

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การบำบัดและใช้ประโยชน์น้ำเสียที่มีโครเมียมจากห้องปฏิบัติการ



รพ.  
๗๖๖๗  
๑๕๕๐

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 107895  
วัน,เดือน,ปี - 8 ส.ย. 2553

b. ๑๕๑๒๑๑๖  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Treatment and Utilization of Chromium Wastewater from Laboratory**



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

**Department of Chemistry**

**Faculty of Science**


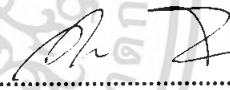
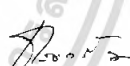

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**


**Academic Year 2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โครงการพิเศษเรื่อง** การบำบัดและใช้ประโยชน์น้ำเสียที่มีโครเมียมจากห้องปฏิบัติการ  
**นักศึกษา** นายกิตติ อนุศิริ  
 นางสาวพัชราภรณ์ วิวัฒน์พงศ์เพชร  
 นางสาวศรวณีย์ สิงห์ทอง  
**ภาควิชา** เคมี  
**สาขาวิชา** เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
**ปีการศึกษา** 2550  
**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์  
**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** ดร.พันธ์วิศ สัมพันธ์พานิช

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	
กรรมการ อ.สุจินต์ ตันติพิสิฐกุล	
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์	
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.พันธ์วิศ สัมพันธ์พานิช	

  
 ( ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ )  
 หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การบำบัดและใช้ประโยชน์น้ำเสียที่มีโครเมียมจากห้องปฏิบัติการ	
นักศึกษา	นายกิตติ	อนุศิริ
	นางสาวพัชราภรณ์	วิวัฒนพงศ์เพชร
	นางสาวศรวณีย์	สิงห์ทอง
ภาควิชา	เคมี	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม	
ปีการศึกษา	2550	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.กรองแก้ว	ทิพย์ศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.พันธวัศ	สัมพันธ์พานิช

#### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการกำจัด โครเมียมจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการและโรงงานฟอกหนังโดยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ระหว่างการบำบัดตัวอย่างขั้นต้นได้ศึกษาผลของชนิดตัวรีดิวซ์ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) และ เฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) ซึ่งสภาวะที่ใช้ในกระบวนการเฟอร์ไรต์ โดยทำที่ค่าพีเอช 9 อุณหภูมิ  $90\text{ }^\circ\text{C}$  และอัตราการให้อากาศ  $100\text{ mL/min}$  (Erdem and Tumen, 2004) โดยผสมน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการกับน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพื่อให้ความเข้มข้นโครเมียมมากกว่า  $2000\text{ mg/L}$  และทำให้เกิดตะกอนโครไมต์ ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียตัวอย่างทุกแบบและชนิดของตัวรีดิวซ์ทั้งสอง พบว่าเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม วัดสมบัติความเป็นแม่เหล็กของตะกอนโครไมต์โดยใช้ Gauss Meter และเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กของตะกอนโครไมต์โดย 3 กระบวนการ คือ การอัดเม็ด การเผาในบรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation Firing) และการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ผลจากการเพิ่มความเป็นแม่เหล็กจากตะกอนโครไมต์และจากกระบวนการทั้งสามได้ค่าความเป็นแม่เหล็กเป็น 1.0 2.0, 0.7 และ 50.0 G ตามลำดับ การทดสอบสกัดตะกอนโครไมต์ตามวิธี Waste Extraction Test ไม่พบโครเมียม (VI) ที่ระดับการตรวจวัดได้หรือมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ( $< 0.5\text{ mg/L}$ ) แต่โครเมียม (III) มีมากกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด การใช้ตะกอนโครไมต์ควรทำตระหนักก่อนการใช้งาน เนื่องจากผลการทดสอบการสกัดตะกอนโครไมต์ของจำนวนโครเมียม (III) ค่าใช้จ่ายการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ประมาณ 25 บาท/ลิตร

**คำสำคัญ :** กระบวนการเฟอร์ไรต์, โครไมต์, การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก, การใช้ประโยชน์จากของเสีย

<b>Special Project Title</b>	Treatment and Utilization of Wastewater from Laboratory	
<b>Name</b>	Kitti	Anusiri
	Patcharapond	Vivattanapongpet
	Saravane	Singtong
<b>Department</b>	Chemistry	
<b>Program</b>	Environmental Resource Chemistry	
<b>Academic year</b>	2007	
<b>Special Project Advisor</b>	Asst. Prof. Krongkaew	Tippayasak
<b>Special Project co-Advisor</b>	Pantawat	Sumpanpanish, Ph. D.

### ABSTRACT

The chromium removal from laboratory waste and tannery waste were studied by ferrite process. During sample pretreatment, the effect of reducing agents, sodium sulfite ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) and ferrous sulfate ( $\text{FeSO}_4$ ) were studied. Ferrite process was done at pH 9,  $90^\circ\text{C}$  with aeration rate 100 mol/min (Redeem and Tumen, 2004). Mixed waste samples contained laboratory waste and tannery waste to 2000 ppm concentration. Chromite sludge powder was produced from mixed waste. The removal efficiency of chromium in all waste water was 100% both from  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  and  $\text{FeSO}_4$  reduction pretreatment. The effluent after ferrite process were met the Thai Industrial Effluent Standard. The magnetic property of chromite was measured by Gauss Meter. The magnetic saturation of chromite powder was enhanced by 3 processes; compress, the oxidation firing and magnetic field induction. The results insisted the increasing of magnetite from powder and 3 process as about 1.0, 2.0, 0.7 and 50.0G respectively. The chromite sludge waste extraction test (WET) showed that Cr(VI) were not detected at level of detection and less than the effluent standard (<0.5 mg/L) but the Cr(III) was more than standard level. Application of chromite powder should be distinguished before use due to amount of Cr (III). The ferrite operating cost was about 25 Bath per liter.

**Keyword:** Ferrite process, , Magnetic induce, Chromite, Waste utilization

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษได้รับความอนุเคราะห์จึ่งใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานของโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคุณ ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และ อ.สุจินต์ ตันติพิสิษฐกุล ที่สละเวลาอันมีค่ายังเป็นกรรมการตรวจสอบ และอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็น และคำแนะนำ ในระหว่างดำเนินงานโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี เจ้าหน้าที่ห้องคอมพิวเตอร์ แม่บ้าน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่หอสมุดกลาง ที่ให้ความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณบิดา-มารดา และพี่น้องในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ ในการฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆ จนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกเหนือจากบุคคลที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และให้ความช่วยเหลือตลอด โครงการพิเศษนี้ ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นายกิตติ

อนุศิริ

นางสาวพัชราภรณ์

วิวัฒน์พงศ์เพชร

นางสาวศรวณีย์

สิงห์ทอง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....</b>	<b>5</b>
2.1 โลหะหนัก.....	5
2.1.1 ตะกั่ว.....	5
2.1.2 โครเมียม.....	12
2.2 การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปน.....	14
2.2.1 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	15
2.2.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน.....	15
2.2.3 รีเวอร์สออสโมซิส.....	15
2.2.4 อิเล็กโทรไดอะไลซิส.....	15
2.2.5 สารสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า.....	15
2.2.6 การดูดซับ.....	15
2.2.7 การระเหย.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.8 การปรับเสถียร.....	16
2.2.9 การตกตะกอนทางเคมี.....	16
2.3 เฟอร์ไรต์ (Ferrite).....	16
2.3.1 การแบ่งสารประกอบเฟอร์ไรต์ตามสภาพของสนามแม่เหล็ก.....	17
2.3.2 การแบ่งสารประกอบเฟอร์ไรต์ตามลักษณะของโครงสร้าง.....	22
2.3.3 การเกิดสารประกอบเฟอร์ไรต์.....	28
2.3.4 คุณลักษณะเด่นของกระบวนการเฟอร์ไรต์.....	29
2.4 สนามแม่เหล็ก.....	30
2.4.1 เส้นแรงแม่เหล็ก.....	33
2.4.2 การวัดความแรงสนามแม่เหล็ก.....	34
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง.....</b>	<b>39</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.3 การดำเนินการทดลอง.....	40
3.3.1 การเก็บตัวอย่าง.....	40
3.3.2 การศึกษาคุณลักษณะน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเบื้องต้นซึ่งมีโครเมียม (III) และตะกั่ว (II) เป็นองค์ประกอบ.....	40
3.3.3 การเตรียมน้ำเสียตัวอย่าง.....	41
3.3.4 ตรวจสอบโครเมียม (VI) และโครเมียม (III) ด้วยวิธีการเทียบสี (Colorimetric Method).....	43
3.3.5 การกำจัด โครเมียม (III) ออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์.....	43
3.3.6 กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นแม่เหล็กแก่ตะกอนโครไมต์.....	44
3.3.7 กระบวนการวิเคราะห์.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.8 การประกันคุณภาพในการวิเคราะห์ (Quality assurance and Quality control)	45
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>	<b>46</b>
4.1 การศึกษาคุณลักษณะน้ำเสียเบื้องต้น	46
4.2 การเตรียมน้ำเสียตัวอย่าง	46
4.2.1 การน้ำเสียตัวอย่างโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$	46
4.2.1 การน้ำเสียตัวอย่างโดยใช้ $\text{FeSO}_4$	47
4.3 การกำจัดโครเมียม (III) ออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์	49
4.3.1 น้ำหนักตะกอนโครไมต์	50
4.3.2 สารละลายที่ผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์	51
4.3.3 ความเป็นแม่เหล็กของตะกอน	55
4.4 ผลของการเพิ่มความเป็นแม่เหล็กแก่ตะกอนโครไมต์	57
4.4.1 กระบวนการอัดเม็ด	57
4.4.2 กระบวนการเผาในบรรยากาศออกซิเดชัน	58
4.4.3 กระบวนการเพิ่มสนามแม่เหล็กโดยการเหนี่ยวนำจากเครื่อง Magnetic Induce	60
4.5 การศึกษาความเป็นพิษของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์โดยสกัดด้วยวิธี WET	61
4.5.1 การทดสอบการชะละลายของโครเมียม (VI) ในสารละลายสกัด	62
4.5.2 การทดสอบการชะละลายของโครเมียม (III) ในสารละลายสกัด	62
4.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับ นันทพร, สายสุนีย์ และสิรินันท์(2545)	62
4.6.1 น้ำเสีย	62
4.6.2 น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด	64
4.6.3 ตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัด	64
<b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	<b>65</b>
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>67</b>

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก .....	69
ภาคผนวก ข.....	73
ภาคผนวก ค.....	82
ภาคผนวก ง.....	84
ภาคผนวก จ.....	85
ภาคผนวก ฉ.....	87
ภาคผนวก ช.....	89
ภาคผนวก ซ.....	94
ภาคผนวก ฌ.....	97
ภาคผนวก ฎ.....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะตะกั่ว และสารประกอบตะกั่ว.....	5
2.2 การจัดเรียงตัวของไอออนของโลหะในหน่วยเซลล์ของเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างสไปเนลและมี องค์ประกอบ $MO.Fe_2O_3$ .....	19
2.3 การเรียงตัวของอิเล็กตรอนและค่าไอออนิกแมกเนติกโมเมนต์ (Ionic Magnetic Moments) ของ ไอออนของธาตุ 3d – แทรนซิชันบางชนิด.....	20
2.4 การจัดวางไอออนและค่าแมกเนติกโมเมนต์สุทธิ (Magnetic Moments) ต่อโมเลกุลในเฟอร์ไรต์ที่ มีโครงสร้างปกติและอินเวิร์ดสไปเนล (Inverse Spinel).....	21
2.5 การกระจายตัวของไอออนของโลหะในเฟอร์ไรต์.....	25
3.1 การวิเคราะห์สมบัติน้ำเสียเบื้องต้น.....	42
4.1 การศึกษาคุณลักษณะน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการและน้ำโครมจากโรงงานฟอกหนัง.....	47
4.2 แสดงผลการรีดิวซ์ระหว่าง $FeSO_4$ กับ $Na_2SO_3$ .....	49
4.3 แสดงผลของน้ำหนักตะกอนโครไมต์หลังจากผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์.....	51
4.4 แสดงผลของประสิทธิภาพของกระบวนการเฟอร์ไรต์.....	53
4.5 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะน้ำเสียของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์.....	54
4.6 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์กับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจาก โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	55
4.7 แสดงผลความเป็นแม่เหล็กของตะกอนโครไมต์หลังจากผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์.....	57
4.8 แสดงผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเพิ่มคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก.....	61
4.9 เปรียบเทียบผลการทดลอง.....	63
ก-1 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานรีดอกซ์.....	72
ข-1 แสดงความสัมพันธ์ของ $N_t / N_0$ ที่อุณหภูมิ 2000 K และ 3000 K.....	76
ข-1 การคำนวณค่าสารเคมีสำหรับกระบวนการเฟอร์ไรต์.....	90
ข-2 การคำนวณค่าไฟฟ้าสำหรับกระบวนการเฟอร์ไรต์.....	91
ข-3 การคำนวณค่าสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์โครเมียม (III).....	92

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ช-4 การคำนวณค่าสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์โครเมียม (VI).....	93
ช-5 การคำนวณค่าไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี Waste Extraction Test.....	94



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ชั้นส่วนต่าง ๆ ที่ทำจากวัสดุพวกเฟอร์ไรต์แบบซอฟต์แวร์ ซึ่งถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์.....	17
2.2 การจัดเรียงตัวของแมกเนติกไดโพล (Magnetic Dipoles) ของ (a) Ferromagnetisms (b) Anti-Ferromagnetisms (c) Ferrimagnetisms .....	17
2.3 (a) หน่วยเซลล์ของเฟอร์ไรต์แบบซอฟต์แวร์ ( $MO.Fe_2O_3$ ) (b) ชั้นเซลล์ของเฟอร์ไรต์( $FeO.Fe_2O_3$ ).....	18
2.4 โครงสร้างแบบเฟซเซนเตอร์ (Face - Centered Cubic, FCC) ในยูนิตเซลล์ .....	19
2.5 โครงสร้างของสไปเนล (A ion อยู่ที่ tetrahedral sites และ B ions อยู่ที่ octahedral sits).....	24
2.6 ยูนิตเซลล์ของแบเรียมเฟอร์ไรต์ (Unit cell of barium ferrite, $BaFe_6O_{19}$ ).....	27
2.7 ยูนิตเซลล์ของแรเอิร์ทการ์เนท [ $M_3Fe_5O_{12}$ ] A ions on tetrahedral sites, B ions on octahedral sites, C ions on dodecahedral sites.....	28
2.8 เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งออกจากขั้วเหนือของแม่เหล็กและโค้งเข้าไปยังขั้วใต้.....	33
3.1 แสดงภาพขณะเตรียมน้ำเสียตัวอย่าง.....	41
3.2 แสดงรูปแบบการทำเฟอร์ไรต์ในสภาวะพีเอชเท่ากับ 9 ในขวดรูปชมพู่ ให้ความร้อน $90^{\circ}C$ เขย่าอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที อัตราการให้อากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที มีอัตราส่วนน้ำหนักของ $Fe^{2+}/Cr^{3+}$ เท่ากับ 13.36 .....	44
4.1 ตะกอน MWS โดยใช้ $Na_2SO_3$ .....	50
4.2 ตะกอน WT โดยใช้ $Na_2SO_3$ .....	50
4.3 ตะกอน MWS โดยใช้ $FeSO_4$ .....	51
4.4 ตะกอน WT โดยใช้ $FeSO_4$ .....	51
4.5 สารละลายที่ผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์รีดิวซ์ด้วย $Na_2SO_3$ และผ่านการกรองแบบธรรมดาซึ่งมีลักษณะใส แตกต่างกับน้ำเสียก่อนเข้ากระบวนการกันอย่างสิ้นเชิง.....	53
4.6 แท่งแม่เหล็กก่อนดูดกับตะกอน.....	56

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แท่งแม่เหล็กหลังดูดกับตะกอน.....	56
4.8 ตะกอน MWS ที่อัดเม็ดโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ .....	58
4.9 ตะกอน WT ที่อัดเม็ด โดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ .....	58
4.10 ตะกอน MWS ที่อัดเม็ดโดยใช้ $\text{FeSO}_4$ .....	58
4.11 ตะกอน WT ที่อัดเม็ดโดยใช้ $\text{FeSO}_4$ .....	58
4.12 แสดงภาพขณะเผาตะกอน.....	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ปัจจุบันภาวะมลพิษทางน้ำเป็นปัญหาที่รุนแรง ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมอย่างมาก รวมถึงมีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีขึ้นอย่างกว้างขวาง สาเหตุหลักมาจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งปัญหาที่เห็นได้ชัดอย่างหนึ่งจากโรงงานอุตสาหกรรมคือ ภาวะมลพิษทางน้ำ ได้มีกฎหมายเพื่อควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งต่างๆ ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยแหล่งกำเนิดน้ำทิ้งอาจมาจากโรงงานอุตสาหกรรม อาคารบ้านเรือน หรือ โรงแรม เป็นต้น แต่ยังไม่มีการกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการ เนื่องจากมลพิษที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมส่งผลกระทบต่อรุนแรงกว่า ซึ่งในความเป็นจริงจะพบว่า ห้องปฏิบัติการจะมีการวิเคราะห์ทั้งทางด้านฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ล้วนก่อให้เกิดมลพิษทั้งสิ้น หากยังไม่มีการควบคุมและการจัดการที่ถูกต้องอาจส่งผลกระทบต่อรุนแรงได้ในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีการวิเคราะห์ ทดสอบ โดยใช้สารเคมีที่ประกอบด้วยโลหะหนักในปริมาณมาก จะทำให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักลงในแหล่งน้ำสาธารณะ ซึ่งโลหะหนักเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับมนุษย์และสัตว์ โดยส่งผลกระทบต่อระบบประสาท ทางเดินอาหาร กล้ามเนื้อและอื่นๆ มลพิษเหล่านี้จะถูกสะสมและถูกปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำ ในอากาศ รวมทั้งในชั้นดินตะกอน เป็นสารมลพิษที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันเป็นอย่างมาก

น้ำทิ้งที่เกิดจากการวิเคราะห์ เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ จะเกิดการตกค้างของโลหะหนักในน้ำและกระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยถ่ายทอดผ่านห่วงโซ่อาหาร ดังนั้นจึงควรมีการกำจัดหรือบำบัดโลหะหนัก ในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ให้ได้มาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยอาศัยหลักเกณฑ์ วิธีการทำลายฤทธิ์ การกำจัดทิ้ง หรือการฝังกลบสิ่งปฏิกูล หรือการนำไปใช้ประโยชน์ การบำบัดของเสียโลหะหนักมีหลายวิธี ทั้งทางด้านเคมี และด้านกายภาพ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาการบำบัดของเสียจากห้องปฏิบัติการ และทำการศึกษาการนำของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการกับของเสียอันตราย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการได้จริง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนเฟอร์ไรต์ของโครเมียมในน้ำเสีย
- 1.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการโดยวิธีตกตะกอนเฟอร์ไรต์
- 1.2.3 ศึกษากระบวนการเพิ่มคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของตะกอนโครไมต์ ( $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ ) ด้วยวิธีทางกายภาพ
- 1.2.4 ศึกษาการนำตะกอนโครไมต์ที่ผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 น้ำเสียจากการทดลองใช้น้ำเสียจากเรื่อง การหาปริมาณของตะกั่วโดยการไทเทรต ปฏิกริยารีดอกซ์ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการเคมีอาคารเรียนรวมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเน้นการบำบัด โครเมียม (III) และ ตะกั่ว (II)
- 1.3.2 ศึกษาผลของกระบวนการรีดักชันในน้ำเสียเพื่อเตรียมน้ำเสียตัวอย่างก่อนเข้ากระบวนการเฟอร์ไรต์โดยเปรียบเทียบผลระหว่าง โซเดียมซัลไฟด์ และ เฟอร์รัสซัลเฟต (Erdem and Tumen 2004)
- 1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียโดยวิธีตกตะกอนเฟอร์ไรต์ ในสภาวะที่ พีเอชเท่ากับ 9 อุณหภูมิเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที (Modified Erdem and Tumen 2004)
- 1.3.4 ศึกษากระบวนการเพิ่มคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของตะกอนโครไมต์ ( $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ ) ด้วยวิธีทางกายภาพ ได้แก่ เพิ่มแรงกดอัดของตะกอน นำตะกอนไปเผาในอุณหภูมิสูง และใส่สนามแม่เหล็กแก่ตะกอนโครไมต์
- 1.3.5 ศึกษาการนำตะกอนโครไมต์ที่ผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่โดยประยุกต์ใช้ในงานเกี่ยวกับแม่เหล็ก

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถลดปัญหาการกำจัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ
- 1.4.2 สามารถประเมินประสิทธิภาพของวิธีการบำบัดได้โดยตรวจสอบจากปริมาณโครเมียมในน้ำเสียหลังจากผ่านการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนเฟอร์ไรต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.3 สามารถนำสถานะในกระบวนการเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการจริง

1.4.4 สามารถนำสถานะที่ได้จากการศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นแม่เหล็กแก่ตะกอนโครไมต์ ( $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ ) ทางวิธีกายภาพได้จริง

1.4.5 เป็นการบำบัดน้ำเสียให้กลับมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบใหม่ จากผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์ได้ ตะกอนโครไมต์และนำไปใช้ประโยชน์ในงานเกี่ยวกับแม่เหล็กต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่น ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) ปรอท (Hg) นิกเกิล (Ni) โครเมียม (Cr) เป็นต้น โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็งยกเว้น ปรอท ที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีสมบัติทางกายภาพคล้ายคลึงกัน ได้แก่ การนำไฟฟ้าและความร้อนดี มีความมันวาว และสามารถนำมาตีแผ่บาง ๆ ได้ ส่วนสมบัติทางเคมีที่สำคัญ คือ สามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปแบบที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ

โลหะหนักสามารถจัดแบ่งโดยอาศัยแนวโน้มความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมสูงมาก ได้แก่ As, Au, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Sb, Te และ Zn และกลุ่มที่มีแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมสูงรองลงมา ได้แก่ Ba, Bi, Fe, Mo, Ti และ U

ความเป็นพิษของโลหะหนักกลุ่มเหล่านี้ เป็นผลมาจากการที่มนุษย์ได้รับสารเหล่านี้ในปริมาณที่แตกต่างกัน แล้วก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายนั่นเอง แหล่งที่มาสำคัญของโลหะเหล่านี้ก็คือกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม จากนั้นจึงเกิดการปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในดิน น้ำ อากาศ และผลิตผลจากการเกษตร และเข้าสู่ร่างกายมนุษย์โดยมีผลต่อเมตาบอลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต

##### 2.1.1 ตะกั่ว (Pb)

ตะกั่วมีเลขออกซิเดชัน 0, +2, +4 สถานะออกซิเดชัน +2 ที่เสถียร สมบัติทางกายภาพของตะกั่วประกอบด้วย ความหนาแน่น 11.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร จุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส การนำไฟฟ้าดี ออกไซด์ของตะกั่วอยู่ในรูป  $PbO$ ,  $PbO_2$  แล  $Pb_2O_4$  ซึ่ง  $Pb^{+4}$  จะเสถียรกว่า  $Pb^{2+}$  ของตะกั่ว +2 โดยทั่วไปจะไม่ละลายน้ำ ยกเว้น อะซิเตดและไนเตรดเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวอย่างอิสระให้ไอออนตะกั่ว

### 2.1.1.1 การค้นพบ

ตะกั่วเป็นโลหะหนึ่งที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่สมัยโบราณ มีหลักฐานยืนยันว่า มนุษย์รู้จักนำตะกั่วมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่ 4,000 ปีก่อนคริสตกาล

ตะกั่วมีสัญลักษณ์ Pb จากชื่อละติน plumbum

### 2.1.1.2 สมบัติทางกายภาพ

เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะทั่วไป ตะกั่วมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำและมีจุดเดือดสูงพอสมควร ตะกั่วบริสุทธิ์เป็นโลหะหนัก มีสีเทา จัดเป็นโลหะค่อนข้างอ่อนมีแรงเทนไซล์ (Tensile strength) ต่ำจึงไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องรับน้ำหนักมากๆ อย่างไรก็ตามความอ่อนของตะกั่วมีประโยชน์ในแง่ที่โลหะนี้สามารถนำไปแปรรูปได้ง่าย

โลหะตะกั่วสามารถตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ แต่ดึงเป็นเส้นได้ไม่ค่อยดีนัก และมีความสามารถในการนำไฟฟ้าไม่ดี สมบัติทางกายภาพทั่วไปของตะกั่วและสารประกอบตะกั่วแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะตะกั่ว และสารประกอบตะกั่ว

สารประกอบของตะกั่ว	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)	คุณสมบัติการละลายน้ำ
โลหะตะกั่ว Pb	327.4	1,525	ไม่ละลายในน้ำร้อนและน้ำเย็น ละลายในกรดอะซิติก และกรดไนตริก
เลดอะซิเตท (แอนไฮดริส) Pb(COOH) <sub>2</sub>	280	-	443 กรัมต่อลิตร ละลายได้ในน้ำเย็น 2,212 กรัมต่อลิตรละลายได้ในน้ำร้อน
เลดโครเมต (โครมเหลือง) PbCrO <sub>4</sub>	844	สลายตัว	0.0005 กรัมต่อลิตร ละลายได้ในน้ำเย็น ละลายในกรดและค้างยกเว้นในกรดอะซิติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.3 สมบัติทางเคมี

โลหะตะกั่วเป็นโลหะที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยานัก สามารถทนต่อการผุกร่อนได้ดีที่สุดโลหะหนึ่ง เมื่อเกิดสารประกอบตะกั่วในสารประกอบทั่วไปมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +4 สมบัติทางเคมีของตะกั่วมีดังนี้

- 1) สามารถละลายในกรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริกได้น้อยมาก จนถึงได้ว่าไม่ละลายก็ได้เพราะเกิด  $PbSO_4$  และ  $PbCl_2$  ไปเคลือบผิว ทำหน้าที่ขัดขวางการละลายหรือการเกิดปฏิกิริยาต่อไป
- 2) สามารถละลาย(หรือออกซิไดส์)ในกรดไนตริก โดยสามารถละลายในกรดไนตริกเจือจางเร็วกว่ากรดไนตริกที่เข้มข้น
- 3) ตะกั่วเป็นโลหะ amphoteric นอกจากจะเกิดเกลือ plumbous ( $Pb^{2+}$ ) และ plumbic ( $Pb^{4+}$ ) แล้วยังเกิดสารประกอบ plumboite และ plumbate ด้วย
- 4) ในกรณีที่มีความชื้นในอากาศ ผิวของตะกั่วจะเปลี่ยนเป็นสีคล้ำ (tamish) เพราะเกิด  $PbO$  ไปเคลือบที่ผิวเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- 5) ในกรณีที่อากาศแห้ง หรือในน้ำที่ปราศจากออกซิเจน โลหะตะกั่วสามารถคงอยู่ได้อย่างเสถียร
- 6) ตะกั่วในสถานะหลอมเหลวสามารถออกซิไดซ์เป็น  $PbO$  ถ้าให้อุณหภูมิสูงขึ้นคือที่ 430 องศาเซลเซียส  $PbO$  จะค่อย ๆ เปลี่ยนไปเป็น  $Pb_2O_3$  จะสลายให้  $PbO$  และ  $Cl_2$
- 7) ตะกั่วสามารถเกิดออกไซด์อื่น ๆ ได้แก่  $Pb_2O_3$  และเสดออกไซด์ ( $PbO$ ) ซึ่งสลายตัวที่ 630 องศาเซลเซียส เป็น  $PbO$  และ  $O_2$
- 8) กรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก ซิตริก ทาร์ทาริก สามารถละลายตะกั่วได้อย่างช้า ๆ

### 2.1.1.4 การใช้ประโยชน์

ตะกั่วเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมและมีเพียงไม่กี่โลหะเท่านั้นที่มีปริมาณการใช้มากกว่าตะกั่ว โลหะเหล่านี้ได้แก่ เหล็ก(Fe) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และอะลูมิเนียม (Al) ทั่วโลกใช้ตะกั่วประมาณ 3 ล้านตัน ตะกั่วใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่และใช้ในรูปเตตระเอทิลเลดซึ่งใช้เติมใส่น้ำมันเพื่อเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมัน ประโยชน์ของตะกั่วมีดังนี้

- 1) ใช้ในการสังเคราะห์สารเตตระเอทิลเลด หรือ Tetraethyl Lead, TEL ซึ่งเป็นสารที่เติมใส่แก๊สโซลีนเพื่อเพิ่มค่าออกเทนของแก๊สโซลีน สาร TEL เตรียมจากเอทิลคลอไรด์และโลหะเจือ

ของตะกั่ว สาร TEL มีความเป็นพิษอย่างแรง ดังนั้นแก๊สโซลีนที่มีการเติม TEL จึงมักเติมสี เพื่อเป็นการเตือนอันตรายในตัวเอง เมื่อเผาไหม้แก๊สโซลีนที่มีการเติม TEL สารนี้จะถูกออกซิไดส์เป็นเลดออกไซด์ (PbO) ซึ่งเมื่อเกิดแล้วจะถูกรีดิวส์ทันทีเป็นโลหะตะกั่วไปเกาะอยู่ในเสื้อสูบของเครื่องยนต์ เพื่อแก้ไขปัญหานี้จึงต้องมีการเติมสาร โบรไมด์หรือคลอไรด์อินทรีย์ลงไปแก๊สโซลีนด้วย ซึ่งสารที่เติมใส่ทั่วไปได้แก่ เอทิลีน ไดโบรไมด์ และ เอทิลีนไดคลอไรด์ แก๊สโซลีนที่มีสารทั้งสองนี้อยู่ด้วย เมื่อเกิดการเผาไหม้ ตะกั่วของ TEL จะเปลี่ยนไปเป็น  $PbCl_2$  และ  $PbBr_2$  ซึ่งเป็นสารเสถียรและระเหยง่าย และถูกขับออกจากเครื่องยนต์ออกมาสู่สิ่งแวดล้อมทางท่อไอเสีย แก๊สโซลีนซูเปอร์ที่ใส่ทั่วไปเติม TEL ประมาณร้อยละ 0.05 โดยปริมาตรหรือตะกั่วประมาณ 3 กรัมต่อแก๊สโซลีน 1 แกลลอน (1 แกลลอน ประมาณ 3.7 ลิตร) ซึ่งเป็นปริมาณที่มากทีเดียว และพิจารณาจากปริมาณแก๊สโซลีนที่ใช้ในแต่ละวันจะเห็นว่าสารประกอบของตะกั่วปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในแต่ละวันปริมาณมหาศาล

2) ใช้ในแบตเตอรี่ แบตเตอรี่รถยนต์ที่ใส่ทั่วไปเป็นเซลล์กัลวานิกใช้โลหะตะกั่วเป็นอานอดและออกไซด์ของโลหะตะกั่ว ( $PbO_2$ ) เป็นคาโทด เนื่องจากอุตสาหกรรมแบตเตอรี่รถยนต์เป็นแหล่งที่มีการใช้ตะกั่วในปริมาณมหาศาลแห่งหนึ่ง

3) การใช้งานอื่นๆ ได้แก่ ใช้งานบัดกรี ทำโลหะเจือ ใช้ในการทำท่อในอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมผลิตกรดซัลฟูริก กระสุนปืน สีทา ฯลฯ

#### 2.1.1.5 การแพร่กระจายของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม

การผลิตสารตะกั่วจำแนกได้เป็นสองประเภทใหญ่ ๆ คือ ตะกั่วปฐมภูมิ และตะกั่วทุติยภูมิ ประเภทแรกเป็นการผลิตตะกั่วจากการถลุงแร่ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกาไลนา (PbS) แล้วหลอมให้บริสุทธิ์ ส่วนประเภทหลังเป็นการหลอมเศษตะกั่วส่วนใหญ่ได้แก่ แบตเตอรี่ แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ในการผลิตตะกั่วทั้งสองประเภทรูปนั้นทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนสารตะกั่วในสภาวะแวดล้อม ทั้งดิน น้ำ และอากาศ นอกจากนี้ยังมีผลต่อเนื่องไปยังประชาชนผู้ที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียงอีกด้วย

สารตะกั่วที่ผลิตได้นำไปใช้ในการทำแบตเตอรี่เป็นหลัก นอกจากนั้นจะใช้ในการทำตะกั่วแอลกิลเพื่อผสมในน้ำมันเบนซินเป็นสาร anti-knock ทำสายเคเบิล และผลิตสารเคมีต่าง ๆ เช่น สี ยาปราบศัตรูพืช ตะกั่วอาร์เซนเนท ตลอดจนการทำโลหะผสมต่าง ๆ น้ำมันตะกั่วอินทรีย์ คือตะกั่วเตตระแอลกิลได้แก่ ตะกั่วเตตระเมทิล ตะกั่วเตตระเอทิล และตะกั่วแอลกิล ไตรเอทิลผสม คือ ตะกั่วไดเมทิล และตะกั่วไดเอทิล

ส่วนใหญ่ใช้ตะกั่วแอลคิล คือ ตะกั่วเตตระเอทิล และตะกั่วเตตระเมทิล เป็นสารผสมในน้ำมันรถยนต์ สารประกอบตะกั่วอินทรีย์ทั้งสองเป็นของเหลว ไม่มีสี และระเหยกลายเป็นไอ ได้น้อยกว่าน้ำมัน จุดเดือดของตะกั่วเตตระเมทิลเป็น 110 องศาเซลเซียส และ ตะกั่วเตตระเอทิล เป็น 200 องศาเซลเซียส แต่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันมีจุดเดือด ตั้งแต่ 20-200 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อน้ำมันรถยนต์ระเหยเป็นไอ จะทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วอินทรีย์ทั้งสองในน้ำมันสูงขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ตะกั่วแตกตัวที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำกว่าจุดเดือด หรือแตกตัวด้วยแสง UV หรือ เมื่อมีสารประกอบฮาโลเจน กรด หรือ สารออกซิไดส์ต่าง ๆ ซึ่งความเข้มข้นต่ำมากในบรรยากาศ

ตะกั่วอินทรีย์ในน้ำมันเบนซินแตกตัวระหว่างการสันดาปในเครื่องยนต์ และกลายรูปเป็นตะกั่วอินทรีย์และ 70-80 เปอร์เซ็นต์ ของตะกั่ว ซึ่งใช้ในน้ำมันรถยนต์ออกสู่อากาศทางท่อไอเสีย ในรูปสารประกอบตะกั่วอินทรีย์ ปริมาณตะกั่วจะเพิ่มมากขึ้นในขณะขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูง และจะลดน้อยลงเมื่อรถเดินเครื่องอยู่กับที่ หรือเมื่อไป ๆ หยุด ๆ มีเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไอตะกั่วเตตระแอลคิลส่วนที่เหลือ 20-25 เปอร์เซ็นต์ ยังคงค้างอยู่ในท่อไอเสียและน้ำมันหล่อลื่น ไอระเหยของน้ำมันจากถังน้ำมันรถยนต์และคาร์บูเรเตอร์ ตลอดจนไอเสียจากเสื่อสูบ มีไอตะกั่วเตตระแอลคิล ตะกั่วอินทรีย์ ซึ่งระบายออกจากท่อไอเสียนี้อยู่ในรูปของอนุภาคมลสาร ส่วนตะกั่วเตตระแอลคิล อยู่ในรูปไอ มีเป็นส่วนน้อยจะถูกดูดซับติดกับอนุภาคมลสาร จะแยกตะกั่วอินทรีย์ออกได้ด้วยการกรองตัวอย่างอากาศ ไอเสียจากรถยนต์ในขั้นต้นมีตะกั่วในรูปของฮาไลด์ แล้วเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของตะกั่วออกไซด์ ซัลเฟต และคาร์บอนेट เมื่อทิ้งช่วงไว้นาน ดังนั้นการฟุ้งกระจายของสารประกอบตะกั่วอินทรีย์จากรถยนต์ ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคมลสาร กล่าวคือ อนุภาคมลสารขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอนจะตกลงสู่พื้น และลอยฟุ้งอยู่ในบรรยากาศไม่ได้ขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 ไมครอน จะถูกกักอยู่ในช่องจมูก และหลอดลมในส่วนล่างคอ และอนุภาคมลสารที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน จะเข้าสู่ระบบหายใจส่วนล่าง รวมทั้งส่วนต่าง ๆ ของปอด

