โดยมีโครงสร้างของสารประกอบเฟอร์ไรท์เป็นแบบสไปเนล

**Iguchi, Kamura and Inoue** พิจารณากระบวนการเฟอร์ไรท์เพื่อที่จะนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักที่ปนมากับน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า พบว่าสามารถลดปริมาณโลหะหนักจากเดิมลงได้มาก อีกทั้งมีข้อดีกว่าวิธีธรรมดาที่ใช้กันอยู่

**Tsai และ คณะ (1980)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม สังกะสี นิเกิล โคบอลต์ และทองแดง ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ โดยใช้  $FeSO_4$  กำจัด Cr Zn Ni Co และ Cu ในน้ำทิ้งจากการชุบเคลือบโลหะ จากการทำปฏิกิริยาโดยการเป่าอากาศ ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส ได้สไปเนลเฟอร์ไรท์ อัตราการเป่าอากาศมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของ Cr<sup>6+</sup> ที่มีความเข้มข้น 10 50 100 และ 200 ส่วนในล้านส่วน ควรเป่าอากาศในอัตรา 0.6-2.4 1.2-8 1.2-6 2.4-12.8 ลิตรอากาศต่อลิตรน้ำเสีย ตามลำดับ

**Tamura, Mechaimonehit and Katsura (1981)** ศึกษากระบวนการเฟอร์ไรท์กับวานาเดียม (vanadium) โดยใช้วิธีเดียวกับ Kiyama พบว่าสภาวะเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดสารประกอบเฟอร์ไรท์ได้คือที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 11 และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

**Kondo; Nakashima; Hirasava (1982)** ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ โดยทำการออกซิไดซ์  $Fe(OH)_2$  ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้  $Fe_3O_4$  การหาอัตราการเกิด  $Fe_3O_4$  สามารถคำนวณจาก  $Fe^{2+}$  ในสารละลายและ Fe ที่อยู่ในรูปของอิออน ที่แขวนลอยในสารละลาย ค่าความเป็นกรด-เบส ที่เหมาะสมในการเกิด  $Fe_3O_4$  คือที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 11.5 -12.5 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-เบสที่ 11.5-13.0 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่ำเกิด  $Fe_3O_4$  ได้เร็วกว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสสูง

**Kanzaki, Tonoike and Katsura (1982)** ศึกษากระบวนการเฟอร์ไรท์กับแคลเซียมที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ คือ 10 ส่วนในพันล้านส่วน พบว่าสามารถลดปริมาณแคลเซียมลงได้ถึง 92% นอกจากนี้ยังทำการทดลองเปรียบเทียบกับการกำจัดแคลเซียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยวิธีอื่นได้แก่ไอออนเอ็กเชนจ์ การตกตะกอนร่วมและการสกัดด้วยตัวทำละลาย พบว่ากระบวนการเฟอร์ไรท์มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีอื่นๆ ในแง่การลดปริมาณจะลดได้ถึง 2 เท่า และยังสามารถแยกตะกอนเฟอร์ไรท์ได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้การแยกด้วยแม่เหล็ก

NEC Corp.Jp. (1984) ทดลองกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ ซึ่งมีทองแดง 160 นิกเกิล 60 แมงกานีส 30 ตะกั่ว 20 อาร์เซนิก 10 ส่วนในล้านส่วน โดยปรับค่าพีเอชให้เป็น 10 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และปรับอุณหภูมิให้ได้ 70 องศาเซลเซียส พบว่าความเข้มข้นที่เหลือของทองแดง 0.5 นิกเกิล 0.3 แมงกานีส 0.3 ตะกั่ว 0.15 และอาร์เซนิก 0.01 ส่วนในล้านส่วน

Nippon Electric Co., Ltd. (1984) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ และแยกตะกอนเฟอร์ไรท์ ออกจากน้ำทิ้งในการศึกษาครั้งนี้เติม  $\text{FeSO}_4$  ลงในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของ  $\text{FeSO}_4$  เป็น 0.1 โมลต่อลิตร น้ำเสียที่บำบัดประกอบด้วยโลหะหนักต่าง ๆ เช่น Cu 160 Ni 60 Mn 30 Pb 20 As 10 ส่วนในล้านส่วน ปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เป็น 12 ด้วย NaOH ทำการเป่าอากาศที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมงทำการแยกตะกอนเฟอร์ไรท์ออกจากส่วนใส นำส่วนใสไปวิเคราะห์หาโลหะหนัก พบโลหะหนักดังนี้ Cu 0.5 Ni 0.3 Mn 0.2 Pb 0.15 As 0.01 ส่วนในล้านส่วน

Kondo and Suzuki (1986) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีปรอทปนอยู่โดยใช้กระบวนการเฟอร์ไรท์ โดยใช้การเป่าอากาศที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 10-12 ในการศึกษาครั้งนี้ใช้  $\text{FeSO}_4$  0.05 โมล ใส่ในน้ำเสียที่มี Hg 14.9 ส่วนในล้านส่วนปริมาตร 1 ลิตร การสร้างตะกอนเฟอร์ไรท์ เกิดขึ้นที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 12 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเป่าอากาศด้วยอัตรา 0.5 ลิตรต่อนาที หลังสิ้นสุดปฏิกิริยา นำส่วนใสไปหา Hg พบว่ามี Hg อยู่ 3.7 ส่วนในพันล้านส่วน ถ้าเติม 1 ส่วนในล้านส่วนของ ascorbic acid พบว่าส่วนใสมี Hg อยู่ 0.29 ส่วนในพันล้านส่วน

Sano and Nakama (1986) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วยโลหะหนักโดยใช้เกลือเฟอร์รัสที่สัดส่วน 2-100 เท่า เมื่อเทียบกับโมลโลหะหนักทุกตัวในน้ำเสีย ใช้สารละลายต่างปรับพีเอชเป็น 8 ทำการออกซิไดซ์เฟอร์รัสช้า ๆ จะได้ตะกอนแม่เหล็ก ในการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำเสีย 2 ลิตร ที่มี  $\text{Cu}^{2+}$   $\text{Zn}^{2+}$   $\text{Pb}^{2+}$  อย่างละ 50 ส่วนในล้านส่วน ผสมกับ  $\text{FeSO}_4$  0.2 โมล แล้วปรับค่าความเป็นกรด-เบสที่ 10 ทำการกวนนาน 4 ชั่วโมง พร้อมกับการเติมออกซิเจนในอัตรา 17 โมลต่อนาที ทำการแยกตะกอนเฟอร์ไรท์ออกมาและนำส่วนใสไปวิเคราะห์หาโลหะหนักพบว่ายังมี Cu 0.05 Zn 0.03 Pb 0.01 ส่วนในล้านส่วน

กูดยา จงศิริลักษณ์ (1986) ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมโดยกระบวนการเฟอร์ไรท์ พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วคือ ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 9 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส สำหรับแคดเมียมคือที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 9 อุณหภูมิ 55-70 องศาเซลเซียส กรณีที่ใช้กำจัดตะกั่วและแคดเมียมพร้อมกันเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือ ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 9 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนโมล  $Pb^{2+} / Iron_{total} = 0.007$   $Cd^{2+} / Iron_{total} = 0.013$  จะเกิดเฟอร์ไรท์ได้ดี ที่เงื่อนไขดังกล่าวนี้ ประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมมีค่าเป็น 99.91 % และ 99.97% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการเฟอร์ไรท์อาจถูกรบกวนได้จากตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดที่ไม่ละลายน้ำเช่น MIBK ที่ผสมอยู่ 5% แต่ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ดีเช่น เอทานอล จะไม่มีผลต่อกระบวนการนี้

Akasaki (1987) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานคอนกรีตประกอบด้วย  $Cr^{6+}$  และ  $Ca(OH)_2$  โดยใช้  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  ในการบำบัดน้ำเสียไม่ต้องปรับพีเอช เนื่องจากในน้ำทิ้งมีสารละลายอิมตัว  $Ca(OH)_2$  การศึกษาครั้งนี้ใช้  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  400 ส่วนในล้านส่วน บำบัด  $Cr^{6+}$  5 ส่วนในล้านส่วน ตกตะกอนเฟอร์ไรท์ แล้วนำส่วนใสไปวิเคราะห์พบ  $Cr^{6+}$  น้อยกว่า 0.1 ส่วนในล้านส่วน (สามารถบำบัดได้มากกว่า 98%)

Wen, Li and Liu (1987) ศึกษาการบำบัดร้านานจากโรงงานชุบโลหะและน้ำจาก Cation-Exchange โดยใช้วิธี Ferrosipinel น้ำที่บำบัดแล้วมีสารละลายโลหะมาตรฐาน ทำการศึกษาโดยละลายใน Acid Cation Exchange จะได้  $Fe^{2+}$  คลอรีนจะเปลี่ยน  $Fe^{2+}$  ไปเป็น  $Fe^{3+}$  เดิมสารละลาย  $Fe^{3+} / Fe^{2+}$  2 ต่อ 1 ลงในน้ำเสียจากการเคลือบโลหะหนัก โลหะหนักในน้ำเสียตกตะกอนเป็นตะกอนเฟอร์ไรท์สไปเนล (มีสีดำ) และตกตะกอนได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7-9 ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย และใช้พลังงานน้อย

สุรภี ไร่อรยานนท์ (1987) ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย โดยกระบวนการเฟอร์ไรท์ พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์คือ ที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 9 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในขณะที่เงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียมคือ ที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 9 อุณหภูมิ อยู่ในช่วง 55-70 องศาเซลเซียส ในกรณีที่ต้องกำจัดตะกอนและแคดเมียมพร้อม ๆ กันก็จะมีเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือ ที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 9 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราโมลของ  $Pb^{2+} / Fe_{total}$  และ  $Cd^{2+} / Fe_{total}$  ในสารละลายตั้งต้นเป็น  $7.45 \cdot 10^{-3}$  และ  $13.37 \cdot 10^{-3}$  ตามลำดับ

Chen และคณะ (1988) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมประกอบด้วย  $\text{Cr}^{6+}$   $\text{Cu}^{2+}$   $\text{Ni}^{2+}$   $\text{Zn}^{2+}$  โดยมีขั้นตอนดังนี้ (1) ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ของน้ำทิ้งให้อยู่ในช่วง 1.5-2.5 และผสมเหล็กให้มีพีเอชมากกว่า 5.4 (2) ออกซิไดซ์กับออกซิเจนหรืออากาศในภาชนะปิดเป็นเวลา 3-10 นาที แล้วเติมสารละลายต่างเพื่อปรับค่าความเป็นกรด-เบส การทดลองให้อยู่ในช่วง 8-9 (3) ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลามากกว่า 10 นาที แล้วกรองส่วนใส การทดลองครั้งนี้ทำกับน้ำเสียที่มี  $\text{Cr}^{6+}$  50 ส่วนในล้านส่วน ใช้กรดซัลฟูริก ปรับพีเอช 2.4 ผสมกับผงเหล็กนาน 10 นาที ทำให้ ค่าความเป็นกรด-เบสไม่ขึ้นเป็น 5.4 เป่าอากาศนาน 3-10 นาที ใช้ 10% NaOH ปรับค่าความเป็นกรด-เบสให้เป็น 8-9 กรองส่วนใสไปวิเคราะห์ พบว่าไม่มี  $\text{Cr}^{6+}$  และมี  $\text{Cr}^{3+}$  0.006 ส่วนในล้านส่วน

Kim , Byung Kwang และคณะ (1988) ศึกษาการตกตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียที่มี นิกเกิล  $\text{Cr}^{6+}$   $\text{Cr}^{3+}$  ในกระบวนการเฟอร์ไรท์โดยใช้ X-Ray diffraction พบการตกตะกอนที่มีโครงสร้างสไปเนลเฟอร์ไรท์จากการบำบัดน้ำเสียที่มีนิกเกิลต่ำกว่า 3000 ส่วนในล้านส่วน ได้โครงสร้างสไปเนลเฟอร์ไรท์ เมื่อสัดส่วน  $\text{Ni/Fe} = 0.51$  ได้  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  อย่างเดียว ถ้าสัดส่วนมากกว่า 0.51 จะเกิด  $\text{Na}_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2$  และ  $\text{NiFe}_2\text{SO}_4$

ในการบำบัดน้ำเสียที่มี  $\text{Cr}^{3+}$  และ  $\text{Cr}^{6+}$  ความเข้มข้นสูงของ  $\text{Cr}^{3+}$  และ  $\text{Cr}^{6+}$  ที่ได้ตะกอนเฟอร์ไรท์คือ 1500 และ 1000 ส่วนในล้านส่วน สัดส่วน  $\text{Cr/Fe} = 0.29$  และ 0.91 ตามลำดับ สไปเนลเฟอร์ไรท์ที่ได้มีสูตร  $\text{Fe}^{2+}$   $\text{Fe}^{3+}$  1.33  $\text{Cr}^{6+}$  0.67 และ  $\text{Fe}^{2+}$   $\text{Fe}^{3+}$  1.5  $\text{Cr}$  0.5 น้ำเสียที่มีความเข้มข้น  $\text{Cr}^{3+}$  ก่อนบำบัด 15000 ถึง 4000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อบำบัดแล้วพบว่า มี  $\text{Cr}^{3+}$  ในตะกอนเฟอร์ไรท์ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์โดย X - Ray diffraction น้ำเสียที่มีความเข้มข้น  $\text{Cr}^{6+}$  ก่อนบำบัด 1000 ถึง 4000 ส่วนในล้านส่วน เมื่อบำบัดแล้วได้ตะกอนสไปเนลเฟอร์ไรท์ พบว่ามี  $\text{Cr}^{6+}$  เหลือจากการจับกับ Fe ในโครงสร้างสไปเนลเฟอร์ไรท์ปรากฏอยู่ในสารละลายส่วนใส

Nuhmanov , Kovalenko and Firsova (1988) ศึกษาปริมาณการใช้ด่างในปฏิกิริยาออกซิเดชันเหล็ก  $\text{Fe}^{2+}$  เพื่อตกตะกอนโครเมียม  $\text{Cr}^{6+}$  จากการศึกษาพบว่า ปริมาณการใช้ NaOH มีความสัมพันธ์กับการกำจัด  $\text{Cr}^{6+}$  ออกจากน้ำทิ้งจากการชุบเคลือบโลหะหนัก เมื่อเพิ่ม NaOH พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ไปเป็น  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  เพิ่มขึ้น เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์เป็นสไปเนลเฟอร์ไรท์

Nakazawa , Sato and Hasebe (1989) ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการบำบัด  $\text{As}^3$  หรือ  $\text{As}^{3+}$  ด้วยบวนการเฟอร์ไรท์  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_2$  กับวิธีตกตะกอนโดยใช้สารละลายและให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ ค่าความเป็นกรด-เบส และอุณหภูมิคงที่ แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกันพบว่ากระบวนการเฟอร์ไรท์บำบัด  $\text{As}^{3+}$  ที่ 90 องศาเซลเซียสได้ดีกว่าวิธีตกตะกอน

ในส่วนโซลมี Fe- อีออนน้อยกว่า 0.05 ส่วนในล้านส่วน แมกนีไซต์ที่เกิดจากกระบวนการเฟอร์ไรท์มี As ปนอยู่ด้วย สามารถแยกได้โดยวิธีผ่านรางแม่เหล็กอัตรา 200 ลิตรต่อชั่วโมง

Shin , Cho and Oh (1989) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักโดยการศึกษากการเกิดFerrosiferrous Oxide( $Fe_3O_4$ ) จากปฏิกิริยาออกซิเดชันสารละลาย Ferrous Hydroxide ( $Fe(OH)_2$ ) ในน้ำเสียที่มีโลหะหนัก ผลการศึกษาพบว่าปริมาณNaOH ที่เติมลงในปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กับการเกิด $Fe_3O_4$  อัตราส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ  $R=2NaOH/FeSO_4$  เท่ากับ 1 เพิ่มค่า R พบว่า $Fe_3O_4$ เกิดน้อยลง สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดคือ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการออกซิเดชันของสารละลาย( $Fe(OH)_2$ ) คือ 60 นาทีอัตราการเป่าอากาศ 1 ลิตรต่อนาที ถ้าอัตราการเป่าอากาศมากกว่า 1 ลิตรต่อนาที จะทำให้  $Fe_3O_4$  เกิดได้น้อยลงเมื่อนำ  $Fe_3O_4$ ไปหาคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก โดยใช้ X-Ray diffraction พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับX-Ray main peak intensity

Shin , Cho and Oh (1989)ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก โดยการศึกษากการเกิดCopper Ferrite และคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของCopper Ferrite การศึกษาครั้งนี้เป็นการดึง Cu-ion ออกจากน้ำเสีย สภาวะในการเกิด Cu-Ferrite คืออุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน 70 นาที ค่าความเป็นแม่เหล็กของภาคตะกอนเฟอร์ไรท์มีค่าลดลง เมื่อค่า R เพิ่มขึ้น ค่า  $R= 2(OH)/(SO)$  ค่า R ในช่วง 1.0 ถึง 1.5 ได้ผลิตภัณฑ์ CuO อัตราส่วนไอออน Cu/F ในสารละลายเริ่มต้นมีค่าสูงกว่า 0.2 พบว่า Cu-ไอออนในสารละลายที่มากเกินไปจะถูกออกซิไดซ์เป็นCuO

Zongkei , Wuran and Fangzhi (1989) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม พบว่ากระบวนการเฟอร์ไรท์เป็นวิธีที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม เนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและไม่ทำให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม สภาวะที่ใช้คือ ความคุมพีเอชไว้ที่ 4 เพื่อให้  $Cr_2O_7^{2-}$  ทำปฏิกิริยากับ  $Fe^{2+}$  และควบคุม ค่าความเป็นกรด-เบส ไว้ที่ 7 เพื่อตกตะกอน $Cr^{3+}$   $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  ในการศึกษาในการศึกษาครั้งนี้ใช้ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  16 เท่าของความเข้มข้นในสารละลาย

Kim , Ji Hwan and Oh (1990) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก โดยใช้ออกซิเจนทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโคบอลต์ไฮดรอกไซด์และนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ในสารละลายปฏิกิริยาออกซิเดชันCo-Ni Hydroxide มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนN/Co ค่า  $R(2OH/SO^2)$  และอุณหภูมิ เมื่อทดลองเพิ่มค่าRผลที่ได้คือเวลาในการทำปฏิกิริยาและขนาดอนุภาคผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้Co-Ni เมื่อทำการทดลองเพิ่มค่า R และเพิ่มอุณหภูมิพบว่า Co เข้าไปอยู่ในโครงสร้างได้มากขึ้นขณะที่ Ni เข้าไปอยู่ในโครงสร้างได้น้อยลง สูตรของสารประกอบจากปฏิกิริยาออกซิเดชันคือ  $Co_xNi_yFe_{3-(x+y)}O_4$

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้

อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และ  $\text{Co}^{2+} + \text{Ni}^{2+} / \text{Fe}^{2+} = 0.5$  และ  $\text{Ni}^{2+} / \text{Co}^{2+} = 0.5$  ในสารละลายเริ่มต้น ผลิตภัณฑ์หลังสิ้นสุดปฏิกิริยามีสูตรเป็น  $\text{Co}_{0.25}\text{Ni}_{0.25}\text{Fe}_{2.41}\text{O}_4$  แสดงว่า Co และ Ni เข้าไปอยู่ใน  $\text{Ni}^{2+} / \text{Co}^{2+} = 2.0$  โครงสร้างสไปเนลเฟอร์ไรท์ในปริมาณที่เท่ากัน

