

การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียซีไอดีโดยใช้เคลือบโพลีเมอร์

นางสาวพัชราภรณ์ ทวีสุวรรณพร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2743-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HEAVY METAL REMOVAL FROM COD WASTEWATER  
USING CHELATING POLYMER

Miss Patcharaporn Thaweesuwanporn



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2743-7



พัชราภรณ์ ทวีสุวรรณพร : การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียซีโอดีโดยใช้คีเลตติ้งโพลีเมอร์.  
(HEAVY METAL REMOVAL FROM COD WASTEWATER USING CHELATING POLYMER.)  
อ. ที่ปรึกษา : รศ.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 202 หน้า, ISBN 974-17-2743-7.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก (ในน้ำ) โดยใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ ส่วนแรกเป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก 4 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละชนิด ได้แก่ ปรอท โคโรเมียม เงิน และเหล็ก และส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดพร้อมกันในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง (เจือจาง 10 เท่า)

ผลการทดลองพบว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์สามารถกำจัดปรอทและเงินได้ดี แต่ไม่สามารถกำจัดโคโรเมียมและเหล็กได้ โดยที่น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าปรอทและเงินเริ่มต้นประมาณ 150 และ 200 มก./ล. พบว่าการใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ประมาณ 480 และ 360 มก./ล. ทำให้ปรอทและเงินถูกกำจัดให้เหลือต่ำกว่า 0.005 และ 1.0 มก./ล. ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าพีเอชไม่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทและเงิน

ผลการทดลองนี้ยังพบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักต่างๆ ทั้ง 4 ชนิดพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยน้ำเสียซีโอดีเจือจางมีปริมาณปรอท โคโรเมียม เงิน และเหล็กเริ่มต้นประมาณ 200, 46, 180 และ 140 มก./ล. เมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีโอดีเจือจางให้เท่ากับ 5.0 และใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 1,440 มก./ล. โดยทิ้งให้ตกตะกอนประมาณ 30 นาที จะทำให้มีปริมาณ ปรอท โคโรเมียม เงิน และเหล็ก เหลืออยู่ในน้ำเท่ากับ 0.001, 0.07, 0.1 และ 0.3 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 8.4 - 8.5 ทำให้ของแข็งแขวนลอยมีขนาดใหญ่และแยกออกได้ง่าย เมื่อทิ้งให้ตกตะกอนประมาณ 30 นาที โดยที่ไม่ต้องมีการใช้สารโคแอกกูแลนต์

การกำจัดโลหะหนักต่างๆ ในน้ำเสียซีโอดีด้วยวิธีข้างต้นพบว่าต้องเสียค่าใช้จ่ายรวมประมาณ 11,300 - 15,800 บาท/ลบ.ม. (น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น) หรือ 0.9 - 1.3 บาท/1 ตัวอย่างน้ำสำหรับการวิเคราะห์ค่าซีโอดีแบบเปิด (รวมค่าบำบัดและกำจัดตะกอน) ซึ่งค่าใช้จ่ายดังกล่าวส่วนใหญ่เกือบร้อยละ 60 เป็นค่าสารปรับพีเอช (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ในขณะที่ค่าใช้จ่ายในส่วนของสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ประมาณร้อยละ 38

ภาควิชา	<u>วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม</u>	ลายมือชื่อนิสิต _____
สาขาวิชา	<u>วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม</u>	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ปีการศึกษา	<u>2545</u>	

## 4270451121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: HEAVY METAL REMOVAL/ DITHIOCARBAMATE/ CHELATION REACTION/ COD WASTEWATER

PATCHARAPORN THAWEESUWANPORN : HEAVY METAL REMOVAL FROM COD WASTEWATER USING CHELATING POLYMER. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. ORATHAI CHAVALPARIT. 202 pp. ISBN 974-17-2743-7.

This study investigated the removal efficiency of heavy metal from wastewater using chelating polymer. The experiments were divided into two major parts. The first part was conducted to optimize conditions for removing heavy metals from four synthetic wastewaters, i.e., Hg, Cr, Ag and Fe. The second part was to optimize the removal conditions for combined four heavy metals, i.e., Hg, Cr, Ag and Fe, contained in diluted COD wastewater prepared from diluting 10 times of real COD wastewater with tap water.

The results showed that this chelating polymer was very effective for the removal of Hg and Ag, but it was not able to help remove Cr and Fe. When the initial concentrations of Hg and Ag in synthetic wastewaters were 150 and 200 mg/l and the chelating polymer was added at 480 and 360 mg/l, the concentration of Hg and Ag remained in effluent were only 0.005 and 1 mg/l, respectively. In addition, the results also illustrated that pH did not affect on the removal efficiency of soluble Hg and Ag,

Moreover, the exploitation of sodium hydroxide together with the chelating polymer could remove four heavy metals effectively. That is, when the initial concentrations of Hg, Cr, Ag and Fe were 200, 46, 180 and 140 mg/l, pH of diluted COD wastewater was initially adjusted to 5.0 and the 1440 mg/l of chelating polymer was added, the concentrations of those heavy metals in the effluent after 30 minutes of settling were left only 0.001, 0.07, 0.1 and 0.3 mg/l, respectively. In addition, the pH after adding the chelating polymer was about 8.4 - 8.5, which resulted in heavier suspended solid and easily separated without any coagulant aids needed.

The expense for the procedure from this study was totally 11,300 - 15,800 baht/cu.m. of real COD wastewater or 0.9 - 1.3 baht/sample from COD open reflux analysis (also included the expense for sludge treatment). Most of the expense was the cost of neutralization by sodium hydroxide while the cost of the chelating polymer was about 38%.

Department Environmental Engineering Student's signature \_\_\_\_\_  
 Field of study Environmental Engineering Advisor's signature \_\_\_\_\_  
 Academic year 2002

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของบุคคลต่างๆ หลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังนี้

รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยด้วยดีมาตลอด รวมทั้งให้กำลังใจเมื่อมีปัญหาต่างๆ เกิดขึ้นในการทำวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.มันัสสิน ตันทุลเวศม์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ตลอดถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ที่สามารถเป็นประโยชน์กับงานวิจัย รวมถึงให้ความอนุเคราะห์สารคดีเล็งโพลีเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้อีกด้วย

ขอบคุณ ทบวงมหาวิทยาลัย และบัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งได้ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยนี้

คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้ช่วยอบรมสั่งสอนและให้ความรู้

คุณจันทวรรณ (พี่ปอง) เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการปริญญาโท ที่ให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจและอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ ดวงเดือน อาจารย์ม้งกร กิตติพัฒน์มนตรี รวมถึงคุณอมร กิตติธร เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิเคราะห์ (โลหะหนัก) ของสถาบันวิจัยเคมี ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ต. คลอง 6 อ. ธัญบุรี จ. ปทุมธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง AAS รวมถึงช่วยวิเคราะห์ผลให้ อย่างเร่งด่วนเมื่อยามจำเป็น

คุณปรีชาวิทย์ รอดรัตน์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้กำลังใจและช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

คุณโสภา ชินเวศกิจวานิชย์ (พี่ก๊วง) ที่ช่วยให้คำแนะนำ รวมถึงให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงสารเคมีบางอย่างด้วย

น้องๆ เพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือทุกครั้งที่เคยปาก

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย.....	3
2.1 วัตถุประสงค์.....	3
2.2 ขอบเขตการวิจัย.....	3
3. ทบทวนเอกสาร.....	4
3.1 เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก.....	4
3.1.1 การตกตะกอนผลึก.....	4
3.1.2 ออกซิเดชัน-รีดักชัน.....	6
3.1.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ.....	7
3.1.4 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	8
3.1.5 อิเล็กโตรไลซิส.....	8
3.1.6 การปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยกรดหรือด่าง.....	8
3.1.7 การใช้สารเคมีในการตกตะกอน.....	9
3.2 การตกตะกอนทางเคมี.....	10
3.2.1 การตกตะกอนผลึกในรูปของไฮดรอกไซด์.....	11
3.2.2 การตกตะกอนผลึกในรูปของซัลไฟด์.....	14
3.2.3 การตกตะกอนผลึกในรูปของคาร์บอเนต.....	18
3.2.4 การตกตะกอนผลึกในรูปของแซนแรต.....	20
3.2.5 การตกตะกอนผลึกแต่ละประเภทร่วมกัน.....	20
3.2.6 การตกตะกอนผลึกในรูปของโซเดียมโบโรไฮไดรด์.....	21

บทที่	หน้า
3.3 สารประกอบเชิงซ้อน.....	23
3.3.1 อีออนเชิงซ้อน.....	23
3.3.2 การทำลายสารประกอบเชิงซ้อน.....	26
3.3.3 คีเลชัน.....	26
3.3.4 สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกับสารอินทรีย์ (คีเลท).....	27
3.3.5 สารคีเลตที่ใช้กำจัดโลหะหนัก.....	29
3.4 ลักษณะน้ำเสียซีโอดี.....	34
3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
4. แผนการดำเนินการวิจัย.....	52
4.1 แผนการทดลอง.....	52
4.1.1 ขั้นตอนที่ 1 การทำกราฟไตเตรชัน.....	52
4.1.2 ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพ การกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด.....	54
4.1.3 ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาปริมาณคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพ การกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด.....	58
4.1.4 ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการกำจัด โลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง.....	60
4.2 ลักษณะของน้ำเสียแต่ละประเภท.....	62
4.3 สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์.....	62
4.3.1 คุณสมบัติทั่วไป.....	62
4.3.2 สารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ร่วมกับ EPOFLOC L-1.....	62
4.3.3 การเตรียมสารละลาย EPOFLOC L-1 ที่ใช้ในการทดลองนี้.....	63
4.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	63
4.4.1 ตัวแปรอิสระ.....	63
4.4.2 ตัวแปรกำหนด.....	63
4.4.3 ตัวแปรตามที่ต้องวิเคราะห์.....	64
4.5 วิธีวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ.....	64
4.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	64



บทที่	หน้า
5. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	66
5.1 กราฟไคเตรชัน.....	66
5.1.1 น้ำเสียสังเคราะห์ปรีท.....	67
5.1.2 น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม.....	70
5.1.3 น้ำเสียสังเคราะห์เงิน.....	73
5.1.4 น้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก.....	75
5.1.5 น้ำเสียซีไอดี.....	78
5.2 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ปรีท.....	82
5.2.1 ขั้นตอนการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดปรีท.....	82
5.2.2 ขั้นตอนการศึกษาปริมาณคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมในการกำจัดปรีท.....	92
5.2.3 สรุปผลการกำจัดปรีทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์.....	96
5.3 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม.....	98
5.3.1 ขั้นตอนการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียม.....	98
5.3.2 ขั้นตอนการศึกษาปริมาณคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม.....	106
5.3.3 สรุปผลการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์.....	108
5.4 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เงิน.....	109
5.4.1 ขั้นตอนการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดเงิน.....	110
5.4.2 ขั้นตอนการศึกษาปริมาณคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมในการกำจัดเงิน.....	117
5.4.3 สรุปผลการกำจัดเงินในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์.....	120
5.5 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก.....	121
5.5.1 ขั้นตอนการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดเหล็ก.....	121
5.5.2 ผลของปริมาณสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก.....	129
5.5.3 สรุปผลการกำจัดเหล็กในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์.....	129
5.6 ผลการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีเจือจาง.....	129
5.6.1 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักต่างๆ.....	129
5.6.2 ขั้นตอนการศึกษาหาปริมาณคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ที่เหมาะสม.....	145
5.6.3 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในสภาวะที่เหมาะสม และผลของปริมาณสารโพลีเมอร์ที่ระบุ.....	150
5.6.4 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง.....	158

## สารบัญ (ต่อ)

ญ

บทที่	หน้า
5.6.5	เปรียบเทียบปริมาณความต้องการสารคลอรีนไดออกไซด์เพื่อใช้ในการกำจัดปรอทและเงินในน้ำเสียสังเคราะห์และในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง.....
	159
5.7	วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีไอดี.....
	160
5.7.1	ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปรอทและเงิน.....
	160
5.7.2	ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีไอดี.....
	161
6.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....
	166
6.1	สรุปผลการทดลอง.....
	166
6.2	ข้อเสนอแนะ.....
	168
	รายการอ้างอิง.....
	169
	บรรณานุกรม.....
	172
	ภาคผนวก.....
	173
	ภาคผนวก ก การทดลองเบื้องต้น.....
	174
	ภาคผนวก ข การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละประเภท.....
	184
	ภาคผนวก ค เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีไอดีของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา.....
	190
	ภาคผนวก ง ระบบบำบัดน้ำเสียซีไอดีแบบแบคทีเรียอย่างง่าย.....
	194
	ภาคผนวก จ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539).....
	197
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....
	202

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

๘

ตารางที่	หน้า
3.1	ข้อดีและข้อเสียของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์..... 14
3.2	ข้อดีและข้อจำกัดของการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์..... 15
3.3	ความสามารถในการละลายของโลหะซัลไฟด์เทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์..... 17
3.4	ค่า $K_{sp}$ และ $pK_{sp}$ ของโลหะไฮดรอกไซด์ โลหะซัลไฟด์และโลหะคาร์บอเนต..... 18
3.5	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโลหะที่ถูกรีดิวซ์ต่อจำนวนโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ใช้..... 22
3.6	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการตกตะกอนแบบต่างๆ..... 23
3.7	แสดงเปรียบเทียบค่า $\log K_s$ ของ 1:1 Metal Ion Chelate ต่างๆ..... 28
3.8	การประมาณความเข้มข้นของปรอท โครเมียม เงิน และเหล็กในการวิเคราะห์ซีไอดี... 34
3.9	ลักษณะน้ำเสียซีไอดีซึ่งรวบรวมได้จากงานวิจัยต่างๆ..... 35
3.10	แสดงปริมาณสารมลทินในผงเงิน..... 39
3.11	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทจากน้ำเสียซีไอดีตามวิธี ของ Aslam และ Walker กับวิธีที่ EPA แนะนำ..... 40
4.1	ลักษณะของน้ำเสียในแต่ละประเภทซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้..... 62
4.2	ตัวแปรที่วิเคราะห์และวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์..... 64
5.1	ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท..... 83
5.2	ผลของปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอท ในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท..... 93
5.3	ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย สังเคราะห์โครเมียม..... 99
5.4	ผลของปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม..... 107
5.5	ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในน้ำเสียสังเคราะห์เงิน..... 111
5.6	ผลของปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในน้ำเสีย สังเคราะห์เงิน..... 118
5.7	ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก..... 123
5.8	ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง..... 131
5.9	ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง..... 132
5.10	ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง..... 133

## สารบัญตาราง

ฎ

ตารางที่		หน้า
5.11	ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง.....	134
5.12	ผลของปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง.....	146
5.13	ผลของปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง.....	147
5.14	ผลของปริมาณสารโพลีเมอร์ประจุบวกต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง.....	153
5.15	ผลของปริมาณสารโพลีเมอร์ประจุบวกต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง.....	154
5.16	ผลของปริมาณสารโพลีเมอร์ประจุบวกต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง.....	155
5.17	ผลของปริมาณสารโพลีเมอร์ประจุบวกต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง.....	156
5.18	ลักษณะน้ำเสียซีโอดีของงานวิจัยนี้ก่อนและหลังบำบัด.....	159
5.19	สรุปค่าใช้จ่ายในการกำจัดโลหะหนักต่างๆ ในน้ำเสียซีโอดี.....	162
5.20	ค่าใช้จ่ายสำหรับการใช้บริการศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ.....	164

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

ฐ

รูปที่	หน้า
3.1	ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักบางชนิดที่ระดับพีเอชต่างๆ..... 5
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลาย กับความสามารถในการละลาย ของโลหะไฮดรอกไซด์..... 12
3.3	แสดงความสามารถในการละลายของโลหะซัลไฟด์..... 16
3.4	ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะซัลไฟด์เปรียบเทียบกับ โลหะไฮดรอกไซด์..... 19
3.5	แสดงคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ละลายน้ำ คุณสมบัติที่ทำให้ละลายน้ำคือ -NH-CS <sub>2</sub> Na, -SNa..... 32
3.6	เมื่อจับโลหะหนักสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์จะสูญเสียความสามารถ ในการละลายน้ำจึงเกิดฟลอค..... 32
3.7	การเติมโคแอกกูแลนต์ เช่น FeCl <sub>3</sub> หรือ Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (สารส้ม) ทำให้คีเลตติ้งโพลีเมอร์ มีการจับโลหะหนัก (จากโคแอกกูแลนต์) มากขึ้นฟลอคเพิ่มขึ้น ผลึกของ Fe(OH) <sub>3</sub> หรือ Al(OH) <sub>3</sub> ช่วยทำให้เกิดฟลอคได้ดียิ่งขึ้น..... 32
3.8	สายยาวของโพลีเมอร์ที่ตกผลึกพันกันเป็นกลุ่ม ทำให้เกิดฟลอคดียิ่งขึ้น..... 33
3.9	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทโดยวิธีการตกตะกอน..... 36
3.10	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมประจุบวกสาม..... 37
3.11	แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมประจุบวกหก..... 37
3.12	แสดงกลไกการตกผลึกเงิน..... 43
3.13	แสดงผลของการกำจัดเงินโดยใช้สาร SRP..... 44
3.14	กราฟไตเตรชันระหว่างน้ำ DI และอีโปฟลอค 1: 100 หรือเข้มข้น 12 กรัม/ลิตร..... 49
3.15	กราฟไตเตรชันของอีโปฟลอคในการกำจัดตะกั่วเข้มข้น 20 มก./ล. ในน้ำ DI..... 49
4.1	วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 1 เป็นการทำการกราฟไตเตรชัน..... 53
4.2	วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อ ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละประเภท..... 55
4.3	วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อ ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง..... 56
4.4	วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 3 เป็นการศึกษาหาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละประเภท..... 59

รูปที่	หน้า	
4.5	วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 3 เป็นการศึกษาหาปริมาณสารคลอโรฟิลล์เมออร์ ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง.....	60
4.6	วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 4 เป็นการศึกษาหาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง.....	61
5.1	กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	68
5.2	กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	71
5.3	กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์เงินที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	73
5.4	กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็กที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	76
5.5	กราฟไตเตรชันของน้ำเสียซีโอดีที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	79
5.6	ความลาดชันช่วงแรกและช่วงที่สองของกราฟไตเตรชันในน้ำเสียซีโอดี.....	81
5.7	ความลาดชันช่วงแรกของกราฟไตเตรชันในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทและเงิน.....	81
5.8	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท.....	84
5.9	ค่าพีเอชและไออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอช เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท.....	85
5.10	ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท.....	86
5.11	ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท.....	87
5.12	ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท.....	88
5.13	ลักษณะการตกตะกอนหลังเติมสารโพลิเมออร์ประจุบวก (3 มก./ล.) และทิ้งให้ ตกตะกอน 30 นาทีในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย สังเคราะห์ปรอท.....	90
5.14	ค่าปรอทที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท.....	91
5.15	ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท.....	91

## สารบัญรูป

ผ

รูปที่	หน้า
5.16	ค่าพีเอชและไออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท..... 94
5.17	ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท..... 95
5.18	ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท..... 95
5.19	ค่าปรอทที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท..... 97
5.20	ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท..... 97
5.21	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม..... 100
5.22	ค่าพีเอชและไออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม..... 100
5.23	ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม..... 101
5.24	ลักษณะของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นหลังเติมคีเลตติ้งโพลีเมอร์ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม..... 102
5.25	ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม..... 102
5.26	ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม..... 104
5.27	ลักษณะการตกตะกอนหลังเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวก (3 มก./ล.) และทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม..... 104
5.28	ค่าโครเมียมที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม..... 105

## สารบัญรูป

ณ

รูปที่	หน้า
5.29	ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม..... 105
5.30	ค่าพีเอชและไออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม..... 108
5.31	ค่าโครเมียมที่สภาวะต่าง ๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม..... 109
5.32	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับปรับค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลองของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน..... 112
5.33	ค่าพีเอชและไออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน..... 112
5.34	ของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน..... 113
5.35	ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน..... 114
5.36	ลักษณะการตกตะกอนหลังเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวก (3 มก./ล.) และทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาทีในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน..... 115
5.37	ค่าเงินที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน..... 115
5.38	ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน..... 116
5.39	ค่าพีเอชและไออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน..... 119
5.40	ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน..... 119
5.41	ค่าเงินที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน..... 121



รูปที่	หน้า
5.42	ประสิทธิภาพการกำจัดเงินในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณ สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน..... 121
5.43	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับปรับค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง ของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก..... 124
5.44	ค่าพีเอชและไออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอช เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก..... 124
5.45	ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอช เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก..... 124
5.46	ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก..... 126
5.47	ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก..... 126
5.48	ลักษณะการตกตะกอนหลังเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวก (3 มก./ล.) และทิ้งให้ ตกตะกอน 30 นาทีในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก..... 127
5.49	ค่าเหล็กที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก..... 127
5.50	ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก..... 128
5.51	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับปรับค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง ของน้ำเสียซีไอดีเจือจาง..... 135
5.52	ค่าพีเอชและไออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีไอดีเจือจาง..... 135
5.53	ของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีไอดีเจือจาง..... 137
5.54	ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีไอดีเจือจาง..... 138

## สารบัญรูป

ต

รูปที่	หน้า
5.55	ค่าปรอทที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จาง..... 139
5.56	ค่าโครเมียมที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จาง..... 141
5.57	ค่าเงินที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จาง..... 142
5.58	ค่าเหล็กที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จาง..... 143
5.59	ค่าพีเอชและไออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จาง..... 148
5.60	ของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จาง..... 148
5.61	เปรียบเทียบของแข็งแขวนลอยทั้งหมดกับประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสีย ซีไอดีเจ็จาง..... 148
5.62	ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันปริมาณคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จาง..... 149
5.63	ค่าปรอทในสภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณ สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จาง..... 151
5.64	ค่าเงินในสภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณ สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จาง..... 151
5.65	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและเงินในน้ำเสียซีไอดีเจ็จางที่ปริมาณ สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ต่างๆ..... 151
5.66	ของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณ สารโพลีเมอร์ประจุบวกของน้ำเสียซีไอดีเจ็จาง..... 157
5.67	ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียซีไอดีที่สภาวะเหมาะสม..... 162

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันโลหะหนักได้เข้ามามีบทบาทในการประกอบกิจการต่างๆ โดยเฉพาะการนำโลหะหนักมาใช้ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานชุบโลหะ โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โรงงานผลิตแบตเตอรี่ เป็นต้น และน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานเหล่านี้มีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในปริมาณมาก ทางรัฐบาลจึงได้มีการออกกฎหมายเพื่อควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิด ก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ซึ่งมักใช้บังคับกับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโรงงานอุตสาหกรรมปล่อยมลพิษออกมาปริมาณมากและส่งผลกระทบต่อได้รุนแรงกว่า ส่วนน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมียังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานและข้อบังคับออกมาใช้กันอย่างจริงจัง ทั้งนี้อาจมองว่าน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการปล่อยน้ำทิ้งออกมาปริมาณน้อย และถูกเจือจางเมื่อไหลรวมกับน้ำทิ้งจากอาคารบ้านเรือนที่มีน้ำเสียปริมาณมากกว่าหลายเท่าตัว แต่ในความเป็นจริงพบว่าห้องปฏิบัติการทั้งของราชการ สถาบันการศึกษาหรือเอกชนก็ตามที่มีการทดสอบหรือวิเคราะห์ทั้งทางด้านฟิสิกส์ เคมี และชีววะ มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถ้ายังไม่มีการกำหนดมาตรฐานขึ้นมาควบคุมอาจส่งผลกระทบต่อได้รุนแรงได้ในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีทดสอบและวิเคราะห์ต่างๆ ที่มีการใช้ สารเคมีที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบในปริมาณสูง เช่น การวิเคราะห์หาปริมาณความต้องการออกซิเจนของน้ำเสียในห้องปฏิบัติการ โดยใช้สารเคมีในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำหรือที่เรียกว่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand; COD) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ใช้กันมากโดยเฉพาะงานด้านสิ่งแวดล้อม น้ำทิ้งภายหลังการวิเคราะห์หรือน้ำเสีย ซีโอดีมีค่าพีเอชต่ำมาก (<1) และมีความเข้มข้นของโลหะหนัก ได้แก่ ปรอท โครเมียม เงิน และเหล็กอยู่ในปริมาณสูง และเมื่อน้ำที่มีโลหะหนักเหล่านี้ปะปนอยู่ถูกปล่อยทิ้งลงไปปนเปื้อนในแหล่งน้ำสาธารณะก็จะทำให้โลหะหนักเหล่านี้กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมและจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นปัญหาอย่างมากกับสุขภาพและอนามัยของมนุษย์และสัตว์ โดยจะมีการถ่ายทอดการสะสมของสารพิษเป็นทอดๆ (Bioaccumulation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งปรอทซึ่งจะเป็นตัวที่ก่อให้เกิดปัญหาสำคัญ ดังเช่นที่เคยเกิดขึ้นในประเทศญี่ปุ่นซึ่งเกิดกับคนที่รับประทานอาหารจำพวกปลาและหอยที่มีสารประกอบปรอทเจือปนอยู่ทำให้เกิดโรคที่เรียกว่า “มินามาตะ” (Minamata Diseases) ผลจากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้มีผู้ได้รับอันตรายถึงประมาณ 1,000 – 3,500 คน

กระบวนการที่นิยมใช้กันทั่วไปในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย คือ กระบวนการตกผลึกโลหะหนักและแยกออกจากน้ำเสีย โดยเฉพาะการตกผลึกโลหะหนักด้วยไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้

กันแพร่หลายมากที่สุด อีออนโลหะต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียล้วนสามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ โดยการตกผลึกเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ แต่ผลึกไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักแต่ละชนิดจะละลายน้ำได้น้อยที่สุดที่พีเอชช่วงหนึ่งแต่ถ้าพีเอชมีค่ามากหรือน้อยกว่าช่วงดังกล่าวโลหะก็จะกลับมาละลายเพิ่มขึ้นอีก จึงพบเสมอว่าวิธีตกผลึกแบบนี้ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักทุกชนิดออกจากน้ำเสียได้พร้อมๆ กัน ส่วนการตกผลึกซัลไฟด์สามารถกำจัดโลหะหนักหลายชนิดได้พร้อมกัน (ไม่ขึ้นกับค่าพีเอชมากนัก) ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบกว่าการใช้ไฮดรอกไซด์ แต่แม้ว่าการตกผลึกโลหะซัลไฟด์ด้วยเกลือซัลไฟด์ เช่น โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) มีข้อดีหลายประการเหนือกว่าการตกผลึกด้วยไฮดรอกไซด์หรือสารอื่น แต่ผลึกโลหะซัลไฟด์มีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถแยกออกจากน้ำเสียโดยวิธีตกตะกอนหรือวิธีการกรอง ดังนั้นการกำจัดโลหะหนักด้วยเกลือซัลไฟด์จึงใช้ไม่ได้ผลในทางปฏิบัติ ต่อมาจึงมีความพยายามเปลี่ยนมาใช้สารประกอบซัลไฟด์รูปต่างๆ เช่น เหล็กซัลไฟด์ ( $\text{FeS}$ ) ซึ่งสามารถสร้างฟล็อกของผลึกโลหะซัลไฟด์ที่มีขนาดใหญ่สามารถตกตะกอนและกรองได้ แต่การใช้เหล็กซัลไฟด์มีความยุ่งยากในการป้อนเข้าระบบประกอบกับเหล็กซัลไฟด์หาซื้อได้ยาก ดังนั้นต่อมาจึงได้มีการนำสารประกอบอินทรีย์ประเภทไธโอคาร์บาเมต (Thiocarbamate) ซึ่งเป็นสารเอไมด์ (Amide) ที่มีซัลไฟด์ในการกำจัดโลหะหนักโดยอาศัยปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) มาใช้ เนื่องจากปฏิกิริยาคีเลชันมีข้อดีคือ เป็นปฏิกิริยาเคมีที่สร้างสารประกอบเชิงซ้อนโดยการจับอีออนของโลหะให้ละลายอยู่ในน้ำโดยไม่เกิดการตกผลึกและทำให้โลหะคงอยู่ในรูปสารละลายโดยไม่เป็นพิษ และเป็นสารประกอบที่คงตัว (โลหะไม่หลุดออกได้โดยง่าย) ดังนั้นโลหะหนักจะรวมตัวกับไธโอคาร์บาเมตเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งไม่สามารถตกตะกอนได้ จึงต้องแยกโลหะหนักออกจากสารเชิงซ้อนดังกล่าวด้วยวิธีสกัดโลหะหนักด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีเช่นนี้ไม่สามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียในทางปฏิบัติได้ ต่อมาจึงมีโรงงานเคมีบางแห่งได้ผลิตสารเคมีเชิงพาณิชย์ซึ่งเป็นสารโพลีเมอร์ที่มีองค์ประกอบของไธโอคาร์บาเมต (-SH) หรือไธโอคาร์บอเนต ( $-\text{CS}_3$ ) ในชื่อทางการค้าต่างๆ เช่น Epofloc, Thiram, Methyl Red, Thio Red เป็นต้น และจากการทดลองใช้สารเหล่านี้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ พบว่าสารเคมีเหล่านี้มีข้อได้เปรียบที่น่าสนใจหลายอย่าง เช่น หลังจากจับกับโลหะหนักแล้วเกิดเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย และใช้ได้ในพื้นที่กว้าง เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักโดยการใช้อนุภาคโพลีเมอร์ (สารโพลีเมอร์ที่มีกลุ่มไธโอคาร์บาเมต) โดยอาศัยปฏิกิริยาคีเลชัน โดยทำการทดลองกับน้ำเสียซีไอดี เนื่องจากน้ำเสียซีไอดีมีปริมาณโลหะหนักอยู่หลายชนิดและมีอยู่ในปริมาณสูง เพื่อนำผลจากการทดลองนี้ไปประยุกต์และพัฒนาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการหรือน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ที่มีโลหะหนักปนเปื้อนได้ในอนาคต

## บทที่ 2

### วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

#### 2.1 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีใช้คีเลตติ้งโพลีเมอร์ในการกำจัดโลหะหนักออกจากร้ำเสียซีโอดีเจือจาง
2. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักออกจากร้ำเสียซีโอดีเจือจางโดยใช้คีเลตติ้งโพลีเมอร์
3. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักออกจากร้ำเสียซีโอดีเจือจางโดยใช้คีเลตติ้งโพลีเมอร์
4. ประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัดโลหะหนักออกจากร้ำเสียซีโอดีเจือจางโดยใช้คีเลตติ้งโพลีเมอร์

#### 2.2 ขอบเขตการวิจัย

1. งานวิจัยนี้ทำการทดลองกับร้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักแตกต่างกัน 4 ชนิด (วิธีเตรียมร้ำเสียสังเคราะห์ดูในภาคผนวก ข.) และร้ำเสียจริงจากการวิเคราะห์ซีโอดี โดยร้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการทดลองมีดังนี้

- ร้ำเสียสังเคราะห์ปรอท
- ร้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม
- ร้ำเสียสังเคราะห์เงิน
- ร้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก

ส่วนร้ำเสียจริงจากการวิเคราะห์ซีโอดี จะนำมาทำการเจือจาง 10 เท่าด้วยร้ำประปา (อัตราการเจือจางที่เลือก ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นดูในภาคผนวก ก.) ซึ่งร้ำเสียจริงที่ใช้รวบรวมจากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพร้ำ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. การทดลองนี้ทำการศึกษาในชุดการทดลองแบบจาร์ทดสอบ
3. สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทไฮโอคาร์บาเมตที่ผลิตขึ้นเป็นการค้า
4. เมื่อทราบสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักออกจากร้ำเสียซีโอดีด้วยสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์แล้ว จึงนำมาประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัดร้ำเสียดังกล่าว

### บทที่ 3

#### ทบทวนเอกสาร

ถึงแม้ว่าการลดการเกิดน้ำเสียที่แหล่งกำเนิดเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการจัดการน้ำเสียเพื่อป้องกันปัญหามลพิษทางน้ำและสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามก็ต้องมีน้ำเสียจำนวนหนึ่งที่ถูกระบายทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมอยู่ดี โดยเฉพาะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือแหล่งกำเนิดน้ำเสียอื่นๆ ที่มีโลหะหนักต่างๆ ปนเปื้อนออกมาด้วย เช่นโรงงานชุบโลหะ น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีต่างๆ เป็นต้น ซึ่งน้ำเสียดังกล่าวยากต่อการบำบัดและการทำลาย นอกจากนี้ถ้าน้ำเสียดังกล่าวถูกระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมย่อมเป็นเหตุให้มีอันตรายเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมและเป็นปัญหาสาธารณสุขอย่างมาก วิธีการบำบัดมีอยู่หลากหลายวิธีด้วยกัน เช่นการบำบัดทางเคมี ฟิสิกส์หรือชีววิทยาซึ่งในบางกระบวนการอาจใช้ประโยชน์จากของเสียที่เกิดขึ้นได้โดยการนำกลับมาใช้อีกและยังเป็นการช่วยลดปริมาณของเสียได้อีกด้วย วิธีการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีโลหะหนักปนเปื้อนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

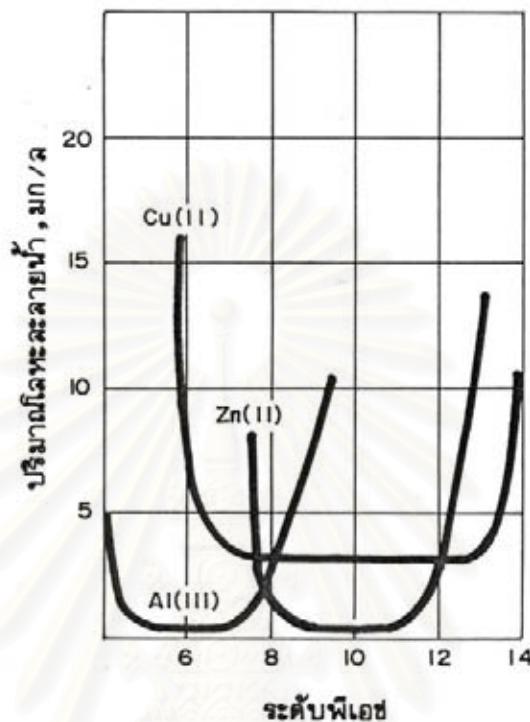
#### 3.1 เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก

ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีโลหะหนักอยู่นั้น สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกันดังต่อไปนี้

**3.1.1 การตกตะกอนผลึก** เป็นการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปในน้ำเสียเพื่อทำให้อิออนประจุบวกและลบรวมกันเป็นตะกอนผลึกที่ไม่ละลายน้ำ เช่น อีออนตะกั่ว ( $Pb^{+2}$ ) ในน้ำเสียร่วมกับไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ ) จะเกิดปฏิกิริยาสร้างตะกอนผลึกกลายเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์ หรือ  $Pb(OH)_2$  ซึ่งไม่ละลายน้ำ วิธีนี้ต่างกับวิธีโคแอกกูเลชันซึ่งเป็นการเติมสารเคมีเพื่อช่วยให้โลหะหนักต่างๆ ที่เป็นคอลลอยด์หรืออนุภาคขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นฟลอคขนาดใหญ่

โลหะหนักจะเป็นปัญหาเฉพาะกับน้ำเสียที่มีพีเอชต่ำเนื่องจากโลหะหนักสามารถละลายน้ำได้ดีที่พีเอชต่ำ การเพิ่มพีเอชจะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักลดลง โลหะหนักแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการละลายน้ำแตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.1 ส่วนใหญ่แล้วโลหะหนักจัดเป็นสาร Amphoteric กล่าวคือ โลหะหนักละลายน้ำได้น้อยที่สุดที่พีเอชช่วงหนึ่ง เช่นตามรูปที่ 3.1 Zn ละลายน้ำได้น้อยที่สุดที่พีเอชประมาณ 8 - 11 แต่ Zn จะละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่อ

พีเอชมีค่าสูงกว่า 11 หรือต่ำกว่า 8 ปฏิกริยาที่ทำให้โลหะหนักกลายเป็นตะกอนผลึกนี้เรียกว่า ปฏิกริยาสร้างตะกอนผลึก



รูปที่ 3.1 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักบางชนิดที่ระดับพีเอชต่างๆ (มันลิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

การเพิ่มพีเอชให้น้ำเสียเพื่อกำจัดโลหะหนักด้วยปฏิกริยาสร้างตะกอนผลึกสามารถกระทำได้โดยการเติมสารเคมีประเภทเบสหรือต่างเช่น โซดาไฟหรือปูนขาวให้กับน้ำเสีย ปริมาณปูนขาวหรือโซดาไฟที่ต้องใช้อาจคำนวณคร่าวๆ ได้จากสมการเคมีของปฏิกริยาสร้างตะกอนผลึก นอกจากนั้นการสร้างตะกอนผลึกอาจทำได้โดยการใช้สารประกอบซัลไฟด์ เช่น  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{NaHS}$  ทำปฏิกริยากับโลหะหนัก ข้อดีของการสร้างตะกอนผลึกกับซัลไฟด์คือไม่ขึ้นอยู่กับพีเอช แต่อย่างไรก็ตาม ตะกอนซัลไฟด์ของโลหะหนักมักมีขนาดเล็กและเกิดฟล็อกเล็กมากทำให้ตกตะกอนได้ยาก นอกจากนี้ปฏิกริยาที่เกิดจากสารประกอบซัลไฟด์อาจทำให้เกิดก๊าซพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังนั้นการกำจัดโลหะหนักด้วยปูนขาวหรือโซดาไฟจึงยังคงได้รับความนิยมมากกว่าการใช้สารเคมีตัวอื่นๆ (มันลิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

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

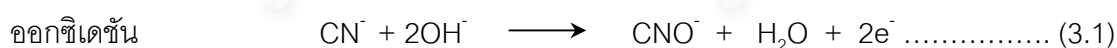
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หมายถึงปฏิกิริยาเคมีที่มีการให้และรับอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) ในขณะที่ปฏิกิริยากรด-ด่าง หมายถึงปฏิกิริยาเคมีที่มีการให้หรือรับโปรตอนหรือ  $H^+$  อันที่จริงแล้วการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพทุกแบบรวมทั้งแบบเคมีบางชนิดเกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (บางครั้งเรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือ Redox ซึ่งเป็นคำย่อของปฏิกิริยา) (มันลิน ตันทูลเวศม์, 2542)

ในขณะที่ปฏิกิริยากรด-ด่างเกี่ยวข้องกับสารละลายต่าง (เช่น โซดาไฟ ปูนขาว โซดาแอช เป็นต้น) และสารละลายกรด (เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน เป็นต้น) การวัดค่าความเป็นกรด-ด่างกระทำได้ด้วยค่าพีเอช ส่วนการวัดปฏิกิริยารีดอกซ์ก็สามารถทำได้โดยใช้ค่าโออาร์พี (ORP) ถ้าวัดค่าโออาร์พีได้เป็นบวกแสดงว่าสารละลายอยู่ในสภาวะออกซิเดชัน แต่ถ้าวัดค่าโออาร์พีได้เป็นลบแสดงว่าสารละลายอยู่ในสภาวะรีดิวซ์ซึ่งพร้อมจะมอบอิเล็กตรอนให้กับสารรับอิเล็กตรอนที่จะเติมเข้าไป ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในขณะที่พีเอชใช้เป็นพารามิเตอร์ในการควบคุมปริมาณสารละลายกรด-ด่างได้ ค่าโออาร์พีก็เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมปริมาณสาร Oxidizing หรือ Reducing ได้เช่นกัน สารเคมีที่มักนำมาใช้มีดังนี้

- สารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidant) ได้แก่ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน รูปแบบต่างๆ ต่างทับทิม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โครเมต และไนเตรต
- ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reductant) ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เหล็กซัลเฟต และเกลือซัลไฟต์

ตัวอย่างการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ได้แก่ การกำจัดไซยาไนด์ ( $CN^-$ ) และการกำจัดโครเมียม ( $Cr^{+6}$ ) ซึ่งใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

- การกำจัดไซยาไนด์เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของ  $CN^-$  ดังนี้



สมการ (3.1) เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันเพราะ  $CN^-$  กลายเป็น  $CNO^-$  และสร้างหรือให้อิเล็กตรอน จึงถือว่า  $CN^-$  เป็น  $e^-$  donor และเรียก  $CN^-$  ว่าเป็น Reducing Agent (R.A.)

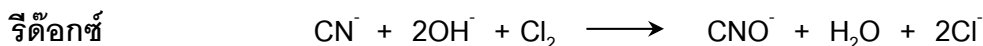
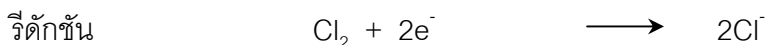
- การกำจัดโครเมียมเป็นปฏิกิริยารีดักชันของโครเมียม +6 หรือ  $Cr^{+6}$  ดังนี้



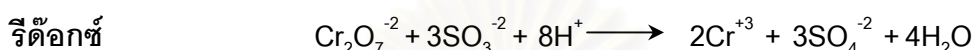
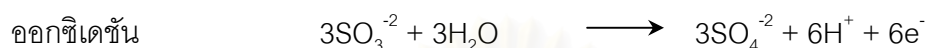
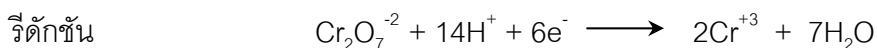
สมการ (3.2) เป็นปฏิกิริยารีดักชันเพราะ  $Cr_2O_7^{-2}$  เป็นสารรับอิเล็กตรอนและกลายเป็น  $Cr^{+3}$   $Cr_2O_7^{-2}$  จึงเป็น Oxidizing Agent (O.A.)