#### 2.1.1.6 ความเป็นพิษ

ตะกั่วเป็นโลหะที่ร่างกายไม่ต้องการกล่าวคือ ไม่มีส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบเผาผลาญอาหารยิ่งไปกว่านั้นตะกั่วยังเป็นพิษต่อร่างกายอย่างรุนแรง ถ้าร่างกายได้รับตะกั่วเข้าไปในปริมาณสูง โดยปกติร่างกายของคนเราสามารถทนต่อตะกั่วในปริมาณสูงพอสมควร มีการวิจัยพบว่าคนทั่วไปมีตะกั่วในเลือด 0.25 ppm ไม่ก่อให้เกิดอาการเป็นพิษแต่อย่างใด แต่ถ้าร่างกายรับตะกั่วเข้าไปในปริมาณมากในทันทีทันใดเช่นในเลือดมีตะกั่ว 0.8 ppm จะเกิดอาการเป็นพิษอย่างเฉียบพลัน เช่น เกิดอาการปวดท้อง

อย่างแรง อุจจาระมีสีดำ (เกิดจาก Pbs ในอุจจาระ) เกิดอาการช็อค ตื่นเต้นง่าย ความจำเสื่อม และทำอันตรายต่อไต อาการพิษตะกั่วอย่างฉับพลันมักเกิดในคนงานที่ทำงานในอุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่วในกระบวนการผลิต เช่น โรงงานสังเคราะห์เตตระเอทิลเลด โรงงานแบตเตอรี่รถยนต์ เป็นต้น แต่สำหรับคนทั่วไปพิษของตะกั่วที่เกิดขึ้น เป็นแบบสะสมกล่าวคือ ร่างกายรับตะกั่วหรือสารประกอบตะกั่วเข้าไปทีละน้อย แต่มากกว่าที่ร่างกายจะสามารถขับถ่ายออกไปได้

การเกิดพิษเฉียบพลัน ผู้ที่ได้รับสารตะกั่วในปริมาณมากในระยะเวลาอันสั้น มักจะเกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน และปวดท้องอย่างรุนแรง รวมทั้งมีอาการทางประสาท ได้แก่ ความคิดสับสน การทำงานของร่างกายไม่ประสานงานกัน สูญเสียทักษะที่เคยทำได้บางอย่าง ชัก หมดสติ และมีอาการทางสมอง ซึ่งพบได้ในเด็กมากกว่าผู้ใหญ่ ส่วนระดับตะกั่วในเลือดของผู้ป่วยที่มีระดับตะกั่ว 70 มิลลิกรัมต่อลิตรเช่นกัน — ส่วนการเกิดพิษเรื้อรังในผู้ป่วยที่ได้รับสารตะกั่วที่มีปริมาณน้อยกว่าที่ก่อให้เกิดพิษเฉียบพลันเป็นเวลานาน มักก่อให้เกิดอาการเป็นพิษเรื้อรัง ซึ่งมีอาการตามระบบต่าง ๆ ได้แก่ ระบบประสาทส่วนกลางและส่วนรอบ ระบบทางเดินอาหาร ระบบการสร้างเม็ดเลือด อาการทางระบบประสาทส่วนกลางมักเริ่มด้วยอาการเซื่องซึม ความคิดช้า ปวดศีรษะ มึนศีรษะ เวียนศีรษะ การทรงตัวไม่ดี เหนื่อย และหงุดหงิด ถ้าอาการรุนแรงขึ้นมักมีอาการสั้นไหวเวลาเคลื่อนไหว ซึมหลับ ชัก หมดสติ นอกจากนี้ อาจพบมีประสาทตาฝ่อ และความผิดปกติในการทำงานของกล้ามเนื้อ อาการต่อระบบประสาทส่วนรอบและกล้ามเนื้อ มักมีอาการปวดตามกล้ามเนื้อที่ใช้กระดูกข้อมือทำให้กระดูกข้อมือไม่ได้ ซึ่งอาจเป็นข้างเดียวหรือสองข้างก็ได้ อาการของระบบประสาทส่วนมากมักเป็นอาการเคลื่อนไหวเป็นหลัก นอกจากนี้อาจมีปลายประสาทอักเสบ ทำให้มีอาการชาได้แต่พบไม่บ่อยนัก อาการทางระบบทางเดินอาหาร ผู้ป่วยอาจมีอาการเบื่ออาหาร อาเจียน ปวดท้องแบบลำไส้บิดตัว ซึ่งอาจสับสนกับอาการไส้ติ่งอักเสบเฉียบพลันได้ นอกจากนี้อาจมีอาการท้องผูกและท้องเดินได้ และส่วนมากมักมีน้ำหนักลดลง

ในการสร้างเม็ดเลือด มักพบว่ามีอาการช็อค โดยทั่วไปมักพบลักษณะเม็ดเลือดมีขนาดเล็ก เช่นเดียวกับการขาดธาตุเหล็ก และอาจพบเป็นแบบรูปร่างเม็ดเลือดปกติได้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ อาจมีอาการเม็ดเลือดแดงแตกเฉียบพลันได้ การตรวจดูโดยใช้สไลด์เลือกที่เจาะจากปลายนิ้วอาจพบ Basophilic stippling ในเม็ดเลือดแดง และพบในสภาวะที่ติดเชื้อมีเม็ดเลือดขาวได้

ในผู้ป่วยที่ได้รับตะกั่วนาน ๆ มักเกิดภาวะกรดยูริกคั่งในร่างกายจึงอาจทำให้เกิดภาวะไตวายเรื้อรัง หรือมีอาการของโรคเก๊าท์ได้ นอกจากนี้ยังมีลักษณะหนึ่งที่พบได้เช่น lead line ซึ่งเป็นเส้นสีน้ำเงินเทาเข้มที่เหงือกเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์ของแบคทีเรียในช่องปากกับตะกั่ว อาจ

พบได้ถึงร้อยละ 80 ของผู้ป่วยรอบต่อไปที่ได้รับตะกั่วสะสมมาเป็นเวลานาน แต่ค่อนข้างแยกจากโรคปริทันต์ได้ยาก

### สาเหตุการเกิดอาการพิษตะกั่ว

เนื่องจากตะกั่วสามารถยับยั้งการเกิดฮีโมโกลบินของร่างกายโดยไปขัดขวางการสังเคราะห์ตัวที่เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตฮีโมโกลบิน เรียกว่า Porphyrin นอกจากนี้แล้วยังสามารถขัดขวางการทำงานของเอนไซม์บางชนิดที่มีหมู่ซัลไฮดริล (Sulhydryl group) อยู่ด้วย เช่น โคอเอนไซม์เอ ทำให้ร่างกายเกิดอาการเป็นพิษผิดปกติดังกล่าวมาแล้ว อาการต่าง ๆ ที่แสดงออกในขั้นเริ่มต้น ถ้าไม่รีบทำการรักษาอย่างเร่งด่วน อาจกลายเป็นอาการเรื้อรังหรืออาจเป็นโรคต่าง ๆ ได้เช่น โรคโลหิตจาง โรคไตพิการ โรคเยื่อสมองอักเสบ และยังสามารถสะสมในกระดูกได้อีกด้วย จะเห็นได้ว่าพิษของตะกั่วมีอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอย่างมาก จึงควรมีการป้องกันไม่ให้ตะกั่วแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

ตะกั่วที่เจือปนอยู่ในอากาศอาจแพร่กระจายสู่สิ่งมีชีวิตได้ 2 ทาง ทางตรงโดยการสูดหายใจหรือกินอาหารที่มีตะกั่วเจือปนเข้าไป ส่วนทางอ้อมนั้นตะกั่วจะเข้ารบกวนหรือเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตโดยผ่านทางห่วงโซ่อาหาร ตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกขับออกมาได้ช้ามาก ส่วนใหญ่จะถูกจับยึดอยู่กับเม็ดเลือดแดงหมุนเวียนไปตามกระแสเลือด กระจายไปทั่วร่างกายสู่เนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ โดยจะสะสมอยู่ในไตในความเข้มข้นที่สูงสุด รองลงมาคือตับหลังจากนั้นชั่วระยะเวลาหนึ่งก็จะแพร่กระจายอีกครั้งหนึ่งโดยไปยึดเกาะอยู่ในกระดูกเป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เหลือจะกระจายอยู่ในฟันและผม ตะกั่วเมื่อถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายจะมีผลรบกวนและเป็นอันตรายต่อระบบภายในร่างกายสิ่งมีชีวิตหลายระบบคือ

- 1) ระบบการสร้างเม็ดเลือด พิษตะกั่วทำให้เกิดโรคโลหิตจางโดยมีผลไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่สังเคราะห์ฮีโม (Heme) ทำให้ระดับฮีโมโกลบินลดลง
- 2) ระบบประสาท ตะกั่วมีพิษทำลายระบบประสาท ทำให้เกิดอาการเฉื่อยชา เมื่อยล้าง่าย เป็นอัมพาต ข้อมือข้อเท้าตก วิงเวียนศีรษะ กล้ามเนื้อทำงานไม่สัมพันธ์กัน ปวดหัวนอนไม่หลับ หงุดหงิด มึนงง และอาการชัก
- 3) ไต ตะกั่วจะทำความเสียหายแก่ท่อไต ทำให้มีการขับกรดอะมิโน น้ำตาลและฟอสเฟตออกมากับปัสสาวะมากผิดปกติ ทั้งนี้เนื่องจากตะกั่วรวมตัวกับ โปรตีนของเซลล์ภายในไตทำให้หลอดไตทำงานผิดปกติ

นอกจากนี้ตะกั่วยังมีผลต่อการทำงานของตับ หัวใจ และเส้นเลือด และยังเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย

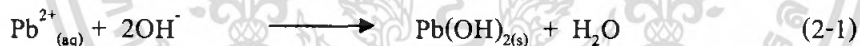
### 2.1.1.7 ตะกั่วในน้ำเสีย

ตะกั่วเป็นสารที่ไม่สลายตัวเองตามธรรมชาติ และเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียโดยการชะล้างตะกั่ว ซึ่งตกค้างจากการใช้งาน หรือเกิดจากกิจกรรมอุตสาหกรรมที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากตะกั่วมีสมบัติเหมาะในการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น ในกิจกรรมแบตเตอรี่ ใช้ผสมน้ำมันเชื้อเพลิง เพื่อให้เครื่องยนต์เดินเรียบ ทำสี วัสดุเคลือบ การบัดกรี ทำพิมพ์ท่อน้ำ ลูกปืน แผ่นตะกั่ว ใช้เป็นองค์ประกอบในการผลิตแก้ว พลาสติก เซรามิก แผ่นเหล็ก ออบสังกะสี และโลหะผสมนานาชนิด

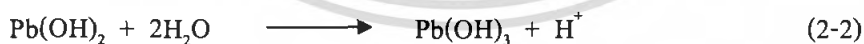
การละลายของตะกั่วในน้ำเสีย มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย โดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการละลายของตะกั่วในน้ำ คือ ความเป็นด่าง ความกระด้าง และค่าพีเอช ซึ่งพารามิเตอร์แต่ละตัวมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน กล่าวคือ อัตราส่วนความเป็นด่าง ซึ่งอยู่ในรูปคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนต ไฮดรอกไซด์ มีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช และความกระด้างก็มีความสัมพันธ์กับความเป็นด่าง และค่าพีเอชเช่นเดียวกัน

#### ผลของค่าพีเอช

การละลายของตะกั่วในสารละลายนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ที่พีเอชน้อยกว่า 8 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารละลาย และที่พีเอช 9 - 10 ตะกั่วจะตกตะกอนเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์ ดังสมการ



เนื่องจากคุณสมบัติตามธรรมชาติของตะกั่วไฮดรอกไซด์จะละลายในสารละลายที่มีพีเอชมากกว่า 10 ดังสมการ



ผลของความกระด้าง การละลายของตะกั่ว ขึ้นอยู่กับความกระด้าง ในการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวที่พีเอช 10.5 ที่ พีเอช นี้ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์

ผลของความเป็นด่าง ในน้ำที่มีตะกั่วและคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์ ค่าการละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับ ค่าพีเอชและความเข้มข้นของคาร์บอเนตไอออน ที่พีเอชน้อยกว่า 5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารละลาย ที่พีเอช 5 - 8.5 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต ดังสมการ



ที่พีเอช 8.5 - 12.5 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์ หรืออาจจะตกตะกอนในรูป basic lead carbonate ดังสมการ

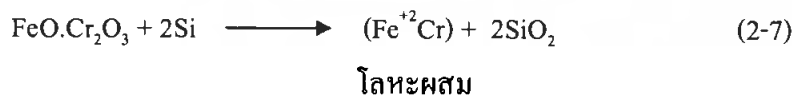
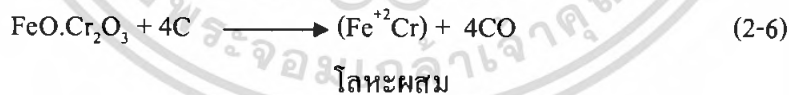


ที่ พีเอช 12.5 ตะกั่วจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วออกไซด์

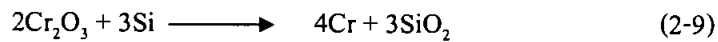
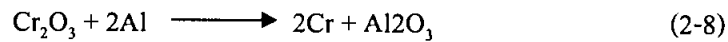
### 2.1.2 โครเมียม (Cr) (Arnold, A., 1991)

ธาตุโครเมียมส่วนใหญ่ที่พบอยู่ในรูปโครไมต์ ( $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในประเทศ USSR ตุรกี ซิมเบบเวย์ แอฟริกาใต้ และประเทศฟิลิปปินส์ โครเมียม ส่วนใหญ่ใช้ในโลหะผสมกับเหล็ก และเฟอร์โรโครมสำหรับอุตสาหกรรมเหล็ก ซึ่งส่วนใหญ่ในประเทศสหภาพโซเวียตใช้โครเมียมผลิตเหล็กและมีการสะสมโครเมียม

โครไมต์มีกลิ่นคล้ายผงแอนทราไซด์จากเตาไฟฟ้าเพื่อผลิตเฟอร์โรโครมที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่จำนวนมาก ( $\text{Cr} = 60, \text{Fe} = 35, \text{C} = 5$  w/w) ในขณะที่โลหะผสมคาร์บอนเป็นองค์ประกอบจำนวนน้อยเพื่อผลิตซิลิกอนตามสมการ



โครเมียมมีความเปราะบางมากเมื่อใช้เป็นโลหะบริสุทธิ์ทางการค้า แต่อาจสกัดโดยใช้ปฏิกิริยารีดักชันกับโครเมียม(III) ออกไซด์ โดยให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยาหรือซิลิกอนเป็นตัวออกซิไดซ์ในเตาไฟฟ้า ดังสมการ



โครเมียม(III) ออกไซด์ เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของ โครเดียมไดโครเมต ซึ่งมีซิลเฟอร์ในเตาเผา การใช้งานโครเมียม มีการใช้อย่างกว้างขวางในโลหะเหล็กผสมและที่ไม่มีโลหะผสมเป็นเฟอร์ไรต์ โลหะผสมของโครเมียมมีลักษณะเป็นสีขาวอมน้ำเงินสว่าง แข็งแต่เปราะ เหนียว ทนต่อความร้อนและสภาวะการกัดกร่อน คุณภาพของโครเมียมที่พิเศษอาจจะใช้ประโยชน์โดยใช้โครเมียมเคลือบเหล็กหรือโลหะ ซึ่งนำไปใช้เป็นแคโทดในทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีแอโนดเป็นแผ่นตะกั่ว ในสารละลาย อีเล็กโทรไลต์ เป็นกรดโครมิก 25% และกรดซัลฟริก 0.25% แผ่นโครเมียมใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมมอเตอร์รถยนต์

#### ความเป็นพิษของโครเมียม

โครเมียมหรือสารประกอบของโครเมียมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของฝุ่นและควัน ซึ่งจะเข้าสู่ร่างกายได้โดย

- 1) ทางจมูก โดยการสูดหายใจเอาผงและควันของกรดโครมิก ซึ่งส่วนใหญ่จะตกค้างบริเวณจมูกและทำอันตรายแก่กระดูกอ่อนที่กั้นระหว่างจมูกและอาจเข้าไปถึงปอด ซึ่งทำให้เกิดมะเร็งขึ้นได้
- 2) ทางผิวหนัง คนงานที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับโครเมียมจะได้รับฝุ่นละอองหรือควันของโครเมียมจะเกิดปฏิกิริยาต่อผิวหนังได้

#### โครเมียมเมื่อูดซึมเข้าสู่ร่างกายจะเกิดอาการเป็นพิษดังนี้

- 1) แผลจากโครเมียมจากการสะสมของฝุ่นละอองของโครเมียม ซึ่งโดยมากจะเริ่มเป็นรอยถลอกที่ผิวหนังและจะพบมากที่สุดที่โคนเล็บมือตามข้อที่ นิ้วมือหรือหลังเท้า มีลักษณะเป็นแผลวงกลมค่อนข้างเรียบ บวมเล็กน้อย ปกติมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร หรือเล็กกว่าซึ่งจะมองคล้ายถูกเจาะด้วยตะปู ถึงแม้ว่าแผลนี้จะไม่เจ็บปวดแต่จะคันมากเวลากลางคืน ต่อไปอาจเกิดการติดเชื้อขึ้นและอาจทำให้ลุกลามไปถึงข้อต่อใกล้เคียงซึ่งอาจทำให้ต้องตัดนิ้วทิ้ง ฝุ่นละอองเกลือ

โครเมียมหรือควันของกรดโครมิกอาจตกลงบนหลังตาหรือที่ปลายจมูกซึ่งอาจทำให้เกิดแผลขึ้นได้ ใกล้เคียงกัน

2) ผิวหนังอักเสบ บริเวณที่อาจเกิดการอักเสบ ได้แก่ มือ แขน ขา ใบหน้า และหน้าอก อาจเกิดเมื่อสัมผัสโครเมียมมาแล้ว 6 เดือน ในรายที่รุนแรงใบหน้าจะมีสีแดงเข้มและบวม ส่วนที่อักเสบจะคันมากและอาจเจ็บแสบด้วย

3) ผื่นงันในโพรงจมูกอาจถูกเจาะทะลุ คนที่ทำงานเกี่ยวข้องกับโครเมียมที่ได้รับควันกรดโครมิกหรือฝุ่นละอองของโครเมียมเป็นประจำจะทำให้ผื่นงันในจมูกถูกทำลายจนเป็นรูทะลุซึ่งการทะลุนี้จะไม่รู้สึกเจ็บปวดแต่อย่างใด จะรู้ตัวก็ต่อเมื่อมีเสียงอู้อี้หรือคังจมูกบี้แบนลง

4) มะเร็งปอดอาจเกิดกับผู้ที่สูดเอาโครเมียมเข้าสู่ร่างกายอยู่เป็นประจำและเป็นเวลานาน ซึ่งจะเป็อันตรายน่ากลัวอย่างมาก

**มาตรฐานของโครเมียมที่กำหนด ที่ปลอดภัยต่อคนงานที่ทำงานวันละ 7-8 ชั่วโมง หรือ สัปดาห์ละ 40-42 ชั่วโมง**

1) งานที่ต้องทำเกี่ยวข้องกับควันของกรดโครมิกจะต้องมีได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร

2) งานที่ต้องทำเกี่ยวข้องกับฝุ่นละอองของโครเมียมจะต้องมีได้ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร

โครเมียม (VI) เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในระบบนิเวศน์ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโครเมียม (VI) ปะปนอยู่ ควรจะได้รับการบำบัดก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำต่าง ๆ เพื่อลดผลกระทบที่จะมีต่อระบบนิเวศตามธรรมชาติ

## 2.2 การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปน

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมียหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

### 2.2.1 การแลกเปลี่ยนไอออน

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้สามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกจับโดยเรซิน ไม่เท่ากันซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งที่ได้แบบตามธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ วิธีการนี้จะเหมาะสมสำหรับโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง

### 2.2.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน

เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะซึ่งมีสารประกอบโลหะหนักต่างๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่มีพิษหรือตกตะกอนได้

### 2.2.3 รีเวอร์สออสโมซิส

วิธีนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยเซลล์ลูโลส อะซิเตด และพอลิเอมีน ซึ่งจะใช้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน Semi-permeable membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูง โดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ

### 2.2.4 อิเล็กโตรไดอะไลซิส

วิธีนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion selective membrane) กลไกของวิธีการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย วิธีนี้มีต้นทุนการก่อสร้างและการดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือ สามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

### 2.2.5 สารสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่ละลายอยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงาน

### 2.2.6 การดูดซับ

วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดมลทินสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุลและสารดูดซับที่มักใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มี

พื้นที่ผิวมากที่สุด กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักได้ และสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง

### 2.2.7 การระเหย

วิธีการระเหยนี้เป็นวิธีที่ง่ายๆ ที่ใช้ทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (Atmospheric evaporation) และระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum evaporation) วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้นแต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

### 2.2.8 การปรับเสถียร

กระบวนการปรับเสถียรเป็นการเปลี่ยนสารพิษให้อยู่ในรูปที่เสถียรไม่สามารถแพร่กระจายออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ซึ่งมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การปรับพีเอช การตกตะกอน การย่อยสลายจุลินทรีย์

### 2.2.9 การตกตะกอนทางเคมี

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้ว เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปน ทำโดยการเติมสารเคมีลงไปใต้น้ำทิ้ง เพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกมาจากน้ำได้

## 2.3 เฟอร์ไรต์ (Ferrite)

เฟอร์ไรต์เป็นวัสดุแม่เหล็กจำพวกเซรามิกที่ประกอบด้วยออกไซด์ของเหล็ก ( $Fe_2O_3$ ) ร่วมกับออกไซด์อื่นๆ หรือพวกคาร์บอเนตที่อยู่ในลักษณะเป็นผงแล้วนำไปอัดและเผาที่อุณหภูมิสูงและในบางครั้งจำเป็นที่จะต้องมีการปรับแต่งเพื่อให้รูปร่างตามที่ต้องการดังรูปที่ 2.1 ค่าความเป็นแม่เหล็ก (Magnetic saturations) จะไม่สูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุแม่เหล็กจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) โครงสร้าง domain และ hysteresis loops ของพวกเฟอร์ไรต์จะเหมือนกับวัสดุแม่เหล็กจำพวก เฟอร์โรแมกเนติก สารประกอบเฟอร์ไรต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามสภาพของสนามแม่เหล็กคือ แบบซอฟท์และแบบฮาร์ด

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

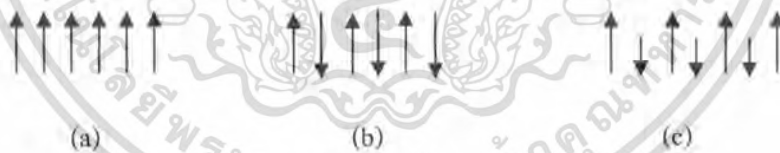


รูปที่ 2.1 ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ทำจากวัสดุพวกเฟอร์ไรต์แบบซอพท์ ซึ่งถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

2.3.1 การแบ่งสารประกอบเฟอร์ไรต์ออกได้เป็น 2 ประเภท ตามสภาพของสนามแม่เหล็ก

### 2.3.1.1 วัสดุเฟอร์ไรต์แบบซอพท์

วัสดุเฟอร์ไรต์แบบซอพท์จะแสดงสถานะแม่เหล็กแบบ Ferrimagnetisms ซึ่งมีค่าแมกเนติกโมเมนต์สุทธิ (Magnetic moment) ที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ในวัสดุเฟอร์ไรต์แบบซอพท์ มีค่าแมกเนติกโมเมนต์สุทธิ ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของอิเล็กตรอนเดี่ยวที่อยู่ออร์บิทัลภายใน ในแต่ละซุคมีทิศทางตรงข้ามกันแต่ไม่หักล้างกันจนหมดดังรูปที่ 2.2



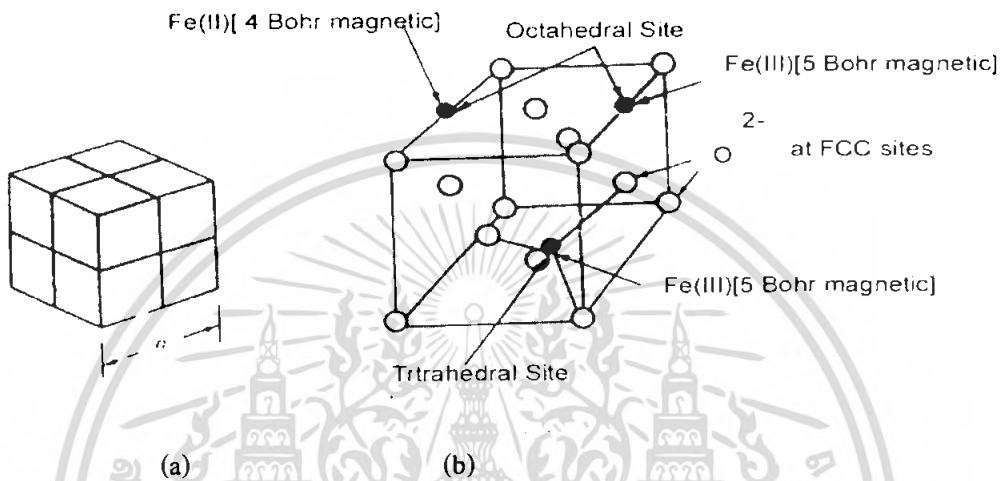
รูปที่ 2.2 การจัดเรียงตัวของแมกเนติกไดโพล (Magnetic dipoles) ของ  
(a) Ferromagnetism (b) Anti-Ferromagnetism (c) Ferrimagnetisms

องค์ประกอบของโครงสร้างของวัสดุเฟอร์ไรต์แบบซอพท์ที่มีองค์ประกอบดังนี้คือ  $MO.Fe_2O_3$ , เมื่อ M คือโลหะที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence spinel) เท่ากับ 2 เช่น  $Fe^{2+}$   $Mn^{2+}$   $Ni^{2+}$  หรือ  $Zn^{2+}$  โครงสร้างแบบสไปแนล (Inverse spinel) ซึ่งตัดแปลงมาจากโครงสร้างแบบสไปแนล

107895

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

( $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) โครงสร้างแบบอินเวิร์ตสไปแนลของเฟอร์ไรต์แบบซอพท์ จะประกอบด้วย 8 ซับเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3(a)

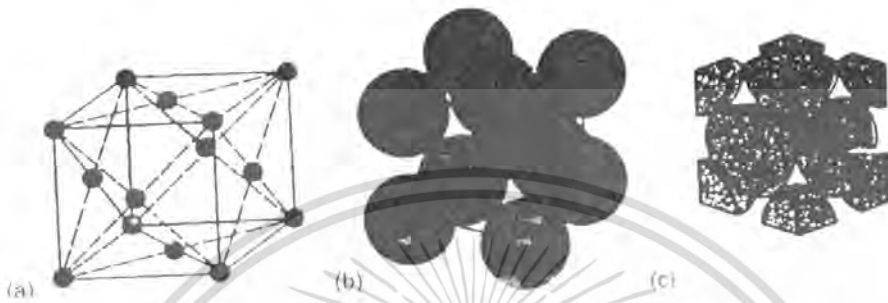


รูปที่ 2.3 (a) หน่วยเซลล์ของเฟอร์ไรต์แบบซอพท์ ( $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ )  
(b) ซับเซลล์ของเฟอร์ไรต์ ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ )

แต่ละซับเซลล์จะประกอบด้วย  $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  1 โมเลกุล และเนื่องจากใน 1 โมเลกุลของ  $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  มีไอออนอยู่ 7 ไอออน ดังนั้นในแต่ละหน่วยเซลล์ จึงมีไอออนทั้งหมดเท่ากับ 7 ไอออน  $\times$  8 ซับเซลล์ = 56 ไอออนต่อยูนิตเซลล์ แต่ละซับเซลล์มีโครงสร้างแบบ Face-Centered Cubic (FCC) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (b) และรูปที่ 2.4 โดยที่ออกซิเจนไอออนอยู่ที่จุดแลตทิซ (lattice point) และไอออนของโลหะ(II) เหล็ก(II) ซึ่งมีขนาดเล็กขนาดเล็ประมาณ 0.07 – 0.08 นาโนเมตร อยู่ในซอกระหว่างไอออนของออกซิเจน ในหน่วยเซลล์ของโครงสร้างแบบ FCC จะมีตำแหน่งของซอกออกตะฮีดรอลอยู่ 4 ซอกและซอกเตตระฮีดรอลอยู่ 8 ซอก สำหรับโครงสร้างสไปแนลปกติ จะมีซอกออกตะฮีดรอลเพียงครึ่งเดียวที่ถูกอะตอมเข้าแทนที่ นั่นหมายความว่า มีเพียง  $\frac{1}{2}(8 \text{ ซับเซลล์} \times 4 \text{ ไซท์ต่อซับเซลล์}) = 16$  ออกตะฮีดรอลไซท์ (Octahedral site) ที่ถูกแทนที่ (ตารางที่ 2.1) และในโครงสร้างสไปแนลปกติ จะมีซอกเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ทั้งหมด  $8 \times 8$  (เตตระฮีดรอลไซท์ (Tetrahedral Site) ต่อซับเซลล์) = 64 ไซท์ต่อซับเซลล์ (Site/Unit cell) แต่ละอันมีเพียง 1/8 ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซอกเตตระฮีดรอล 64 ซอกนี้ที่ถูกแทนที่ คั่งนั้น จึงมีเพียง 8 ซอกของเตตระฮีดรอลที่ถูกแทนที่เท่านั้นดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.4 โครงสร้างแบบเฟซเซนเตอร์ (Face - Centered Cubic, FCC) ในหน่วยเซลล์ [8]

- (a) แสดงตำแหน่งของอะตอมในหน่วยเซลล์  
 (b) แสดงอะตอมที่เป็นทรงกลมแข็ง  
 (c) แสดงลักษณะของหน่วยเซลล์ที่แยกออกมาเดี่ยว ๆ

ในหน่วยเซลล์ของโครงสร้างสไปเนลปกติจะมี  $MO.Fe_2O_3$  ทั้งหมด 8 ไอออนจะอยู่ที่ ซอกของออกเตฮีดรอล 8 ซอก และเหล็ก(III) 16 ไอออนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยที่ 8 ไอออนจะอยู่ที่ซอกของออกเตฮีดรอลและอีก 8 ไอออนจะอยู่ที่ซอกของเตตระฮีดรอล 8 ซอก

ตารางที่ 2.2 การจัดเรียงตัวของไอออนของโลหะในหน่วยเซลล์ของเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างสไปเนล และมีองค์ประกอบ  $MO.Fe_2O_3$

Type of Interstitial site	Number available	Number occupied	Normal spinel	Inverse spinel
Tetrahedral	64	8	$8M^{2+}$	$8Fe^{3+} \leftarrow$
Octahedral	32	16	$16Fe^{3+}$	$8Fe^{3+}, 8M^{2+} \rightarrow$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแมกเนติกโมเมนต์สุทธิที่เกิดขึ้นใน 1 ชั้นเซลล์ของ  $\text{MO.Fe}_2\text{O}_3$  ซึ่งเป็นเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างแบบอินเวิร์ด สไปเนลสามารถพิจารณาได้ดังนี้คือ

เมื่ออะตอมของเหล็กถูกไอออนไนซ์ไปเป็นเหล็ก(II) ไอออนจะทำให้อิเล็กตรอนเดี่ยวใน 3d-ออร์บิทัลจำนวน 4 ตัวหลังจากที่สูญเสียอิเล็กตรอนที่อยู่ใน 4s-ออร์บิทัลไป 2 ตัวและเมื่อถูกไอออนไนซ์ไปเป็นเหล็ก(III) ไอออนจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเดี่ยวใน 3d-ออร์บิทัลหลังจากที่สูญเสียอิเล็กตรอนที่อยู่ใน 4s-ออร์บิทัลไป 2 ตัวและ 3d-ออร์บิทัลไป 1 ตัว ดังแสดงในตารางที่ 2.3 อิเล็กตรอนเดี่ยวหนึ่งตัวจะมีค่าแมกเนติกโมเมนต์เท่ากับ 1 Bohr magneton ดังนั้นเหล็ก(II) ไอออนจึงมี 4 Bohr magneton และเหล็ก(III)ไอออนจึงมี 5 Bohr magneton เมื่อนำวัสดุเฟอร์ไรต์วางในสนามแม่เหล็กแมกเนติกโมเมนต์ของไอออนที่อยู่ในออกตะฮีดรอลไซต์และเตตระฮีดรอลไซต์จะสวนทิศกันดังรูปที่ 2.3(b) ดังนั้นถ้าวัสดุเฟอร์ไรต์ คือ  $\text{FeO.Fe}_2\text{O}_3$  ทำให้แมกเนติกโมเมนต์ของเหล็ก(II) ในออกตะฮีดรอลไซต์จะหักล้างกับเหล็ก(III) ในเตตระฮีดรอลไซต์ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น คือเกิดแมกเนติกโมเมนต์สุทธิ ที่สืบเนื่องมาจากเหล็ก(II) ในออกตะฮีดรอลไซต์เท่ากับ 4 Bohr magneton ใน ชั้นเซลล์ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 การเรียงตัวของอิเล็กตรอนและค่าไอออนิกแมกเนติกโมเมนต์ (Ionic Magnetic Moments) ของไอออนของธาตุ 3d – แทรนซิชันบางชนิด

Ion	Number Of electrons	Electron configuration 3d orbital	Ionic magnetic moment (Bohr magnetrons)
$\text{Fe}^{3+}$	23	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	5
$\text{Mn}^{2+}$	23	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	5
$\text{Fe}^{2+}$	24	↑↓ ↑ ↑ ↑ ↑	4
$\text{Co}^{2+}$	25	↑↓ ↑↓ ↑ ↑ ↑	3
$\text{Ni}^{2+}$	26	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑ ↑	2
$\text{Cu}^{2+}$	27	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑	1
$\text{Zn}^{2+}$	28	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	0

ตารางที่ 2.4 การจัดวางไอออนและค่าแมกเนติกโมเมนต์สุทธิ (Magnetic Moments) ต่อโมเลกุลใน เฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างปกติและอินเวิร์ดสไปเนล (Inverse Spinel)

Ferrite	Structure	Tetrahedral site occupied	Tetrahedral site occupied	Net magnetic moments
$\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Inverse spinel	$\text{Fe}^{3+}$ 5 ←	$\text{Fe}^{2+}$ $\text{Fe}^{3+}$ 4    5 →    →	4
$\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Normal spinel	$\text{Zn}^{2+}$ 0	$\text{Fe}^{3+}$ $\text{Fe}^{3+}$ 5    5 ←    →	0

วัสดุเหล็ก โคบอล และนิกเกิล เฟอร์ไรต์ทั้งหมดจะมีโครงสร้างแบบอินเวิร์ดสไปเนลและมีคุณสมบัติสภาวะแม่เหล็กแบบเฟอร์ริกแมกเนติก (Ferromagnetic) เนื่องจากค่าแมกเนติกโมเมนต์สุทธิในโครงสร้างไอออนิกของวัสดุนี้ โดยทั่วไปวัสดุเฟอร์ไรต์แบบซอพท์ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักจะประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ชนิดต่าง ๆ ผสมเข้าด้วยกันเนื่องจากจะทำให้สามารถเพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กของวัสดุได้ (Saturation Magnetizations) วัสดุเฟอร์ไรต์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางด้วยกัน 2 ชนิดคือ Ni – Zn – ferrite ( $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_{2-y}\text{O}_4$ ) และ Mn – Zn – ferrite ( $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_{2+y}\text{O}_4$ )