Kim, Tae Hoon; Kang and Oh (1990) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วย  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  และ  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  โดยศึกษาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันปฏิกิริยาออกซิเดชันมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วน Cu/Fe ค่า R ( $2\text{OH}^- / \text{SO}_4^{2-}$ ) และอุณหภูมิ นั่นคือศึกษาอัตราส่วนโมล Cu/Fe เพิ่มขึ้น ค่าความเป็นกรด-เบส ของปฏิกิริยาเริ่มต้นลดลง ค่าความเป็นกรด-เบส ของปฏิกิริยาสิ้นสุดเพิ่มขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันติดตามปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลการศึกษาที่อุณหภูมิ 50 ถึง 80 องศาเซลเซียส ค่า R = 1.0 ถึง 1.4 ไม่เกิด Cu-Ferrite สารละลายได้คือ ช่วงแรกเป็นการออกซิไดซ์  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ไปเป็น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ช่วงหลังเป็นการออกซิไดซ์  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  ไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CuO}$  การทดลองที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส Cu/Fe = 0.5 และ ค่า R = 1.1 ผลิตภัณฑ์  $\text{CuO}$  และ Cu-Ferrite มีสูตรเป็น  $\text{CuFeO}$  เป็นแม่เหล็ก 28 อีเอ็มยูต่อกรัม

Lin, Zhao and Yan (1990) ศึกษาปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำที่มีโครเมียมพบว่า ความเข้มข้นของ  $\text{Cr}^{6+}$  ขึ้นกับค่าพีเอช กล่าวคือในตัวกลางที่เป็นด่าง  $\text{Cr}^{6+}$  อยู่ในรูปของ  $\text{CrO}_4^{2-}$  ในตะกอน  $\text{Cr}^{6+}$  ควรทำให้ตัวกลางมี ค่าความเป็นกรด-เบส มากกว่า 8 เพราะ  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันสูงกว่า  $\text{CrO}_4^{2-}$  ปฏิกิริยาเปลี่ยน  $\text{Cr}^{6+}$  ไปเป็น  $\text{Cr}^{3+}$  เกิดในตัวกลางที่เป็นกรดซึ่งพบสารหลายตัวที่สามารถเปลี่ยน  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ไปเป็น  $\text{Cr}^{3+}$  ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ตะกอนที่ ค่าความเป็นกรด-เบส 6.7 เป็น ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมคือสามารถกำจัด  $\text{Cr}^{6+}$  ออกจากน้ำเสียได้มากที่สุด

Kitamura, Honda and Takasaki (1991) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะหนัก ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ โดยศึกษาความเข้มข้นของฟอสเฟตไอออน ต่อการเกิดเฟอร์ไรท์ ศึกษาค่าความเป็นแม่เหล็ก ( $\sigma$ ) ของกากตะกอนเฟอร์ไรท์จากน้ำเสียที่ประกอบด้วยไอออนโลหะหนักและผลจากความเข้มข้นของฟอสเฟตในความเข้มข้นต่างๆกัน ในน้ำเสียต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันในกระบวนการเฟอร์ไรท์ กราฟ ( $\sigma$ -f) ของโลหะหนักหลายชนิดและฟอสเฟตไอออน พบว่าลักษณะเหมือนกัน กราฟที่ได้แบ่งเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกมีความชันเป็น 1.0 ช่วงหลังมีความชันเป็น 2.6 ค่าความเป็นแม่เหล็ก 92 อีเอ็มยูต่อกรัม  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ค่า  $\sigma$  เพิ่มขึ้นเมื่อมีค่า f เพิ่มขึ้น การที่ค่า  $\sigma$  ลดลง เมื่อ f ลดลงเกิดจากการรวมตัวระหว่างฟอสเฟตไอออนและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรท์ ถ้าค่า  $\sigma = 60$  อีเอ็มยูต่อกรัม สามารถแยกตะกอนออกจากส่วนใส โดยใช้แม่เหล็กได้ง่าย กากตะกอนเฟอร์ไรท์ที่แยกออกมาสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tamura , Katsura (1991) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยมีโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ สามารถอธิบายกระบวนการเฟอร์ไรท์ได้ดังนี้ อีออนของโลหะหนักถูกจับอยู่ที่โครงสร้างผลึกรูปร่างสไปเนล ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน  $Fe^{2+}$  การเกิดเฟอร์ไรท์มี 2 วิธีคือ วิธีที่หนึ่งเกิดตะกอนสีเขียว (ค่าความเป็นกรด-เบส 7 ถึง 10) วิธีที่สอง  $FeO(OH)$  (ค่าความเป็นกรด-เบส 10.5 ถึง 11) กระบวนการเฟอร์ไรท์เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ น้ำเสียจากการชุบโลหะหนัก น้ำชะล้างเหมืองแร่ กากตะกอนเฟอร์ไรท์ที่ได้มีความเป็นแม่เหล็กสูง สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงวัสดุศาสตร์

Tamura , Tu และคณะ ศึกษาความเสถียรของ  $Fe_3O_4$  ที่เคลือบบนอีออนโลหะหนักในกระบวนการเฟอร์ไรท์ ปฏิกิริยาการเกิดเฟอร์ไรท์ในสารละลายเกิดจากการจับอีออนโลหะหนัก และการออกซิไดซ์  $Fe(II)$  ที่อยู่รอบๆอีออนโลหะหนักเกิดเป็นอนุภาคเฟอร์ไรท์ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาได้  $Fe_3O_4$  เคลือบอยู่บนอนุภาคโลหะหนักการเกิดปฏิกิริยาแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ 1 การเติมสารละลายเหล็กลงในน้ำเสีย 2 การเป่าอากาศเพื่อทำให้เกิดออกซิเดชันได้สารประกอบ เคลือบอยู่บนอีออนโลหะหนัก วิธีนี้สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วยอีออนฟลูออไรด์หรือดินที่มีอีออนแคดเมียม หลังการบำบัดแล้วได้เฟอร์ไรท์ที่เสถียรมาก เนื่องจากในสภาพธรรมชาติ ไม่สามารถชะล้างอีออนโลหะหนักออกจากตะกอนเฟอร์ไรท์

Topkin และคณะ (1991) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก โดยกระบวนการเฟอร์ไรท์พบว่าสามารถกำจัด  $Cd^{2+}$   $Cr^{6+}$  และ  $Zn^{2+}$  ในน้ำทิ้งจากโรงงานชุบเคลือบโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารผสม  $FeSO_4-FeCl_3$  หรือ  $Fe(OH)_2$  การใช้  $Fe(OH)_2$  สามารถบำบัด  $Cr^{6+}$  ได้ดีกว่า  $FeSO_4-FeCl_3$  กากตะกอนที่ได้มีโครงสร้างเป็นสไปเนลเฟอร์ไรท์และมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวัสดุศาสตร์

นงนุช คุณประสิทธิ์และวุฒิชัย นิปิงการนันท์ (1991) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำยา FLUX จากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ซึ่งใช้ขบวนการที่มี 3 ขั้นตอนบรรจุ 1 ลิตร เป็นขบวนการปฏิกรณ์ในงานวิจัยนี้ พบว่ากระบวนการนี้ให้ตะกอนเฟอร์ไรท์ที่ค่าความเป็นกรด-เบสสูงกว่า 9 ขึ้นไป สภาวะที่เหมาะสมคืออัตราส่วนน้ำเสียต่อน้ำเจือจางเท่ากับ 1:0 ที่อุณหภูมิ  $60-70^{\circ}C$  และ ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 10 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดสำหรับตะกั่วและทองแดงเท่ากับ 100% และ 99.88% ตามลำดับ

ดร.ณิ รัตนสุวรรณ (1992) ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียโดยกระบวนการเฟอร์ไรท์ พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการ

กำจัดโครเมียมคือ ค่าความเป็นกรด-เบส 10 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และ ค่าความเป็นกรด-เบส11 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส สำหรับนิกเกิลคือ ค่าความเป็นกรด-เบส10-11 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลพร้อมๆกันคือ ค่าความเป็นกรด-เบส 10 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโมลที่เหมาะสมคือ  $Cr^{3+}/Iron_{total} = 14.85 \cdot 10^{-3}$  ,  $Ni^{2+}/Iron_{total} = 13.15 \cdot 10^{-3}$  ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลเป็น 100% อัตราส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำเสียโรงชุบโลหะที่ไม่มีไซยาไนด์คือ  $Cr^{3+}/Iron_{total} = 2.51 \cdot 10^{-3}$  ,  $Ni^{2+}/Iron_{total} = 1.4 \cdot 10^{-3}$  อัตราส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำเสียโรงชุบโลหะที่มีไซยาไนด์คือ  $Cr^{3+}/Iron_{total} = 1.8 \cdot 10^{-3}$   $Ni^{2+}/Iron_{total} = 0.76 \cdot 10^{-3}$  เมื่อทดสอบความเสถียรของการตะกอนเฟอร์ไรท์ที่สังเคราะห์ได้จากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะที่ไม่มีไซยาไนด์ โดยวิธีleaching test ในเวลา 6-24 ชั่วโมงพบว่าตะกอนมีความเสถียรที่ ค่าความเป็นกรด-เบส 3-5.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3 วิธีการวิจัย

### 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

1. การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำทิ้ง
2. การทดลองเพื่อศึกษาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว นิกเกิล และทองแดง  
ในน้ำทิ้ง
3. การทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ ในการนำกระบวนการเฟอร์ไรต์มาใช้บำบัดน้ำทิ้ง  
จากห้องปฏิบัติการเคมี

### 3.2 แหล่งน้ำทิ้ง

1. น้ำทิ้งที่ 1 นำมาจากถังเก็บน้ำทิ้งประเภทโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการเคมี ชั้น 4 ตึก  
พระเทพ
2. น้ำทิ้งที่ 2 นำมาจากถังเก็บน้ำทิ้งประเภทโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการเคมี ชั้น 5  
ภาควิชาเคมี
3. น้ำทิ้งที่ 3 นำมาจากถังเก็บน้ำทิ้งประเภทโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการเคมี ชั้น 5  
ภาควิชาเคมี

### 3.3 สารเคมี ทุกชนิด Analytical Reagent Grade

1.  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
2. NaOH
3.  $\text{HNO}_3$  (conc.)
4.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ (1:1)
5. HCl(1:1)
6.  $\text{HNO}_3$ (1:1)

### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Hot Plate แบบ stirring
2. Air Pump
3. Atomic Absorption Spectrophotometer ของ บริษัท SHIMADZU รุ่น AA-680
4. Conductrometer ของ บริษัท SCHOOT รุ่น CG-855
5. pH meter ของ บริษัท THAI SMITH รุ่น METROHM 654
6. dopper
7. ซ้อนคัสสาร
8. บีกเกอร์ขนาด 1000 ml
9. แท่งแก้วคน
10. แท่งแม่เหล็ก
11. ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml, 100 ml
12. กระจกนาฬิกา
13. กระจกบอกตวง
14. เครื่องชั่งสาร ของ บริษัท SCIENTIFIC PROMOTION รุ่น METTLER BB 3000
15. ชุดกรองบุทเนอร์
16. ขวดน้ำกลั่น
17. ขวดโธอิโทรทีลินขนาด 60 ml
18. นาฬิกาจับเวลา
19. ปิเปต
20. ลูกยาง
21. กระจกกรอง GF/C
22. จานระเหยขนาด 50 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การทดลองเพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว นิกเกิล และ ทองแดง จากน้ำทิ้งในห้องปฏิบัติการ โดยมีเงื่อนไขที่ศึกษาค้างนี้**

1. ปริมาณ  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ที่ใช้ โดยจะเปลี่ยนแปลงในแต่ละสภาวะเงื่อนไข ตามน้ำหนักค้างนี้ เป็น 14.4 กรัม 21.6 กรัม และ 28.8 กรัม ตามลำดับ
2. ค่า pH ในแต่ละสภาวะเงื่อนไขเป็น 10
3. เวลาที่ใช้ในการฟ่นออกซิเจน ในแต่ละสภาวะเงื่อนไขเป็น 15 นาที 30 นาที 60 นาที และ 120 นาที
4. อุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

**3.4.วิธีทำการทดลอง**

1. นำน้ำทิ้งตัวอย่างมาศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพค้างนี้
  - ค่าความเป็นกรด-เบส
  - ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (Total Metals)
  - ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids)
  - ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)
2. ตวงน้ำทิ้ง 500 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
3. เติม กรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1:1) 4-5 หยด
4. ใส่  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณแต่ละชุดเป็น 14.4 กรัม 21.6 กรัม และ 28.8 กรัม ตามลำดับ
5. ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ด้วย 12 M NaOH จนกระทั่งได้ ค่าความเป็นกรด-เบส เป็น 10
6. ให้ออกซิเจนโดยการฟ่นอากาศด้วย เครื่องฟ่น( อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที) พร้อมทั้งวัดค่าศักย์ออกซิเดชันที่เปลี่ยนแปลง
7. จับเวลาเพื่อหาเวลาในการฟ่นออกซิเจนที่เหมาะสมโดยเปลี่ยนแปลงในแต่ละเงื่อนไขคือ 15 นาที 30 นาที 60 นาที และ 120 นาที
8. ทิ้งไว้ให้ตกตะกอนโดยการควบคุมค่าความเป็นกรด-เบส ให้คงที่ตลอดเวลา บันทึกเวลาตกตะกอน
9. กรองตะกอนด้วยระบบลดความดันด้วยแรงน้ำ โดยใช้กระดาษกรอง GF/C
10. นำส่วนใส 5 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-เบส ให้ต่ำกว่า 2 ด้วย กรดไนตริก เข้มข้นและเติมน้ำกลั่น ให้มีปริมาตรรวมเป็น 25 มิลลิลิตร บรรจุในขวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Polypropylene ขนาดความจุ 60 มิลลิลิตร ที่ผ่าน การล้างอย่างถูกวิธี

11. นำไปตรวจสอบปริมาณ ตะกั่ว นิกเกิล และ ทองแดง ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
12. นำส่วนตะกอนมาทดสอบคุณสมบัติเฟอร์ไรท์ด้วยแท่งแม่เหล็ก โดยแท่งแม่เหล็กจะสามารถดูดตะกอนเฟอร์ไรท์ออกมา
13. นำตะกอนเฟอร์ไรท์มาตรวจสอบ เพื่อยืนยันผลอีกครั้งด้วย เครื่อง x-ray diffractometer
14. คำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดในแต่ละสภาวะเงื่อนไข

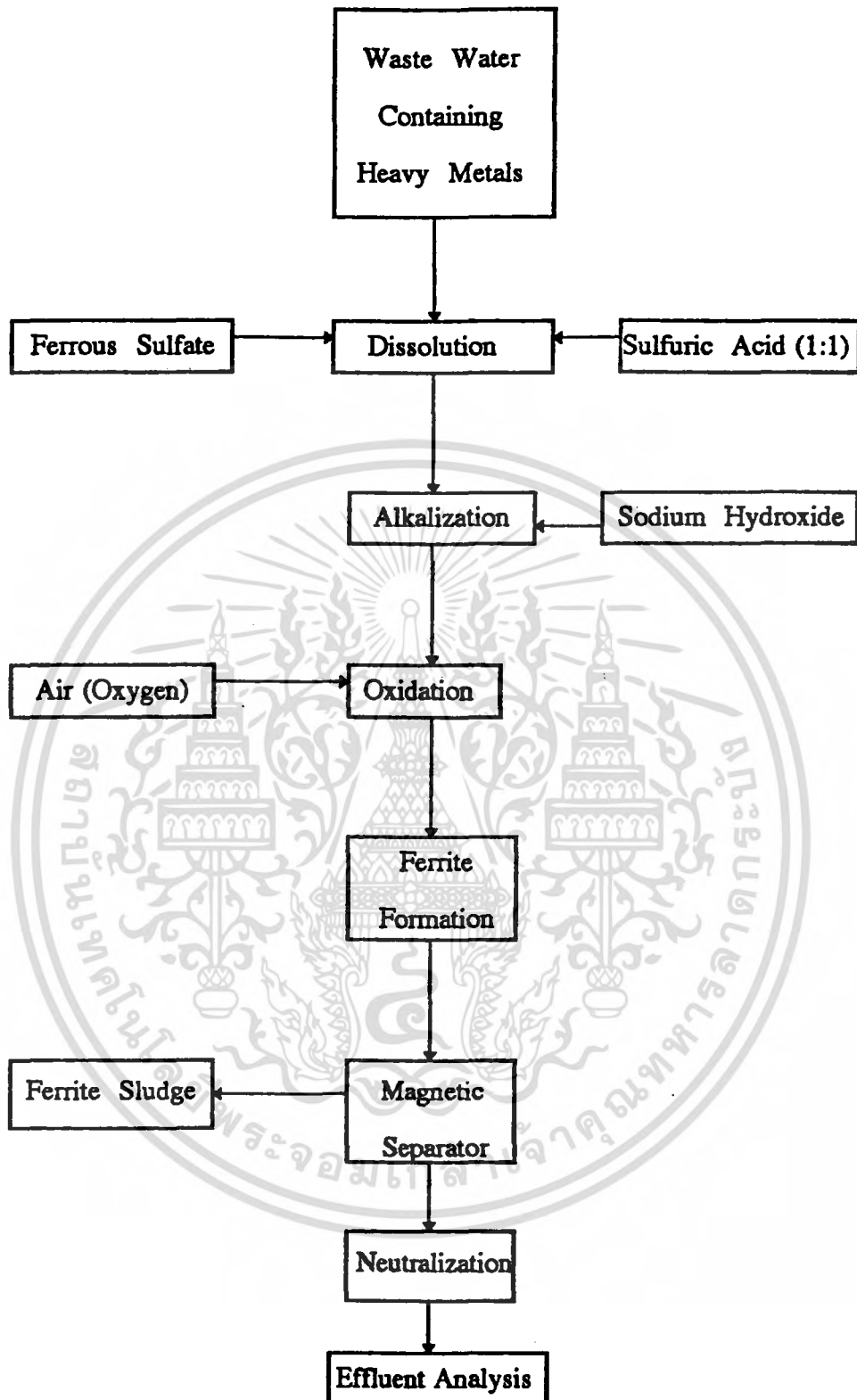
• ขั้นตอนการทดลองแสดงไว้ที่ภาคผนวก

\*\*วิเคราะห์โดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### การทำาทดลองเปรียบเทียบ

- เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดระหว่างสภาวะอุณหภูมิที่ 30 และ 70 องศาเซลเซียส โดยในการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ให้อุ่นน้ำตัวอย่าง บน Hot Plate โดยปรับอุณหภูมิให้เท่ากับ 70 องศาเซลเซียส ก่อนทำขั้นตอนที่ 3 ต่อไป

- เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดระหว่างการตกตะกอนด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ และการตกตะกอนด้วยวิธีธรรมดาด้วย NaOH โดยเปลี่ยนจากขั้นตอนการเติม  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  เป็นการเติม NaOH แทน



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงการทดลองด้วยระบบ suction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำทิ้ง