สมการทั้งสองข้างบนเป็นสมการครึ่งปฏิกิริยา (Half Reaction) เท่านั้น ยังไม่ได้เป็นสมการรีด็อกซ์ที่สมบูรณ์ นั่นคือ อิเล็กตรอนที่ได้จากสมการ (3.1) จะต้องมีสารมารับจึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยารีด็อกซ์ได้สมบูรณ์ สมการ (3.1) จึงต้องการ Half Reaction ที่เป็นรีดักชันมาควบคุมด้วยจึงจะเป็นสมการรีด็อกซ์ที่สมบูรณ์





ส่วนสมการ (3.2) นั้นต้องการ Half Reaction ที่เป็นออกซิเดชันมาควบคู่ด้วยจึงจะเป็นสมการรีด็อกซ์ ที่สมบูรณ์



ทำย่นี่สรุปได้ว่า ในกรณีที่ต้องการกำจัดมลพิษที่ละลายอยู่ในน้ำ แต่ไม่สามารถใช้วิธีสร้างตะกอนผลึกได้ ก็อาจใช้กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชันเปลี่ยนมลพิษให้เป็นสารที่มีความเป็นพิษน้อยลงและสามารถกำจัดได้ง่ายขึ้น กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ได้แก่การเติมสารเคมีซึ่งอาจเป็น Oxidant หรือ Reductant อย่างใดอย่างหนึ่งไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันกับสารมลพิษทำให้ได้ผลปฏิกิริยาเป็นสารที่ไม่สร้างปัญหา (มันลิน ตันซูลเวศม์ และมันรักษ์ ตันซูลเวศม์, 2545)

### 3.1.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange)

ในกรณีที่ไม่ต้องการใช้วิธีสร้างตะกอนผลึกเพื่อกำจัดโลหะหนักต่างๆ อาจใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแทนได้ วิธีนี้ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบรรจุอยู่ในถังและปล่อยให้ น้ำเสียไหลผ่าน โลหะต่างๆ ในน้ำเสียจะอยู่ในรูปของไอออนที่มีประจุบวก เช่น  $\text{Cr}^{+3}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$  เป็นต้น และจะถูกแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระที่จับอยู่กับหมู่ไอออน (Functional Group) ของเรซิน น้ำที่ผ่านถังเรซินจึงปราศจากโลหะหนักเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อย มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงแต่มีข้อจำกัดคือ น้ำที่ผ่านเข้าถังเรซินควรเป็นน้ำใสที่มีความขุ่นหรือตะกอนแขวนลอยหรือก๊าซละลายน้ำหรือน้ำมันลอยอยู่น้อยที่สุดเพราะสารมลทินต่างๆ ดังกล่าวทำให้อายุของเรซินสั้นกว่าที่ควรจะเป็นจึงต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน นอกจากนี้วิธีนี้จะแพงดูแลบำรุงรักษายากและหลังจากใช้งานสักระยะหนึ่งประสิทธิภาพจะต่ำลงต้องมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพ (regeneration) ให้เรซินที่หมดอำนาจไปแล้วกลับฟื้นตัวขึ้นมาใช้อำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนใหม่อีก สารเคมีที่ใช้เติมไอออนอิสระให้กับเรซินที่เสื่อมอำนาจไปแล้วเรียกว่า สารรีเจนเนอแรนต์ (Regenerant) ตัวอย่างของสารรีเจนเนอแรนต์ ได้แก่ NaCl ซึ่งใช้เติม  $\text{Na}^+$  หรือ  $\text{Cl}^-$  ให้กับเรซิน หรือ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ซึ่งใช้เติม  $\text{H}^+$  ให้กับเรซิน เป็นต้น และได้ น้ำที่มีความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักสูงมาก อาจนำกลับมาใช้ใหม่หรือกำจัดด้วยวิธีอื่นต่อไป

**3.1.4 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)** เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีดูดติดผิวด้วยถ่าน ซึ่งถ่านที่ใช้เป็นถ่านพิเศษเรียกว่า ถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมาก มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูงเมื่อมีการสัมผัสกับน้ำเสียจะทำให้โลหะหนักต่างๆ ในน้ำถูกจับไว้ในช่องรูพรุนต่างๆ ทำให้น้ำทิ้งสะอาด แต่เมื่อถ่านกัมมันต์ถูกใช้งานไปนานๆ รูพรุนของถ่านกัมมันต์จะอุดตันด้วยโมเลกุลของโลหะต่างๆ ทำให้หมดประสิทธิภาพในการดูดติดผิว ซึ่งอาจจะสังเกตได้จากสี กลิ่น หรือโดยการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่ต้องการกำจัดก่อนและหลังผ่านระบบบำบัด ถ้าปริมาณโลหะในน้ำทิ้งหลังการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกับก่อนการบำบัด ก็แสดงว่าระบบหมดขีดความสามารถแล้ว ในกรณีเช่นนี้ต้องมีการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ หรือเปลี่ยนใหม่ (สวสท., 2540)

**3.1.5 อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)** เป็นกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยจะลดออกซิเจนโลหะหนักในน้ำเสียให้เปลี่ยนเป็นธาตุเกาะที่ขั้วคาโทด ทำให้สามารถแยกโลหะหนักออกมาได้

### 3.1.6 การปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยกรดหรือด่าง

เป็นการปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยกรดหรือด่างแล้วแต่กรณีเพื่อที่จะทำให้ค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่สามารถปล่อยทิ้งลงแหล่งน้ำสาธารณะได้ ซึ่งอาจทำให้โลหะหนักชนิดต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียนั้นทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ใส่เข้าไปเพื่อปรับพีเอชน้ำเสียและสามารถทำให้โลหะหนักชนิดต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียตกตะกอนผลึกและสามารถแยกออกมาน้ำเสียได้ ถ้าที่พีเอชนั้นๆ มีความเหมาะสมต่อการเกิดตะกอนผลึกระหว่างออกซิเจนของโลหะชนิดนั้นๆ กับออกซิเจนของสารที่ใช้ปรับพีเอชที่เติมเข้าไป โดยน้ำเสียที่เป็นกรดจะใช้ปูนขาว โซดาไฟ หรือโซดาแอช ในการปรับพีเอช ปูนขาว มีข้อดีที่ราคาถูกกว่าตัวอื่นๆ และทำให้เกิดตะกอนของสารบางชนิดด้วย แต่มีข้อเสียตรงที่ปริมาณสลัดจ์มีค่อนข้างมากและอาจทำให้เกิดตะกอนในเส้นท่อได้ ถ้าใช้ปูนขาวในรูปของน้ำตะกอน (Slurry) ในขณะที่ใช้งานจะต้องมีการกวาดตลอดเวลา เพราะถ้าหยุดกวาดเมื่อใดก็จะตกตะกอนทันที น้ำเสียที่เป็นด่างจะทำให้เป็นกลางด้วยกรดแก่ เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก หรือด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ระบบการปรับค่าพีเอชนั้นประกอบด้วยถังผสม ทำหน้าที่ผสมกรดหรือด่างให้เข้ากับน้ำเสีย ถังพักทำหน้าที่ให้ปฏิกิริยาระหว่างกรดหรือด่างกับน้ำเสียเกิดอย่างสมบูรณ์ที่สุด ดังนั้นผู้ควบคุมต้องคอยวัดค่าพีเอชเป็นระยะๆ หรือถ้าจะให้สะดวกก็ใช้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะควบคุมค่าพีเอชให้ได้ตามต้องการ

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมักจะไม่เป็นกลาง เช่นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเคมีผลิตกรดหรือด่าง ซึ่งน้ำเสียจากโรงงานประเภทนี้เป็นพวกสารอนินทรีย์

ดังนั้นในการกำจัดเพียงใช้วิธีการปรับพีเอชด้วยกรดหรือด่างแล้วแต่กรณีเท่านั้นเพื่อทำให้มีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 5 - 9 ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม ก็สามารถจะปล่อยทิ้งลงแหล่งน้ำได้ หรือโรงงานอุตสาหกรรมใดก็ตามที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียและโลหะหนักดังกล่าวนั้นสามารถเกิดตะกอนผลึกกับสารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอชของน้ำเสียนั้น ก็จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้โดยการตกตะกอน (สวสท., 2540)

### 3.1.7 การใช้สารเคมีในการตกตะกอน

บางครั้งหลังจากขั้นตอนการสร้างผลึกด้วยการใช้สารเคมีชนิดต่างๆ แล้ว แต่ตะกอนผลึกของโลหะต่างๆ โดยเฉพาะตะกอนผลึกของโลหะซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นมักมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือแม้แต่วิธีกรองก็ยังไม่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการที่ทำให้ผลึกเหล่านี้รวมกันเป็นอนุภาคใหญ่และมีน้ำหนักพอที่จะสามารถจมตัวได้ วิธีการดังกล่าวคือการเติมสารเคมีบางชนิดเพิ่มเข้าไปเพื่อเป็นตัวประสานให้อนุภาคขนาดเล็กมาจับตัวกันช่วยรวมตะกอนและทำให้ตะกอนของโลหะนั้นๆ มีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนลงสู่ก้นถังตกตะกอนได้ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกก็จะช่วยให้การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งที่กล่าวมาข้างต้นการทำให้อนุภาคเล็กๆ จับตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ด้วยสารเคมีนี้เรียกว่า เคมีคัลโคแอกกูเลชัน (chemical coagulation) สารเคมีที่ใช้เรียกว่า โคแอกกูแลนต์หรือฟลอคกูแลนต์ ที่รู้จักกันดีและใช้โดยทั่วไปได้แก่ สารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14.3 \text{ H}_2\text{O}$ ) เพอริคคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) โพลีอะลูมินัมคลอไรด์ (PACl) ปูนขาว นอกจากนี้ยังมีสารโพลีเมอร์อีก 3 ชนิดคือ โพลีเมอร์ประจุบวก (Cationic Polymer) โพลีเมอร์ประจุลบ (Anionic Polymer) และโพลีเมอร์ไม่มีประจุ (Non Ionic Polymer) ดังนั้นสรุปว่าผลของการทำเคมีคัลโคแอกกูเลชันคือ ทำให้ตะกอนหรืออนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียตกตะกอนได้ภายในระยะเวลาอันสั้น (เช่น 30 นาที) ทำให้ได้น้ำใส

ในการทำโคแอกกูเลชัน เมื่อเติมสารเคมีลงไปลงในน้ำเสียจะต้องกวนให้สารเคมีผสมไปในน้ำอย่างรวดเร็วทันที เพื่อให้สารเคมีนั้นกระจายไปได้ทั่ว เมื่อเกิดอนุภาคเล็กๆ ลักษณะเหนียวหยุ่นซึ่งเรียกว่าฟลอค ที่มองเห็นได้ชัดจะต้องเปลี่ยนจากการกวนอย่างรวดเร็วมาเป็น การกวนอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้ฟลอคที่เกิดขึ้นแตกกระจาย และเพื่อให้ฟลอคที่เกิดขึ้นมีโอกาสได้จับตัวกับอนุภาคหรือตะกอนขนาดเล็กหรืออนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสะเทินประจุที่ล้อมรอบแล้ว กลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มีน้ำหนักพอที่จะจมตัวแยกออกจากน้ำเสียได้ โดยทั่วๆ ไปแล้ว เวลาที่ใช้ในการกวนเร็วประมาณ  $\frac{1}{2}$  - 2 นาที และเวลาในการกวนช้าประมาณ 12 - 30 นาที

การใช้สารเคมีในการทำให้อ่อนตัวลงๆ เหล่านี้รวมตัวกันได้ดีที่สุดจะต้องมีการควบคุมค่าสภาพต่าง โดยทั่วไปใช้วัดเอาจากค่าพีเอช ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับ

โคแอกกูแลนต์ชนิดหนึ่งๆ มีค่าแตกต่างกันไป เช่นสารส้ม มีค่าพีเอชเหมาะสมอยู่ระหว่าง 6 - 7 สารประกอบเหล็ก มีค่าพีเอชเหมาะสมอยู่ระหว่าง 5 - 7 ถ้าในน้ำเสียมี่ค่าพีเอชไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวให้ปรับจนอยู่ในช่วงนั้นๆ แล้วจึงเติมสารโคแอกกูแลนต์ลงไป ซึ่งวิธีนี้จำเป็นต้องศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการโดยวิธีที่เรียกว่าจาร์เทสต์ เพื่อหาระดับพีเอช ค่าสภาพต่าง และปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมโดยให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

หลักการในการเลือกใช้กระบวนการต่างๆ อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างนั้นจะต้องพิจารณาความเหมาะสมต่างๆ ดังหัวข้อต่อไปนี้

- 1) ลักษณะของน้ำเสียก่อนบำบัด
- 2) คุณภาพของน้ำที่ต้องการ
- 3) พื้นที่ที่ต้องใช้ทั้งหมด
- 4) ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและตรวจสอบคุณภาพ
- 5) ความยากง่ายในการเดินระบบและความปลอดภัย
- 6) ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ หรือกากที่ต้องกำจัด

### 3.2 การตกตะกอนทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการทางฟิสิกส์-เคมี โดยการเปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปของสารละลายให้กลายเป็นของแข็งซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว ซึ่งจัดว่าเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปน ซึ่งอาจใช้ร่วมกับวิธีออกซิเดชัน-รีดักชันก็ได้ แต่การตกตะกอนทางเคมียังคงมีข้อจำกัดหลายประการคือ

- ต้องใช้ปริมาณสารเคมีตามค่าสตอยชิโอเมตริก
- เกิดสลัดจ์ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบสูง
- กรณีที่ต้องการลดมลสารของน้ำออกให้อยู่ในระดับหนึ่งในล้านของมลสารที่เข้าระบบ จะต้องใช้การตกตะกอนทางเคมี 2 ชั้น (two stage precipitation)
- ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้กับน้ำเสียที่มีอัตราไหลต่ำหรือไหลเป็นพักๆ

การตกตะกอนทางเคมีจะมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดอิออนที่ละลายน้ำ โดยเฉพาะโลหะหนัก เหมาะสำหรับบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมและน้ำใต้ดินที่ปนเปื้อน และสามารถใช้ในการบำบัดขั้นต้นเพื่อกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายน้ำของสารนั้นๆ สารประกอบที่นิยมใช้ในการตกตะกอนทางเคมีเพื่อกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้แก่

ไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์และคาร์บอเนต ซึ่งแต่ละชนิดจะตกตะกอนโลหะในรูปที่แตกต่างกัน การใช้สารเคมีเหล่านี้สามารถใช้แยกกันหรือใช้รวมกันได้ในปริมาณเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างโลหะหนักที่ละลายในน้ำเสียกับสารเคมีเพื่อทำให้เกิดเป็นตะกอนเคมีที่สามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการตกตะกอนและ/หรือการกรอง

เทคนิคการตกตะกอนทางเคมีสามารถแบ่งได้เป็น 6 ประเภทพื้นฐาน เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลาย ได้แก่

- Hydroxide Precipitation
- Sulfide Precipitation
- Carbonate Precipitation
- Xanthate Precipitation
- Combined Precipitation
- Sodium Borohydride Precipitation

### 3.2.1 การตกตะกอนผลึกในรูปของไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation)

ในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ โลหะหนักจะถูกกำจัดออกโดยการเติมสารที่เป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โซดาไฟ) หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปูนขาว) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นไปตามสมการที่

3.3 และ 3.4 ตามลำดับ



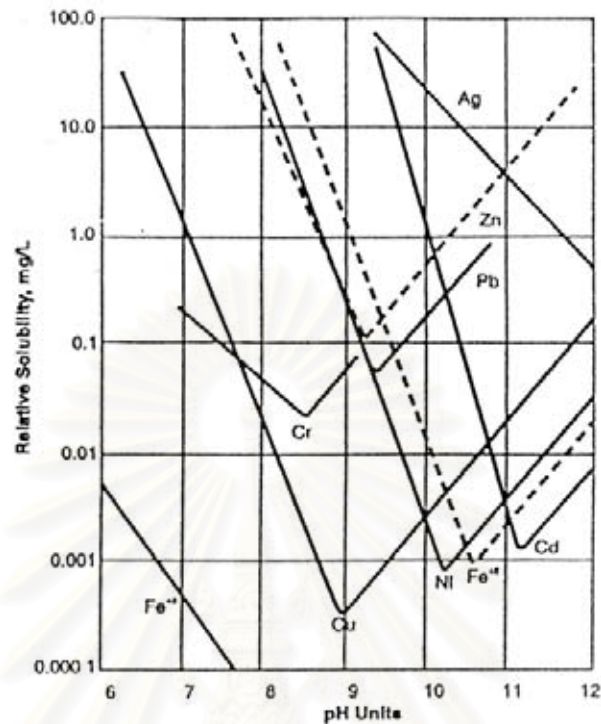
โดยที่  $M^{+2}$  คือ โลหะไอออน

การเติมสารที่เป็นด่างดังกล่าว เพื่อปรับพีเอชของน้ำเสียให้ถึงจุดที่โลหะในรูปไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการละลายต่ำสุด โดยทั่วไปความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ในสารละลายจะลดลงเมื่อปรับพีเอชเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง (isoelectric point) หลังจากนั้นโลหะจะกลับมามีความสามารถในการละลายได้อีกเพราะโลหะไฮดรอกไซด์เป็นสารพวกแอมโฟเทอริก

(amphoteric) กล่าวคือโลหะไฮดรอกไซด์จะละลายน้ำได้น้อยที่สุดที่พีเอชช่วงหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังนั้นที่ พีเอชหนึ่งความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ตัวหนึ่งอาจสูงกว่าโลหะหนักอื่น

ในเกือบทุกกรณีค่าพีเอชที่ใช้ในการทำให้โลหะตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์จะอยู่ระหว่าง 8.5 – 11 ดังนั้นค่าพีเอชที่ต้องการจึงขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตกผลึก สำหรับน้ำ

ทั้งที่มีโลหะหลายๆ ชนิดปนกันอยู่โลหะแต่ละชนิดจะละลายน้ำได้น้อยที่สุดที่พีเอชช่วงหนึ่ง ดังนั้นโลหะแต่ละชนิดจะมี



**รูปที่ 3.2** ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลาย กับ ความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ (U.S.EPA, 1980)

ช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึกที่แตกต่างกัน การที่จะกำจัดโลหะทุกตัวออกจากน้ำเสียจนได้ระดับที่เราต้องการอาจใช้การตกตะกอนผลึกอื่นที่อาจเป็นไปได้ภายหลังการตกผลึก ระดับของโลหะละลายที่เหลืออยู่จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชที่ใช้ในการตกผลึก ชนิดของโลหะที่ผสมอยู่ในน้ำเสียและความเข้มข้นของสารประกอบที่เป็นสารรบกวนเช่นสารประกอบเชิงซ้อน (complexing agents) หรือสารคีแลนท์ต่างๆ โลหะที่ตกตะกอนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์แล้วสามารถกำจัดออกได้โดยการรวมตะกอนและปล่อยให้ตกตะกอน/กรอง การตกตะกอนทางเคมีจะขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ ค่า  $K_L$  ของโลหะไฮดรอกไซด์ และค่า  $K_S$  ของ complexing agents เช่น EDTA, NTA, citrate, tartrate, gluconic acid, cyanide, ammonia เป็นต้น ส่วนประสิทธิภาพในการแยกของแข็ง/ของเหลวในระบบจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น ขนาด ความหนาแน่นของโลหะไฮดรอกไซด์ เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายต่ำและควบคุมได้ง่ายด้วยค่าพีเอช

**การเปรียบเทียบการตกตะกอนผลึกระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์**

### \* แคลเซียมไฮดรอกไซด์

แคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวผึ่งน้ำเป็นสารเคมีที่ใช้กันมากในการตกตะกอนผลึก แต่การป้อนสารละลายปูนขาวมีปัญหาเนื่องจากปูนขาวละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้ปูนขาวอยู่ในน้ำในรูปของน้ำตะกอน (Slurry) การป้อนปูนขาวต้องป้อนทั้งเนื้อและน้ำจึงต้องกวนน้ำอย่างช้าๆ ตลอดเวลา ถ้าหยุดกวนเมื่อใดก็จะตกตะกอนทันที ควรเตรียมปูนขาวให้ใช้พอเพียงในแต่ละวันเนื่องจากปูนขาวสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศได้ง่าย ปูนขาวจะมีราคาถูกกว่าโซดาไฟ แต่ปูนขาวทำให้เกิดสลัดจ์มากกว่าการใช้โซดาไฟมาก นั่นคือต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์ของปูนขาวมากกว่า แต่ถ้าพิจารณาถึงเฉพาะงานการกำจัดโลหะหนัก การใช้ปูนขาวจะทำให้ได้ตะกอนผลึกหรือฟล็อกขนาดใหญ่กว่าการใช้โซดาไฟ มักมีผลทำให้การกำจัดโลหะหนักด้วยปูนขาวได้ผลดีกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากปูนขาวทำให้เกิดฟล็อกของหินปูนหรือสารประกอบแคลเซียมอื่นๆ ที่ช่วยให้เกิด Coprecipitation ในการกำจัดโลหะหนัก

### \* โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่ยิยมใช้ในการตกตะกอนผลึกเนื่องจากการทำปฏิกิริยาเป็นไปโดยง่ายและสามารถทำปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่าปูนขาว แต่จะมีราคาแพงมากกว่า การเก็บรักษาทำได้ง่ายแต่ต้องไม่ให้เกิดความร้อน เมื่อพิจารณาในด้านการใช้งาน การป้อนโซดาไฟกระทำได้ง่ายกว่าปูนขาวมากและไม่มีปัญหาเรื่องการฟุ้งกระจายของสารเคมี ที่อาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ ดังนั้นการจะเลือกใช้ปูนขาวหรือโซดาไฟควรจะต้องพิจารณาถึงข้อดี-ข้อเสียของสาร 2 ตัวนี้ให้ครบทุกด้านและเลือกสารเคมีตัวที่เหมาะสมของเฉพาะงาน

ข้อดีและข้อเสียของการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงในตารางที่ 3.1

**Peter และคณะ (1985)** ศึกษาการตกตะกอนไฮดรอกไซด์เพื่อกำจัด Cu, Fe, Ni, Cr และ Pb ออกจากน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดจะดีขึ้นเมื่อใช้ปูนขาวหรือโซดาไฟแอสร่วมกับสารเติมซัลเฟตหรือซัลไฟด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบทองแดง/เหล็ก และได้ศึกษาถึงอิทธิพลของ complexing agents ในน้ำเสียพบว่า มีผลยับยั้งการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์

**Clifford และคณะ (1986)** ให้ข้อสังเกตว่า การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ไฮดรอกไซด์ที่มีโลหะหลายชนิดปนกันควรใช้การตกตะกอนที่ละชั้นเพราะความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์แต่ละชนิดเกิดขึ้นที่พีเอชไม่เท่ากัน

ตารางที่ 3.1 ข้อดีและข้อเสียของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ปรับปรุงจาก พวงรัตน์ แก้วล้อม, 2537)

	ปูนขาว $\text{Ca}(\text{OH})_2$	โซดาไฟ $\text{NaOH}$
<b>ข้อดี</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ราคาถูก</li> <li>2. ทำให้ได้ตะกอนผลึกหรือฟล็อกขนาดใหญ่กว่า</li> <li>3. อาจช่วยให้เกิด Coprecipitation ในการกำจัดโลหะหนัก</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า</li> <li>2. การนำมาใช้งานสะดวกกว่า</li> <li>3. เกิดตะกอนน้อย</li> <li>4. ไม่มีปัญหาเรื่องการฟุ้งกระจายของสารเคมีที่อาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้</li> </ol>
<b>ข้อเสีย</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. การเตรียมสารยุ่งยากกว่า</li> <li>2. ค่าใช้จ่ายในการบ่อนสารเคมีมีราคาสูงกว่า</li> <li>3. ถ้าน้ำเสียมีปริมาณซัลเฟตสูงจะเกิดตะกอนมาก</li> <li>4. เกิดตะกอนมากทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์มากกว่า</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ราคาแพง</li> <li>2. เสียค่าใช้จ่ายในการทำตะกอนให้แห้งมากกว่า</li> <li>3. ตะกอนกลับมาละลายในน้ำได้ อีก</li> </ol>

### 3.2.2 การตกตะกอนผลึกในรูปของซัลไฟด์ (sulfide precipitation)

การตกตะกอนด้วยซัลไฟด์ พบว่าให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ไฮดรอกไซด์ในการกำจัดโลหะหนัก แต่ข้อเสียที่เด่นชัดของการตกผลึกด้วยซัลไฟด์ได้แก่ เรื่องก๊าซพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ซึ่งมีกลิ่นเหม็นและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ข้อดีและข้อจำกัดของการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์และรูปซัลไฟด์ แสดงดังตารางที่ 3.2

US.EPA แนะนำการใช้ซัลไฟด์กำจัดโลหะหนัก 2 วิธีคือ วิธีตกผลึกด้วยซัลไฟด์ละลายน้ำ (SSP หรือ Soluble Sulfide Precipitation) และ วิธีตกผลึกด้วยซัลไฟด์ไม่ละลายน้ำ (ISP หรือ Insoluble Sulfide Precipitation) ทั้งสองวิธีแตกต่างกันตรงที่ชนิดของสารประกอบซัลไฟด์ที่เติม กล่าวคือ วิธี SSP ใช้สารประกอบซัลไฟด์ที่ละลายน้ำได้ดี เช่น โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) หรือโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{NaHS}$ ) เป็นต้น และควบคุมการเติมสารละลายซัลไฟด์ด้วยวิธี feedback control loop โดยใช้ ion specific electrodes ทำงานได้ทั้งแบบ batch และแบบต่อเนื่อง ส่วนวิธี ISP ใช้สารประกอบซัลไฟด์ที่ละลายน้ำได้น้อย เช่น เฟอรัสซัลไฟด์ ( $\text{FeS}$ ) ทำให้ต้องบ่อนแบบ Slurry (คล้ายกับการบ่อนปูนขาว) โดยเติมลงในน้ำเสีย ซึ่งจะให้ออนซัลไฟด์



ตารางที่ 3.2 ข้อดีและข้อจำกัดของการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์ (มณีรัตน์ องค์กรบรรณดี, 2542)

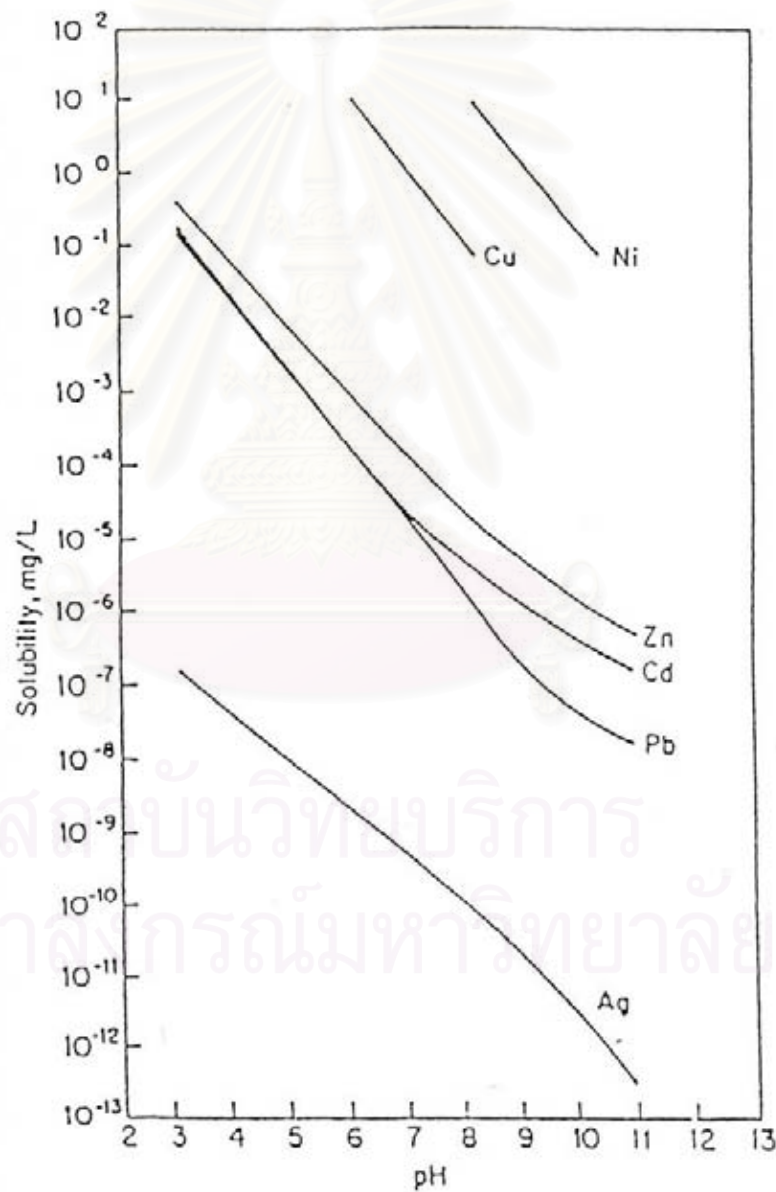
Hydroxide precipitation	Sulfide precipitation
<p><b>ข้อดี</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ง่ายต่อการควบคุมด้วยพีเอช</li> <li>- การทำงานของระบบค่อนข้างง่าย</li> <li>- ค่าสารเคมีถูก (ปูนขาว)</li> </ul> <p><b>ข้อจำกัด</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ตะกอนไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มที่จะสามารถละลายกลับได้ ถ้าพีเอชสารละลายเปลี่ยนไป</li> <li>- การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหลายชนิดปนกันจะให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดี</li> <li>- กรณีน้ำเสียมี chelating agents จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะลดลง</li> <li>- ไม่สามารถกำจัด <math>Cr^{+6}</math> ได้</li> <li>- โซเดียมไฮดรอกไซด์ จะรบกวนการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์</li> <li>- ดึงน้ำออกจากสลัดจ์ยาก เนื่องจากโครงสร้างของอนุภาคเป็น amorphous (อสัณฐาน)</li> <li>- ที่พีเอช &lt; 6 จะเกิดโลหะไฮดรอกไซด์ได้น้อย</li> <li>- ไม่เหมาะที่จะใช้กับน้ำเสียที่มีอัตราการไหลสูง และมีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลง</li> </ul>	<p><b>ข้อดี</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่ขึ้นอยู่กับพีเอช</li> <li>- ต้องการเวลากักน้ำในถังปฏิกรณ์น้อย เนื่องจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง</li> <li>- สลัดจ์ซัลไฟด์มีคุณสมบัติที่ดีกว่าในแง่การทำให้ข้น (thickening) และ การรีดน้ำออก (dewatering)</li> <li>- อิทธิพลของ chelating agents ต่อการตกตะกอนโลหะซัลไฟด์มีน้อย</li> <li>- ปริมาณสลัดจ์โลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อย</li> <li>- สามารถเลือกกำจัดโลหะที่ต้องการและ Recovery ส่วนที่เหลืออยู่ได้</li> </ul> <p><b>ข้อจำกัด</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำให้เกิดก๊าซ <math>H_2S</math></li> <li>- ปัญหาความเป็นพิษของซัลไฟด์</li> <li>- กระบวนการค่อนข้างซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อเทียบกับการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์</li> <li>- ตะกอนซัลไฟด์ของโลหะหนักมักมีขนาดเล็กและเกิดฟล็อกเล็กมากทำให้ตกตะกอนได้ยาก</li> </ul>

ที่ต้องการสำหรับตกตะกอนโลหะหนัก เนื่องจากโลหะหนักส่วนใหญ่จะละลายน้ำได้น้อยกว่าเฟอร์รัสซัลไฟด์ ดังนั้นจึงสามารถตกตะกอนเป็นโลหะซัลไฟด์

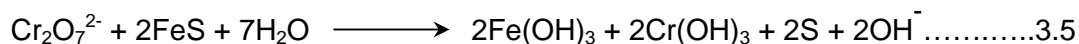
วิธี SSP สามารถปฏิบัติได้ง่าย ความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่สูงจะก่อให้เกิดการตกตะกอนโลหะซัลไฟด์อย่างรวดเร็ว (high nucleation rates) แต่มีข้อเสียคือ ผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือแม้แต่วิธีกรองก็ยังไม่ได้ในกรณีที่น้ำเสียมีสารเคมีจะทำกรตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ไม่ได้ถึงแม้จะปรับพีเอชสูงขึ้นก็ตาม แต่สามารถกำจัดโลหะหนักได้ด้วยการตกตะกอนซัลไฟด์แทน กรณีที่ไม่มีคิเลตติ้งเอเจนต์โลหะไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นเล็กน้อยที่พีเอชต่ำกว่า 6 ส่วนโลหะซัลไฟด์สามารถเกิดได้ที่ช่วงพีเอชกว้างมากตั้งแต่ 2 ถึง 12 เนื่องจากโลหะซัลไฟด์ละลายน้ำได้น้อยกว่าโลหะไฮดรอกไซด์ และเกิดสภาพมีฤทธิ์เป็นกรดหรือด่างแอมโฟเทอริคน้อยกว่าด้วย นอกจากนั้นจะเกิดสลัดจ์โลหะซัลไฟด์น้อยและ

ดึงน้ำออกได้ง่ายกว่า รูปที่ 3.3 แสดงความสามารถในการละลายของโลหะซัลไฟด์ ส่วนตารางที่ 3.3 แสดงความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ เทียบกับโลหะซัลไฟด์

ส่วนวิธี ISP นั้นสามารถสร้างผลึกที่ตกตะกอนได้ดี แต่ก็มีอุปสรรคในทางปฏิบัติ คือไม่สามารถหาซื้อ FeS ได้ง่าย และวิธีป้อน FeS เป็นปัญหามากเนื่องจากไม่ละลายน้ำ (FeS จะเตรียมจากการผสมระหว่าง  $\text{FeSO}_4$  และ NaHS) และวิธี ISP ยังมีข้อดีอีกคือไม่ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และยังสามารถกำจัดโครเมียม ( $\text{Cr}^{+6}$ ) ออกได้โดยไม่ต้องผ่านปฏิกิริยารีดักชันได้ตะกอนโครมิกไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 3.5



รูปที่ 3.3 แสดงความสามารถในการละลายของโลหะซัลไฟด์ (Freeman, 1989)



แต่ข้อเสียก็คือต้องใช้สารเคมีในปริมาณที่มากกว่าค่าสตอยชิโอเมตริกและเกิดสลัดจ์จำนวนมาก เพราะเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ อัตราการเติมเฟอร์รัสซัลไฟด์ได้จากการทำจาร์เทสต์ ซึ่งตามธรรมชาติ จะใช้ปริมาณ 2 - 4 เท่าของสตอยชิโอเมตริกทำให้สิ้นเปลืองค่าสารเคมีจำนวนมากและเกิดสลัดจ์มากด้วย

### ตารางที่ 3.3 ความสามารถในการละลายของโลหะซัลไฟด์เทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์

(Amer, 1998)

ไอออนโลหะหนัก	ความสามารถในการละลาย (มก./ล.)	
	โลหะไฮดรอกไซด์	โลหะซัลไฟด์
Cadmium ( $\text{Cd}^{+2}$ )	$2.3 \times 10^{-5}$	$6.7 \times 10^{-10}$
Chromium ( $\text{Cr}^{+3}$ )	$8.4 \times 10^{-4}$	No ppt.
Cobalt ( $\text{Co}^{+2}$ )	$2.2 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^{-8}$
Copper ( $\text{Cu}^{+2}$ )	$2.2 \times 10^{-2}$	$5.8 \times 10^{-18}$
Iron ( $\text{Fe}^{+2}$ )	$8.9 \times 10^{-1}$	$3.4 \times 10^{-5}$
Iron ( $\text{Fe}^{+3}$ )	$1.0 \times 10^{-4}$	No ppt.
Lead ( $\text{Pb}^{+2}$ )	2.1	$3.8 \times 10^{-9}$
Manganese ( $\text{Mn}^{+2}$ )	1.2	$2.1 \times 10^{-3}$
Mercury ( $\text{Hg}^{+2}$ )	$3.9 \times 10^{-4}$	$9.0 \times 10^{-20}$
Nickel ( $\text{Ni}^{+2}$ )	$6.9 \times 10^{-3}$	$6.9 \times 10^{-8}$
Silver ( $\text{Ag}^{+}$ )	13.3	$7.4 \times 10^{-12}$
Tin ( $\text{Sn}^{+2}$ )	$1.1 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-8}$
Zinc ( $\text{Zn}^{+2}$ )	1.1	$2.3 \times 10^{-7}$

ในสภาวะอิ่มตัวของสารละลายผลคูณความเข้มข้นของไอออนทั้งหมดที่แตกตัว จากของแข็ง เรียกว่า ค่าคงที่ผลคูณการละลาย (Solubility Product Constant ( $K_{sp}$ )) สารที่มีค่า  $K_{sp}$  ต้องเป็นสารที่ละลายน้ำได้ยากเท่านั้น สารที่ละลายได้ดีหรือแตกตัวได้ดีในน้ำ ไม่สามารถคำนวณ  $K_{sp}$  ได้เนื่องจากมีค่าสูงมาก ตารางที่ 3.4 แสดงค่า  $K_{sp}$  และ  $pK_{sp}$  ของโลหะไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์และคาร์บอเนตบางตัว ในทางทฤษฎีสารประกอบของโลหะหนักที่มีค่า  $K_{sp}$  ต่ำกว่า จะสามารถละลายน้ำได้น้อยกว่า (เหลือโลหะหนักน้อย) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโลหะซัลไฟด์มีความสามารถในการละลายน้ำน้อยกว่าโลหะไฮดรอกไซด์มาก ดูจากรูปที่ 3.4 ในทางปฏิบัติจึงมีผู้ใช้ สารประกอบซัลไฟด์ เช่น  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{NaHS}$  ทำปฏิกิริยากับโลหะหนักเพื่อสร้างตะกอนผลึกและข้อดี อีกประการหนึ่งคือปฏิกิริยาสร้างตะกอนผลึกกับซัลไฟด์ไม่ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช

ตารางที่ 3.4 ค่า  $K_{sp}$  และ  $pK_{sp}$  ของโลหะไฮดรอกไซด์ โลหะซัลไฟด์และโลหะคาร์บอเนต  
(มันสัน ตันทูลเวศม์, 2542)

อิออนโลหะหนัก	โลหะไฮดรอกไซด์		โลหะซัลไฟด์		โลหะคาร์บอเนต	
	$pK_{sp}$	$K_{sp}$	$pK_{sp}$	$K_{sp}$	$pK_{sp}$	$K_{sp}$
$Cd^{+2}$	13.6	$2 \times 10^{-14}$	26.1	$7.9 \times 10^{-27}$	11.3	$5 \times 10^{-12}$
$Co^{+2}$	14.8	$1.6 \times 10^{-15}$	24.7	$2 \times 10^{-25}$	12.8	$1.6 \times 10^{-13}$
$Cr^{+3}$	30.2	$6.3 \times 10^{-31}$	-	-	-	-
$Cu^{+2}$	19.7	$2 \times 10^{-20}$	35.2	$6.3 \times 10^{-36}$	9.9	$1.2 \times 10^{-10}$
$Hg^{+2}$	23.7	$2 \times 10^{-24}$	51.8	$1.6 \times 10^{-52}$	16.1	$7.9 \times 10^{-17}$
$Mn^{+2}$	12.7	$2 \times 10^{-13}$	15.2	$6.3 \times 10^{-16}$	10.7	$2 \times 10^{-11}$
$Ni^{+2}$	14.7	$2 \times 10^{-15}$	20.5	$3.2 \times 10^{-21}$	8.2	$6.3 \times 10^{-9}$
$Pb^{+2}$	14.9	$1.2 \times 10^{-15}$	27.9	$1.2 \times 10^{-28}$	13.1	$7.9 \times 10^{-14}$
$Sn^{+2}$	27.8	$1.6 \times 10^{-28}$	25.0	$1.0 \times 10^{-25}$	-	-
$Zn^{+2}$	16.9	$1.2 \times 10^{-17}$	22.8	$1.6 \times 10^{-23}$	10.8	$1.6 \times 10^{-11}$