วัสดุแม่เหล็กแบบซอพท์จะเป็นวัสดุแม่เหล็กที่สำคัญ เพราะว่าวัสดุประเภทนี้ออกจากจะมีสมบัติเป็นแม่เหล็กแล้ว ยังเป็นฉนวนและมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง การที่วัสดุมีความต้านทานไฟฟ้าสูงนี้ ทำให้สามารถนำวัสดุประเภทนี้ไปใช้ในสภาวะที่มีความถี่สูงได้ โดยที่สามารถลดค่าการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไหลวน (Eddy - Current) ได้ดี เนื่องจากว่าถ้าวัสดุแม่เหล็กเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี การสูญเสียพลังงานเนื่องจากกระแสไหลวนก็จะมีค่ามาก โดยเฉพาะที่สภาวะที่มีความถี่สูง ซึ่งกระแสไหลวนนี้เกิดขึ้นเนื่องจากเกิดความต่างศักย์ขึ้น ดังนั้นถ้ายังมีความถี่สูง ก็ยังทำให้เกิดกระแสไหลวนเพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากวัสดุเฟอร์ไรต์แบบซอพท์เป็นฉนวน ดังนั้นวัสดุประเภทนี้จึงสามารถถูกนำมาใช้ทำแกนของหม้อแปลงและถูกใช้ภายใต้สภาวะความถี่สูงได้

วัสดุเฟอร์ไรต์แบบซอฟต์แวร์มักถูกนำไปใช้ในสถานะที่มีสัญญาณต่ำ หน่วยความจำ (Memory Core) และหัวสำหรับการบันทึก (recording - head) เป็นต้น สำหรับงานที่มีระดับสัญญาณต่ำ แกนที่ทำจากวัสดุเฟอร์ไรต์แบบซอฟต์แวร์จำนวนมากจะถูกใช้มากในการทำ deflection - yoke cores flyback transformers และ convergence coils ในจอรับภาพโทรทัศน์

วัสดุเฟอร์ไรต์จำพวก Mn - Zn และ Ni - Zn ที่มีโครงสร้างสไปเนลจะถูกใช้ในการทำตัวแม่เหล็กสำหรับการบันทึกเทปหลายประเภทด้วยกัน หัวจากการบันทึกจะถูกทำจากวัสดุเฟอร์ไรต์จำพวก Ni - Zn ที่มีโครงสร้างผลึก เนื่องจากจะต้องถูกนำไปใช้งานภายใต้สถานะความถี่สูง (100 kHz ถึง 2.5 GHz) ซึ่งสูงมากเกินกว่าที่จะใช้หัวที่ทำจากโลหะผสมได้ เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากกระแสไหลวนมาก

### 2.3.1.2 วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์แบบฮาร์ด

วัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์แบบฮาร์ด ที่มักถูกใช้ทำเป็นแม่เหล็กถาวร โดยทั่วไปจะมีสูตรดังนี้คือ  $\text{MO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$  และมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) วัสดุเฟอร์ไรต์ที่สำคัญที่สุดของกลุ่มนี้คือ แบบเรียมเฟอร์ไรต์ ( $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งถูกค้นพบในประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยบริษัทฟิลิป (Philips) ในปี 1952 ภายใต้ชื่อทางการค้าที่ว่า Ferroxdure ในปัจจุบันนี้แบเรียมเฟอร์ไรต์ถูกแทนที่โดยสตรอนเตียมบางส่วน วัสดุสตรอนเตียมเฟอร์ไรต์ (Strontium ferrite) มีสูตรทั่วไปดังนี้คือ  $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$  และเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็กดีกว่าแบเรียมเฟอร์ไรต์ วัสดุเฟอร์ไรต์แบบฮาร์ดกล่าวคือ วัสดุจะถูกเตรียมขึ้นโดยการอัดแบบเป็ยกในสนามแม่เหล็กเพื่อให้เกิดการเรียงตัวของอนุภาคไปในทิศทางที่ง่ายต่อการเกิดสภาวะแม่เหล็ก วัสดุเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลจะมีค่าต่ำความหนาแน่นต่ำ และมีค่า Coercive force สูงความแข็งแรงเชิงแม่เหล็กที่สูงของวัสดุเหล่านี้เนื่องมาจากการที่วัสดุเหล่านี้ Magneto crystalline Anisotropy ที่สูง ค่า Energy products  $(\text{BH})_{\text{max}}$  ของวัสดุเหล่านี้จะมีค่าประมาณ 14 - 28  $\text{kJ/m}^3$  วัสดุแม่เหล็กถาวรจำพวกเฟอร์ไรต์แบบฮาร์ดนี้มักถูกใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ นอกจากนี้ยังถูกใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น แม่เหล็กในลำโพงเครื่องเสียง โทรศัพท์ และเครื่องรับ รวมถึงของเล่นเด็ก

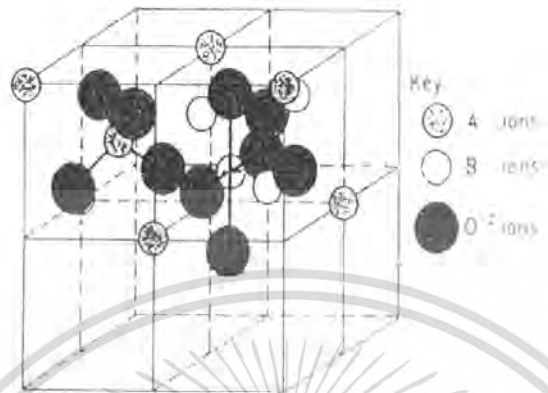
### 2.3.2 การแบ่งสารประกอบเฟอร์ไรต์ตามลักษณะของโครงสร้าง

เฟอร์ไรต์จัดเป็นสารประกอบพวกแมกเนติกออกไซด์ (Magnetic oxides) โครงสร้างของเฟอร์ไรต์แบ่งเป็น 3 ประเภท ที่สำคัญ ดังนี้

### 2.3.2.1 สไปเนลเฟอร์ไรต์ (Spinel Ferrite)

สไปเนลเฟอร์ไรต์เป็นเฟอร์ไรต์เป็นเฟอร์ริกแมกเนติกออกไซด์ที่มีสูตรทั่วไป เป็น  $M^{2+}Fe_2^{3+}O_4$  หรือ  $MO.Fe_2O_3$  โดยที่ M เป็นโลหะที่มีประจุสองบวก (Divalent metal ion) เช่น แมงกานีส ( $Mn^{2+}$ ) นิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) ทองแดง ( $Cu^{2+}$ ) เหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) สังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) หรือตัวอื่น ๆ ที่มีขนาดรัศมีไอออนขนาดเล็กพอที่จะแทรกเข้าไปในช่องว่างได้ สำหรับเหล็ก(III) เหล็ก(II) นิกเกิล(II) และแมงกานีส(II) มีอิเล็กตรอนเดี่ยวในสปิน (Spin) และแสดงความเป็นแม่เหล็กของสไปเนล ส่วนไอออนของโลหะที่มีประจุสองบวกตัวอื่น ๆ เช่น แมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ ) และสังกะสี( $Zn^{2+}$ ) หรือลิเทียม โมโนวาเลนต์ (Mono valent) ไม่เป็นพาราแมกเนติก (Paramagnetic) แต่การไม่ได้ส่วนของเหล็ก(III) ในโครงสร้างแลคทิกเป็นการเพิ่มความเข้มแม่เหล็ก (Magnetic moment) ไอออนของเหล็กจึงยังคงคุณสมบัติแม่เหล็กอยู่

โครงสร้างสไปเนลในหนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell) โดยปกติจะมี  $MO.Fe_2O_3$  ทั้งหมด 8 เซลล์ย่อย (subunit cell) โดยในแต่ละเซลล์ย่อยมีโลหะไดวาเลนต์ 8 ไอออนวางตัวในตำแหน่งเตตระฮีดรอลและเหล็ก(III) 16 ไอออนวางตัวในตำแหน่งออกตะฮีดรอล ดังรูปที่ 2.5 ในโครงสร้างของเตตระฮีดรอล จะมีไอออนของออกซิเจน 4 และ 6 ไอออนตามลำดับ ดังนั้นในหนึ่งหน่วยเซลล์ จะมี 64 เตตระฮีดรอลไซต์ (Tetrahedral site) แต่มีเพียง 8 ตำแหน่งที่มีไอออนเข้าไปอยู่และมี 32 ออกตะฮีดรอลไซต์ (Octahedral site) แต่มีเพียง 16 ตำแหน่งที่มีไอออนเข้าไปอยู่ตำแหน่งทั้งหมด (8 เตตระฮีดรอลและ 16 ออกตะฮีดรอลถูกล้อมรอบด้วย 4 และ 6 ออกซิเจนไอออนตามลำดับ) จะประกอบกันเป็นซับแลคติก (Sub lattices) โมเมนต์ของ 2 ซับแลคติก สไปเนลเฟอร์ไรต์ ที่รู้จักกันทั่วไปคือ สารแมกนีไตท์ (Magnetite) มีสูตรเป็น  $Fe_3O_4$  หรือ  $Fe^{2+}.OFe_2^{3+}O_3$  ซึ่งรู้จักกันมานานแต่นำมาใช้บ่อย ส่วนใหญ่มักนำมาพร้อมกับโลหะหนักอื่น ๆ จะทำให้ความเป็นแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เช่น  $Mg_{1-x}Mn_xFe_2O_4$  เป็นต้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสไปเนล (A ion อยู่ที่ tetrahedral sites และ B ions อยู่ที่ octahedral sites)

เฟอร์ไรต์นอกจากมีคุณสมบัติของแม่เหล็กแล้วยังเป็นฉนวนและมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง ถูกนำมาใช้ทำแกนของหม้อแปลงไฟฟ้าภายใต้สภาวะความถี่สูงได้ เช่น Mn และ Zn (สำหรับความถี่สูงถึง 1 MHz) Zn และ Ni (สำหรับความถี่มากกว่า 1 MHz)

MgMn Ferrite ใช้เกี่ยวกับคลื่นไมโครเวฟ จนกระทั่งในปี 1970 เฟอร์ไรต์ได้ถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ในหน่วยความจำในเครื่องคอมพิวเตอร์

สไปเนลเฟอร์ไรต์ ยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิดย่อยๆ ได้คือ

1) สไปเนลปกติ(Normal spinels) ในยูนิตเซลล์มี 8 เตตระฮีดรอล และ 16 ออกเตตระฮีดรอลซึ่งจะถูกครอบครองโดยไอออนของโลหะหนัก ซึ่งเฟอร์ไรต์จัดเป็นสไปเนลปกติโดยที่ตำแหน่งเตตระฮีดรอลเป็น ไอออนของสังกะสี ซึ่งในที่นี้เป็นแบบนอนพาราแมกเนติก (Non paramagnetic) ไม่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวในสปิน ผลที่ได้เป็นแบบ No-ant ferromagnetic เนื่องจากการปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมของไอออนที่อยู่ในออกเตตระฮีดรอลที่ถูกครอบครองด้วยเหล็ก (III) ไอออนแต่อันตรกิริยา (Interaction) ของเหล็ก (III) อ่อนมากแต่อย่างไรก็ตาม สังกะสีเฟอร์ไรต์ไม่เป็นเฟอร์ริกแมกเนติกซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 การกระจายตัวของไอออนของโลหะในเฟอร์ไรต์

Type of Ferrite	Metal ion on lattice Sites				
	A(Tetrahedral Site)		B(Octahedral Site)		Resultant
	Ions	Moment	Ions	Moment	Moment
Zinc Ferrite $ZnFe_2O_4$ (Normal spinel)	$Zn^{++}$	-	$Fe^{++}$		0
Nickel Ferrite $NiFe_2O_4$ (Inverse spinel)	$Fe^{+++}$		$Fe^{+++}$ $Ni^{++}$		
Nickel-Zinc $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$	$Fe^{+++}$ $Zn^{++}$				

2) อินเวิร์ดสไปเนล (Inverse spinels) สารประกอบพวกสไปเนล ที่พบส่วนใหญ่ มักเป็นสไปเนลปกติ อย่างไรก็ตาม Barth and Posnak (1915) ได้พบว่าในหลายกรณีที่มีไตรวาเลนต์ ไอออน (trivalent ions) ในเตตระฮีดรอล หรือ A site พวกเขาได้ใช้เอกซ์เรย์ดิฟแฟกชันในการแยก ไอออนทั้งสองที่อยู่ใน various site ซึ่งเห็นว่า ไอออนทั้งสองแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของนิกเกิลเฟอร์ไรต์ ซึ่งมี 8 ยูนิตสำหรับ  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  ที่จะเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของสไปเนล เฟอร์ริก ไอออนจะถูกนำไปเติมให้เต็มในตำแหน่งเตตระฮีดรอล แต่ถ้าพิจารณาเพียงครึ่งเดียวก็ยังคงมีอีก 8 ที่เข้าไปอยู่ในออกเตฮีดรอล อันตรกิริยาของไอออนมีสถานะแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โรแมกเนติก โดยมี 8 โมเมนต์ของเหล็ก(III) และ 8 โมเมนต์ของนิกเกิลอยู่ในลักษณะ antiparallel โดย 8 ไอออนของเหล็ก(III) อยู่ในตำแหน่ง เตตระฮีดรอล

โมเมนต์ของเหล็ก(III) จะถูกหักล้างไปแต่โมเมนต์ของนิกเกิลเป็น Magnetization ดังนั้นเฟอร์ไรต์ในกรณีนี้จึงถูกเรียกว่า อินเวอร์ตสไปเนลดังตารางที่ 2.5 และมีเฟอร์ไรต์ที่สำคัญหลายตัวมีโครงสร้างลักษณะนี้

### 2.3.2.2 เฮกซาโกนอล เฟอร์ไรต์ (Hexagonal Ferrite)

เฮกซาโกนอล เฟอร์ไรต์ จัดเป็นแมกเนติกออกไซด์ ที่ถูกเรียกว่า แมกนีโตพลัมไบท์ (Magneto plumbite) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  กับ ไคววาเลนท์ออกไซด์ ( $\text{BaO}$ ,  $\text{SrO}$  หรือ  $\text{PbO}$ ) ซึ่งจะมีโครงสร้างของผลึกเป็น เฮกซาโกนอล โดยแกนหลัก(Major axis) เรียกว่า c - axis และ แกนรอง (Minor axis) เรียกว่า a - axis เฟอร์ไรต์ประเภทนี้มักถูกนำไปใช้เป็นแม่เหล็กถาวร

ออกซิเจนไอออนจะไม่ได้อยู่เฉพาะใน โครงสร้างสไปเนลแต่จะมีชั้นของออกซิเจนรวมอยู่กับแบเรียม สตรอนเตียม หรือเลดไอออนด้วย

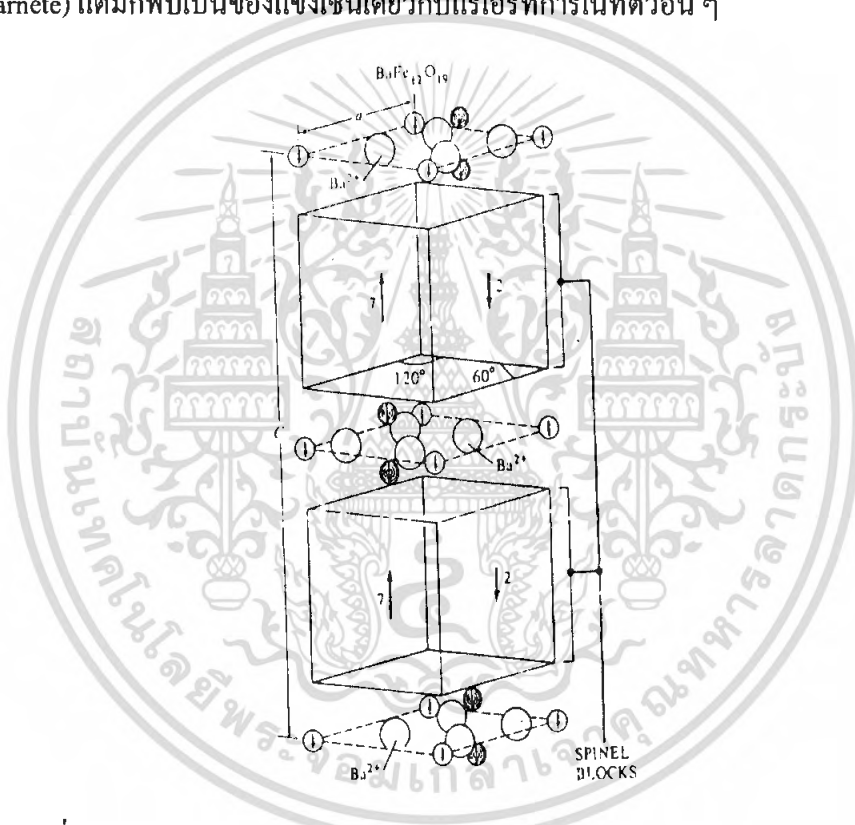
ยูนิตเซลล์ของแมกนีโตพลัมไบท์ แสดงดังรูป 2.6 ประกอบด้วย 10 ชั้น (Ten layer) โดย 2 ชั้นเป็นแบเรียม 4 ชั้นสำหรับออกซิเจนไอออน โดยในแต่ละชั้นจะมีออกซิเจนไอออน 3 ไอออน และ 1 แบเรียมไอออนแต่เส้นผ่าศูนย์กลางของส่วนที่เป็นฐานจะตรงข้ามกับแบเรียมไอออนที่มาก่อน ชั้นที่มีแบเรียม ส่วนเหล็ก(III)จะอยู่ทั้งสิบชั้น ในตำแหน่งออกเตฮีดรอลและเตตระฮีดรอล ซึ่งเป็นอย่างหนึ่งที่ไม่สามารถพบได้ในโครงสร้างแบบสไปเนล โลหะไอออนแต่ละไอออนจะมีออกซิเจนไอออน 5 ไอออนล้อมรอบ มีรูปร่างเป็นพีรามิดฐานสามเหลี่ยม (Trigonal bipyramid) เช่นเดียวกับชั้นของแบเรียม

สูตรโดยทั่วไปของแมกนีโตพลัมไบท์คือ  $\text{MFe}_{12}\text{O}_{19}$  หรือ  $\text{MO}_6\text{Fe}_2\text{O}_3$  โดย M สามารถเป็นได้ทั้งแบเรียม สตรอนเตียม หรือตะกั่ว โดยมี 2 โมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยเซลล์ ในแต่ละโมเลกุล โมเมนต์ของไอออนของเหล็ก (III) มีสปินขึ้น 12 และลง 8 ซึ่งสามารถทำนายโมเมนต์สุทธิ (Net moment) ของ 4  $[\text{Fe}^{3+}\text{ion}]$  ต่อ Formula unit time  $5 \mu_B$  per ion หรือทั้งหมด  $20 \mu_B$  ต่อฟอร์มูลายูนิต

### 2.3.2.3 แร่เอิร์ทการ์เนท (Magnetic rare earth garnets)

แร่เอิร์ทการ์เนท เป็นผลึกแมกเนติกการ์เนท (Magnetic garnets) ในโคเดคะฮีดรอล (Dodecahedral) หรือ 12-sided structure ซึ่งสัมพันธ์กับการ์เนททั่วไป สูตรโครงสร้างโดยทั่วไปคือ  $3M_2O_3 \cdot 5Fe_2O_3$  หรือ  $M_3Fe_5O_{12}$  โดย M เป็นโลหะที่มีประจุสามบวก (Trivalent) M ที่สำคัญคือ Yttrium(y) หรือตัวใดตัวหนึ่งในแร่เอิร์ทการ์เนทถึงแม้ Yttrium จะไม่ใช่แร่เอิร์ทการ์เนทไอออน

ไอออนของ  $La^{3+}$   $Ca^{3+}$   $Pr^{3+}$  และ  $Nd^{3+}$  จะใหญ่มากเมื่อเทียบกับการ์เนทธรรมดา (Simple garnete) แต่มักพบเป็นของแข็งเช่นเดียวกับแร่เอิร์ทการ์เนทตัวอื่น ๆ



รูปที่ 2.6 ยูนิทเซลล์ของแบเรียมเฟอร์ไรต์ (Unit cell of barium ferrite,  $BaFe_{12}O_{19}$ )

โครงสร้างของแมกเนติกการ์เนท แสดงให้ดูดังรูป 2.7 ซึ่งจะมีตำแหน่งแตกต่างกัน 3 ตำแหน่งสำหรับการ์เนทคือ

- 24 เตตระฮีดรอล
- 16 ออกตะฮีดรอล
- 16 โคเดคะฮีดรอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

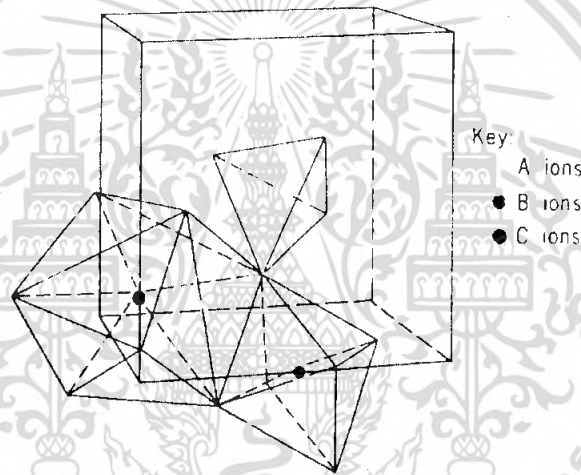
ในหนึ่งยูนิตเซลล์ประกอบด้วย 8 ฟอรัลยาญิต (Formula unite) หนึ่งฟอรัลยาญิต  $[3M_2O_3 \cdot 5F_2O_4]$  อธิบายได้ดังนี้

$3 M_2O_3$ – โคเคะซีทรอล(c)

$3F_2O_3$  – เตตระซีทรอล(a)

$2Fe_2O_3$ –ออกตะซีทรอล(b)

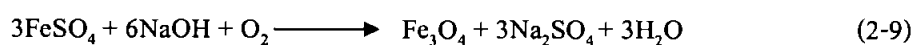
โมเมนต์สุทธิต่อหนึ่งฟอรัลยาญิตคือ  $10 \mu_B$  โดยได้จาก 2 เหล็ก(III) ในเตตระซีทรอล ( $2 \times 5 \mu_B$  สำหรับ  $2Fe^{3+} = 10 \mu_B$ )



รูปที่ 2.7 ยูนิตเซลล์ของแมกเนไทต์ [M<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>] A ions on tetrahedral sites, B ions on octahedral sites, C ions on dodecahedral sites.

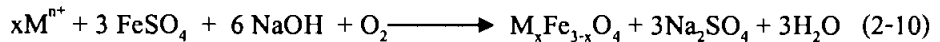
### 2.3.3 การเกิดสารประกอบเฟอร์ไรต์

สารละลายที่มีเหล็ก(III) อยู่ในที่อากาศถ่ายเทสะดวกได้สภาวะเบส (Alkaline condition) ไอออนของเหล็ก (II) บางส่วนจะถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศจะได้เป็น Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Magnetite) ดังปฏิกิริยาที่

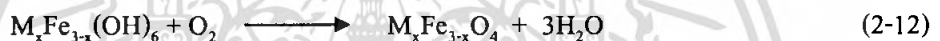
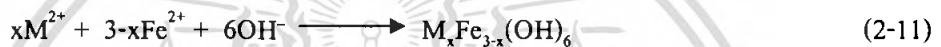


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

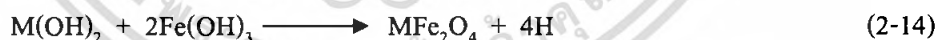
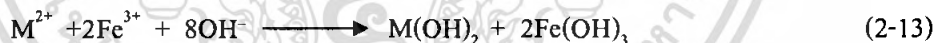
ถ้าในสารละลายมีไอออนของโลหะหนักอยู่ด้วยจะได้ตะกอนของโลหะหนัก เหล็ก(II) และ เหล็ก (III) เกิดขึ้นเนื่องด้วยโลหะหนักที่มีประจุบวก ( $M^{2+}$ ) จะเข้าไปอาศัยตำแหน่งของไอออนของ เหล็กบางตัวในโครงสร้างของแมกนีไตท์ ปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการเป็นดังปฏิกิริยาที่



$M_xFe_{3-x}O_4$  คือ โลหะเฟอร์ไรต์ที่ถูกสร้างขึ้นยังมีกลไกอีกมากมายที่จะเป็นการกระตุ้นการเกิด เฟอร์ไรต์ซึ่งสอดคล้องกับ Okudaetal ที่กล่าวว่าเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นเป็นผลจากปฏิกิริยาและ ดังนี้



$M_xFe_{3-x}O_4$  ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นสีดำที่แยกออกโดยการปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกไซด์ ( $M_xFe_{3-x}(OH)_6$ ) ที่อยู่รวมกันในสารละลายภายใต้สภาวะที่กำหนด กลไกที่ใช้เตรียมเฟอร์ไรต์ทำตาม สภาวะดังปฏิกิริยาที่ และ



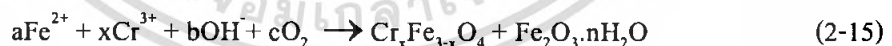
โดยการเกิดเฟอร์ไรต์จะขึ้นอยู่กับพีเอช ปริมาณเหล็ก(II) ในสารละลายอุณหภูมิ อากาศ และเป็นตัวที่มีผลต่อความไม่แน่นอนของโครงสร้างเฟอร์ไรต์

#### 2.3.4 คุณลักษณะเด่นของกระบวนการเฟอร์ไรต์

กระบวนการเฟอร์ไรต์ได้ถูกทดลองนำไปใช้กำจัด โลหะหนักซึ่งมีในน้ำเสียหลายๆแห่ง เนื่องจากมีลักษณะเด่นที่ดีกว่าวิธีอื่นๆ

- 1) สามารถกำจัดโลหะหนักที่ปะปนกันหลายชนิดในน้ำเสียได้พร้อมๆกัน ในการทดลองกำจัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์
- 2) ปริมาณของโลหะหนักจะลดลงอย่างมากเมื่อใช้กระบวนการนี้ กล่าวคือกระบวนการนี้ให้ประสิทธิภาพในการทดลองกำจัดโลหะหนักสูง
- 3) ตะกอนเฟอร์ไรต์ที่ได้จะมีสีดำหนักและไม่ละลายน้ำสามารถกรองแยกจากสารละลายได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถแยกออกได้ง่ายจากสารละลายด้วยเครื่องแยกแบบแม่เหล็ก (Magnetic Separator)
- 4) ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) สามารถถูกกำจัดออกได้ด้วยในขณะเดียวกันกับการกำจัดโลหะหนัก
- 5) สารเฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ใช้กำจัดโลหะหนักในกระบวนการเฟอร์ไรต์เป็นสารที่มีราคาถูก และเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมตัดเหล็กและชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
- 6) ตะกอนเฟอร์ไรต์ที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้อีกโดยอาจจะใช้เป็นอุปกรณ์ไมโครเวฟแอบซอร์บเบอร์ วัสดุที่ใช้ในการสื่อสาร เป็นต้น

ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้กระบวนการเฟอร์ไรต์มาประยุกต์ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยสารประกอบเฟอร์ไรต์ที่เกิดจากผลพลอยได้ในกำจัดโลหะหนักจะเกิดจากการผสมเหล็ก (III) กับโลหะ (II) เข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีแรเอิร์ทการ์เนท (Magnetic rare earth gamets) ข้างต้นได้เป็นตะกอนโครไมต์ ( $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ ) ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้ในงานแม่เหล็กต่างๆได้ สมการการเกิดโครไมต์ดังนี้



## 2.4 สนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กนั้นอาจเกิดขึ้นได้จากกระแสไฟฟ้า หรือในทางกลศาสตร์ควอนตัมนั้น สปินของอนุภาคต่างๆ ก็ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเช่นกัน ซึ่งสนามอย่างหลังนี้เองเป็นที่มาของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรต่างๆ

สนามแม่เหล็กคือปริมาณที่บ่งบอกแรงกระทำบนประจุที่กำลังเคลื่อนที่ สนามแม่เหล็กเป็นสนามเวกเตอร์และทิศของสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งใดๆ คือทิศที่เข็มของเข็มทิศวางตัวอย่างสมดุล

เรามักจะเขียนแทนสนามแม่เหล็กด้วยสัญลักษณ์  $B$  เดิมทีแล้ว สัญลักษณ์  $B$  นั้นถูกเรียกว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหรือความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ในขณะที่  $H = B/\mu$  ถูกเรียกว่า สนามแม่เหล็ก (หรือ ความแรงของสนามแม่เหล็ก) และคำเรียกนี้ก็ยังคงใช้กันติดปากในการแยกปริมาณทั้งสองนี้ เมื่อเราพิจารณาความตอบสนองต่อแม่เหล็กของวัสดุชนิดต่างๆ แต่ในกรณีทั่วไปแล้ว สองปริมาณนี้ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก และเรามักใช้คำแทนปริมาณทั้งสองชนิดว่าสนามแม่เหล็ก

ในระบบหน่วย SI  $B$  และ  $H$  นั้นมีหน่วยเป็นเทสลา (T) และ แอมแปร์/เมตร (A/m) หรือในระบบหน่วย cgs หน่วยของทั้งสองคือ เกาส์ (G) และ oersted (Oe)

สนามแม่เหล็กนั้นถูกนิยามขึ้นตามแรงที่มันกระทำ เช่นเดียวกับในกรณีของสนามไฟฟ้า ในระบบหน่วย SI แรงดังกล่าวนี้อธิบายในรูปสมการตามกฎแรงของลอเรนซ์คือ

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2-16)$$

เมื่อ

$\mathbf{F}$  คือแรงที่เกิดขึ้น วัดในหน่วยนิวตัน

$\times$  เป็นสัญลักษณ์แสดง cross product ของเวกเตอร์

$q$  คือประจุไฟฟ้า วัดในหน่วยคูลอมบ์

$\mathbf{v}$  คือความเร็วของประจุไฟฟ้า  $q$  วัดในหน่วยเมตรต่อวินาที

$\mathbf{B}$  คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก วัดในหน่วยเทสลา

ถ้าประจุที่เคลื่อนที่นั้นเป็นส่วนหนึ่งของกระแสในเส้นลวด กฎด้านบนนี้สามารถเขียนใหม่ได้ในรูปสมการ 2-17

หรือพูดอีกอย่างคือ สมการนี้กล่าวว่าแรงที่กระทำต่อหน่วยกระแสไฟฟ้านั้นเท่ากับ cross product ระหว่างเวกเตอร์กระแสและสนามแม่เหล็ก ในสมการนี้ เวกเตอร์กระแส  $\mathbf{i}$  มีขนาดเท่ากับค่าสเกลาร์ (scalar) ของกระแสเช่นทั่วไป ( $i$ ) และมีทิศทางชี้ไปในทางที่กระแสไหล

การเกิดขึ้นของสนามแม่เหล็กนั้น บรรยายได้กระชับและสวยงามที่สุดเมื่อใช้เวกเตอร์แคลคูลัส ดังนี้ (สำหรับกรณีของสุญญากาศ)

$$\frac{d\mathbf{F}}{dl} = \mathbf{i} \times \mathbf{B} \quad (2-17)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2-18)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2-19)$$

เมื่อ

$\nabla \times$  คือโอเปอเรเตอร์ เคิร์ล (curl)

$\nabla \cdot$  คือโอเปอเรเตอร์ ไดเวอร์เจนซ์ (divergence)

$\mu_0$  คือ สภาพให้ซึมได้ของสุญญากาศ

$\mathbf{J}$  คือ ความหนาแน่นของกระแส

$\partial$  คือ อนุพันธ์ย่อย

$\epsilon_0$  คือ สภาพยอมของสุญญากาศ

$\mathbf{E}$  คือสนามไฟฟ้า

$t$  คือ เวลา

สมการแรกนั้นรู้จักกันในชื่อกฎของแอมแปร์(หลังการแก้ไขโดยแมกซ์เวลล์) พจน์ที่สองของสมการนี้ ( $\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ ) จะมีค่าเป็นศูนย์ในกรณีที่ระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนสมการที่สองนั้นแสดงให้เห็นว่า magnetic monopole นั้นไม่มีอยู่ ทั้งสองสมการนี้เป็นส่วนหนึ่งของชุดสมการของแมกซ์เวลล์

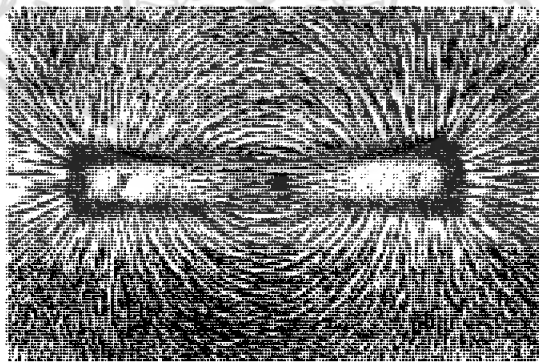
แมกซ์เวลล์มีผลงานชิ้นสำคัญในการรวมปรากฏการณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กเข้าด้วยกัน และสร้างชุดสมการสี่สมการขึ้นเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับสนามทั้งสองแบบ แต่ด้วยการอธิบายแบบแมกซ์เวลล์นี้ ยังคงมองปรากฏการณ์ทั้งสองแยกเป็นสนามสองชนิด ซึ่งมุมมองนี้เปลี่ยนไปเมื่อไฮน์สไตน์ใช้หลักการของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษแสดงให้เห็นว่า ทั้งสองปรากฏการณ์เป็นเพียงด้านสองด้านของสิ่งเดียวกัน (เทนเซอร์ rank 2 อันหนึ่ง) และผู้สังเกตคนหนึ่งอาจจะรับรู้แรงแม่เหล็ก ในขณะที่ผู้สังเกตคนที่สองรับรู้เป็นแรงไฟฟ้าอย่างเดียวกันได้ ดังนั้นในมุมมองของสัมพัทธภาพพิเศษ สนามแม่เหล็กจึงเป็นเพียงรูปหนึ่งของแรงไฟฟ้าที่เกิดจากประจุที่กำลังเคลื่อนที่อยู่เท่านั้น และสามารถจะคำนวณได้หากเรารู้แรงไฟฟ้าและการเคลื่อนที่ของประจุเทียบกับผู้สังเกต

เราสามารถใช้ในการทดลองในจินตนาการแสดงให้เห็นว่าคำกล่าวนี้เป็นจริง โดยพิจารณาเส้นประจุสองเส้นที่ขนานกันและยาวเป็นอนันต์ และอยู่หนึ่งเมื่อเทียบกับกันและกัน แต่มีการเคลื่อนที่เทียบกับผู้สังเกตคนแรก ผู้สังเกตอีกคนหนึ่งซึ่งกำลังเคลื่อนที่ไปกับเส้นประจุทั้งสอง (ที่ความเร็วเท่ากัน) จะรู้สึกได้เฉพาะแรงไฟฟ้าที่ผลัดกันระหว่างประจุและความเร่งที่เกิดขึ้นจากแรงนี้ ส่วนผู้สังเกตคนแรกซึ่งอยู่นิ่งมองเห็นเส้นประจุทั้งสอง (และผู้สังเกตคนที่สอง) เคลื่อนที่ผ่านไปด้วยความเร็วค่าหนึ่ง และยังมองเห็นนาฬิกาของผู้สังเกตที่กำลังเคลื่อนที่นั้นเดินช้าลงด้วย (เนื่องจากเวลาหด (time dilation)) และดังนั้นจึงเห็นว่าความเร่งจากแรงผลัดกันของเส้นประจุนั้นมีค่าน้อยลงด้วย เทียบกับความเร่งที่ผู้สังเกตคนที่สองรู้สึก การลดลงของความเร่งในทิศทางผลัดกันนี้ สามารถมองในแง่กลศาสตร์ดั้งเดิมได้ว่าเป็นแรงคูลอมบ์ และแรงคูลอมบ์มีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วสัมพัทธ์มีค่ามากขึ้น แรงเสมือนนี้ก็คือแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในมุมมองเดิมของแมกซ์เวลล์นั่นเอง

จากกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงนั้นสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า(และกระแสไฟฟ้า)ได้ ปรัชญาการนี้เป็นพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ไฟฟ้านั่นเอง

#### 2.4.1 เส้นแรงแม่เหล็ก

ด้วยนิยามอย่างเป็นทางการแล้ว เส้นแรงแม่เหล็กไม่ได้เป็นปริมาณเวกเตอร์ แต่เป็นเวกเตอร์เสมือน เท่านั้น แม้ว่าภาพต่างๆ มักจะแสดงเส้นแรงแม่เหล็กด้วยลูกศร แต่เราไม่สามารถแปลความหมายลูกศรนั้นเป็นการเคลื่อนที่หรือการไหลของเส้นสนาม ความสับสนในการเรียกชื่อขั้วแม่เหล็กสิ่งสำคัญที่ควรจำคือ ขั้วขั้วเหนือได้บนเข็มทิศนั้นเรียกสลับกับขั้วเหนือได้ของแกนโลก



รูปที่ 2.8 เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งออกจากขั้วเหนือของแม่เหล็กและโค้งเข้าไปยังขั้วใต้

ถ้าเรามีแม่เหล็กสองอันที่มีป้ายบอกขั้ว มันก็ไม่ยากที่จะมองเห็นว่าขั้วเหมือนกันจะผลักกันและขั้วต่างกันดูดกัน แต่การมองแบบนี้ใช้ไม่ได้กับเข็มทิศทั่วไป เพราะสำหรับเข็มทิศแล้ว ด้านที่บอกว่าเป็นขั้วชี้ไปทางทิศเหนือไม่ใช่ทิศใต้

เรานิยมเรียกขั้วของก้อนแม่เหล็กตามทิศที่มันชี้ไป ดังนั้นเราจึงสามารถเรียกขั้วเหนือของแม่เหล็กได้อีกอย่างหนึ่งว่า ขั้วที่ชี้ไปทางเหนือ

## 2.4.2 การวัดความแรงสนามแม่เหล็ก

วิธีที่นิยมใช้ในการวัดสนามแม่เหล็ก

1) วิธีที่ใช้กระแสเหนี่ยวนำในขดลวดตรวจวัด (search coil) หรือเรียกว่าวิธีบัลลิสติก (Ballistic method) สามารถใช้วัดค่าของ  $B$  และ  $M$  ได้เหมือนกับการวัด  $H$  ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาในรายละเอียดบางอย่าง โดยเฉพาะจะต้องเข้าใจการทำงานของอุปกรณ์การวัดที่เกี่ยวข้องเช่น บัลลิสติกกลลวานอมิเตอร์ (Ballistic galvanometer) และฟลักซ์มิเตอร์ (Flux meter)

2) วัดแรงดันที่เกิดในสารกึ่งตัวนำโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ถ้าปล่อยกระแสไฟฟ้า  $I$  ให้ไหลในแผ่นโลหะบางและขณะเดียวกันก็ป้อนสนามแม่เหล็ก  $H$  ในแนวทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า จะเกิดความต่างศักย์ขึ้น ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์จะแปรผันตามกับกระแสและสนาม ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นได้ทั้งในโลหะและสารกึ่งตัวนำแต่ในสารกึ่งตัวนำจะมีค่ามาก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์กับสนามจะไม่เป็นเชิงเส้นที่สนามมากกว่า อุปกรณ์วัดสนามนี้จะต้องได้รับการสอบเทียบอย่างสม่ำเสมอที่สนามเป็นศูนย์และที่สนามที่ทราบค่า อุปกรณ์ที่ใช้วัดสนามแม่เหล็กบางครั้งเรียกว่า เกาส์มิเตอร์ (Gauss meter) หรือ แมกนีโตมิเตอร์ (Magnetometer)

วิธีอื่น ๆ สนามอาจยังสามารถวัดได้ด้วยวิธีดังต่อไปนี้

1) Rotating coil ถ้าขดลวดตรวจวัดหมุนกลับไปกลับมาอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องก็จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนสลับซึ่งแปรผันกับความแรงของสนาม ขดลวดที่วางไว้ที่ด้านปลายของเพลาขายแรงดันเอาท์พุทที่เป็นกระแสตรงสามารถเกิดได้โดยวิธีคอมมิวเตเตอร์ (commutator) และแปรงถ่าน (brush)

2) Moving-magnet magnetometer

3) Saturable core

4) Nuclear magnetic resonance

5) Josephson effect เป็นปรากฏการณ์ที่ให้กระแสข้ามช่องว่างของฉนวนที่แคบมาก ระหว่างตัวนำยิ่งยวด 2 แท่ง ขนาดของกระแสจะมีความไวต่อสนามแม่เหล็ก การวัดสนามด้วยวิธีนี้จะมี ความไวมาก

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดร.ณิ (2535) ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียโดย กระบวนการเพอร์ไรต์ พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมคือ ค่าความเป็นกรด-เบส 10 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-เบส 11 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส สำหรับ นิกเกิล คือ ค่าความเป็นกรด-เบส 10-11 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เงื่อนไขที่เหมาะสมในการ กำจัดโครเมียมและนิกเกิลพร้อม ๆ กันคือ ค่าความเป็นกรด-เบส 10 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโมลที่เหมาะสมคือ  $Cr^{3+}/Iron_{total} = 14.85 * 10^{-3}$ ,  $Ni^{2+} / Iron_{total} = 13.5 * 10^{-3}$  ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลเป็น 100% อัตราส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำเสีย โรงชุบโลหะที่ไม่มีไซยาไนด์คือ  $Cr^{3+} / Iron_{total} = 2.51 * 10^{-3}$ ,  $Ni^{2+} / Iron_{total} = 1.4 * 10^{-3}$  อัตราส่วนที่ เหมาะสมในการกำจัดน้ำเสียโรงชุบโลหะที่มีไซยาไนด์ คือ  $Cr^{3+} / Iron_{total} = 1.8 * 10^{-3}$ ,  $Ni^{2+} / Iron_{total} = 0.76 * 10^{-3}$  เมื่อทดสอบความเสถียรของการตะกอนเพอร์ไรต์ที่สังเคราะห์ได้จากน้ำเสียโรงงานชุบ โลหะที่ไม่มีไซยาไนด์ โดยวิธี leaching test ในเวลา 6-24 ชั่วโมง พบว่าตะกอนมีความเสถียรที่ ค่า ความเป็นกรด-เบส 3-5.8

เพชรพร และคณะ (2537) การบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอนในน้ำเสียสังเคราะห์ โดย ทดลองใช้ โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ กำจัดโครเมียม (VI) ให้เป็นโครเมียม (III) พบว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสมคือ 9-11 แต่ที่ดีที่สุดคือ 9.0 จะได้น้ำใส (effluent) ได้ตามมาตรฐานน้ำ เสียแต่ต้องผ่านการกรองอีกครั้งหนึ่ง การกำจัดโลหะสังกะสี ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ช่วงพีเอช คือ 9-11 แต่ที่ดีที่สุดคือ 9.0 เช่นเดียวกันจะได้น้ำใสที่ใสโดยไม่ต้องกรอง การกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี อยู่ร่วมกัน จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ช่วงพีเอช 9-11 แต่ที่เหมาะสมที่สุด คือ 9.0 แต่ต้อง ผ่านการกรองก่อนเช่นเดียวกัน แต่หากต้องการใช้สารละลายปูนขาวในการกำจัดควรใช้พีเอชในช่วง 9.5-11 หรือที่ 9.5 โดยไม่ต้องผ่านการกรอง

จันทพร, สายสุนีย์ และ สิรินันท์ (2547) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการที่มีโครเมียมและตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เข้มข้น 2,330 และ 46 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยวิธีรีดักชัน- ปริซิพีเตชัน และกระบวนการเฟอร์ไรต์ ในวิธีรีดักชัน- ปริซิพีเตชัน จะใช้เฟอร์รัสซัลเฟตและโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ โดยสัดส่วนโมลเท่ากับ 2.5 และ 1.0 ตามลำดับ ในการรีดิวส์โครเมียม (VI) เป็นโครเมียม(III) จากนั้นทำการตกตะกอนโดยใช้สารเคมี 2 ชนิดคือ เฟอร์รัสซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่พีเอช 8.5 พบว่าสามารถลดปริมาณโครเมียมและตะกั่วในน้ำทิ้งมากกว่าร้อยละ 99 สำหรับการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ให้ผลการบำบัดที่ดีที่สุดที่อัตราส่วนโมล Cr ต่อ  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ  $8.889 \times 10^{-4}$  เวลาพ่นอากาศ 60 นาที พบว่าสามารถลดปริมาณโครเมียมและตะกั่วในน้ำทิ้งมากกว่าร้อยละ 99 เช่นกัน และตะกอนสามารถแยกออกได้ง่ายโดยใช้แม่เหล็กซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของตะกอน แต่ค่าใช้จ่ายในการบำบัดโดยวิธีรีดักชัน- ปริซิพีเตชัน จะถูกกว่าการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์

Kiyama (1978) ได้ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบเฟอร์ไรต์ โดยการทดลองผสมโลหะหนักที่เป็นไอวาลেন্টกับเกลือเฟอร์รัสซัลเฟต โลหะหนักดังกล่าวได้แก่แมงกานีส แมกนีเซียม และโคบอลต์ โดยผสมเกลือเฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) และเกลือแมงกานีสซัลเฟต ( $\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ค่าความเป็นกรด-เบส ระหว่าง 9-10 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างของสารประกอบเฟอร์ไรต์ที่ได้เป็นแบบสไปเนล (spinal) อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กอีกด้วย นอกจากนี้ยังทำการทดลองใช้กระบวนการเฟอร์ไรต์กับเกลือแมงกานีสซัลเฟต และจากผลการทดลองนี้ยังสรุปต่อไปอีกว่า เงื่อนไขการเกิดสารเฟอร์ไรต์แมกเนติกเป็นเงื่อนไขเกี่ยวกับการเกิดสารแมกเนไตต์ Tamura, Tu และคณะ (1991) ศึกษาความเสถียรของ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ที่เคลือบบนไอออนโลหะหนักในกระบวนการเฟอร์ไรต์ ปฏิกริยาการเกิดเฟอร์ไรต์ในสารละลายเกิดจากการจับไอออนโลหะหนักและการออกซิไดซ์ (Fe(II) ที่ถูกรอบ ๆ ไอออนโลหะหนักเกิดเป็นอนุภาคเฟอร์ไรต์ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาได้  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  เคลือบอยู่บนอนุภาคโลหะหนักการเกิดปฏิกิริยาแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

- 1) การเติมสารละลายเหล็กลงในน้ำเสีย
- 2) การเป่าอากาศเพื่อทำให้เกิดออกซิเดชันได้สารประกอบเคลือบอยู่บนไอออนโลหะหนัก วิธีนี้สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วยไอออนฟลูออไรด์หรือดินที่มีไอออนแคลเซียม หลัง

การบำบัดแล้วได้เฟอร์ไรต์ที่เสถียรมา เนื่องจากในสภาพธรรมชาติ ไม่สามารถชะล้างไอออนโลหะหนักออกมาจากตะกอนเฟอร์ไรต์

**Barrado, Prieto, Medina และ Lopez (2001)** ศึกษาการออกแบบลักษณะของแข็งที่เหลือจากน้ำเสียที่มีโลหะหนักโครเมียม (III) เป็นองค์ประกอบ นำมาทำให้บริสุทธิ์โดยกระบวนการเฟอร์ไรต์ และประเมินของกระบวนการโดยใช้ค่าสัดส่วนโมล  $Fe^{2+}/Cr^{3+}$  แตกต่างกัน การศึกษานี้องค์ประกอบโครเมียม (VI) จะหลีกเลี่ยงเนื่องจากสัดส่วนโครเมียม (VI) จะเปลี่ยนเป็นโครเมียม (III) และจากกระบวนการประยุกต์ สารประกอบของแข็งที่ได้ถูกวิเคราะห์โดยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์และการวิเคราะห์ทางเคมี (couple plasma และ potentiometric titrations) ตามคำแนะนำ  $Cr_xFe^{2+}Fe^{3+}_{2-x}O_4$  เป็นผลิตภัณฑ์ที่สมดุลมากที่สุดที่  $9 \leq x \leq 0.59$  การวัดเอกซเรย์วัดความแตกต่างที่ความร้อนและการเคลื่อนที่ที่คลื่นอินฟราเรดแบบสไปเนลปกติเป็นโครงสร้างชนิดหนึ่งของโครเมียมที่เป็นโครเมียมไฮดรอกไซด์ โครงสร้างนี้แตกต่างกับโลหะไดวาเลนต์แบริ่งเฟอร์ไรต์ (inverse spinel) วิธีการเกิดไฮดรเทอร์มอลสำหรับโครไมท์ที่ไม่สมดุล ตามข้อเสนอการเกิดปฏิกิริยาออกไซด์ทั่วไป



**Erdem และ Tumen (2004)** ได้ศึกษาวิจัยการกำจัดโครเมียมด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการเฟอร์ไรต์กับสารละลายโครเมียม (VI) โดยมีกระบวนการรีดักชัน 2 กระบวนการแบ่งตามชนิดของสารที่ใช้ ซึ่งสารละลายที่ใช้คือ โซเดียมซัลไฟต์ และ เฟอร์รัสซัลเฟต ซึ่งในสารละลายตัวอย่างประกอบด้วยโครเมียม (III) ในการเกิดตะกอนเฟอร์ไรต์วิเคราะห์โดย XRD ในการวิเคราะห์คุณสมบัติการละลายของตะกอนกับสารละลาย ดังเช่น ซัลฟูริก , กรดซिटริก , ทาร์ทาลิก , กรดแอสคอบิก และ อิติทีเอ และมีการทดสอบลักษณะของความเป็นพิษ (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP) ของ US. EPA ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม (III) เกือบหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์ ในการรีดิวซ์โครเมียม (VI) ให้เป็นโครเมียม (III) ซึ่งสารละลายที่ใช้คือ โซเดียมซัลไฟต์ โดยค่าพีเอชของสารละลายที่ใช้ในการบำบัดเท่ากับ 9 อุณหภูมิที่ใช้คือ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที สำหรับอัตราส่วน  $Fe^{2+}/Cr^{3+}$  อัตราส่วนต่อน้ำหนักเท่ากับ 16 ส่วนสำหรับสารละลายโครเมียม (III) เตรียมจากการรีดิวซ์โครเมียม (VI) ด้วยสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟตสำหรับอัตราส่วน  $Fe^{2+}/Cr^{3+}$  อัตราส่วนต่อน้ำหนักเท่ากับ 17.9 ที่สภาวะเงื่อนไขเดียวกัน พบว่าสามารถกำจัดโครเมียม (III) ได้อย่างสมบูรณ์ เกิดสารประกอบ Cr-Fe

เป็น โครไมต์ ( $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ ) ความเข้มข้นของการละลายตะกอนจากทั้ง 2 วิธี ได้เท่ากับ 5 mg/L USEPA ผลการกำจัดโครเมียมด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์ ตะกอนเพอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นมีประโยชน์หลายอย่าง ง่ายต่อการแยกออก และมีความเสถียรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งใช้สภาวะและขั้นตอนของงานวิจัยนี้ในโครงการพิเศษนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) โพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
- 2) กรดไนตริกเข้มข้น (conc.  $HNO_3$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
- 3) กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc.  $H_2SO_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท FISHER CHEMICALS
- 4) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
- 5) แอมโมเนียไฮดรอกไซด์ ( $NH_4OH$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
- 6) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $KMnO_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
- 7) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
- 8) 1,5-ไดฟีนิลคาร์บาไซด์ ( $C_{13}H_{14}N_4O_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
- 9) กรดซิตริก  $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$  บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
- 10) อะซีโตน ( $C_3H_6O$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
- 11) กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA REAGENTI
- 12) น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water, DI)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Orion รุ่น model 210A
- 2) เครื่องวัดความนำไฟฟ้า (Conductivity meter) ยี่ห้อ Orion รุ่น model 125
- 3) เตาไฟฟ้า (Hot plate)
- 4) ถ้วยระเหย (Evaporating dish)
- 5) เครื่องกวนชนิดแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- 6) หัววัดโออาร์พี (Oxidation reduction potential probe , ORP)
- 7) เครื่องชั่งสารแบบละเอียด (Analytical balance)
- 8) เครื่องยูวีสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Spectrophotometer) รุ่น UV/VIS 6405

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 9) เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic Absorption Spectrophotometer) ยี่ห้อ Perkin Eimer instruments รุ่น AAnalyst 800
- 10) เครื่องไมโครเวฟไดเจสชัน (Microwave digestion Unit) ยี่ห้อ Milestone รุ่น mls 1200 mega
- 11) เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (Temperature shaker) ยี่ห้อ GFL รุ่น 1086
- 12) เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic floor cranes) ยี่ห้อ TMC
- 13) เครื่องเขย่า (Orbital shaker) ยี่ห้อ GALLENKAMP
- 14) เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ยี่ห้อ SANYO
- 15) เตาเผา (Furnace) ยี่ห้อ Vecstar รุ่น 1550
- 16) เครื่องเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic induce) เอื้อเพื่อจากภาควิชาฟิสิกส์
- 17) เครื่องวัดความเป็นแม่เหล็ก (Gauss meter) ยี่ห้อ Bell Technologies Inc. รุ่น Model 6010

### 3.3 การดำเนินการทดลอง

แหล่งที่มาของน้ำเสีย คือน้ำทิ้งจากการทดลองปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 1 เรื่อง การหาปริมาณของตะกั่วโดยการไทเทรตปฏิกิริยารีดอกซ์ จากห้องปฏิบัติการเคมี อาคารเรียนรวมสมเด็จพระเทพฯ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยในน้ำเสียนี้มี โครเมียม และ ตะกั่ว ซึ่งเป็นโลหะหนักอยู่ และน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกหนัง โดยในน้ำเสียนี้มีโครเมียมซึ่งเป็นโลหะหนักอยู่ และมีสารอินทรีย์ปนในปริมาณเล็กน้อย

#### 3.3.1 การเก็บตัวอย่าง

นำน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการซึ่งมี 4 แกลลอน มาผสมรวมกันเพื่อปรับสภาพในถังเดียวกัน (Equalizing tank) ขนาด 100 ลิตร และทำการกวนตัวอย่างน้ำเสียด้วยไม้ทุกครั้ง

น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังมีเพียง 1 แกลลอน และทำการกวนตัวอย่างน้ำเสียด้วยไม้ทุกครั้งเช่นกัน

#### 3.3.2 การศึกษาคุณลักษณะน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเบื้องต้นซึ่งมีโครเมียม (III) และตะกั่ว (II) เป็นองค์ประกอบ

ดังตารางที่ 3.1 โดยทุกพารามิเตอร์ จะมีการวิเคราะห์ตัวอย่างอย่างน้อย 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

### 3.3.3 การเตรียมน้ำเสียตัวอย่างแบ่งเป็น 2 แบ่งตามชนิดของสารเคมีที่ใช้รีดิวซ์

(Erdem and Tumen, 2004)

#### 3.3.2.1 การเตรียมน้ำเสียตัวอย่างโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$

- 1) นำน้ำเสียตัวอย่างจากห้องปฏิบัติการผสมกับน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังให้ได้ปริมาณ 1,700 มิลลิลิตร เพื่อทำทั้งหมด 7 ข้ำและมีความเข้มข้นโครเมียมเพียงพอต่อการเข้ากระบวนการเฟอร์ไรต์
- 2) นำน้ำเสียมาปรับค่าพีเอชด้วยสารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ให้มีพีเอช 2±1
- 3) ใช้มวลสารสัมพัทธ์หาจำนวน  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  โดยมี 3 เท่าของความเข้มข้นโครเมียม (VI) ดังแสดงในภาคผนวก ฉ เติมลงในสารละลายน้ำเสียตัวอย่างซึ่งโครเมียม (VI) ที่จะถูกรีดิวซ์ โดยกวนให้ผสมกันเป็นเวลา 15 นาที
- 4) นำน้ำเสียตัวอย่างจากโรงงานฟอกหนังทำเช่นเดียวกัน โดยนำน้ำเสียฟอกหนังมาปริมาณ 1700 มิลลิลิตรตั้งน้ำเสียแบบผสมดังกล่าว

#### 3.3.2.2 การเตรียมน้ำเสียตัวอย่างโดยใช้ $\text{FeSO}_4$

- 1) นำน้ำเสียตัวอย่างจากห้องปฏิบัติการผสมกับน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังให้ได้ปริมาณ 1,700 มิลลิลิตร เพื่อทำทั้งหมด 7 ข้ำและมีความเข้มข้นโครเมียมเพียงพอต่อการเข้ากระบวนการเฟอร์ไรต์
- 2) ใช้มวลสารสัมพัทธ์หาจำนวน  $\text{FeSO}_4$  โดยมี 2.5 เท่าของความเข้มข้นโครเมียม ดังแสดงในภาคผนวก ฉ เติมลงในน้ำเสียตัวอย่างแบบผสมที่มีโลหะหนักโครเมียมและโครเมียม (VI) จะถูกรีดิวซ์
- 3) นำน้ำเสียตัวอย่างจากโรงงานฟอกหนังทำเช่นเดียวกับน้ำเสียตัวอย่างแบบผสม



รูปที่ 3.1 แสดงภาพขณะเตรียมน้ำเสียตัวอย่างแบบผสมโดยใช้  $\text{FeSO}_4$  เป็นตัวรีดิวซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงการวิเคราะห์สมบัติน้ำเสียเบื้องต้น

พารามิเตอร์	วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์	หมายเหตุ
1. ค่าพีเอช (pH)	วัดค่าพีเอชด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์	ตามคู่มือการใช้เครื่องมือ
2. ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)	วัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดความนำไฟฟ้า	ตามคู่มือการใช้เครื่องมือ
3. ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำเสีย	วิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater .19 <sup>th</sup> Edition. 1995. AWWA, WEF, APHA. No.2540 B.
4. ปริมาณความต่างศักย์โออาร์พี (ORP)	วิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater .19 <sup>th</sup> Edition. 1995. AWWA, WEF, APHA. No.2580 A,B.
5. ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมในรูปละลายน้ำ	วิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater .19 <sup>th</sup> Edition. 1995. AWWA, WEF, APHA. No.3111 A.
6. ปริมาณความเข้มข้นตะกั่วในรูปละลายน้ำ	วิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater .19 <sup>th</sup> Edition. 1995. AWWA, WEF, APHA. No.3111 A.

หมายเหตุ : ทุกพารามิเตอร์ทำการวัด 3 ซ้ำและทำการวัดค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 ตรวจสอบโครเมียม (VI) และโครเมียม (III) ด้วยวิธีการเทียบสี (Colorimetric Method)

วิธีการวิเคราะห์แสดงภาคผนวก ค

### 3.3.5 การกำจัดโครเมียม (III) ออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์

(Modified Erdem and Tumen, 2004)

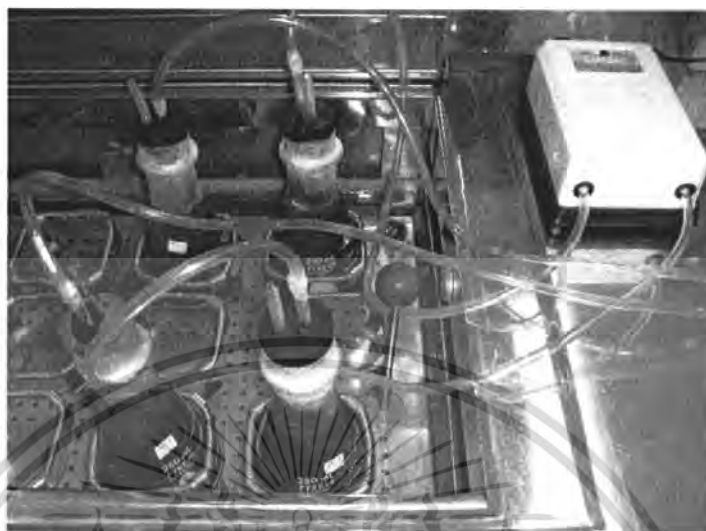
1) น้ำเสียโครเมียม(III)ที่ใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  เป็นตัวรีดิวซ์ที่เตรียมไว้ ผสมกับ  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  2.5 เท่าของความเข้มข้นของโครเมียมตามสัดส่วนที่ได้คำนวณไว้(ภาคผนวก จ ) นำน้ำเสียตัวอย่างทั้งที่ใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  และ  $\text{FeSO}_4$  เป็นตัวรีดิวซ์ ปรับพีเอชด้วย  $\text{NaOH}$  ให้มีพีเอชเท่ากับ 9 ในขวดรูปชมพู่ ให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส พร้อมเขย่าด้วยเครื่องเขย่าในอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที พร้อมกับให้อากาศด้วย air pump 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที มีอัตราส่วนน้ำหนักของ  $\text{Fe}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$  เท่ากับ 13.36

2) แยกตะกอนด้วยการกรองแบบธรรมดา และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3) บดตะกอนที่ได้ให้ละเอียดและชั่งน้ำหนักตะกอนของแต่ละน้ำเสียตัวอย่างซึ่งทำทั้งหมด 7 ซ้ำ

4) แบ่งตะกอนเป็น 2 ชุดโดยทดสอบความเป็นแม่เหล็กในหน่วยของแก๊สส์และทดสอบความเป็นพิษของตะกอน (Waste Extraction Wet, WET)

5) ของเหลวที่ผ่านการกรองจะนำไปวิเคราะห์หาโลหะหนักที่เหลือ โดยวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) ค่าพีเอช (pH) ปริมาณความต่างศักย์โออาร์พี (ORP) และอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน (AAS)



รูปที่ 3.2 แสดงรูปแบบการทำเฟอร์ไรต์ในสถานะฟิอ็อกเท่ากับ 9 ในขวดรูปชมพู ให้ความร้อน  $90^{\circ}\text{C}$  เขย่าอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที อัตราการให้อากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที มีอัตราส่วนน้ำหนักของ  $\text{Fe}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$  เท่ากับ 13.36

### 3.3.6 กระบวนการเพิ่มความเป็แม่เหล็กแก่ตะกอนโครไมต์

- 1) นำผงตะกอนโครไมต์ ( $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ ) ที่ได้จากน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์ มาอัดด้วยเครื่อง Hydraulic Floor Cranes ด้วยแรงกดตัน 1 ตัน
- 2) นำไปวัดค่าความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่อง Gauss meter
- 3) นำก้อนแม่เหล็กที่ได้ไปเผาในเตาเผา ซึ่งมีอุณหภูมิ  $800^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 4) นำไปวัดค่าความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่อง Gauss meter
- 5) นำไปเพิ่มสนามแม่เหล็กด้วยเครื่องเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Magnetic induce)
- 6) นำไปวัดค่าความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่อง Gauss meter

### 3.3.7 กระบวนการวิเคราะห์

- 1) ความเข้มข้นของเหล็กและโครเมียมหาโดยใช้วิธี AAS ยี่ห้อ Perkin Eimer instruments รุ่น AAnalyst 800 จากน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์และการย่อยด้วยกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ทดสอบการตอบสนองต่อแม่เหล็กของตะกอนโดยนำตะกอนออกมาจากขวดรูปชมพู่
- 3) วิเคราะห์ความเป็นพิษของตะกอนด้วยวิธี Waste Extraction Wet (WET)

### 3.3.8 การประกันคุณภาพในการวิเคราะห์ (Quality assurance and Quality control)

#### 1. การควบคุมคุณภาพขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

ก่อนทำการวิเคราะห์ตัวอย่างจะทำการกวนตัวอย่างน้ำเสียภายใน Equalizing tank และถังแกสตอนของน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง ให้เข้ากันก่อน โดยใช้แท่งพลาสติกยาว

#### 2. การควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์น้ำเสีย

จากเครื่องมือการวิเคราะห์ประกอบด้วย เครื่องพีเอชมิเตอร์ เครื่องวัดความนำไฟฟ้า หัววัดโออาร์พี โดยทำการเทียบมาตรฐาน ด้วยสารละลายมาตรฐานของเครื่องมือแต่ละชนิดเช่น เครื่องพีเอชมิเตอร์ทำการเทียบมาตรฐานด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ 7 และ 10 พร้อมทั้งทำการล้างหัววัดทุกครั้งที่ทำ การวิเคราะห์ด้วยน้ำกลั่นและสารละลายตัวอย่างที่จะทำการวัด

#### 3. การควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์ความเป็นแม่เหล็ก

จากการทดลองได้ทำการสุ่มตัวอย่างที่ได้มาทั้ง 7 ตัวอย่าง เนื่องจากตัวอย่างมีขนาดอนุภาคหลายขนาดและเพื่อความมั่นใจว่าตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นตัวแทนของตัวอย่างที่แท้จริง จึงได้ทำการนำตัวอย่างมาทลบนกระดวยขาว ทำการเกลี่ยเพื่อกระจายตัวอย่างให้ทั่วจากนั้นจับมุมกระดวยทั้ง 4 มุมเป็นจำนวน 5 ครั้งในแต่ละตัวอย่างเพื่อให้เกิดการคลุกเคล้าตัวอย่างให้กระจายทั่วสม่ำเสมอและทำการสุ่มตัวอย่างมา 3 ตัวอย่างแล้วนำไปเข้ากระบวนการเพิ่มความเข้มข้นแม่เหล็กแก่ตะกอนโครไมต์ ( $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ ) ต่อไป

#### 4. การควบคุมคุณภาพผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ โดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี ได้หาค่าทางสถิติของผลการทดลองและทำ Triplicate Sample โดยนำผลที่ได้หาค่าทางสถิติได้แก่ ค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และทำการกราฟมาตรฐาน พร้อมกับหาค่า  $R^2$

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 การศึกษาคุณลักษณะน้ำเสียเบื้องต้น

##### 4.1.1 แหล่งที่มาของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

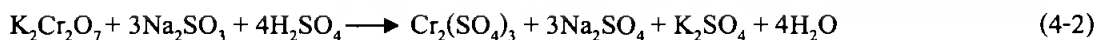
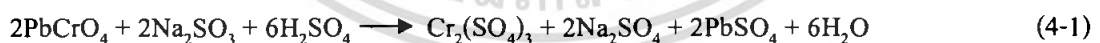
1 น้ำทิ้งมาจากการทดลองปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 1 เรื่อง การหาปริมาณของตะกั่วโดยการไทเทรตปฏิกิริยารีดอกซ์ จากห้องปฏิบัติการเคมีอาครเรียนรวมสมเด็จพระรัตนราชสุดาฯ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งรายละเอียดของส่วนประกอบน้ำทิ้งแสดงในภาคผนวก ฎ และดังแสดงในตาราง 4.1

2 น้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกหนัง จากโรงงานฟอกหนัง จังหวัดสมุทรปราการ โดยมีปริมาณโครเมียมทั้งหมด ซึ่งเป็นโลหะหนักมีความเข้มข้น 3050.6 mg/L ดังแสดงในตาราง 4.1

#### 4.2 การเตรียมน้ำเสียตัวอย่าง (Erdem and Tumen, 2004)

##### 4.2.1 การเตรียมน้ำเสียตัวอย่างโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$

จากผลการทดลองน้ำเสียแบบผสม (Mix waste laboratory, WMS) และน้ำเสียโรงงานฟอกหนัง (Tannery waste, TW) เมื่อเติมปริมาณ  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  3 เท่าของความเข้มข้นโครเมียม (VI) ตามทฤษฎีและปรับพีเอชเท่ากับ  $2 \pm 1$  ด้วย  $\text{H}_2\text{SO}_4$  เมื่อตรวจสอบด้วยวิธีการเทียบสี (Colorimetric Method) ไม่พบปริมาณโครเมียม (VI) เหลือในน้ำเสียทั้ง 2 แบบ แสดงว่าเป็นไปตามสมการเคมีดังนี้



โดยน้ำเสียแบบผสมเป็นไปตามสมการเคมี (4-1) และน้ำเสียโรงงานฟอกหนังเป็นไปตามสมการเคมี (4-2) แสดงว่าโครเมียม (VI) ถูกรีดิวซ์เป็นโครเมียม (III) หหมด

ตารางที่ 4.1 การศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการและน้ำโครมจากโรงงานฟอกหนังซึ่งมีโครเมียม (VI) เป็นองค์ประกอบ

พารามิเตอร์	น้ำจากห้องปฏิบัติการ	น้ำจากโรงงานฟอกหนัง
1. ค่าพีเอช (pH)	1.35 ± 0.03	5.00
2. ค่าสภาพการนำไฟฟ้า(Conductivity, ms/cm)	121.5 0± 0.05	102.5 ± 2.70
3. ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำเสีย (g)	2.04	10.58 ± 0.28
4. ปริมาณความต่างศักย์ โออาร์พี (ORP, mV)	227.27 ± 0.15	109.2 ± 5.20
5. ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม (III) ในรูปละลายน้ำ (mg/L)	0.20 ± 0.004	3,046.87
6. ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม (VI) ในรูปละลายน้ำ (mg/L)	1.03	3.73
7. ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดในรูปละลายน้ำ (mg/L)	1.23	3,050.60
8. ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในรูปละลายน้ำ (mg/L)	0.278 ± 0.006	NA

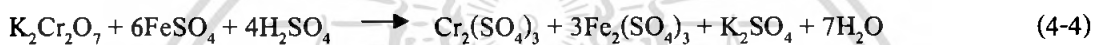
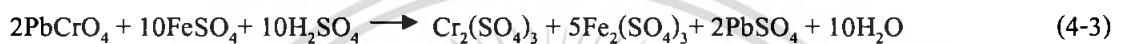
หมายเหตุ ทุกพารามิเตอร์ทำการวัด 3 ซ้ำ และหาค่า  $\bar{X}$  และ SD

NA = not analyze

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การเตรียมน้ำเสียตัวอย่างโดยใช้ FeSO<sub>4</sub>

จากผลการทดลองน้ำเสียแบบผสม และน้ำเสียโรงงานฟอกหนัง เมื่อเติมปริมาณ FeSO<sub>4</sub> 2.5 เท่าของความเข้มข้น โครเมียมทั้งหมดตามทฤษฎี ได้ว่าโครเมียม (VI) เปลี่ยนเป็นโครเมียม (III) ไม่หมด จากการตรวจสอบด้วยวิธีการเทียบสี (Colorimetric Method) พบว่าน้ำเสียแบบผสมมีความเข้มข้น โครเมียม (VI) เท่ากับ 0.86 mg/L และ น้ำเสียโรงงานฟอกหนังเท่ากับ 0.24 mg/L แสดงว่ามีบางส่วนที่ โครเมียม (VI) ถูกรีดิวซ์เป็นโครเมียม (III) ในน้ำเสียทั้ง 2 แบบและเป็นไปตามสมการเคมีดังนี้



โดยน้ำเสียแบบผสมเป็นไปตามสมการเคมี (4-3) และน้ำเสียโรงงานฟอกหนังเป็นไปตามสมการที่ (4-4)

ตารางที่ 4.2 ผลของตัวรีดิวซ์ระหว่าง  $\text{FeSO}_4$  กับ  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ในกระบวนการรีดิวซ์ก่อนเข้ากระบวนการ  
เฟอร์ไรต์