ในการทดลองได้ศึกษาหาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำทิ้งก่อนการบำบัดโดยการวัดความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ การนำไฟฟ้า ปริมาณของแข็งรวม และปริมาณโลหะหนักรวม ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1 พบว่าน้ำทิ้งที่ 1 ซึ่งได้มาจากห้องปฏิบัติการชั้น 4 ตึกพระเทพ มีปริมาณโลหะหนักมากที่สุด และน้ำทิ้งจากคณะวิทยาศาสตร์มีปริมาณโลหะหนักน้อยที่สุด

#### 4.2 การศึกษาสถานะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการเฟอไรไทน์ สถานะอุณหภูมิ 30 °ซ

สถานะเงื่อนไขที่ได้ทำการทดลองศึกษานั้นได้แก่ ปริมาณ  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  เวลาที่ใช้ในการฟ้นออกซิเจน โดยพิจารณาจากความสามารถในการตกตะกอน ลักษณะตะกอนและความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2

#### 4.3 การศึกษาสถานะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการเฟอไรไทน์ สถานะอุณหภูมิ 70 °ซ

สถานะเงื่อนไขต่างๆในการทดลองเหมือนในหัวข้อที่ 4.2 แต่ต่างเฉพาะสถานะอุณหภูมิ ซึ่งได้แสดงผลการทดลองไว้ในตารางที่ 3

จากการศึกษาพบว่าผลการทดลองที่ได้ในแต่ละสถานะเงื่อนไข มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสถานะเงื่อนไขนั้นๆ ซึ่งได้แสดงผลไว้ในตารางที่ 4 5 6 7

จากผลการทดลองนี้ทำให้ พบว่าน้ำตัวอย่างที่มีลักษณะที่ต่างกัน ต้องเลือกใช้สถานะเงื่อนไขต่างๆให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการบำบัด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 8 ซึ่งเมื่อนำตะกอนที่ได้จากสถานะที่เหมาะสมนี้ มาทดสอบการชะล้าง (Leaching) พบว่ามีความสามารถในการชะล้างแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 9



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำทิ้งที่นำมาศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงการตกตะกอนหลังจากกระบวนการเฟอร์ไรท์ของน้ำทิ้งที่ 2

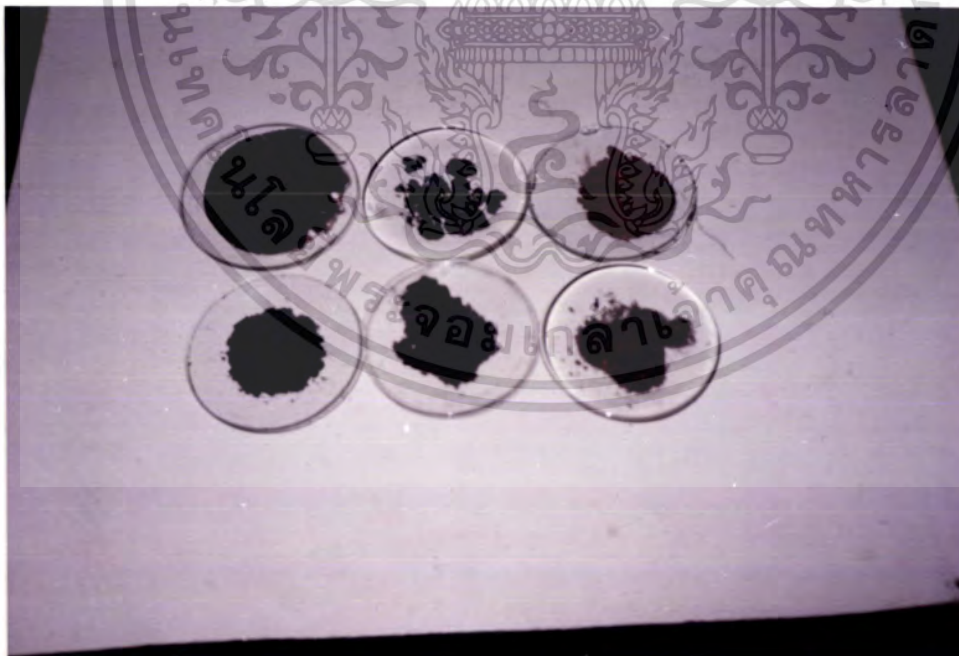


รูปที่ 4.3 แสดงการตกตะกอนหลังจากกระบวนการเฟอร์ไรท์ของน้ำทิ้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงสภาพน้ำหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์



รูปที่ 4.5 แสดงสภาพตะกอนหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์กับการบำบัดด้วยการตกตะกอนแบบธรรมดาของน้ำทิ้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 สภาพน้ำทางกายภาพและเคมี วันที่ 25 กันยายน 2539

น้ำตัวอย่างที่	สีของน้ำทิ้ง (ด้วยตาเปล่า)	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	ค่าการนำไฟฟ้า (µmhos/cm)	ปริมาณของแข็งรวม (mg/l)	ปริมาณโลหะหนักแต่ละประเภท (mg/l)							ปริมาณ โลหะหนัก ทั้งหมด (mg/l)
						ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	เหล็ก	โครเมียม	สังกะสี	แมงกานีส	
1	น้ำตาลเข้ม	1.3	30	$1.1 \times 10^6$	5880	1.40	67.25	4.59	22.3	366.30	11.00	10.54	483.41
2	ม่วงอ่อน	7.5	30	$2.3 \times 10^5$	2100	108.15	45.77	0.42	0.59	1.18	8.27	0.02	164.40
3	ส้มอ่อน	8.7	30	$1.2 \times 10^5$	700	34.94	15.76	2.72	2.26	0.73	9.75	10.76	101.49
4*	ขาวขุ่น	7.1	30	$1.5 \times 10^3$	2.57	0.12	0.20	0.07	0.14	0.25	0.24	0.06	1.08

\* น้ำทิ้งจากคณะวิทยาศาสตร์

ตารางที่ 2 สรุปผลการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์ที่เงื่อนไขต่างๆที่ pH=10 และ T=30°C โดยมีปริมาณน้ำทิ้ง 500 มิลลิลิตร

น้ำตัวอย่างที่	ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (กรัม)	เวลาที่ใช้ในการ ผ่าน $\text{O}_2$ (นาที)	ผลการตกตะกอน *	สีของน้ำหลังการ บำบัด	ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu$ mhos/cm)	สีของตะกอน	ความสามารถ ในการดูดแม่ เหล็ก **
1	14.4	15	1	สีส้ม	$6.0 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✗
		30	1	สีส้ม	$5.8 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✗
		60	1	สีส้ม	$6.3 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✗
		120	1	สีส้ม	$6.0 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✗
	21.6	15	1	เหลืองอ่อน	$6.8 \cdot 10^4$	ค่า	✓
		30	1	เหลืองอ่อน	$5.0 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✓
		60	1	เหลืองอ่อน	$6.7 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✓
		120	1	เหลืองอ่อน	$6.7 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✓
	28.8	15	1	ส้มแดง	$7.5 \cdot 10^4$	น้ำตาลแดง	✓
		30	1	ส้มอ่อน	$7.2 \cdot 10^4$	ค่า	✓
		60	1	ส้มอ่อน	$6.8 \cdot 10^4$	ค่า	✓
		120	1	ส้มอ่อน	$3.3 \cdot 10^4$	ค่า	✓

\*,\*\* ดูความหมายที่หน้า 38

ตารางที่ 2 (ต่อ)

น้ำตัวอย่างที่	ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (กรัม)	เวลาที่ใช้ในการ พ่น $\text{O}_2$ (นาที)	ผลการตกตะกอน*	สีของน้ำหลัง การบำบัด	ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{mhos/cm}$ )	สีของ ตะกอน	ความสามารถ ในการดูดแม่เหล็ก**
2	14.4	15	1	เหลืองอ่อน	$2.1 \cdot 10^4$	ดำ	✓
		30	1	เหลืองอ่อน	$3.1 \cdot 10^4$	ดำ	✓
		60	2	เหลืองใส	$2.1 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✓
		120	2	ฟ้าใส	$3.0 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✓
	21.6	15	1	เหลืองอ่อน	$3.0 \cdot 10^4$	ดำ	✓
		30	2	เหลืองอ่อน	$3.2 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✓
		60	2	เหลืองใส	$3.2 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✓
		120	2	ฟ้าใส	$3.3 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✓
	28.8	15	4	เหลืองอ่อน	$3.9 \cdot 10^4$	ดำ	✓
		30	4	เหลืองใส	$4.1 \cdot 10^4$	ดำ	✓
		60	4	เหลืองใส	$4.7 \cdot 10^4$	ดำ	✓
		120	4	ส้มใส	$4.5 \cdot 10^4$	ดำ	✓

\*,\*\* ดูความหมายที่หน้า 38

ตารางที่ 2 (ต่อ)

น้ำตัวอย่างที่	ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (กรัม)	เวลาที่ใช้ในการ พ่น $\text{O}_2$ (นาทีก)	ผลการตกตะกอน*	สีของน้ำหลัง การบำบัด	ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{ mhos/cm}$ )	สีของ ตะกอน	ความสามารถ ในการดูดแม่เหล็ก**
3	14.4	15	4	เหลืองอ่อน	$2.2 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✗
		30	3	เหลืองอ่อน	$2.2 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✗
		60	2	เหลืองใส	$1.9 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✗
		120	3	ฟ้าใส	$2.3 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✗
	21.6	15	4	เหลืองอ่อน	$2.4 \cdot 10^4$	น้ำตาลดำ	✗
		30	4	เหลืองอ่อน	$2.3 \cdot 10^4$	น้ำตาลดำ	✓
		60	4	เหลืองใส	$2.7 \cdot 10^4$	น้ำตาลดำ	✓
		120	4	ฟ้าใส	$2.9 \cdot 10^4$	น้ำตาลดำ	✓
	28.8	15	4	เหลืองอ่อน	$2.6 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✓
		30	3	เหลืองใส	$2.6 \cdot 10^4$	น้ำตาล	✓
		60	4	เหลืองใส	$2.0 \cdot 10^4$	น้ำตาลดำ	✓
		120	4	ส้มใส	$1.8 \cdot 10^4$	น้ำตาลดำ	✓
		เติม NaOH จนมี pH=10	15	แขวนลอย	ส้มอ่อน	$1.3 \cdot 10^4$	ส้มอ่อน

\*,\*\* ดูความหมายที่หน้า 3

ตารางที่ 3 สรุปผลการบำบัดน้ำทิ้งที่ 3 ด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์ที่ pH=10 และ T=70°C โดยมีปริมาณน้ำตัวอย่าง 500 มิลลิลิตร

น้ำทิ้งที่	ปริมาณ FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O(กรัม)	เวลาที่ใช้ในการ พ่น O <sub>2</sub> (นาที)	ผลการตกตะกอน *	สีของน้ำหลัง การบำบัด	ค่าการนำไฟฟ้า(μ mhos/cm)	สีของตะกอน	ความสามารถ ** ในการดูดแม่เหล็ก
1	14.4	15	1	เหลืองอ่อน	4.4*10 <sup>4</sup>	น้ำตาล	✗
	21.6	15	2	เหลืองอ่อน	1.8*10 <sup>4</sup>	ดำ	✓
	28.8	15	1	ส้มอ่อน	7.6*10 <sup>4</sup>	ดำ	✓
2	14.4	15	4	ฟ้าใส	3.6*10 <sup>4</sup>	ดำ	✓
	21.6	15	4	เหลืองใส	2.8*10 <sup>4</sup>	ดำ	✓
	28.8	15	4	เหลืองใส	2.6*10 <sup>4</sup>	ดำ	✓
3	14.4	15	3	เหลือง	2.9*10 <sup>4</sup>	น้ำตาล	✓
	21.6	15	1	เหลืองอ่อน	2.3*10 <sup>4</sup>	น้ำตาลอ่อน	✗
	28.8	15	1	เหลืองอ่อน	3.9*10 <sup>4</sup>	น้ำตาล	✓

\* หมายถึงระดับความสามารถในการตกตะกอนโดย

- 4 หมายถึง ตกมากและเร็วมาก (ตกมากกว่า 3/4 ของระดับน้ำและใช้เวลาน้อยกว่า 2 ชั่วโมง)  
 3 หมายถึง ตกปานกลางและเร็ว (ตกระหว่าง 1/2-3/4 ของระดับน้ำและใช้เวลาระหว่าง 2-5 ชั่วโมง)  
 2 หมายถึง ตกน้อยและช้า (ตกระหว่าง 1/3-1/2 ของระดับน้ำและใช้เวลาระหว่าง 10-24 ชั่วโมง)  
 1 หมายถึง ตกน้อยมากและช้ามาก (ตกน้อยกว่า 1/3 ของระดับน้ำและใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง)

\*\* หมายถึงความสามารถในการแม่เหล็กโดย

- ✓ หมายถึง ดูดแม่เหล็ก  
 ✗ หมายถึง ไม่ดูดแม่เหล็ก

ตารางที่ 4 แสดงค่าความเข้มข้นของโลหะหนักหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ที่ pH=10 และ T=30°C

น้ำทิ้งที่	ปริมาณ FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O (กรัม)	เวลาที่พ่น O <sub>2</sub> (นาที)	ปริมาณโลหะก่อนบำบัด(mg/l)				ปริมาณโลหะหลังบำบัด(mg/l)			
			ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	เหล็ก	ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	เหล็ก
1	14.4	15	1.40	62.25	4.59	22.33	0.03	23.33	1.23	0.44
		30					0.37	28.38	0.10	0.11
		60					0.05	26.18	0.10	0.13
		120					0.07	21.81	0.15	0.08
	21.6	15	0.03	21.08	0.60	0.22				
		30					0.05	29.11	0.19	0.72
		60					0.16	29.71	0.13	0.38
		120					0.18	28.25	0.20	0.14
	28.8	15	0.01	21.83	1.84	0.24				
		30					0.01	23.25	0.20	0.38
		60					0.05	23.95	0.24	0.53
		120					0.06	25.51	0.20	0.63

ตารางที่ 4 (ต่อ)

น้ำทิ้งที่	ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (กรัม)	เวลาที่พ่น $\text{O}_2$ (นาที)	ปริมาณโลหะหนักก่อนบำบัด (mg/l)				ปริมาณโลหะหนักหลังบำบัด(mg/l)			
			ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	เหล็ก	ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	เหล็ก
2	14.4	15	108.15	45.77	0.42	0.60	5.05	12.34	0.07	10.64
		30					5.04	12.68	0.06	49.80
		60					2.09	7.02	0.06	3.38
		120					20.04	12.34	0.04	2.62
	21.6	15	108.15	45.77	0.42	0.60	5.30	12.98	0.10	13.87
		30					1.01	15.46	0.07	22.01
		60					1.74	19.15	0.09	42.74
		120					13.26	19.25	0.06	14.99
	28.8	15	108.15	45.77	0.42	0.60	1.96	12.70	0.07	21.00
		30					8.36	17.68	0.05	3.58
		60					9.45	16.94	0.02	3.02
		120					11.48	15.44	0.14	2.37

ตารางที่ 4 (ต่อ)

น้ำทิ้งที่	ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (กรัม)	เวลาที่ฟ่น $\text{O}_2$ (นาที)	ปริมาณโลหะหนักก่อนบำบัด (mg/l)				ปริมาณโลหะหนักหลังบำบัด(mg/l)							
			ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	เหล็ก	ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	เหล็ก				
3	14.4	15	34.94	15.76	2.72	2.26	4.98	7.53	0.68	42.83				
		30					5.43	8.43	0.44	40.14				
		60					10.47	11.22	0.23	37.72				
		120					8.80	9.01	0.25	34.77				
	21.6	15	3.64	10.74	0.14	43.55								
		30					8.18	5.17	0.18	47.16				
		60					7.17	6.45	0.11	43.78				
		120					1.03	7.30	0.02	48.50				
	28.8	15	7.89	6.08	0.16	56.41								
		30					8.82	8.95	0.07	67.14				
		60					8.04	8.19	0.10	66.33				
		120					9.00	8.92	0.07	65.76				
	NaOH	15									19.34	11.70	0.95	0.47

ตารางที่ 5 แสดงค่าความเข้มข้นของโลหะหนักหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์ที่ pH=10 และ T=70°C

น้ำทิ้งที่	ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (กรัม)	เวลาที่ฟ่น $\text{O}_2$ (นาที)	ปริมาณโลหะหนักก่อนบำบัด(mg/l)				ปริมาณโลหะหนักหลังบำบัด(mg/l)			
			ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	เหล็ก	ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	เหล็ก
1	14.4	15	1.40	67.25	4.59	22.33	0.18	22.61	0.04	5.03
	21.6	15					0.18	18.64	0.03	1.88
	28.8	15					0.11	14.60	0.02	0.10
2	14.4	15	108.15	45.77	0.42	0.60	10.59	13.48	0.03	0.54
	21.6	15					10.34	13.78	0.02	0.53
	28.8	15					11.04	12.14	0.03	0.59
3	14.4	15	34.94	15.76	2.72	2.26	12.73	4.36	0.13	36.38
	21.6	15					10.04	2.34	0.18	61.70
	28.8	15					1.18	7.60	0.02	56.14

**ตารางที่ 6** แสดงผลต่างของความเข้มข้นก่อนและหลังบำบัดและประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์ที่ pH=10 และ T=30°C

น้ำทิ้งที่	ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (กรัม)	เวลาที่ผ่าน $\text{O}_2$ (นาที)	ผลต่างของความเข้มข้นก่อนและหลังบำบัด (mg/l)			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		
			ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว
1	14.4	15	1.37	38.92	3.36	97.6	65.3	73.2
		30	0.03	33.87	4.49	73.2	57.8	97.8
		60	1.35	26.07	4.49	96.1	61.1	97.8
		120	1.33	40.44	4.44	94.6	67.3	96.7
	21.6	15	1.37	41.17	3.99	97.9	68.8	86.9
		30	1.35	33.14	4.40	96.4	56.9	95.8
		60	1.24	32.54	4.46	88.6	55.8	97.2
		120	1.22	34.00	4.39	87.1	58.0	95.6
	28.8	15	1.39	40.42	2.75	99.1	67.6	60.8
		30	1.39	39.00	4.39	99.9	65.8	95.6
		60	1.35	38.30	4.35	96.4	64.4	94.8
		120	1.34	36.74	4.39	95.7	62.1	95.6

ตารางที่ ๔ (ต่อ)

น้ำทิ้งที่	ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (กรัม)	เวลาที่พ่น $\text{O}_2$ (นาที)	ผลต่างของความเข้มข้นก่อนและหลัง			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		
			บำบัด (mg/l)			ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว
			ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว			
2	14.4	15	108.10	33.43	0.35	95.3	73.1	83.1
		30	103.11	33.09	0.32	95.3	72.3	85.7
		60	106.06	38.75	0.32	98.1	84.7	84.0
		120	88.11	33.43	0.38	81.5	73.1	90.5
	21.6	15	102.83	32.79	0.32	95.1	71.6	76.2
		30	107.14	45.70	0.35	99.0	66.4	83.3
		60	106.41	45.68	0.33	98.4	58.3	78.1
		120	94.89	45.71	0.32	87.7	57.9	85.7
	28.8	15	106.19	45.70	0.35	98.1	72.3	81.9
		30	99.79	45.72	0.37	92.3	61.4	86.6
		60	91.21	45.75	0.40	91.3	62.9	95.2
		120	96.67	30.33	0.28	89.4	66.4	65.7