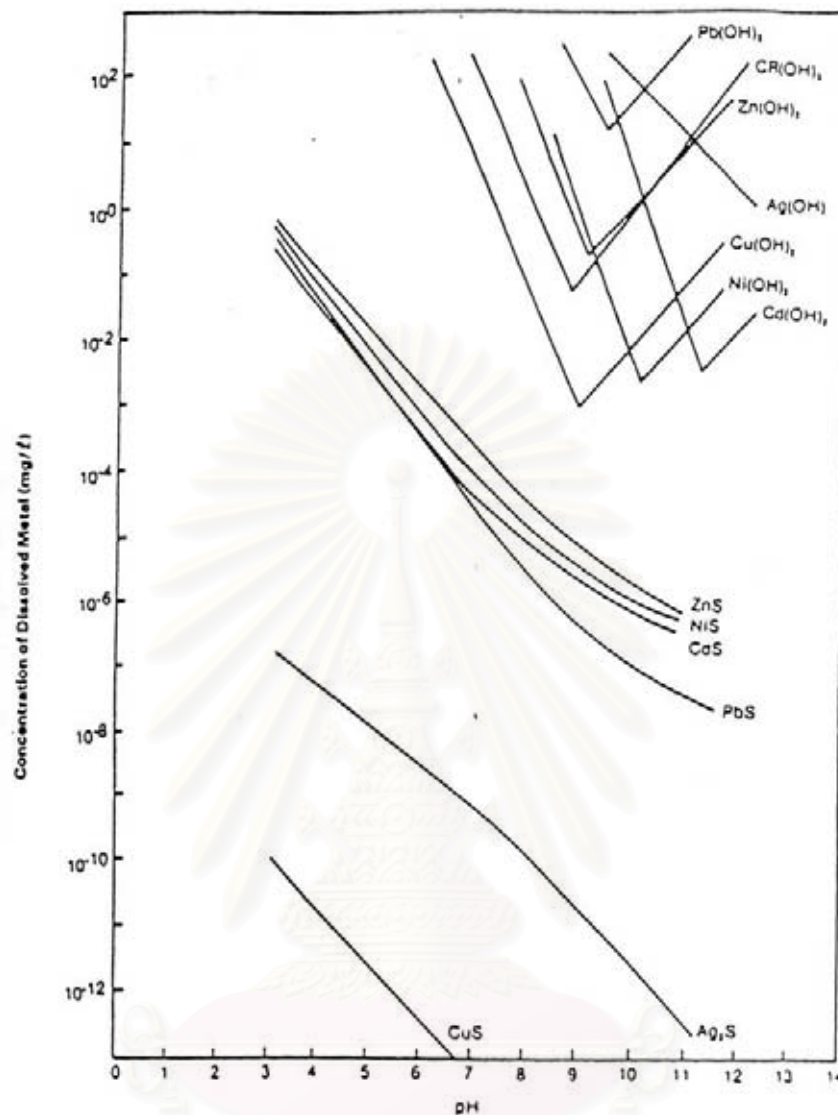
Peter และ Ku (1985) ศึกษากระบวนการตกตะกอน Cu, Ni, Cr และ Zn จากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงของโรงงานชุบโลหะด้วยไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ เมื่อใช้ปริมาณซัลไฟด์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของ Cu, Zn และ Cr ที่เหลือลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของ Ni เพิ่มขึ้น ที่พีเอชเท่ากับ 10 การบำบัดด้วยซัลไฟด์จะสามารถกำจัด Zn, Cu, Cr และ Ni ได้มากกว่า 97, 98, 55 และ 83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การเติมซัลไฟด์ในปริมาณที่ต่ำกว่าสโตยชิโอเมตริก นอกจากจะทำให้ความเข้มข้นโลหะเหลือน้อยแล้วยังช่วยลดการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และปัญหาความเป็นพิษของซัลไฟด์ด้วย

### 3.2.3 การตกตะกอนผลึกในรูปของคาร์บอเนต (Carbonate Precipitation)

การตกตะกอนด้วยคาร์บอเนตสามารถทำได้โดยการเติมโซดาแอชหรือโซเดียมคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ ) ซึ่งเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 3.6



ในการตกตะกอนผลึกของโลหะ เช่น แคดเมียม และตะกั่ว การตกตะกอนผลึกในรูปของคาร์บอเนตให้ผลดีกว่าการตกตะกอนผลึกในรูปของไฮดรอกไซด์ เนื่องจากสามารถทำได้พีเอชต่ำกว่า ในการตกตะกอนผลึกรูปคาร์บอเนตของแคดเมียม และตะกั่ว เกิดขึ้นที่พีเอชประมาณ



รูปที่ 3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะซัลไฟด์เปรียบเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ (Cullinane, 1986)

7.8 - 8.5 ในขณะที่การตกตะกอนผลึกในรูปของไฮดรอกไซด์ ต้องควบคุมพีเอชประมาณ 10 หรือมากกว่านั้น กระบวนการนี้เหมาะสมกับโลหะบางชนิดเท่านั้น เช่น แคดเมียมและตะกั่ว

ข้อดีของการตกผลึกคาร์บอเนตมีดังนี้ คือ

- ตกผลึกได้ดีที่พีเอชระดับต่ำกว่าผลึกไฮดรอกไซด์
- ได้สลัดจ์ที่เนื้อแน่นและดึงน้ำออกจากสลัดจ์ได้ง่ายกว่าสลัดจ์ไฮดรอกไซด์
- เกิดสลัดจ์น้อยกว่าการตกผลึกแบบอื่นๆ

ข้อเสียของการใช้โซดาแอชคือต้องใช้ในปริมาณสูงกว่าปูนขาวหรือโซดาไฟ (เพื่อให้ได้พีเอชระดับเดียวกัน) และอาจเหลือโลหะในน้ำมากกว่า ( $K_{sp}$  ของโลหะคาร์บอเนตมักสูงกว่าของโลหะไฮดรอกไซด์) (มันสิน ตันฑุลเวศม์ และ วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2542)

Patterson และคณะ (1977) พบว่าการกำจัด Ni และ Zn ด้วยการตกตะกอนคาร์บอเนตไม่มีประโยชน์เมื่อเทียบกับการใช้ไฮดรอกไซด์นั่นคือไม่ได้ช่วยให้สลัดจ์มีความหนาแน่นขึ้นหรือกรองออกได้ดีกว่า แต่จะมีผลดีกับการกำจัด Cd และ Pb โดยพบว่าความเข้มข้นของ Cd ที่เหลือเมื่อบำบัดโดยการคาร์บอเนตจะให้ความเข้มข้นที่เหลือต่ำกว่าการใช้ไฮดรอกไซด์และทำได้ทีพีเอชต่ำกว่า ส่วนการกำจัด Pb ที่ประสิทธิภาพเท่ากันจะต้องใช้พีเอชเท่ากับ 10.5 สำหรับ  $Pb(OH)_2$  แต่ใช้พีเอช 7.5 สำหรับ  $PbCO_3$  นอกจากนี้  $PbCO_3$  เป็นตะกอนที่แน่นซึ่งช่วยการกรองให้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับ  $Pb(OH)_2$

### 3.2.4 การตกตะกอนผลึกในรูปของแซนเธต (Xanthate Precipitation)

ในการบำบัดด้วยแซนเธต โลหะที่เป็นตัวปนเปื้อนจะแลกเปลี่ยนกับอออนโซเดียมของแซนเธตแล้วฟอร์มตัวในรูปสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ตามสมการที่ 3.7 หรือ 3.8



แซนเธตเป็นสารประกอบ sulfonated organic ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุระหว่างโลหะหนักในสารละลายและแทนที่ด้วย Na หรือ Mg การแยกโลหะแซนเธต ออกจากของเหลวทำได้โดยการปล่อยให้ตกตะกอนแล้วกรองออกซึ่งเมื่อเทียบกับการบำบัดน้ำเสียด้วยไฮดรอกไซด์จะมีข้อดีก็คือ

- ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะสูงกว่า
- ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช
- ช่วยทำให้การดึงน้ำออกจากสลัดจ์ดีขึ้น
- สามารถเลือกกำจัดโลหะที่ต้องการได้

### 3.2.5 การตกตะกอนผลึกแต่ละประเภทร่วมกัน (Combined Precipitation)

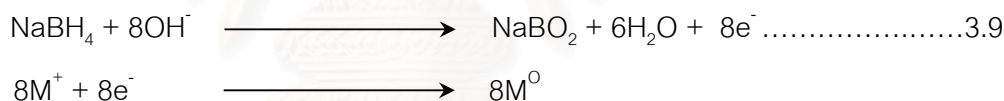
เป็นระบบที่ใช้การตกตะกอนแต่ละประเภทร่วมกัน เช่น McAnally และคณะ (1984) ได้ศึกษาการใช้ซัลไฟด์ชนิดละลายน้ำและคาร์บอเนตเพื่อบริการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

จากผลจาร์เทสต์ พบว่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับกำจัดนิกเกิลเท่ากับ 11 และใช้อัตราส่วน S : Ni เป็น 2 และ  $\text{CO}_3 : \text{Ni}$  เท่ากับ 20 (โดยน้ำหนัก) จะได้ความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลือ 0.1 มก./ล. ซึ่งคาดว่ากลไกการกำจัดนิกเกิลอาจเกิดจากการตกตะกอนร่วม (Coprecipitation)

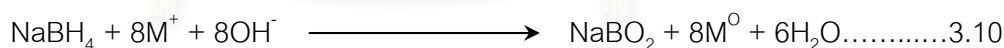
### 3.2.6 การตกตะกอนผลึกในรูปของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride Precipitation)

โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ( $\text{NaBH}_4$ ) มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง sodium hydride หรือ sodium methoxide กับ diborane มีคุณสมบัติละลายน้ำได้และจะมีความเสถียรถ้าอยู่ในสภาวะที่เป็นต่าง สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (SBH) เป็น reducing agent สำหรับเปลี่ยนไอออนของโลหะที่ละลายน้ำหรือสารประกอบอินทรีย์โลหะ (organometallic compounds) ให้เป็นโลหะพื้นฐานที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble elemental metal) โดยจะอยู่ในรูปของสารละลาย 12% (w/v)  $\text{NaBH}_4$  ใน 40% (w/v) NaOH (มณีรัตน์ องค์กรวรรณดี, 2542)

โซเดียมโบโรไฮไดรด์ จะทำปฏิกิริยากับไอออนไฮดรอกซิลตามสมการที่ 3.9



ซึ่งแสดงให้เห็นว่า  $\text{NaBH}_4$  1 โมลจะรีดิวซ์ monovalent metal ได้ 8 โมล ตามสมการที่ 3.10



ตารางที่ 3.5 แสดงอัตราส่วนน้ำหนักของโลหะที่ถูกรีดิวซ์ต่อน้ำหนักของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ใช้ในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติแล้วต้องใช้ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอาจมีสารประกอบอื่นที่สามารถถูกรีดิวซ์ได้ด้วยโบโรไฮไดรด์ และถ้าในน้ำที่มี strongly complexed metals เช่น สารประกอบไซยาไนด์ จำเป็นจะต้องทำลายสารประกอบเหล่านี้ก่อนที่จะบำบัดด้วยโบโรไฮไดรด์

นอกจากนี้โซเดียมโบโรไฮไดรด์สามารถใช้รีดิวซ์สารประกอบอินทรีย์ที่มีน้ำและแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายได้ด้วย เช่น ketones, organic acids, amides และใช้ในกระบวนการ dehalogenation สารปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ (มณีรัตน์ องค์กรวรรณดี, 2542)

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโลหะที่ถูกรีดิวซ์ต่อจำนวนไซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ใช้  
(มณีรัตน์ องค์กรธนดี, 2542)

Metal	Valence	Weight ratio*
Lead	Pb <sup>+2</sup>	22
Cadmium	Cd <sup>+2</sup>	12
Mercury	Hg <sup>+2</sup>	21
	Hg <sup>+</sup>	42
Copper	Cu <sup>+2</sup>	7
Silver	Ag <sup>+</sup>	22
Gold	Au <sup>+3</sup>	14
Nickel	Ni <sup>+2</sup>	6
Palladium	Pd <sup>+2</sup>	11
Platinum	Pt <sup>+4</sup>	10
Cobalt	Co <sup>+2</sup>	6
Rhodium	Rh <sup>+3</sup>	7
Iridium	Ir <sup>+4</sup>	10

\* Weight ratio = maximum kilograms of metal reduced per kilogram of sodium borohydride.

กระบวนการนี้มีช่วงพีเอชที่เหมาะสมคือ 8 - 11 ถ้าพีเอชต่ำกว่า 8 ต้องใช้ไซเดียมโบโรไฮไดรด์ปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการไฮโดรไลซิสของโบโรไฮไดรด์ แต่ถ้าพีเอชมากกว่า 11 ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง พีเอชที่เหมาะสมถูกกำหนดโดยการทดสอบความสมดุลของการใช้โบโรไฮไดรด์กับระยะเวลาทำปฏิกิริยาและคุณภาพน้ำที่ปล่อยออก

การตกตะกอนผลึกชนิดนี้ใช้ในการนำกลับโลหะจากน้ำเสียโดยเฉพาะตะกั่ว ปรอท นิกเกิล ทองแดง แคดเมียมและโลหะมีค่าเช่น ทอง เงิน แพลทินัม ออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปริมาณตะกอนลดลง 50% หรือมากกว่า การศึกษาพบว่าการใช้ไซเดียมโบโรไฮไดรด์เกิดตะกอนน้อยกว่าการใช้ปูนขาว (ชนิษฐา ทวีถาวรสวัสดิ์, 2539)

สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละประเภทจะมีข้อดี-ข้อเสียในการเลือกใช้ที่แตกต่างกันรวมถึงราคาของแต่ละสารจะมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.6



ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการตกตะกอนแบบต่างๆ (ปรับปรุงจากขนิษฐา ทวีถาวรสวัสดิ์, 2539)

การตกตะกอน	ไฮดรอกไซด์	ซัลไฟด์	คาร์บอเนต	โบโรไฮไดรด์
<b>ข้อดี</b>	1. ราคาถูก	1. โลหะซัลไฟด์มีค่าการละลายน้ำต่ำ 2. ตกตะกอน $Cr^{+6}$ โดยไม่ต้องผ่านรีดักชัน 3. ตกตะกอนพวก chelating agent ได้ 4. เอน้ำออกจากตะกอนได้มากกว่าไฮดรอกไซด์	1. เมื่อใช้กับ Cd และ Pb ทำปฏิกิริยาที่ pH ต่ำกว่าไฮดรอกไซด์ 2. สามารถกรองตะกอนได้มากกว่า 3. เกิดตะกอนน้อยกว่าการตกผลึกแบบอื่น	1. ใช้กับการนำกลับของโลหะ 2. ตะกอนน้อยกว่าไฮดรอกไซด์
<b>ข้อเสีย</b>	1. ไฮดรอกไซด์ละลายกลับได้เมื่อพีเอชเปลี่ยน 2. เกิดตะกอนมาก 3. ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีพวก chelating agent ได้	1. เกิดแก๊ส $H_2S$ 2. มีกลิ่นของซัลไฟด์เกิดขึ้น 3. โลหะซัลไฟด์มีขนาดเล็กมากตกตะกอนได้ยาก	1. ใช้กับโลหะได้ไม่ทุกชนิด 2. ใช้ปริมาณสูงกว่าปูนขาวหรือโซดาไฟ (ที่ระดับพีเอชเดียวกัน)	1. ใช้ได้กับช่วง pH สั้นคือที่ 8 - 11 เท่านั้น

### 3.3 สารประกอบเชิงซ้อน

โดยทั่วไปโลหะที่วิเคราะห์พบในตัวอย่างน้ำมักเป็นไอออนอิสระ เช่น  $Pb^{+2}$   $Cu^{+2}$   $Ni^{+2}$  เป็นต้น ซึ่งไอออนอิสระดังกล่าวเป็นรูปแบบที่ถือว่าเป็นปกติและพบมากที่สุดแต่เมื่อเติมสารบางชนิดเพื่อไปกำจัดไอออนของโลหะเช่น เติมต่างไฮดรอกไซด์ ก็จะเกิดสารเชิงซ้อน โลหะ-ไฮดรอกไซด์ แต่โลหะอาจจับตัวกับลิแกนด์ซึ่งอาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ กลายเป็นสารเชิงซ้อนโลหะ-ลิแกนด์ ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่กำจัดออกจากร้ำน้ำได้ยาก

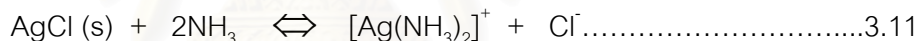
#### 3.3.1 ไอออนเชิงซ้อน (Complex Ions)

ไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายมักไม่อยู่อย่างอิสระ แต่จะรวมตัวกับไอออนหรือโมเลกุลอื่นๆ ที่เรียกว่า ลิแกนด์ (ligands) เพื่อให้ไอออนของโลหะนั้นๆ เสถียรยิ่งขึ้นในสารละลาย ไอออนของโลหะที่รวมอยู่กับลิแกนด์ เรียกว่า ไอออนเชิงซ้อน พวกโลหะที่เกิดไอออนเชิงซ้อนมักได้แก่ โลหะทรานสิชัน เช่น  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Ag}^{+}$  และ  $\text{Pt}^{+2}$  พวกโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท เช่น  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Ba}^{+2}$  และ  $\text{Sr}^{+2}$  ก็เกิดได้บ้าง

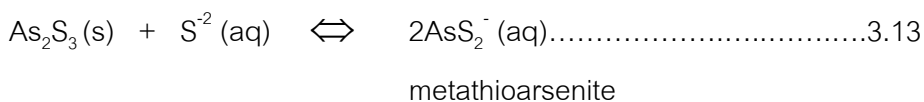
พวกไอออนหรือโมเลกุลที่ทำหน้าที่เป็นลิแกนด์ (บางที่เรียก complexing agents) ส่วนมากมีประจุลบ และจะต้องมีคู่อิเล็กตรอนอิสระที่สามารถจะให้กับไอออนของโลหะได้ เช่น  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CN}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$  ส่วนลิแกนด์ที่เป็นโมเลกุลได้แก่  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  เป็นต้น

ไอออนเชิงซ้อนประกอบด้วยไอออนโลหะศูนย์กลางตัวเดียวหรือหลายตัวล้อมรอบด้วยไอออนลิแกนด์หลายตัว ลิแกนด์ช่วยให้ไอออนของโลหะมีความคงตัวและละลายน้ำได้ ถ้าลิแกนด์เป็นไอออน ประจุของไอออนเชิงซ้อนมีค่าเท่ากับผลบวกของประจุของไอออนโลหะกับประจุของลิแกนด์

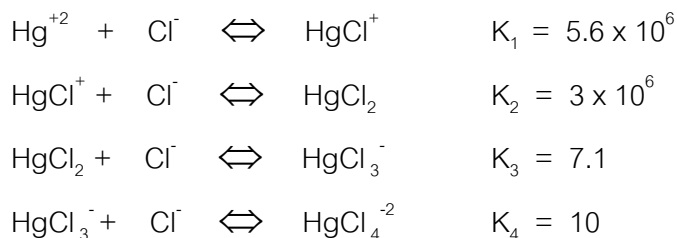
ตัวอย่างของกรดไอออนเชิงซ้อน เช่น  $\text{AgCl}$  ซึ่งละลายในน้ำได้น้อยมาก ถ้าหยดสารละลาย  $\text{NH}_3$  มากเกินพอลงไปจะทำให้  $\text{AgCl}$  ละลายได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดไอออนเชิงซ้อนขึ้นในสารละลาย ดังสมการที่ 3.11



โดยเหตุที่เกิดไอออนเชิงซ้อนทำให้สารที่ละลายในน้ำได้น้อย ละลายได้มากขึ้น วิธีการนี้จึงเป็นประโยชน์ในงานเคมีวิเคราะห์ เช่น ถ้ามีตะกอนของ  $\text{CuS}$  และ  $\text{As}_2\text{S}_3$  ปนกันอยู่ อาจแยกออกจากกันได้โดยนำไปละลายในสารละลายเบสของ  $\text{S}^{-2}$  (สารละลายต้องมี pH สูง เพื่อให้  $\text{S}^{-2}$  เสถียร) ดังสมการที่ 3.12 และ 3.13 (คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ สาขาเคมีตามโครงการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ระดับมหาวิทยาลัยของทบวงมหาวิทยาลัย, 2533)

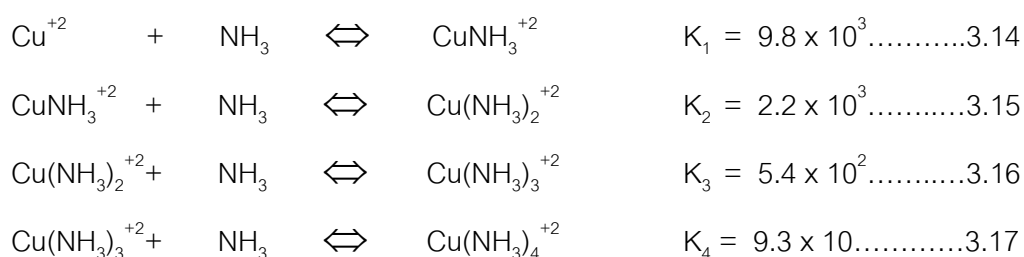


อีกตัวอย่างหนึ่งเช่น เมื่อ  $\text{Hg}^{+2}$  และ  $\text{Cl}^-$  อยู่ในน้ำอะตอมทั้งสองจะรวมกันกลายเป็น  $\text{HgCl}_2$  ที่ไม่แตกตัวแต่ละลายน้ำได้ (เขียนเป็น  $\text{HgCl}_2(\text{aq})$ ) นอกจากนี้คลอไรด์ยังอาจรวมกับปรอท  $\text{Hg}^{+2}$  กลายเป็นสารเชิงซ้อนรูปอื่น เช่น

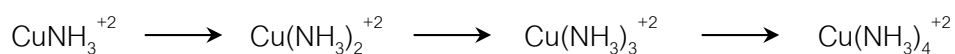


K เรียกว่า ค่าคงที่การเกิด (formation constant) ของอิกอนเชิงซ้อน บางทีเรียกว่า ค่าคงที่ความเสถียร (stability constant :  $K_s$ ) ถ้าค่า K มากแสดงว่าจะเกิดอิกอนเชิงซ้อนได้มาก การแตกตัวจึงเป็นไปได้น้อย (ค่าคงที่สมดุลอีกค่าหนึ่งที่นิยมใช้กับอิกอนเชิงซ้อนก็คือ ค่าคงที่การแตกตัว (dissociation constant :  $K_D$ ) ของอิกอนเชิงซ้อนหรือบางทีเรียกว่า ค่าคงที่ความไม่เสถียร (instability constant :  $K_{instab}$ ) ) ซึ่งจะมีค่าเป็นส่วนกลับของค่า K ดังนั้นถ้า  $K_D$  มีค่าน้อยก็แสดงว่าอิกอนเชิงซ้อนนั้นเสถียร (แตกตัวได้น้อย) ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกับกรดที่แตกตัวได้น้อยก็จะเป็นกรดที่เสถียรและจะให้โปรตอนออกไปได้ยาก ดังนั้นยิ่งค่า K มาก สารเชิงซ้อนก็จะมีเสถียรภาพสูง ส่วนจำนวนเลขที่ห้อยใต้ K หมายถึงอะตอมของลิแกนด์ที่ประกอบกันเป็นสารเชิงซ้อน

โลหะจะเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตก็ต่อเมื่อโลหะอยู่ในสถานะอิกอน เช่น  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{Hg}^{+2}$  เป็นต้น ถ้าอิกอนของโลหะจับตัวกับลิแกนด์กลายเป็นสารเชิงซ้อน โลหะก็จะเป็นพิษ การที่โลหะอยู่ในรูปสารเชิงซ้อนมีประโยชน์คือทำให้โลหะคงอยู่ในรูปสารละลายที่ไม่เป็นพิษ แต่ในบางครั้งการที่โลหะอยู่ในรูปสารเชิงซ้อนก็เป็นข้อเสีย เช่น ในกรณีที่ต้องการกำจัดโลหะออกจากน้ำเสีย ปฏิกริยาตกผลึกสามารถกำจัดโลหะในรูปอิกอนธรรมชาติได้ไม่ยาก แต่ถ้าโลหะอยู่ในรูปสารเชิงซ้อน (อาจรวมกับสารคีเลนต์) การกำจัดโลหะด้วยการตกผลึกมักทำได้ยากหรือใช้ไม่ได้ผล เช่นเมื่อน้ำเสียนั้นมีแอมโมเนียอิสระ ( $\text{NH}_3$ ) อยู่ด้วยซึ่งแอมโมเนียเป็นลิแกนด์ที่ดีในการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับอิกอนของโลหะต่างๆ และพบเสมอในน้ำ ขอยกตัวอย่างสารเชิงซ้อนแอมโมเนีย-ทองแดง ซึ่งมีหลายรูปเช่น  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{CuNH}_3^{+2}$ ,  $\text{Cu}(\text{NH}_3)_2^{+2}$ ,  $\text{Cu}(\text{NH}_3)_3^{+2}$  และ  $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{+2}$  ดังสมการที่ 3.14 ถึง 3.17



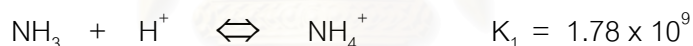
สารประกอบเชิงซ้อนเริ่มต้นคือ  $\text{CuNH}_3^{+2}$  เกิดขึ้นเมื่อมีแอมโมเนีย 1 โมเลกุลจับกับทองแดง เมื่อมีแอมโมเนียมากขึ้น สารเชิงซ้อนจะมีจำนวนโมเลกุลแอมโมเนียมากขึ้นตาม



ดังนั้นเมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมโมเนีย-ทองแดง จึงทำให้การกำจัดทองแดงออกจากรู้น้ำทำได้ยาก ซึ่งในน้ำอาจมีสารเชิงซ้อนหลายรูปอยู่ปะปนกัน ปริมาณหรือสัดส่วนของสารเชิงซ้อนแต่ละรูปขึ้นอยู่กับปริมาณของแอมโมเนียอิสระ และเนื่องจากพีเอชเป็นตัวกำหนด  $\% \text{NH}_3$  ดังนั้นพีเอชจึงมีบทบาทในการกำหนดความเข้มข้นของ  $\text{Cu}^{+2}$  และสารเชิงซ้อนรูปต่าง ๆ ด้วย

### 3.3.2 การทำลายสารประกอบเชิงซ้อน

สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นสามารถทำลายได้ด้วยการกำจัดอิออนตัวใดตัวหนึ่งโดยทางกายภาพหรือทางเคมี เช่น สารประกอบเชิงซ้อนทองแดง-แอมโมเนีย อาจถูกทำลายได้โดยเติมกรดหรือ  $\text{H}^+$  กรณีนี้  $\text{H}^+$  จะแย่งทำปฏิกิริยากับ  $\text{NH}_3$  เกิดสารประกอบเชิงซ้อนตัวใหม่คือ  $\text{NH}_4^+$  ซึ่งมีเสถียรภาพสูงกว่าทองแดง-แอมโมเนีย



การกำจัดแอมโมเนียโดยวิธีต้มไล่ออกจากน้ำก็สามารถป้องกันการเกิดสารเชิงซ้อนทองแดง-แอมโมเนียได้เช่นกัน (มันสิน ตันทุลเวศม์ และมันรักษ์ ตันทุลเวศม์, 2545)

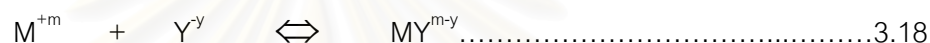
### 3.3.3 คีเลชัน (Chelation)

คีเลชัน หมายถึง ปฏิกิริยาเคมีในการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนโดยการจับอิออนของโลหะให้ละลายอยู่ในน้ำโดยไม่เกิดการตกผลึก สารคีเลทมักเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำที่มีความสามารถในการจับอิออนให้อยู่ในน้ำโดยไม่เกิดปฏิกิริยาตามปกติ ยกตัวอย่างเช่น อิออนแคลเซียม ( $\text{Ca}^{+2}$ ) ในน้ำมักเกิดปฏิกิริยาตกผลึกและกลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ แต่เมื่อมี EDTA อยู่ในน้ำด้วยจะเกิดปฏิกิริยาคีเลชันระหว่าง Ca และ EDTA กลายเป็นสารเชิงซ้อน  $\text{Ca}.\text{EDTA}$  ซึ่งยังคงละลายในน้ำโดยที่แคลเซียมจะไม่ตกผลึกเป็น  $\text{CaCO}_3$  ในทางทฤษฎีกล่าวได้ว่า คีเลชันเป็นปฏิกิริยาสร้างสารเชิงซ้อน (Complex Formation) ที่มีลิแกนด์เป็นสารชนิด Multidentate (ลิแกนด์ที่มีอะตอมที่ให้คู่อิเล็กตรอนมากกว่า 1 อะตอม) เช่น EDTA

เป็น Hexadentate Ligand สร้างสารเชิงซ้อนให้กับแคลเซียมดังกล่าวมาแล้ว เราอาจเรียกลิแกนด์ 6 วัลติเดนเทตว่าตัวคีเลท เมื่อพิจารณาถึงกลไกที่เกิดขึ้นอาจกล่าวได้ว่า คีเลชันก็คล้ายกับการ แลกเปลี่ยนไอออน สารแลกเปลี่ยนไอออนทำหน้าที่จับไอออนโลหะเช่นเดียวกับสารคีเลทตั้ง แต่ความแตกต่างอยู่ที่สถานะของสารทั้งสองคือ สารแลกเปลี่ยนไอออนเป็นของแข็งที่มีขนาดใหญ่ และไม่ละลายน้ำ ในขณะที่สารคีเลทตั้งเป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (มันซิน ตันทูลเวศม์ และ มัณรัักษ์ ตันทูลเวศม์, 2545)

### 3.3.4 สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกับสารอินทรีย์ (คีเลท)

สารคีเลทจะมีความสามารถจับตัวกับไอออนของโลหะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนคีเลทดังปฏิกิริยาในสมการที่ 3.18



เมื่อ  $M^{+m}$  เป็นไอออนของโลหะ และ  $Y^{-y}$  เป็นประจุลบของสารคีเลท สารประกอบเชิงซ้อนคีเลท เหล่านี้จะมีค่าคงที่การเกิด (formation constant : K) ของไอออนเชิงซ้อนหรือค่าคงที่ความเสถียร (stability constant :  $K_s$ ) แตกต่างกันดังสมการที่ 3.19 ยิ่งค่า  $K_s$  มากสารเชิงซ้อนก็จะยิ่ง มีเสถียรภาพสูง ซึ่งแสดงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 3.7 ในเมื่อ

$$K_s = \frac{(MY^{(m-y)})}{(M^{+m})(Y^{-y})} \dots\dots\dots 3.19$$

ซึ่งสารคีเลทต่างๆ เหล่านี้จะมีความสามารถในการรวมตัวกับโลหะชนิดต่างๆ ได้ไม่เท่ากัน ขึ้นกับค่า  $K_s$  ของแต่ละโลหะกับลิแกนด์ชนิดนั้นๆ โดยถ้าลิแกนด์ชนิดนั้นๆ สามารถรวมตัวกับโลหะ ชนิดใดแล้วมีค่า  $K_s$  สูงกว่าก็แสดงว่า เมื่อใส่ลิแกนด์ชนิดนั้นๆ ลงไปในน้ำที่มีไอออนของโลหะต่างๆ ละลายอยู่ลิแกนด์ชนิดนั้นก็เริ่มจับตัวกับโลหะที่มีค่า  $K_s$  สูงกว่าก่อน จากนั้นจึงค่อยจับตัวกับ โลหะที่มีค่า  $K_s$  ต่ำกว่าตามลำดับ ดังจะขอยกตัวอย่าง เช่นในการไตเตรทหาปริมาณของโลหะธาตุ ในสารละลาย โดยใช้ประโยชน์จากสารคีเลท ซึ่งมีความสามารถจับตัวกับไอออนของโลหะเกิดเป็น สารประกอบเชิงซ้อนคีเลท ดังปฏิกิริยาจากสมการที่ 3.18 และค่าคงที่ความเสถียร  $K_s$  ในตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเห็นว่า EDTA จะรวมตัวกับ  $Fe^{+3}$  ได้ดีกว่า  $Hg^{+2}$  ทำนองเดียวกัน EDTA ก็รวมกับ  $Mn^{+2}$  ได้ดีกว่า  $Ca^{+2}$  นั่นก็คือเมื่อใส่ EDTA ลงไปในสารละลายที่มีไอออนของโลหะต่างๆ ดังตารางที่ 3.7 แล้ว EDTA จะเริ่มจับตัวกับ  $Fe^{+3}$  ก่อนและจะจับตัวกับ  $Na^{+}$  ได้หลังสุด ดังนั้น หลักการในการใช้สารคีเลทในการตรวจวัดปริมาณไอออนของโลหะตัวใดตัวหนึ่ง จำเป็นต้องกำจัดไอออนของโลหะอื่นที่สามารถรวมตัวกับสารคีเลทที่ใช้นั้นได้ดีกว่าไอออนของโลหะ

ตารางที่ 3.7 แสดงเปรียบเทียบค่า log K<sub>s</sub> ของ 1 : 1 Metal Ion Chelate ต่างๆ  
(สุพจน์ โตตระกูล, 2526)

Chelate Metal-ion	EDTA	HEDTA	EEDTA	EGTA	DTPA	CDTA	NTA	Trien	Tetren
Fe <sup>+3</sup>	25.1	-	-	-	27.5	-	15.8	-	-
Hg <sup>+2</sup>	22.1	20.1	23.1	23.8	27.0	24.4	-	25.0	27.7
Cu <sup>+2</sup>	18.8	17.4	17.8	17.8	21.0	21.3	12.6	20.1	22.9
Ni <sup>+2</sup>	18.6	17.0	14.7	13.6	20.2	19.4	11.5	14.0	17.8
Pb <sup>+2</sup>	17.9	15.5	14.4	14.6	18.6	19.7	11.1	10.4	10-11
Cd <sup>+2</sup>	16.5	13.0	16.3	16.7	19.0	19.2	9.8	10.8	14.0
Zn <sup>+2</sup>	16.4	14.5	15.3	13.0	18.8	18.6	10.5	11.9	15.4
Co <sup>+2</sup>	16.3	14.4	14.7	12.3	19.0	18.9	10.4	11.0	15.1
Al <sup>+3</sup>	16.1	-	-	-	-	17.6	-	*	*
La <sup>+3</sup>	15.5	13.2	-	-	19.1	-	10.4	*	*
Fe <sup>+2</sup>	14.4	11.6	-	-	16.7	-	8.8	7.8	-
Mn <sup>+2</sup>	13.8	10.7	13.2	12.3	15.5	16.8	7.4	4.9	7.0
Ca <sup>+2</sup>	10.7	8.0	10.0	10.9	10.7	12.3	6.4	*	*
Mg <sup>+2</sup>	8.7	7.0	8.3	5.4	9.0	10.3	5.4	*	*
Sr <sup>+2</sup>	8.6	6.8	8.6	8.5	9.7	10.0	5.0	*	*
Ba <sup>+2</sup>	7.9	6.2	8.2	8.4	8.6	8.0	4.8	*	*
Li <sup>+1</sup>	2.8	-	-	-	-	-	-	-	-
Na <sup>+</sup>	1.7	-	-	-	-	-	-	-	-
R.E.	15.8- 19.8	14.1- 15.8	-	-	-	16.8- 21.5	10.4- 12.2	-	-

\* น้อยมาก

ในเมื่อ

EDTA = Ethylenediaminetetraacetic Acid

HEDTA = Hydroxyethylethylenediaminetraacetic Acid

EEDTA = Ethyletherdiaminetetraacetic Acid

EGTA	=	Ethylene Glycol-bis-( $\beta$ -Aminoethylether)-N, N' – Tetraacetic Acid
DTPA	=	Diethylenetriaminepentaacetic Acid
NTA	=	Nitrilotriacetic Acid or Ammeniatriacetic Acid
CDTA	=	Cyclohexanediaminetetraacetic Acid
Trien	=	Triethylenetetramine
Tetren	=	Tetraethylenepentamine
R.E.	=	Rare Earth

ที่ต้องการหา ยกตัวอย่างเช่นต้องการหา  $Pb^{+2}$  ก็ต้องกำจัด  $Fe^{+3}$ ,  $Hg^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$  และ  $Ni^{+2}$  ออกไปเสียก่อน จากนั้นจึงใช้ EDTA มาทำปฏิกิริยากับ  $Pb^{+2}$  ที่ต้องการหา โดยมี indicator ที่เหมาะสมซึ่งเปลี่ยนแปลงสีตามประจุสุทธิที่เกิดขึ้นบนโมเลกุลของมันเป็นตัวช่วยระบุจุดสุดท้ายเมื่อปริมาณ  $Pb^{+2}$  ถูกใช้หมดไปในการทำปฏิกิริยากับ EDTA ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เติมปริมาณ EDTA ลงไปมากเกินไป เพราะหลังจากนั้นไปแล้ว EDTA ก็จะไปทำปฏิกิริยากับ  $Cd^{+2}$  ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ปริมาณ  $Pb^{+2}$  ได้ค่ามากเกินไปจนไม่เป็นจริง

สารคีเลทสามารถรวมตัวกับไอออนของโลหะได้ในอัตราส่วนต่างๆ กันซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารคีเลท และไอออนของโลหะนั้น

### 3.3.5 สารคีเลทที่ใช้กำจัดโลหะหนัก

เนื่องจากการกำจัดโลหะหนักด้วยซัลไฟด์มีข้อดีหลายประการดังกล่าวแล้วในตอนต้น แต่ก็มีข้อเสียคือตะกอนของโลหะซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นจึงได้มีความพยายามหาทางแก้ไขข้อเสียของซัลไฟด์ที่ใช้กำจัดโลหะหนัก โดยหาทางทำให้เกิดตะกอนหนักของโลหะซัลไฟด์เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายและพบว่าสารอินทรีย์ที่มีกลุ่ม-SH เช่น สารไฮโดรคาร์บาเมต ซึ่งเป็นสารเอไมด์ที่มีซัลไฟด์ในการกำจัดโลหะหนัก สามารถกำจัดไอออนของโลหะหนักหลายๆ ชนิดออกจากน้ำได้ด้วยปฏิกิริยาคีเลชัน โดยโลหะหนักจะถูกจับรวมกับไฮโดรคาร์บาเมตกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน จากนั้นจึงใช้วิธีสกัดโลหะหนักด้วยตัวทำละลาย เช่น Methyl Isobutyl Ketone แม้ว่าวิธีดังกล่าวจะใช้กำจัดโลหะหนักได้แต่ก็ไม่สามารถนำมาใช้บำบัดน้ำเสียในทางปฏิบัติได้เนื่องจากดังได้กล่าวแล้วข้างต้นว่าเมื่อโลหะหนักถูกจับอยู่ในรูปสารเชิงซ้อนคีเลทจะทำให้มันสามารถคงรูปอยู่ได้ในสารละลายโดยไม่มีพิษและเป็นสารประกอบที่คงตัว (โลหะไม่หลุดออกได้โดยง่าย) จึงเป็นข้อดีของการใช้ปฏิกิริยาคีเลชันในการกำจัดโลหะหนัก แต่ปัญหาก็คือถึงแม้โลหะหนักจะถูกจับอยู่ในรูปสารเชิงซ้อนแต่ก็ยังละลายอยู่ในน้ำจึงต้องมีวิธีแยกสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นออกจากน้ำโดยใช้

วิธีสกัดโลหะหนักที่ถูกไฮโดรคาร์บาเมตจับไว้ออกจากสารเชิงซ้อนด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆ จึงเห็นได้ว่าการใช้สารไฮโดรคาร์บาเมตโดยตรงในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักไม่สามารถทำได้ ดังนั้นในวงการอุตสาหกรรมเคมี จึงได้มีการผลิตสารประกอบอินทรีย์ไฮโดรคาร์บาเมต ในหลายลักษณะ ซึ่งส่วนใหญ่จะมี -SH ซึ่งใช้กำจัดโลหะหนักแต่แตกต่างกันในขนาดของน้ำหนักโมเลกุล ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักต่างๆ ด้วยกระบวนการคีเลชัน โดยโลหะหนักจะถูกจับร่วมกับสารประกอบดังกล่าวซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่แบบโพลีเมอร์ จึงทำให้เกิดฟลอคขนาดใหญ่และหนักสามารถตกตะกอนหรือกรองได้ง่าย ซึ่งจากการทดลองใช้สารนี้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักจากอุตสาหกรรมต่างๆ พบว่าสารเคมีตัวนี้มีประเด็นที่น่าสนใจหลายอย่าง เช่น เกิดฟลอคซัลไฟด์ขนาดใหญ่กว่าการใช้  $\text{Na}_2\text{S}$  และสามารถใช้ได้ทั้งระดับพีเอชต่างๆ เป็นต้น และประเด็นที่มีประโยชน์มากคืออาจควบคุมปริมาณการใช้ได้ด้วยค่าไออาร์พี นอกจากนี้ยังมีข้อดีที่ผู้ผลิตอ้างถึงคือ ให้สลัดจ์ที่คงตัว (โลหะหนักจะไม่หลุดออกจากสลัดจ์ได้โดยง่าย) จากข้อดีต่างๆ จึงมองเห็นการนำเอาสารนี้ไปใช้บำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนกัน จึงจะขอกล่าวถึงรายละเอียดของสารชนิดนี้ โดยจะเรียกว่า “สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์” ใช้ในกำจัดโลหะหนัก โดยสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์นี้เป็นสารวินิลโพลีเมอร์แบบลิเนียร์ที่ถูกจับยึดด้วยกลุ่มไดไฮโดรคาร์บาเมต (DTCM) ซึ่งทำให้มันละลายน้ำได้ โดยจะมีอิมอนโซเดียมเอาไว้สำหรับแลกเปลี่ยนกับอิมอนโลหะหนักที่อยู่ในน้ำตามลำดับความชอบจับโลหะของสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ และจะฟอร์มอยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำและเนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่แบบโพลีเมอร์จึงพันกันเป็นกลุ่มทำให้เกิดฟลอคขนาดใหญ่และหนักสามารถตกตะกอนหรือกรองได้ง่าย ซึ่งตามข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตบอกว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ชนิดนี้มีข้อดีดังนี้คือ

- \* เป็นทั้งสารกำจัดโลหะหนัก + โพลีเมอร์สร้างฟลอค
- \* ควบคุมอัตราการบ่อนได้อย่างอัตโนมัติด้วยค่าไออาร์พี
- \* ฟลอคมีขนาดใหญ่
- \* ตะกอนสลัดจ์เกิดน้อยและอัดตัวได้ดี

ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ชนิดนี้ตามข้อมูลจากผู้ผลิตอ้างถึงมีดังนี้