น้ำเสีย	ชนิดตัวรีดิวซ์					
	$\text{FeSO}_4$			$\text{Na}_2\text{SO}_3$		
	ลักษณะทาง กายภาพหลัง รีดิวซ์	Cr (VI) ก่อน รีดิวซ์	Cr (VI) หลัง รีดิวซ์	ลักษณะ ทาง กายภาพ หลัง รีดิวซ์	Cr (VI) ก่อน รีดิวซ์	Cr (VI) หลัง รีดิวซ์
MWS	สีน้ำเงินเข้มปน ดำ	3.64 mg/1700mL	0.86 mg/1700mL	เป็นสีน้ำ เงินอม ฟ้า	3.64 mg/1700mL	ND
TW	เป็นสีดำนม เงิน	3.73 mg/1700mL	0.24 mg/1700mL	เป็นสีน้ำ เงินเข้ม อมเขียว	3.73 mg/1700mL	ND

หมายเหตุ ทุกพารามิเตอร์ทำการวัด 7 ซ้ำ และหาค่า  $\bar{X}$  และ SD

ND = not detect

4.3 การกำจัดโครเมียม (III) ออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ (Modified Erdem and Tumen, 2004)

จากการศึกษาการกำจัดโครเมียม (III) ออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ทำในสภาวะที่ค่าพีเอชเท่ากับ 9 ให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องเครื่องเขย่าด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที พร้อมกับให้อากาศ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 60 นาทีและทำการแปรตัวรีดิวซ์ 2 ชนิดคือ  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  และ  $\text{FeSO}_4$  และอัตราส่วนน้ำหนักของ  $\text{Fe}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$  เท่ากับ 13.36 และได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.3.1 น้ำหนักตะกอนโครไมต์ ( $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ )

จากการทดลองของ Erdem and Tumen, 2004 พบว่าตะกอนที่มีสีดำหรือสีน้ำตาลเข้มปนดำ มีลักษณะเป็นลิ่มๆ มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กสูง และโลหะหนักที่เหลือในสารละลายที่ผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์ตรวจไม่พบ

ก. น้ำเสียแบบผสมที่รีดิวซ์ด้วย  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  มีปริมาณตะกอนน้อยกว่าและมีสีของตะกอนอ่อนกว่าน้ำเสียโรงงานฟอกหนัง ดังรูปที่ 4-1 และ 4-2 จากทฤษฎี ตะกอนที่เกิดจากกระบวนการเฟอร์ไรต์ในสภาวะนี้อยู่ในรูปสารประกอบโครเมียม-เหล็ก หรือในรูปโครไมต์ ( $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ ) และผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคือ ฮีมาไทต์ และจีโอไทต์ ( $\text{Cr}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ) ซึ่งสมการตามทฤษฎีของการเกิดตะกอนคือ



และถ้าอัตราส่วนน้ำหนักของ  $\text{Fe}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$  แตกต่างกันลักษณะของตะกอนแตกต่างกัน ซึ่งถ้าน้ำเสียตัวอย่างทั้ง 2 แบบมีอัตราส่วนน้ำหนักของ  $\text{Fe}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$  เท่ากันคือ 13.36 ลักษณะทางกายภาพจึงคล้ายกัน และเกิดตะกอนดังสมการ (4-5) ตามทฤษฎี

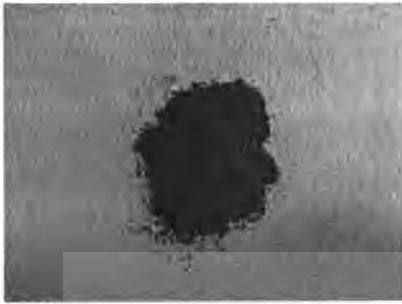
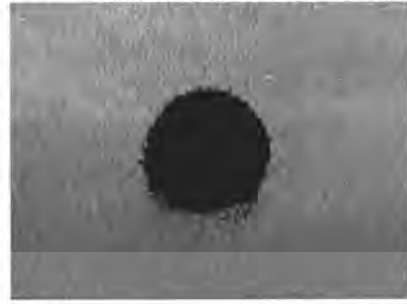


รูปที่ 4.1 ตะกอน MWS โดยใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$

เป็นตัวรีดิวซ์

รูปที่ 4.2 ตะกอน TW โดยใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  เป็นตัวรีดิวซ์

ข. น้ำเสียแบบผสมที่รีดิวซ์ด้วย  $\text{FeSO}_4$  มีปริมาณตะกอนมากกว่าและมีสีดำเป็นเกล็ดดังตาราง 4.3 ลิ่มๆคล้ายกับตะกอนของน้ำเสียโรงงานฟอกหนัง แสดงผลดังรูปที่ 4-3 และ 4-4 อัตราส่วนน้ำหนักของ  $\text{Fe}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$  เท่ากันคือ 13.36

รูปที่ 4.3 ตะกอน MWS โดยใช้  $\text{FeSO}_4$ รูปที่ 4.4 ตะกอน TW โดยใช้  $\text{FeSO}_4$ 

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของน้ำหนักตะกอนโครไมต์หลังจากผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์ในสภาวะพีเอช 9 อุณหภูมิ  $90^\circ\text{C}$  อัตราการให้อากาศ  $100\text{ mL/min}$  เวลาสัมผัส 60 นาที อัตราการเขย่า 100 รอบ/นาที (ทำ 7 ซ้ำ)

ชนิดน้ำเสียตัวอย่าง	ชนิดตัวรีคิวซ์			
	$\text{FeSO}_4$		$\text{Na}_2\text{SO}_3$	
	ลักษณะทางกายภาพ	น้ำหนัก ตะกอน (g)	ลักษณะทางกายภาพ	น้ำหนัก ตะกอน (g)
MWS	สีน้ำตาลเข้มเป็นเกล็ด ไม่ค่อยละเอียด	$9.06 \pm 1.6$	สีน้ำตาลอ่อนค่อนข้าง ละเอียด	$6.17 \pm 0.05$
TW	สีดำเข้มเป็นเกล็ดไม่ ค่อยละเอียด	$7.78 \pm 1.48$	สีน้ำตาลเข้มค่อนข้าง ละเอียดละเอียด	$7.57 \pm 1.4$

หมายเหตุ ทุกพารามิเตอร์ทำการวัด 7 ซ้ำ และหาค่า  $\bar{X}$  และ SD

#### 4.3.2 สารละลายที่ผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์

เมื่อเกิดกระบวนการเฟอร์ไรต์ตั้งสภาวะดังกล่าวในน้ำเสียตัวอย่างทั้ง 2 แบบ จะได้ 2 ส่วนคือ ส่วนสารละลายและตะกอน เมื่อกรองตะกอนแบบธรรมดาและนำส่วนสารละลายไปวัดค่าความต่างศักย์โออาร์พี (Oxidation Reduction Potential) ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) ค่าพีเอช และโครเมียม (VI) และโครเมียม (III) ด้วยอะตอมมิคแอบซอร์พชัน (AAS) ซึ่งได้เข้ากระบวนการย่อยด้วยกรด ดังแสดงในภาคผนวก ฉ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. น้ำเสียแบบผสมที่รีดิวซ์ด้วย  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ที่ผ่านกระบวนการเพอร์ไรต์ดังกล่าว เมื่อตรวจสอบด้วยอะตอมมิคแอนาไลเซอร์พบว่ามีน้ำเสียตัวอย่างตรวจไม่พบปริมาณโครเมียมเหลืออยู่หรือต่ำกว่าขีดจำกัดที่ตรวจวัดได้ (น้อยกว่า  $0.1 \text{ mg/L}$ ) มีค่าความต่างศักย์โออาร์พีเฉลี่ยเท่ากับ  $-84 \text{ mV}$  พีเอชเฉลี่ยเท่ากับ  $6.89$  ค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ  $86.8 \text{ ms/cm}$  จากค่าโออาร์พีแสดงในค่าลบแสดงว่าโอกาสที่จะให้อิเล็กตรอนได้มากกว่ารับอิเล็กตรอนเมื่อเทียบกับข้าวฮ้างอิงซึ่งผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ และแสดงว่าน้ำเสียแบบผสมมีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังรีดิวซ์ด้วย  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ที่ผ่านกระบวนการเพอร์ไรต์ดังกล่าว เมื่อตรวจสอบ พบว่ามีน้ำเสียตัวอย่างตรวจไม่พบปริมาณโครเมียมเหลืออยู่ มีค่าความต่างศักย์โออาร์พีเฉลี่ยเท่ากับ  $12.70 \text{ mV}$  พีเอชเฉลี่ยเท่ากับ  $5.32$  ค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ  $108.2 \text{ ms/cm}$  จากค่าโออาร์พีแสดงในค่าบวกแสดงว่าโอกาสที่จะรับอิเล็กตรอนได้มากกว่าให้อิเล็กตรอนเมื่อเทียบกับข้าวฮ้างอิงซึ่งผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ และแสดงว่าน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังมีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ผลการทดลองสอดคล้องกับทางทฤษฎี โดยเติม  $\text{FeSO}_4$  เกิดปฏิกิริยากับโครเมียม (III) เพื่อเกิดตะกอนโครไมต์และกำจัดโลหะหนักในที่นี้คือโครเมียม

เนื่องจากผลการทดลองได้ยืนยันว่าสามารถกำจัดโครเมียมได้ เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นโลหะหนักก่อนเข้าการบำบัดด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์ และมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมแสดงผลในตาราง 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

ข. น้ำเสียแบบผสมที่รีดิวซ์ด้วย  $\text{FeSO}_4$  ระหว่างน้ำที่ผ่านกระบวนการเพอร์ไรต์ดังกล่าว เมื่อตรวจสอบ พบว่ามีน้ำเสียตัวอย่างตรวจไม่พบปริมาณโครเมียมเหลืออยู่ มีค่าความต่างศักย์โออาร์พีเฉลี่ยเท่ากับ  $-92.10 \text{ mV}$  พีเอชเฉลี่ยเท่ากับ  $3.73$  ค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ  $110.5 \text{ ms/cm}$  จากค่าโออาร์พีแสดงในค่าลบแสดงว่าโอกาสที่จะให้อิเล็กตรอนได้มากกว่ารับอิเล็กตรอนเมื่อเทียบกับข้าวฮ้างอิงซึ่งผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ และแสดงว่าน้ำเสียแบบผสมมีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

น้ำเสียโรงงานฟอกหนังที่รีดิวซ์ด้วย  $\text{FeSO}_4$  ที่ผ่านกระบวนการเพอร์ไรต์ดังกล่าว เมื่อตรวจสอบด้วยอะตอมมิคแอนาไลเซอร์ พบว่ามีน้ำเสียตัวอย่างตรวจไม่พบปริมาณโครเมียมเหลืออยู่ซึ่งได้ผลว่า ND มีค่าความต่างศักย์โออาร์พีเฉลี่ยเท่ากับ  $49.40 \text{ mV}$  พีเอชเฉลี่ยเท่ากับ  $7.29$  ค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ  $89.2 \text{ ms/cm}$  จากค่าโออาร์พีแสดงในค่าบวกแสดงว่าโอกาสที่จะรับอิเล็กตรอนได้มากกว่าให้อิเล็กตรอนเมื่อเทียบกับข้าวฮ้างอิงซึ่งผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ และแสดงว่าน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังมีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน

แสดงว่าผลการทดลองสอดคล้องกับทางทฤษฎี โดยเติม  $\text{FeSO}_4$  เกิดปฏิกิริยากับโครเมียม (III) เพื่อเกิดตะกอนโครไมต์ เนื่องจากผลการทดลองได้ยืนยันว่าสามารถกำจัดโครเมียมได้ เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นโลหะหนักก่อนเข้าการบำบัดด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์ และมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมดังแสดงผลในตาราง 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 สารละลายที่ผ่านกระบวนการเพอร์ไรต์รีดิวซ์ด้วย  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  และผ่านการกรองแบบธรรมดาซึ่งมีลักษณะใส แตกต่างกับน้ำเสียก่อนเข้ากระบวนการกันอย่างสิ้นเชิง

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของประสิทธิภาพกระบวนการเพอร์ไรต์ในสภาวะพีเอช 9 อุณหภูมิ  $90^\circ\text{C}$  อัตราการไหลอากาศ  $100\text{ mL/min}$  เวลาสัมผัส 60 นาที อัตราการเขย่า  $100\text{ รอบ/นาที}$

ชนิดน้ำเสียตัวอย่าง	ชนิดตัวรีดิวซ์			
	$\text{Na}_2\text{SO}_3$		$\text{FeSO}_4$	
	[Cr]หลังกระบวนการเพอร์ไรต์	ประสิทธิภาพ	[Cr]หลังกระบวนการเพอร์ไรต์	ประสิทธิภาพ
MWS	ND	100%	ND	100%
TW	ND	100%	ND	100%

หมายเหตุ ทุกพารามิเตอร์ทำการวัด 7 ซ้ำ และหาค่า  $\bar{X}$  และ SD

ND = not detect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะน้ำเสียของน้ำเสียก่อนและหลังผ่าน  
กระบวนการเพอร์ไรต์ ( $n = 7$ )

พารามิเตอร์	ก่อนเข้ากระบวนการเพอร์ไรต์		หลังเข้ากระบวนการเพอร์ไรต์			
	น้ำทิ้งห้องปฏิบัติการ	น้ำจากโรงงานฟอกหนัง	MWS		TW	
			Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	FeSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	FeSO <sub>4</sub>
ค่าพีเอช (pH)	1.35 ± 0.03	5.00	6.89 ± 0.13	7.29 ± 0.51	5.32 ± 0.46	3.73 ± 0.12
ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (ms/cm)	121.50 ± 0.05	102.5 ± 2.7	86.8 ± 1.4	89.2 ± 0.7	108.2 ± 10	110.5 ± 3.1
ปริมาณความต่างศักย์ โออาร์ที (mV)	227.27 ± 0.15	109.2 ± 5.20	-84.40 ± 3.47	-92.1 ± 9.74	12.7 ± 6.59	49.40 ± 0.82

หมายเหตุ ทุกพารามิเตอร์ทำการวัด 3 ซ้ำ และหาค่า  $\bar{X}$  และ SD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลเปรียบเทียบน้ำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์ในสภาวะพีเอช 9 อุณหภูมิ 90 °C อัตราการให้อากาศ 100 mL/min เวลาสัมผัส 60 นาที อัตราการเขย่า 100 รอบ/นาที กับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (พ.ศ.2540)

พารามิเตอร์	ชนิดตัวรีดิวซ์				มาตรฐานคุณภาพน้ำ ทิ้งจากโรงงาน อุตสาหกรรมและนิคม อุตสาหกรรม
	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>		FeSO <sub>4</sub>		
	MWS	TW	MWS	TW	
ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	6.89	5.32	7.29	3.73	5.5-9.0
สีหรือกลิ่น	ไม่มี กลิ่น	ไม่มี กลิ่น	ไม่มี กลิ่น	ไม่มี กลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ โครเมียม	ND	ND	ND	ND	ไม่เกิน 0.25 mg/L
โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์โครเมียม	ND	ND	ND	ND	ไม่เกิน 0.75 mg/L
ตะกั่ว	ND	ND	ND	ND	ไม่เกิน 0.2 mg/L

แหล่งที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภท โรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

#### 4.3.3 ความเป็นแม่เหล็กของตะกอน

ตะกอนโครไมต์ (Cr<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub>) ที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ในสภาวะดังกล่าว เมื่อนำมาวัดคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กด้วย Gauss Meter ได้ผลดังนี้

จากตารางแสดงผล 4.7 เห็นว่าน้ำเสียแบบผสมกับน้ำเสียโรงงานฟอกหนังที่รีดิวซ์ด้วย Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กพอกันๆ ได้แก่ 1.04G และ 1.14G ตามลำดับ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของตะกอนน้ำเสียทั้ง 2 แบบคล้ายกัน และมีอัตราส่วนน้ำหนักของ Fe<sup>2+</sup>/Cr<sup>3+</sup> เท่ากันและได้ทดลองโดยนำแท่งแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็กสูงมาวางใกล้กับตะกอน ซึ่งได้ผลว่ามีตะกอน

บางส่วนได้ดูดติดกับแท่งแม่เหล็ก แสดงว่ามีตะกอนบางส่วนที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กและบางส่วนไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก

จากตารางแสดงผล 4.7 เห็นว่าน้ำเสียแบบผสมกับน้ำเสียโรงงานฟอกหนังที่รีดิวซ์ด้วย  $\text{FeSO}_4$  มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กพอๆ กัน ได้แก่ 1.11G และ 1.14G ตามลำดับ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของตะกอนน้ำเสียทั้ง 2 แบบคล้ายกัน และมีอัตราส่วนน้ำหนักของ  $\text{Fe}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$  เท่ากันและได้ทดลองโดยนำแท่งแม่เหล็กที่มีค่าความเป็นแม่เหล็กสูงมาวางใกล้กับตะกอน ซึ่งได้ผลว่ามีตะกอนบางส่วนได้ดูดติดกับแท่งแม่เหล็ก แสดงว่ามีตะกอนบางส่วนที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กและบางส่วนไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก



รูปที่ 4.6 แท่งแม่เหล็กก่อนดูดกับตะกอน

รูปที่ 4.7 แท่งแม่เหล็กหลังดูดกับตะกอน

ตารางที่ 4.7 แสดงผลของความเป็นแม่เหล็กของตะกอนโครไมต์หลังจากผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์ในสถานะที่เอช 9 อุณหภูมิ 90 °c อัตราการให้อากาศ 100 mL/min เวลาสัมผัส 60 นาที อัตราการเขย่า 100 รอบ/นาที

ชนิดน้ำ เสีย ตัวอย่าง	ชนิดตัวรีดิวซ์			
	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>		FeSO <sub>4</sub>	
	ความเป็น แม่เหล็ก (G)	น้ำหนัก ตะกอน (g)	ความเป็น แม่เหล็ก (G)	น้ำหนัก ตะกอน (g)
MWS	1.04	6.17	1.11	9.06
TW	1.14	7.57	1.14	7.78

หมายเหตุ ทุกพารามิเตอร์ทำการวัด 7 ซ้ำ และหาค่า  $\bar{X}$  และ SD

#### 4.4 ผลของการเพิ่มความเป็นแม่เหล็กแก่ตะกอนโครไมต์ (Cr<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub>)

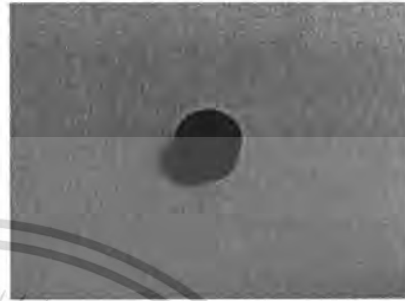
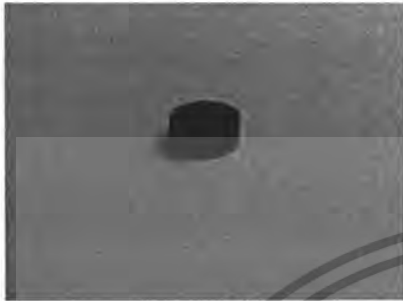
เนื่องจากตะกอนที่ได้เกิดจากสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) หลายชนิดและการเรียงตัวของอิเล็กตรอนเดี่ยวที่อยู่ออร์บิทัลภายในแต่ละชุดยังไม่มีความเป็นระเบียบที่ให้ค่าความเป็นแม่เหล็ก (Magnetic saturations) มากพอที่นำไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับแต่งเพื่อให้มีค่าความเป็นแม่เหล็กสูงขึ้นดังนี้

##### 4.4.1 กระบวนการอัดเม็ด

ก่อนเข้ากระบวนการอัดเม็ดต้องทำให้ตะกอนอยู่ในลักษณะที่เป็นผง โดยใช้โกร่งนำให้ละเอียดจนมีขนาดประมาณ 10 mesh หรือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรแล้วเข้าเครื่อง Hydraulic Floor Clanes กระบวนการอัดเม็ดนี้ช่วยให้อิเล็กตรอนเดี่ยวในออร์บิทัลภายในมีความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มค่าความเป็นแม่เหล็กหรือคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก

เมื่อนำตะกอนที่รีดิวซ์ด้วย Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> มาอัดเม็ดแล้วนำไปวัดค่าความเป็นแม่เหล็กได้ผลว่ามีค่าความเป็นแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามทฤษฎี แต่มีค่าความเป็นแม่เหล็กไม่เพียงพอต่อการใช้ประโยชน์เนื่องจากได้ค่าความเป็นแม่เหล็กของน้ำเสียแบบผสมและน้ำเสียโรงงานฟอกหนังเพียง 1.50G และ 1.73 G ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.8 และได้ทดสอบโดยนำแท่งแม่เหล็กมาวางใกล้ๆกับตะกอนที่อัดเม็ด ผล

ปรากฏว่าไม่มีการดึงดูดกันแต่อย่างใด อาจเป็นเพราะตะกอนส่วนที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก  
ขัดขวางตะกอนที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก จากการผสมแล้วอัดเม็ดเข้าด้วยกัน



รูปที่ 4.8 ตะกอนMWS ที่อัดเม็ด โดยใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$

รูปที่ 4.9 ตะกอนTW ที่อัดเม็ด โดยใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$

เมื่อนำตะกอนที่รีดิวซ์ด้วย  $\text{FeSO}_4$  มาอัดเม็ดแล้วนำไปวัดค่าความเป็นแม่เหล็กได้ผลว่ามีค่า  
ความเป็นแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามทฤษฎี แต่มีค่าความเป็นแม่เหล็กไม่เพียงพอต่อการใช้ประโยชน์เนื่องจาก  
ได้ค่าความเป็นแม่เหล็กของน้ำเสียแบบผสมและน้ำเสียโรงงานฟอกหนังเพียง 2.70G และ 1.70G  
ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.8 และได้ทดสอบโดยนำแท่งแม่เหล็กมาวางใกล้ๆกับตะกอนที่อัดเม็ด ผล  
ปรากฏว่าไม่มีการดึงดูดกันแต่อย่างใด อาจเป็นเพราะตะกอนส่วนที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก  
ขัดขวางตะกอนที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก จากการผสมแล้วอัดเม็ดเข้าด้วยกัน



รูปที่ 4.10 ตะกอนMWS ที่อัดเม็ด โดยใช้  $\text{FeSO}_4$

รูปที่ 4.11 ตะกอนTW ที่อัดเม็ด โดยใช้  $\text{FeSO}_4$

#### 4.4.2 กระบวนการเผาในบรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation Firing: OF)

ในกระบวนการนี้เป็นการเผาเพื่อไล่ความชื้น สารอินทรีย์ และเปลี่ยนเหล็กออกไซด์ใน  
ชิ้นงานให้อยู่ในรูปของสารประกอบของเฟอร์ริกออกไซด์ได้แก่ ตะกอนโครไมต์ หรือผลิตภัณฑ์  
ข้างเคียงคือ ฮีมาไทต์ และ จีโอไทต์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก และเตรียมเข้ากระบวนการ  
เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในขั้นตอนต่อไป ในกระบวนการนี้เผาที่  $800^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมงซึ่ง

บรรยากาศในเตาเผาเมื่อออกซิเจนมากเกินไปซึ่งทำได้โดยให้อากาศผ่านเข้าเตาอย่างเต็มที่โดยการปรับหัวพ่นไฟและมีปริมาณเพียงพอที่จะไล่ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ให้พุ่งออกไปจากเตาได้เร็วที่สุด

เมื่อเผาแล้วตะกอนที่รีดิวซ์ด้วย  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ที่อัดเม็ดแล้วซึ่งแตกออกหลังเผาพบว่า มีความละเอียดมากขึ้น เป็นสีดำนวลๆ ลักษณะตรงตามกับตะกอนที่ Eedem and Tumen, 2004 ได้กล่าวว่ามีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กสูง และตะกอนได้มีน้ำหนักลดลงเหลือ โดยน้ำเสียแบบผสมมีน้ำหนักเท่ากับ 0.54g แสดงว่าน้ำหนักลดลงไปจำนวน 0.46g และน้ำเสียโรงงานฟอกหนังมีน้ำหนักเท่ากับ 0.61g แสดงว่าน้ำหนักลดลงไปจำนวน 0.39g และเมื่อนำไปอัดเม็ดแล้ววัดค่าความเป็นแม่เหล็กเท่ากับ 0.49G และ 0.80G ตามลำดับตาราง 4.8 จะเห็นว่าค่าความเป็นแม่เหล็กลดลง แต่เมื่อนำแท่งแม่เหล็กมาวางใกล้กับตะกอนจะเกิดการดึงดูดกันทุกส่วนของตะกอน แสดงว่าตะกอนที่ได้เหลือแต่ส่วนที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กเหมาะแก่การไปเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เนื่องจากกำจัดสารประกอบจำพวกความชื้น และสารอินทรีย์ออกและเปลี่ยนเหล็กออกไซด์ไปเป็นสารประกอบ เฟอริกออกไซด์

เมื่อเผาแล้วตะกอนที่รีดิวซ์ด้วย  $\text{FeSO}_4$  ที่อัดเม็ดแล้วซึ่งแตกออกหลังเผาพบว่า มีความละเอียดมากขึ้น เป็นสีดำนวลๆ ลักษณะตรงตามกับตะกอนที่ Eedem and Tumen, 2004 ได้กล่าวว่ามีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กสูง และตะกอนได้มีน้ำหนักลดลงเหลือ โดยน้ำเสียแบบผสมมีน้ำหนักเท่ากับ 0.49g แสดงว่าน้ำหนักลดลงไปจำนวน 0.51g และน้ำเสียโรงงานฟอกหนังมีน้ำหนักเท่ากับ 0.55g แสดงว่าน้ำหนักลดลงไปจำนวน 0.45g และเมื่อนำไปอัดเม็ดแล้ววัดค่าความเป็นแม่เหล็กเท่ากับ 0.53G และ 0.73G ตามลำดับตาราง 4.8 จะเห็นว่าค่าความเป็นแม่เหล็กลดลง แต่เมื่อนำแท่งแม่เหล็กมาวางใกล้กับตะกอนจะเกิดการดึงดูดกันทุกส่วนของตะกอน แสดงว่าตะกอนที่ได้เหลือแต่ส่วนที่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กเหมาะแก่การไปเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เนื่องจากกำจัดสารประกอบจำพวกความชื้น และสารอินทรีย์ออกและเปลี่ยนเหล็กออกไซด์ไปเป็นสารประกอบ เฟอริกออกไซด์



รูปที่ 4.12 ภาพขณะเผาตะกอนในเตาเผาในบรรยากาศออกซิเดชัน (OF)

#### 4.4.3 กระบวนการเพิ่มสนามแม่เหล็กโดยการเหนี่ยวนำจากเครื่อง Magnetic Induce

เนื่องจากเม็ดตะกอนที่ผ่านกระบวนการเผาในบรรยากาศออกซิเดชันเป็นเวลา 3 ชั่วโมงมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก (Magnetic Saturation) ไม่เพียงพอที่จะนำไปเป็นแม่เหล็ก หรือประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ จึงต้องเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กด้วยเครื่อง Magnetic Induce ซึ่งเป็นไปตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ที่ว่า กระแสอิเล็กตรอนสามารถสร้างขึ้นได้โดยการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กตามสมการคือ

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (4-6)$$

จากหลักการของเคมือนิวทรียักรที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวมากและเคลื่อนที่ในออร์บิทัลภายใน จะเกิดคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กเพิ่มขึ้นหรือเรียกว่าพาราแมกเนติก (Paramagnetic)

เครื่องMagnetic Induce นี้สามารถเพิ่มสนามแม่เหล็กแก่วัสดุได้ถึง 500G แต่วัสดุจะมีความเป็นแม่เหล็กเท่าใดนั้นขึ้นกับความสามารถในการดูดซับสนามแม่เหล็กของตะกอน ซึ่งผลของการเหนี่ยวนำตะกอนจากเครื่องMagnetic Induce โดยวัดค่าความเป็นแม่เหล็กด้วย Gauss Meter ดังนี้

พบว่าความสามารถดูดซับสนามแม่เหล็กของตะกอนตัวอย่างที่รีดิวซ์ด้วย  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ทั้ง 2 แบบคล้ายกันโดยตะกอนของน้ำเสียแบบผสมมีค่าความเป็นแม่เหล็ก 50.3G และตะกอนของน้ำเสียโรงงานฟอกหนังมีค่าความเป็นแม่เหล็ก 52.11G จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเป็นคุณสมบัติของวงจรไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กจากการสร้างกระแสไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ ดังนั้นความเป็นแม่เหล็กของตะกอนจะมากหรือน้อยขึ้นกับความสามารถดูดซับสนามแม่เหล็กของตะกอนหรือวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้น กระแสไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรและจำนวนขดลวดในวงจรของเครื่องเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งในที่นี้กระแสไฟฟ้าและจำนวนขดลวดเท่ากัน แสดงว่าตะกอนของน้ำเสียโรงงานฟอกหนังมีคุณสมบัติการดูดซับสนามแม่เหล็กมากกว่าตะกอนของน้ำเสียแบบผสม

พบว่าความสามารถการดูดซับสนามแม่เหล็กของตะกอนตัวอย่างที่รีดิวซ์ด้วย  $\text{FeSO}_4$  ทั้ง 2 แบบคล้ายกันโดยตะกอนของน้ำเสียแบบผสมมีค่าความเป็นแม่เหล็ก 49.80G และตะกอนของน้ำเสียโรงงานฟอกหนังมีค่าความเป็นแม่เหล็ก 51.10G จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเป็นคุณสมบัติของวงจรไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กจากการสร้างกระแสไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ ดังนั้นความเป็นแม่เหล็กของตะกอนจะมากหรือน้อยขึ้นกับความสามารถการดูดซับสนามแม่เหล็กของตะกอนหรือวัสดุ นั้น กระแสไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรและจำนวนขดลวดในวงจรของเครื่องเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งในที่นี้กระแสไฟฟ้าและจำนวนขดลวดเท่ากัน แสดงว่าตะกอนของน้ำเสียโรงงานฟอกหนังมีสมบัติการดูดซับสนามแม่เหล็กมากกว่าตะกอนของน้ำเสียแบบผสม

ตารางที่ 4.8 แสดงผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเพิ่มคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก

ชนิดตัวอย่างน้ำเสีย	ชนิดตัวรีดิวซ์							
	$\text{FeSO}_4$				$\text{Na}_2\text{SO}_3$			
	ก่อนอัดเม็ด (G)	หลังอัดเม็ด (G)	หลังไล่ $\text{O}_2$ (G)	หลังเหนี่ยวนำ (G)	ก่อนอัดเม็ด (G)	หลังอัดเม็ด (G)	หลังไล่ $\text{O}_2$ (G)	หลังเหนี่ยวนำ (G)
MWS	1.11	2.70	0.53	49.80	1.04	1.50	0.49	50.03
TW	1.14	1.70	0.73	51.10	1.14	1.73	0.80	52.11

หมายเหตุ กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นแม่เหล็กทำการวัด 3 ซ้ำ และหาค่า  $\bar{X}$  และ SD

#### 4.5 การศึกษาความเป็นพิษของตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์โดยสกัดด้วยวิธี

##### Waste Extraction Test (WET) (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6/2540)

การศึกษาความเป็นพิษของตะกอนเฟอร์ไรต์ได้ทำการศึกษาตามวิธีของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540 ซึ่งได้กำหนดวิธีทดสอบการชะละลายของของเสียอันตรายโดยใช้วิธีการสกัดด้วยวิธีวิธี Waste Extraction Test (WET)

#### 4.5.1 การทดสอบการชะละลายของโครเมียม (VI) ในสารละลายสกัด

สารละลายสกัดที่ใช้คือ น้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ต่อตะกอน 1 กรัม ทำการสกัดโดยใส่ ก๊าซออกซิเจนเข้าทิ้งไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และนำมากรองเอาเฉพาะสารละลายสกัด วิเคราะห์ สารละลายสกัดด้วยวิธีเทียบสี (Colorimetric method) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม (VI) ที่ถูกชะละลายในสารละลายสกัด ซึ่งได้ผลการทดลองดังตาราง เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่าไม่พบการชะละลายของ โครเมียม (VI) ในสารละลายสกัดเลย ซึ่งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6/2546 กำหนดให้มี โครเมียม (VI) ในสารละลายสกัดได้ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มิฉะนั้นจัดเป็น สารอันตราย ดังนั้นคือตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์นั้นไม่จัดเป็นสารอันตราย

#### 4.5.2 การทดสอบการชะละลายของโครเมียม (III) ในสารละลายสกัด

สารละลายสกัดที่ใช้คือ สารละลายโซเดียมซัลเฟต 0.2 M ที่ pH  $5.5 \pm 0.1$  10 มิลลิลิตร ต่อตะกอน 1 กรัม ทำการสกัดโดยใส่ก๊าซออกซิเจนเข้าทิ้งไว้เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และนำมากรองเอาเฉพาะสารละลายสกัด วิเคราะห์สารละลายสกัดด้วยวิธี AAS เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม (III) ที่ถูกชะละลายในสารละลายสกัด ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฎ เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่า โครเมียม (III) ถูกชะละลายในสารละลายสกัด ซึ่งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2546 กำหนดให้มี โครเมียม (III) ในสารละลายสกัดได้ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร มิฉะนั้นจัดเป็นสารอันตราย ดังนั้นคือตะกอนที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์นั้นจัดเป็นสารอันตราย

### 4.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับ นันทพร, สายสุนีย์และสิรินันท์ (2545)

#### 4.6.1 น้ำเสีย

แหล่งที่มาของน้ำเสียของ นันทพร, สายสุนีย์ และสิรินันท์ (2545) คือ น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการทางเคมี ดิกรียนรวมสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งได้จากการทดลองเรื่องสมดุลเคมี และน้ำยาล้างเครื่องแก้ว ส่วนโครงการนี้ใช้น้ำเสียจากการทดลองเรื่องการหาปริมาณของตะกั่วโดยการไทเทรตปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งลักษณะน้ำเสียดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การแสดงลักษณะน้ำเสียและเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยกระบวนการเพอร์ไรท์กับ  
 นันทพร, สายสุณีย์ และสิรินันท์ (2545)

พารามิเตอร์	นันทพร,สายสุณีย์และ สิรินันท์(2545)		ผลการทดลองของโครงการนี้						มาตรฐานคุณภาพน้ำ ที่โรงงาน อุตสาหกรรมและนิคม อุตสาหกรรม
	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด		หลังบำบัด				
			Lab	ฟอกหนัง	ผสม		ฟอกหนัง		
					FeSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	FeSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	
pH	0.88	-	1.35	5.0	7.29	6.89	3.73	5.32	5.5-9.0
Conduct (ms/cm)	60.07	-	121.5	102.5	89.2	86.8	110.5	108.2	-
ORP (mV)	-	-	325.76	704.96	6.4	14.7	147.0	90.6	-
TDS (g/l)	6,168.5	-	2.0354	10.5764	-	-	-	-	ไม่เกิน 3
Pb (mg/L)	46	0.152	0.276	ND	-	-	-	-	ไม่เกิน 0.2
Total Cr (mg/L)	2,330	1.646	1.2	3050.6	ND	ND	ND	ND	-
Cr <sup>3+</sup> (mg/L)	-	-	0.202	3046.785	ND	ND	ND	ND	ไม่เกิน 0.75
Cr <sup>6+</sup> (mg/L)	-	-	0.998	3.725	ND	ND	ND	ND	ไม่เกิน 0.25
แหล่งน้ำเสีย	การทดลองเรื่องสมดุลเคมี และน้ำยาล้างเครื่องแก้ว		การทดลองเรื่องการหาปริมาณของตะกั่ว โดยการไทเทรตปฏิกิริยารีดอกซ์ , โรงงานฟอก หนัง และน้ำเสียผสม						