ตารางที่ ๘ (ต่อ)

น้ำทิ้งที่	ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (กรัม)	เวลาที่ฟ่น $\text{O}_2$ (นาที)	ผลต่างของความเข้มข้นก่อนและหลังบำบัด			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		
			(mg/l)			ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว
3	14.4	15	30.04	8.23	2.04	85.7	52.4	74.8
		30	29.51	7.33	2.28	84.5	46.5	83.7
		60	24.47	4.54	2.49	70.0	28.9	91.5
		120	26.14	6.75	2.47	74.8	37.9	90.7
	21.6	15	31.3	5.02	2.58	86.7	32.3	94.8
		30	26.76	10.09	2.54	76.5	67.1	93.3
		60	27.77	9.31	2.61	79.4	59.5	96.3
		120	27.84	6.88	2.70	79.9	53.7	99.3
	28.8	15	27.05	9.68	2.56	77.4	61.4	94.1
		30	26.12	6.81	2.65	74.8	43.7	97.4
		60	26.90	7.57	2.62	77.1	49.4	96.3
		120	29.94	6.84	2.65	74.2	43.7	97.4
	NaOH	15	15.6	4.06	1.77	44.7	25.5	66.6

**ตารางที่ 7** แสดงผลต่างของความเข้มข้นก่อนและหลังบำบัดและประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ที่ pH=10 และ T=70°C

น้ำทิ้งที่	ปริมาณ FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O (กรัม)	เวลาที่พ่น O <sub>2</sub> (นาที)	ผลต่างของความเข้มข้นก่อนและหลังบำบัด (mg/l)			ประสิทธิภาพการบำบัด (%)		
			ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว
1	14.4	15	1.22	44.64	4.55	87.1	66.4	99.1
	21.6	15	1.22	48.61	4.56	87.1	72.4	99.3
	28.8	15	1.39	52.65	4.57	93.0	78.3	99.6
2	14.4	15	97.56	32.29	0.39	90.2	70.5	92.8
	21.6	15	97.81	31.99	0.40	90.4	69.8	95.2
	28.8	15	97.11	33.63	0.39	89.8	73.6	92.8
3	14.4	15	22.21	11.4	2.59	63.6	72.3	95.2
	21.6	15	24.90	13.42	2.54	71.3	85.4	93.4
	28.8	15	33.76	8.16	2.70	96.6	51.7	99.2

**ตารางที่ 8** สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ ที่ pH=10

น้ำทิ้งที่	อุณหภูมิ(°C)	ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (กรัม)	เวลาที่ฟ่น $\text{O}_2$ (นาที)	ผลการตกตะกอน*	ประสิทธิภาพการบำบัด(%)		
					ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว
1	30	28.8	30	1	99.9	65.8	95.6
2	30	21.6	15	4	95.1	71.6	76.2
3	30	21.6	30	1	76.5	67.1	93.3
1	70	21.6	15	2	87.1	72.4	99.3
2	70	14.4	15	4	90.2	70.5	93.8
3	70	14.4	15	3	63.6	72.3	95.2

\* ดูความหมายที่หน้า 38

**ตารางที่ ๑** แสดงการชะล้าง (Leaching) ของตะกอนที่ได้จากสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสม

น้ำทิ้งที่	อุณหภูมิ(°c)	ปริมาณ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (กรัม)	เวลาที่พ่น $\text{O}_2$ (นาที)	ผลการตกตะกอน*	ผลการทำทดสอบการชะล้าง (Leaching)			ประสิทธิภาพการชะล้าง(%)		
					ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว	ทองแดง	นิกเกิล	ตะกั่ว
1	30	28.8	30	1	0.54	0.17	0.10	100	0.74	50
2	30	21.6	15	4	0.45	0.19	0.30	9.50	0.47	100
3	30	21.6	30	1	0.33	6.38	0.14	8.04	100	77.8
1	70	21.6	15	2	0.32	0.24	0.17	100	1.29	100
2	70	14.4	15	4	0.47	0.26	0.11	4.70	4.7	100
3	70	14.4	15	3	0.58	5.61	0.10	100	100	77.0

## ค่าใช้จ่ายในการทำโครงการพิเศษ

### 1. สารเคมี

- $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.5	kg.	900	บาท
- $\text{H}_2\text{SO}_4$ (conc)	100	ml.	15	บาท
- $\text{HNO}_3$ (conc)	2.5	l.	47	บาท
- $\text{HCl}$ (conc)	2.5	l.	360	บาท
- $\text{NaOH}$	250	g.	63	บาท

2. กระดาษกรอง GF/C 1 ก้อน 700 บาท

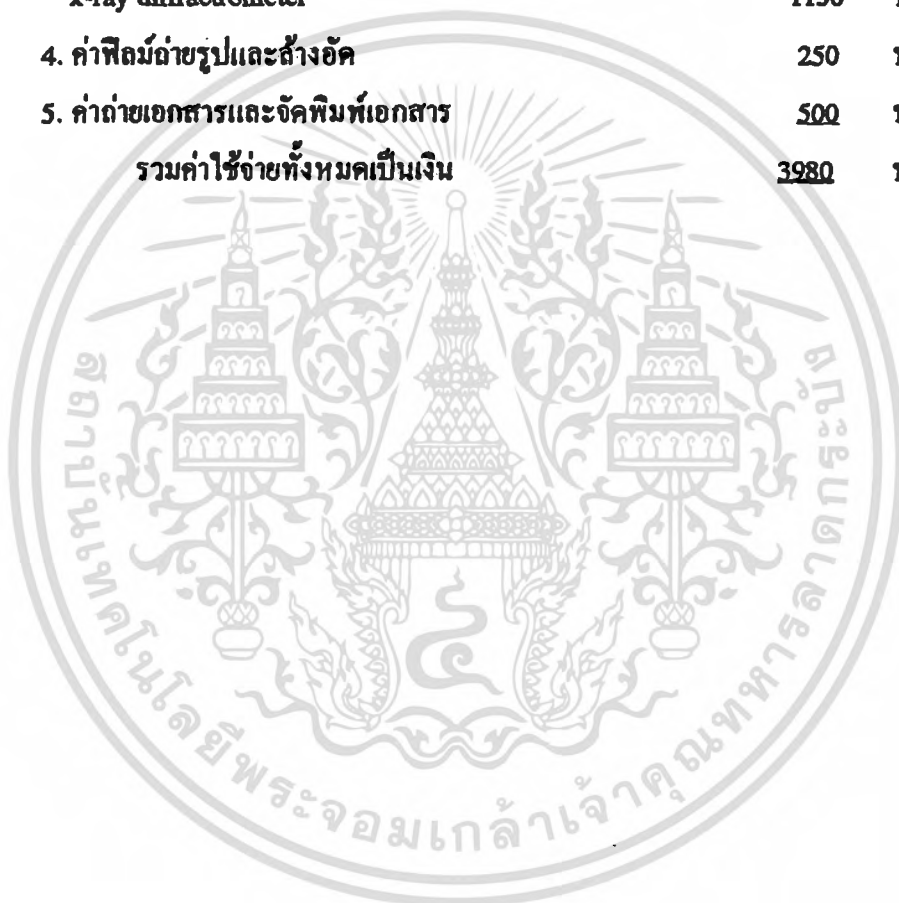
### 3. ค่าตรวจวัดความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่อง

x-ray diffractometer 1150 บาท

4. ค่าฟิล์มถ่ายรูปและล้างอัด 250 บาท

5. ค่าถ่ายเอกสารและจัดพิมพ์เอกสาร 500 บาท

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดเป็นเงิน 3980 บาท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

ในการทดลองนี้มุ่งศึกษาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก โดยเลือกศึกษา 3 ชนิดได้แก่ทองแดง นิกเกิล และตะกั่ว ซึ่งมีปะปนอยู่มากในน้ำทิ้งที่นำมาทดลอง โดยใช้วิธีการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ ข้อแตกต่างที่สำคัญจากการศึกษาที่ผ่านมาของผู้อื่นคือในการศึกษาครั้งนี้จะเน้นถึงการนำไปใช้บำบัดกับน้ำเสียจริง ซึ่งต้องมีความสะดวก รวดเร็ว ประหยัดและมีประสิทธิภาพที่ดี จึงทำให้สภาวะเงื่อนไขที่ศึกษานั้นสามารถควบคุมได้ง่ายอันได้แก่ ปริมาณเกลือเฟอร์รัสซัลเฟต เวลาที่ใช้ในการฟ้นออกซิเจน และเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน

ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

1.สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำทิ้ง คือ น้ำทิ้งตัวอย่างที่ 1 ใช้ปริมาณเกลือเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 28.8 กรัม เวลาที่ใช้ในการฟ้นออกซิเจนเท่ากับ 30 นาที และประสิทธิภาพการบำบัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 87 เปอร์เซ็นต์ น้ำทิ้งตัวอย่างที่ 2 ใช้ปริมาณเกลือเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 21.6 กรัม เวลาที่ใช้ในการฟ้นออกซิเจนเท่ากับ 15 นาที และประสิทธิภาพการบำบัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 81 เปอร์เซ็นต์ น้ำทิ้งตัวอย่างที่ 3 ใช้ปริมาณเกลือเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 21.6 กรัม เวลาที่ใช้ในการฟ้นออกซิเจนเท่ากับ 30 นาที และประสิทธิภาพการบำบัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 79 เปอร์เซ็นต์

2.ในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอนแบบธรรมดาโดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ กับวิธีกำจัดโดยกระบวนการเฟอร์ไรท์พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์มีสูงกว่าวิธีการกำจัดโดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนั้นลักษณะของตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ได้เป็นตะกอนเบา ซึ่งจะใช้เวลาในการตกตะกอนนานกว่าตะกอนเฟอร์ไรท์ที่มีลักษณะเป็นตะกอนหนัก ทำให้สามารถแยกตะกอนออกจากสารละลายของตะกอนเฟอร์ไรท์จะดีกว่าตะกอนของไฮดรอกไซด์มาก

3.สภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมควรได้ตะกอนเฟอร์ไรท์ที่มีลักษณะสีดำสนิท มีความเป็นแม่เหล็ก แต่ถ้าเงื่อนไขไม่เหมาะสมจะได้ตะกอนสีอื่น เช่น สีน้ำตาลแดง สีน้ำตาลอ่อน หรือสีส้ม เป็นต้น

4.ผลการทดลองทำการบำบัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งตัวอย่างที่ 1 คือมีการใช้ปริมาณเกลือเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 21.6 กรัม

เวลาที่ใช้ในการฟ้นออกซิเจนเท่ากับ 15 นาที และประสิทธิภาพการบำบัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 86.3 เปอร์เซ็นต์ น้ำทิ้งตัวอย่างที่ 2 ใช้ปริมาณเกลือเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 14.4 กรัม เวลาที่ใช้ในการฟ้นออกซิเจนเท่ากับ 15 นาที และประสิทธิภาพการบำบัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 84.8 เปอร์เซ็นต์ น้ำทิ้งตัวอย่างที่ 3 ใช้ปริมาณเกลือเฟอร์รัสซัลเฟตเท่ากับ 14.4 กรัม เวลาที่ใช้ในการฟ้นออกซิเจนเท่ากับ 30 นาที และประสิทธิภาพการบำบัดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะตะกอนที่ได้จากสภาวะที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสกับที่อุณหภูมิกปกติ พบว่าในสภาวะที่อุณหภูมิสูง จะให้ตะกอนที่ดำสนิทและมีระดับการตกตะกอนที่ดีกว่า

5.สภาวะเงื่อนไขที่ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำทิ้งและวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เช่น ถ้าต้องการความรวดเร็วในการบำบัด สำหรับน้ำทิ้งตัวอย่างที่ 1 จะต้องทำในสภาวะอุณหภูมิสูงซึ่งจะต้องเปลืองพลังงาน แต่ลักษณะตะกอนที่ดีกว่า

6.ในการทดลองโดยใช้น้ำทิ้งจริง ค่าศักย์ออกซิเดชัน ไม่สามารถบอกให้ทราบว่าปฏิกิริยาออกซิไดซ์สิ้นสุดลงเมื่อใด (ดูผลการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชันที่ภาคผนวก) ซึ่งต่างจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ให้ค่าศักย์ออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และลงที่ในที่สุด ดังนั้นในการทดลองจึงไม่สามารถใช้ค่าศักย์ออกซิเดชัน เป็นตัวบ่งชี้ของปฏิกิริยาได้ จึงต้องใช้ปริมาณเกลือเฟอร์รัสซัลเฟตให้มากขึ้นพอ

7.ตะกอนเฟอร์ไรท์มีหลายชนิด เช่น แมกเนไตต์ ( $Fe_3O_4$ ) โครไมต์ ( $FeCr_2O_4$ ) และอื่นๆ ซึ่งควรนำไปตรวจสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายสูงมาก ทำให้ไม่สามารถนำมาตรวจสอบได้ทุกตะกอน สำหรับการวิจัยนี้ ได้นำตะกอนจากน้ำทิ้งตัวอย่างที่ 1 และ 2 ไปวิเคราะห์ พบว่าตะกอนจากน้ำทิ้งตัวอย่างที่ 1 มีตะกอนเฟอร์ไรท์แบบแมกเนไตต์และโครไมต์ส่วนตะกอนจากน้ำทิ้งตัวอย่างที่ 2 มีตะกอนเฟอร์ไรท์แบบแมกเนไตต์เท่านั้น จากผลดังกล่าวทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าตะกอนเฟอร์ไรท์เป็นตะกอนที่ได้จากโลหะหนักในน้ำทิ้งหรือไม่ แม้ว่าปริมาณโลหะหนักหลังบำบัดมีปริมาณน้อยลงก็ตาม เนื่องจากการที่ปริมาณโลหะหนักน้อยลงนั้น อาจเกิดจากความผิดพลาดจากการทดลองได้ ดังนั้นจึงควรออกแบบการทดลองและเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม รวมถึงทักษะในการทดลองที่ถูกต้อง



# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## พิษของตะกั่ว นิกเกิลและทองแดง

### พิษของตะกั่ว นิกเกิลและทองแดงที่มีต่อมนุษย์

อาการพิษโลหะหนักมีการศึกษาในรูปของอินทรีย์สารและอนินทรีย์สาร โดยอาจจะเข้าสู่ร่างกายทางการกิน ทางการหายใจ หรือทางผิวหนัง ผลกระทบส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับ ระบบประสาท ทางเดินอาหาร และกล้ามเนื้อแข็งเกร็งจนเป็นอัมพาต

### พิษของตะกั่ว

ชนิดอนินทรีย์สารที่เข้าสู่ร่างกายโดยการกิน และการหายใจเอาฝุ่นหรือไอเข้าไป อันตรายเหล่านี้ มักเกิดกับผู้ประกอบอาชีพที่ทำงานในโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ การหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่ที่เสียแล้ว ช่างทำตัวพิมพ์ ช่างเรียงพิมพ์ ช่างเคาะแผ่นสียรอยนต์ เป็นต้น

ชนิดอินทรีย์สารที่เข้าสู่ร่างกายโดยการกิน ทางผิวหนัง และการหายใจ ซึ่งสารแอนติออก(anti-koock) ระเหยได้ดี อันตรายเกิดแก่ผู้ปฏิบัติงานในโรงงานต่างๆ อาการเกิดขึ้นรวดเร็ว มีความผิดปกติทางจิตและประสาท เริ่มด้วยอาการอ่อนเพลีย นอนไม่หลับ ปวดศีรษะ กระสับกระส่าย พุงมาก ประสาทหลอน เพื่อ ชีพ หมกมืด และชักในที่สุด

### พิษของนิกเกิล

ทำให้เกิดการแพ้ได้ ที่ผิวหนัง เกิดผื่นจากนิกเกิล ก่อให้เกิดการระคายเคืองที่เยื่อเมือก และเยื่อบุทางเดินหายใจส่วนบน เกล็ดของนิกเกิลอาจทำให้เกิดมะเร็งได้ อัตราการเป็นมะเร็งที่ปอด และช่องจมูกสูงขึ้น ช่วงระยะเวลาที่จะก่อให้เกิดมะเร็งเฉลี่ย 25 ปี (พิสัยตั้งแต่ 4 ปีถึง51 ปี) จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่านิกเกิล มีผลต่อกล้ามเนื้อหัวใจ สมอ ตับ และไต

### พิษของทองแดง

อันตรายจากการหายใจเข้าไป มักเกิดอาการกับผู้ทำงานเกี่ยวข้องกับกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เชื่อมโลหะที่มีทองแดงเป็นส่วนประกอบ อาการแพ้ที่เกิดขึ้นทันทีทันใด

- ระบบทางเดินหายใจ : จมูก คอ อักเสบ แ่น้ำออก หายใจขัด ปวดบวมและอาจตายได้
- ระบบทางเดินอาหาร : คลื่นไส้ อาเจียน

- ทั่ว ๆ ไป : อ่อนเพลีย ปวดเมื่อยตามกล้ามเนื้อ มีไข้ หนาวสั่น ถ้าแพ้พิษเรื้อรังจะมีความผิดปกติที่ปอด โดยเชื้อปอดจะถูกทำลาย ดุลมโป่งพอง และกลายเป็นคนปอดพิการในที่สุด จะมีอาการไอ หอบ เหนื่อยง่าย และทำงานไม่ได้

### พิษของตะกั่ว นิกเกิลและทองแดงที่มีต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

ผลกระทบของโลหะหนักที่มีต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ พบว่าขึ้นกับลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีของทองแดง นิกเกิลและตะกั่ว โดยที่โลหะจะเข้าไปในสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ที่อาศัยอยู่ในน้ำ เช่น ไฟโตแพลงตอน (Phytoplankton) ไดอะตอม (Diatom) โดยจะแพร่ผ่านเข้าทางเมมเบรน ส่วนปลา นั้นสามารถที่จะรับได้โดยผ่านทางเหงือก โลหะหนักบางพวกที่อยู่ในน้ำก็เป็นสิ่งจำเป็นของสิ่งมีชีวิตในน้ำ กล่าวคือ เป็นสารอาหารของสัตว์ เช่น หอยนางรม (Oysters) หอยกาบ (Clams) และอื่นๆ เป็นการลดการตกตะกอนของพวกโลหะหนักในน้ำตามธรรมชาติ

ไฟโตแพลงตอน (Phytoplankton) เป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดใหญ่กว่าในวงจรรอาหาร โลหะหนักจะมีผลกระทบต่อไฟโตแพลงตอนได้ 2 ทาง คือ โลหะหนักจะถูกส่งต่อในวงจรรอาหาร เนื่องจากไฟโตแพลงตอนจะถูกกินโดยสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในน้ำ เช่น ปลา แล้วจึงเข้าไปอยู่ในร่างกายของมนุษย์ทางวงจรรอาหารต่อไป ผลกระทบของโลหะหนักอีกทางหนึ่งคือ ปริมาณโลหะหนักที่เข้าไป ถ้ามีปริมาณมากแล้วจะทำให้ไฟโตแพลงตอนตายได้ เมื่อแพลงตอนตายก็จะมีผลทางเชื่อมกับระบบนิเวศน์ในน้ำ เนื่องจากเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญ รูปแบบของโลหะหนักซึ่งแตกตัวได้อย่างรวดเร็วเมื่ออยู่ในใกล้เมมเบรนของปลา คือ ซิมเพลคอมเพลกซ์ (Simple Complex) และไอออนแพร์ (Ion Pairs) ส่วนรูปแบบที่สามารถเข้าไปอยู่ในตัวปลาได้เลยคือ เมทัล สปีชีส์ (Metal Species)

## ภาคผนวก ข

## การวิเคราะห์หาค่าทีเอสหรือปริมาณสารทั้งหมด (Total Solids , TS)

## วิธีการวิเคราะห์

1. การเตรียมจานระเหย : จานที่ใช้จะต้องสะอาดและนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นใน Desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก สมมติว่าเท่ากับ A มก.

2. เลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำให้เหมาะสม โดยปกติมีปริมาณอยู่ระหว่าง 50-100 ลบ.ซม.

3. ควบน้ำตัวอย่างลงในถ้วยระเหยที่ตั้งบน Hot Plate เมื่อไอน้ำระเหยออกหมดแล้ว ให้นำจานระเหยไปอบที่เตาอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นใน desiccator

4. ชั่งจากกระเหยทันทีที่เย็นลงทำอุณหภูมิห้อง สมมติเท่ากับ B มก. (น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น คือ น้ำหนักของปริมาณสารทั้งหมดหรือทีเอส)

$$\text{การคำนวณ} \\ \text{ทีเอสหรือสารทั้งหมด ( มก./ลบ.คม.)} = \frac{\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (B-A) * 1000}{\text{ลบ.ซม. ของตัวอย่างน้ำ}}$$

โดย B = น้ำหนักสารและน้ำหนักจานระเหย (mg)

A = น้ำหนักจานระเหย (mg)

## ภาคผนวก ค.

## การวิเคราะห์หาค่าที่เข้มหรือปริมาณโลหะหนักรวม(Total Metals, TM)

## วิธีวิเคราะห์

1. ใส่น้ำตัวอย่างปริมาณ 50-125 มล. (ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างนั้นๆ) ในขวดรูปชมพู่ ที่มีขนาดเหมาะสม
2. เติม  $\text{HNO}_3$ (conc) 3 มล. แล้ววางบน Hot Plate ปลดปล่อยให้ระเหยมากที่สุด แต่อย่าให้เดือดและให้ระเหยจนเหลือน้อยกว่า 5 มล.(ป้องกันขวดแห้ง)
3. ปลดปล่อยให้เย็น แล้วเติม  $\text{HNO}_3$ (conc) 5 มล. ปิดด้วยกระจกนาฬิกา แล้ววางบน Hot Plate
4. ค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิของ Hot Plate เพื่อให้เกิดการเดือดธรรมดา(gentle reflux)
5. รอจนเกิดการ digest สมบูรณ์ โดยดูจากสีของน้ำที่ได้ควรเป็นสีใสหรือสีที่คงที่
6. ระเหยให้เหลือน้อยกว่า 5 มล. แล้วปล่อยให้เย็น
7. เติม  $\text{HCl}$ (1:1) 10 มล. และเติมน้ำกลั่น 15 มล. ต่อปริมาตรรวม 100 มล.
8. ให้ความร้อน 15 นาที เพื่อละลายตะกอนที่เหลืออยู่
9. ปลดปล่อยให้เย็น ล้างขวดและกระจกนาฬิกา ด้วยน้ำกลั่นใส่ลงในขวด
10. กรองส่วนที่ไม่ละลายออก
11. นำส่วนที่กรองได้ ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

## ภาคผนวก ง.

**เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณ ตะกั่ว ทองแดง และนิกเกิล ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี มีดังต่อไปนี้**

	ตะกั่ว	ทองแดง	นิกเกิล
Hollow Cathode lamp (mA)	7	3	5
Slit Width (nm)	0.3	0.5	0.15
Slit Height (nm)	Normal	Normal	Normal
Wavelength (nm)	283.3	324.8	232.0
Flame	Air-Acetylene	Air-Acetylene	Air-Acetylene
Fuel Flow (l/min)	1.8	1.8	1.7
Oxidant Flow (l/min)	8.0	8.0	8.0
Burner (cm)	10	10	10
Height (mm)	6.0	6.0	6.0
Angle ( °c )	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

## สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)

## เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดการนำไฟฟ้า
2. เทอร์โมมิเตอร์
3. เซลล์การนำไฟฟ้า (conductivity cell)

## รีเอเจนต์

1. น้ำกลั่นซึ่งมีความนำไฟฟ้าจำเพาะ (specific conductance) น้อยกว่า 1 ไมโครซีเมนส์/ซม.
2. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.01 โมล/ลบ.คม

## วิธีการวัด

1. หาความคงที่ของเซลล์ (cell constant)

ล้างเซลล์การนำไฟฟ้าด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.01 โมล/ลบ.ซม. อย่างน้อย 2 ครั้ง ปรับอุณหภูมิของเครื่องให้เท่ากับอุณหภูมิของสารละลาย ให้มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . วัดความต้านทานของสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และจดอุณหภูมิไว้

$$C = \frac{0.01413 R_{KCl}}{1 + 0.0200(t - 25)}$$

$C$  = ความคงที่ของเซลล์ มีหน่วย ซม.<sup>2</sup> ที่  $t^{\circ}\text{C}$

$R$  = ความต้านทานของสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.01 โมล/ลบ.คม. ที่วัดได้มีหน่วยเป็นโอห์ม

$t$  = อุณหภูมิของสารละลายเป็น  $^{\circ}\text{C}$ .

## ภาคผนวก ข

## ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม

## เรื่อง กำหนดวิธีการเก็บ ทำลายฤทธิ์

กำจัด ฝั ง ทิ้ง เคลื่อนย้ายและการขนส่งสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว

ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2531

ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2531) ลงวันที่ 3 สิงหาคม 2531 ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512 เรื่องหน้าที่ของผู้รับ

ใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน ซึ่งกำหนดให้ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานดำเนินการเกี่ยวกับการกำจัดสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วนั้นๆ พร้อมทั้งวิธีการเก็บทำลายฤทธิ์ กำจัด ฝั ง ทิ้ง เคลื่อนย้ายและการขนส่งตามหลักเกณฑ์แนวทางปฏิบัติและวิธีการที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

คั้งนั้น เพื่อให้สอดคล้องกับประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมดังกล่าว กรมโรงงานอุตสาหกรรมจึงวางระเบียบและวิธีการแจ้งรายละเอียดสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วไว้ดังต่อไปนี้

ข้อ 1 ให้ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานที่มีสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วเก็บสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วคั้งกล่าวภายในหรือภายนอกโรงงานให้ห่างจากที่ชุมชนหรือแหล่งน้ำสาธารณะ โดยใช้วิธีการเก็บที่มีคชคิ ปลอดภัย และไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสาธารณชนหรือผู้อยู่อาศัยใกล้เคียง

ข้อ 2 ให้ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานตามข้อ 1 ทำลายฤทธิ์และหรือทำสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุไม่ ใช่นี่แล้วให้เป็นก้อนก่อนนำไปทิ้งหรือฝั งด้วยวิธีการ ดังต่อไปนี้

## 2.1 วิธีการทำลายสิ่งปฏิภนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วเฉพาะประเภท

ประเภทสิ่งปฏิภน	วิธีการทำลายฤทธิ์
2.1.1 กากตะกอนที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากตะกอนมาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ ( $\text{HgS}$ ) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน (Solidification) ด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ผสมสารตัวเติม (Additive) ลงไปด้วย
2.1.2 กากจากการผลิตหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากที่อาจต้องผ่านการบดให้มีขนาดเล็กลงก่อน เพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ทั่วถึง มาผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้เป็นปรอทซัลไฟด์ ( $\text{HgS}$ ) แล้วจึงทำให้เป็นก้อนด้วยการผสมปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม (Additive) ผสมลงไปด้วย
2.1.3 กากตะกอน หรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว มังกานีส เป็นต้น	ใช้สารละลายด่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์( $\text{NaOH}$ ) ผสมกับกากตะกอนให้ทั่วกันจน สารโลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบของเกลือไฮดรอกไซด์ที่มีค่าพีเอช (pH) ของของผสมประมาณ 11 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ในกรณีที่เป็นกากตะกอนหรือฝุ่นที่ปนเปื้อนด้วยแคดเมียม (Cd) จะต้องทำให้เป็นก้อนต่อการผสมกับปูนซีเมนต์
2.1.4 กากตะกอนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีขาม่านแมลง ยากำจัดศัตรูพืช หรือยากำจัดเชื้อราปนเปื้อน	เติมสารละลายด่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ในปริมาณที่สามารถจะทำลายพิษของตัวยาแต่ละชนิดได้หมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 สิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน (Solidification) จะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

2.2.1 นำซึมผ่านได้ในอัตราต่ำกว่า  $1 \times 10^{-6}$  ซม./วินาที

2.2.2 รับแรงอัด (compressive strength) ได้ไม่น้อยกว่า 14 กิโลเมตรต่อตารางเซนติเมตร

2.2.3 มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

2.2.4 มีลักษณะแข็งคล้ายหิน ไม่ไหม้ไฟ ไม่มีกลิ่น

2.3 ในกรณีที่ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานตามข้อ 1 ประสงค์จะใช้วิธีการทำลายฤทธิ์และ/หรือทำให้เป็นก้อนด้วยวิธีอื่นนอกเหนือจากที่กำหนดไว้ในประกาศฉบับนี้ จะต้องแจ้งรายละเอียดพร้อมด้วยเหตุผลให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมพิจารณาอนุญาตเป็นรายๆ ไป

ข้อ 3 ให้ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานตามข้อ 1 ซึ่งตั้งโรงงานอยู่ในจังหวัด กรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ ปทุมธานี นนทบุรี นครปฐม ราชบุรี และสมุทรสาคร ที่ตั้งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วตามวิธีการและ ๗ สถานที่ซึ่งกำหนดไว้ ดังต่อไปนี้

### 3.1 ลักษณะที่ตั้งและสถานที่ฝัง (landfill)

3.1.1 สถานที่ฝังดินจะต้องมีลักษณะทางธรณีวิทยาที่เหมาะสม โดยต้องเป็นพื้นที่ไม่มีแหล่งแร่อยู่ข้างใต้ ไม่มีรอยแตกหรือเป็นโพรงของหินชั้นล่าง มีความหนาของชั้นดินระหว่างฐานของสถานที่ฝังกับระดับน้ำใต้ดินพอสมควร และมีระดับน้ำใต้ดินต่ำ

3.1.2 ไม่เป็นพื้นที่ถล่มหรือมีน้ำท่วมถึงไม่มีปัญหาเรื่องน้ำท่วมและไม่ติดต่อกับหรืออยู่ใกล้กับแม่น้ำ ลำคลอง หรือแหล่งน้ำที่ใช้ประโยชน์ได้

3.1.3 อยู่ห่างจากพื้นที่ใช้ประโยชน์ของราษฎรและชุมชน ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาหกหล่น ฟุ้งกระจาย ปัญหาการจราจระหว่างกระบวนการขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว รวมทั้งปัญหาเรื่องฝุ่น และเสียงที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการทำงาน

3.1.4 มีเนื้อที่กว้างขวางพอที่จะใช้ฝังได้นานตั้งแต่ 5 ปีขึ้นไป

## 3.2 การออกแบบสถานที่ฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว

หลุมที่จะใช้ฝังต้องได้รับการเตรียมการไว้ ดังต่อไปนี้คือ

3.2.1 ต้องทำการบุด้านล่างและด้านข้างโดยรอบของหลุมที่จะใช้ฝัง (landfill) ด้วยวัสดุกันซึม (liner) เพื่อป้องกันการซึมผ่านของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วออกสู่หน้าผิวดิน หรือน้ำผิวดินที่อยู่ใกล้เคียง โดยวัสดุนี้ต้องมีความแข็งแรง และหนาเพียงพอที่จะทนต่อการรับน้ำหนัก และแรงดันที่จะเกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งวัสดุกันซึมดังกล่าวอาจจะเป็นวัสดุที่สังเคราะห์เพื่อใช้งานโดยเฉพาะ หรือเป็นวัสดุที่มีอยู่ตามธรรมชาติเช่น ดินเหนียว ที่ยอมให้มีอัตราการซึมผ่านของน้ำ (permeability) ได้ไม่เกินกว่า  $1 \times 10^{-7}$  เซนติเมตรต่อวินาที (ประมาณ 0.1 ฟุตต่อปี) หรืออาจจะใช้วัสดุกันซึมทั้งสองประเภทประกอบกันก็ได้

3.2.2 ระดับก้นหลุมของสถานที่ฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วจะต้องอยู่สูงจากระดับน้ำใต้ดินไม่น้อยกว่า 5 ฟุต

3.2.3 ต้องมีระบบรวมน้ำเสียที่เกิดขึ้นภายในหลุมที่ใช้ฝังและมีระบบบำบัดน้ำเสียหรือนำน้ำเสีย (leachate) ที่เกิดขึ้นออกไปบำบัดที่อื่น

3.2.4 เมื่อเลิกใช้หลุมที่ฝังแล้ว ให้ทำการปิดหลุมชั้นสุดท้ายด้วยวัสดุกันซึมเพื่อป้องกันการซึมของน้ำหรือของเหลวอื่นๆ เข้าสู่หลุมฝัง แล้วปูทับด้วยดินอีกชั้นหนึ่ง พร้อมทั้งปลูกพืชคลุมดิน เพื่อลดความรุนแรงของการพังทลายของดินอันเกิดจากฝนและลม พร้อมทั้งจัดให้มีการระบายน้ำฝนหรือน้ำที่จะไหลบ่าผ่าน ให้ออกจากบริเวณหลุมฝังได้อย่างรวดเร็ว และเหมาะสม

3.2.5 ในกรณีที่ใช้ดินเหนียวปูเป็นวัสดุกันซึม ดินเหนียวต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า 60 เซนติเมตร โดยทำการบดอัดดินเหนียวให้แน่นที่ระดับความหนา 30 เซนติเมตร และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ใช้วัสดุอื่นเป็นวัสดุกันซึมหรือจะต้องมีการจัดการเป็นพิเศษ จะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรมเป็นกรณีๆ ไป

3.2.6 วัสดุกันซึมที่ใช้ปิดหลุมฝังจะต้องเป็นวัสดุชนิดและความหนาเดียวกับวัสดุกันซึมชั้นล่าง ส่วนชั้นดินปลูกพืชตอนบนต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 150 เซนติเมตร และระหว่างชั้นทั้งสองนี้อาจจะให้มีชั้นทรายเพื่อเป็นมาตรการเสริมในการระบายน้ำออกจากส่วนบนของบริเวณที่ใช้ฝังการให้เร็วยิ่งขึ้นก็ได้

3.2.7 พืชที่ปลูกคลุมดินจะต้องเป็นพืชประเภทรากสั้น หรือมีเอกสารพิสูจน์ได้ว่าความยาวที่สุดของรากจะยาวนานน้อยกว่า 150 เซนติเมตร

3.2.8 ต้องจัดสร้างบ่อสังเกตการณ์เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะของน้ำใต้ดินในบริเวณใกล้เคียงตามขนาดและจำนวนที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมเห็นชอบ เพื่อตรวจสอบติดตามผล การดำเนินงาน สถานที่ฝัง ตลอดช่วงเวลาที่ใช้งานอยู่ และน้ำใต้ดินจะต้องมีคุณลักษณะไม่เกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

ชนิดของสาร	ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
อาร์เซนิก	0.05
แคดเมียม	0.01
โครเมียม	0.05
ตะกั่ว	0.05
ปรอท	0.001
นิกเกิล	0.05
แมงกานีส	0.3
ทองแดง	1.0
สังกะสี	5.0

### 3.3 การดำเนินการฝังต้องดำเนินการ ดังต่อไปนี้

3.3.1 จดบันทึกและรายงานเกี่ยวกับรายละเอียดในการดำเนินการ โดยแจ้งชนิด/ประเภท ปริมาณ และวิธีการฝัง รวมทั้งการจัดแบ่งการทิ้งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในแต่ละบริเวณ(cell)ของหลุม เก็บไว้เป็นหลักฐานพร้อมที่จะให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมตรวจสอบได้ทุกเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ต้องแจ้งให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมทราบทันทีในกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินหรืออุบัติเหตุเกี่ยวกับการรั่วไหลของสิ่งปนื้อหรือวัสดุไม่ใช้แล้ว และจะต้องแก้ไขเหตุฉุกเฉินหรืออุบัติเหตุ นั้นให้พ้นจากภาวะอันตราย ตามวิธีการและภายในระยะเวลาที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

3.3.3 เมื่อเลิกใช้บริเวณฝังสิ่งปนื้อหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในบางส่วน (cell) เป็นการชั่วคราว ต้องจัดให้มีการปิดคลุมด้วยดินเหนียว หรือปิดคลุมด้วยดินและปลูกหญ้ากันการฟุ้งกระจาย หรือปิดคลุมด้วยวัสดุกันซึมอื่นๆ และจัดระบบระบายน้ำออกจากพื้นที่นั้นให้เพียงพอ

3.3.4 การฝังสิ่งปนื้อหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทที่อาจทำปฏิกิริยาเคมีรุนแรงต่อกัน (incompatible wastes) ไว้ในสถานที่แห่งเดียวกัน จะต้องจัดให้มีมาตรการป้องกัน มิให้เกิดการสัมผัสหรือการผสมรวมตัวกันซึ่งอาจจะทำให้เกิดปฏิกิริยารุนแรงขึ้นได้

3.3.5 ในกรณีที่จำเป็นต้องฝังสิ่งปนื้อหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเหลวจะต้องบรรจุของเหลวในภาชนะที่ทนการกัดกร่อน และมีฝาปิดมิดชิด และจะต้องบรรจุภาชนะด้วยสารดูดซับ (absorbent) อีกชั้นหนึ่ง

#### 3.4 การตรวจสอบติดตามผลและบำบัด

3.4.1 ให้ตรวจสอบคุณภาพน้ำใต้ดินที่เก็บจากบ่อตรวจสอบอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มดำเนินการฝัง ระหว่างดำเนินการฝังและหลังจากปิดการฝังขั้นสุดท้าย โดยเก็บตัวอย่างน้ำก่อนทำการฝังอย่างน้อย 2 ครั้ง เพื่อจดบันทึกสำหรับใช้เปรียบเทียบ และถ้าหากผลการตรวจสอบพบว่าคุณลักษณะของน้ำใต้ดินเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ จะต้องทำการแก้ไขทันที พร้อมทั้งแจ้งให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมทราบ

3.4.2 ให้ตรวจสอบคุณลักษณะของน้ำเสียในบ่อรวบรวมทุกครั้งก่อนปล่อยทิ้งไป ถ้าพบว่ามีความสกปรกเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม จะต้องทำการบำบัดจนมีคุณลักษณะเป็นไปตามมาตรฐานนั้นเสียก่อน

ข้อ 4 ให้ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานตามข้อ 1 ที่ตั้งโรงงานอยู่ในเขตอื่นนอกเหนือจากที่กล่าวไว้ในข้อ 3 ทำการทิ้งสิ่งปนื้อหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วด้วยวิธีการและ ณ สถานที่ที่เหมาะสมและปลอดภัยเป็นไปตามหลักเกณฑ์และเงื่อนไขทางวิชาการ ทั้งนี้ให้แจ้งรายละเอียดวิธีการและสถานที่ทิ้งดังกล่าวให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมพิจารณาความเหมาะสมเป็นรายๆ ไป