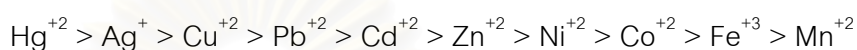
### 3.3.5.1 สามารถใช้ได้กับน้ำเสียต่างๆ ดังนี้

- โรงชุบโลหะต่างๆ
- น้ำเสียจากห้องแล็บเคมีต่างๆ
- น้ำเสียที่เกิดจากหอกำจัดไอก๊าซต่างๆ
- โรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ แผ่นวงจร PCB, IC
- โรงงานผลิตหลอดไฟนีออน



- โรงพิมพ์
- โรงงานผลิตเลนส์
- โรงงานแบตเตอรี่
- โรงงานเหล็กและเหล็กกล้า
- น้ำล้างฟิล์ม
- เม็ดสีและสี

### 3.3.5.2 ลำดับความชอบจับโลหะหนัก



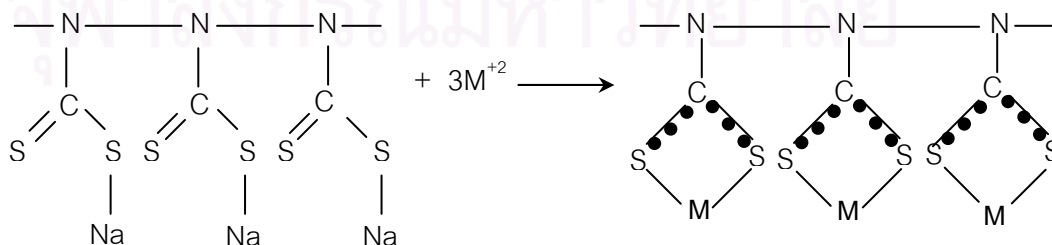
กำจัดปรอท ( $\text{Hg}^{+2}$ ) ได้ดีที่สุด และกำจัดแมงกานีส ( $\text{Mn}^{+2}$ ) ได้น้อยที่สุด

### 3.3.5.3 โคแอกกูแลนต์ที่สามารถใช้ร่วมด้วยเพื่อช่วยลดปริมาณการใช้และเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน

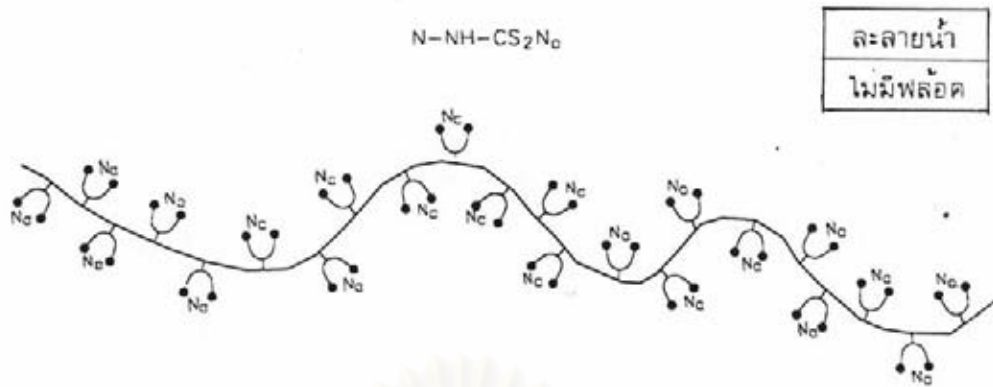
- \* สารส้ม  $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14.3 \text{H}_2\text{O}]$  หรือ  $\text{FeCl}_3$  เพื่อช่วยลดปริมาณการใช้สารเคลือบโปลิมเมอร์ และเพื่อให้เกิดฟล็อกสมบูรณ์ยิ่งขึ้น
  - ปริมาณของ  $\text{FeCl}_3$  ควรเติมประมาณ 3 – 10 เท่า ของปริมาณเคลือบโปลิมเมอร์ที่ใช้ เช่น ถ้าใช้เคลือบโปลิมเมอร์ 20 มก./ล. ควรเติม  $\text{FeCl}_3$  ประมาณ 60 - 200 มก./ล.
  - ปริมาณสารส้มควรเติมประมาณ 3 – 20 เท่าของเคลือบโปลิมเมอร์
- \* อาจเติมโปลิมเมอร์ชนิดประจุลบหรือไม่มีประจุเพื่อช่วยเพิ่มขนาดของฟล็อกให้สามารถตกตะกอนได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

### 3.3.5.4 กลไกการกำจัดโลหะหนักของสารเคลือบโปลิมเมอร์

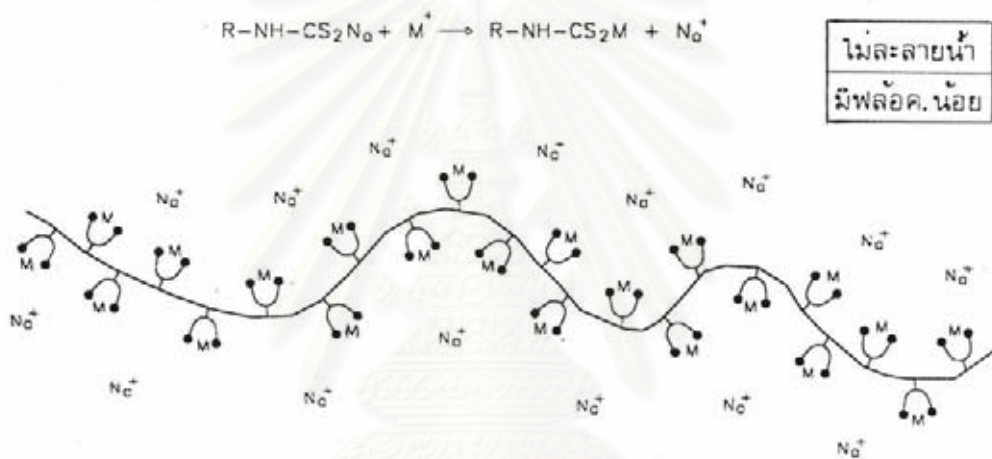
กลไกกำจัดโลหะหนักเป็นปฏิกิริยาแบบคีเลชัน ดังนี้



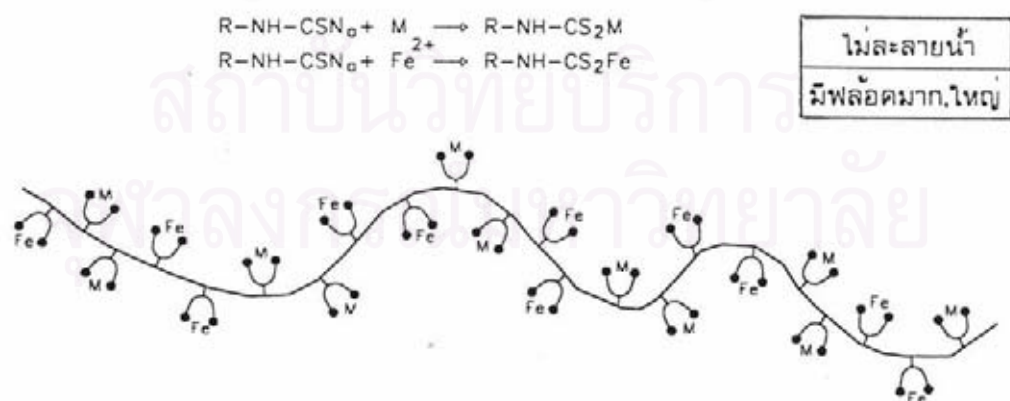
กลไกในการกำจัดโลหะหนักเป็นปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) ตามด้วยการตกผลึกของสารเชิงซ้อนโปลิมเมอร์ ดูรูปที่ 3.5 ถึง 3.8



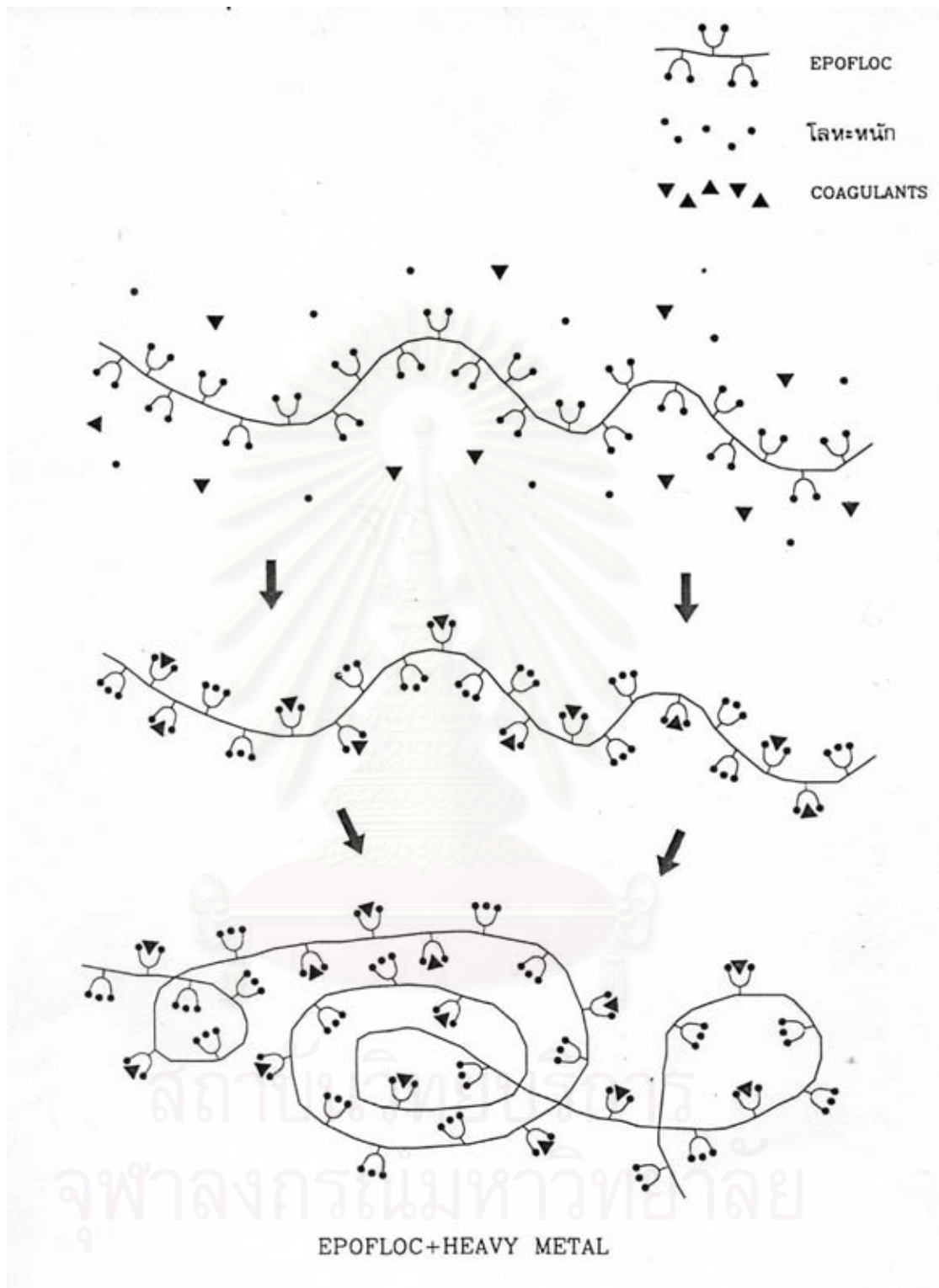
รูปที่ 3.5 แสดงคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ละลายน้ำ คุณสมบัติที่ทำให้ละลายน้ำคือ  $-NH-CS_2Na$ ,  $-Sna$  (บริษัท Miyoshi Oil and Fat, 1994)



รูปที่ 3.6 เมื่อจับโลหะหนักสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์จะสูญเสียความสามารถในการละลายน้ำจึงเกิดฟลอค (บริษัท Miyoshi Oil and Fat, 1994)



รูปที่ 3.7 การเติมโคแอกกูแลนต์ เช่น  $FeCl_3$  หรือ  $Al_2SO_4$  (สารส้ม) ทำให้คีเลตติ้งโพลีเมอร์มีการจับโลหะหนัก (จากโคแอกกูแลนต์) มากขึ้นฟลอคเพิ่มขึ้น ผลึกของ  $Fe(OH)_3$  หรือ  $Al(OH)_3$  ช่วยทำให้เกิดฟลอคได้ดียิ่งขึ้น (บริษัท Miyoshi Oil and Fat, 1994)



**รูปที่ 3.8** สายยาวของโพลีเมอร์ที่ตกผลึกพันกันเป็นกลุ่ม ทำให้เกิดฟลอคดียิ่งขึ้น  
 (บริษัท Miyoshi Oil and Fat, 1994)

### 3.4 ลักษณะน้ำเสียซีไอดี

ในการวิเคราะห์ค่าซีไอดีมีสารเคมีที่ใช้คือ โปตัสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ), กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ ), เมอร์คิวรีซัลเฟต ( $HgSO_4$ ) และเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ( $FeSO_4(NH_4)_2SO_4$ ) ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการวิเคราะห์แล้ว (ไตเตรทถึงจุดยุติ) จะได้ว่าโครเมียม (VI) ถูกรีดิวซ์เป็นโครเมียม (III) และเหล็ก (II) ถูกออกซิไดซ์เป็นเหล็ก (III) ส่วนเงิน (I) และปรอท (II) ไม่ถูกรีดิวซ์หรือถูกออกซิไดซ์ จึงทำให้พบไอออนโลหะหนักในน้ำเสียคือ  $Hg^{+2}$ ,  $Cr^{+3}$  และ  $Ag^+$  รวมทั้งมี  $Fe^{+3}$  ในปริมาณมากด้วย ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน [ $H^+$ ] หลังการวิเคราะห์ประมาณ 0.5 M (Hendrickson และคณะ, 1984) ทำให้ได้ค่าพีเอชใกล้เคียงศูนย์

ตารางที่ 3.8 แสดงตัวอย่างการประมาณความเข้มข้นของปรอท โครเมียม เงิน และเหล็ก ในการวิเคราะห์ค่าซีไอดี เมื่อปริมาตรน้ำตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร และปริมาตรสุดท้ายหลังการไตเตรทเท่ากับ 170 มิลลิลิตร และแสดงความเข้มข้นของ ปรอท โครเมียม เงินและเหล็ก แต่ละรูปในน้ำเสียซีไอดี เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน [ $H^+$ ] และความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน [ $SO_4^{2-}$ ] เท่ากับ 0.5 M ซึ่งทั้งนี้ น้ำเสียซีไอดีจะมีความเข้มข้นของโลหะเท่าไรขึ้นอยู่กับ ปริมาตรน้ำตัวอย่าง ห้องปฏิบัติการ และผู้วิเคราะห์

ตารางที่ 3.8 การประมาณความเข้มข้นของปรอท โครเมียม เงิน และเหล็กในการวิเคราะห์ซีไอดี

โลหะ	กรัม/ตย. 20 มล.	กรัม/ลิตร	โมล/ลิตร	รูป	โมล/ลิตร	% ของโลหะ แต่ละรูป
ปรอท (II)	0.27	1.6	$10^{-2.1}$	$Hg(SO_4)_2^{2-}$	$10^{-2.3}$	85
				$HgSO_4^0$	$10^{-3.1}$	13
โครเมียม (III)	0.043	0.25	$10^{-2.3}$	$CrSO_4^+$	$10^{-2.3}$	100
เงิน (I)	0.21	1.2	$10^{-2.0}$	$Ag^+$	$10^{-2.5}$	41
				$AgSO_4^-$	$10^{-2.5}$	41
				$Ag(SO_4)_2^{3-}$	$10^{-3.1}$	10
				$Ag(SO_4)_3^{5-}$	$10^{-3.2}$	8
เหล็ก (III)	0.11	0.67	$10^{-1.9}$	$FeSO_4^+$	$10^{-2.1}$	74
				$Fe(SO_4)_2^-$	$10^{-2.6}$	23

ที่มา : ดัดแปลงจาก Hendrickson และคณะ (1984)

ตารางที่ 3.9 แสดงลักษณะของน้ำเสียซีโอดีซึ่งรวบรวมได้จากงานวิจัยต่างๆ โดยเป็นน้ำเสียที่รวบรวมจากห้องปฏิบัติการบางแห่งในประเทศไทย

ตารางที่ 3.9 ลักษณะน้ำเสียซีโอดีซึ่งรวบรวมได้จากงานวิจัยต่างๆ

ลักษณะ	งานวิจัย				
	พวงรัตน์ (2537) <sup>1</sup>	นฤมิต (2538) <sup>2</sup>	ชณิษฐา (2539) <sup>3</sup>	อนุวัฒน์ (2540) <sup>4</sup>	สุวีรัตน์ (2540) <sup>4</sup>
พีเอช	<1	<1	<1	<1	<1
ปรอท (มก./ล.)	1,804	703	1,341	2,562	1,396
โครเมียม (มก./ล.)	700	492	288	672	444
เงิน (มก./ล.)	1,150	n.a.	921	n.a.	1,715
เหล็ก (มก./ล.)	670	540	153	1,083	1,041

n.a. : ไม่มีข้อมูล

- 1: ตัวอย่างน้ำเสียรวบรวมจาก ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ
- 2: ตัวอย่างน้ำเสียรวบรวมจาก ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
- 3: ตัวอย่างน้ำเสียรวบรวมจาก ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ของหน่วยงานราชการและบริษัทเอกชน 10 แห่ง
- 4: ตัวอย่างน้ำเสียรวบรวมจาก ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Williams, R.T และคณะ (1971) ศึกษาการกำจัดปรอทออกจากน้ำเสียที่ผ่านการทดลองในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ น้ำเสียจากการทดลองหาค่าซีโอดี เจห์ดาห์ล และจากการประมาณค่าความเข้มข้นโดยใช้เนสเลอร์ การทดลองนี้ใช้วิธีการตกตะกอนผลึกในรูปของผลึกซัลไฟด์ลำดับขั้นตอนในการทดลองเป็นดังนี้

1. นำน้ำเสียที่ผ่านการทดลองหาค่าซีโอดีและน้ำเสียส่วนอื่นๆ มาปรับค่าพีเอช โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พร้อมกับกวนให้ความร้อน
2. ปรับค่าพีเอช ของน้ำเสียให้มีค่ามากกว่า 10

3.เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้เกิดการตกตะกอนผลึกของโลหะหนักในรูปตะกอนซัลไฟด์

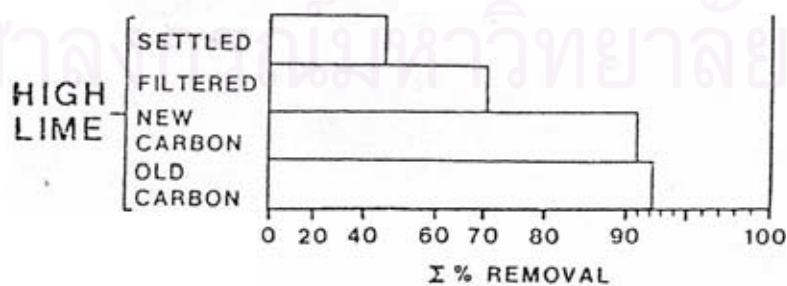
4. แยกน้ำใสออกจากตะกอนโลหะหนัก นำตะกอนมาล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางเพื่อให้เกิดโซเดียมซัลไฟด์เพื่อกำจัดซัลไฟด์ออกจากรูปนั้นทำตะกอนให้แห้งโดยอบที่อุณหภูมิมากกว่า 100°C และนำไปกำจัดต่อไป

วิธีการนี้ได้นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากการทดลองหาค่าซีไอดีในห้องปฏิบัติการก่อนที่จะมีการพัฒนาวิธีบำบัดน้ำเสียในปีต่อๆ มา

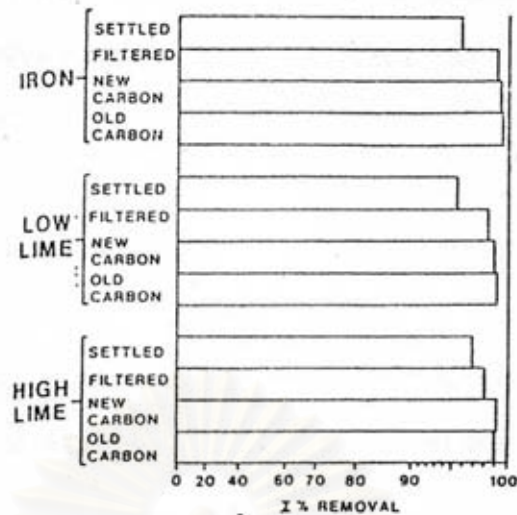
**Maruyama และคณะ (1975)** ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนผลึกทางเคมี โดยน้ำเสียจะได้รับการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดตะกอนผลึก จากนั้นจะถูกนำไปตกตะกอนที่ถังตกตะกอนเพื่อนำตะกอนของโลหะหนักออก ส่วนน้ำเสียจะถูกบำบัดต่อด้วยการกรองและการดูดซับโดยใช้ถ่านคาร์บอนและทำให้เป็นกลางก่อนที่จะระบายทิ้ง

การทดลองที่เกี่ยวกับการวิจัยนี้ คือ การกำจัดปรอทและโครเมียม โดยในการกำจัดปรอทได้ใช้สารเคมี คือ ปูนขาว ซึ่งมีความเข้มข้น 600 มก./ล. เติมลงไปใ้ในน้ำเสีย โดยมีการควบคุมพีเอชที่ 11.5 และในการกำจัดโครเมียมได้ใช้สารเคมี 3 ชนิด คือ เหล็ก 45 มก./ล. โดยควบคุมพีเอชที่ 6.0 ปูนขาว 260 มก./ล. และเหล็ก 20 มก./ล. โดยควบคุมพีเอชที่ 10.0 และปูนขาว 600 มก./ล. โดยควบคุมพีเอชที่ 11.5

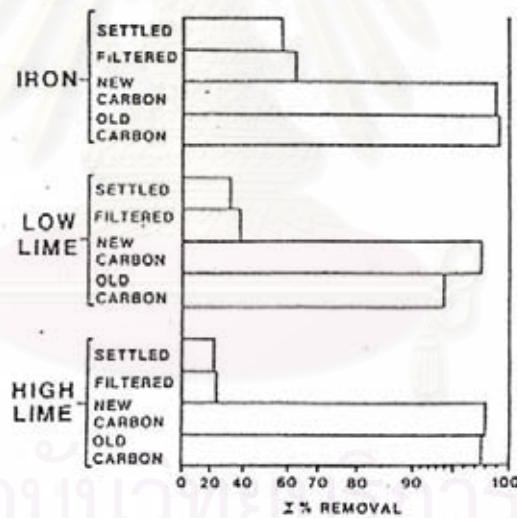
จากการทดลองพบว่าในการกำจัดปรอท น้ำที่ผ่านการตกตะกอนและนำมากรอง สามารถกำจัดปรอทได้ 70% และเมื่อผ่านการดูดซับจากถ่านคาร์บอนพบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มเป็น 91% ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ในการกำจัดโครเมียม พบว่าโครเมียมประจุ +3 สามารถตกตะกอนได้ดี โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกอนของสารเคมีทั้ง 3 ชนิด และของทุกกระบวนการ 98 ถึง 99% ส่วนโครเมียมประจุ +6 มีการตกตะกอนที่ไม่ค่อยดีนัก การตกตะกอนไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้หมดต้องนำไปผ่านการดูดซับประสิทธิภาพจึงจะเพิ่มมากขึ้น ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11



**รูปที่ 3.9** แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทโดยวิธีการตกตะกอน (Maruyama และคณะ, 1975)



รูปที่ 3.10 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมประจุบวกสาม (Maruyama และคณะ, 1975)



รูปที่ 3.11 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมประจุบวกหก (Maruyama และคณะ, 1975)

Lanouete (1977) ได้เขียนบทความในการกำจัดโลหะหนัก โดยได้กล่าวถึงการตกตะกอนของปรอท โดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปของตะกอนซัลไฟด์ วิธีการทดลองเริ่มจากการนำน้ำเสียมาปรับค่าพีเอชให้อยู่ระหว่าง 5 - 6 ด้วยกรดซัลฟิวริก จากนั้นเติมโซเดียมซัลไฟด์ให้มีมากพอและเหลืออยู่ในน้ำเสียประมาณ 1 - 3 มก./ล. แล้วนำน้ำที่ผ่านการตกตะกอนไปกรองโดยใช้ Precoat Filter

ผลการทดลองนี้พบว่าสามารถกำจัดปรอทออกจากน้ำเสียได้ดี โดยมีความเข้มข้นของปรอทเหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วประมาณ 0.01 - 0.02 มก./ล.

Aslam และ Walker (1982) ได้ทำการศึกษาวิธีการในการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการทดลองหาค่าซีไอดี โดยมีวิธีการดังนี้

1. **การกำจัดเงิน** โดยนำน้ำเสีย 2 ลิตร มาเติมด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จำนวน 20 กรัม และกวนประมาณ 2 - 3 นาที กรองแยกน้ำส่วนบนกับตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ออกจากกันเพื่อนำตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์ไปทำการทดลองนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดเงิน 99.9% ล้างซิลเวอร์คลอไรด์ด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจาง 200 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น เพื่อกำจัดปรอทที่ตกค้าง แล้วทำให้แห้ง จากนั้นจึงเก็บไว้ใช้เพื่อนำเงินกลับต่อไป

2. **การนำเงินกลับมาใช้ใหม่** นำตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ประมาณ 100 กรัมมาเติมโลหะสังกะสี 50 กรัม แล้วเติมกรดซัลฟิวริก 4 นอร์มัล 500 มิลลิลิตร กรองผงเงินออกจากสารละลายซิงค์ซัลเฟต แล้วนำผงเงินมาเติมโลหะสังกะสีและกรดซัลฟิวริกในปริมาณเดิมอีกครั้ง และเติมกรดซัลฟิวริกเพิ่มอีกเพียงเล็กน้อย ทำให้ร้อนเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีสังกะสีปะปนในผงเงิน จากนั้นกรองแยกผงเงินออกและล้างด้วยน้ำกลั่น ความบริสุทธิ์ของเงินที่ได้ประมาณ 99.9% โดยยังมีปรอท สังกะสี และแคดเมียมปะปนเปื้อน ส่วนปรอทที่ปนเปื้อนนี้สามารถกำจัดออกจากผงเงินได้โดยให้ความร้อนถึง 500° C ดังแสดงในตารางที่ 3.10 และในการทดลองมีปริมาณเงินหายไป 0.5% ต่อจากนั้นนำผงเงิน 5.4 กรัม มาเติมกรดไนตริก 5 ถึง 8 มิลลิลิตร และน้ำกลั่นในปริมาณเดียวกัน แล้วนำไปต้มจนได้สารละลายใส ในกรณีที่สารละลายยังขุ่นเติมกรดไนตริกอีกจำนวนเล็กน้อยแล้วเติมกรดซัลฟิวริก 200 มิลลิลิตรและกวน จะได้ตะกอนขาวของซิลเวอร์ซัลเฟต จึงเติมกรดซัลฟิวริกอีก 800 มิลลิลิตรเพื่อให้ได้สารละลาย 1 ลิตร จะได้กรดซัลฟิวริกผสมซิลเวอร์ซัลเฟต สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าซีไอดีต่อไป

3. **การกำจัดปรอท** นำน้ำที่ผ่านการแยกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ออกแล้ว 1 ลิตร มาเติมเฟอร์รัสซัลไฟด์ 10 กรัม โดยต้องทำการทดลองในตู้ควีน เนื่องจากเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทิ้งไว้ประมาณ 2 - 3 ชั่วโมง ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนเมอร์คิวริกคลอไรด์เปลี่ยนรูปไปเป็นตะกอนดำของเมอร์คิวริกซัลไฟด์ ทำการกรองแยกออกจากน้ำส่วนบน ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทแสดงไว้ใน ตารางที่ 3.11 ซึ่งยังคงมีปรอทเหลืออยู่ในน้ำหลังการบำบัดมากกว่า 45 มก./ล. และมีประสิทธิภาพการกำจัดปรอทเฉลี่ย 98% ในขณะที่วิธีของ EPA ยังคงมีปรอทเหลืออยู่ในน้ำมากกว่า 97 มก./ล. และมีประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทเฉลี่ย 96.4%



ตารางที่ 3.10 แสดงปริมาณสารมลทินในผงเงิน

การทดสอบ ครั้งที่	ปริมาณสารในผงเงิน (%)				
	เงิน	สังกะสี	ปรอท	แคดเมียม	ปรอทหลังให้ความร้อน
1	99.86	0.030	0.071	0.0014	ND <sup>1</sup>
2	99.89	0.025	0.078	0.0010	ND <sup>1</sup>
3	99.86	0.023	0.085	0.0012	ND <sup>1</sup>
4	99.90	0.030	0.065	0.0010	ND <sup>1</sup>
5	99.93	0.021	0.076	0.0013	ND <sup>1</sup>
6	99.92	0.032	0.067	0.0015	ND <sup>1</sup>
7	99.90	0.034	0.063	0.0911	ND <sup>1</sup>
ค่าเฉลี่ย	99.89	0.0278	0.072	0.0012	ND <sup>1</sup>

ที่มา : Aslam และ Walker (1982)

ND<sup>1</sup> : น้อยจนตรวจวัดไม่ได้

4. การนำปรอทกลับมาใช้ใหม่ เติมกรดไฮโดรคลอริก 1 : 1 ลงในตะกอนเมอร์คิวริกซัลไฟด์ จะได้ตะกอนขาวของเมอร์คิวริกคลอไรด์ล้างด้วยน้ำกลั่นและต้มให้เดือดเพื่อละลายเมอร์คิวริกคลอไรด์และนำสารละลายมากรองอย่างรวดเร็ว แล้วทำให้เย็นจะได้ผลึกของเมอร์คิวริกคลอไรด์ จากนั้นละลายผลึกเมอร์คิวริกคลอไรด์ด้วยน้ำและเอทิลแอลกอฮอล์ 1 : 1 และตามด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล จะได้ตะกอนสีส้มของเมอร์คิวริกออกไซด์ นำตะกอนมาหยดด้วยกรดซัลฟิวริก จนกระทั่งตะกอนเปลี่ยนเป็นสีเหลืองของเมอร์คิวริกไดออกไซด์ซัลเฟต ( $\text{Hg}(\text{HgO})_2\text{SO}_4$ ) ซึ่งนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีได้ต่อไป

Okazaki (1983) กล่าวถึงระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ของประเทศญี่ปุ่น โดยนำน้ำเสียที่มีปรอทอยู่มากเติมสารเคมี ซึ่งได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ โซดาไฟ กรดซัลฟิวริก เฟอร์รัสซัลเฟต โซเดียมไฮโปคลอไรต์และโพลีเมอร์ น้ำเสียจะถูกนำไปยัง precoat filter โดยโลหะหนักจะอยู่ในตะกอนของเฟอร์ไรท์แยกออกมาจากน้ำ ส่วนน้ำใสจะนำไปยัง chelate resin tower เพื่อกำจัดปรอทและโลหะอื่นๆ ที่เหลืออยู่ในน้ำ จากนั้นทำน้ำให้เป็นกลางก่อนระบายทิ้งการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์โดยวิธีนี้

สามารถกำจัดปรอทได้อย่างมีประสิทธิภาพและกำจัดได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้คือต่ำกว่า 0.005 มก./ล.

ตารางที่ 3.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทจากน้ำเสียซีไอดีตามวิธีของ Aslam และ Walker กับวิธีที่ EPA แนะนำ (Aslam และ Walker, 1982)

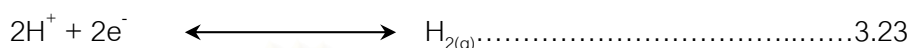
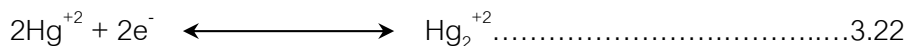
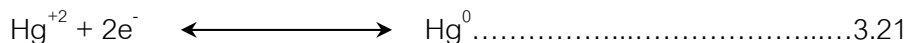
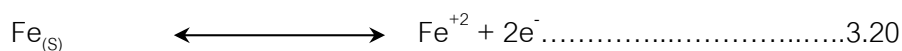
การทดลองที่	ความเข้มข้นของปรอท (Hg) ในน้ำเสียซีไอดี (มก./ล.)	ความเข้มข้นของปรอทหลังการบำบัด (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัดปรอท (%)	ความเข้มข้นของปรอทหลังการกำจัดโดยวิธีที่ EPA แนะนำ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพการกำจัดปรอท (%)	ประสิทธิภาพการกำจัดเงิน (%)
1	2940	50	98.3	108	96.4	99.9
2	3000	58	98.1	116	96.1	99.8
3	2890	45	98.4	110	96.2	99.9
4	3120	70	97.8	98	96.9	99.9
5	3050	65	97.9	120	96.1	99.9
6	3070	66	98.2	121	96.2	99.9
7	2860	54	98.2	105	96.4	99.8
8	2980	56	98.1	97	96.8	99.9
9	3250	68	97.9	130	96.0	99.9
10	3110	74	97.6	101	96.8	99.9
เฉลี่ย			98.0		96.4	

Hendrickson และคณะ (1984) ศึกษาการกำจัดเงินและปรอทจากน้ำเสียซีไอดีด้วยวิธีการตกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์และการออกซิเดชันเหล็ก ตามลำดับ โดยได้แนะนำวิธีการดังนี้

1. **การกำจัดเงิน** นำน้ำเสียซีไอดีมาเติมโซเดียมคลอไรด์ประมาณ 30 มิลลิโมลต่อลิตรนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 – 100 °C จนกระทั่งได้ตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ ทำสารละลายให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องแล้วกรองแยกตะกอนและน้ำส่วนบนออกจากกัน โดยมีความเข้มข้นของเงินเหลืออยู่ในน้ำเสียหลังการกำจัด 0.072 มก./ล. และมีประสิทธิภาพการกำจัด 99.99%

2. **การกำจัดปรอท** นำน้ำที่ผ่านการแยกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์มาเติมผงเหล็กอย่างน้อย 5.4 มิลลิโมลต่อลิตรน้ำเสีย ผงเหล็กจะเกิดการออกซิไดซ์และปลดปล่อยอิเล็กตรอน

ออกมา โดยปรอทจะนำอิเล็กตรอนนั้นไปใช้ในการรีดิวซ์ ปฏิริยาที่อาจเกิดขึ้นมีดังสมการที่ 3.20 ถึง 3.23



ทำการผสมกันนาน 24 ชั่วโมงจากนั้นนำไปกรองแยกน้ำส่วนบนออกจากตะกอนผสมของปรอท และเมอร์คิวรีสคัลไรต์ น้ำที่ผ่านการกรองนำไปปรับพีเอชให้มีค่าเป็น 7 ก่อนนำไปทิ้ง ความเข้มข้นของปรอทที่เหลืออยู่ในน้ำเสียหลังการกำจัดเท่ากับ 1.6 มก./ล. และมีประสิทธิภาพ ในการกำจัด 99.86%

Sund (1986) ได้กล่าวถึงระบบบำบัดน้ำเสียรวมของประเทศเดนมาร์ก ซึ่งใช้บำบัดน้ำเสีย จากแหล่งต่างๆ รวมทั้งโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ

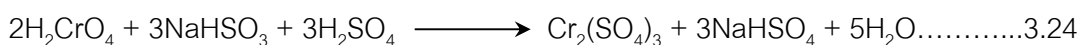
ในการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งมีโลหะหนักคือปรอทรวม อยู่ด้วย ได้ทำการบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ในปริมาณที่มากกว่าการคำนวณจาก ปฏิริยาเคมี 30% จากนั้นเติมคอปเปอร์ซัลเฟต โดยปริมาณที่เติมมากกว่าปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ ประมาณ 15% เพื่อป้องกันการเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากนั้นเติมโซดาไฟเพื่อปรับพีเอช ให้อยู่ในช่วงที่โลหะหนักจะตกตะกอนลงมาได้ ตะกอนของโลหะหนักจะอยู่ในรูปของซัลไฟด์ เช่น HgS

Yuan (1990) (อ้างถึงใน พงษ์รัตน์ แก้วล้อม, 2537) ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียซีโอดี เพื่อให้โลหะอยู่ในรูปตะกอนจากนั้นนำตะกอนของโลหะที่ได้ไปบำบัดต่อโดยใช้หลักการ หล่อซีเมนต์ (Cementation) ซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ (Portland cement) และ ปูนขาวผสมเถ้า จากเปลือกข้าว (Lime-rice Husk Ash)

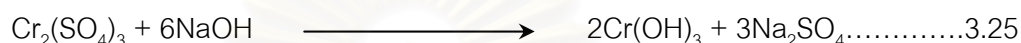
วิธีในการบำบัดน้ำเสียซีโอดี ทำดังนี้

1. นำน้ำเสียมาวัดปริมาณโครเมียมและปรอท
2. วัดพีเอช และปรับพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าน้อยกว่า 2 เพื่อให้เหมาะสมกับการรีดักชัน โครเมียมจากประจุ +6 เป็นโครเมียมประจุ +3 เพื่อให้สามารถตกตะกอนได้ดีในรูปของ ไฮดรอกไซด์

3. เติม  $\text{NaHSO}_3$  อย่างช้าๆ ใช้เวลาผสมสารเคมีประมาณ 10 นาที เพื่อให้เกิดการรีดักชัน ดังสมการที่ 3.24



4. เติม  $\text{NaOH}$  โดยใช้ commercial grade เพื่อปรับพีเอชจนมีค่าประมาณ 8.5 ซึ่งจะเกิดการตกตะกอนโลหะหนักอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 3.25



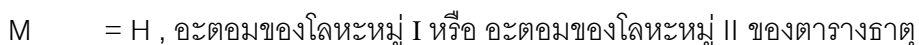
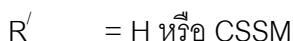
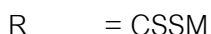
5. ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอน จากนั้นแยกตะกอนโลหะหนักออกจากน้ำเสีย

6. วัดความเข้มข้นของโครเมียมและปรอทในน้ำใสที่ผ่านการบำบัดและในตะกอน

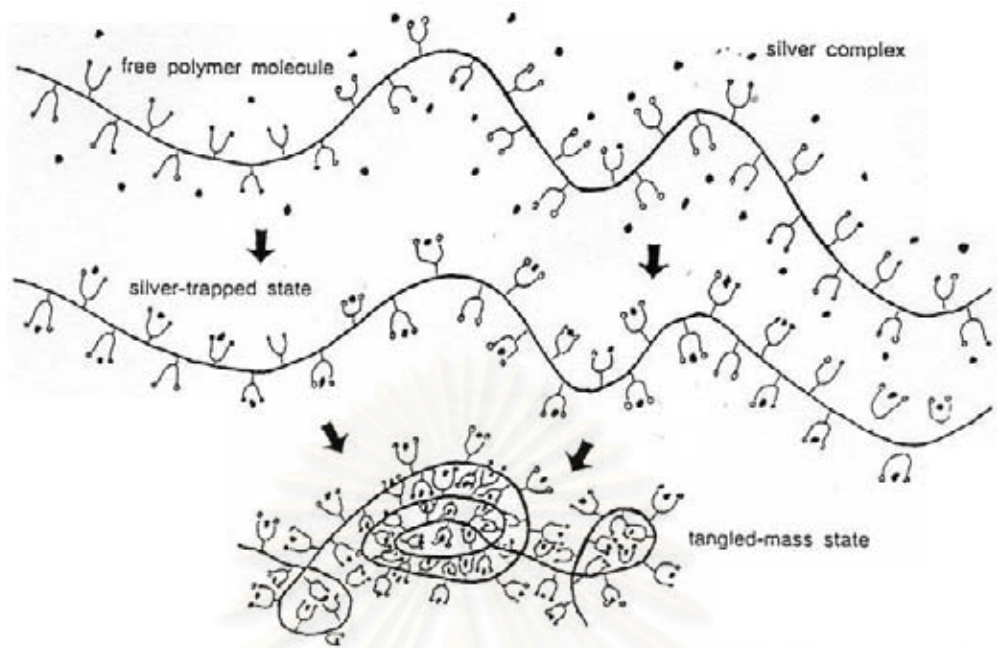
ของโลหะนำตะกอนของโลหะที่ได้ไปทำ Cementation

ผลการทดลองพบว่า ตะกอนโลหะหนักจะอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ และปริมาณปรอทในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีปริมาณน้อยกว่า 0.005 มก./ล. ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง

Nakamura และ Iwano (1995) ศึกษาการกำจัดเงินในน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างฟิล์มโดยใช้การตกผลึกด้วยกระบวนการซึ่งถูกเรียกว่า Self-Ripening Precipitating (SRP) ซึ่งก็คือการใช้สารตกผลึกที่มีลักษณะเฉพาะคือเป็นสารวินิลโพลีเมอร์แบบดีเนียร์ที่ถูกจับยึดด้วยกลุ่มไดไฮโอคาร์บาเมต ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำให้มันละลายน้ำได้ เมื่อกลุ่มไดไฮโอคาร์บาเมต (กลุ่มอะตอมที่ใช้จับเงิน) ทำปฏิกิริยากับอิออนของเงินก็จะทำให้สารโพลีเมอร์สูญเสียความสามารถในการละลายน้ำ (ตกผลึก) และสารโพลีเมอร์จะพันกันเป็นกลุ่มทำให้เกิดฟลอคขนาดใหญ่สามารถตกตะกอนได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมี ดังนี้



ส่วนกลไกในการกำจัดเงินแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงกลไกการตกผลึกเงิน (Nakamura และ Iwano, 1995)

**รูปบน** แสดงโมเลกุลโพลีเมอร์แบบลิเนียร์ที่ละลายน้ำ (มีกลุ่มอะตอมไดไฮโดรคาร์บาเมต) (วงกลมขาว) ซึ่งจะจับกับไอหะเงิน (จุดดำ)

**รูปกลาง** แสดงกลุ่มอะตอมไดไฮโดรคาร์บาเมตจับกับเงิน และเมื่อจับได้ปริมาณหนึ่งก็ทำให้โพลีเมอร์สูญเสียความสามารถในการละลายน้ำ

**รูปล่าง** แสดงสายยาวของโพลีเมอร์ตกผลึกพันกันเป็นกลุ่ม

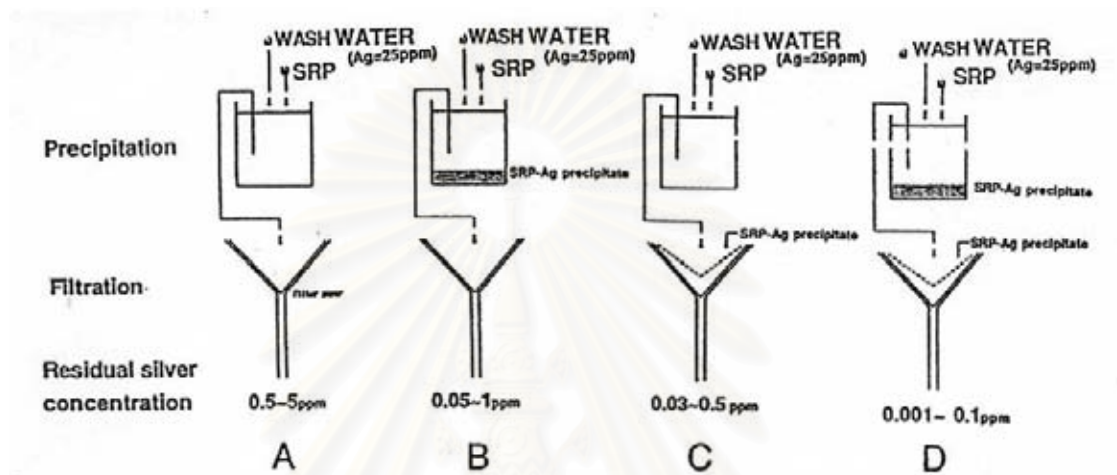
และผู้วิจัยยังได้ทดลองกำจัดไอหะเงินที่มีปริมาณเงินในน้ำเสียเท่ากัน คือ 25 มก./ล. และใส่สารตกผลึก SRP เหมือนกันทุกถังโดยทำการทดลองดังรูปที่ 3.13 ซึ่งอธิบายได้ว่า

**รูป A** แสดงการตกผลึกเงินโดยวิธีง่าย ๆ ไม่มีผลึกอยู่ในถังปฏิกริยาและที่ตัวกรอง (ซึ่งเป็นกระดาษกรองธรรมดา) พบว่าในน้ำที่ผ่านระบบยังมีปริมาณความเข้มข้นของเงินค่อนข้างสูงคือประมาณ 0.5 - 5 มก./ล. ทั้งนี้เนื่องจากยังคงมีผลึกบางส่วนที่มีขนาดเล็กมากยังไม่จับกันเป็นฟลอค จึงสามารถหลุดผ่านกระดาษกรองไปได้

**รูป B** มีชั้นผลึกอยู่ในถังปฏิกริยา พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดเงิน ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ที่มีปริมาณเงินบางส่วนถูกกำจัดด้วยกระบวนการดูดซับโดยชั้นผลึกที่มีอยู่ในถังทำปฏิกริยาทำให้มีปริมาณเงินในน้ำออกของระบบ 0.05 - 1 มก./ล.