#### 4.6.2 น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

นันทพร,สายสุนีย์ และสิรินันท์ (2545) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมและตะกั่วด้วย 2 กระบวนการคือ กระบวนการรีดักชัน – ฟิสิกัลเตชัน และกระบวนการเพอร์ไรต์ ซึ่งในกระบวนการรีดักชัน – ฟิสิกัลเตชัน ใช้เฟอร์รัสซัลเฟตและเมตาไบซัลไฟต์เป็นตัวรีดิวส์ และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารทำให้ตกตะกอน ได้ผลการทดลองคือ สามารถกำจัดโครเมียมได้ 100 เปอร์เซ็นต์ และสามารถกำจัดตะกั่วได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกระบวนการเพอร์ไรต์ ใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวรีดิวส์ โดยใช้อัตราส่วนโมลของ  $\text{Cr/FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  เป็น  $5.333 \times 10^{-3}$ ,  $2.667 \times 10^{-3}$ ,  $1.778 \times 10^{-3}$ ,  $1.333 \times 10^{-3}$ ,  $1.067 \times 10^{-3}$ ,  $8.889 \times 10^{-4}$ , และ  $7.619 \times 10^{-4}$  ที่พีเอชเท่ากับ 10 อุณหภูมิ  $70 \pm 5$  องศาเซลเซียส เวลาในการพ่นอากาศ 15, 30, 60 และ 100 นาที และใช้เวลาในการตกตะกอน 15 ชั่วโมง พบว่าในการบำบัดที่ใช้อัตราส่วนโมลและเวลาในการพ่นอากาศที่แตกต่างกันนั้นให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกันมากนักคือ สามารถบำบัดโครเมียมและตะกั่วได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ แต่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ ใช้อัตราส่วนโมลเท่ากับ  $1.778 \times 10^{-3}$  และเวลาพ่นอากาศ 60 นาที ซึ่งทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าความเข้มข้นโครเมียมและตะกั่วต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของโครงการนี้พบว่าการบำบัดโครเมียม 100 เปอร์เซ็นต์

#### 4.6.3 ตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัด

นันทพร,สายสุนีย์ และสิรินันท์ (2545) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมและตะกั่วด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์ ได้มีการทำการทดสอบความเป็นแม่เหล็กของตะกอนโดยใช้แท่งแม่เหล็กมาวางที่ก้นบีกเกอร์นั้นพบว่าตะกอนสามารถตกได้อย่างรวดเร็ว แสดงถึงความเป็นแม่เหล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ทำศึกษานี้โดยทำการทดสอบความเป็นแม่เหล็กโดยใช้เครื่อง Gauss Meter พบว่าตะกอนที่ได้มีค่าความเป็นแม่เหล็กเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาการนำตะกอนไปใช้ประโยชน์ต่อไปโดยการเพิ่มความเข้มข้นแม่เหล็กโดยการไล่ออกซิเจนออกจากตะกอนและทำการใส่สนามแม่เหล็ก

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาใช้สภาวะของกระบวนการเฟอร์ไรต์ในสภาวะพีเอช 9 อุณหภูมิ 90 °C อัตราการให้อากาศ 100 mL/min เวลาสัมผัส 60 นาที อัตราการเขย่า 100 รอบ/นาที อัตราส่วนน้ำหนัก  $Fe^{2+}/Cr^{3+}$  เท่ากับ 13.36 ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียคือโครเมียม (Cr) โดยมีตะกั่ว (Pb) ปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อยซึ่งสามารถกำจัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ได้เช่นกัน การกำจัดโครเมียมนี้อยู่ในรูปสารประกอบโครเมียม-เหล็กหรือโครไมต์ ( $Cr_2FeO_4$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ลักษณะของตะกอนนี้มีความแตกต่างกับตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ เนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่น เป็นวัตถุดิบใน  $Na_2K_2CrO_7$ , อัญมณี และ ferrochrome alloy ผลิตภัณฑ์อื่นๆ (Erdem and Tumen, 2004) เนื่องจากมีค่า TCLP ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดจาก USEPA แต่ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาการพัฒนาคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของโครไมต์ โดยวิธีทางกายภาพพบว่าเมื่อนำตะกอนมาอัดเม็ดแล้วนำมาเผาในบรรยากาศ (OF) เมื่อนำมาใช้สนามแม่เหล็กจากการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กด้วยเครื่อง Magnetic Induce ทำให้ตะกอนโครไมต์มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กมากขึ้น และสามารถประยุกต์ในงานแม่เหล็กได้ เช่น แม่เหล็กติดตู้เย็น เป็นส่วนประกอบในคอมพิวเตอร์

จากการศึกษาประสิทธิภาพของตัวรีดิวซ์ทั้ง 2 ชนิด พบว่าประสิทธิภาพการรีดิวซ์ด้วย  $Na_2SO_3$  มีประสิทธิภาพดีกว่า  $FeSO_4$  ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์มีประสิทธิภาพพอๆกัน แต่ปริมาณตะกอนที่ได้  $FeSO_4$  มีปริมาณมากกว่า  $Na_2SO_3$  ส่วนสมบัติความเป็นแม่เหล็กพอ ๆ กัน

จะเห็นว่า การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักโครเมียมอยู่ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดและตะกอนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ถึงแม้การทดสอบการชะละลายของโครเมียม (III) ในสารละลายสกัดพบว่า โครเมียม (III) ถูกชะละลายในสารละลายสกัด ดังนั้นก่อนนำไปประยุกต์ใช้งานต้องมีมาตรการที่เหมาะสม เช่น เคลือบพลาสติก แต่การทดสอบการชะละลายของโครเมียม (VI) พบว่าไม่มีการชะละลาย

แนวทางในการศึกษาต่อไปคือ การเพิ่มคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของตะกอนโครไมต์ ( $Cr_2FeO_4$ ) ด้วยวิธีทางเคมี ปรับปรุงตะกอนโดยไม่ให้โครเมียม (III) ถูกชะละลายในสารละลายสกัด

หาสภาวะของกระบวนการเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมกับน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการและโรงงานฟอกหนัง  
เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- จันทร์พร สุนทรเลิศวิช, สายสุนีย์ จำรัส, สิรินันท์ กันศิริ.การกำจัดโครเมียมและตะกั่วจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการ โดยวิธีรีดักชัน-พรีซิพิเตชัน .กรุงเทพฯ.2545: คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฉัตรพร คล้ายแก้ว.2547. การกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์ . คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.กรุงเทพฯ
- ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์ .2534.อุปรกรณ์และเทคนิคทางห้องปฏิบัติการ.กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ศิริภักษ์ออฟเซต
- มันสิน ตันฑุลเวศน์, มั่นรักษ ตันฑุลเวศน์.2545.เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย.ครั้งที่1.ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- แม่น อมรสิทธิ์.2539.หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ชวนพิมพ์
- ศุภชัย ไข่เทียมวงศ์.2536.เคมีวิเคราะห์.พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Arnold,A. 1991. **Comparative Inorganic Chemistry**,3 edition.
- AWWA,WEF,APHA.1995. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**.19<sup>th</sup> edition.American:Publication office American Public Health Association
- Cotton,F.A.,Wilkinson,G.1972. **Advanced inorganic chemistry**.3<sup>rd</sup> edition .New York:Interscience
- David R. Lide. 1993-1994 . **Handbook of chemistry and Physics** ,Editor in Chief 74 Edition. Cleveland, Ohio: Chemical Rubber
- E. Barrado, F. Prieto, J. Medina, F.A. Lo'pez. 2002.Characterisation of solid residues obtained on removal of Cr from waste water. **Journal of Alloys and Compounds** .203–209.
- Garret,A.B. t., Lippincott ,W.T., Verhoek, F. H.,1968. **Chemistry**. Waltham. Massachusetts : Blaisdell
- K.M.Mackey,R.A. Mackey,W.Hendersen .2002.**Introduction to Modern Inorganic chemistry**,6 edition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mehmet Erdem, Fikret Tumen. 2004. Chromium removal from aqueous solution by the ferrite process. **Journal of Hazardous Materials B**. 71–77.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การตรวจลักษณะน้ำเสียทางเคมี

#### 1. พีเอช(pH)

หลักการหาค่าพีเอชด้วยมาตรพีเอชโดยทั่ว ๆ ไป

1. ใช้น้ำกลั่นชนิดล้างแท่งอิเล็กโทรดให้สะอาด ใช้กระดาษชนิดเนื้อละเอียดซับน้ำให้แห้ง
2. ปรับเครื่องมือให้ได้ค่ามาตรฐานตามคำแนะนำในคู่มือของเครื่องมือชิ้น ๆ โดยจุ่มอิเล็กโทรดลงในสารละลายมาตรฐานที่มีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าของน้ำที่ตัวอย่างที่จะวัด
3. ใช้น้ำกลั่นชนิดล้างอิเล็กโทรดอีกครั้ง ซับน้ำให้แห้ง
4. วัดค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำ (ตัวอย่างน้ำที่จะนำมาหาค่าต้องมีอุณหภูมิใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิของสารละลายมาตรฐานในข้อ 2)

หมายเหตุ รายละเอียดคนนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วนี้ จะอ่านได้ในคู่มือประจำเครื่อง

#### 2. สภาพนำไฟฟ้าจำเพาะ (Conductivity, K) สภาพนำไฟฟ้า (Conductance, G)

วิธีการวัด

1. หาความคงที่ของเซลล์ (cell constant)

ล้างเซลล์การนำไฟฟ้าด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.01 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร อย่างน้อยสองครั้ง ปรับอุณหภูมิของเครื่องให้เท่ากับอุณหภูมิของสารละลายที่อุณหภูมิของสารละลายที่อุณหภูมิของสารละลายที่อุณหภูมิไม่ต่างกว่า  $\pm 0.1$  องศาเซลเซียส วัดความต้านทานของสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และจดอุณหภูมิไว้

$$C = \frac{0.001413 R_{KCl}}{1 + 0.0200(t-25)}$$

เมื่อ

C = ความคงที่ของเซลล์ มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$  ที่ t องศาเซลเซียส

R = ความต้านทานของสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.01 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตรที่วัดได้ มีหน่วยเป็น โอห์ม

t = อุณหภูมิของสารละลายเป็น องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. วัดความนำไฟฟ้าจำเพาะ

ล้างเซลล์ 1-2 ครั้ง ด้วยตัวอย่างน้ำที่จะหาค่า ปรับอุณหภูมิสุดท้ายของตัวอย่างน้ำให้เท่ากับอุณหภูมิของสารละลาย ( $25 \pm 0.1$  องศาเซลเซียส) ให้มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 0.1 องศาเซลเซียส วัดความต้านทานของตัวอย่างและจดอุณหภูมิไว้

$$G = \frac{1,000,000C}{R/[1+0.0200(t-25)]}$$

เมื่อ G = การนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็นไมโครซีเมนตต่อเซนติเมตร

C = ความคงที่ของเซลล์ ที่หาได้จากข้อ 1

R = ความต้านทานของตัวอย่างน้ำที่วัดได้ มีหน่วยเป็น โอห์ม

T = อุณหภูมิ เป็นองศาเซลเซียส

ในกรณีที่เครื่องมือวัดได้แต่ค่าการนำไฟฟ้า (conductance, G) เมื่อจะคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะให้แทนค่า R ด้วย  $\frac{1}{\text{ซึ่งค่าความนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็นซีเมนส์-ซม.}}$

ค่าการนำไฟฟ้า

## 3. วิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมด(TS)

- นำด้วยระยะเหยไปอบให้แห้งในตู้ที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้งแล้วชั่งน้ำหนัก
- เลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ให้ค่าของแข็งประมาณ 10-20 มิลลิกรัมโดยปกติใช้ 50-100 มล.) เขย่าน้ำให้เข้ากันดีแล้วตวงปริมาตรน้ำที่แน่นอนด้วยกระบอกตวงใส่ในถ้วยระยะเหยในกรณีที่ใช้ปริมาตรน้อยกว่า 50 มิลลิลิตรควรใช้ปิเปตจะได้ค่าที่แน่นอนมากขึ้น
- นำไปตั้งบนเครื่องอังไอน้ำจนแห้ง แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
- นำด้วยระยะเหยใส่ในโถทำแห้ง เพื่อปล่อยให้เย็นและนำมาชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ควรทำซ้ำโดยนำไปอบแห้งที่ 103-105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นในโลทำแห้งและชั่งน้ำหนัก ทำจนกระทั่งได้น้ำหนักที่ลดลงน้อยกว่า 4% ของการชั่งครั้งแรกหรือประมาณ 0.5 มิลลิกรัม

$$\text{การคำนวณ ของแข็งทั้งหมด (มก/ล)} = \frac{(A - B) \times 1000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มล.)}}$$

A = น้ำหนักของของแข็งและถ้วยระเหย (มก.)

B = น้ำหนักของถ้วยระเหย (มก.)

#### 4. ปริมาณความต่างศักย์โออาร์ที

1. เปิดเครื่องที่ป้อนเปิดหรือเปิดในโหมดมิลลิโวลต์
2. จุ่มอิเล็กโทรดในสารละลายมาตรฐาน FAS สองสามนาที่แล้วบันทึกค่า
3. ลาดสารละลายตัวอย่างที่จะทำการวัดบนอิเล็กโทรด
4. จุ่มอิเล็กโทรดลงในสารละลายตัวอย่างที่ลาด โดยอยู่บนเครื่องกวาด
5. อ่านค่าที่ได้ และฉีดล้างด้วยน้ำกลั่น
6. ซ้ำด้วยกระดามให้แห้ง แล้วลาดด้วยสารตัวอย่างที่จะทำการวัดต่อไป
7. ทำการวัดจนครบจากนั้นมาหาค่า  $E_{h_{\text{system}}}$  จากสมการ

$$E_{h_{\text{system}}} = E_{\text{observed}} + E_{\text{reference standard}} - E_{\text{reference observed}}$$

ค่า  $E_{h_{\text{system}}}$  ที่ได้เป็นค่าบวก หมายความว่าในน้ำตัวอย่างนั้นมีสารละลาย (อาจเป็นไอออนหรือโมเลกุล) ที่แสดงแนวโน้มในการรับอิเล็กตรอน ถ้าค่าที่ได้เป็นลบ หมายความว่าในน้ำตัวอย่างมีสารละลายที่แสดงแนวโน้มในการให้อิเล็กตรอน

ตารางที่ ก-1 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานรีดอกซ์

สารละลาย มาตรฐาน	ศักย์ไฟฟ้าของขั้ว Pt กับขั้วอ้างอิงในสารละลายมาตรฐานที่อุณหภูมิ 25 °C				
	Calomel Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> saturated KCl	Silver:Silver Chloride Ag/AgCl			Standard Hydrogen
		KCl 1.00M	KCl 4.00M	KCl Saturated	
Light's solution	430	439	475	476	675
ZoBell's solution	183	192	228	229	428

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

### อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy)

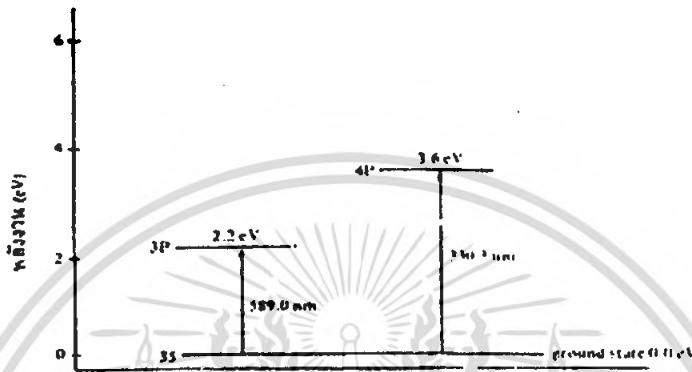
เทคนิคทางอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปีเป็น (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS) เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถทำได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์ที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง เพราะเป็นเทคนิคที่ให้ความเที่ยง ความแม่นยำมีสภาพไวสูง และเป็นเทคนิคเฉพาะที่ดีมาก ประกอบกับค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ก็ไม่สูงนัก ดังนั้นห้องปฏิบัติการการวิเคราะห์ที่ทันสมัย โดยทั่วไปจะมีเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์อยู่ด้วยเสมอ ความสามารถของเทคนิคนี้สูงมาก เพราะสามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ได้ถึง 67 ธาตุ ซึ่งนับว่ามากพอสมควรสำหรับเครื่องมือเพียงอย่างเดียว ทำให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ปี ค.ศ. 1953 Walsh ได้สร้างความสนใจและแสดงให้เห็นถึงประโยชน์และข้อดีต่าง ๆ ของการใช้อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปีเพื่อการวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งในขณะนั้นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ธาตุทางสเปกโตรสโกปี ได้แก่ เทคนิคคัลเลอร์ิเมตรี (Colorimetry) และเทคนิคทางอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปีขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์ธาตุได้อย่างกว้างขวาง ช่วยทำให้การวิเคราะห์รวดเร็วขึ้น และได้เปรียบกว่าการใช้วิธีทางอะตอมมิกอิมิตชัน ซึ่งต้องขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้อย่างมาก (แม้นและอมร , 2534)

#### 1. หลักการของอะตอมมิกแอบซอร์พชัน (Principles of Atomic Absorption)

อะตอมมิกแอบซอร์พชันเป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมเสรีของธาตุดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นอันหนึ่งโดยเฉพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับของพลังงานแตกต่างกัน จึงมีการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน เช่นอะตอมของโซเดียมจะดูดกลืนได้ดีที่ความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร เพราะแสงที่มีความยาวคลื่นนี้เป็นแสงที่มีพลังงานพอดีที่จะให้อิเล็กตรอนของโซเดียมอะตอมเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสภาวะพื้นไปสู่สภาวะกระตุ้น ดังรูปที่ 1-ค ซึ่งจะเห็นว่าความยาวคลื่นเหล่านี้จะเป็น Spectroscopic line ของอะตอมมิกสเปกตรัม ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด

ในการทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมเสรีได้นั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไป ซึ่งอาจอยู่ในรูปสารต่าง ๆ กัน เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ หรือความร้อนจากไฟฟ้า เป็นต้น ความร้อนจะทำให้เกิดกระบวนการแตกตัว (Dissociation) หรือเปลี่ยนเป็นไอ



(Vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม (atomization) หรืออาจทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะกระตุ้น หรืออาจกลายเป็นไอออนก็ได้

รูปที่ 1-ข ระดับพลังงานของอะตอมโซเดียม



รูปที่ 2-ข แสดง transition diagram สำหรับ

1. อะตอมมิกแอบซอร์พชั่น
2. อะตอมมิกอิมิสชั่น
3. อะตอมมิกฟลูออเรสเซนซ์

การเกิดอะตอมมิกแอบซอร์พชั่นอิมิสชั่น และมิกฟลูออเรสเซนซ์ นั้นมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2-ข จึงเป็นการเกิดทรานซิชันจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นระดับแรก (first excited state) มีด้วยกัน 3 แบบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 1 เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะกระตุ้นระดับแรก โดยการดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนเป็นอะตอมมิกลอบซอร์พชัน

แบบที่ 2 เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากความร้อน ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานไปยังสถานะกระตุ้นระดับแรก แล้วปล่อยพลังงานออกมา เมื่อกลับสู่สถานะพื้นจะให้โฟตอนออกมา เรียกว่า อะตอมมิกลิมิซชัน

แบบที่ 3 เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากโฟตอนที่มาจากสเปกตรัมทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานไปยังสถานะกระตุ้น เมื่อกลับมาสู่สถานะพื้นจะให้โฟตอนออกมา เรียกว่า อะตอมมิกลูออเรสเซนส์

กระบวนการที่สารประกอบแตกตัวเป็นอะตอมแล้วกลายเป็นไอ หรือเกิดการกระตุ้น หรือแม้แต่เกิดแตกตัวเป็นไอออนด้วยพลังงานความร้อน เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะของ thermal equilibrium จำนวนอะตอมที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น ( $N_j$ ) ที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิภาคกับกับจำนวนอะตอมที่อยู่ในสถานะพื้นต่อหน่วยปริมาตร ( $N_0$ ) ดังนั้น  $N_0$  ก็เกิดปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย Boltzmann ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของ  $N_j$  กับ  $N_0$  ดังแสดงในสมการที่ 1-ข

$$N_j / N_0 = g_j / g_0 e^{-\Delta E_{j0} / kT}$$

เมื่อ  $N_j$  และ  $N_0$  = จำนวนอะตอมของธาตุที่อยู่ในสถานะกระตุ้นและสถานะพื้น

$g_j$  และ  $g_0$  = statistical weight ของสถานะกระตุ้นและสถานะพื้น ซึ่งบอกถึงจำนวนสถานะของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเท่ากันของแต่ละระดับควอนตัม

$\Delta E = h\nu = E_j - E_0$  = ระดับพลังงานที่แตกต่างกันระหว่างสถานะกระตุ้นและสถานะพื้น

$k$  = Boltzmann constant =  $1.38 \times 10^{-16}$  erg/deg.

$T$  = อุณหภูมิในหน่วยของศาสม์บอร์น (K)

ดังนั้นจะเห็นว่า  $N_j / N_0$  จะมีค่ามากเมื่อ  $T$  สูงขึ้น และ  $\Delta E$  น้อย

$N_j / N_0$  จะมีค่าน้อยเมื่อ  $T$  ต่ำ และ  $\Delta E$  มาก

ความสัมพันธ์ของ  $N_j / N_0$  ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันดังแสดงในตารางในตารางที่ 1-ข

ตารางที่ ข-1 แสดงความสัมพันธ์ของ  $N_j / N_0$  ที่อุณหภูมิ 2000 K และ 3000 K

ธาตุ	Resonance Line (nm)	Gi/Gu	$\Delta E$ (ev)	$N_j / N_0$	
				2000K	3000K
Na	589.0	2	2.10	$9.86 \times 10^{-4}$	$5.88 \times 10^{-4}$
Ca	422.7	3	2.93	$1.21 \times 10^{-7}$	$3.69 \times 10^{-5}$
Cu	324.8	2	3.82	$4.82 \times 10^{-10}$	$6.65 \times 10^{-7}$
Mg	285.2	3	4.35	$3.35 \times 10^{-11}$	$1.50 \times 10^{-7}$
Zn	213.9	3	5.80	$7.45 \times 10^{-15}$	$5.50 \times 10^{-10}$

จากตารางข้างบนนี้จะเห็นได้ว่า จำนวนอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ซึ่งเป็นแหล่งที่จะทำให้อิมิตชันออกมาในการศึกษาทางอิมิตชันสเปกโตรสโกปีนั้น มีน้อยกว่าจำนวนอะตอมของธาตุที่อยู่ในสถานะพื้นมาก นี่เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปีทั้งในเชิง sensitivity และ detection limit เพราะการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของธาตุที่มีมาก ๆ ย่อมจะง่ายกว่าการตรวจและวัดธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ นั่นคือ วัดปริมาณ  $N_0$  ย่อมง่ายกว่าวัด  $N_j$  นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าค่า  $\Delta E$  ของธาตุต่าง ๆ ยังแตกต่างกันด้วย ซึ่งค่า  $\Delta E$  นี้บอกให้ทราบว่าธาตุบางธาตุถูกกระตุ้นง่าย Cu และ Zn อุณหภูมิที่ใช้ก็มีส่วนสำคัญในการจะทำให้เกิดอะตอมเสรี แต่จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิของเปลวไฟ 3,000 K จะเปลี่ยนอะตอมเสรีให้อยู่ในสถานะกระตุ้นได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 2,000 K

สำหรับค่า  $g_j$  และ  $g_0$  เป็น Statistical weight ซึ่งหมายถึงความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอน จะอยู่ในระดับพลังงานที่กำหนดให้ และสามารถหาได้จากการคำนวณทางกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum mechanics) ในสมการ 1-ก สามารถคำนวณหาค่าของ  $N_j / N_0$  ที่อุณหภูมิใด ๆ ที่กำหนดให้ได้ เมื่อทราบความถี่หรือความยาวคลื่นที่ธาตุจะเกิดแทรนซิชัน ดังแสดงในตารางที่ 1-ข

Statistical weight หาได้จากสมการ 2-ข

$$g = 2J + 1 \quad (2-ข)$$

เมื่อ  $J =$  Russell-Saunders coupling  
 $J = L + S$  หรือ  $L - S$   
 $L =$  total orbital angular momentum number  
 $= 0, 1, 2, 3$   
 $S =$  spin quantum number  $= \pm \frac{1}{2}$

โดยทั่วไปจะเขียนอยู่ในรูป  $N^M L g$

$N =$  principal quantum number

$M =$  multiplicity

เช่น การเกิดทรานซิชันของ Cs 852.1 nm เป็นการเกิดจาก

$$2_{P_{3/2}} \longrightarrow 1_{S_{1/2}} \quad \text{และ} \quad g_j/g_0 = [ 2^{(3/2)} + \frac{1}{2}^{(1/2)} + 1 ]$$

$$= 4/2$$

$$= 2$$

อะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น ( $N_j$ ) เมื่อกลับมาอยู่ในสถานะพื้น ( $N_0$ ) จะให้โฟตอนออกมา โดยมีความเข้มของ emission lines ( $I_\nu$ ) หาได้จากสมการ 3-ค

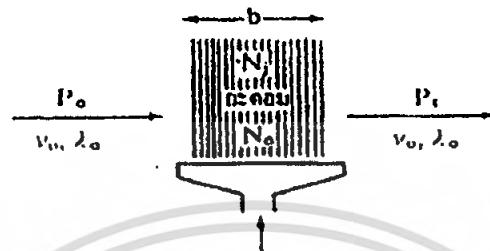
$$I_\nu = V \cdot A_{0j} \cdot h \nu N_0 (g_j/g_0) e^{-\Delta E/kT} \quad (3-ข)$$

เมื่อ  $V =$  ปริมาตรของหลอดไฟที่เห็นโดยดีเทกเตอร์

$A_{0j} =$  Einstein probability coefficient ในการกิดทรานซิชันจาก  $E_j \rightarrow E_0$  ต่อ  
 หน่วยเวลาโดยมีการให้โฟตอนออกมา

จากสมการ 3-ข นี้ จะเห็นได้ว่าความเข้มของเส้นสเปกตรัมที่เปล่งออกมาเป็นฟังก์ชันกับ  $\Delta E$  และ  $T$  ในทำนองเดียวกันอะตอมที่อยู่ในสถานะพื้นก็จะถูกกระตุ้นจาก  $E_0 \rightarrow E_j$  โดยดูดกลืนพลังงานที่ความถี่เท่ากับ resonance frequency และ hollow cathode lamp ที่ผ่านเข้าไปใน

เปลวไฟ ซึ่งมีอะตอมของธาตุที่ต้องการอยู่ (รูป 3-ข) ปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนจะเป็นไปตาม absorption law ดังสมการ 4-ข



สารตัวอม

รูปที่ 4-ข การกลายเป็นอะตอมของสารตัวอย่าง

$$P_t = P_0 e^{-K} \quad (4-ข)$$

$P_0$  = radiant power เริ่มต้น

$P_t$  = radiant power ที่ผ่านมา

$K$  = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนซึ่งขึ้นกับ  $\lambda$  หรือ  $\nu$

$B$  = ความกว้างของเปลวไฟ หรือ absorbing medium

เส้นสเปกตรัมต่าง ๆ ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของอะตอมจากสถานะพื้นไปสู่สถานะเร้าต่าง ๆ เรียกว่า เส้นเรโซแนนซ์ (resonance line) สำหรับธาตุแต่ละชนิดสเปกตรัมของอะตอมของมันจะมีลักษณะเฉพาะ ในกระบวนการดูดกลืนแสงค่าแอมพลิจูดของแบนด์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มข้นของสาร  $\rho$  ความยาวคลื่นของสารที่กำหนดให้ ดังสมการ

$$A = abc$$

เมื่อ  $A$  = absorbance

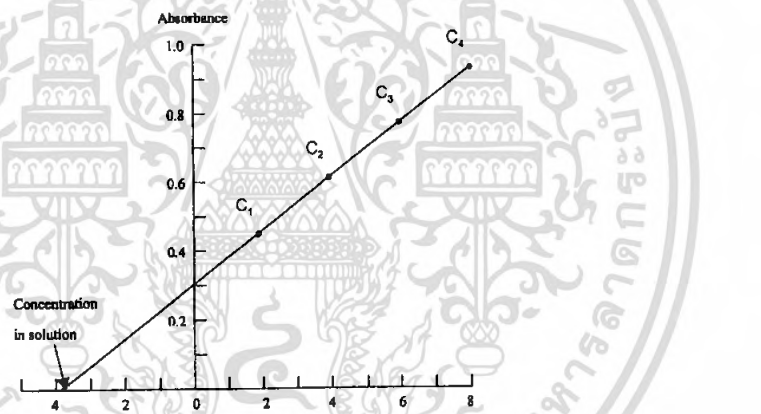
$a$  = absorptivity

$b$  = absorption path length

$c$  = ความเข้มข้นของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหลักการแล้ว เราอาจหาความเข้มข้นของสารตัวอย่าง (c) ได้จากสมการของเบียร์ เนื่องจากค่า a และ b เป็นค่าคงที่ และ A วัดได้จากเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer แต่ไม่นิยมกัน ดังนั้นวิธีที่ง่ายที่สุดคือ นำสารละลายมาตรฐาน ซึ่งทราบค่าความเข้มข้นที่ถูกต้องมา วัดค่าแอมซอร์ฟเบนซ์ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าแอมซอร์ฟเบนซ์ของสารละลายตัวอย่างที่ยังไม่ทราบความเข้มข้น เนื่องจากค่าแอมซอร์ฟเบนซ์ของสารแปรผันโดยตรงกับค่าความเข้มข้นของสารที่เราจะวิเคราะห์ แต่ถ้าเราต้องการวัดความเข้มข้นให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น ควรมีการทำ standard addition โดยแบ่งสารละลายตัวอย่างออกเป็น 4 หรือ 5 ส่วน แล้วนำแต่ละส่วนมาเติมสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ลงไปจำนวนปริมาตรเท่ากัน นำสารละลายทั้งหมดไปวัดค่าแอมซอร์ฟเบนซ์ แล้วนำมาเขียนกราฟกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมลงไป ความเข้มข้นของสารตัวอย่างหาได้จาก extrapolating ไปตัดแกนความเข้มข้น ดังรูปที่ 5-๗



รูปที่ ๗-5 แสดงการหาความเข้มข้นของสารตัวอย่างด้วยวิธี standard addition

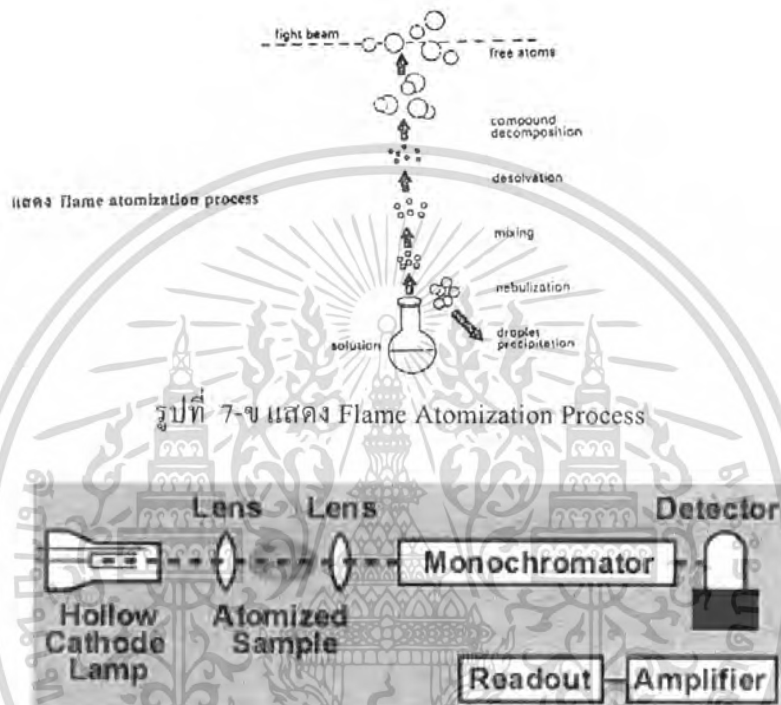
กระบวนการที่ทำให้สารละลายตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมเสรีด้วยเปลวไฟ (Flame Atomization)

กระบวนการ Atomization แบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. Nebulization เป็นกระบวนการเปลี่ยนของเหลวให้เป็นละอองเล็ก ๆ (mist)
2. Droplet precipitation เป็นกระบวนการแยกสารละลายที่เป็นเม็ดใหญ่เกินความต้องการออกไป
3. Mixing การผสมของละอองสารละลายกับก๊าซเชื้อเพลิงและก๊าซออกซิเจน
4. Compound decomposition การแยกสารประกอบซับซ้อนให้เป็นสารประกอบง่าย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Atomization การทำให้สารประกอบอย่างง่ายกลายเป็นไออะตอม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7



องค์ประกอบที่สำคัญต่าง ๆ ของเครื่องอะตอมมิคแอนาไลเซอร์ชนิดสเปกโทรสโกปี

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source)
2. ส่วนที่ทำให้ธาตุเป็นอะตอมเสรี (atomizer)
3. โมโนโครมาเตอร์ (monochromator)
4. ดีเทคเตอร์ (dectector)
5. เครื่องประมวลผลและอ่านค่า (data system and read – out units)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีวิเคราะห์

### อุปกรณ์

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer
2. เครื่องแก้วอื่นๆ

### สารเคมี

1. น้ำกลั่นที่ปราศจากโครเมียม
2. กรดไนตริกเข้มข้น
3. สารละลายสต็อกโครเมียมเข้มข้น (Stock Chromium Solution)  
โดยละลายโครเมียมไตรออกไซด์ ( $\text{CrO}_3$ ) จำนวน 0.1923 ในน้ำกลั่นจนละลายหมด  
ทำให้เป็นกรดด้วยการเติมกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร แล้วเจือจางเป็น 1 ลิตรด้วย  
น้ำกลั่น

สารละลายโครเมียมนี้ 1 มิลลิลิตร = โครเมียม 100 ไมโครกรัม

4. สารละลายโครเมียมเข้มข้นปานกลาง (Intermediate Chromium Solution)  
โดยดูดสารละลายโครเมียมเข้มข้นจากข้อ 3 จำนวน 10.0 มิลลิลิตรลงในขวดวัด

### ปริมาตร

สารละลายโครเมียมนี้ 1 มิลลิลิตร = โครเมียม 10 ไมโครกรัม

### ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. การเตรียมตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างไปย่อยด้วยกรดไนตริกหรือไนตริก-ซัลฟูริก
2. การเตรียมกราฟมาตรฐาน โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานตามช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมอย่างน้อย 4 ความเข้มข้น โดยเติมกรดไนตริกเข้มข้น 0.15 มิลลิลิตรต่อสารละลายมาตรฐาน 100 มิลลิลิตร สำหรับเบสลงค์ใช้น้ำกลั่นที่ปราศจากโครเมียมที่เติมกรดไนตริกเข้มข้น 1.5 มล./1000 มล.
3. เตรียมเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer ทำกราฟมาตรฐานแล้วนำตัวอย่างเข้าวัด

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์โครเมียม (VI) ด้วยวิธีการเทียบสี (Colorimetric Method) (Standard Methods for Examination of Water and Wastewater .19<sup>th</sup>)

#### 1. การเตรียมสารละลาย

##### สารละลายสต็อกโครเมียม

- ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 0.1414 กรัม ด้วยน้ำกลั่น และเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

##### สารละลายมาตรฐานโครเมียม

- ปิเปตสต็อกโครเมียม 1.00 มิลลิลิตร
- เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

##### สารละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์

- ละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์ 0.2500 กรัม ด้วยอะซิโตน 50 มิลลิลิตร และเก็บไว้ในขวดสีชา

##### สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

- ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 กรัม ด้วยน้ำกลั่น 1 ลิตร และเก็บในขวดพลาสติก