**ข้อ 5 ให้ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานตามข้อ 1 ทำการเคลื่อนย้ายและขนส่งสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วด้วยวิธีการ ดังต่อไปนี้**

**5.1 ยานพาหนะที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายและขนส่ง ต้องบรรทุกสิ่งปฏิภูลหรือบรรทุกวัสดุที่ไม่ใช้แล้วได้อย่างมิดชิด ไม่มีการรั่วไหล ตกหล่นหรือทิ้งกระจายได้**

**5.2 ห้ามมิให้เคลื่อนย้ายและขนส่งสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วประเภทที่อาจทำปฏิกิริยาเคมีรุนแรงต่อกัน รวมไปถึงในยานพาหนะเดียวกัน โดยไม่มีมาตรการป้องกันการเกิดปฏิกิริยารุนแรงดังกล่าว**

**5.3 ชนิดของภาชนะบรรจุสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วสำหรับการเคลื่อนย้ายและขนส่ง จะต้องเหมาะสมกับสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้นๆ**

**5.4 จัดให้มีมาตรการเพื่อความปลอดภัยในการขนส่ง รวมทั้งมาตรการแก้ไขเหตุฉุกเฉินในกรณีเกิดอุบัติเหตุหรือหกล้มในระหว่างการเคลื่อนย้ายและขนส่งอย่างเพียงพอ**

**ข้อ 6 วิธีการสกัด (Extraction Procedure) และการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำสกัด ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้**

**6.1 บดตัวอย่างสิ่งปฏิภูลให้เป็นผงละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดของสิ่งปฏิภูลระหว่าง 0.5 มิลลิเมตร ถึง 5 มิลลิเมตร**

**6.2 นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 6.1 หนัก 50 กรัม ใส่ในถ้วยโลหะซึ่งประกอบด้วย น้ำกลั่นผสมกับกรดไฮโดรคลอริก และปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จนมีความเป็นกรด ค่าระหว่าง 5.8 ถึง 6.3 ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายเป็น 10 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่างสิ่งปฏิภูล**

**6.3 เขย่าบนเครื่องเขย่า (Agitator) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบ/นาที ที่ช่วงกว้างของการเขย่า 5 เซนติเมตร**

**6.4 กรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรู 1 ไมครอน**

**6.5 นำของเหลวที่ได้ ไปวิเคราะห์หาค่าสารมลพิษต่างๆ ตามวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้ง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อ 7 การแจ้งรายละเอียดมาตรการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

7.1 ให้ผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานตามข้อ 1 ส่งเอกสารดังต่อไปนี้ แนบมาพร้อมแบบแจ้งรายละเอียดมาตรการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วของโรงงาน

- แผนที่แสดงที่ตั้งโรงงาน บริเวณกำจัดสิ่งปฏิกูลและสถานที่ทิ้ง สิ่งกาก
- แผนการดำเนินงาน เช่น วิธีการเก็บ วิธีการและเส้นทางการขนส่ง วิธีการทำลายฤทธิ์ วิธีการทิ้งหรือฝัง ตลอดจนการจกบันทึกและติดตามผล
- แผนการแก้ไขเหตุฉุกเฉินและมาตรการรักษาความปลอดภัยในการขนส่ง

7.2 ให้แจ้งรายละเอียดตามข้อ 7.1 ภายใน 90 วัน หลังจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2531) มีผลใช้บังคับ และทุกครั้งเมื่อมีการยื่นคำขอต่ออายุใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน ตามมาตรา 17 หรือเมื่อยื่นคำขอรับใบอนุญาตขยายโรงงาน ตามมาตรา 21 แห่งพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512

7.3 การแจ้งรายละเอียดดังกล่าว ให้ใช้แบบตามที่กำหนดไว้ท้ายประกาศนี้

ประกาศ ณ วันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2531

(นายพิศาล คงสำราญ)

อธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม

## ตาราง ก. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชัน (ORP) ของน้ำตัวอย่าง 1

ที่ pH=10 และ t=30 C

เวลา(นาที)	ORP (mv)	เวลา(นาที)	ORP (mv)	เวลา(นาที)	ORP (mv)
0	-1538.5	41	-909.5	81	-858.2
1	-1528.8	42	-912.6	82	-869
2	-1512	43	-911.9	83	-875.6
3	-1492.9	44	-910.9	84	-873.6
4	-1480.2	45	-908.5	85	-877.1
5	-1464.9	46	-898.3	86	-876.4
6	-1458	47	-896.5	87	-874.4
7	-1442.6	48	-883.1	88	-874.3
8	-1440.3	49	-876.2	89	-871
9	-1440.8	50	-860.5	90	-869.4
10	-1445.4	51	-850.4	91	-868.6
11	-1447.9	52	-842.6	92	-868.7
12	-1453.4	53	-833.9	93	-866.3
13	-1455.4	54	-801.8	94	-866.6
14	-1498.8	55	-744.2	95	-864.4
15	-1443.5	56	-731.1	96	-862
16	-1431.5	57	-715.6	97	-859
17	-1421.9	58	-699.8	98	-862.1
18	-1400	59	-675.2	99	-857.8
19	-1090.7	60	-656.2	100	-853.8
20	-1367.7	61	-635.6	101	-851.9
21	-1362.9	62	-606.5	102	-851.3
22	-1309.5	63	-550.4	103	-848.2
23	-1263.3	64	-341.6	104	-845.5
24	-1219.6	65	-241.6	105	-843.5
25	-1166.5	66	-233.3	106	-841
26	-1122.4	67	-233.4	107	-838.8
27	-1067	68	-237.8	108	-840.5
28	-1031.5	69	-244.7	109	-841.2
29	-990.9	70	-252.3	110	-833.8
30	-959.8	71	-265.9	111	-827.6
31	-931.5	72	-266.4	112	-826.6
32	-914.4	73	-316.3	113	-823.2
33	-921.8	74	-366.5	114	-821.2
34	-918.3	75	-420.8	115	-818.1
35	-910.7	76	-479.3	116	-817.3
36	-913	77	-535.4	117	-814.5
37	-919.6	78	-590.5	118	-810.3
38	-927.9	79	-628.1	119	-807.4
39	-908.2	80	-645	120	-806.6
40	-914.2				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชัน (ORP) ของน้ำตัวอย่าง 2

ที่ pH=10 และ t=30 C

เวลา(นาที)	ORP(mv)	เวลา(นาที)	ORP(mv)	เวลา(นาที)	ORP(mv)
0	-960.2	41	-1024.5	81	-910
1	-1090.1	42	-1023.1	82	-909.4
2	-1085.1	43	-1022.7	83	-908.4
3	-1089.5	44	-1020.9	84	-905.5
4	-1062.1	45	-1019.2	85	-903.5
5	-1031.5	46	-1018.8	86	-901.8
6	-1001.5	47	-1016	87	-899.7
7	-975.4	48	-1015.5	88	-897.1
8	-935.3	49	-1013.2	89	-895.7
9	-873.1	50	-1012.2	90	-895.7
10	-818.2	51	-1010	91	-893.4
11	-859.2	52	-1007.6	92	-889.8
12	-922.9	53	-1004.3	93	-885.5
13	-964.7	54	-1000.5	94	-884.1
14	-993.1	55	-997.3	95	-880.7
15	-1012.3	56	-992.6	96	-877.5
16	-1019.8	57	-987.2	97	-872.3
17	-1022.7	58	-983.2	98	-868.6
18	-1024.4	59	-977.5	99	-862.4
19	-1029	60	-974.6	100	-854.3
20	-1033	61	-969.7	101	-847.5
21	-1031.2	62	-966	102	-837.3
22	-1031.1	63	-961.1	103	-825.7
23	-1030.5	64	-955.6	104	-810.2
24	-1030.1	65	-952.6	105	-795.6
25	-1028.3	66	-948.4	106	-783.4
26	-1029.1	67	-944.2	107	-772.4
27	-1028.3	68	-942.6	108	-763.3
28	-1028.5	69	-938.5	109	-754.3
29	-1027.8	70	-934.6	110	-744.8
30	-1028.5	71	-931.2	111	-728.4
31	-1028.5	72	-929.8	112	-724
32	-1025.2	73	-926.7	113	-717.6
33	-1024.5	74	-924.3	114	-712.4
34	-1022.1	75	-923.2	115	-707.2
35	-1020.5	76	-919.9	116	-701.8
36	-1023	77	-919.3	117	-697.4
37	-1024.4	78	-918	118	-690.1
38	-1029.1	79	-915.1	119	-688
39	-1025.5	80	-912.8	120	-684.9
40	-1024.1				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชัน (ORP) ของน้ำตัวอย่าง

ที่ pH=10 และ t=30 C

เวลา(นาที)	ORP(mv)	เวลา(นาที)	ORP(mv)	เวลา(นาที)	ORP(mv)
0	-672.9	41	-546.2	81	-504.8
1	-741.7	42	-539.6	82	-508.1
2	-874.6	43	-539.6	83	-515.8
3	-919	44	-534	84	-529.1
4	-944.9	45	-528.6	85	-532.9
5	-973.6	46	-523.2	86	-537
6	-972.2	47	-520.8	87	-542
7	-955.2	48	-517.5	88	-543.1
8	-925.9	49	-515.1	89	-554.1
9	-895.3	50	-514	90	-566
10	-887.9	51	-511.9	91	-585.3
11	-897.8	52	-510	92	-601.1
12	-913.2	53	-508.5	93	-621.6
13	-924.3	54	-507.4	94	-635.7
14	-927.9	55	-505.4	95	-648.6
15	-927.4	56	-505.6	96	-657.9
16	-916	57	-504.3	97	-674
17	-909.1	58	-502	98	-682.9
18	-898.9	59	-498.2	99	-690.7
19	-888.8	60	-496.3	100	-697
20	-875	61	-495.3	101	-701.6
21	-809.5	62	-494.6	102	-706.2
22	-772.8	63	-493.7	103	-709.8
23	-744.8	64	-492.8	104	-712.5
24	-729.4	65	-491	105	-715
25	-712.7	66	-490.6	106	-715
26	-694	67	-489	107	-715.3
27	-681.7	68	-488.2	108	-716.2
28	-672.9	69	-488.5	109	-716.1
29	-660.7	70	-489.3	110	-715.1
30	-653.5	71	-489.2	111	-714.4
31	-643.4	72	-489.1	112	-713.9
32	-632.5	73	-489.1	113	-713.3
33	-621.7	74	-493.2	114	-712.5
34	-611.9	75	-492.8	115	-712.1
35	-601.2	76	-493.9	116	-712.3
36	-592.1	77	-494.7	117	-710.4
37	-580.8	78	-494.9	118	-709.6
38	-570.7	79	-495	119	-710.3
39	-561.2	80	-504.2	120	-710.8
40	-553.6				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชัน(ORP)ของน้ำตัวอย่าง1  
ที่ pH=10 และ t=70 C

เวลา(นาที)	ORP(mv)	เวลา(นาที)	ORP(mv)	เวลา(นาที)	ORP(mv)
0	-1008.6	41	-875.9	81	-778.2
1	-1101.6	42	-869.5	82	773.4
2	-1120.5	43	-864.5	83	775.5
3	-1127.3	44	-859.3	84	774.7
4	-1128.6	45	-854.5	85	773.7
5	-1125.6	46	-850.2	86	772.4
6	-1122.2	47	-846.8	87	770.6
7	-1116.9	48	-843.7	88	769
8	1111.3	49	-841.1	89	767.8
9	-1104.6	50	-838.1	90	765.1
10	-1098.4	51	-836.9	91	-763.4
11	-1091.6	52	-835.1	92	-761.5
12	-1083.1	53	-833.5	93	-760.6
13	-1078.4	54	-832	94	-759.7
14	-1071.4	55	-830.6	95	-759.7
15	-1064.2	56	-829.4	96	-757.6
16	-1056.5	57	-827.9	97	-755.4
17	-1043.6	58	-826.5	98	-753.2
18	-1038.1	59	-825.3	99	-751
19	-1032.3	60	-824.1	100	-744.4
20	-1027.8	61	-822.6	101	-744
21	-1023.5	62	-821.4	102	-742.5
22	-1019.4	63	-820	103	-741.8
23	-1014.8	64	-798.7	104	-740.4
24	-1011.1	65	-773.4	105	-739.7
25	-1007.6	66	-774.6	106	-739.2
26	-1004.2	67	-763.2	107	-738.8
27	-1000.1	68	-764.5	108	-738.6
28	-993.6	69	-760.4	109	-738.4
29	-991.5	70	-761.5	110	-737.2
30	-980.1	71	-765.1	111	-737.1
31	-947.5	72	-763.1	112	-737.1
32	-950.2	73	-750.4	113	-737
33	-943.5	74	-752.2	114	-736.9
34	-934.2	75	-753.2	115	-736.7
35	-922.1	76	-755.4	116	-735.4
36	-913.7	77	-761.6	117	-734.3
37	-905.2	78	-744.1	118	-733.8
38	-906.3	79	-766.2	119	-733.5
39	-890.2	80	-776.3	120	-733.1
40	-882.6				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง จ. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชัน(ORP)ของน้ำตัวอย่าง2  
ที่ pH=10 และ t=70 C

เวลา(นาที)	ORP(mv)	เวลา(นาที)	ORP(mv)	เวลา(นาที)	ORP(mv)
0	-891.4	41	-1038.3	81	-942.1
1	-1032.1	42	-1039	82	-815
2	-1031.2	43	-1039.7	83	-785.1
3	-1025.9	44	-1040	84	-760.2
4	-1020.5	45	-1040.2	85	-741.5
5	-1011.4	46	-1039.4	86	-726.3
6	-1012.3	47	-1039.2	87	-714.4
7	-1008.1	48	-1038.5	88	-701.8
8	-1003.9	49	-1037.4	89	-688.5
9	-1000.1	50	-1036.9	90	-673.8
10	-999	51	-1035	91	-650
11	-998	52	-1033.3	92	-612
12	-997.2	53	-1032.2	93	-564.2
13	-997.2	54	-1031	94	-531.4
14	-996.9	55	-1029.3	95	-511.5
15	-996.6	56	-1028.5	96	-500.9
16	-996	57	-1027.3	97	-508.7
17	-996.1	58	-1026.2	98	-514.2
18	-995.9	59	-1024.6	99	-518.4
19	-996.6	60	-1022.9	100	-521.7
20	-976.4	61	-1000.8	101	-521.2
21	-990.4	62	-999.1	102	-523.2
22	-994.8	63	-997.1	103	-525.4
23	-997.6	64	-994.9	104	-526.4
24	-999.8	65	991.7	105	-526
25	-1001.8	66	-987.3	106	-529.7
26	-1004.1	67	-978.9	107	-531.1
27	-1008.1	68	-974.4	108	-532.8
28	-1011	69	-970.6	109	-533.6
29	-1015.1	70	-966	110	-534.5
30	-1018.8	71	-960.4	111	-535.7
31	-1021.8	72	-955.8	112	-536.3
32	-1024	73	-950.5	113	-536.9
33	-1025.9	74	-944.8	114	-537.7
34	-1028	75	-938	115	-538.8
35	-1031.5	76	-928.1	116	-539.4
36	-1032.8	77	-918.5	117	-540
37	-1033.8	78	-901.8	118	-540.7
38	-1033.7	79	-984.4	119	-541.6
39	-1034.8	80	-964.2	120	-542
40	-1036.6				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

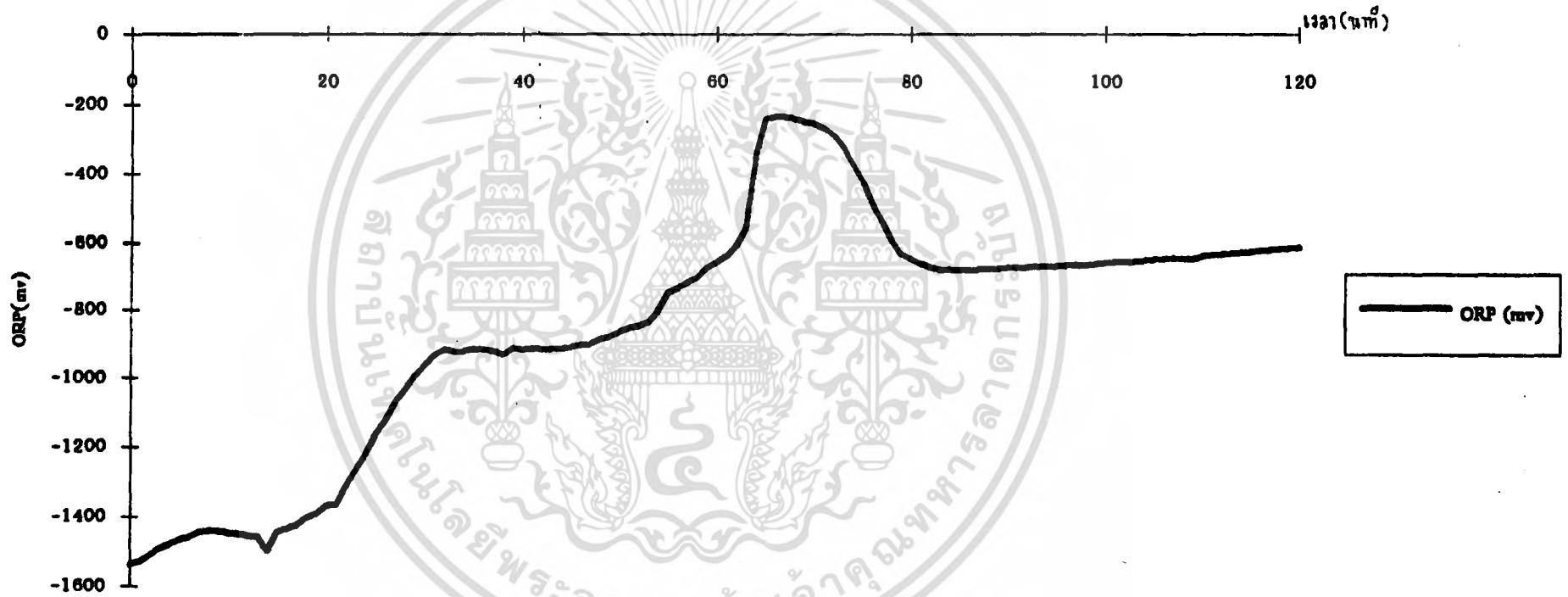
ตาราง ฉ. แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ออกซิเดชัน(ORP)ของน้ำตัวอย่าง3