รูป C น้ำจากถังปฏิบัติการผ่านตัวกรองที่มีชั้นผลึกอยู่ และเงินจะถูกจับไว้ในชั้นผลึกด้วย จึงพบว่าสามารถเพิ่มปฏิบัติการได้สูงขึ้นดังนั้นก็จะมีปริมาณเงินในน้ำที่ออกระบบ 0.03 - 0.5 มก./ล.

รูป D เป็นการรวมกันของแบบ B และ C คือมีชั้นผลึกทั้งในถังปฏิบัติการและในตัวกรอง พบว่าทำให้น้ำที่ออกจากระบบมีปริมาณเงินต่ำมากคือ ประมาณ 0.001 - 0.1 มก./ล. ซึ่งวัดโดยใช้ ICP



รูปที่ 3.13 แสดงผลของการกำจัดเงินโดยใช้สาร SRP (Nakamura และ Iwano, 1995)

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดเงินโดยใช้การกรองด้วย micro-filter (เมมเบรน) แบบ cross flow มีขนาดรู 0.45 ไมครอน และมีอัตราการกรอง 0.02 ml/cm<sup>2</sup>/min, Pressure range 0 - 0.8 kg/cm<sup>2</sup> แทนตัวกรองที่เป็นกระดาษกรองธรรมดา จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเงินดีขึ้น ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้ได้ถูกนำไปใช้กับห้องทดลองในญี่ปุ่นและเยอรมัน ซึ่งสามารถลดปริมาณของเงินให้เหลือความเข้มข้นต่ำถึง 0.01 มก./ล.

### ข้อได้เปรียบของการกำจัดเงินด้วยกระบวนการ SRP มีดังนี้

1. ได้น้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของเงินต่ำกว่าเทคโนโลยีที่ใช้กันอยู่ในขณะนั้น
2. สามารถตกผลึกได้เร็วมาก ซึ่งเร็วกว่ากระบวนการที่ใช้สารตกผลึกอย่างอื่น
3. ใช้อุปกรณ์ที่ไม่แพง (อุปกรณ์หลักมีแค่ ถังผสม และตัวกรอง) เท่านั้น
4. เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ดังนั้นสามารถใช้ได้กับห้องแล็บทั่วไป เนื่องจากไม่ต้องอาศัยบุคลากร ที่มีความรู้และความชำนาญมากนัก
5. ใช้สารเคมีที่ไม่อันตราย และไม่มีการปนเปื้อน (สาร SRP)

Henke (1998) ศึกษาการใช้ Thio-Red® ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางในการตกตะกอนผลึกโลหะหนักที่มีประจุ +2 ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ซึ่ง Thio-Red® มีลักษณะเป็นของเหลวสีส้ม-แดง ถึงแดงซึ่งมีพีเอชประมาณ 12 เมื่อเตรียมใหม่ๆ ซึ่งของเหลวนี้คือสารละลายของโซเดียม (กับหรือปราศจากโปตัสเซียม) ไธโอคาร์บอเนต ( $[\text{Na},\text{K}]_2\text{CS}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , เมื่อ  $n \geq 0$ ) Thio-Red<sup>(R)</sup> จะทำให้ได้ตะกอนผลึกของโลหะไฮโดรคาร์บอเนตที่เสถียร ( $\text{MCS}_3$  เมื่อ  $\text{M} = \text{Pb}^{+2}, \text{Cu}^{+2}, \text{Ni}^{+2}, \text{Cd}^{+2}, \text{Zn}^{+2}$  หรือโลหะประจุ +2 ตัวอื่น) ซึ่งอาจถูกทำให้เกิดขึ้นดังสมการที่ 3.26



เพื่อให้เข้าใจว่า Thio-Red<sup>(R)</sup> ทำปฏิกิริยากับโลหะประจุ +2 อย่างไรจึงทำการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้ Thio-Red® ลงไปในสารละลายที่มีสารประกอบของโลหะชนิดหนึ่งๆ ละลายอยู่ เช่นทองแดง ตะกั่ว พรอท และสังกะสี พบว่าในทุกสารละลาย จะมีการฟอร์มตัวของผลึกอย่างรวดเร็วหลังจากใส่ Thio-Red<sup>(R)</sup> ลงไป

จากผลการศึกษาในห้องแล็บได้ชี้บอกว่า Thio-Red<sup>(R)</sup> สามารถกำจัดโลหะ Cu, Hg, Pb และ Zn ที่ละลายอยู่ในน้ำได้เกือบจะทั้งหมด โดยการฟอร์มตัวเป็นโลหะซัลไฟด์ที่เสถียร คือ  $\text{CuS}$ ,  $\text{HgS}$ ,  $\text{PbS}$  และ  $\text{ZnS}$  มากกว่าที่จะเป็นโลหะไฮโดรคาร์บอเนต คือ  $\text{CuCS}_3$ ,  $\text{HgCS}_3$ ,  $\text{PbCS}_3$  และ  $\text{ZnCS}_3$  โดยนำตะกอนผลึกไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray diffraction และจากการตรวจสอบต่อไปพบว่าปฏิกิริยาอาจจะตอบสนองต่อการฟอร์มตัวของตะกอนผลึก

การตกผลึกของโลหะหนักด้วย Thio-Red<sup>(R)</sup> จะคล้ายคลึงอย่างมากกับวิธีที่ใช้โดยทั่วไป นั่นก็คือใช้  $\text{Na}_2\text{S} \cdot n\text{H}_2\text{O}$  หรือซัลไฟด์ของโลหะหมู่ 1 ตัวอื่นๆ ซึ่ง Thio-Red<sup>(R)</sup> จะมีประสิทธิภาพมากในการกำจัดโลหะหนักจากสารละลายถึงแม้ว่าจะมีการฟอร์มตัวเป็นโลหะไฮโดรคาร์บอเนตแค่ช่วงสั้นๆ ในน้ำที่ถูกบำบัดด้วย Thio-Red<sup>(R)</sup> แต่ก็มีความสำคัญน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความเสถียรและความมีอยู่อย่างท่วมท้นของโลหะซัลไฟด์

### สำหรับในประเทศไทยมีการศึกษาดังต่อไปนี้

**พวงรัตน์ แก้วล้อม (2537)** ศึกษาแนวทางการจัดการน้ำเสียซีไอดีในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งประกอบด้วยการรวบรวมข้อมูลน้ำเสียซีไอดีและแหล่งที่มาจากห้องปฏิบัติการจำนวน 20 แห่ง ในเขตกรุงเทพมหานคร โดยนำน้ำเสียมาทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหาวิธีที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียและในการนำกลับโลหะเงินโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ปริมาณ

4 เท่าของค่าสโตยซิโอมเมตริกในการตกตะกอนเงิน จากนั้นนำน้ำเสียที่แยกตะกอนเงินออกแล้วไปหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึกโดยเปรียบเทียบกันระหว่างการใช้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลจากการทดลองพบว่าสารเคมีที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยพีเอชที่เหมาะสมคือ 9.5 และเวลาในการตกตะกอน 150 นาที ส่วนสารที่ใช้ในการนำกลับโลหะเงินคือ ทองแดง ใช้ในปริมาณ 1.5 เท่าของค่าสโตยซิโอมเมตริก เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการนำกลับโลหะเงินมีค่า 70% ซึ่งสามารถนำกลับไปใช้ในการวิเคราะห์ซีโอได้อีก และผลจากการสำรวจพบว่า มีปริมาณน้ำเสียซีโอดีจากห้องปฏิบัติการที่ใช้วิธีการวิเคราะห์ซีโอดีแบบเปิดในแต่ละแห่งมีปริมาณเฉลี่ย 21.8 ลิตร/เดือน ซึ่งน้ำเสียดังกล่าวมีปริมาณปรอท โครเมียม และเงิน เท่ากับ 1,803.7, 700 และ 1,150 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ส่วนค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียพบว่า การส่งน้ำเสียไปบำบัดที่หน่วยบำบัดน้ำเสียส่วนกลางโดยคิดค่าใช้จ่ายเฉพาะค่าสารเคมีและค่าบำบัดตะกอนคือ 2.88 บาท/ตัวอย่าง หรือ 8.71 บาท/ลิตร แต่ถ้าคิดค่าใช้จ่ายรวมกับค่าวัสดุอุปกรณ์จะเท่ากับ 13.50 บาท/ตัวอย่าง หรือ 49.50 บาท/ลิตร

**ขนิษฐา ทวีถาวรสวัสดิ์ (2539)** ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกทางเคมี โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดและความเหมาะสมของสารเคมี 4 ชุดคือ โซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ โซเดียมไฮโอซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำการสำรวจและรวบรวมข้อมูลน้ำเสียซีโอดีจากห้องปฏิบัติการจำนวน 10 แห่ง

ผลการสำรวจพบว่า น้ำเสียจากห้องปฏิบัติการทั้ง 10 แห่ง มีน้ำเสียเฉลี่ย 44.14 ลิตร/เดือน มีปริมาณปรอท โครเมียม เงิน และเหล็ก เท่ากับ 1,341.20, 288.45, 921.10 และ 153.18 มก./ล. ตามลำดับ สารเคมีที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียคือการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮโอซัลเฟต 10 กรัมและปรับพีเอชเป็น 7 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50% น้ำหนักโดยปริมาตรต่อน้ำเสีย 500 มล. และทิ้งให้ตกตะกอนประมาณ 1 วัน ซึ่งจะมีปริมาณปรอท โครเมียม เงิน และเหล็กเหลือในน้ำเท่ากับ 0.001, 0.01, 0.50 และ 1.32 มก./ล. ตามลำดับและคิดเป็นประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะเท่ากับร้อยละ 100, 100, 99.96 และ 99.80 ตามลำดับ และจากการคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียด้วยโซเดียมไฮโอซัลเฟต 10 กรัมที่พีเอช 7 คิดเป็นค่าสารเคมีและค่าบำบัดกากตะกอนเท่ากับ 6,336.75 และ 58.90 บาท/น้ำเสีย 1 ลบ.ม. ตามลำดับ คิดเป็นค่าใช้จ่ายในการบำบัดรวมทั้งสิ้นเท่ากับ 6,395.65 บาท/น้ำเสีย 1 ลบ.ม. (ประมาณ 6.50 บาท/น้ำเสีย 1 ลิตร หรือ 1.95 บาท/ตัวอย่างการวิเคราะห์ซีโอดี)



**สุรรัตน์ ฅมยาศิริกุล (2540)** ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัด ปรอท โครเมียม และเหล็ก ในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ การทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. การทดลองหาพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยแปรค่าพีเอชเป็น 9, 10, 11, 12 และแปรค่าอุณหภูมิเป็น 55, 60, 65, 70 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตคงที่เท่ากับ 0.025 โมล
2. การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยแปรปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเป็น 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1 โมล และใช้พีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1 โดยกำหนดให้อัตราการเติมอากาศคงที่ 10 ลิตร/นาที่

ผลการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมคือ พีเอช 9 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของเฟอร์รัสซัลเฟตต่ออ็อกซิเจนทั้งหมดในน้ำเสียเท่ากับ 18.65 โดยมีปริมาณปรอท โครเมียม และเหล็ก หลังบำบัดมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.097, 0.329 และ 0.180 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดปรอท โครเมียม และเหล็กเท่ากับ 99.86% 97.87% และ 99.53% ตามลำดับ ปรอทยังคงเหลืออยู่เกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมเล็กน้อย ส่วนโครเมียมมีปริมาณเหลืออยู่ต่ำกว่ามาตรฐานดังกล่าว ผลการทดสอบการชะละลายพบว่า ความเข้มข้นของปรอทและโครเมียมในน้ำสกัดต่ำกว่ามาตรฐานของสารมีพิษของกระทรวงอุตสาหกรรม ลวดลายการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่า สารประกอบหลักของตะกอนที่ได้คือ แมกนีไทต์ ในกรณีที่มีการใช้ในโตรเจนจะได้ตะกอนเฟอร์ไรต์ที่มีความเป็นสารแม่เหล็กดีกว่า การไม่ใช้ในโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ แต่ให้ผลประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักไม่แตกต่างกัน อย่างเด่นชัด สำหรับค่าใช้จ่ายเฉพาะสารเคมีในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์โดยใช้ ไนโตรเจนมีค่าประมาณ 10.6 บาท/ลิตร (10,620 บาท/ลบ.ม. หรือ 3.18 บาท/ตัวอย่าง การวิเคราะห์ซีโอดี) ส่วนในกรณีไม่มีการใช้ในโตรเจน มีค่าใช้จ่ายประมาณ 9.35 บาท/ลิตร (9,350 บาท/ลบ.ม. หรือ 2.80 บาท/ตัวอย่างการวิเคราะห์ซีโอดี)

**สุรรัตน์ เพชรเกษม (2541)** ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีด้วยวิธีการ ตกตะกอนผลึกทางเคมี โดยใช้โซเดียมคลอไรด์เพื่อตกผลึกเงิน เฟอร์รัสซัลไฟด์เพื่อตกผลึกปรอท และโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อตกผลึกโครเมียม โดยมีความเข้มข้นของ เงิน ปรอท โครเมียม และเหล็กในน้ำเสียซีโอดี คือ 1,455, 940, 301 และ 725 มก./ล. ตามลำดับ

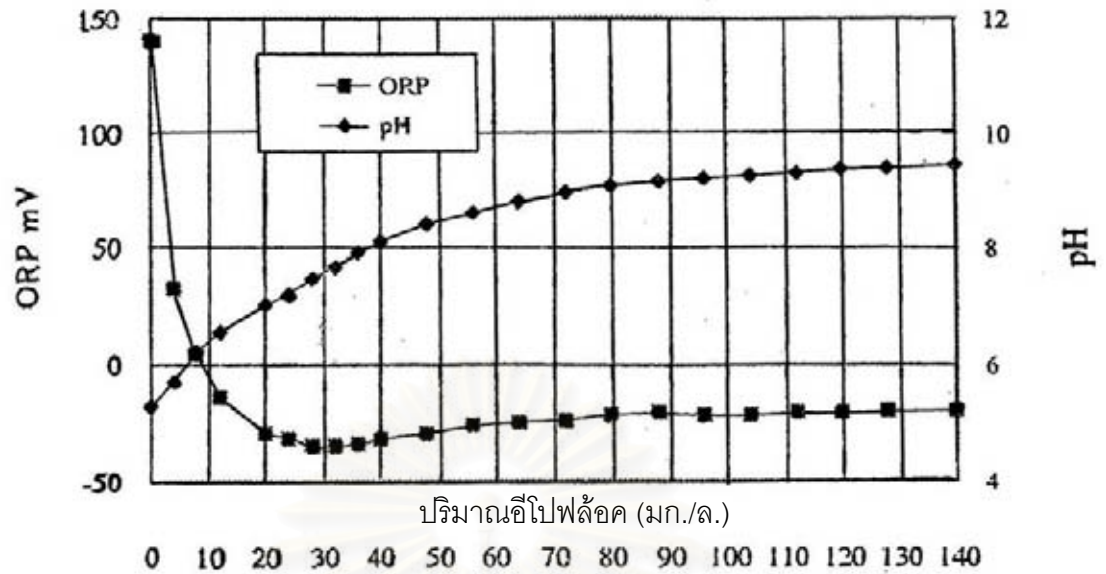
ผลการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมคือใช้โซเดียมคลอไรด์ 4 กรัม/ลิตร ที่พีเอช 0 สำหรับการตกผลึกเงิน ใช้เฟอร์รัสซัลไฟด์ 3 กรัม/ลิตร ที่พีเอช 0.5 สำหรับการตกผลึกปรอท และการใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มเข้าไป เพื่อปรับพีเอชเป็น 9 สำหรับตกผลึกโครเมียม

ลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วคือ พีเอช 9 ปริมาณของแข็งทั้งหมด 349,067 มก./ล. ปริมาณสารแขวนลอย 25 มก./ล. ปริมาณสารละลาย 349,042 มก./ล. และเหลือปริมาณเงิน โปรท โครเมียม และเหล็ก เท่ากับ 0.13, 0.001, 0.1 และ 40.5 มก./ล. ตามลำดับ ปริมาณซัลเฟต (ไม่พบซัลไฟด์) 195,000 มก./ล. ประสิทธิภาพของการกำจัดเงิน โปรท โครเมียม และเหล็กคือ 99.989%, >99.999%, > 99.967% และ 94.41% ตามลำดับ ราคาของสารเคมีที่ใช้คือ 10.25 บาท/ลิตรของน้ำเสีย

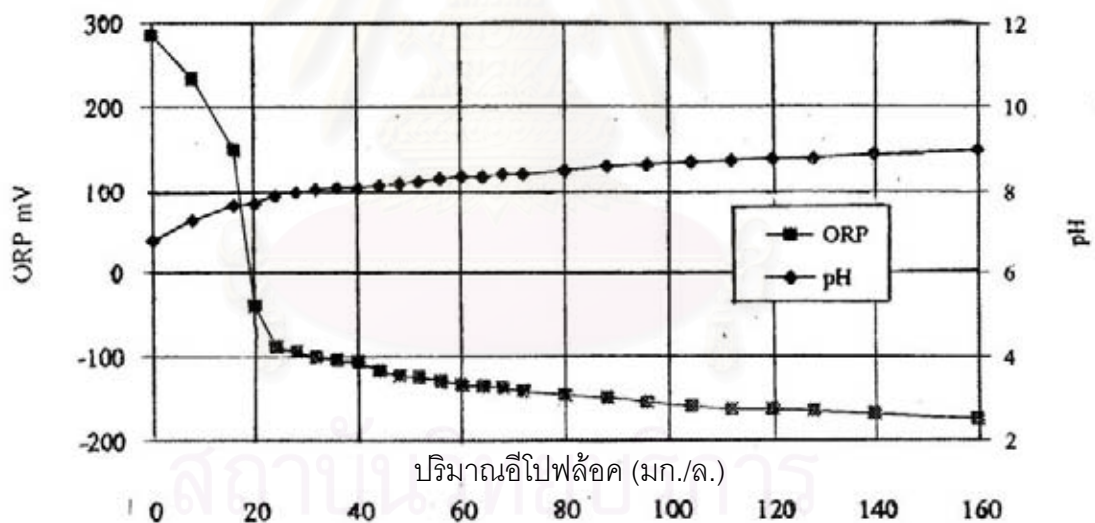
**มันสิน ตันทุลเวศม์ และ วุฒิ วิพันธ์พงษ์ (2542)** ศึกษาแนวคิดในการใช้ไออาร์พี ในการควบคุมปริมาณการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีชื่อว่า อีโปฟลอค L-1 (epofloc L-1) หรือ เรียกสั้นๆ ว่าอีโปฟลอค เพื่อใช้ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก เพื่อให้สามารถเลือกกระดပ် (ช่วง) ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการออกแบบทดสอบจาร์เทสต์ต่อไป โดยทำการทดสอบด้วยวิธีไตเตรชัน โดยการเติมอีโปฟลอค 1 : 100 หรือเข้มข้น 12 กรัม/ลิตร ที่ลดน้อยลงในน้ำ DI เพื่อดูลักษณะของฟลอคที่เกิดขึ้น ระดับพีเอชหรือไออาร์พีที่เปลี่ยนแปลงโดยกราฟไตเตรชันดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.14 ซึ่งอีโปฟลอคที่ใช้เป็นสารละลายต่างเจือจาง กราฟพีเอชจึงมีความชันไม่มาก แต่กราฟไออาร์พีจะลดอย่างรวดเร็วจากค่า +140 mV (ของน้ำ DI) ลงมาต่ำกว่าศูนย์จนได้ประมาณ -20 mV และค่อนข้างคงที่ เนื่องจากไม่มีปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำ DI และอีโปฟลอค จึงวิเคราะห์ได้ว่ากราฟที่ลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าคงที่ในเวลาต่อไป แสดงถึงอีโปฟลอคที่สะสมและแสดงว่าปฏิกิริยาถึงที่สุด

ยังได้ทดลองทำกราฟไตเตรชันของอีโปฟลอคในการกำจัดตะกั่วเข้มข้น 20 มก./ล. ในน้ำ DI แสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งกราฟที่ได้มีลักษณะเดียวกับกราฟของปฏิกิริยารีดักชันต่างๆ ที่การกำจัดตะกั่วด้วยอีโปฟลอคเกิดจากปฏิกิริยาคีเลชัน (หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาตกผลึกก็ได้) ซึ่งพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่าการกำจัดตะกั่วเกิดขึ้นสมบูรณ์ที่ไออาร์พีประมาณ -50 mV ซึ่งเท่ากับปริมาณอีโปฟลอคประมาณ 20 มก./ล. ซึ่งในระหว่างไตเตรชันจะสังเกตเห็นการเกิดฟลอคสีดำเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการลดลงของไออาร์พี ฟลอคสีดำจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อไออาร์พีเป็นลบ และเริ่มมีกลิ่นซัลไฟด์

การทดลองนี้ทำให้อาจสรุปได้ว่า ไออาร์พีน่าจะใช้เป็นพารามิเตอร์ควบคุมปริมาณการเติมอีโปฟลอคได้ แม้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่ใช่ปฏิกิริยารีดอกซ์ก็ตาม ซึ่งแนวคิดนี้อาศัยหลักการที่ว่า เมื่อปฏิกิริยากำจัดโลหะหนักถึงที่สุดแล้ว อีโปฟลอคที่เติมเกินไปจะเริ่มสะสมอยู่ในน้ำ ซึ่งวัดได้ด้วยค่าไออาร์พี เนื่องจากอีโปฟลอคเป็นรีดักแทนท์ จึงสามารถใช้ไออาร์พีเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงการปรากฏของอีโปฟลอค ซึ่งจะเกิดเมื่อกำจัดโลหะหนักหมดแล้ว และยังพบว่าปริมาณอีโปฟลอคที่ใช้



รูปที่ 3.14 กราฟไตเตรชันระหว่างน้ำ DI และอีโปฟลอค 1 : 100 หรือเข้มข้น 12 กรัม/ลิตร (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และ วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2542)



รูปที่ 3.15 กราฟไตเตรชันของอีโปฟลอคในการกำจัดตะกั่วเข้มข้น 20 มก./ล. ในน้ำ DI (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และ วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2542)

จะขึ้นอยู่กับปริมาณโลหะหนัก ซึ่งกราฟไตเตรชันระหว่างปริมาณอีโปฟลอคกับระดับไออาร์พี มีลักษณะคล้ายกราฟไตเตรชันของปฏิกิริยารีดอกซ์ทั่วไป ซึ่งถ้าตัวอย่างน้ำมีโลหะหนัก (ไม่มีไซยาไนด์) ค่าไออาร์พีมักจะเป็นบวกเนื่องจากออกซิเจนที่อยู่ในน้ำ เมื่อเริ่มเติมอีโปฟลอค โลหะหนักจะถูกกำจัดแต่ยังไม่หมดอีโปฟลอคส่วนใหญ่ใช้ไปในปฏิกิริยากำจัดโลหะหนักแต่อาจ

มีเหลืออยู่บ้าง ซัลไฟด์หรืออิมโพลต์ที่สะสมตัวในระบบทำให้ไออาร์พีมีค่าลดลง ต่อเมื่อปฏิบัติกรรยาถึงสมดุลย์ โลหะหนักถูกกำจัดหมดจึงมีอิมโพลต์เป็นอิสระและสะสม ค่าไออาร์พีจึงลดลงตามปริมาณอิมโพลต์ที่เติม และไออาร์พีควรมีค่าเป็นลบในกรณีที่น่าเสียมีค่าพีเอชเป็นกลางแต่ถ้าระดับพีเอชต่ำลงระดับไออาร์พีที่เหมาะสมจะมีค่าเป็นลบน้อยลงหรืออาจเป็นค่าบวกระดับต่ำๆ ได้

**สิริโสภา นิลพันธ์ (2542)** ศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนอิออนของโลหะหนักจากน้ำเสียที่รวบรวมได้จากห้องปฏิบัติการของการเรียนวิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไป 1 สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนมี 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยตกตะกอนให้อยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์ ในการศึกษาได้แบ่งน้ำเสียออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ น้ำเสียจากการทดลองหาแคทอิออนหมู่ 1 ซึ่งประกอบด้วยอิออน  $Ag^+$ ,  $Cr^{+3}$ ,  $Cr^{+6}$ ,  $Hg_2^{+2}$  และ  $Pb^{+2}$  น้ำเสียจากการทดลองหาแคทอิออนหมู่ 2 มีอิออน  $Bi^{+3}$ ,  $Cd^{+2}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $Hg^{+2}$  และ  $Pb^{+2}$  น้ำเสียจากการทดลองหาแคทอิออนหมู่ 3 มีอิออน  $Al^{+3}$ ,  $Co^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $Ni^{+2}$  และ  $Zn^{+2}$  และน้ำเสียจากการวิเคราะห์เกลือและสารผสมประกอบด้วย อิออน  $Ag^+$ ,  $Al^{+3}$ ,  $As^{+3}$ ,  $Cd^{+2}$ ,  $Co^{+2}$ ,  $Cr^{+3}$ ,  $Cr^{+6}$ ,  $Cu^{+2}$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $Ni^{+2}$ ,  $Pb^{+2}$  และ  $Zn^{+2}$

การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกศึกษาปริมาณและลักษณะน้ำเสียที่รวบรวมได้ ส่วนที่สองศึกษาพีเอชที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการตกตะกอนอิออนโลหะหนัก ส่วนที่สามศึกษาการใช้สารแอนไอออนิกโพลีเมอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและหาเวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนอิออนโลหะหนัก

ผลการศึกษาความเข้มข้นของอิออนโลหะหนักและปริมาณน้ำเสียพบว่าแต่ละห้องปฏิบัติการมีน้ำเสีย  $\leq 20$  ลิตร มีสภาพเป็นกรด และมีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะอยู่ระหว่าง 0 – 943 มก./ล.

ผลการศึกษาการตกตะกอนน้ำเสียที่ได้จากการทดลองหาแคทอิออนหมู่ 1 พบว่าสามารถตกตะกอนได้ดีในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ โดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ปรับให้น้ำเสียมีพีเอชเป็น 11 ยกเว้น  $Ag^+$  จะตกตะกอนได้ดีในรูปโลหะซัลไฟด์ที่พีเอช 11 อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของอิออน  $Hg_2^{+2}$  ที่เหลือยังไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง ส่วนน้ำเสียจากการทดลองหาแคทอิออนหมู่ 2 จะตกตะกอนอิออนโลหะหนักได้ดีในรูปโลหะซัลไฟด์ที่พีเอช 11 ยกเว้น  $Hg^{+2}$  จะตกตะกอนได้ดีในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ที่พีเอช 7 น้ำเสียจากการทดลองหาแคทอิออนหมู่ 3 ตกตะกอนได้ดีในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ที่พีเอช 9 – 10 และตกตะกอนในรูปโลหะซัลไฟด์ได้ดีที่

พีเอช 11 ส่วนน้ำเสียจากการวิเคราะห์เกลือและสารผสม อีออนโลหะตกตะกอนได้ดีในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ที่พีเอช 8 และ 11 ส่วนการตกตะกอนในรูปโลหะซัลไฟด์จะตกได้ดีที่พีเอช 8 และ 12 อย่างไรก็ตามความเข้มข้นอีออน  $As^{+3}$  และ  $Hg_2^{+2}$  ที่เหลือไม่ว่าจะตกตะกอนในรูปใดยังไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง

ผลการศึกษาการใช้สารแอนไอออนิกโพลีเมอร์ช่วยในการตกตะกอนโดยใช้น้ำเสียจากการทดลองหาแคทไอออนหมู่ 3 เป็นกรณีศึกษา พบว่าในกรณีที่ตกตะกอนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยปรับพีเอชเป็น 10 เวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนคือ 30 นาที ส่วนในกรณีที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการตกตะกอนและปรับพีเอชเป็น 11 เวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนคือ 4 ชั่วโมง โดยที่การวัดปริมาณอีออนของโลหะต่างๆ วัดโดยใช้เครื่อง ICP



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### แผนการดำเนินการวิจัย

การทดลองในการวิจัยนี้กระทำที่ห้องปฏิบัติการปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท โครเมียม เงิน และเหล็ก ด้วยสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ในชุดการทดลองแบบจาร์เทสต์ โดยทำการทดลองกับน้ำเสีย 5 ประเภท น้ำเสียประเภทที่ 1 - 4 เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยโลหะหนักแตกต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์ปรอท น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม น้ำเสียสังเคราะห์เงิน และน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก (น้ำเสียสังเคราะห์แต่ละชนิดจะประกอบด้วยโลหะหนักเพียง 1 ชนิดเท่านั้น) ส่วนน้ำเสียประเภทที่ 5 ได้แก่ น้ำเสียซีไอดีเจ็จจาง (น้ำเสียซีไอดีเจ็จจางในที่นี้หมายถึงการนำน้ำเสียซีไอดีเจ็จจางมาเจ็จจาง 10 เท่าด้วยน้ำประปา) ซึ่งประกอบด้วยโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดอยู่ร่วมกัน

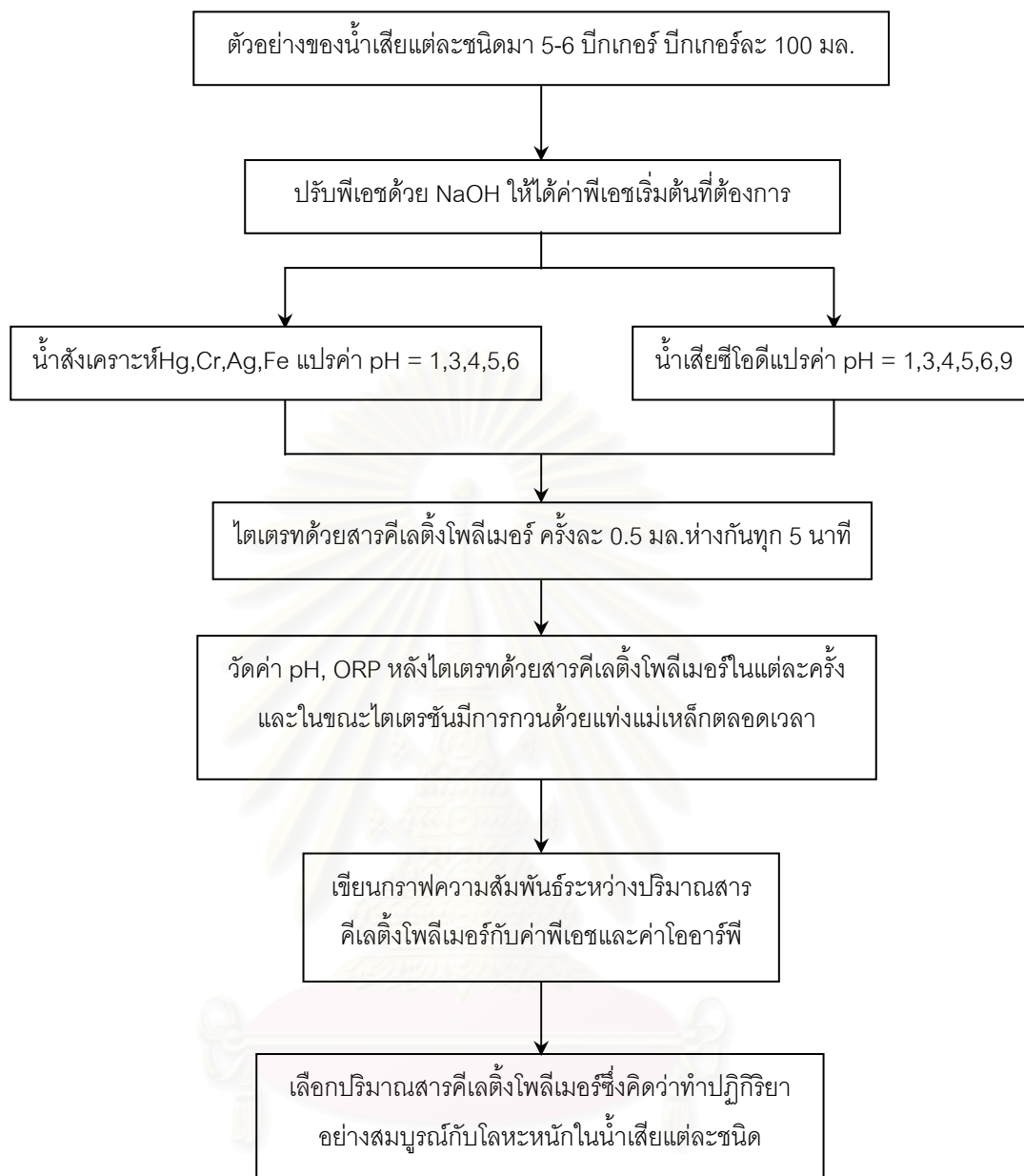
แผนการทดลองและขั้นตอนการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การทำกราฟไตเตรชัน การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด และการศึกษาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียแต่ละประเภท

ส่วนแผนการทดลองและขั้นตอนการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีเจ็จจางจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ซึ่งในขั้นตอนที่ 1 - 3 ทำการทดลองเหมือนกับน้ำเสียสังเคราะห์ ส่วนในขั้นตอนที่ 4 (ทำการทดลองเฉพาะในน้ำเสียซีไอดีเจ็จจางเท่านั้น) โดยเป็นการศึกษาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ (สารโพลีเมอร์ประจุบวก) ที่เหมาะสมต่อลักษณะและการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้น

##### 4.1.1 ขั้นตอนที่ 1 การทำกราฟไตเตรชัน

ทำการกราฟไตเตรชันระหว่างน้ำเสียแต่ละประเภทกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เมื่อน้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ โดยใช้ค่าไออาร์พีเป็นตัวบ่งชี้จุดยุติปฏิกิริยา เพื่อหาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์อย่างคร่าวๆ ซึ่งคิดว่าทำปฏิกิริยาอย่างพอดีกับโลหะหนักในน้ำเสีย เนื่องจากต้องนำปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่หาได้ดังกล่าวไปทำการทดลองในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งเป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียในแต่ละประเภทด้วยสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์

ขั้นตอนการทำการทดลองในขั้นนี้แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.1 วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 1 เป็นการทำการกราฟไตเตรชัน

- นำตัวอย่างน้ำเสียแต่ละประเภทมา 100 มล. ปรับพีเอชเริ่มต้นให้ได้ค่าพีเอชเริ่มต้นตามที่ต้องการ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50% เป็นสารปรับพีเอชในช่วงที่ค่าพีเอชยังเปลี่ยนแปลงไม่เร็วมาก หลังจากนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางปรับพีเอชเพื่อให้ได้ค่าพีเอชที่ต้องการ

- ไตเตรทตัวอย่างน้ำข้างต้นด้วยสารละลายคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่มีความเข้มข้น 24 กรัม/ลิตร โดยไตเตรทด้วยสารละลายคีเลตติ้งโพลีเมอร์ครั้งละ 0.5 มล.ทำการกวนด้วย

แห่งแม่เหล็กตลอดเวลาเมื่อได้ประมาณ 5 นาที บันทึกค่าไออาร์พีและพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไป ก่อนที่จะได้เตรตด้วยสารละลายคลอรีนไดออกไซด์ 0.5 ม.ล. อีกครั้ง (แต่ละครั้งห่างกันประมาณ 5 นาที) และทำการไตเตรทไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าไออาร์พีมีแนวโน้มที่จะคงที่

- เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ที่ให้กับค่าพีเอชและไออาร์พีที่ได้จุดบิ้นทิกไว้
- นำเสียดแต่ละชนิดจะทำกราฟไตเตรชันประมาณ 5 ชุด ซึ่งแต่ละชุดได้จากการแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย 5 ค่า ยกเว้นน้ำเสียซีไอดีเจ็อบจะทำการแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้น 6 ค่า
- วิเคราะห์กราฟไตเตรชันและเลือกปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ซึ่งคิดว่าน่าจะทำปฏิกิริยาอย่างพอดีกับโลหะหนักในน้ำเสีย

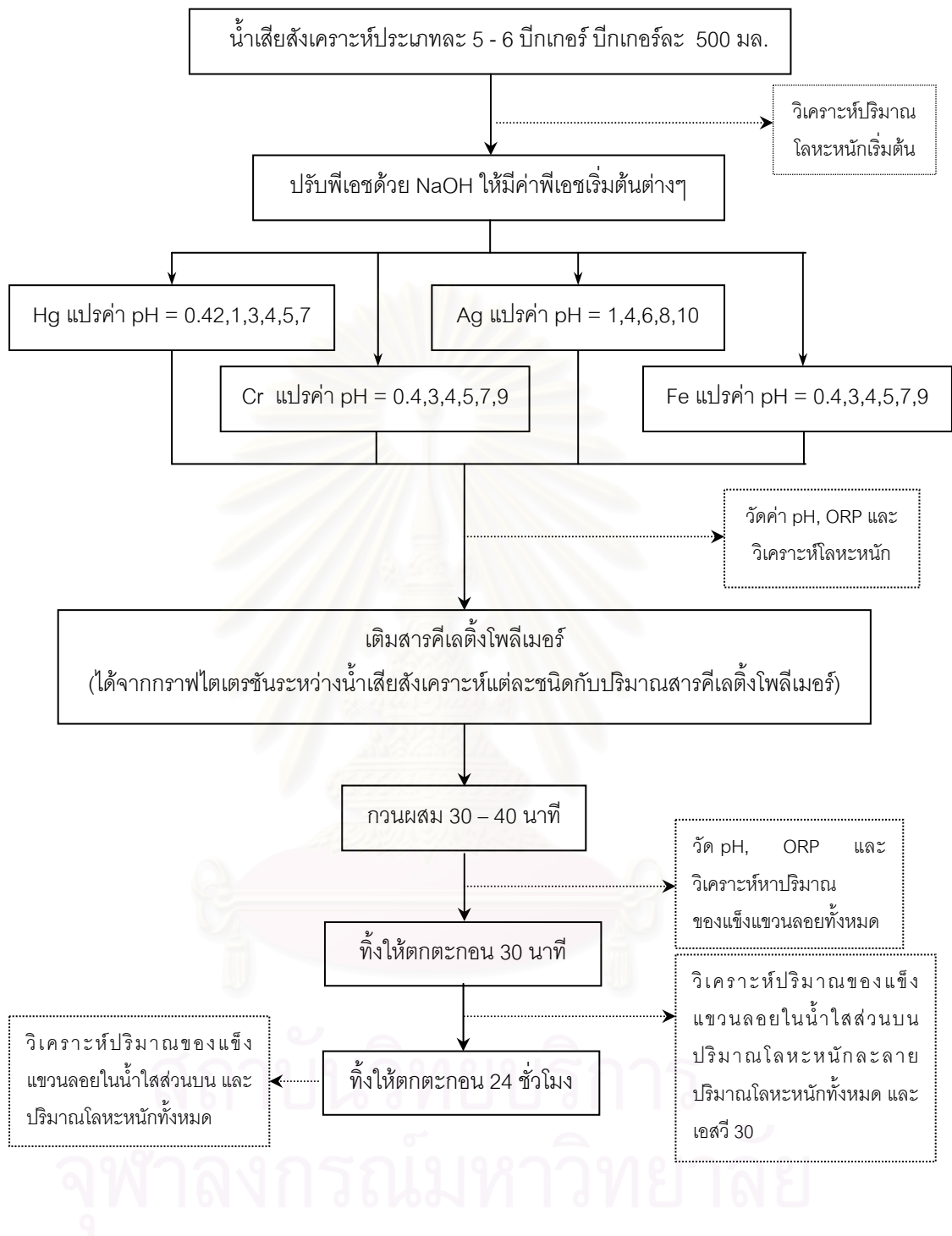
#### 4.1.2 ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด

การทดลองในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดด้วยสารคลอรีนไดออกไซด์ ซึ่งกระทำโดยการแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียในแต่ละประเภท ประเภทละ 5 - 7 ค่า โดยกำหนดการใช้สารคลอรีนไดออกไซด์ให้คงที่ ปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ได้จากผลการทำกราฟไตเตรชันจากขั้นตอนที่ 1

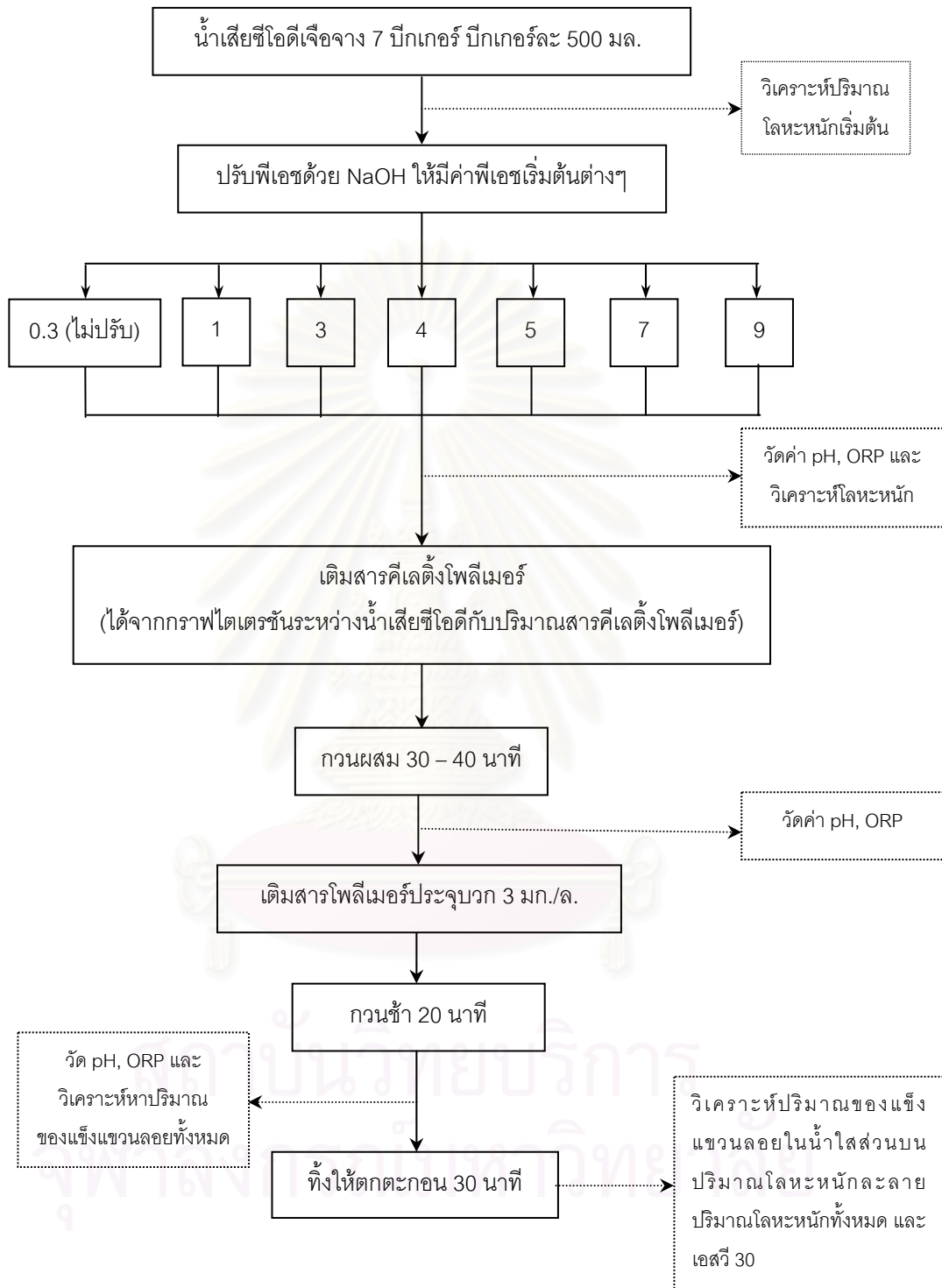
ขั้นตอนการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.2 ส่วนขั้นตอนการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีเจ็อบมีความแตกต่างไปเล็กน้อยแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยที่การทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์นั้นจะไม่มีสารโคแอกกูแลนต์ตั้งแต่แรก (หลังจากการเติมสารคลอรีนไดออกไซด์) แต่ถ้าของแข็งแขวนลอยของชุดการทดลองใดตกตะกอนไม่ได้ จึงจะนำชุดการทดลองนั้นมาลองทำการทดลองเพิ่มเติมโดยการเติมสารโคแอกกูแลนต์ในภายหลังว่าจะช่วยให้ของแข็งแขวนลอยตกตะกอนดีขึ้นหรือไม่ ส่วนน้ำเสียจริงจะมีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ในขั้นตอนหลังจากการเติมสารคลอรีนไดออกไซด์ก่อนที่จะนำไปทิ้งให้ตกตะกอน

สำหรับการเลือกชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ ได้จากการทดลองก่อนหน้า (pre-test) ซึ่งสนใจเฉพาะลักษณะของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นเท่านั้น เช่น ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนหลังการตกตะกอน ความเร็วในการตกตะกอน ขนาดของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้น เป็นต้น ซึ่งจากการทดสอบในห้องต้นโดยใช้สารส้ม สารโพสิเมอร์ประจุลบ และสารโพสิเมอร์ประจุบวกเป็นสารโคแอกกูแลนต์ พบว่าการใช้สารโพสิเมอร์ประจุบวกให้ผลเป็นที่น่าพอใจที่สุด คือทำให้ได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ และสามารถตกตะกอนได้เร็วกว่าสารโคแอกกูแลนต์ชนิดอื่นดังนั้นจึงเลือกใช้สารโพสิเมอร์ประจุบวกเป็นสารโคแอกกูแลนต์กับงานวิจัยนี้





รูปที่ 4.2 วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษามลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละประเภท



รูปที่ 4.3 วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษามวลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง

การทดลองในขั้นตอนที่ 2 มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

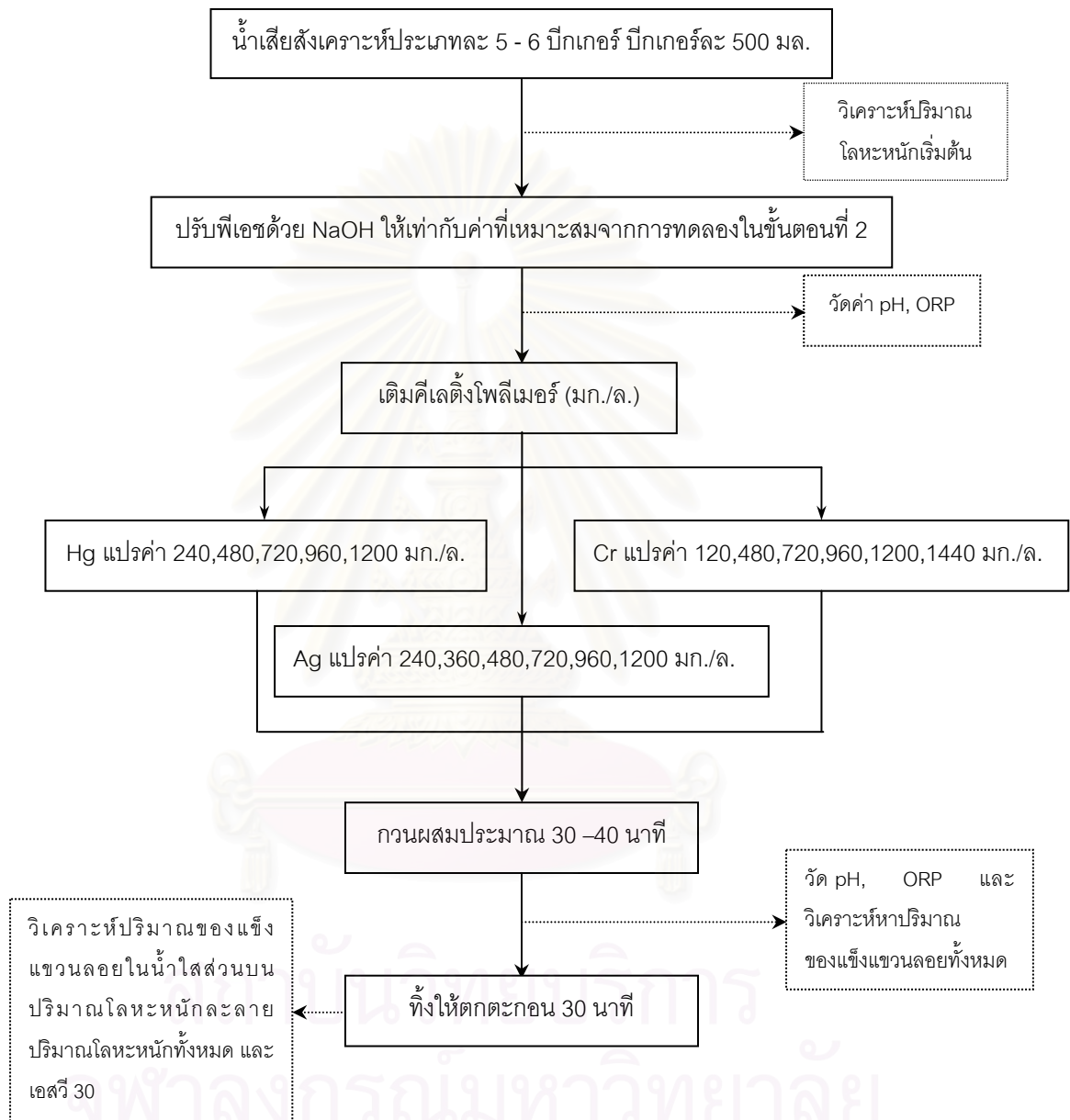
- นำน้ำตัวอย่างในแต่ละประเภทมา 5 - 7 ปีกเกอร์ แต่ละปีกเกอร์มีปริมาตรเท่ากับ 500 มล. โดยใส่ในปีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร
- ปรับพีเอชของน้ำตัวอย่างข้างต้นให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นตามที่ต้องการ 5 - 7 ค่า (แล้วแต่ชนิดของน้ำเสีย) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50% เป็นสารปรับพีเอช ในช่วงที่ค่าพีเอชยังเปลี่ยนแปลงไม่เร็วมาก หลังจากนั้นจึงใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางปรับพีเอชเพื่อให้ได้ค่าพีเอชที่ต้องการ (น้ำเสียทั้ง 5 ชนิดมีค่าพีเอชน้อยกว่า 1)
- เติมหีเลติ่งโพลีเมอร์ลงในแต่ละชุดการทดลองด้วยปริมาณคงที่ (ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยการทำการกราฟไตเตรชันระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์กับคิเลติ่งโพลีเมอร์) และกวนผสมเป็นเวลา 30 - 40 นาที บันทึกค่าพีเอชและไออาร์พีที่ได้และวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เกิดขึ้น
- ถ้าเป็นการทดลองกับน้ำเสียซีโอดีเจือจาง จะมีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ (สารโพลีเมอร์บวก) 3 มก./ล. และกวนผสม (กวนช้า) ประมาณ 20 นาที บันทึกค่าพีเอชและไออาร์พีที่ได้
- หยุดการกวนผสม เทน้ำจากปีกเกอร์ใส่ในกระบอกตวงขนาด 500 มล. ทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที และทำการวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำใส ปริมาณโลหะหนักละลาย (กรองผ่านเยื่อเมมเบรน 0.45 ไมครอน) และปริมาณโลหะหนักทั้งหมด ในน้ำใสส่วนบน พร้อมทั้งหาค่าเอสวี 30 ด้วย
- สำหรับในชุดการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์จะทิ้งให้ตกตะกอนนานขึ้นเป็น 24 ชั่วโมง (ถ้าหลังจาก 30 นาทีที่ยังตกตะกอนได้ไม่ดี) และทำการวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบน
- สำหรับในชุดการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ จะทำการทดลองเพิ่มเติมโดยใช้สารโคแอกกูแลนต์ช่วยในการรวมตะกอน (โดยเฉพาะชุดการทดลองที่มีของแข็งแขวนลอยตกตะกอนได้ไม่ดีนัก) ซึ่งทำโดยเทน้ำตัวอย่างที่เหลือจากการตกตะกอน 24 ชั่วโมงลงในปีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร และเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวกประมาณ 3 มก./ล. และกวนผสม (กวนช้า) ประมาณ 20 นาที จึงหยุดกวนและทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที สังเกตลักษณะของของแข็งแขวนลอย พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบน
- วิเคราะห์และเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสมเพื่อนำไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป (ขั้นตอนที่ 3) ซึ่งเป็นการศึกษาหาปริมาณสารคิเลติ่งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียแต่ละชนิด

### 4.1.3 ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาปริมาณคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด

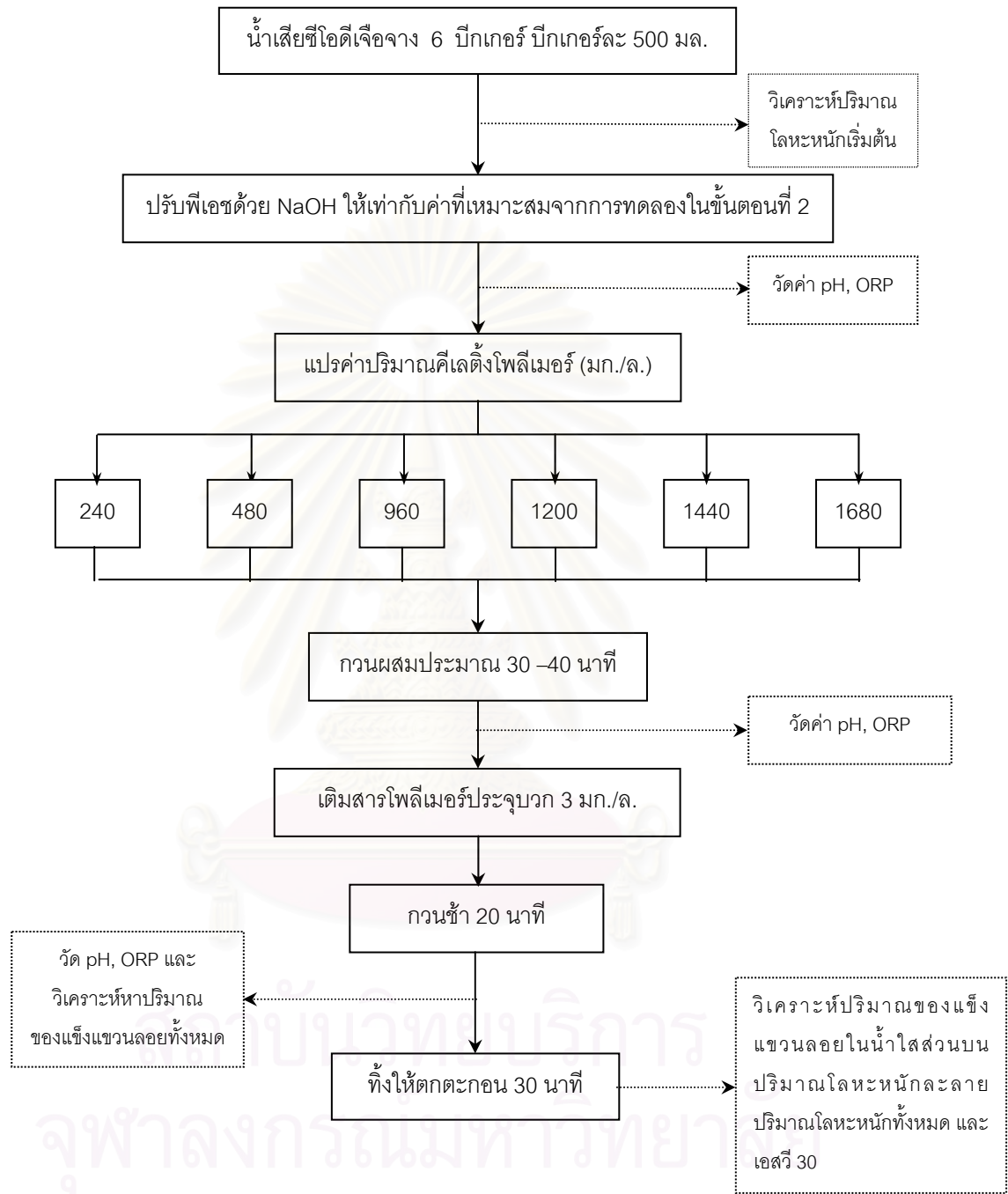
ศึกษาผลของปริมาณคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียแต่ละประเภท โดยแปรค่าปริมาณคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์อย่างน้อย 5 ค่า และกำหนดค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม ซึ่งได้จากผลการทดลองในขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.4 ส่วนการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีเจ็จจาง มีความแตกต่างกับน้ำเสียสังเคราะห์เล็กน้อย กล่าวคือการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีเจ็จจางมีการเติมสารโคแอกกูแลนต์หลังขั้นตอนการเติมสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5

การทดลองในขั้นตอนที่ 3 มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- นำตัวอย่างน้ำเสียในแต่ละประเภทมา 5 – 6 บีกเกอร์ แต่ละบีกเกอร์มีปริมาตรเท่ากับ 500 มล. โดยใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร
- ปรับพีเอชของน้ำตัวอย่างข้างต้นให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีความเหมาะสมกับการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียแต่ละประเภท ซึ่งได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารปรับพีเอช (น้ำเสียทั้ง 5 ประเภทมีค่าพีเอชน้อยกว่า 1)
- เติมสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ในแต่ละชุดการทดลองโดยการแปรผันปริมาณสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ 5 – 6 ค่า สำหรับน้ำเสียแต่ละประเภท และกวนผสมเป็นเวลา 30 – 40 นาที พร้อมทั้งบันทึกค่าพีเอช ไออาร์พีที่ได้ และทำการวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เกิดขึ้น
- ถ้าเป็นการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีเจ็จจาง จะมีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ (สารโพลีเมอร์บวก) 3 มก./ล. และกวนผสม (กวนช้า) ประมาณ 20 นาที และบันทึกค่าพีเอชและไออาร์พีที่ได้
- หยุดการกวนผสม เติมน้ำจากบีกเกอร์ใส่ในกระบอกตวงขนาด 500 มล. ปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที และทำการวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณโลหะหนักละลาย (กรองผ่านเยื่อเมมเบรน 0.45 ไมครอน) และปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในน้ำใส่ส่วนบน พร้อมทั้งหาค่าเอสวี 30 ด้วย
- วิเคราะห์และเลือกปริมาณสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียแต่ละประเภท สำหรับการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีเจ็จจางจะต้องนำค่าปริมาณสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป (ขั้นตอนที่ 4) ซึ่งเป็นการศึกษาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม



รูปที่ 4.4 วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 3 เป็นการศึกษหาปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละประเภท

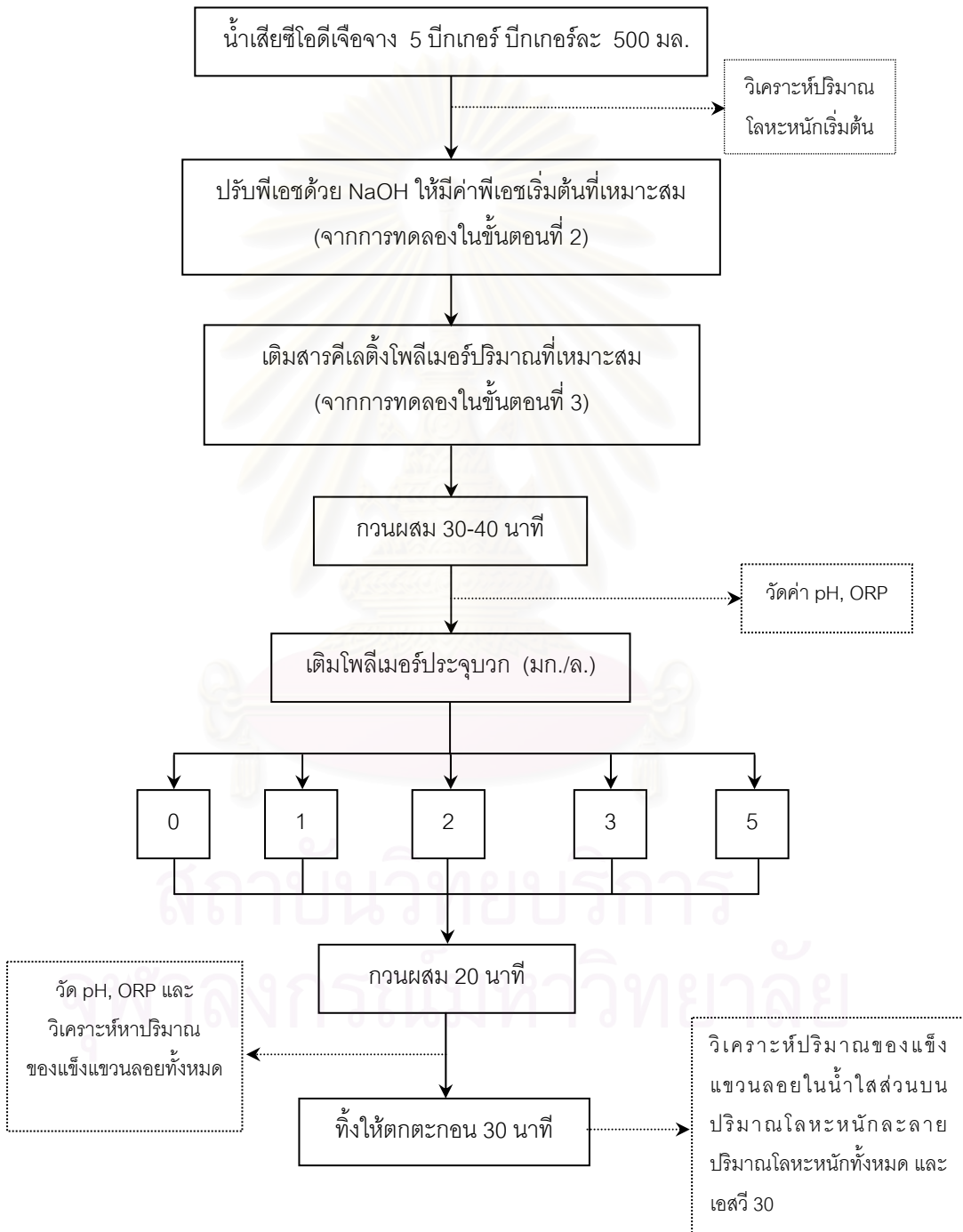


รูปที่ 4.5 วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 3 เป็นการศึกษาหาปริมาณสารซีเลดิงโพลีเมอร์ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง

#### 4.1.4 ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง

ศึกษาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีเจือจางด้วยสารคัลเลคติ้งโพลีเมอร์ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีเจือจางเท่านั้น โดยแปรค่าปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ 5 ค่า และกำหนดค่าพีเอชเริ่มต้นและปริมาณสารคัลเลคติ้งโพลีเมอร์เท่ากับค่าที่เหมาะสม จากผลการทดลองในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 4 แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วิธีการทดลองในขั้นตอนที่ 4 เป็นการศึกษาหาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

#### 4.2 ลักษณะของน้ำเสียแต่ละประเภท

ลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสียแต่ละประเภทที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของน้ำเสียในแต่ละประเภทซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้

ประเภทน้ำเสีย	ลักษณะและองค์ประกอบของน้ำเสีย					
	ปรอท	โครเมียม	เงิน	เหล็ก	ฟิเซ	ไออาร์พี
น้ำเสียสังเคราะห์ปรอท	150	-	-	-	0.42	615
น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม	-	33	-	-	0.40	320
น้ำเสียสังเคราะห์เงิน	-	-	222	-	0.41	608
น้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก	-	-	-	135	0.40	466
น้ำเสียซีไอดีเจ็จาง*	185	44	209	139	0.38	596

\* คือ ค่าที่ได้จากการเจ็จางน้ำเสียซีไอดีจริง 10 เท่า

หมายเหตุ : วิธีเตรียมน้ำเสียแต่ละประเภทรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข

#### 4.3 สารคิเลตติ้งโพลีเมอร์

สารคิเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ EPOFLOC L-1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.3.1 คุณสมบัติทั่วไป

ลักษณะที่เห็น	:	ของเหลวใสสีเหลืองอ่อน
ความถ่วงจำเพาะ	:	1.2 – 1.25 ที่อุณหภูมิ 25 ° ซ
ฟิเซ (สารละลาย 10 %)	:	11.0 – 11.8
ความหนืด	:	25 – 50 cps ที่อุณหภูมิ 25 ° ซ
ช่วงฟิเซที่ใช้ได้	:	3 – 10
น้ำหนักโมเลกุล	:	80,000 – 120,000
น้ำหนักสมมูลย์	:	165 กรัม/สมมูลย์
สารคิแลนท์	:	-NH-CS <sub>2</sub> Na, -SNa
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ได้	:	-20° ซ ถึง 180° ซ

##### 4.3.2 สารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ร่วมกับ EPOFLOC L-1

โคแอกกูแลนต์ที่ใช้ร่วมกับ EPOFLOC L-1 ในงานวิจัยนี้ได้แก่ โพลีเมอร์ประจุบวก (ชนิด Medium Charge) เพื่อทำให้เกิดฟลอคสมบูรณ์ยิ่งขึ้น



#### 4.3.3 การเตรียมสารละลาย EPOFLOC L-1 ที่ใช้ในการทดลองนี้

เนื่องจากสาร EPOFLOC L-1 เป็นสารอินทรีย์โพลีเมอร์ที่มีไดไฮโดรคาร์บาเมตเป็นส่วนประกอบหลัก จะมีความเสถียรถ้าอยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง เพราะถ้าอยู่ในสภาวะที่มีพีเอชต่ำกว่า 6 มันจะสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว และควรเก็บไว้ในที่เย็นและมีแสงน้อยเพราะจะสลายตัวได้ง่ายเมื่อโดนความร้อนหรือแสงและจะไม่คงตัวอยู่ได้นานเมื่อละลายอยู่ในน้ำโดยจะค่อยๆ สลายตัวไปเป็นสารประกอบของคาร์บอนและไนโตรเจน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเก็บสาร EPOFLOC L-1 ไว้ในตู้เย็น โดยจะแบ่งมาใช้ทีละน้อย จากนั้นก่อนใช้จะนำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น 24 กรัม/ลิตร (1 : 50) ซึ่งมีค่าพีเอชและไอออนพีเอชภายหลังการเจือจางเท่ากับ 11.5 และ -500 ถึง -520 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ

#### 4.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

##### 4.4.1 ตัวแปรอิสระ

- ตัวแปรอิสระที่ต้องกำหนดให้คงที่ คือ
  - ♦ ประเภทของน้ำเสีย ได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์ (ปรอท โครเมียม เงิน และ เหล็ก) และน้ำเสียซีไอดีเจือจาง (นำน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดีมาเจือจาง 10 เท่า)
  - ♦ ชนิดของสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ NaOH คีเลตติ้งโพลีเมอร์ (ที่มีชื่อทางการค้าว่า EPOFLOC L-1) และโพลีเมอร์ประจุบวก (Cationic Polymer ชนิด Medium Charge) ชื่อ Waterfloc<sup>®</sup> WF-2498 ของบริษัท Water Doctor Co.Ltd.
- ตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา คือ
  - ♦ ปริมาณสารเคมีที่ใช้
  - ♦ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

##### 4.4.2 ตัวแปรกำหนด

- ♦ อุปกรณ์จาร์เทสต์
- ♦ ชุดอุปกรณ์สำหรับการทำไตเตรชัน
- ♦ เวลาในการกวนผสมระหว่างน้ำเสียกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์
- ♦ เวลาในการกวนผสมระหว่างน้ำเสียกับสารโพลีเมอร์บวก (โคแอกกูแลนต์)
- ♦ เวลาในการตกตะกอน

#### 4.4.3 ตัวแปรตามที่ต้องวิเคราะห์

- ◆ พีเอช
- ◆ ไออาร์พี
- ◆ ปริมาณโลหะหนัก
- ◆ ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น (SV30)
- ◆ ของแข็งแขวนลอยในน้ำส่วนบนและของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

#### 4.5 วิธีวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ

ตัวแปรต่างๆ และวิธีที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตัวแปรที่วิเคราะห์และวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตัวแปร	วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์
พีเอช	มาตรวัดพีเอช
ไออาร์พี (mV)	มาตรวัดไออาร์พี
ความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำเสีย (มก./ล.)	Atomic Absorption Spectrometer
ปรอท	Hydride Generation
โครเมียม	Direct Air-Acetylene Flame Method
เงิน	Direct Air-Acetylene Flame Method
เหล็ก	Direct Air-Acetylene Flame Method
ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นทั้งหมด (มล./มล.ของน้ำเสีย) [SV30]	ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนในกระบอกตวง 500 มล.
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มก./ล.)	วิธี Gravimetric
ของแข็งแขวนลอยในน้ำส่วนบน (มก./ล.)	วิธี Gravimetric

#### 4.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีดังนี้

- ◆ เครื่องอะตอมมิก แอบซอร์พชัน สเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) รุ่น Analyst 800 ของบริษัท Perkin Elmer Co.,Ltd.
- ◆ จาร์เทสต์
- ◆ เครื่องกวน และแท่งแม่เหล็ก
- ◆ เครื่องวัดพีเอช ; HORIBA pH METER F-13

- ◆ เครื่องวัดโออาร์พี ;  $\Omega$  Metrohm 744
- ◆ เครื่องชั่งสารแบบละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- ◆ ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 103 – 105 องศาเซลเซียส
- ◆ กระดาษกรอง GF/C, เยื่อกรอง (membrane) ขนาดรู 0.45 ไมครอน ขนาด 4.7 ซม.
- ◆ เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction Pump) และกรวยบุคเนอร์ (Buchner Funnel)
- ◆ โถทำแห้ง (Desiccator) พร้อมสารดูดความชื้น
- ◆ เต้าไฟฟ้า (Hot Plate)
- ◆ เครื่องอังน้ำ (Water Bath)
- ◆ เครื่องแก้วต่าง ๆ
- ◆ ขวดพลาสติก สำหรับใส่น้ำตัวอย่าง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักโดยใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ ซึ่งแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ การศึกษากับน้ำเสียสังเคราะห์ และการศึกษา กับน้ำเสียซีโอดีเจือจาง การศึกษากับน้ำเสียสังเคราะห์เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด โดยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการศึกษาได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์ปรอท น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม น้ำเสียสังเคราะห์เงิน และน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก (น้ำเสียสังเคราะห์แต่ละประเภทประกอบด้วยโลหะหนักเพียงชนิดเดียวเท่านั้น) ส่วนการศึกษากับน้ำเสียซีโอดีเจือจางเป็นการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดพร้อมๆ กัน ได้แก่ ปรอท โครเมียม เงิน และเหล็ก

น้ำเสียซีโอดีเจือจางในที่นี้หมายถึงการนำน้ำเสียซีโอดีมาเจือจาง 10 เท่าด้วยน้ำประปา เหตุผลที่จะต้องทำการเจือจางน้ำเสียซีโอดีก่อนนำมาบำบัด ดูเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ก. ซึ่งโดยปกติแล้วโลหะหนักแต่ละชนิดอาจมีได้หลายรูป เช่น โครเมียมอาจพบได้ทั้งในรูปของโครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ ( $\text{Cr}^{+6}$ ) และโครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ ( $\text{Cr}^{+3}$ ) ส่วนเหล็กอาจพบได้ในรูปเฟอร์รัส ( $\text{Fe}^{+2}$ ) หรือเฟอริก ( $\text{Fe}^{+3}$ ) ซึ่งจากการศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในห้องปฏิบัติการ พบว่าที่สภาวะสุดท้ายหลังการวิเคราะห์ซีโอดีเสร็จสิ้น (หลังการไตเตรท) ปรอท โครเมียม เงิน และเหล็กในน้ำเสียซีโอดีดังกล่าวจะอยู่ในรูป  $\text{Hg}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+3}$ ,  $\text{Ag}^{+}$  และ  $\text{Fe}^{+3}$  ตามลำดับ

การเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักหมายถึงการเลือกค่าพีเอชและปริมาณสารเคมีที่ทำให้น้ำทิ้งภายหลังการบำบัดมีค่าโลหะหนักต่ำที่สุด และควรมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมด้วย (ดูได้จากภาคผนวก จ.) ซึ่งกำหนดค่าสูงสุดของปรอทและโครเมียม ( $\text{Cr}^{+3}$ ) ไว้ไม่เกิน 0.005 และ 0.75 มก./ล. ตามลำดับ แต่มีได้กำหนดค่าสูงสุดของโลหะเงินและเหล็กเอาไว้ด้วย อย่างไรก็ตามนิคมอุตสาหกรรมบางแห่งได้กำหนดค่าสูงสุดของเงินและเหล็กในน้ำทิ้งไว้ไม่เกิน 1.0 และ 10 มก./ล. ตามลำดับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบค่าเงินและเหล็กตามข้อกำหนดดังกล่าวด้วย

#### 5.1 กราฟไตเตรชัน

การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียแต่ละประเภทของงานวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบจาร์เทสต์ ซึ่งในลำดับแรกเป็นการทดลองเพื่อศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ซึ่งกระทำโดยแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียหลายๆ ค่าโดยกำหนดให้ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์คงที่ แต่อย่างไรก็ตามในขั้นตอนนี้ยังไม่ทราบว่าต้องใช้ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่าไรจึงจะเหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย วิธีการหนึ่งซึ่งสามารถประเมินปริมาณความต้องการสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์อย่างคร่าวๆ ในการกำจัด

โลหะหนักในน้ำเสียก็คือการทำกราฟไตเตรชันระหว่างน้ำเสียกับสารสีเลติงโพลีเมอร์ ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาระหว่างสารสีเลติงโพลีเมอร์กับโลหะหนักมิใช่ปฏิกิริยารีดอกซ์ แต่การใช้ไออาร์พีเป็นพารามิเตอร์เพื่อบ่งชี้ถึงจุดยุติปฏิกิริยาก็มีความเป็นไปได้ ซึ่งโดยปกติแล้วความต้องการปริมาณสารสีเลติงโพลีเมอร์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย (มันสิน ตันทุลเวศม์ และ วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2542)

ในบางกรณีค่าพีเอชอาจมีผลต่อความต้องการปริมาณสารสีเลติงโพลีเมอร์ด้วย ดังนั้นในการทำกราฟไตเตรชันของน้ำเสียแต่ละชนิดของการทดลองนี้จึงมีการแปรผันค่าพีเอชด้วย โดยจะทำการแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียทั้งหมด 5 ค่า ซึ่งจะทำให้น้ำเสียแต่ละชนิดมีกราฟไตเตรชันเท่ากับ 5 กราฟด้วย โดยน้ำเสียแต่ละชนิดจะมีการแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ (แต่ชุดการทดลองที่ทำกับน้ำเสียซีโอดีจะทำกราฟไตเตรชันที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 9 ด้วย) สำหรับวิธีการทำกราฟไตเตรชันได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.1.1

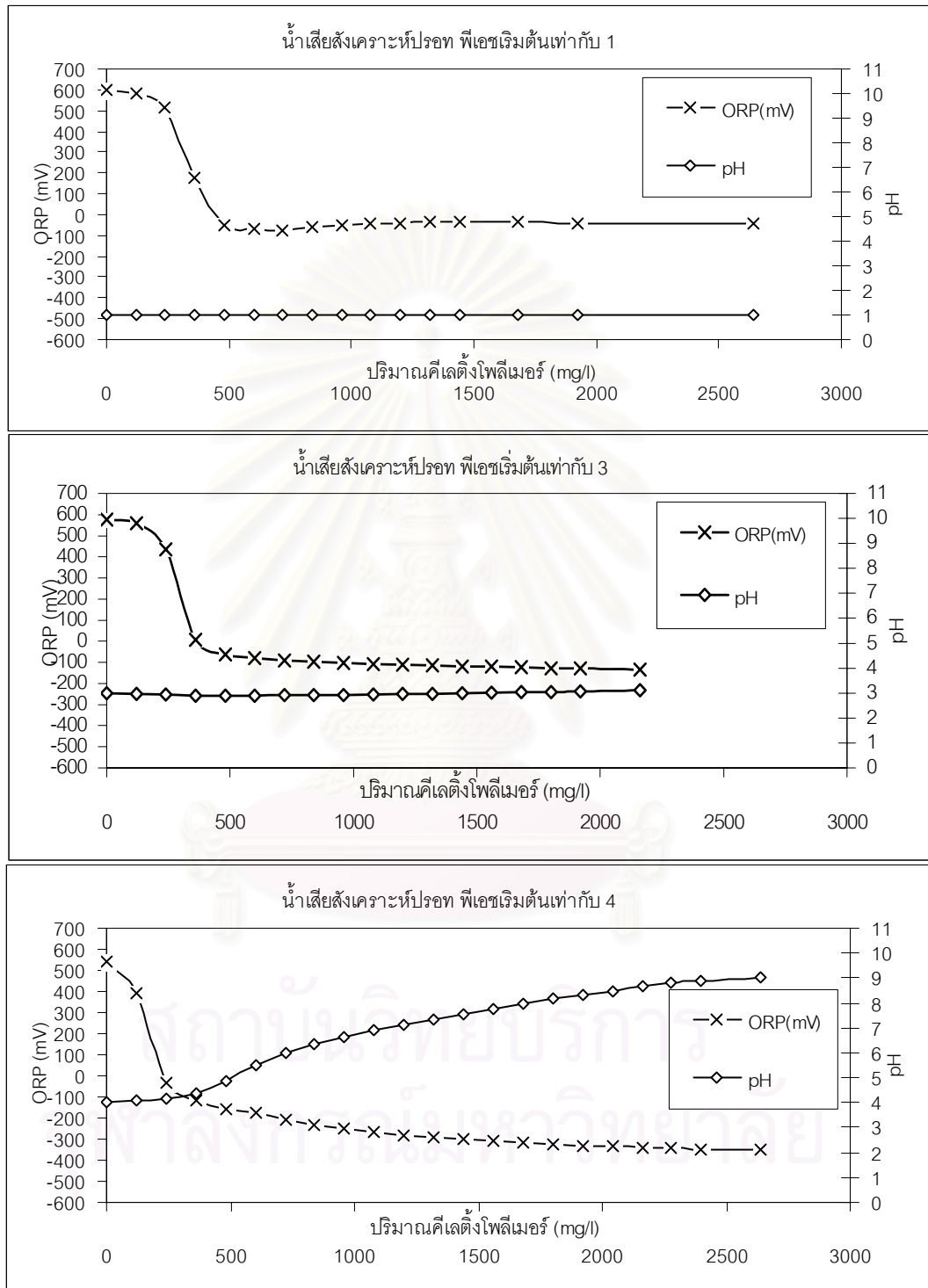
กราฟไตเตรชันของน้ำเสียแต่ละชนิดที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ มีรายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