#### 2. การสร้างกราฟมาตรฐาน

- ปิเปตสารละลายมาตรฐานโครเมียมมา 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 มิลลิลิตร ตามลำดับ ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร
- ปรับพีเอช ด้วยกรดฟอสฟอริก 0.2 นอร์มอลให้ได้ พีเอช ประมาณ  $2.0 \pm 0.5$  วัดด้วยกระดาษลิตมัส
- เติมสารละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์ 2.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 5-10 นาที
- วัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ 540 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นแบลนด์

### 3. การวัดสารตัวอย่าง

- บีบอัดสารละลายตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร
- ปรับพีเอชและเติมสารเคมีเช่นเดียวกับการสร้างกราฟมาตรฐานข้างต้น
- ทิ้งไว้ 5-10 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ 540 นาโนเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### การวิเคราะห์ความเป็นพิษโดยสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test

(WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6/2548

1. เตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต 0.2 M ที่ pH 5.5 ± 0.1 โดยนำกรดซัลฟูริกมาปรับ pH ให้เป็น 5.0 ด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4.0 N
  2. เตรียมสารละลายกรดไนตริก โดยเทกรดไนตริกเข้มข้นลงในน้ำกลั่น ด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร
  3. ชั่งตะกอนที่ตากแห้งและบดละเอียด 1 กรัม
  4. เติมสารละลายสำหรับสกัด 10 มิลลิลิตร (สำหรับสกัด Cr<sup>3+</sup> คือ โซเดียมซัลเฟต 0.2 M ที่ pH 5.5 ± 0.1 ส่วน Cr<sup>6+</sup> ใช้ น้ำกลั่นในการสกัด)
  5. ไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที
  6. นำไปเขย่าให้ของผสมถูกกวนผสมอยู่ตลอดเวลา เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
  7. นำของผสมไปปั่นเหวี่ยง (centrifuged) ก่อนแล้วมากรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน
  8. หากยังไม่ทำการวิเคราะห์ให้ปรับกรดด้วยกรดไนตริก 50% 0.5 มิลลิลิตร
  9. หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร (สำหรับหาโครเมียม (III) ใช้วิธี AAS ส่วนโครเมียม (VI) ใช้วิธี Colormetric method)
- หมายเหตุ ระหว่างการสกัดควรควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 20-40 องศาเซลเซียส

## ภาคผนวก จ

### การวัดความเป็นแม่เหล็ก

#### วิธีที่นิยมใช้ในการวัดสนามแม่เหล็ก

1. วิธีที่ใช้กระแสเหนี่ยวนำในขดลวดตรวจวัด หรือเรียกว่าวิธีบัลลิสติก (Ballistic Method) สามารถใช้วัดค่าของ B และ M ได้เหมือนกับการวัด H ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาในรายละเอียดบางอย่าง โดยเฉพาะจะต้องเข้าใจการทำงานของอุปกรณ์การวัดที่เกี่ยวข้องเช่น บัลลิสติกกัลวานอมิเตอร์ (Ballistic galvanometer) และฟลักซ์มิเตอร์ (Fluxmeter)
2. วัดแรงดันที่เกิดในสารกึ่งตัวนำโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ถ้าปล่อยกระแสไฟฟ้า I ให้ไหลในแผ่นโลหะบางและขณะเดียวกันก็ป้อนสนามแม่เหล็ก H ในแนวทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า จะเกิดความต่างศักย์ขึ้น ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์จะแปรผันตามกับกระแสและสนาม ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นได้ทั้งในโลหะและสารกึ่งตัวนำแต่ในสารกึ่งตัวนำจะมีค่ามาก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์กับสนามจะไม่เป็นเชิงเส้นที่สนามมากกว่า อุปกรณ์วัดสนามนี้จะต้องได้รับการสอบเทียบอย่างสม่ำเสมอที่สนามเป็นศูนย์และที่สนามที่ทราบค่า อุปกรณ์ที่ใช้วัดสนามแม่เหล็กบางครั้งเรียกว่า เกาส์มิเตอร์ (Gauss meter) หรือ แมกเนโตมิเตอร์ (Magnetometer) ดังรูปที่ 1-จ

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องเกาส์มิเตอร์ (Gauss meter) รุ่น 6010
2. หัววัดฮอลล์ (Hall Probe) รุ่น 6010

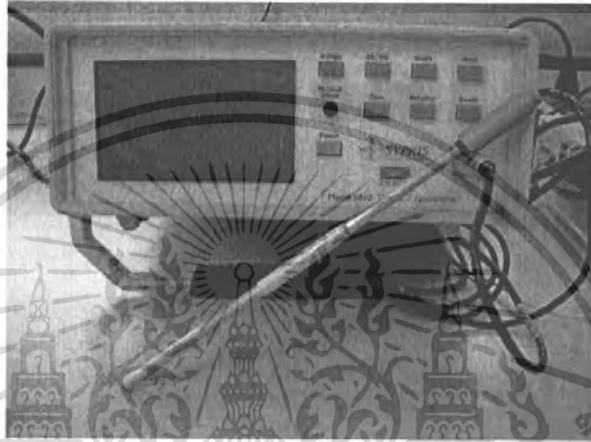
#### วิธีในการตรวจวัด

1. ต่อหัววัดฮอลล์ (Hall Probe) รุ่น 6010 กับเครื่องเกาส์มิเตอร์ (Gauss meter) รุ่น 6010
2. เสียบปลั๊กไฟ จากนั้นกดปุ่มเปิด-ปิด เพื่อเปิดเครื่องเกาส์มิเตอร์
3. เลือกหน่วยที่ต้องการระหว่าง Gauss (G), Tesla (T), Ampere per meter (A/m)
4. ให้เลือกหน่วย Gauss(G)

$$1 \text{ tesla} = 10000 \text{ gauss}$$

$$1 \text{ gauss} = 0.0001 \text{ tesla}$$

5. นำหัววัดฮอลล์ สัมผัสกับ ผงตะกอน โครไมต์อ่านค่าที่ได้จากจอแสดงผล แล้วบันทึกค่าที่ตรวจวัดได้ ในหน่วย Gauss (G)



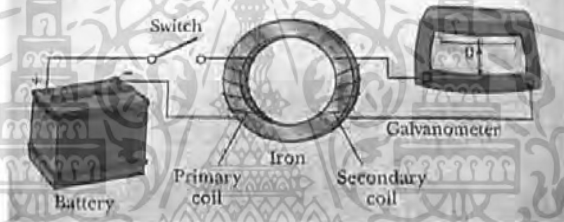
รูปที่ จ-1 เครื่อง Gauss Meter Model 6010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

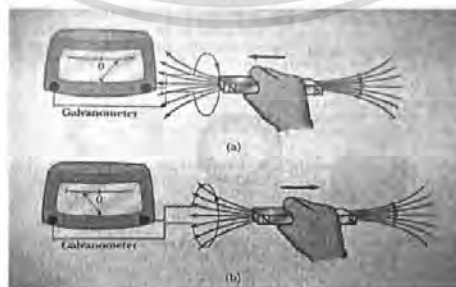
### การเหนี่ยวนำ

การเหนี่ยวนำ คือ การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ผู้ที่ทำการศึกษาเรื่อง การเหนี่ยวนำ คือ Michael Faraday ในอังกฤษ และ Joseph Henry ในสหรัฐอเมริกา ศึกษาการทดลองที่ ทำ โดย Michael Faraday ในการทดลองประกอบด้วย แบตเตอรี่, สวิตช์, วงเหล็ก และกัลวานอมิเตอร์ ดังรูปที่ 1-ฉ Michael Faraday พบว่าเมื่อมีการสับสวิตช์ เข็มของกัลวานอมิเตอร์จะกระดิกไปทางหนึ่ง และกลับมามีศูนย์ และเมื่อยกสวิตช์เข็มนั้นก็จะกระดิกไปอีกทางและกลับมามีศูนย์



รูปที่ 1-ฉ อุปกรณ์ในการเหนี่ยวนำ

มีกระแสไอเลคตรอนเกิดขึ้นในวงจรถูกัลวานอมิเตอร์ตรวจวัดที่มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันระหว่าง แม่เหล็กกับขดลวด (Coil) หมายความว่า เราสามารถมีกระแสในวงจรแม้ว่าจะไม่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้า หรือ แบตเตอรี่ในวงจรดังรูปที่ 2-ฉ



รูปที่ 2-ฉ กระแสไอเลคตรอนที่เกิดขึ้นในวงจรถูกัลวานอมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสังเกต Michael Faraday สรุปว่า กระแสอิเล็กตรอนสามารถสร้างขึ้นได้โดยการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กเราสามารถทำการคำนวณได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กเทียบกับเวลา เครื่องหมายลบเป็นผลมาจากกฎของเลนซ์

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

สำหรับขดลวด N รอบ

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

#### กฎของเลนซ์ (Lenz's Law)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นในลักษณะที่ต้านการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กนั้น ๆ กล่าวคือ เกิดขึ้นเพื่อรักษาสภาพของฟลักซ์แม่เหล็กเดิมไว้ เป็นผลมาจากกฎทรงพลังงาน

#### กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

กฎของฟาราเดย์กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กจะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าเสมอ เขียนเป็นรูปทั่วไปได้

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

สนามไฟฟ้าจะเกิดได้ทั้งในที่ว่างและในลวดตัวนำ

ภาคผนวก ช  
การวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. กระบวนการเฟอร์ไรท์

ตารางที่ ข-1 การคำนวณค่าสารเคมีสำหรับกระบวนการเฟอร์ไรท์

สารละลาย ตัวอย่าง	สารเคมี								รวมค่าใช้จ่าย ต่อ 1.7 ลิตร	คิดราคาต่อ 1 ลิตร
	FeSO <sub>4</sub>		Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>		NaOH		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			
	ปริมาณ	ราคา	ปริมาณ	ราคา	ปริมาณ	ราคา	ปริมาณ	ราคา		
MWS: FeSO <sub>4</sub>	45.453g	27.72บาท	-	-	5 g	1.11 บาท	-	-	28.83 บาท	16.96 บาท
MWS: Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	45.453g	27.72บาท	0.034g	0.01 บาท	5 g	1.11 บาท	1 mL	0.13 บาท	28.97 บาท	17.04 บาท
TW: FeSO <sub>4</sub>	69.31g	42.28 บาท	-	-	5 g	1.11 บาท	-	-	43.39 บาท	25.52 บาท
TW: Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	69.31g	42.28 บาท	0.026g	0.01 บาท	5 g	1.11 บาท	1 mL	0.13 บาท	43.53 บาท	25.60 บาท

หมายเหตุ : FeSO<sub>4</sub> ราคา 610 บาท/กก.

Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> ราคา 420 บาท/กก.

NaOH ราคา 220 บาท/กก.

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ราคา 320 บาท/ลิตร

ตารางที่ ข-2 การคำนวณค่าไฟฟ้าสำหรับกระบวนการเฟอร์ไรท์

เครื่องใช้ไฟฟ้า	วัตต์ (W)	กิโลวัตต์ (kW)	เวลาที่ใช้ (ชม.)	หน่วยไฟฟ้าที่ใช้ (unit)	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
เครื่องกววน แม่เหล็กไฟฟ้า	625	0.625	0.25	0.156	2.448	0.382
เครื่องเขย่าควบคุม อุณหภูมิ	2800	2.8	1	2.8	2.448	6.854
เครื่องกรอง	60	0.06	1	0.06	2.448	0.146
					รวม	7.384

2. การวิเคราะห์ด้วยวิธี Waste Extraction Test

ตารางที่ ข-3 การคำนวณค่าสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์โครเมียม (III)

รายการสารเคมี		สารละลายสกัด 500ml		รีดิวส์ด้วย $\text{FeSO}_4$				รีดิวส์ด้วย $\text{Na}_2\text{SO}_3$			
สารเคมี	ราคา	ใช้	ราคา (บาท)	น้ำเสียผสม		โรงงานฟอกหนัง		น้ำเสียผสม		โรงงานฟอกหนัง	
				สารละลาย สกัด	ราคา (บาท)	สารละลาย สกัด	ราคา (บาท)	สารละลาย สกัด	ราคา (บาท)	สารละลาย สกัด	ราคา (บาท)
NaOH	220 บาท/ 1kg	2g	0.11								
$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	460 บาท/ 1kg	1.551g	0.72	10ml	2.32	10ml	2.32	10ml	2.32	10ml	2.32
น้ำกลั่น	460 บาท/ 20L	500ml	115.00								
รวม(บาท)			115.83		2.32		2.32		2.32		2.32

ตารางที่ ข-4 การคำนวณค่าสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์โครเมียม (VI)

รายการสารเคมี		รีดิวส์ด้วย $\text{FeSO}_4$				รีดิวส์ด้วย $\text{Na}_2\text{SO}_3$			
สารเคมี	ราคา	น้ำเสียผสม		โรงงานฟอก หนัง		น้ำเสียผสม		โรงงานฟอก หนัง	
		ใช้	ราคา (บาท)	ใช้	ราคา (บาท)	ใช้	ราคา (บาท)	ใช้	ราคา (บาท)
น้ำกลั่น	460บาท/ 20L	10ml	2.30	10ml	2.3000	10ml	2.3	10ml	2.3
รวม(บาท)		2.30		2.30		2.30		2.30	

ตารางที่ ข-5 การคำนวณค่าไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี Waste Extraction Test

เครื่องใช้ไฟฟ้า	กิโลวัตต์ (kW)	เวลาที่ใช้ (ชม.)	หน่วยไฟฟ้าที่ใช้ (unit)	ค่าไฟฟ้าต่อ หน่วย(บาท)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
เครื่องเขย่า	0.15	1	0.15	2.4482	0.36723
เครื่องกรอง	0.06	1	0.06	2.4482	0.146892
รวม					0.514122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การคำนวณสารเคมีและปริมาณน้ำเสียตัวอย่างในกระบวนการเฟอร์ไรต์

การคำนวณหาปริมาณ  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  (Modified Erdem and Et.al,2004)

#### 1. น้ำเสียแบบผสม

น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการมีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 1.23 mg/L หรือประมาณ 1 mg/L

น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการมีความเข้มข้นโครเมียม (VI) เท่ากับ 1.03 mg/L

น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังมีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 3050.6 mg/L

น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังมีความเข้มข้นโครเมียม (VI) เท่ากับ 3.73 mg/L

จากต้องทำการทดลองทั้งหมด 7 ชั่วโมงและต้องใช้ความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดอย่างต่ำเท่ากับ 2000mg/L ดังนั้นใช้สารละลายตัวอย่างทั้งหมด 1,700 mL และมีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 3400.8 mg

#### แสดงวิธีคำนวณ

น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ 1,000 mL มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 1 mg

น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ 585 mL มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 0.71 mg

น้ำเสียโรงงานฟอกหนัง 1,000 mL มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 3,050.6 mg

น้ำเสียโรงงานฟอกหนัง 1,115 mL มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 3,400.1 mg

ในสารละลายผสมนี้มีความเข้มข้นโครเมียม (VI) 4.76mg หรือ 0.09 mol

มวลโมเลกุล  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  เท่ากับ 126 จากใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ในปริมาณ 3 เท่าของความเข้มข้นโครเมียม (VI)

ได้เป็น  $3 * 0.09 = 0.27\text{mol}$  ดังนั้นใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ปริมาณ  $126 * 0.27 = 34.0 \text{ mg}$

#### 2. น้ำเสียโรงงานฟอกหนัง

น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังมีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 3,050.6 mg/L

น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังมีความเข้มข้นโครเมียม (VI) เท่ากับ 3.73 mg/L

จากต้องทำการทดลองทั้งหมด 7 ชั่วโมงและต้องใช้ความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดอย่างต่ำเท่ากับ 2000mg/L ดังนั้นใช้สารละลายตัวอย่างทั้งหมด 1,700 mL และมีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 5,186.02 mg

### วิธีคำนวณ

น้ำเสียโรงงานฟอกหนัง 1,000 mL มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 3,050.6 mg

น้ำเสียโรงงานฟอกหนัง 1,700 mL มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 5,186.02 mg

ในสารละลายผสมนี้มีความเข้มข้นโครเมียม (VI) 6.33mg หรือ 0.12 mol

มวลโมเลกุล  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  เท่ากับ 126 จากใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ในปริมาณ 3 เท่าของความเข้มข้นโครเมียม (VI)

ได้เป็น  $3 * 0.12 = 0.36\text{mol}$  ดังนั้นใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  ปริมาณ  $126 * 0.36 = 45.36 \text{ mg}$

การคำนวณหาปริมาณ  $\text{FeSO}_4$  (Modified Erdem and Et.al, 2004)

#### 1. น้ำเสียแบบผสม

น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการมีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 1.23 mg/L หรือประมาณ 1 mg/L

น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการมีความเข้มข้นโครเมียม (VI) เท่ากับ 1.03 mg/L

น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังมีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 3,050.6 mg/L

น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังมีความเข้มข้นโครเมียม (VI) เท่ากับ 3.73 mg/L

จากต้องทำการทดลองทั้งหมด 7 ซ้ำและต้องใช้ความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดอย่างต่ำเท่ากับ 2,000mg/L ดังนั้นใช้สารละลายตัวอย่างทั้งหมด 1,700 mL และมีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 3,400.80 mg

### วิธีคำนวณ

น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ 1,000 mL มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 1 mg

น้ำเสียโรงงานฟอกหนัง 1,000 mL มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 3,050.6 mg

น้ำเสียโรงงานฟอกหนัง 1,115 mL มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 3,400.1 mg

ในสารละลายผสมนี้มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมด 3,400.8 mg หรือ 65.4 mol

มวลโมเลกุล  $\text{FeSO}_4$  เท่ากับ 278 จากใช้  $\text{FeSO}_4$  ในปริมาณ 2.5 เท่าของความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดได้

เป็น  $65.4 * 2.5 = 163.5\text{mol}$  ดังนั้นใช้  $\text{FeSO}_4$  ปริมาณ  $278 * 163.5 = 45,453 \text{ mg}$

## 2. น้ำเสียโรงงานฟอกหนัง

น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังมีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 3,050.6 mg/L

จากต้องทำการทดลองทั้งหมด 7 ซ้ำและต้องใช้ความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดอย่างต่ำเท่ากับ 2,000mg/L ดังนั้นใช้สารละลายตัวอย่างทั้งหมด 1,700 mL และมีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 5,186.02 mg

### วิธีคำนวณ

น้ำเสียโรงงานฟอกหนัง 1,000 mL มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 3,050.6 mg

น้ำเสียโรงงานฟอกหนัง 1,700 mL มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 5,186.02 mg

ในสารละลายผสมนี้มีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมด 5,186.02 mg หรือ 99.73 mol

มวลโมเลกุล  $\text{FeSO}_4$  เท่ากับ 278 จากใช้  $\text{FeSO}_4$  ในปริมาณ 2.5 เท่าของความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดได้เป็น  $99.73 * 2.5 = 249.32 \text{ mol}$  ดังนั้นใช้  $\text{FeSO}_4$  ปริมาณ  $278 * 249.32 = 69,310.96$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ๖  
(พ.ศ. 2539)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและ ด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	-ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกัน แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. -น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่า ความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่า มากกว่าค่าทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อย หรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก.ล.	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือ ประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรอง ใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัด ขณะทำการเก็บตัวอย่าง น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Titrate
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของ น้ำมันและไขมัน
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วันที่ อุณหภูมิ 20 °C) (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	Azide Modification ที่ อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
14. ค่าที่เคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	Kjeldahl
15. ค่าซีไอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล.หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)		
- สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	Atomic Absorption
- โครเมียม ชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	Spectro Photometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma
- โครเมียม ชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
- ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	
- แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
- ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
- นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
- แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
- อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	Atomic Absorption
- เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	Spectro Photometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
- ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	Atomic Absorption Cold Vapor Techique

แหล่งที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ญ

### ผลการทดลอง

#### 1.ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำเสีย

##### 1.1ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ

$$E_{hs} = E_{h_{obs}} + E_{h_{zobcll}} - E_{h_{zobellobs}}$$

$$= 704.97 + 229 - 824.77$$

$$= 109.2 \pm 5.20$$

สารละลาย	ค่าความต่างศักย์โออาร์พี (mV)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
น้ำกลั่น	278.40	283.30	289.10	283.60	5.35
FAS	326.40	327.80	328.30	327.50	0.98
น้ำเสีย	325.60	325.90	325.80	325.77	0.15

สารละลาย	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (ms/cm)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
น้ำเสีย	121.50	121.60	121.60	121.57	0.05

สารละลาย	พีเอช			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
น้ำเสีย	1.38	1.35	1.32	1.35	0.03

สารละลาย	ปริมาณของแข็งละลาย (g)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
น้ำเสีย	2.02	2.03	2.04	2.03	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง

$$E_{hs} = E_{h_{obs}} + E_{h_{zobell}} - E_{h_{zobellob}}$$

$$= 325.77 + 229 - 327.5$$

$$= 227.27 \pm 0.15$$

สารละลาย	ค่าความต่างศักย์โออาร์ที (mV)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
น้ำกลั่น	878.90	871.90	869.40	873.40	4.92
FAS	825.40	826.20	822.70	824.77	1.83
น้ำเสีย	705.80	699.40	709.70	704.97	5.20

สารละลาย	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (ms/cm)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
น้ำเสีย	105.60	101.50	100.50	102.53	2.70

สารละลาย	พีเอช			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
น้ำเสีย	5.00	5.00	5.00	5.00	0.00

สารละลาย	ปริมาณของแข็งละลาย (g)			ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
น้ำเสีย	10.86	10.30	10.55	10.57	0.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ความเข้มข้นโลหะหนักจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการโดย AAS

ผล AAS ของ Pb	100 mL	1 mL
ตัวอย่างที่1 0.388 mg/L	0.0388mg	$3.88 \times 10^{-4}$ mg
ตัวอย่างที่2 0.428 mg/L	0.0428mg	$4.28 \times 10^{-4}$ mg
ตัวอย่างที่3 0.514 mg/L	0.0514mg	$5.14 \times 10^{-4}$ mg
ความเข้มข้นPbเฉลี่ย		$2.76 \times 10^{-4}$ mg

SD = 0.006

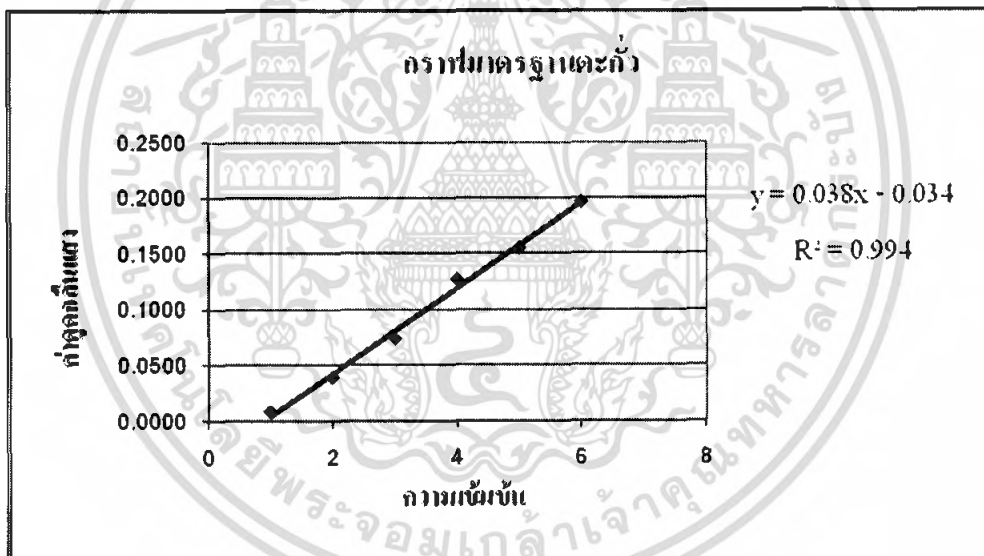
ผล AAS ของ Cr <sup>3+</sup>	100 mL	1 mL
ตัวอย่างที่1 0.177mg/L	0.0177	$1.77 \times 10^{-4}$
ตัวอย่างที่2 0.226mg/L	0.0266	$2.26 \times 10^{-4}$
ตัวอย่างที่3 0.205mg/L	0.0205	$2.05 \times 10^{-4}$
ความเข้มข้น Cr เฉลี่ย		$2.026 \times 10^{-4}$

SD = 0.004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 สารละลายมาตรฐาน ตะกั่ว

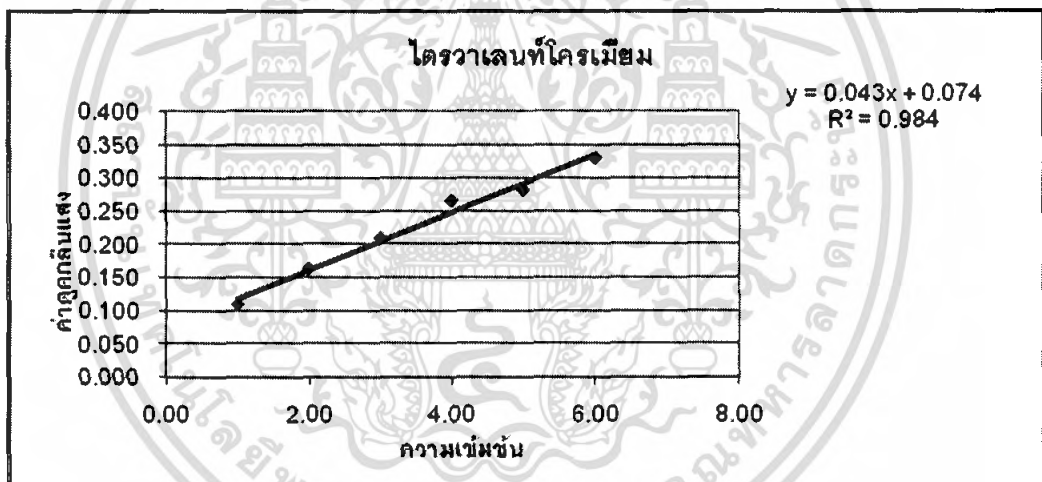
ความเข้มข้นสารละลาย	ค่าดูดกลืนแสง
สารละลาย 0.5mg/L	0.0080
สารละลาย 2.0mg/L	0.0390
สารละลาย 4.0mg/L	0.0740
สารละลาย 6.0mg/L	0.1270
สารละลาย 8.0mg/L	0.1550
สารละลาย 10.0mg/L	0.1960



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 สารละลายมาตรฐานโครเมียม (III)

ความเข้มข้นสารละลาย	ค่าดูดกลืนแสง
สารละลาย 2.0mg/L	0.109
สารละลาย 4.0mg/L	0.163
สารละลาย 6.0mg/L	0.209
สารละลาย 8.0mg/L	0.266
สารละลาย 10.0mg/L	0.282
สารละลาย 12.0mg/L	0.330



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ความเข้มข้นโลหะหนักของน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังโดย ICP

#### 3.1 สารละลายตัวอย่างจากโรงงานฟอกหนังจากการวิเคราะห์ ICP

สารละลายตัวอย่าง	TCr(mg/L)	Fe(mg/L)	Zn(mg/L)
ครั้งที่ 1	30.148	0.282	ND
ครั้งที่ 2	30.456	0.3041	0.053
ครั้งที่ 3	30.914	0.217	0.013

หมายเหตุ : ND = not detect

#### 3.2 สารละลายตัวอย่างจากโรงงานฟอกหนังจากการวิเคราะห์ ICP ในหน่วย mg/L ww.

สารละลายตัวอย่าง	TCr	Fe	Zn
ครั้งที่ 1	3014.8	28.2	ND
ครั้งที่ 2	3045.6	30.4	5.3
ครั้งที่ 3	3091.4	21.7	1.3

หมายเหตุ : ND = not detect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ความเข้มข้นโครเมียม (VI) โดยวิธีการเทียบสี (Colorimetric)

##### 4.1 ผล Colorimetric ของน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง

วัด spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 nm				
สารละลาย	จำนวนครั้งที่วัด			
	1	2	3	เฉลี่ย
แบลนค์	0	0	0	0
สารมาตรฐาน 2 mL	0.084	0.084	0.084	0.084
สารมาตรฐาน 4 mL	0.179	0.176	0.178	0.177
สารมาตรฐาน 6 mL	0.255	0.260	0.263	0.259
สารมาตรฐาน 8 mL	0.334	0.335	0.335	0.334
สารมาตรฐาน 10 mL	0.420	0.421	0.420	0.420
สารมาตรฐาน 12 mL	0.550	0.553	0.553	0.552
สารมาตรฐาน 14 mL	0.584	0.590	0.589	0.587
สารมาตรฐาน 16 mL	0.668	0.668	0.672	0.669
สารมาตรฐาน 18 mL	0.732	0.743	0.737	0.737
สารมาตรฐาน 20 mL	0.783	0.787	0.788	0.786
สารละลายตัวอย่าง 20 mL	0.229	0.232	0.232	0.231
สารละลายตัวอย่าง 20 mL	0.229	0.240	0.230	0.233
สารละลายตัวอย่าง 20 mL	0.224	0.227	0.226	0.225

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณ

$$\text{ครั้งที่ 1 } y=0.0808x - 0.0664$$

$$0.231=0.0808x - 0.0664$$

$$x=3.717$$

$$\text{Cr}^{6+} = 3.717 \text{ mg/L}$$

$$\text{ครั้งที่ 2 } y=0.0808x - 0.0664$$

$$0.233=0.0808x - 0.0664$$

$$x=3.742$$

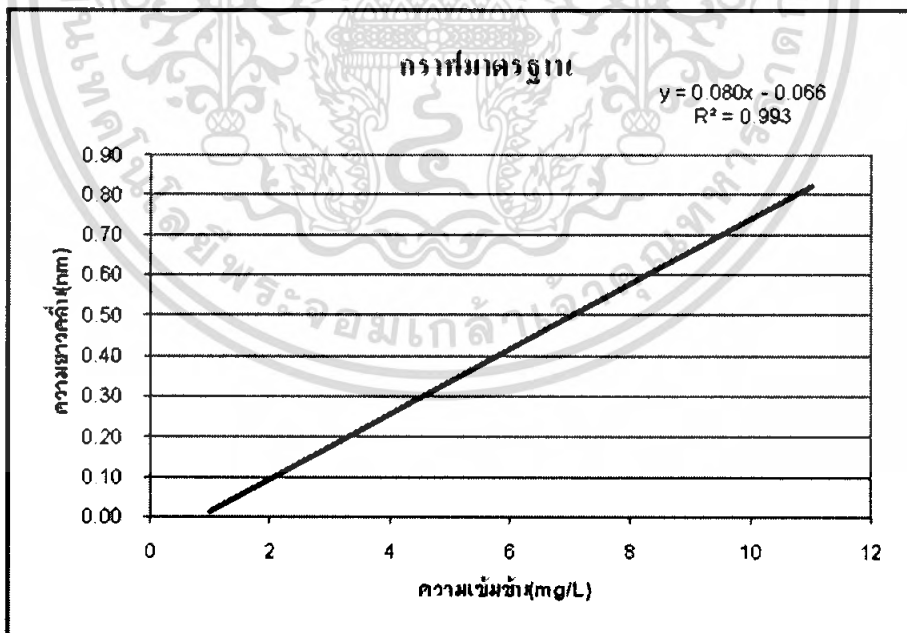
$$\text{Cr}^{6+} = 3.742 \text{ mg/L}$$

$$\text{ครั้งที่ 3 } y=0.0808x - 0.0664$$

$$0.231=0.0808x - 0.0664$$

$$x=3.717$$

$$\text{Cr}^{6+} = 3.717\text{mg/L} \quad \text{เฉลี่ย } \text{Cr}^{6+} = 3.725\text{mg/L}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 ผล Colorimetric ของน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ

วัด spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 nm				
สารละลาย	จำนวนครั้งที่วัด			
	1	2	3	เฉลี่ย
แบลคค์	0	0	0	0
สารมาตรฐาน 2 mL	0.25	0.266	0.276	0.264
สารมาตรฐาน 4 mL	0.534	0.541	0.536	0.537
สารมาตรฐาน 6 mL	0.759	0.758	0.768	0.761
สารมาตรฐาน 8 mL	1.052	1.042	1.047	1.047
สารมาตรฐาน 10 mL	1.265	1.259	1.267	1.263
สารมาตรฐาน 12 mL	1.468	1.47	1.467	1.469
สารมาตรฐาน 14 mL	1.756	1.756	1.752	1.754
สารมาตรฐาน 16 mL	1.818	1.812	1.817	1.815
สารมาตรฐาน 18 mL	1.934	1.937	1.934	1.935
สารมาตรฐาน 20 mL	2.031	2.027	2.027	2.028
สารละลายตัวอย่าง 20 mL	0.028	0.021	0.02	0.023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณ

$$y = 0.2484x - 0.2324$$

$$0.023 = 0.2484x - 0.2324$$

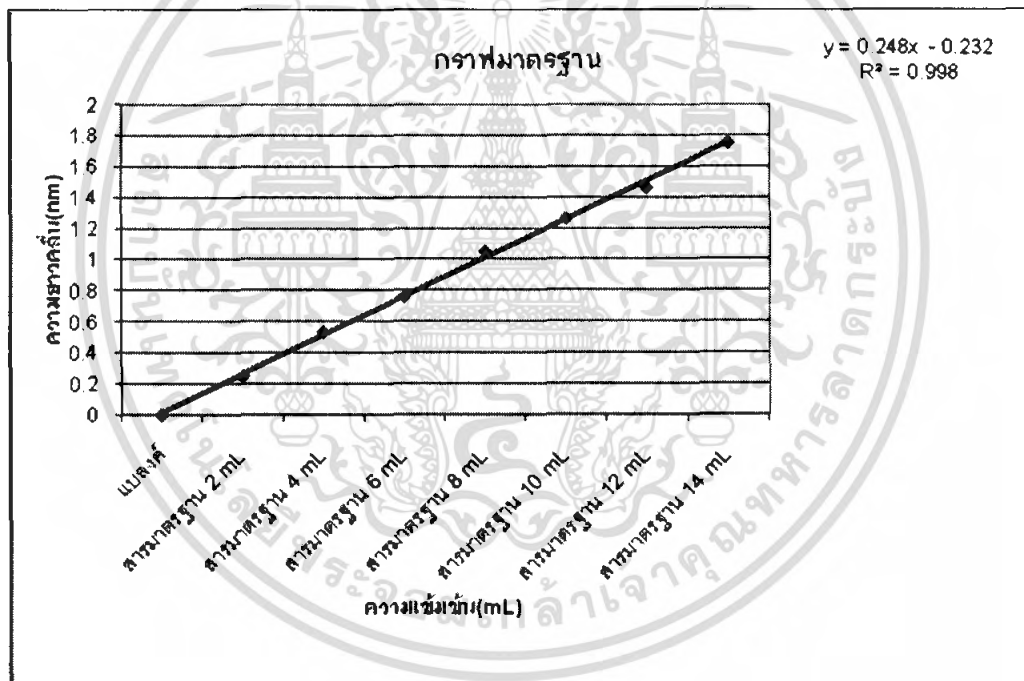
$$x = 1.028$$

$$\text{Cr}^{6+} = 1.028 \text{ mg/L}$$

สารละลาย 100 mL มีความเข้มข้น  $\text{Cr}^{6+}$  0.1028 mg

สารละลาย 20 mL มีความเข้มข้น  $\text{Cr}^{6+}$  0.02056 mg

สารละลาย 1 mL มีความเข้มข้น  $\text{Cr}^{6+}$   $1.028 \times 10^{-3}$  mg



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.ผล AAS จากเฟอริไรต์

### 5.1 แบบผสมโดยใช้ $\text{FeSO}_4$ เป็นตัวรีดิวซ์

สารละลายตัวอย่าง	ปริมาณ(mg/L)
1	ND
2	ND
3	ND
4	ND
5	ND
6	ND
7	ND

หมายเหตุ : ความเข้มข้นน้อยกว่า 0.1 mg/L = ND, not detect

### 5.2 แบบผสมโดย $\text{Na}_2\text{SO}_3$ เป็นตัวรีดิวซ์

สารละลายตัวอย่าง	ปริมาณ(mg/L)
1	ND
2	ND
3	ND
4	ND
5	ND
6	ND
7	ND

หมายเหตุ: ความเข้มข้นน้อยกว่า 0.1mg/L = ND (not detect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  เป็นตัวรีดิวซ์