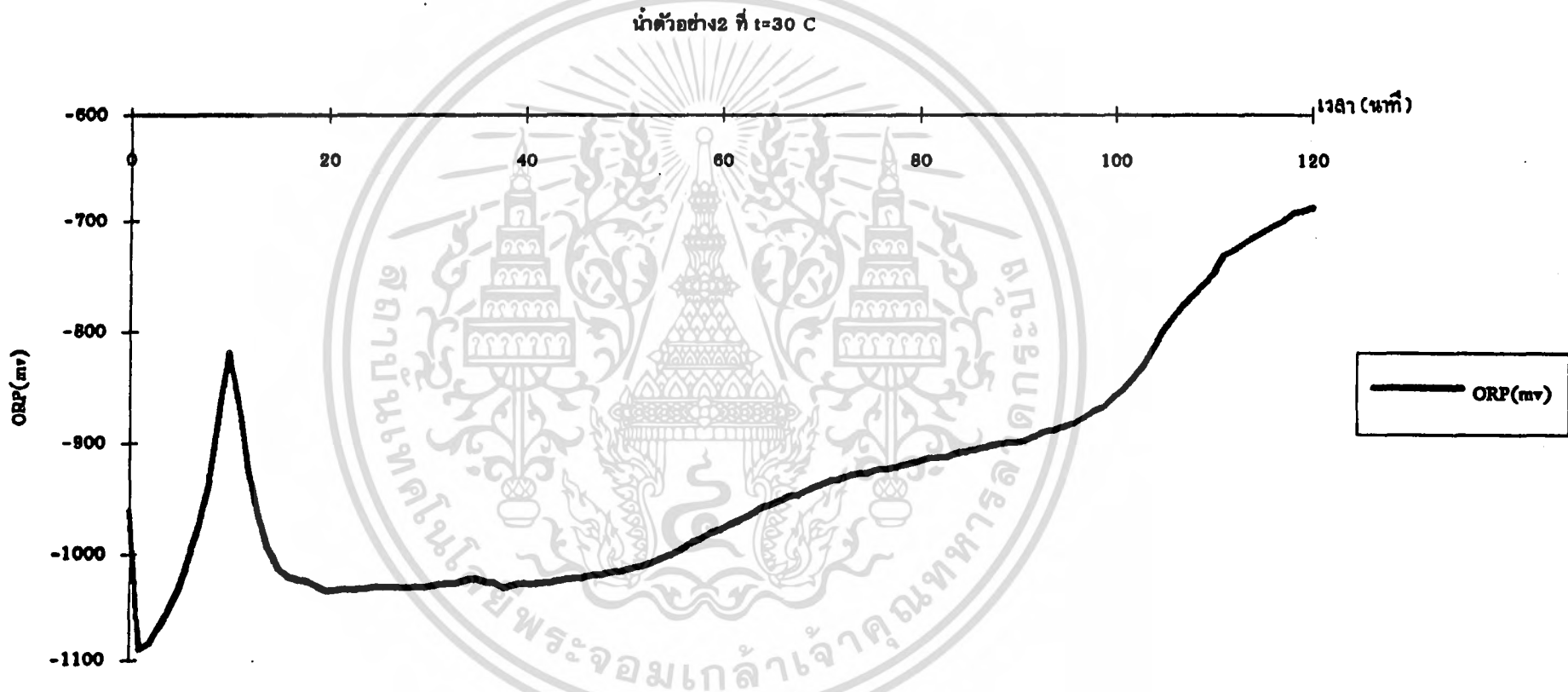
ที่ pH=10 และ t=70 C

เวลา(นาที)	ORP(mv)	เวลา(นาที)	ORP(mv)	เวลา(นาที)	ORP(mv)
0	-1009.7	41	-749.9	81	-651.3
1	-1027	42	-745.6	82	-641.8
2	-1015.5	43	-743.3	83	-639.9
3	-1002.9	44	-740.4	84	-639.2
4	-990	45	-738.5	85	-639.3
5	-975.8	46	-734.7	86	-640.1
6	-950.8	47	-729.9	87	-641.1
7	-938.1	48	-732.4	88	-642
8	-930.9	49	-730.6	89	-643.4
9	-895.5	50	-729.1	90	-645.9
10	-885.6	51	-727.8	91	-648.3
11	-877.7	52	-727.7	92	-650.2
12	-856.9	53	-725.6	93	-652
13	-863	54	-718.1	94	-652.7
14	-864.8	55	-717.9	95	-652.5
15	-847	56	-717.7	96	-649
16	-854.8	57	-717.1	97	-635
17	-839.1	58	-714.8	98	-616.8
18	-876.2	59	-714	99	-592.8
19	-882	60	-714	100	-575.1
20	-860.2	61	-719.6	101	-535.6
21	-851.8	62	-710.2	102	-514.7
22	-840.5	63	-705.1	103	-504.9
23	-835.1	64	-704.7	104	-527.3
24	-820.9	65	-704.1	105	-539.7
25	-819	66	-704.1	106	-55.1
26	-810.7	67	-704.4	107	-567
27	-796.3	68	-701.3	108	-576.9
28	-790	69	-698.5	109	-588
29	-774.8	70	-696.5	110	-598
30	-784.3	71	-693.6	111	-602.7
31	-777.4	72	-690.6	112	-609.7
32	-790.8	73	-688	113	-614.2
33	-775.4	74	-684.8	114	-617.4
34	-766.7	75	-681.7	115	-620.6
35	-764.2	76	-677.8	116	-625.5
36	-753.4	77	-673.5	117	-627.1
37	-756.2	78	-669.4	118	-628.8
38	-754.4	79	-662.7	119	-630.1
39	-751.8	80	-656.1	120	-636
40	-749.8				

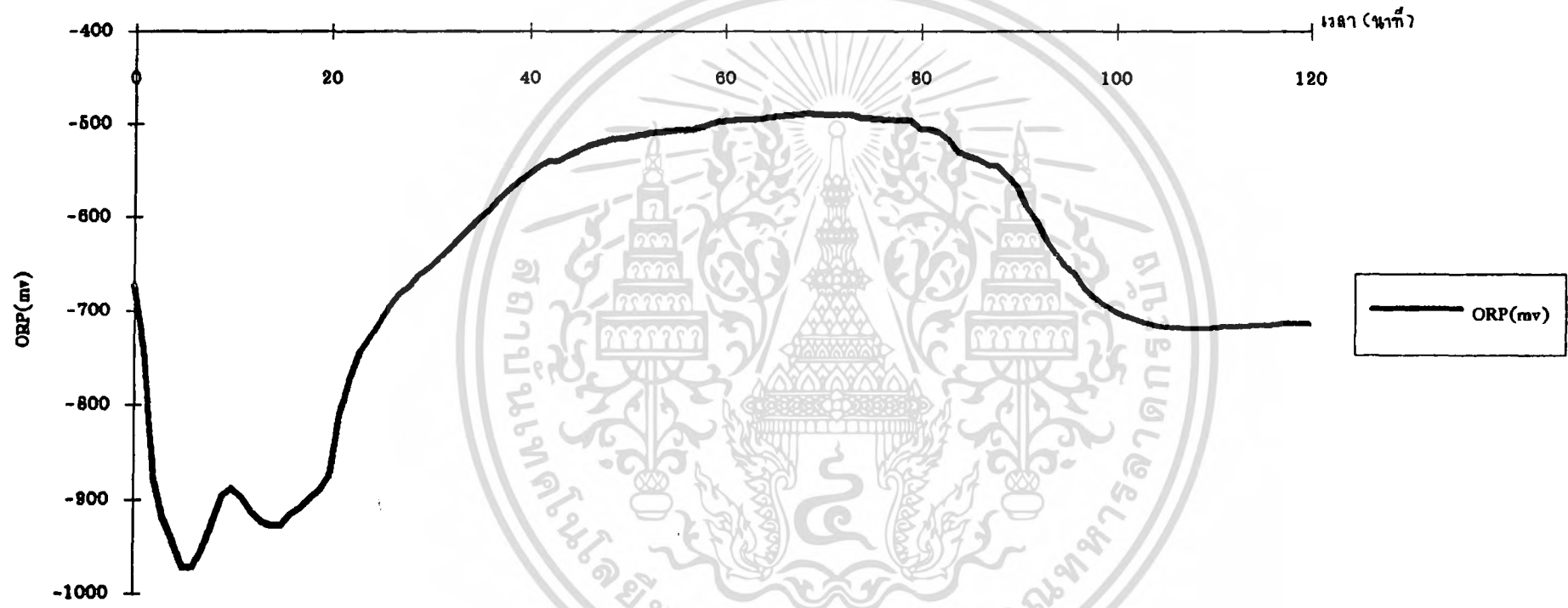
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำตัวอย่าง 1 ที่  $t=30\text{ C}$

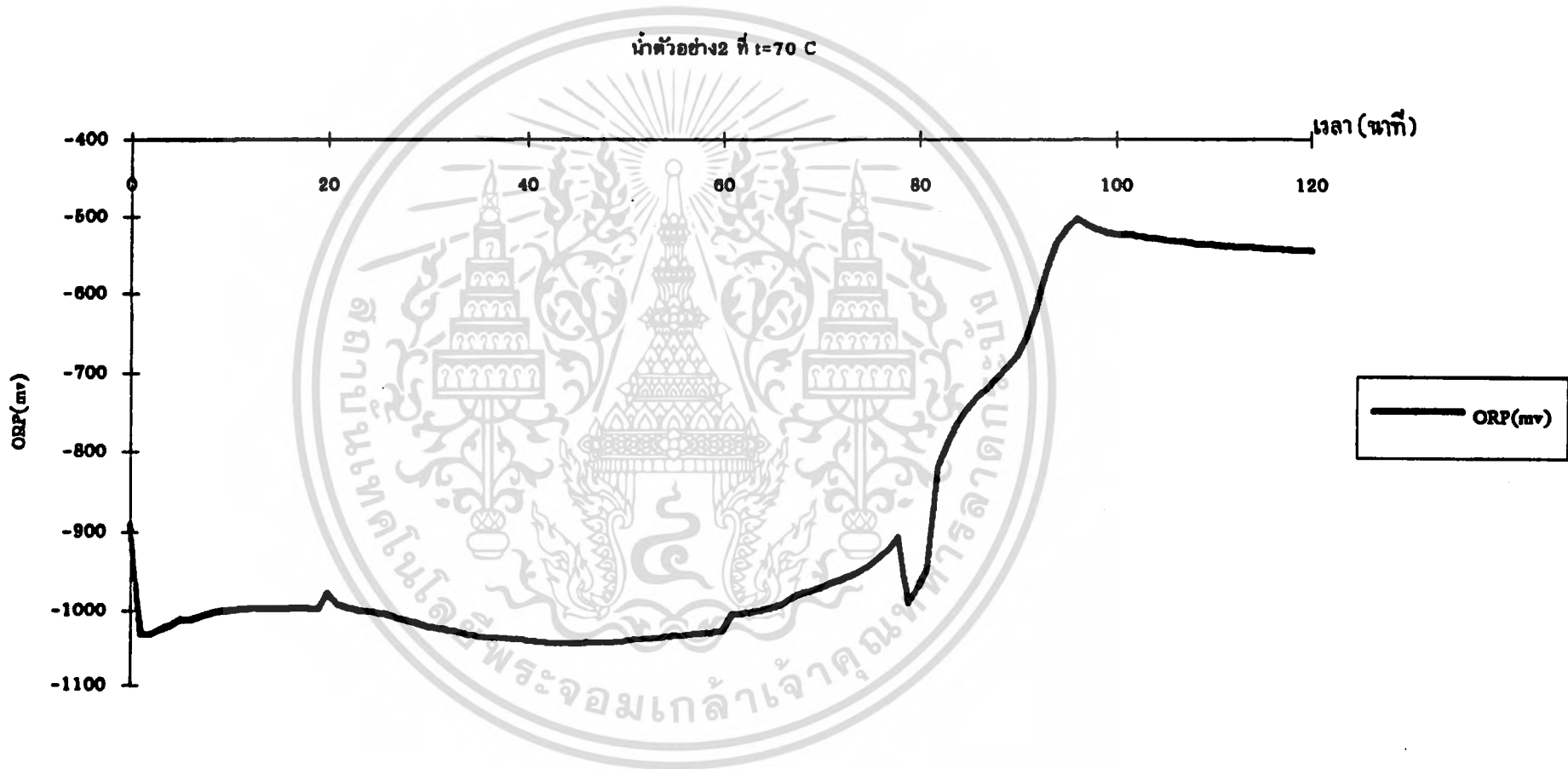




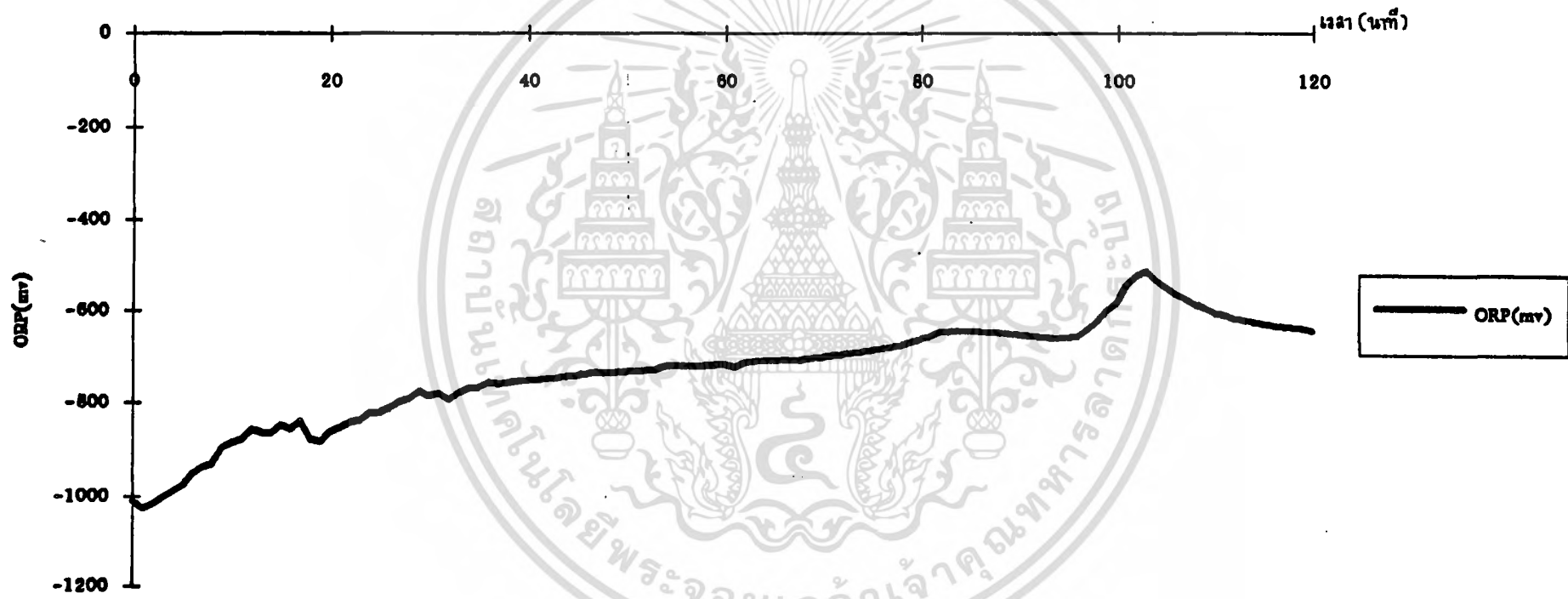
น้ำตัวอย่าง 3 ที่  $t=30\text{ C}$



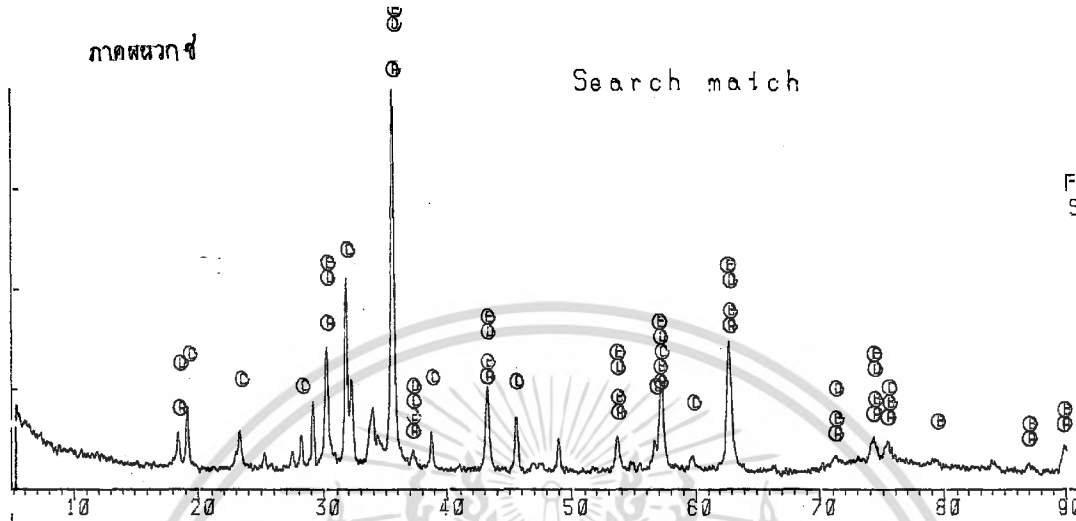




น้ำตัวอย่างที่  $T=70\text{ C}$



File name : B:#1.PK  
Sample name :



Measured peak

B:#1.PK 1 -2 -1996

(A)

190629 FE3 O4

\*4

MAGNETITE, SYN

(B)

340140 FE CR2 O4

\*4

CHROMITE, SYN

(C)

261319 K FE O2

I

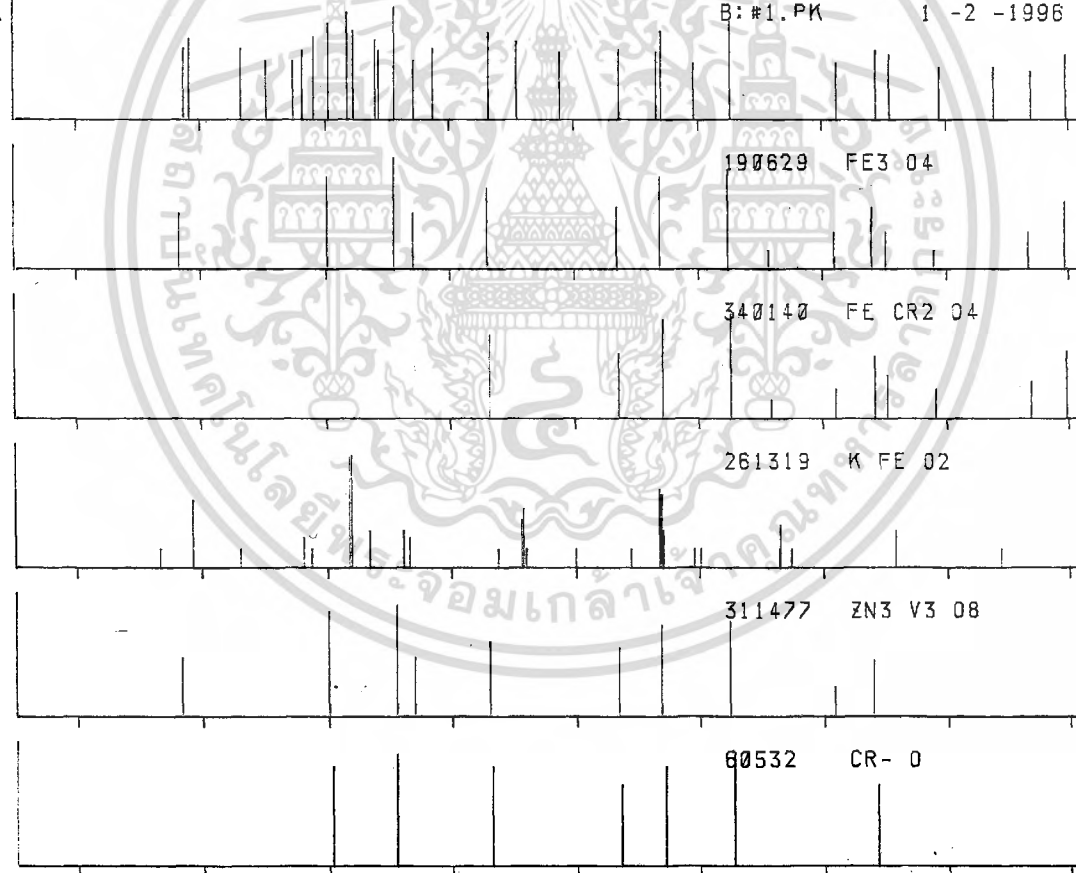
(D)