สารละลายตัวอย่าง	ปริมาณ(mg/L)
1	ND
2	ND
3	ND
4	ND
5	ND
6	ND
7	ND

หมายเหตุ: ความเข้มข้นน้อยกว่า 0.1mg/L = ND (not detect)

5.4 น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้  $\text{FeSO}_4$  เป็นตัวรีดิวซ์

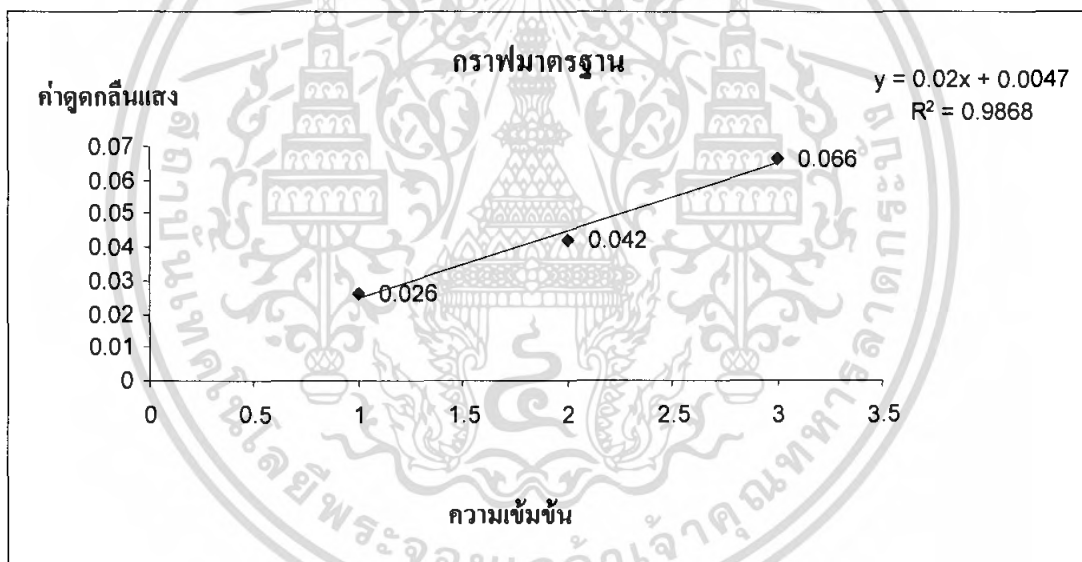
สารละลายตัวอย่าง	ปริมาณ(mg/L)
1	ND
2	ND
3	ND
4	ND
5	ND
6	ND
7	ND

หมายเหตุ: ความเข้มข้นน้อยกว่า 0.1mg/L = ND (not detect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กราฟมาตรฐาน โครเมียม

ความเข้มข้น	ค่าดูดกลืนแสงครั้งที่			เฉลี่ย
	1	2	3	
สารละลายมาตรฐานที่ 1mg/L	0.026	0.025	0.025	0.026
สารละลายมาตรฐานที่ 2mg/L	0.042	0.043	0.042	0.042
สารละลายมาตรฐานที่ 4mg/L	0.071	0.061	0.067	0.066



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. ความเข้มข้นโครเมียม (VI) โดยวิธีการเทียบสี (Colorimetric) ในกระบวนการรีดิวซ์

### 6.1 แบบผสมโดยใช้ $\text{FeSO}_4$ เป็นตัวรีดิวซ์ วัดที่ความยาวคลื่น 540 nm

สารละลาย	จำนวนครั้งที่วัด			
	1	2	3	เฉลี่ย
แบลنگค์	0	0	0	0
สารมาตรฐาน 2 mL	0.093	0.095	0.096	0.086
สารมาตรฐาน 4 mL	0.166	0.167	0.168	0.167
สารมาตรฐาน 6 mL	0.259	0.26	0.26	0.779
สารมาตรฐาน 8 mL	0.334	0.335	0.336	0.335
สารมาตรฐาน 10 mL	0.414	0.414	0.414	0.414
สารมาตรฐาน 12 mL	0.503	0.503	0.504	0.503
สารมาตรฐาน 14 mL	0.568	0.571	0.57	0.569
สารมาตรฐาน 16 mL	0.598	0.604	0.603	0.601
สารมาตรฐาน 18 mL	0.712	0.713	0.715	0.713
สารมาตรฐาน 20 mL	0.766	0.768	0.771	0.768
สารละลายตัวอย่างที่ 1	0.061	0.063	0.061	0.061
สารละลายตัวอย่างที่ 2	0.061	0.063	0.061	0.061
สารละลายตัวอย่างที่ 3	0.054	0.054	0.053	0.053
สารละลายตัวอย่างที่ 4	0.056	0.057	0.057	0.056
สารละลายตัวอย่างที่ 5	0.059	0.058	0.059	0.058
สารละลายตัวอย่างที่ 6	0.054	0.055	0.052	0.053
สารละลายตัวอย่างที่ 7	0.033	0.036	0.034	0.034

หมายเหตุ: ใช้สารละลายตัวอย่างปริมาณ 20 mL

**การคำนวณ**

สารละลายตัวอย่างที่1  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.0616=0.094x - 0.02697$$

$$x=0.942$$

$$Cr^{6+} = 0.942 \text{ mg/L}$$

สารละลายตัวอย่างที่2  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.0616=0.094x - 0.02697$$

$$x=0.942$$

$$Cr^{6+} = 0.942 \text{ mg/L}$$

สารละลายตัวอย่างที่3  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.0536=0.094x - 0.02697$$

$$x=0.857$$

$$Cr^{6+} = 0.857 \text{ mg/L}$$

สารละลายตัวอย่างที่4  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.056=0.094x - 0.02697$$

$$x = 0.882$$

$$Cr^{6+} = 0.882 \text{ mg/L}$$

สารละลายตัวอย่างที่5  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.0586=0.094x - 0.02697$$

$$x=0.910$$

$$Cr^{6+} = 0.910 \text{ mg/L}$$

สารละลายตัวอย่างที่6  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.0536=0.094x - 0.02697$$

$$x=0.857$$

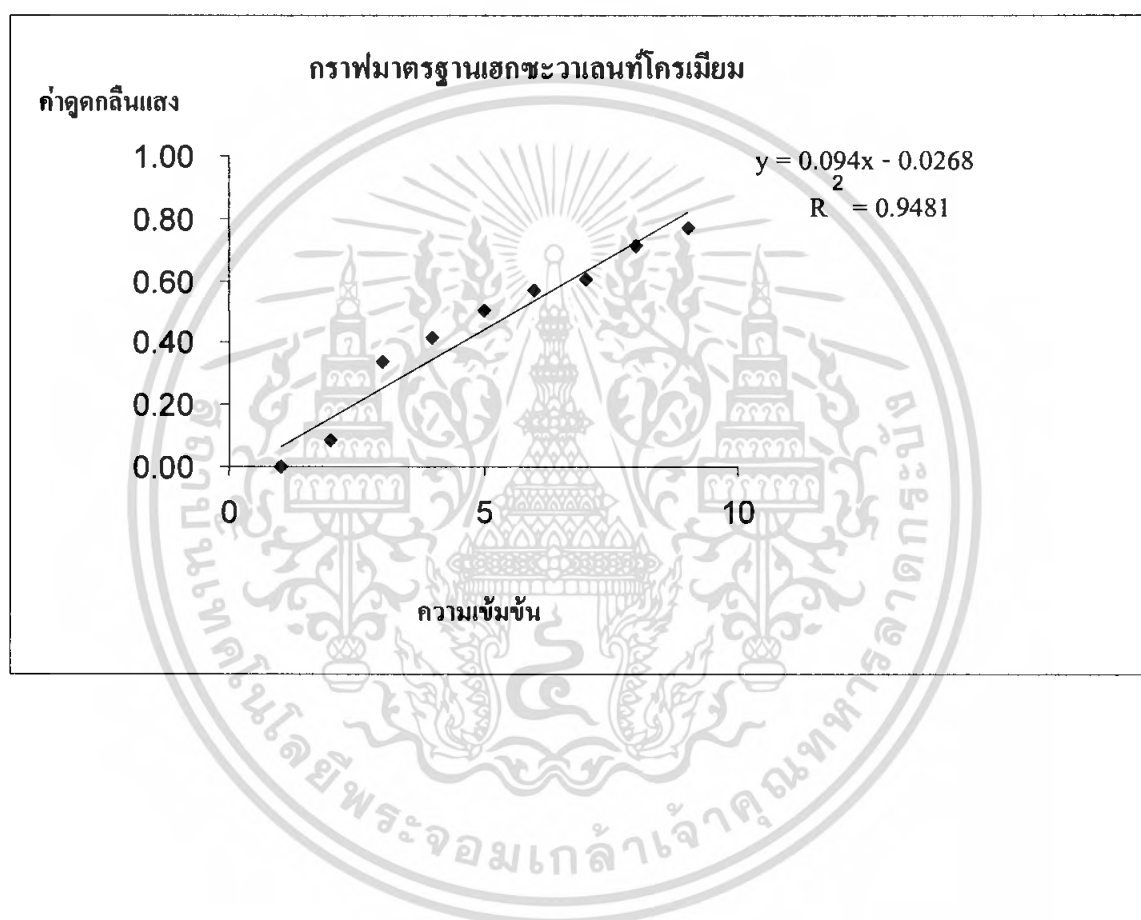
$$Cr^{6+} = 0.857 \text{ mg/L}$$

สารละลายตัวอย่างที่ 7  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.0343=0.094x - 0.02697$$

$$x=0.651$$

$$\text{Cr}^{6+} = 0.651\text{mg/L}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2 แบบผสมโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ เป็นตัวรีดิวซ์วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm

สารละลาย	จำนวนครั้งที่วัด			
	1	2	3	เฉลี่ย
สารละลายตัวอย่างที่ 1	ND	ND	ND	ND
สารละลายตัวอย่างที่ 2	ND	ND	ND	ND
สารละลายตัวอย่างที่ 3	ND	ND	ND	ND
สารละลายตัวอย่างที่ 4	ND	ND	ND	ND
สารละลายตัวอย่างที่ 5	ND	ND	ND	ND
สารละลายตัวอย่างที่ 6	ND	ND	ND	ND
สารละลายตัวอย่างที่ 7	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ : ND = not detect

### 6.3 นำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ เป็นตัวรีดิวซ์วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm

สารละลาย	จำนวนครั้งที่วัด			
	1	2	3	เฉลี่ย
สารละลายตัวอย่างที่ 1	ND	ND	ND	ND
สารละลายตัวอย่างที่ 2	ND	ND	ND	ND
สารละลายตัวอย่างที่ 3	ND	ND	ND	ND
สารละลายตัวอย่างที่ 4	ND	ND	ND	ND
สารละลายตัวอย่างที่ 5	ND	ND	ND	ND
สารละลายตัวอย่างที่ 6	ND	ND	ND	ND
สารละลายตัวอย่างที่ 7	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ: ใช้สารละลายตัวอย่างปริมาณ 20 mL, ND= ไม่สามารถตรวจวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้  $\text{FeSO}_4$  เป็นตัวรีดิวซ์วัดค่าดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 540 nm

สารละลาย	จำนวนครั้งที่วัด			
	1	2	3	เฉลี่ย
สารละลายตัวอย่างที่ 1	0.235	0.236	0.235	0.235
สารละลายตัวอย่างที่ 2	0.241	0.239	0.237	0.239
สารละลายตัวอย่างที่ 3	0.237	0.24	0.237	0.238
สารละลายตัวอย่างที่ 4	0.239	0.236	0.236	0.237
สารละลายตัวอย่างที่ 5	0.228	0.235	0.234	0.232
สารละลายตัวอย่างที่ 6	0.235	0.233	0.237	0.235
สารละลายตัวอย่างที่ 7	0.24	0.239	0.239	0.239

การคำนวณ

สารละลายตัวอย่างที่ 1  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.235=0.094x - 0.02697$$

$$x=2.786$$

$$\text{Cr}^{6+}=2.786 \text{ mg/L}$$

สารละลายตัวอย่างที่ 2  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.239=0.094x - 0.02697$$

$$x=2.829$$

$$\text{Cr}^{6+}=2.829 \text{ mg/L}$$

สารละลายตัวอย่างที่ 3  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.238=0.094x - 0.02697$$

$$x=2.818$$

$$\text{Cr}^{6+}=2.818 \text{ mg/L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายตัวอย่างที่ 4  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.237=0.094x - 0.02697$$

$$x = 2.808$$

$$\text{Cr}^{6+} = 2.808 \text{ mg/L}$$

สารละลายตัวอย่างที่ 5  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.232=0.094x - 0.02697$$

$$x = 2.755$$

$$\text{Cr}^{6+} = 2.755 \text{ mg/L}$$

สารละลายตัวอย่างที่ 6  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.235=0.094x - 0.02697$$

$$x = 2.786$$

$$\text{Cr}^{6+} = 2.786 \text{ mg/L}$$

สารละลายตัวอย่างที่ 7  $y=0.094x - 0.0267$

$$0.239=0.094x - 0.02697$$

$$x = 2.829$$

$$\text{Cr}^{6+} = 2.829 \text{ mg/L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. ผลแม่เหล็กจากตะกอนที่ผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์

### 7.1 แบบผสมโดยใช้ $\text{FeSO}_4$ เป็นตัวรีดิวซ์

หมายเลขตะกอน	ความเป็นแม่เหล็ก(G)
ตะกอน1	1.40
ตะกอน2	1.20
ตะกอน3	1.00
ตะกอน4	0.70
ตะกอน5	1.20
ตะกอน6	1.10
ตะกอน7	1.20

$$\bar{X} = 1.11 \quad SD = 0.219$$

### 7.2 นำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ เป็นตัวรีดิวซ์

หมายเลขตะกอน	ความเป็นแม่เหล็ก(G)
ตะกอน1	1.60
ตะกอน2	1.60
ตะกอน3	1.00
ตะกอน4	1.00
ตะกอน5	0.70
ตะกอน6	1.10
ตะกอน7	1.00

$$\bar{X} = 1.04 \quad SD = 0.081$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.3 นำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้ $\text{FeSO}_4$ เป็นตัวรีดิวซ์

หมายเลขตะกอน	ความเป็นแม่เหล็ก(G)
ตะกอน1	1.20
ตะกอน2	1.00
ตะกอน3	1.10
ตะกอน4	1.20
ตะกอน5	1.30
ตะกอน6	1.00
ตะกอน7	1.20

$$\bar{X} = 1.14 \quad \text{SD} = 0.113$$

### 7.4 แบบผสมโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ เป็นตัวรีดิวซ์

หมายเลขตะกอน	ความเป็นแม่เหล็ก(G)
ตะกอน1	1.00
ตะกอน2	1.00
ตะกอน3	1.10
ตะกอน4	0.98
ตะกอน5	1.00
ตะกอน6	1.20
ตะกอน7	1.00

$$\bar{X} = 1.04 \quad \text{SD} = 0.081$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8. น้ำหนักตะกอนที่ผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์

### 8.1 แบบผสมโดยใช้ $\text{FeSO}_4$ เป็นตัวรีดิวซ์

หมายเลขตะกอน	น้ำหนักตะกอนพร้อมถุง(g)	น้ำหนักถุง(g)	น้ำหนักตะกอน (g)
ตะกอน1	12.42	4.97	7.45
ตะกอน2	14.67	5.01	9.66
ตะกอน3	14.93	4.97	9.96
ตะกอน4	15.17	5.02	10.15
ตะกอน5	11.14	4.96	6.18
ตะกอน6	14.63	4.98	9.65
ตะกอน7	15.40	5.01	10.39

$$\bar{X} = 9.06 \quad \text{SD} = 1.60$$

### 8.2 น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ เป็นตัวรีดิวซ์

หมายเลขตะกอน	น้ำหนักตะกอนพร้อมถุง(g)	น้ำหนักถุง(g)	น้ำหนักตะกอน (g)
ตะกอน1	10.44	5.41	5.03
ตะกอน2	13.77	5.44	8.33
ตะกอน3	10.69	5.41	5.28
ตะกอน4	11.08	5.44	5.64
ตะกอน5	10.59	5.51	5.08
ตะกอน6	11.30	5.41	5.89
ตะกอน7	13.55	5.50	8.05

$$\bar{X} = 6.19 \quad \text{SD} = 1.40$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8.3 แบบผสมโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ เป็นตัวรีดิวซ์

หมายเลขตะกอน	น้ำหนักตะกอนพร้อมถุง(g)	น้ำหนักถุง(g)	น้ำหนักตะกอน (g)
ตะกอน1	12.65	5.04	7.61
ตะกอน2	12.69	5.05	7.64
ตะกอน3	12.63	5.04	7.59
ตะกอน4	12.50	4.99	7.51
ตะกอน5	12.52	5.02	7.50
ตะกอน6	12.53	4.98	7.55
ตะกอน7	12.62	5.02	7.60

$$\bar{X} = 7.57 \quad \text{SD} = 0.052$$

### 8.4 สารละลายตัวอย่างโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้ $\text{FeSO}_4$ เป็นตัวรีดิวซ์

หมายเลขตะกอน	น้ำหนักตะกอนพร้อมถุง(g)	น้ำหนักถุง(g)	น้ำหนักตะกอน (g)
ตะกอน1	8.85	1.76	7.09
ตะกอน2	9.86	1.75	8.11
ตะกอน3	10.81	1.79	9.02
ตะกอน4	10.50	1.77	8.73
ตะกอน5	6.49	1.75	4.74
ตะกอน6	10.31	1.76	8.55
ตะกอน7	9.98	1.75	8.23

$$\bar{X} = 7.78 \quad \text{SD} = 1.48$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำเสียเบื้องต้นหลังผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์

### 9.1 น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้ $\text{FeSO}_4$ เป็นตัวรีดิวซ์

No.	pH	Conductivity (ms)	ORP (mV)		
			Sample	Distill Water	FAS
1	3.50	114.0	142.9	182.5	324.5
2	3.65	113.3	145.0	185.7	327.3
3	3.73	112.5	144.3	170.7	328.7
4	3.71	112.4	143.1	170.9	327.9
5	3.78	109.2	145.0	182.7	327.6
6	3.90	106.9	144.1	178.8	327.4
7	3.85	105.3	143.2	185.5	328.8
<b>เฉลี่ย</b>	<b>3.73</b>	<b>110.5</b>	<b>143.9</b>	<b>179.5</b>	<b>327.5</b>
<b>SD</b>	<b>0.12</b>	<b>3.1</b>	<b>0.82</b>	<b>5.9</b>	<b>1.3</b>

$$E_{hs} = E_{h_{obs}} + E_{h_{zobell}} - E_{h_{zobell_{obs}}}$$

$$E_{hs} = 143.9 + 229 - 327.5$$

$$E_{hs} = 49.4 \text{ mV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.2 นำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  เป็นตัวรีดิวซ์

No.	pH	Conductivity (ms)	ORP (mV)		
			Sample	Distill Water	FAS
1	6.45	84.0	107.0	185.7	327.3
2	5.11	110.4	123.9	170.7	328.7
3	5.16	113.1	108.6	170.9	327.6
4	5.17	111.2	112.4	182.5	327.5
5	5.10	113.2	109.6	182.7	328.8
6	5.14	110.5	100.4	178.8	324.8
7	5.12	115.1	108.7	185.2	325.2
เฉลี่ย	5.32	108.2	110.1	179.5	327.1
SD	0.46	10.0	6.59	5.9	1.5

$$E_{hs} = E_{h_{obs}} + E_{h_{zobell}} - E_{h_{zobellobs}}$$

$$E_{hs} = 110.8 + 229 - 327.1$$

$$E_{hs} = 12.7 \text{ mV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 9.3 แบบผสมโดยใช้ FeSO<sub>4</sub> เป็นตัวรีดิวซ์

No.	pH	Conductivity (ms)	ORP (mV)		
			Sample	Distill Water	FAS
1	7.84	90.2	15.8	170.7	327.6
2	7.18	89.1	9.5	170.9	328.7
3	7.53	88.2	-3.6	182.5	324.5
4	7.76	88.8	-6.4	182.8	327.9
5	6.64	90.4	14.9	179.5	327.9
6	7.61	89.3	-3.5	185.2	328.2
7	6.45	88.7	17.9	182.5	327.4
เฉลี่ย	7.29	89.2	6.4	179.2	327.5
SD	0.51	0.7	9.74	5.5	1.3

$$E_{hs} = E_{h_{obs}} + E_{h_{zobell}} - E_{h_{zobellobs}}$$

$$E_{hs} = 6.4 + 229 - 327.5$$

$$E_{hs} = -92.1 \text{ mV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 9.4 แบบผสมโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ เป็นตัวรีดิวซ์

No.	pH	Conductivity (ms)	ORP (mV)		
			Sample	Distill Water	FAS
1	6.97	86.1	18.9	170.9	327.8
2	6.77	87.1	18.1	182.7	328.7
3	6.85	87.5	18.1	182.5	327.9
4	6.66	84.2	14.5	185.7	328.7
5	7.00	86.3	11.2	182.6	328.7
6	7.04	87.4	9.8	182.5	327.4
7	6.93	89.2	12.0	178.9	327.4
<b>เฉลี่ย</b>	<b>6.89</b>	<b>86.8</b>	<b>14.7</b>	<b>180.8</b>	<b>328.1</b>
<b>SD</b>	<b>0.13</b>	<b>1.4</b>	<b>3.47</b>	<b>4.4</b>	<b>0.6</b>

$$E_{hs} = E_{h_{obs}} + E_{h_{zobell}} - E_{h_{zobell_{obs}}}$$

$$E_{hs} = 14.7 + 229 - 328.1$$

$$E_{hs} = -84.4 \text{ mV}$$

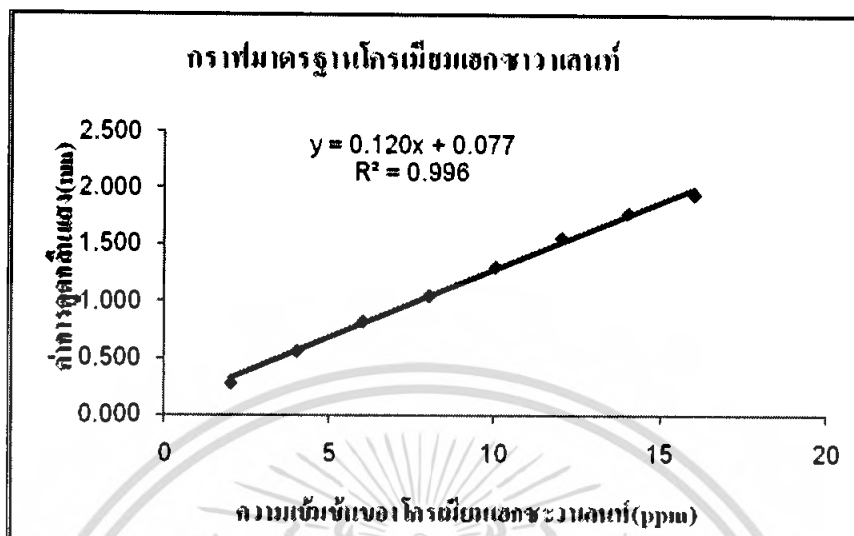
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 10. ผลการทดสอบการชะละลาย Waste Extraction (WET) ของตะกอนโครไมต์

### 10.1 กราฟมาตรฐานโครเมียม (VI) จากวิธีการเทียบสี

วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm				
ความเข้มข้นของสารละลาย มาตรฐาน(ppm)	จำนวนครั้งที่วัด			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.276	0.279	0.280	0.278
4	0.559	0.560	0.561	0.560
6	0.819	0.820	0.820	0.820
8	1.044	1.145	1.048	1.079
10	1.293	1.305	1.307	1.302
12	1.559	1.560	1.556	1.558
14	1.780	1.778	1.780	1.779
16	1.943	1.944	1.945	1.944
18	2.091	2.093	2.091	2.092
20	2.184	2.184	2.185	2.184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 10.2 ผลการทดสอบโครเมียม (VI) ของตะกอนโครไมต์

### 10.2.1 ตะกอนจากน้ำเสียตัวอย่างแบบผสมโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ เป็นตัวรีดิวซ์

วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm

สารละลายจากตะกอน	ค่าการดูดกลืนแสง (nm)				ความเข้มข้นของ $\text{Cr}^{6+}$ ในสารสกัดเจองาง (ppm)
	1	2	3	เฉลี่ย	
1	-0.025	-0.024	-0.024	-0.024	ND
2	-0.025	-0.023	-0.024	-0.024	ND
3	-0.024	-0.024	-0.023	-0.024	ND
4	-0.027	-0.026	-0.025	-0.026	ND
5	-0.025	-0.024	-0.024	-0.024	ND
6	-0.026	-0.025	-0.024	-0.025	ND
7	-0.026	-0.024	-0.025	-0.025	ND

หมายเหตุ: ใช้สารละลายตัวอย่างปริมาณ 10 mL

ND = ตรวจไม่พบ

10.2.2 ตะกอนจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  เป็นตัวรีดิวซ์

วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm					
สารละลายจากตะกอน	ค่าการดูดกลืนแสง (nm)				ความเข้มข้นของ $\text{Cr}^{6+}$ ในสารสกัดเจือจาง (ppm)
	1	2	3	เฉลี่ย	
	-				
1	0.026	-0.032	-0.030	-0.029	ND
	-				
2	0.034	-0.035	-0.036	-0.035	ND
	-				
3	0.034	-0.032	-0.032	-0.033	ND
	-				
4	0.031	-0.030	-0.031	-0.031	ND
	-				
5	0.031	-0.033	-0.033	-0.032	ND
	-				
6	0.030	-0.032	-0.031	-0.031	ND
	-				
7	0.029	-0.031	-0.028	-0.029	ND

หมายเหตุ: ใช้สารละลายตัวอย่างปริมาณ 10 mL

ND = ตรวจไม่พบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.2.3 ตะกอนจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้  $\text{FeSO}_4$  เป็นตัวรีดิวซ์

วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm					
สารละลายจากตะกอน	ค่าการดูดกลืนแสง (nm)				ความเข้มข้นของ $\text{Cr}^{6+}$ ในสารสกัดเจองาง (ppm)
	1	2	3	เฉลี่ย	
1	-0.017	-0.016	-0.016	-0.016	ND
2	-0.018	-0.019	-0.019	-0.019	ND
3	-0.015	-0.014	-0.013	-0.014	ND
4	-0.013	-0.014	-0.014	-0.014	ND
5	-0.023	-0.020	-0.019	-0.021	ND
6	-0.023	-0.023	-0.023	-0.023	ND
7	-0.018	-0.018	-0.019	-0.018	ND

หมายเหตุ: ใช้สารละลายตัวอย่างปริมาณ 10 mL

ND = ตรวจไม่พบ

### 10.2.4 ตะกอนจากน้ำเสียตัวอย่างแบบผสมโดยใช้ $\text{FeSO}_4$ เป็นตัวรีดิวซ์

วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm					
สารละลายจากตะกอน	ค่าการดูดกลืนแสง (nm)				ความเข้มข้นของ $\text{Cr}^{6+}$ ในสารสกัดเจือจาง (ppm)
	1	2	3	เฉลี่ย	
1	-0.007	-0.004	-0.006	-0.006	ND
2	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	ND
3	-0.001	-0.002	-0.007	-0.003	ND
4	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	ND
5	-0.005	-0.005	-0.004	-0.005	ND
6	-0.006	-0.004	-0.005	-0.005	ND
7	-0.004	-0.003	-0.004	-0.004	ND

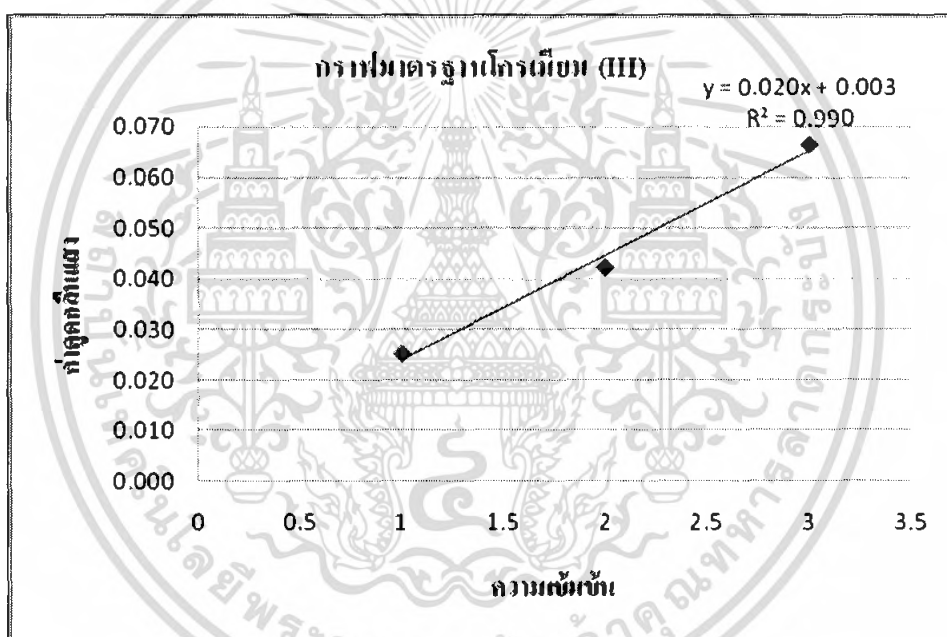
หมายเหตุ: ใช้สารละลายตัวอย่างปริมาณ 10 mL

ND = ตรวจไม่พบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 10.3 กราฟมาตรฐานโครเมียมทั้งหมดจาก AAS

ความเข้มข้น ของ Cr <sup>3+</sup> (ppm)	ค่าการ ดูดกลืนแสง (nm)	ค่าการดูดกลืน แสง (nm)	ค่าการ ดูดกลืนแสง (nm)	ค่าการดูดกลืน แสงเฉลี่ย
1	0.026	0.025	0.025	0.025
2	0.042	0.043	0.042	0.042
4	0.071	0.061	0.067	0.066



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 10.4 ผลการทดสอบโครเมียม (III) ของตะกอนโครไมต์

#### 10.4.1 ตะกอนจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้ $\text{FeSO}_4$ เป็นตัวรีดิวซ์

สารละลาย จากตะกอน	ค่าการดูดกลืนแสง (nm)				ความเข้มข้นของ $\text{Cr}^{3+}$ ในสารสกัด เจองาง 100 เท่า (ppm)	ความเข้มข้นของ $\text{Cr}^{3+}$ ในสารสกัด (mg/l)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
1	0.061	0.065	0.066	0.064	3.933	393.284
2	0.030	0.027	0.028	0.028	1.271	508.458
3	0.030	0.031	0.031	0.031	1.445	578.109
4	0.025	0.026	0.026	0.026	1.072	428.856
5	0.059	0.031	0.051	0.047	2.664	1065.672
6	0.048	0.047	0.047	0.047	2.689	1075.622
7	0.039	0.040	0.040	0.040	2.117	846.766
				เฉลี่ย		699.538
				SD		293.112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.4.2 ตะกอนจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังเพียงอย่างเดียวโดยใช้  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  เป็นตัวรีดิวซ์

สารละลาย จากตะกอน	ค่าการดูดกลืนแสง (nm)				ความเข้มข้นของ $\text{Cr}^{3+}$ ในสารสกัด เจือจาง 100 เท่า (ppm)	ความเข้มข้นของ $\text{Cr}^{3+}$ ในสารสกัด (mg/l)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
1	0.008	0.008	0.007	0.008	0.244	488.000
2	0.004	0.004	0.004	0.004	0.123	246.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	1.200
4	0.005	0.005	0.005	0.005	0.143	286.000
5	0.033	0.033	0.033	0.033	1.470	588.060
6	0.017	0.020	0.019	0.019	0.400	160.199
7	0.045	0.046	0.046	0.046	2.415	966.169
				เฉลี่ย		455.738
				SD		296.390

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 10.4.3 ตะกอนจากน้ำเสียตัวอย่างแบบผสมโดยใช้ $\text{FeSO}_4$ เป็นตัวรีดิวซ์

สารละลาย จากตะกอน	ค่าการดูดกลืนแสง (nm)				ความเข้มข้นของ $\text{Cr}^{3+}$ ในสารสกัด เจองาง 100 เท่า (ppm)	ความเข้มข้นของ $\text{Cr}^{3+}$ ในสารสกัด (mg/l)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
1	0.205	0.192	0.201	0.199	13.883	1388.308
2	0.086	0.085	0.086	0.086	5.400	540.050
3	0.208	0.206	0.206	0.207	14.430	1443.035
4	0.019	0.048	0.048	0.038	1.868	747.264
5	0.037	0.037	0.036	0.037	1.744	697.512
6	0.042	0.043	0.044	0.043	2.216	886.567
7	0.032	0.037	0.038	0.036	1.669	667.662
				เฉลี่ย		910.057
				SD		359.614

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 10.4.4 ตะกอนจากน้ำเสียตัวอย่างแบบผสมโดยใช้ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ เป็นตัวรีดิวซ์

สารละลาย จากตะกอน	ค่าการดูดกลืนแสง (nm)				ความเข้มข้นของ $\text{Cr}^{3+}$ ในสารสกัด เจือจาง 100 เท่า (ppm)	ความเข้มข้นของ $\text{Cr}^{3+}$ ในสารสกัด (mg/l)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
1	0.090	0.090	0.089	0.090	5.699	569.900
2	0.074	0.076	0.076	0.075	4.629	462.935
3	0.109	0.108	0.110	0.109	7.142	714.179
4	0.087	0.087	0.088	0.087	5.525	552.488
5	0.072	0.073	0.073	0.073	4.430	443.035
6	0.090	0.091	0.091	0.091	5.774	577.363
7	0.039	0.038	0.04	0.039	1.918	191.791
				เฉลี่ย		501.670
				SD		162.835

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 11. ผลการเพิ่มความเข้มข้นแม่เหล็กแก่ตะกอนโครไมต์

### 11.1 แสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของตะกอนที่ผ่านการอัดเม็ด

ชนิด	ชนิดตัวรีดิวซ์							
	FeSO <sub>4</sub>				Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย(G)	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย(G)
ตัวอย่าง น้ำเสีย	1(G)	2(G)	3(G)		1(G)	2(G)	3(G)	
MWS	2.67	2.73	2.71	2.70	1.49	1.52	1.50	1.50
TW	1.72	1.68	1.70	1.70	1.72	1.75	1.71	1.73

### 11.2 แสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของตะกอนที่ผ่านการเผาไล่ออกซิเจน

ชนิด	ชนิดตัวรีดิวซ์							
	FeSO <sub>4</sub>				Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย(G)	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย(G)
ตัวอย่าง น้ำเสีย	1(G)	2(G)	3(G)		1(G)	2(G)	3(G)	
MWS	0.50	0.54	0.54	0.53	0.47	0.50	0.49	0.49
TW	0.74	0.73	0.72	0.73	0.82	0.80	0.79	0.80

### 11.3 แสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของตะกอนที่ผ่านการเหนียวน้ำ

ชนิด	ชนิดตัวรีดิวซ์							
	FeSO <sub>4</sub>				Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>			
	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย(G)	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย(G)
ตัวอย่าง น้ำเสีย	1(G)	2(G)	3(G)		1(G)	2(G)	3(G)	
MWS	49.81	49.85	49.74	49.80	49.93	50.14	50.02	50.03
TW	51.55	50.89	50.87	51.10	51.91	52.28	52.13	52.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้