311477 ZN3 V3 O8

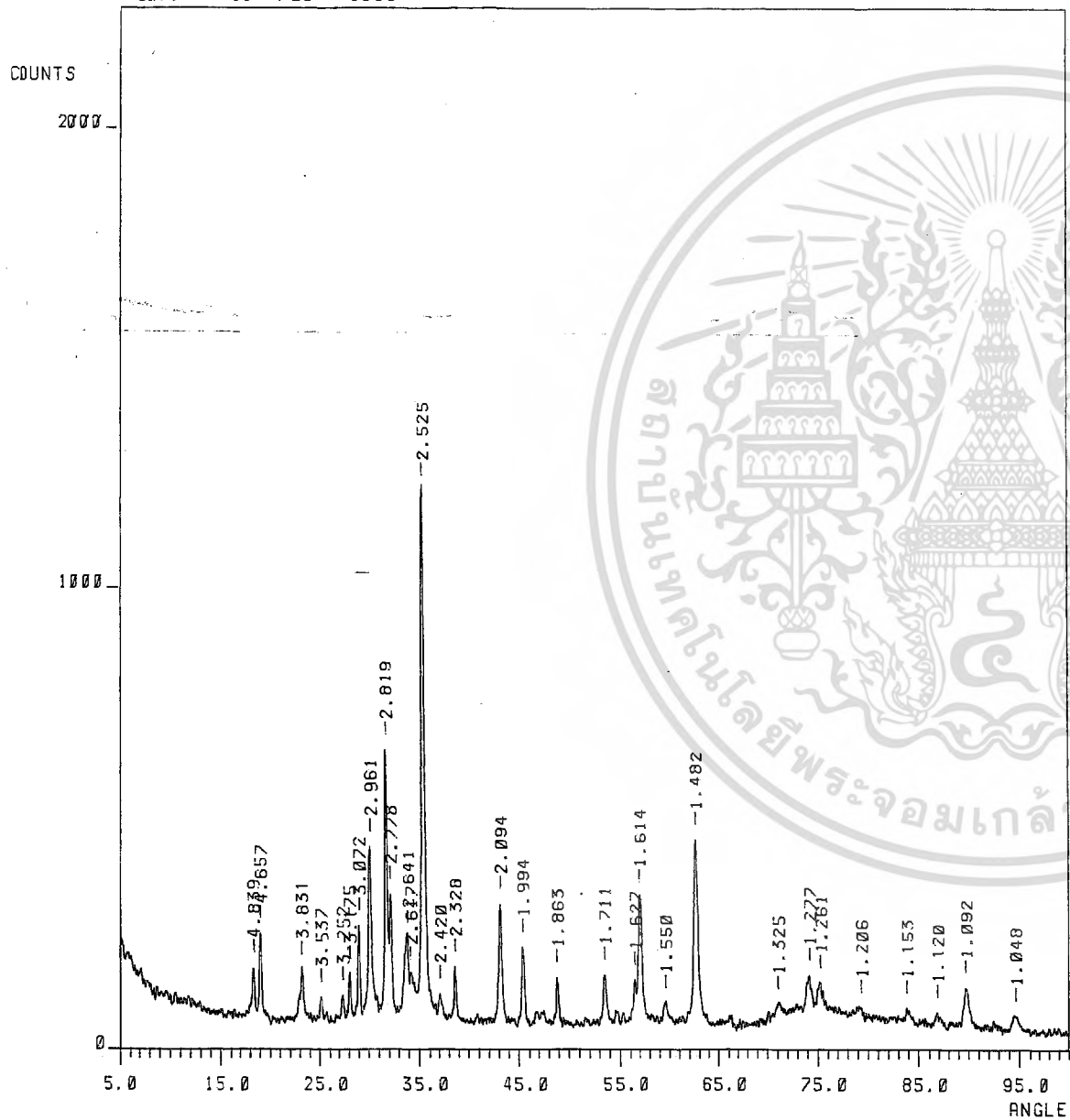
I

(E)

80532 CR- O



File : #1.SM  
Date : 01-FEB-1996

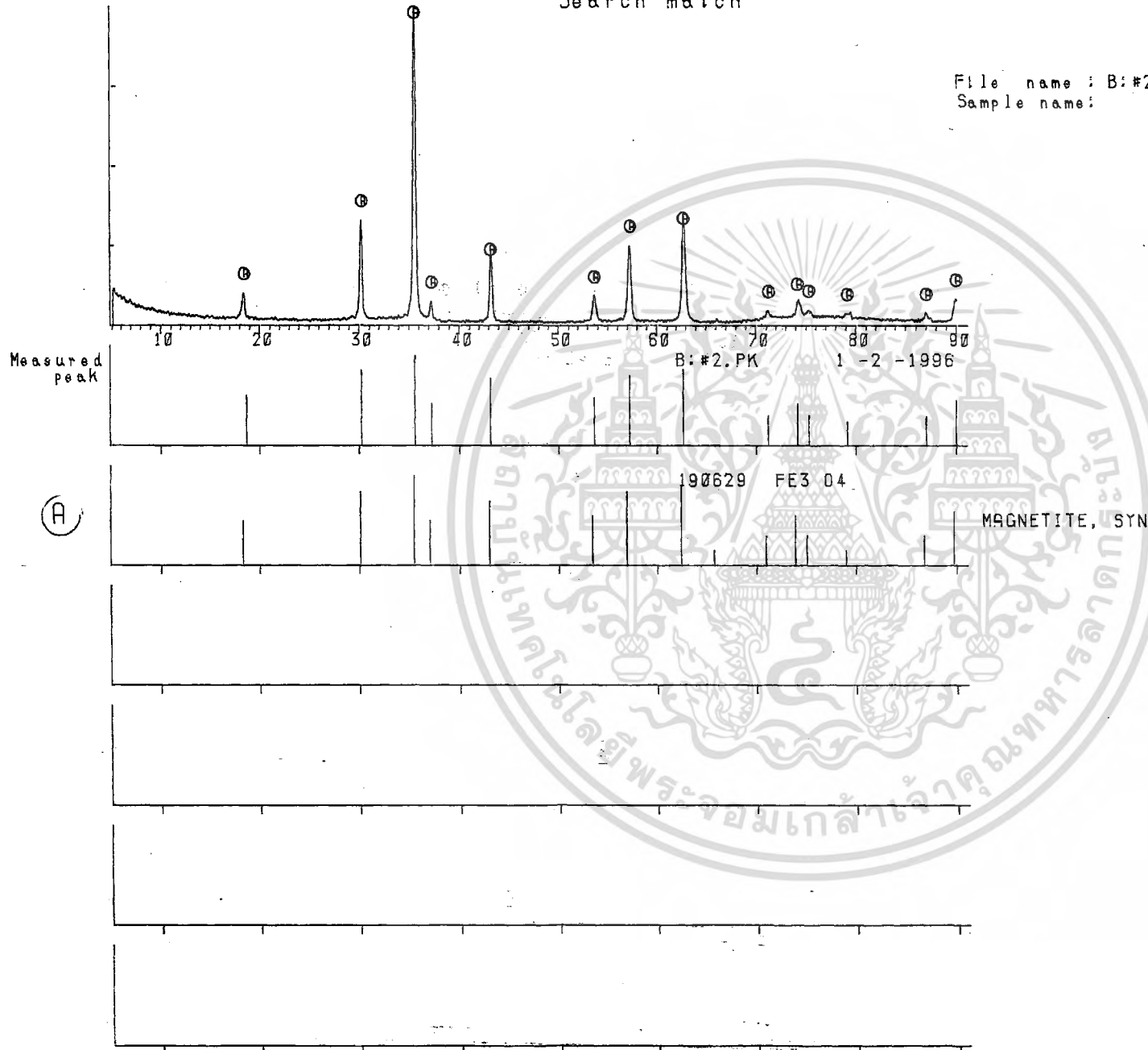


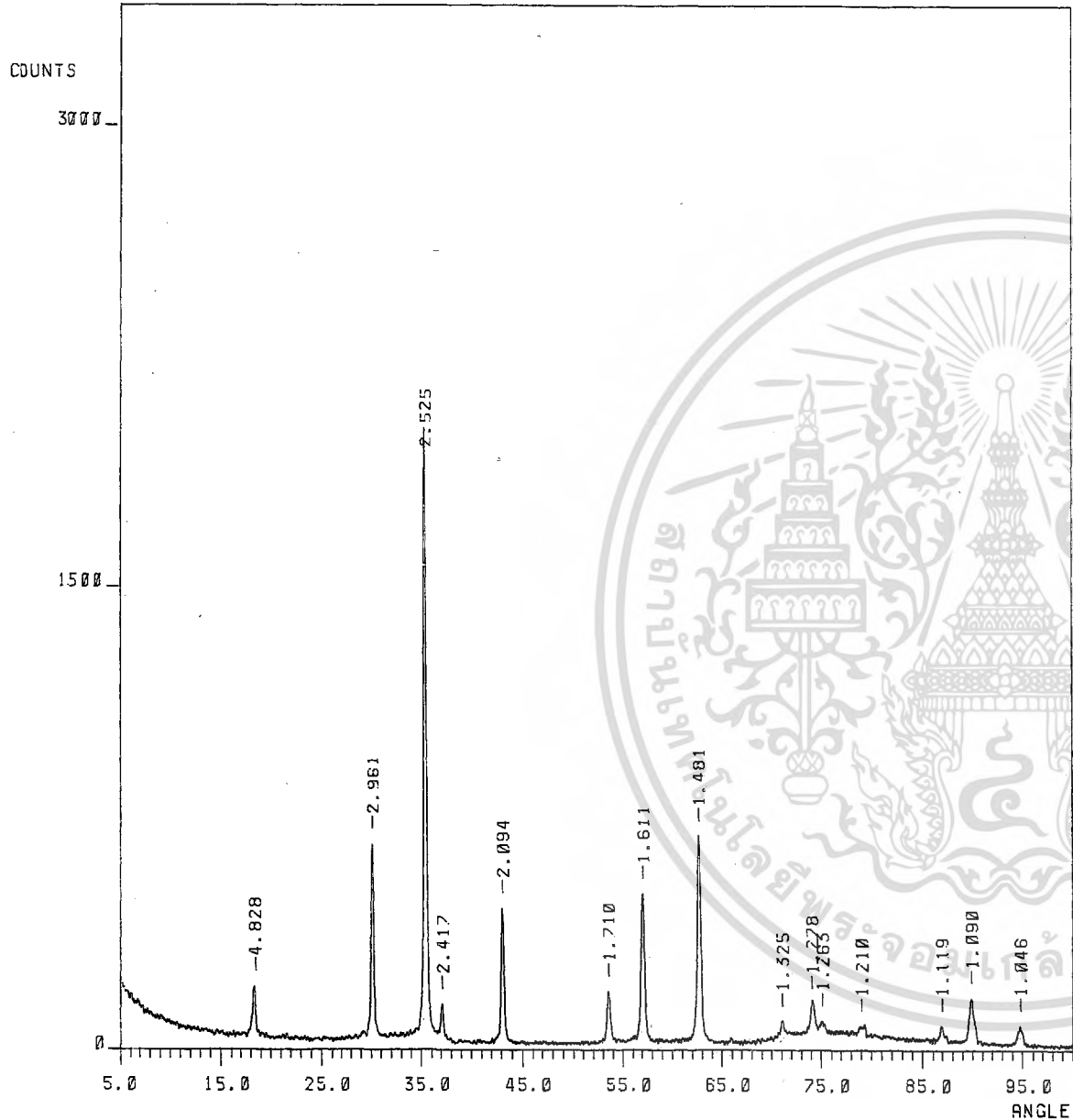
Measure condition  
Sample #1 21.6H  
Target Cu  
kV 45.0 kV  
mA 30.0 mA  
Start angle 5.00 deg.  
Stop angle 100.00 deg.  
Step angle 0.040 deg.  
M. time 1.50 sec.  
Operator  
Memo

2θ (°)	D (Å)	I (counts)	I/I <sub>0</sub>
18.32	4.839	177	14
19.04	4.657	251	20
23.20	3.831	175	14
25.16	3.537	114	9
27.40	3.252	118	10
28.08	3.175	164	13
29.04	3.072	269	22
30.16	2.981	439	36
31.72	2.819	649	53
32.20	2.778	332	27
33.92	2.641	241	20
34.24	2.617	167	14
35.52	2.525	1225	100
37.12	2.420	121	10
38.64	2.328	179	15
43.16	2.094	316	26
45.44	1.994	222	18
48.84	1.863	157	13
53.52	1.711	163	13
56.52	1.627	151	12
57.00	1.614	330	27
59.60	1.550	100	8
62.64	1.482	454	37
71.12	1.325	103	8
74.20	1.277	161	13
75.32	1.261	145	12
79.36	1.206	92	8
83.84	1.153	91	7
86.92	1.120	81	7
89.76	1.092	135	11
94.64	1.048	75	6

Search match

File name : B:#2.PK  
Sample name :





Measure condition  
 Sample #2 14.4(2) H  
 Target Cu  
 kV 45.0 kV  
 mA 30.0 mA  
 Start angle 5.00 deg.  
 Stop angle 100.00 deg.  
 Step angle 0.040 deg.  
 M. time 1.50 sec.  
 Operator  
 Memo

2θ (°)	d (Å)	I (counts)	I/I <sub>0</sub>
18.36	4.828	204	10
30.16	2.961	666	33
35.52	2.525	2019	100
37.16	2.417	149	7
43.16	2.094	459	23
53.58	1.710	169	9
57.12	1.611	506	25
62.68	1.481	693	34
71.08	1.325	94	5
74.12	1.278	156	8
75.16	1.263	95	5
79.04	1.210	78	4
86.96	1.119	81	4
89.88	1.090	169	8
94.60	1.046	80	4



## เอกสารอ้างอิง

1. กุลยา จงศิริลักษณ์ "การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียโดยกระบวนการเฟอร์ไรท์" วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2529.
2. ครุณี รัตนสุบรรณ "ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสีย ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์" วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย 2530.
3. นงนุช คุณประสิทธิ์ และ วุฒิชัย นิปัจการนันท์ "การกำจัดโลหะหนักในน้ำยา Flux จากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์" ปัญหาพิเศษปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2535.
4. แม้น อมรสิทธิ์, รศ. และ อมร เทชรสม, ผศ.ดร. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือครั้งที่ 1. หน้า 422-488, โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2534.
5. ชงชัย ทรรณสวัสดิ์, ศ.ดร. และ อุษา วิเศษสมาน. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. ครั้งที่ 2. หน้า 27-29. สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมไทย, 2535.
6. สุรภีร์ โรจน์อารยานนท์ "การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย(จากห้องปฏิบัติการ) ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์" วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, 2530.
7. American Public Health Association. "Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water." American Public Health Association Inc., Washington D.C., 1975.
8. Kiyama, M. "Conditions of the Formation of  $Fe_3O_4$  by the Air Oxidation of  $Fe(OH)_2$  Suspension." Bull. of the Chemical Society of Japan. 47 No. 7 (1973): 1946-1950.
9. Hayashi, S. "Heavy Metal Treatment by Ferritization." Chemical Economy & Engineering Review. Vol. 7 No.5 (1975): 332-36.
10. Nakashima Tomio. "Removal of Heavy Metals from Wastewater." Chemical Abstract. No.87(1977): Abstract No. 140832 U.
11. Goto, Soroharu; Nakazuki, torao; Okasuki, shuji, "Active Ferrite." Chemical Abstract. No. 88A (1978): Abstract No.202236 J.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Tojo, Tadao; Nagata, Yoshiaki. "Treatment of waste water in a refuse treatment plant in Kawasaki city. If Treatment of dust caught by dust collector in a refuse treatment plant by the ferrite method." *Toshi to Haikibutsu*. 7 (1977):61-68. Chemical Abstract. No.88 (1978):Abstract No. 78601 H.
13. Kiyama, M. "The Formation of Manganese and Cobalt Ferrite by The Air Oxidation of Aqueous Suspension and their Properties." Bull. of the Chemical Society of Japan .Vol. 51 No. 1 (1978):134-138.
14. Iguchi, Kamura and Incue. "Ferrite Process for Treatment of Wastewater Containing Heavy Metals." PEM.4 (1979):49-56.
15. Keneko, K. and Katsura, T. "The Formation of Mg-bearing Ferrite by the Air Oxidation of Aqueous Suspension ." Bull. of the Chemical Society of Japan 52 No.3 (1979):747-752.
16. Tsai, Chi-Hua. et al. "Treatment from Wastewater containing chromium, zinc , nickel , cobalt and copper by ferrite method." Chemical Abstract. No.92(1980): Abstract No.64204 B.
17. Tamura, Y., Mechai-monchit, S. and Katsura, T. The Formation of V-Bearing Ferrite by air oxidation of an Aqueous Suspension. J. Inorg. Nucl. Chem. 43(1981): 671-675.
18. Kondo, Masaki; Nakashima, Nobuaki; Hirasawa, Terumasa. "Treatment of waste water containing heavy metal by ferrite formation , initial pH and dissolved oxygen on  $Fe_3O_4$  by air oxidation of  $Fe(OH)_2$  suspension." Jpn. Soc. Powder Metal. 29(1982):236-240.
19. Kanzaki, T., Tonoike, H. and Katsura, T. "Preconcentration of Trace Amount of Cadmium in Water by Ferrite Process." Bunseki Kagaku 331(1982): E207-E210.
20. Kondo, Masaki Suzuki, Akira. "Ferrite formation and reduction mercury containing wastewater." Chemical Abstract. 104(1986):Abstract No. 64204H.
21. Sano, Masakatsu; Nakama, Hamuuri. "Treatment of waste water containing heavy metals." Chemical Abstract. 104(1986): Abstract No.64204 B.

22. Akasaki, Masateru. "Treatment of cement waste water ." Chemical Abstract. 107 (1987): Abstract No.140512 W.
23. Wen, Baozhang; Li, Dexi;Liu,Li. "Treatment of electroplating and cation column regeneration waste water by the ferrosinell method at room temperature" Diandu Yu Huanbao. 7(1987): 27-29 ,Chemical Abstract. 106(1987): Abstract No. 143434 N.
- 24.Chen, Chuyan; Lu, Kai;Ma,Yali:et al. "Treatment of waste water containing heavy metals with magnatic cast irob powder." Chemical Abstract. 109(1988): Abstract No. 236331 D.
25. Kim, Byung Kwang. et al. "Removal of heavy metals by the ferrite process and characterization for sludge containing heavy metals." Nippon Kagaku Kaishi,3(1988): 351-356.Chemical Abstaction.104(1986): Abstract No. 17000 B.