#### 5.1.1 น้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

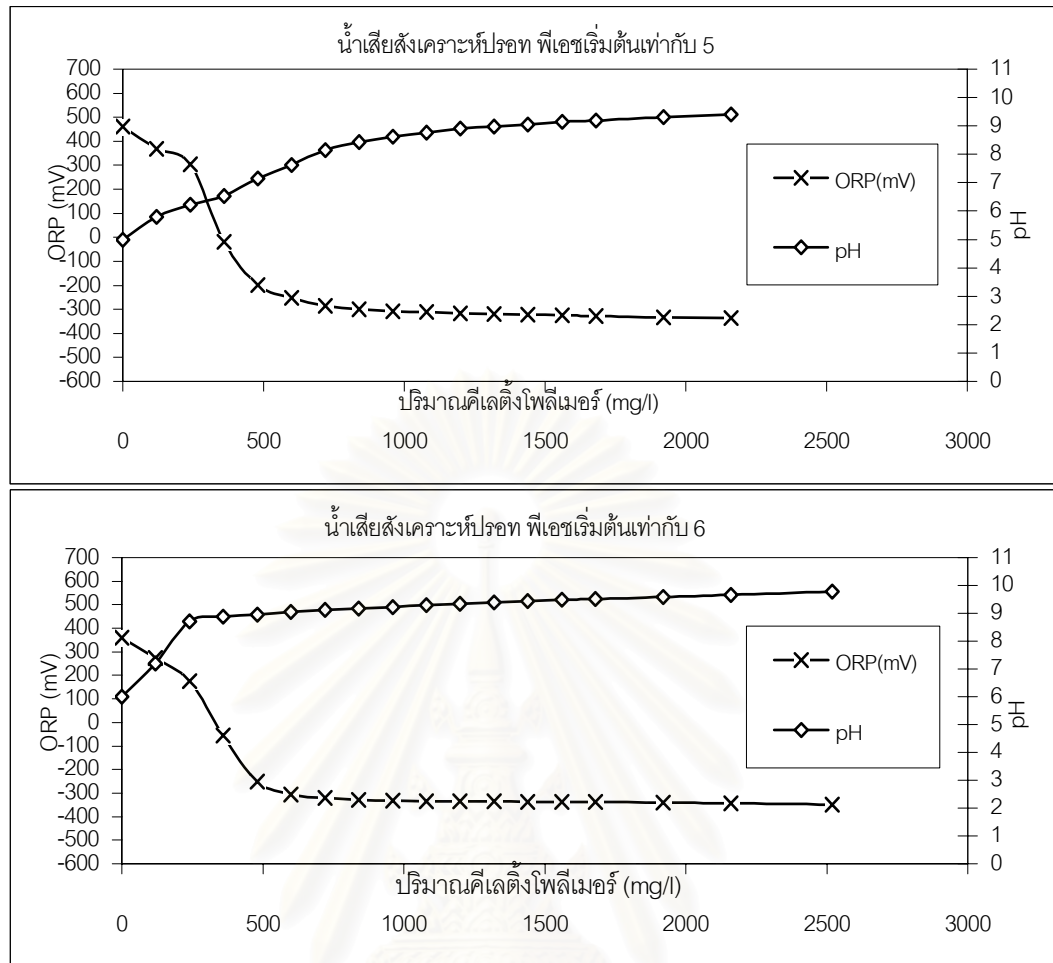
กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.1 จากรูปดังกล่าวพบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นตั้งแต่ 1 - 6 มีค่าไออาร์พีเป็นบวกทั้งสิ้น นอกจากนี้ยังพบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น ทำให้ค่าไออาร์พีมีแนวโน้มลดลงด้วย กล่าวคือเมื่อน้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1, 3, 4, 5 และ 6 พบว่าน้ำเสียดังกล่าวมีค่าไออาร์พีเท่ากับ 595, 577, 541, 461 และ 361 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ

สารละลายสีเลติงโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีความเข้มข้นเท่ากับ 24 กรัม/ลิตร (เจือจาง 1 : 50) โดยมีค่าพีเอชประมาณ 11.5 และมีค่าไออาร์พีประมาณ -500 มิลลิโวลต์ ดังนั้นในขณะไตเตรท จึงทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นด้วย (โดยเฉพาะชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น  $\geq 4$ ) และหลังจากเติมสารสีเลติงโพลีเมอร์ลงไปเพียง 0.5 มล. จะสังเกตเห็นตะกอนสีดำมีลักษณะเป็นฟlocsเกิดขึ้นทันทีหลังจากใส่สารสีเลติงโพลีเมอร์ลงไป และเมื่อพีเอชมีค่าสูงขึ้นฟlocsที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กลง

ทุกชุดการทดลองมีกราฟไตเตรชันคล้ายคลึงกัน กล่าวคือเมื่อไตเตรทด้วยสารละลายสีเลติงโพลีเมอร์ 0 - 240 มก./ล. พบว่าค่าไออาร์พีลดลงอย่างช้าๆ (ด้วยความลาดชันค่าหนึ่ง) อาจเนื่องมาจากสารสีเลติงโพลีเมอร์ส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยากำจัดโลหะหนักแต่อาจยังมีสารสีเลติงโพลีเมอร์เหลืออยู่บ้างจึงทำให้ไออาร์พีมีค่าลดลง แต่เมื่อไตเตรทด้วยสารสีเลติงโพลีเมอร์มากขึ้นจนทำให้โลหะหนักถูกกำจัดหมด จึงมีสารสีเลติงโพลีเมอร์เหลือเป็นอิสระและสะสมค่าไออาร์พีจึงลดลงตามปริมาณสีเลติงโพลีเมอร์ที่เติม มีผลทำให้ค่าไออาร์พีลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงระดับหนึ่งก็จะคงที่หรืออาจเปลี่ยนแปลงน้อยมากแม้ว่าจะไตเตรทด้วยสารสีเลติงโพลีเมอร์มากขึ้นก็ตาม ซึ่งจุดที่ทำให้ค่าไออาร์พีเริ่มคงที่เรียกว่าจุดยุติปฏิกิริยานั่นเอง



รูปที่ 5.1 กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ



รูปที่ 5.1 กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรอทที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ (ต่อ)

จากรูปที่ 5.1 อาจกล่าวได้ว่าความต้องการปริมาณสารคลอรีนที่ทำให้ปฏิกิริยายุติสำหรับในแต่ละชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสรุปได้ว่าปริมาณสารคลอรีนที่ทำให้ปฏิกิริยาพอดีกับปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรอทเท่ากับ 600 มก./ล. **ดังนั้นในหัวข้อที่ 5.2.1 ซึ่งเป็นขั้นตอนการทดลองศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรอท จึงกำหนดใช้ปริมาณสารคลอรีนเท่ากับ 720 มก./ล.** ซึ่งเลือกจากกราฟไตเตรชันที่ได้ โดยเลื่อนจากจุดที่คิดว่าเป็นจุดยุติปฏิกิริยาออกไปอีกประมาณ 1 ค่า หรือ 1 จุดในกราฟ (เพื่อเป็นการเผื่อปัจจัยความปลอดภัยไว้ด้วย)

จากกราฟไตเตรชันข้างต้นอาจกล่าวได้ว่าเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นในช่วง 1 - 6 พบว่าความต้องการสารคลอรีนที่ทำให้ปฏิกิริยายุติไม่แตกต่างกันมากนัก จึงคาดว่าค่าพีเอชในช่วงดังกล่าวไม่มีผลต่อปฏิกิริยาคลอรีนระหว่างปรอทกับสารคลอรีน อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวก็มีความสอดคล้องกับผลการทดลองแบบจาร์เทสตีในหัวข้อที่ 5.2.1 ซึ่งพบว่าในขณะที่

น้ำเสียสังเคราะห์ปรอทมีค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ในช่วง 0.4 - 7 ก็ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโปรทละลายแตกต่างกันเช่นกัน

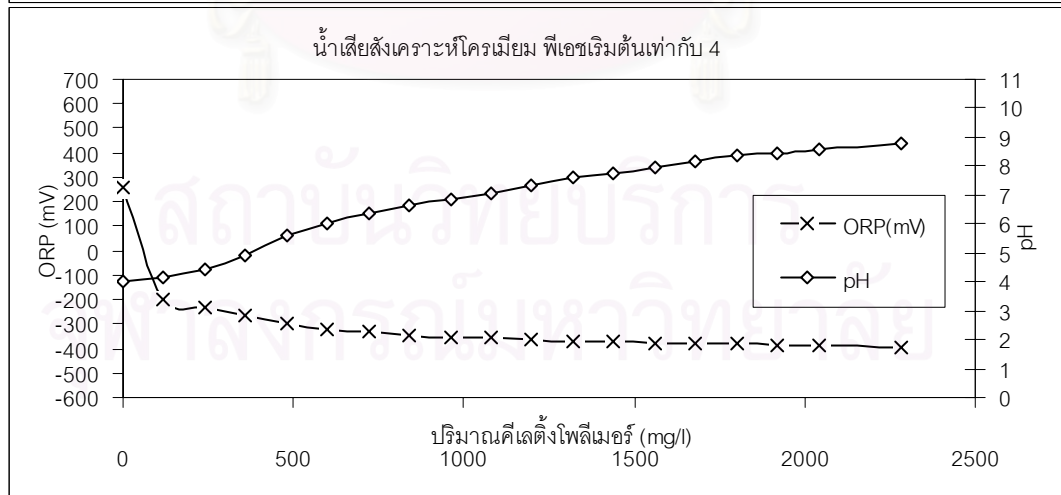
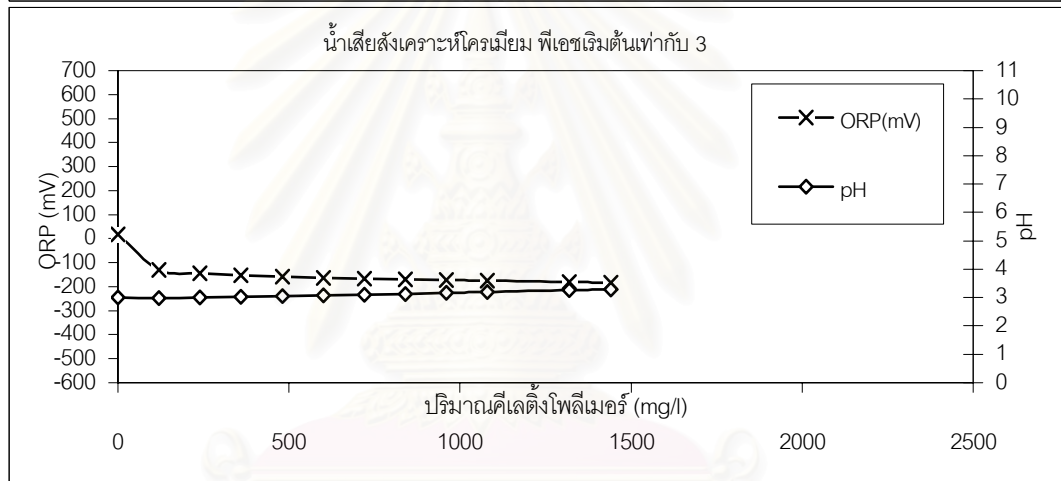
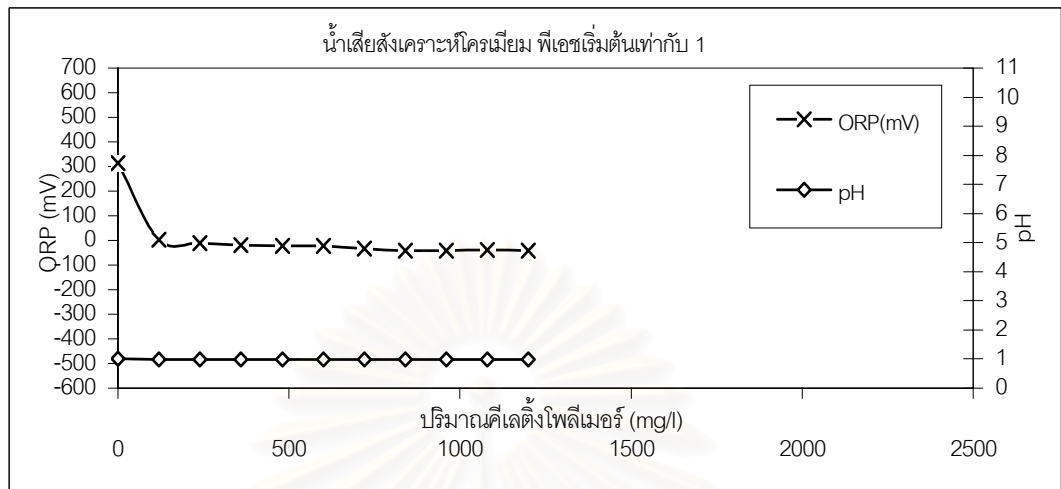
นอกจากนี้ค่าไออาร์พีที่จุดยุติปฏิกิริยาของทุกชุดการทดลองมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าไออาร์พีของน้ำเสียก่อนไตเตรท เพียงแต่ว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชที่จุดยุติปฏิกิริยาสูงกว่า ทำให้ค่าไออาร์พีมีค่าน้อยลงด้วย กล่าวคือในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1, 3, 4, 5 และ 6 พบว่าที่จุดยุติปฏิกิริยามีค่าไออาร์พีเท่ากับ -50, -63, -115, -250 และ -305 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับค่าไออาร์พีของน้ำเสียภายหลังการปรับพีเอชให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ดังที่กล่าวแล้วข้างต้น ซึ่งอาจสรุปได้ว่าค่าไออาร์พีที่วัดได้ในน้ำเสียยอมขึ้นอยู่กับค่าพีเอชด้วย ดังนั้นถ้ารายงานค่าไออาร์พีที่สภาวะใดๆ ก็ควรระบุค่าพีเอชควบคู่กันไปด้วย ซึ่งถือว่าเป็นการให้ข้อมูลที่ครบถ้วนและป้องกันความคลาดเคลื่อนเมื่อนำไปใช้งานเช่น ในกรณีที่ใช้ค่าไออาร์พีเป็นตัวบ่งชี้จุดยุติของปฏิกิริยาเพื่อควบคุมปริมาณการใช้สารเคมีต่างๆ (ในการกำจัดสารมลพิษอย่างใดอย่างหนึ่งในน้ำเสีย) ถ้าควบคุมเฉพาะค่าไออาร์พีเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการควบคุมค่าพีเอชด้วย จะแน่ใจได้อย่างไรที่จุดดังกล่าวคือจุดยุติปฏิกิริยา เนื่องจากค่าไออาร์พีมีค่าแปรผันตามค่าของพีเอชด้วย

### 5.1.2 น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม

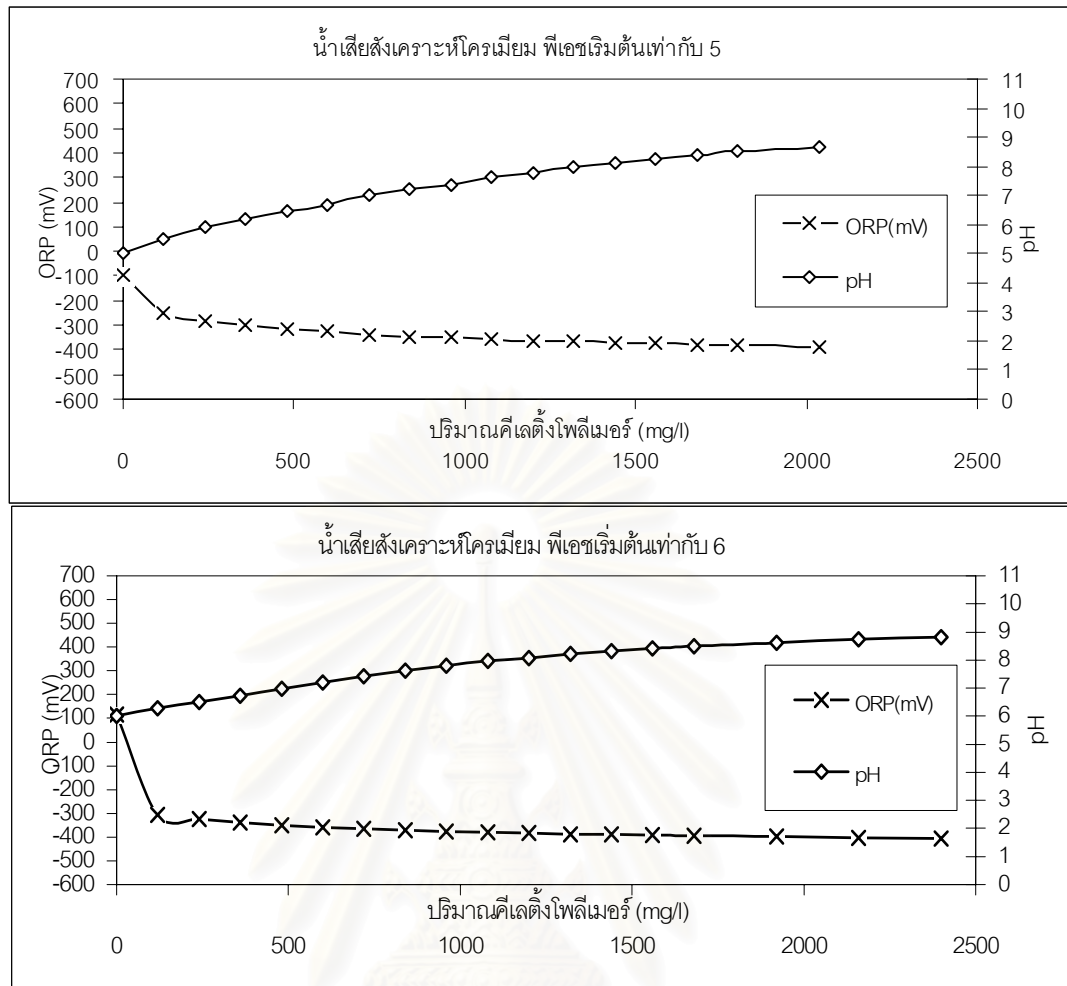
กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.2 โดยน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นในช่วง 1 - 6 มีค่าไออาร์พีเป็นบวกทั้งสิ้น และพบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น ทำให้ค่าไออาร์พีมีค่าลดลงเช่นกัน นอกจากนี้ในขณะไตเตรททำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชสูงขึ้นด้วย (โดยเฉพาะชุดการทดลองที่ค่าพีเอชเริ่มต้น  $\geq 4$ ) เนื่องจากสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เป็นสารละลายต่างเข้มข้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับกราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

จากผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1, 3, 4, 5 และ 6 มีค่าไออาร์พีที่จุดยุติปฏิกิริยาเท่ากับ -11, -144, -234, -285 และ -326 มิลลิโวลต์ตามลำดับและพบว่าที่จุดดังกล่าวในแต่ละชุดการทดลองมีความต้องการปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือประมาณ 120 มก./ล. แต่ใน**ขั้นตอนการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม (หัวข้อที่ 5.3.1) ได้เลือกใช้ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 600 มก./ล.** (เพื่อเป็นการเผื่อปัจจัยความปลอดภัยไว้ด้วย) สาเหตุที่ใช้ค่ามากกว่าความต้องการจริงมากเนื่องจากในครั้งแรกผู้ทดลองยังไม่ทราบแน่ชัดว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์สามารถกำจัดโครเมียมประจุ+3 ได้หรือไม่ ทำให้ไม่มั่นใจว่าปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ได้จากกราฟไตเตรชันดังกล่าวจะเพียงพอต่อการกำจัดโครเมียมเนื่องจากมีค่าน้อยมาก จึงได้เลือกปริมาณเผื่อไว้มากพอสมควร





รูปที่ 5.2 กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ



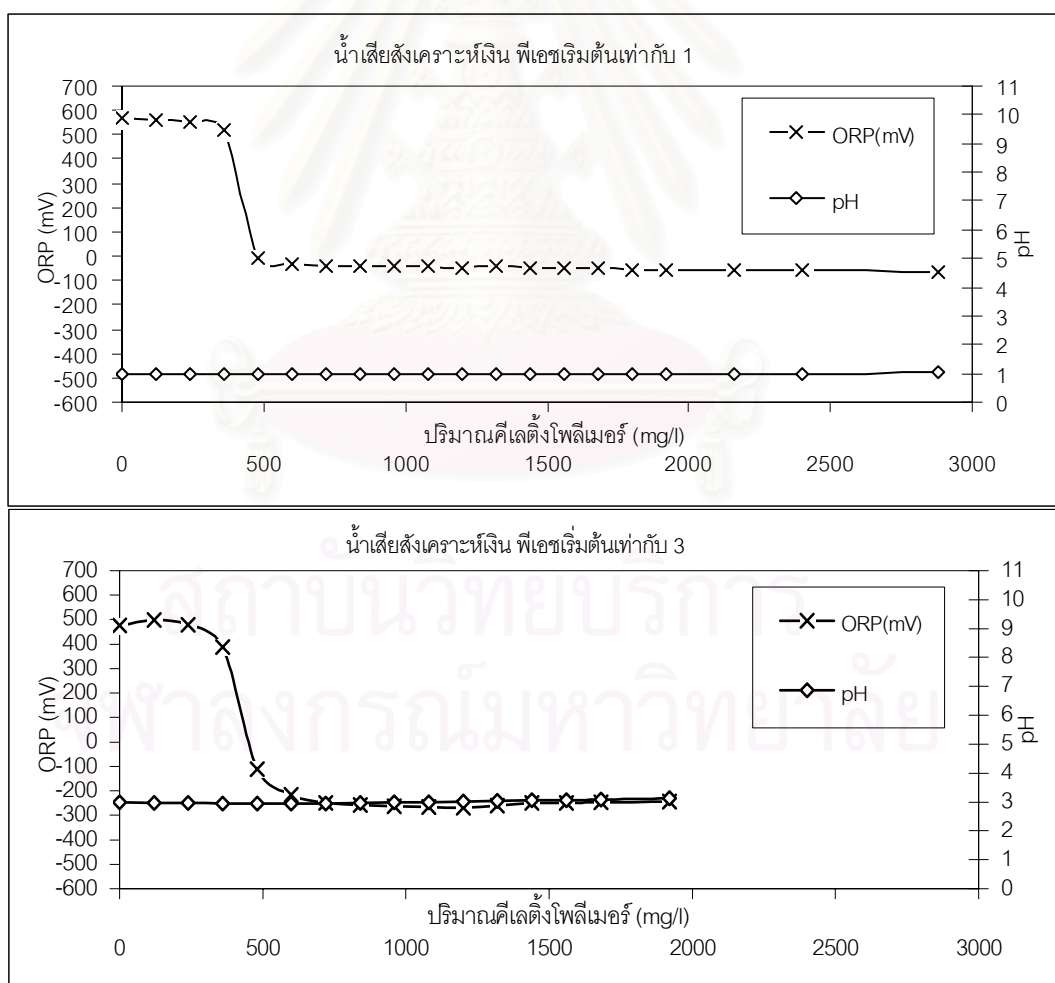
**รูปที่ 5.2** กราฟไตรเตอร์ชันของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ (ต่อ)

อย่างไรก็ตามเมื่อมองอย่างผิวเผินแล้วกราฟไตรเตอร์ชันของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมคล้ายคลึงกับกราฟไตรเตอร์ชันของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท แต่จากการสังเกตพบที่มีความแตกต่างกันบางประการ กล่าวคือเมื่อไตรเตอร์สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เพียงเล็กน้อยประมาณ 120 มก./ล. (หรือเพียง 0.5 มล.) ก็ทำให้ค่าไออาร์พีของทุกชุดการทดลองลดลงและเข้าสู่จุดยุติปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ผลที่เกิดขึ้นทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าโครเมียมทำปฏิกิริยากับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ได้หรือไม่ แนวทางที่อาจเป็นไปได้ คือ สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ในปริมาณดังกล่าวอาจมากพอจนสามารถกำจัดโครเมียมให้หมดได้แม้จะใช้ปริมาณเพียงเล็กน้อย หรือในทางกลับกันอาจเป็นไปได้ที่สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับโครเมียม จึงทำให้สารละลายคีเลตติ้งโพลีเมอร์เหลืออยู่ในน้ำเสียเมื่อเติมลงไปตั้งแต่แรกจึงทำให้ค่าไออาร์พีลดลงเร็วมาก และจากการสังเกตหลังจากเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ลงในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมจะไม่มีฟลอคคูลัสเกิดขึ้นเหมือนเมื่อใส่ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท แต่อย่างไรก็ตามจากชุดการทดลองแบบจาร์เทสต์ในหัวข้อที่ 5.3 ได้ยืนยันว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่สามารถกำจัดโครเมียมละลายได้ แม้ว่าน้ำเสีย

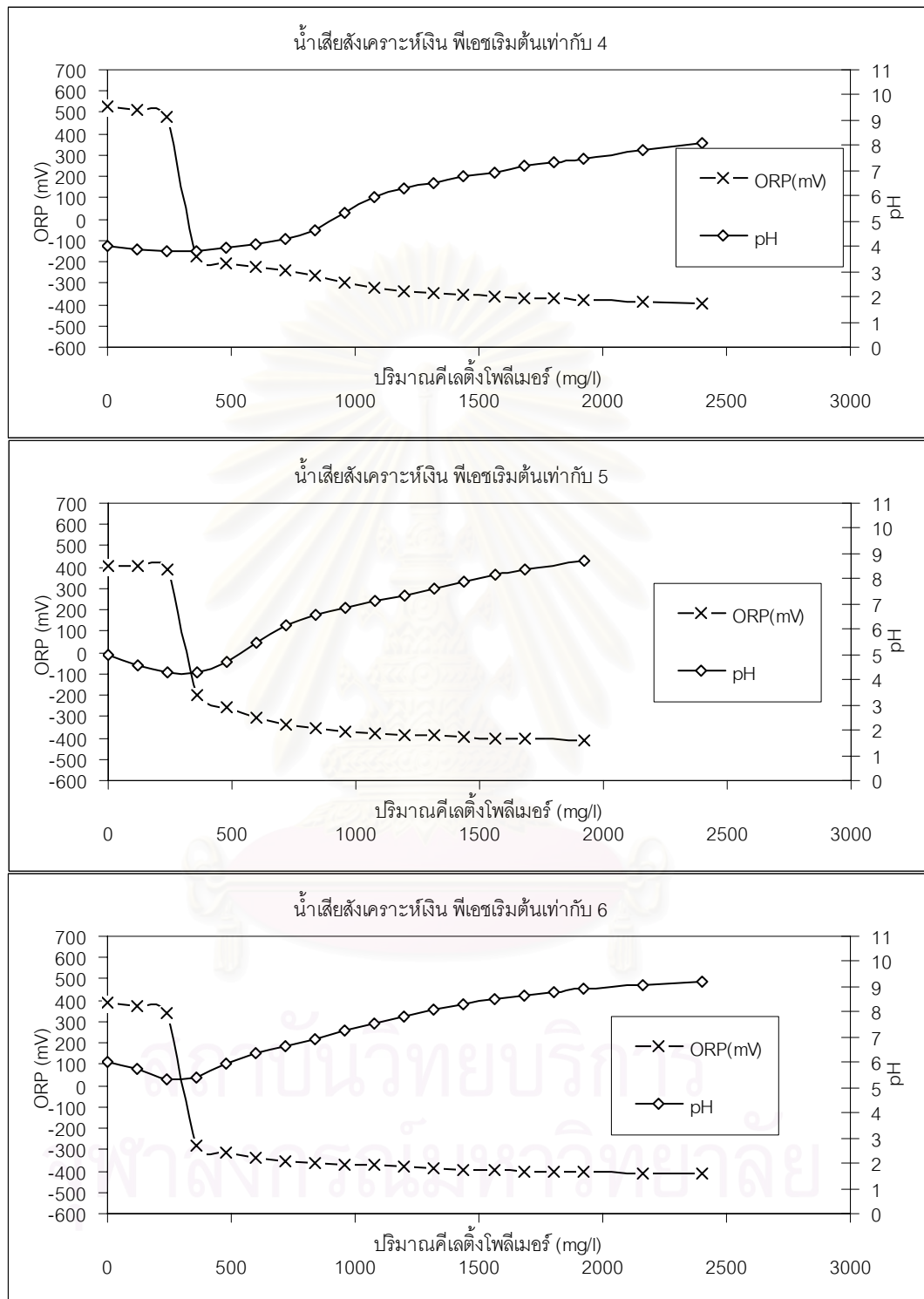
สังเคราะห์โครเมียมจะมีค่าพีเอชเริ่มต้นในช่วง 0.4 - 9 หรือแม้แต่จะแปรผันปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ใน ช่วง 120 - 1,440 มก./ล. ก็ตาม

### 5.1.3 น้ำเสียสังเคราะห์เงิน

กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์เงินที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.3 โดยน้ำเสียสังเคราะห์เงินที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นในช่วง 1 - 6 จะมีค่าไออาร์พีเป็นบวกเช่นเดียวกับน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 2 ประเภทข้างต้น และอีกเช่นกันว่าค่าไออาร์พีมีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น นอกจากนี้ในขณะที่ไตเตรทยังทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชสูงขึ้นด้วย (โดยเฉพาะชุดการทดลองที่ค่าพีเอชเริ่มต้น  $\geq 4$ ) แม้ว่าลักษณะกราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์เงินจะมีความคล้ายคลึงกับกราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทเกือบทุกประการ แต่แตกต่างกันตรงที่กราฟไออาร์พีของน้ำเสียสังเคราะห์เงินจะมีความลาดชันในช่วงแรกน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟไตเตรชันในช่วงแรกของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท



รูปที่ 5.3 กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์เงินที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ



รูปที่ 5.3 กราฟไต่ระดับของน้ำเสียสังเคราะห์เงินที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ (ต่อ)

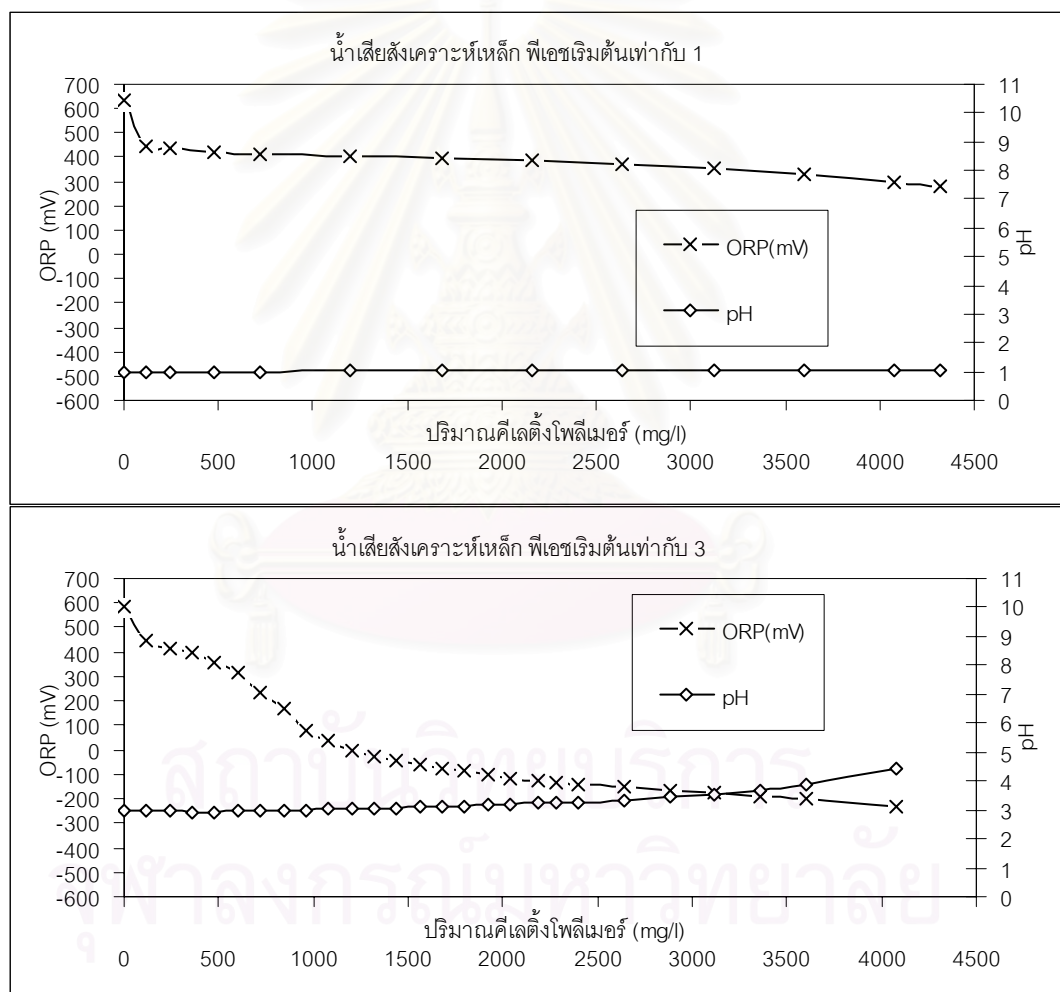
ที่จุดยุติปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1, 3, 4, 5 และ 6 พบว่ามีค่าไออาร์พีเท่ากับ -28, -216, -205, -255 และ -315 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งที่จุดดังกล่าวพบว่าในแต่ละชุดการทดลองมีความต้องการสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ใกล้เคียงกัน กล่าวคือมีความต้องการประมาณ 480 มก./ล. **ดังนั้นในขั้นตอนการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในน้ำเสียสังเคราะห์เงินจึงเลือกใช้ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์คงที่เท่ากับ 720 มก./ล.** โดยเลือกจากกราฟไตเตรชันที่ได้ (เลื่อนจากจุดที่คิดว่าเป็นจุดยุติปฏิกิริยาออกไปอีกประมาณ 2 ค่า (2 จุดในกราฟ) เพื่อเป็นการเผื่อปัจจัยความปลอดภัยไว้ด้วย และเนื่องจากความต้องการสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ในแต่ละชุดการทดลองไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นจึงคาดคะเนในเบื้องต้นนี้ว่าค่าพีเอชไม่น่ามีผลต่อปฏิกิริยาคีเลชันระหว่างเงินกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ ซึ่งผลดังกล่าวจะยืนยันได้ก็ต่อเมื่อมีการตรวจสอบประสิทธิภาพการกำจัดเงินในแต่ละชุดการทดลองก่อน อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองแบบจาร์เทสต์ในหัวข้อที่ 5.4.1 ก็พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเงินละลายไม่แตกต่างกันมากนัก แม้ว่าน้ำเสียสังเคราะห์เงินจะมีค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1 - 10 ก็ตาม และจากการสังเกต หลังจากเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ลงในน้ำเสียสังเคราะห์เงินจะเกิดฟลอคสีดำขึ้นทันทีเช่นเดียวกับในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

#### 5.1.4 น้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก

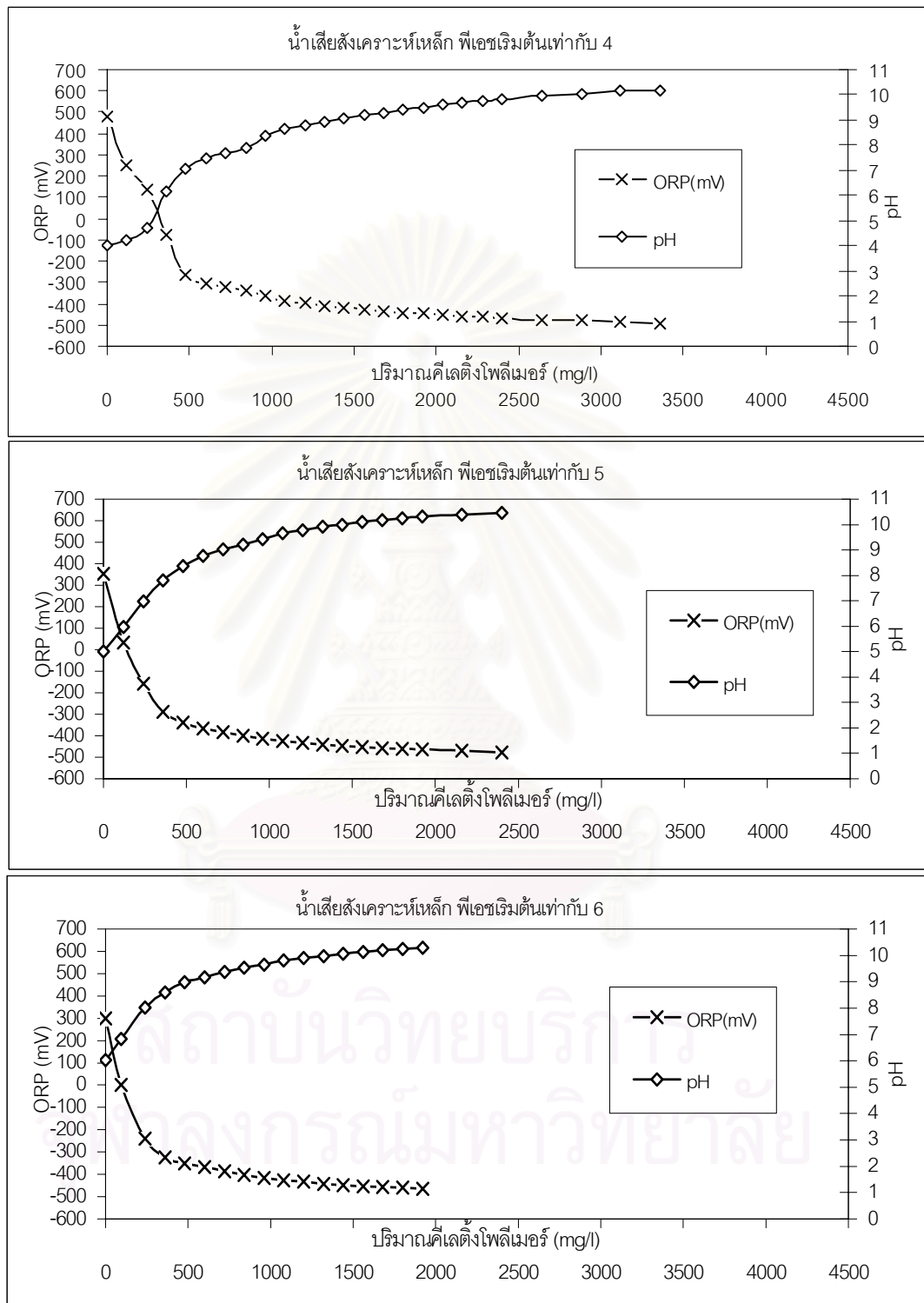
กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็กที่พีเอชเริ่มต้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.4 โดยที่กราฟดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับกราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทและเงิน เพียงแต่ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1 และ 3 มีจุดยุติปฏิกิริยาไม่ชัดเจนนัก ส่วนจุดยุติปฏิกิริยาของชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4, 5 และ 6 มีค่าไออาร์พีเท่ากับ -307, -340, และ -325 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่จุดยุติปฏิกิริยาในแต่ละชุดการทดลองมีความต้องการปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งมีความต้องการประมาณ 480 มก./ล. **ดังนั้นในขั้นตอนการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก (ในหัวข้อที่ 5.5.1) จึงเลือกใช้ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์คงที่เท่ากับ 720 มก./ล.** (เป็นการเผื่อปัจจัยความปลอดภัยไว้ด้วย)

อย่างไรก็ตามกราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็กมีความแตกต่างกับกราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทและเงินเล็กน้อย กล่าวคือกราฟไออาร์พีของปรอทและเงินจะลดลงด้วยความลาดชันค่าหนึ่ง ก่อนที่จะลดลงด้วยความรวดเร็วและเริ่มคงที่ แต่กราฟของเหล็กจะลดลงด้วยความลาดชันค่าเดียวจนถึงจุดยุติของปฏิกิริยา แต่ก็ไม่ลดลงเลยทันทีเหมือนในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าค่าไออาร์พีที่ลดลงนั้น อาจเป็นเพราะความเข้มข้นของสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่สะสมอยู่และค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น นั่นก็หมายความว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่ได้ทำปฏิกิริยาใดๆ กับเหล็ก ซึ่งจากการทดลองแบบจาร์เทสต์ในหัวข้อที่ 5.5 ก็สามารถยืนยันได้อย่าง

ชัดเจนว่าสารคลอรีนไดออกไซด์ไม่สามารถทำปฏิกิริยาคลอรีนกับเหล็กได้ แต่มีข้อสังเกตบางประการจากการทดลองว่าหลังจากเติมสารคลอรีนไดออกไซด์ลงในน้ำเสียสังเคราะห์เหล็กจะเกิดฟลอคสีดำขึ้นทันทีคล้ายกับที่เกิดขึ้นในน้ำเสียสังเคราะห์ปอทและเงิน แต่ผลการทดลองก็บ่งบอกว่าสารคลอรีนไดออกไซด์ไม่สามารถกำจัดเหล็กได้ ซึ่งผู้ทดลองก็ไม่ทราบว่าฟลอคสีดำที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากปฏิกิริยาของสารคลอรีนไดออกไซด์กับสารใด ซึ่งแตกต่างกับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเนื่องจากในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมจะไม่มีฟลอคสีดำเกิดขึ้นเลยตลอดเวลาที่มีการเติมสารคลอรีนไดออกไซด์



รูปที่ 5.4 กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็กที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ



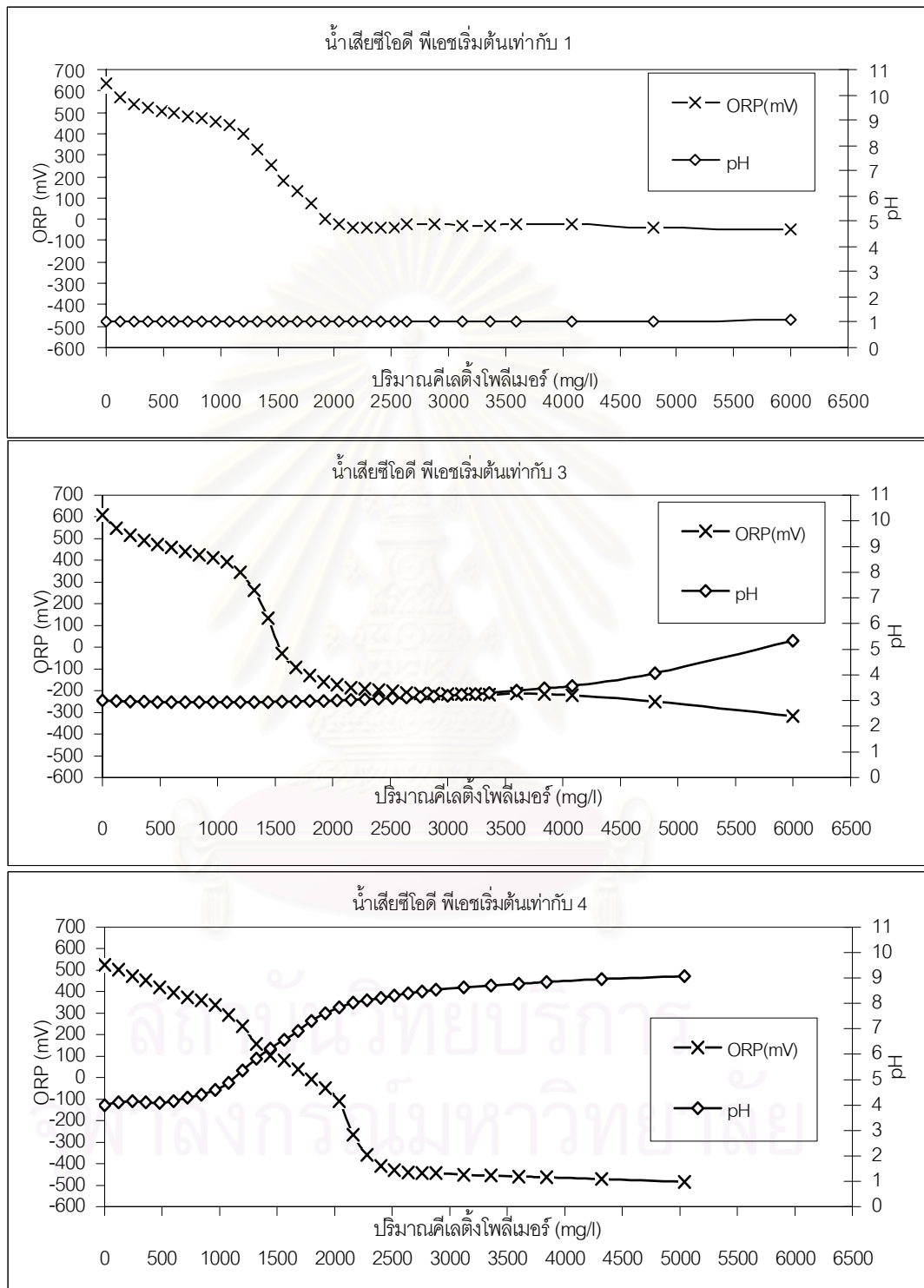
รูปที่ 5.4 กราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็กที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ (ต่อ)

### 5.1.5 น้ำเสียซีโอดี

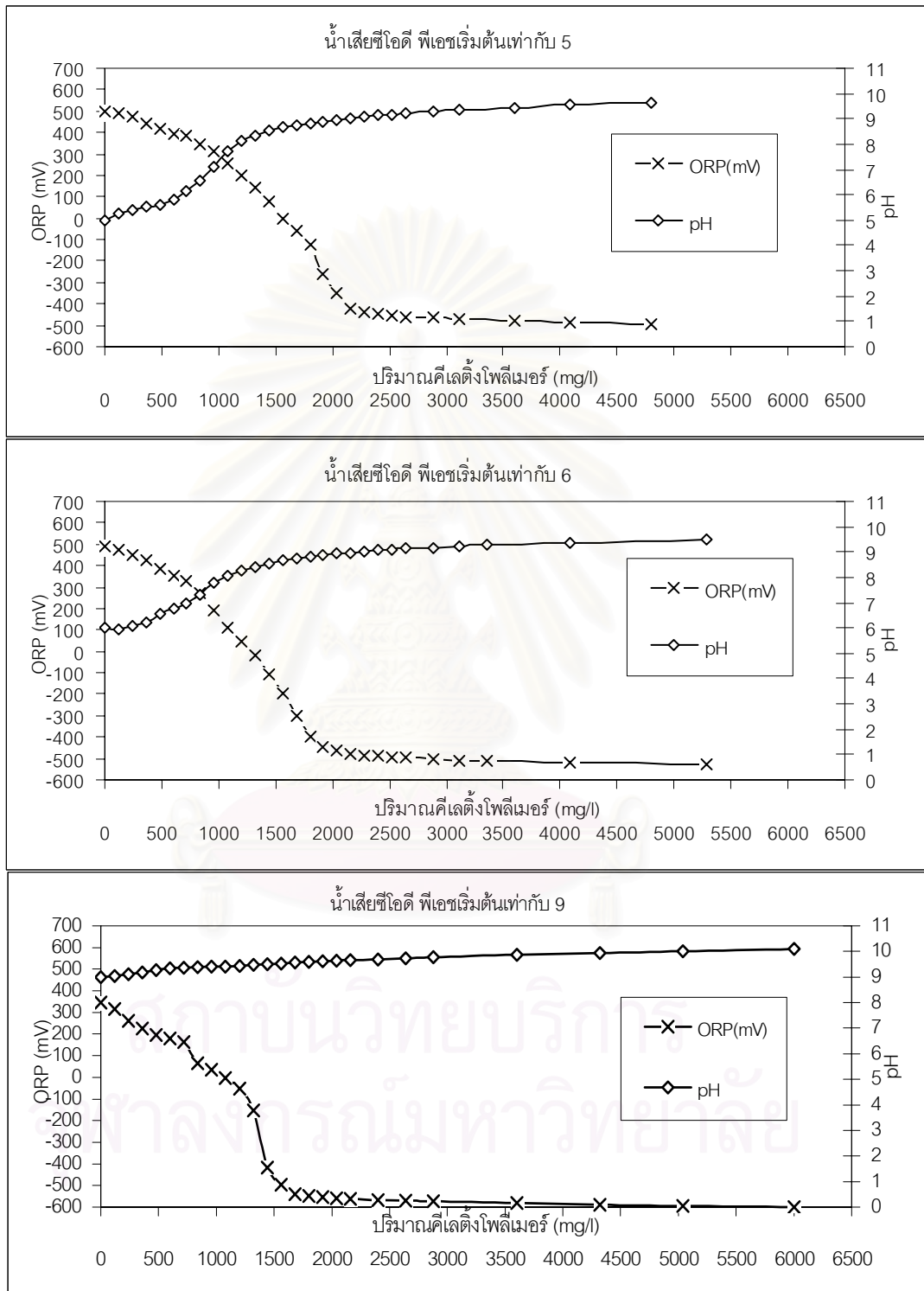
กราฟไตเตรชันของน้ำเสียซีโอดีที่มีพีเอชเริ่มต้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.5 โดยที่กราฟดังกล่าวคล้ายคลึงกับกราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์ปรีทและเงิน หากแต่มีความต้องการปริมาณสารเคิลเลตติ้งโพลีเมอร์ที่จุดยุติปฏิริยามากกว่า ซึ่งน่าจะเกิดจากน้ำเสียซีโอดีมีปริมาณของโลหะหนักหลายชนิดและมีปริมาณอิออนของสารต่างๆ โดยรวมมากกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์

นอกจากนี้จากการสังเกตกราฟไตเตรชันของน้ำเสียซีโอดีพบว่าค่าไออาร์พีลดลงด้วยความลาดชัน 2 ช่วง ก่อนที่จะลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่จุดยุติปฏิริยา ตัวอย่างเช่น ชุดการทดลองที่น้ำเสียซีโอดีมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1 ดังรูปที่ 5.6 พบว่ากราฟไออาร์พีลดลงด้วยความลาดชันค่าหนึ่งเมื่อไตเตรทด้วยสารเคิลเลตติ้งโพลีเมอร์ในช่วง 0 - 240 มก./ล. และเมื่อไตเตรทในช่วง 360 - 1,080 มก./ล. พบว่ากราฟไออาร์พีลดลงด้วยความลาดชันอีกค่าหนึ่งก่อนที่จะลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าสู่จุดยุติปฏิริยา โดยที่ความลาดชันค่าหลังนี้น้อยกว่าความลาดชันค่าแรกจากผลดังกล่าวคาดว่าค่าความลาดชันของไออาร์พีดังกล่าวน่าจะมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการทำปฏิริยากับโลหะหนักชนิดหนึ่งๆ ถ้าเป็นเช่นนั้นอาจกล่าวได้ว่าสารเคิลเลตติ้งโพลีเมอร์น่าจะทำการปฏิริยากับปรอทก่อนและเมื่อปริมาณปรอทลดต่ำลง สารเคิลเลตติ้งโพลีเมอร์จึงจะทำการปฏิริยากับเงินต่อไป (ถ้ามีสารเคิลเลตติ้งโพลีเมอร์มากเกินไป) เหตุผลที่กล่าวเช่นนี้ก็เนื่องจากความลาดชันของกราฟไออาร์พีในช่วงแรกของน้ำเสียสังเคราะห์ปรีทมากกว่าความลาดชันของกราฟไออาร์พีในช่วงแรกของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน ดังรูปที่ 5.7 (สอดคล้องกับกราฟไตเตรชันของน้ำเสียซีโอดี) ซึ่งถ้าเป็นเช่นนั้นน่าจะกล่าวได้ว่าสารเคิลเลตติ้งโพลีเมอร์จะทำการปฏิริยากับโลหะหนักตามลำดับความชอบ ซึ่งมีลักษณะสมบัติเช่นเดียวกับสารเคิลเลตต่างๆ เช่น EDTA เป็นต้น (สุพจน์ โตตระกูล, 2526) นอกจากนี้ค่าไออาร์พีที่จุดยุติปฏิริยามีค่าเป็นลบมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทต่างๆ กล่าวคือชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1, 3, 4, 5, 6 และ 9 มีค่าไออาร์พีที่จุดยุติปฏิริยาเท่ากับ -37, -160, -441, -439, -465 และ -540 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งที่จุดยุติปฏิริยาในแต่ละชุดการทดลองพบว่ามีความต้องการสารเคิลเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่แตกต่างกันมาก กล่าวคือประมาณ 2,000 - 2,500 มก./ล. ดังนั้น **ในขั้นตอนการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักต่างๆ ในน้ำเสียซีโอดี (หัวข้อที่ 5.6.1) จึงเลือกใช้ปริมาณสารเคิลเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 2,160 มก./ล.**

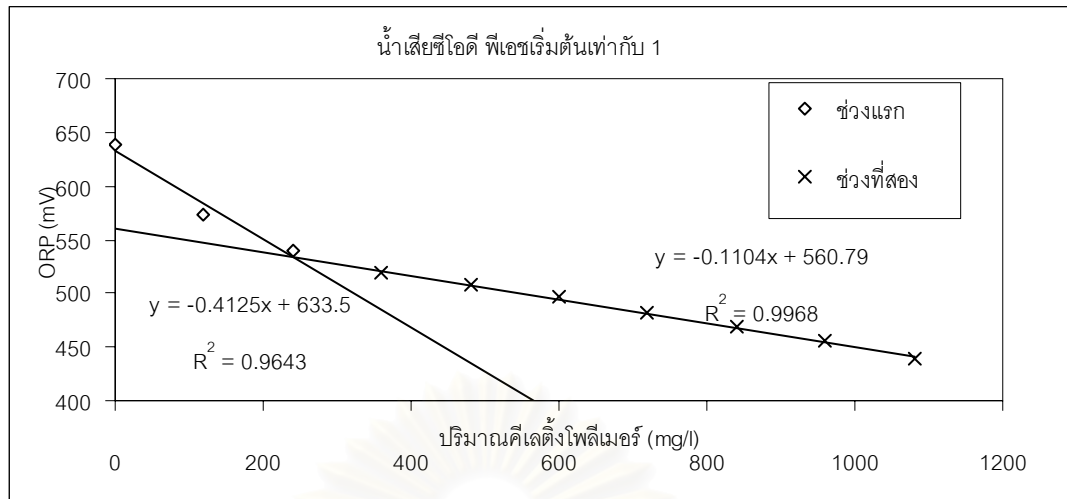




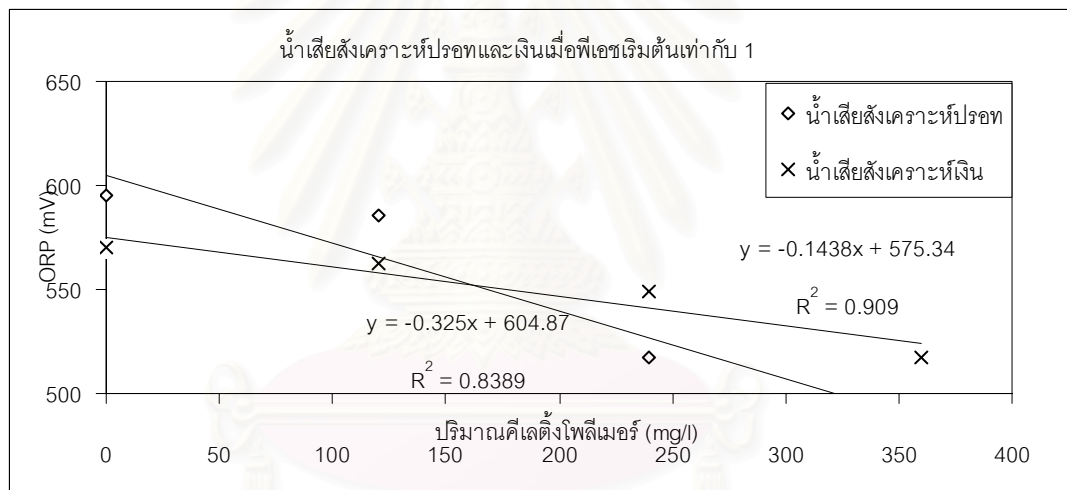
รูปที่ 5.5 กราฟไตเตรชันของน้ำเสียซีไอดีที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ



รูปที่ 5.5 กราฟไตเตรชันของน้ำเสียซีโอดีที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ (ต่อ)



รูปที่ 5.6 ความลาดชันช่วงแรกและช่วงที่สองของกราฟไต่เตรชันในน้ำเสียซีไอดี



รูปที่ 5.7 ความลาดชันช่วงแรกของกราฟไต่เตรชันในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทและเงิน

เนื่องจากความต้องการปริมาณสารคิลเลตติ้งฟอสเฟตในแต่ละชุดการทดลองไม่แตกต่างกันมาก จึงคาดว่าค่าพีเอชไม่น่ามีผลต่อปฏิกิริยาคิลเลชันระหว่างปรอทและเงินในน้ำเสียซีไอดีกับสารคิลเลตติ้งฟอสเฟต แต่ผลดังกล่าวจะยืนยันได้ก็ต่อเมื่อมีการตรวจสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักต่างๆ ก่อน อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองแบบจาร์เทสต์กับน้ำเสียซีไอดีในหัวข้อที่ 5.6 ก็พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและเงินละลายใกล้เคียงกัน แม้ในน้ำเสียซีไอดีจะมีค่าพีเอชเริ่มต้นในช่วง 0.3 - 9 ก็ตาม

## 5.2 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ประอท

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดประอทในน้ำเสียสังเคราะห์ประอทแบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดประอท ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการศึกษาปริมาณสารคลอรีนที่เติมเพื่อเพิ่มค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดประอท ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 5.2.1 ขั้นตอนการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดประอท

การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดประอทในน้ำเสียสังเคราะห์ประอทเป็นการทดลองแบบจาร์เทสต์ 6 ชุดการทดลอง โดยแปรค่าพีเอชเริ่มต้น 6 ค่า คือ 0.4, 1, 3, 4, 5 และ 7 ตามลำดับ และทุกชุดการทดลองใช้ปริมาณสารคลอรีนที่เติมให้เท่ากับ 720 มก./ล. (จากหัวข้อที่ 5.1.1) ขั้นตอนและวิธีการทดลองสามารถดูเพิ่มเติมได้ในหัวข้อ 4.1.2 ซึ่งสามารถสรุปผล การทดลองได้ดังตารางที่ 5.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 5.2.1.1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการ

น้ำเสียสังเคราะห์ประอทที่เตรียมขึ้นมีค่าพีเอชน้อยกว่า 1 ซึ่งเครื่องวัดพีเอชสามารถวัดได้เท่ากับ 0.4 ดังนั้นเมื่อต้องการแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าต่างๆ ข้างต้นจำเป็นต้องใช้สารปรับพีเอชที่ให้สภาพต่าง ซึ่งในที่นี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50% เป็นสารปรับพีเอช ซึ่งในแต่ละชุดการทดลองต้องการปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังรูปที่ 5.8 จากรูปดังกล่าวชุดการทดลองที่มีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ประอทจากพีเอช 0.4 ให้เป็น 1 และ 3 ต้องใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มากถึง 25.30 และ 47.55 กรัม/ลิตร ตามลำดับ แต่ชุดการทดลองที่ปรับค่าพีเอชเป็น 4, 5 และ 7 ต้องการปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่แตกต่างกับชุดการทดลองที่ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 มากนัก คือ มีความต้องการเท่ากับ 48.00, 48.02 และ 48.14 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ผลดังกล่าวอาจอธิบายได้ว่าน้ำเสียที่มีค่าพีเอชต่ำมักมีสภาพกรดและมีปริมาณไอออนไฮโดรเจนสูงมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียที่มีค่าพีเอชสูงกว่า) ซึ่งถ้าเป็นเช่นนั้นย่อมทำให้มีความสามารถในการสะเทินสภาพต่างได้ในปริมาณสูงด้วยหรืออาจกล่าวได้ว่าต้องใช้ปริมาณสารปรับพีเอชในปริมาณมากจึงจะทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยตัวอย่างการคำนวณดังนี้

$$\text{ที่พีเอชเท่ากับ 1 มี } [H^+] = 0.1 \text{ โมล/ลิตร}$$

$$\text{ที่พีเอชเท่ากับ 2 มี } [H^+] = 0.01 \text{ โมล/ลิตร}$$

$$\text{ที่พีเอชเท่ากับ 3 มี } [H^+] = 0.001 \text{ โมล/ลิตร}$$

ถ้าต้องการปรับค่าพีเอชจาก 1 เป็น 2 ต้องทำให้ความเข้มข้นของ  $[H^+]$  ลดลงหรือ

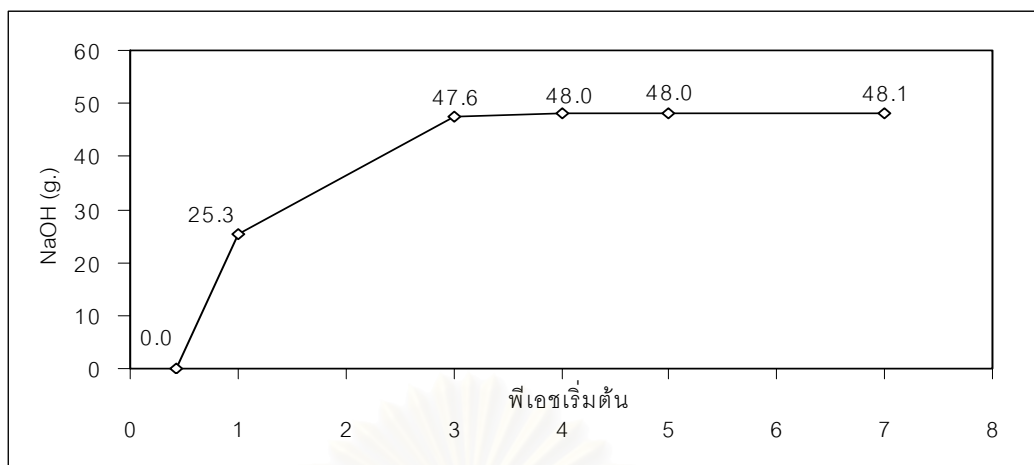
$$\text{ต้องการปริมาณ } [OH^-] \text{ มาสะเทิน} = 0.1 - 0.01$$

ตารางที่ 5.1 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทในน้ำเสียตั้งสถานะที่ปรอท

pH	ปริมาณ NaOH (g/l)	ORP (mV)		ปรอท (mg/l)						ประสิทธิภาพการกำจัด (%)				ของแข็งแขวนลอย (mg/l)			SV30 (ml/l)
		ORP <sub>inf</sub>	ORP <sub>En</sub>	Hg <sub>inf</sub>	Hg <sub>adj pH</sub>	Hg <sub>s-En</sub>	Hg <sub>EF-30min</sub>	Hg <sub>EF-24hr</sub>	Hg <sub>S-rem</sub>	Hg <sub>T-rem-30min</sub>	Hg <sub>T-rem-24hr</sub>	SS <sub>T</sub>	SS <sub>up30min</sub>	SS <sub>up24hr</sub>	SS <sub>upcoag</sub>		
0.42	0 (0 ml)	582	40	153	153	0.025	2.175	0.1924	99.98	98.58	99.87	228	2	0	0	20	
1	25.3 (50.6 ml)	575	-50	153	138	0.021	2.038	0.1691	99.99	98.67	99.89	224	2	0	0	14	
3	47.55 (95.1 ml)	544	-150	153	115	0.007	1.943	0.1240	100.00	98.73	99.92	256	6	0	0	41	
4	48 (96 ml)	510	-278	153	102	0.004	1.830	0.1450	100.00	98.80	99.91	292	8	0	0	45	
5	48.024 (96 ml)	459	-348	153	87	0.022	56.600	3.2850	99.99	63.01	97.85	12	6	8	4	*	
7	48.144 (96.3 ml)	375	-364	153	61	0.074	73.100	6.5750	99.95	52.22	95.70	28	18	14	8	*	

\* = หากค่าไม่ได้

pH <sub>inf</sub>	=	ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียในแต่ละชุดการทดลอง (หลังปรับค่าพีเอช)	Hg <sub>s-rem</sub>	=	ประสิทธิภาพการกำจัดโดยระปรอทละลาย
pH <sub>En</sub>	=	ค่าพีเอชของน้ำยาหลังการบำบัด (หลังเติมคลอรีนโพสิเมอร์)	Hg <sub>T-rem-30min</sub>	=	ประสิทธิภาพการกำจัดปรอททั้งหมดหลังตกตะกอน 30 นาที
ORP <sub>inf</sub>	=	ค่าโออาร์พีเริ่มต้นของน้ำเสียในแต่ละชุดการทดลอง (หลังปรับค่าพีเอช)	Hg <sub>T-rem-24hr</sub>	=	ประสิทธิภาพการกำจัดปรอททั้งหมดหลังตกตะกอน 24 ชั่วโมง
ORP <sub>En</sub>	=	ค่าโออาร์พีของน้ำยาหลังการบำบัด (หลังเติมคลอรีนโพสิเมอร์)	SS <sub>T</sub>	=	ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
Hg <sub>inf</sub>	=	ค่าปรอทเริ่มต้นของน้ำเสียแต่ละชุดการทดลอง (ก่อนปรับพีเอช)	SS <sub>up30min</sub>	=	ของแข็งแขวนลอยในน้ำเสหลังตกตะกอน 30 นาที
Hg <sub>adj pH</sub>	=	ค่าปรอทหลังปรับพีเอชในแต่ละชุดการทดลอง	SS <sub>up24hr</sub>	=	ของแข็งแขวนลอยในน้ำเสหลังตกตะกอน 24 ชั่วโมง
Hg <sub>s-En</sub>	=	ค่าปรอทละลายที่เหลือภายหลังการบำบัด (หลังเติมคลอรีนโพสิเมอร์)	SS <sub>upcoag</sub>	=	ของแข็งแขวนลอยภายหลังเติมโพสิเมอร์บวกและตกตะกอน 30 นาที
Hg <sub>T-En-30min</sub>	=	ค่าปรอททั้งหมดตั้งบำบัดและทิ้งไว้ตกตะกอน 30 นาที	SV30	=	ปริมาตรที่จับตะกอนหลังตกตะกอน 30 นาที
Hg <sub>T-En-24hr</sub>	=	ค่าปรอททั้งหมดตั้งบำบัดและทิ้งไว้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง			



รูปที่ 5.8 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

$$= 0.09 \text{ โมล/ลิตร}$$

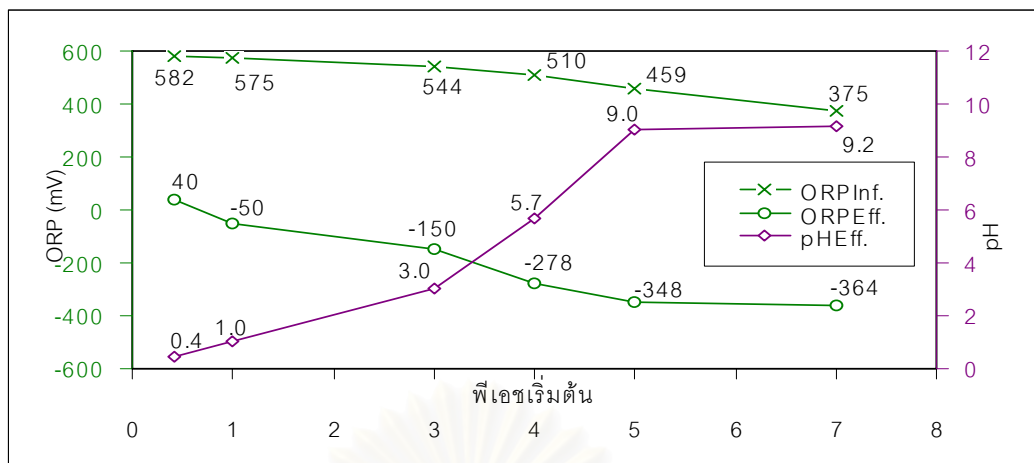
ถ้าต้องการปรับค่าพีเอชจาก 2 เป็น 3 ต้องทำให้ความเข้มข้นของ  $[H^+]$  ลดลงหรือต้องการปริมาณ  $[OH^-]$  มาสะเทิน  $= 0.01 - 0.001$

$$= 0.009 \text{ โมล/ลิตร}$$

จากการคำนวณข้างต้นพบว่าการปรับค่าพีเอชจาก 1 เป็น 2 ต้องใช้ปริมาณไอออนไฮดรอกไซด์มากกว่าการปรับค่าพีเอชจาก 2 เป็น 3 ประมาณ 10 เท่า แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณข้างต้นเป็นการคำนวณตามทฤษฎี ซึ่งเป็นการสมมติว่าในน้ำมีเฉพาะ  $[H^+]$  และ  $[OH^-]$  เท่านั้น แต่การทดลองจริงอาจได้ผลไม่ตรงกับค่าที่คำนวณ เนื่องจากไอออนไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไปอาจทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทด้วย

### 5.2.1.2 ไออาร์พีและพีเอช

ค่าไออาร์พีและพีเอชที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.9 โดยปกติสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีสภาพต่างและค่าพีเอชสูง ดังนั้นเมื่อเติมลงไปใต้น้ำเสียสังเคราะห์ปรอทจึงเป็นการเพิ่มสภาพต่างและทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียสูงขึ้นด้วย ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น  $\geq 4$  โดยชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4, 5 และ 7 จะทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 5.7, 9.0 และ 9.2 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 1 และ 3 ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 5.2.1.1



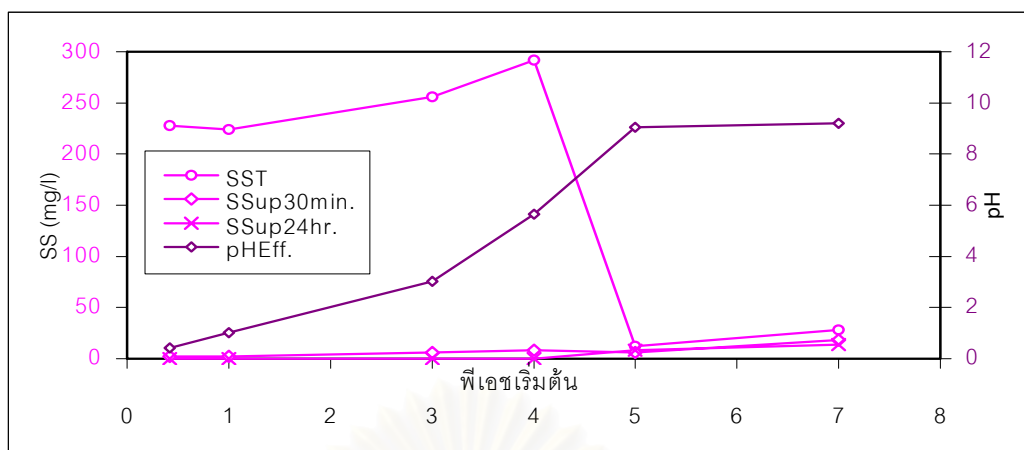
**รูปที่ 5.9** ค่าพีเอชและโออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปروط

น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองมีค่าโออาร์พีเป็นบวกทั้งสิ้น เพียงแต่ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นสูงกว่า จะทำให้ค่าโออาร์พีมีค่าลดลงด้วย กล่าวคือเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 1, 3, 5 และ 7 พบว่ามีค่าโออาร์พีเท่ากับ 582, 575, 544, 510, 459 และ 375 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ส่วนในขั้นตอนหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ทุกชุดการทดลองมีค่าโออาร์พีลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าโออาร์พีของน้ำเสียเริ่มต้น และในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นในช่วง 1 - 7 มีค่าโออาร์พีเป็นลบอีกด้วย (ยกเว้นชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าโออาร์พีหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ดังกล่าวมีค่าลดลงหรือติดลบมากขึ้นตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือในแต่ละชุดการทดลองมีค่าโออาร์พีหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 40, -50, -150, -278, -348 และ -364 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ

### 5.2.1.3 ของแข็งแขวนลอย

ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.10 จากการทดลองปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้ได้ค่าพีเอชเริ่มต้นตามที่ต้องการของในแต่ละชุดการทดลอง พบว่ามีของแข็งแขวนลอยสีขาวเกิดขึ้นเล็กน้อยและเห็นได้ชัดเจนเมื่อมีค่าพีเอช  $\geq 3$  ส่วนในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 7 พบว่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน

ส่วนในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ พบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 1, 3 และ 4 (หรือมีค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 0.4, 1, 3 และ 5.7) จะเกิดของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่สีดำและสามารถตกตะกอนได้ดี และเมื่อทิ้งให้



รูปที่ 5.10 ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน

ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที พบว่ามีของแข็งแขวนลอยเหลือในน้ำใสต่ำ โดยมีค่าเท่ากับ 2, 2, 6 และ 8 ตามลำดับ แต่ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 และ 7 (หรือมีค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 9 และ 9.2) พบว่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีขนาดเล็กมากและตกตะกอนได้ไม่ดี ดังรูปที่ 5.11 ซึ่งไม่พบชั้นตะกอนและไม่สามารถหาค่าเอสวี 30 ได้ นอกจากนี้ของแข็งแขวนลอยดังกล่าวบางส่วนสามารถหลุดลอดผ่านกระดาษกรอง GF/C ได้ (แต่ไม่สามารถผ่านเยื่อกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอน) แสดงให้เห็นว่าตะกอนโลหะหนักที่เกิดจากปฏิกิริยามีลักษณะเป็นคอลลอยด์ขนาด 0.45 - 1 ไมครอน ซึ่งตกตะกอนได้ยาก จึงทำให้ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนหลังตกตะกอน 30 นาที มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงมาก ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าปรอททั้งหมดมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าปรอทละลาย (แม้ว่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่วัดได้มีค่าน้อยก็ตาม) และด้วยสาเหตุข้างต้นทำให้ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่วัดได้ในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 และ 7 มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงเช่นกัน (ซึ่งวัดปริมาณของของแข็งแขวนลอยได้เท่ากับ 12 และ 28 มก./ล. ตามลำดับ) ในขณะที่ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 1, 3 และ 4 มีค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 228, 224, 256 และ 292 มก./ล. ตามลำดับ แต่ในกรณีที่ปล่อยให้ตกตะกอนนานขึ้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 และ 7 สามารถตกตะกอนได้บ้าง (สังเกตเห็นชั้นตะกอนเกิดขึ้น) ดังรูปที่ 5.12 ส่วนชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น  $\leq 4$  พบว่าสามารถตกตะกอนได้ดีขึ้นเช่นกัน ซึ่งไม่พบว่ามีของแข็งแขวนลอยเหลืออยู่ในน้ำใสส่วนบนเลย นอกจากนี้ได้ทดลองเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวกลงไปประมาณ 3 มก./ล. และกวนผสมใหม่ (กวนช้า) ประมาณ 20 นาที พบว่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในแต่ละชุดการทดลองมีขนาดใหญ่ขึ้น แม้แต่ในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอช



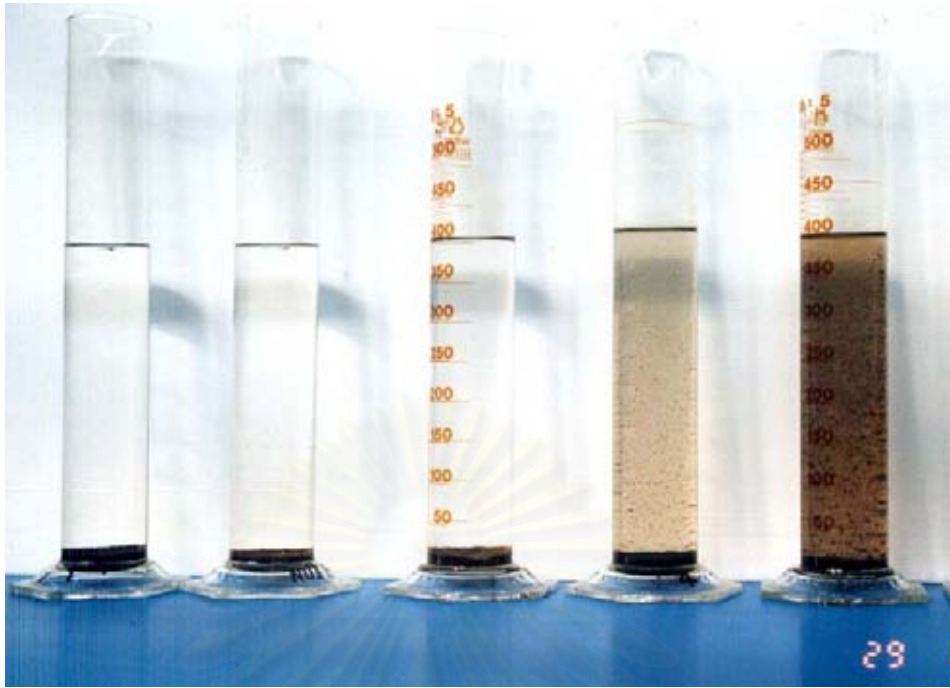


จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 0.4, 1, 3, 5 และ 7 ตามลำดับ



ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4

รูปที่ 5.11 ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท



จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 0.4, 1, 3, 5 และ 7 ตามลำดับ



ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4

รูป 5.12 ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

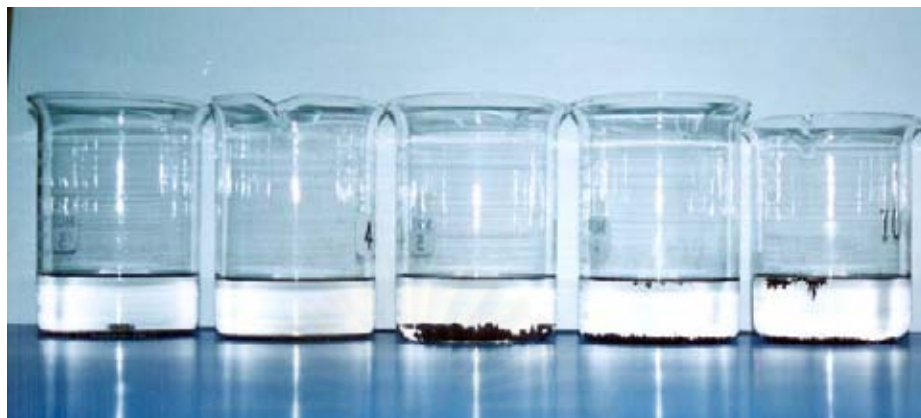
เริ่มต้นเท่ากับ 5 และ 7 ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งภายหลังทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที พบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 1, 3, 4, 5 และ 7 สามารถตกตะกอนได้ดี โดยมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนเท่ากับ 0, 0, 0, 0, 4 และ 8 มก./ล.ตามลำดับ ซึ่งในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 และ 7 จะมีตะกอนแขวนลอยบางส่วนลอยอยู่บนผิวน้ำ

จากผลการทดลองข้างต้นอาจสรุปได้ว่าค่าพีเอชหลังการเติมสารซีเลดิงโพลีเมอร์มีผลต่อลักษณะของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้น กล่าวคือถ้าน้ำเสียหลังการเติมสารซีเลดิงโพลีเมอร์มีค่าพีเอชสูง (ในที่นี้มีค่าพีเอชประมาณ 9) จะทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมากและตกตะกอนไม่ดี แต่ในทางกลับกันถ้าน้ำเสียหลังการเติมสารซีเลดิงโพลีเมอร์มีค่าพีเอชไม่สูงมากนัก จะทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ดี อย่างไรก็ตามการใช้สารโคแอกกูแลนต์ชนิดโพลีเมอร์ประจุบวกพบว่ามีส่วนช่วยในการรวมตะกอนได้ดีขึ้นและช่วยทำให้ตกตะกอนได้เร็วขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพีเอชมีผลต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เกิดขึ้นด้วย กล่าวคือถ้าน้ำเสียมีค่าพีเอชสูงขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีค่าสูงขึ้นด้วย (แต่ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชหลังการเติมสารซีเลดิงโพลีเมอร์เท่ากับ 9 และ 9.2 พบว่าค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริงเนื่องจากตะกอนมีขนาดเล็กมากจนสามารถลอดผ่านกระดาษกรอง GF/C ได้)

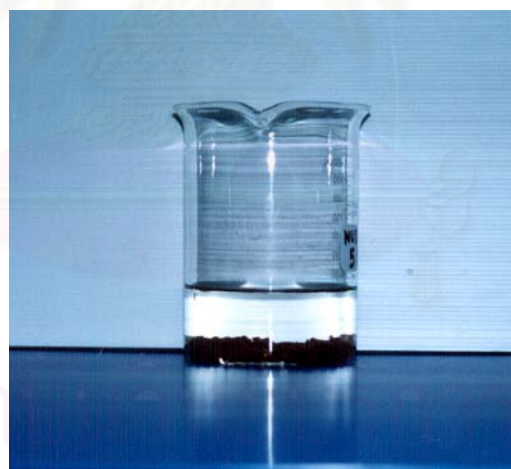
#### 5.2.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัดปรอท

จากการทดลองกำจัดปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทที่มีค่าปรอทเริ่มต้นเท่ากับ 153 มก./ล. โดยใช้สารซีเลดิงโพลีเมอร์ 720 มก./ล. และมีการแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียให้อยู่ระหว่าง 0.4 - 7 ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ปรอทที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.14 และ 5.15 ซึ่งพบว่าเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชเริ่มต้นมากขึ้น ทำให้ค่าปรอทละลายหลังการปรับพีเอชลดลง กล่าวคือเมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทให้มีค่าเท่ากับ 0.4, 1, 3, 4, 5 และ 7 พบว่ามีค่าปรอทละลายเหลืออยู่เท่ากับ 153, 138, 115, 102, 87 และ 61 มก./ล. ตามลำดับ สาเหตุดังกล่าวคาดว่าปรอทละลายส่วนที่หายไปน่าจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปปรอทไฮดรอกไซด์ โดยกลไกการตกตะกอนผลึก เนื่องจากในขณะปรับค่าพีเอชด้วยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่ามีของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้น (โดยเห็นได้ชัดเจนเมื่อมีค่าพีเอช มากกว่า 3) แต่มีปริมาณไม่มากนัก

น้ำเสียสังเคราะห์หลังการเติมสารซีเลดิงโพลีเมอร์ทุกชุดการทดลองพบว่ามีค่าปรอทละลาย (ผ่านการกรองด้วยเยื่อเมมเบรน 0.45 ไมครอน) ต่ำและมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 1, 3, 4, 5 และ 7 พบว่ามีค่าปรอทละลายเหลืออยู่เท่ากับ 0.025, 0.021, 0.007, 0.004, 0.022 และ 0.074 มก./ล. ตามลำดับ เนื่องจาก

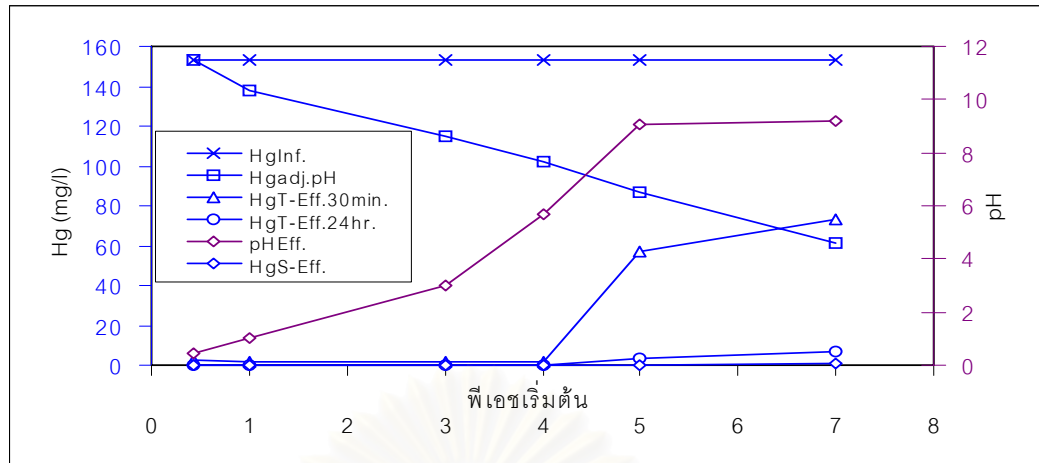


จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 0.4, 1, 3, 5 และ 7 ตามลำดับ

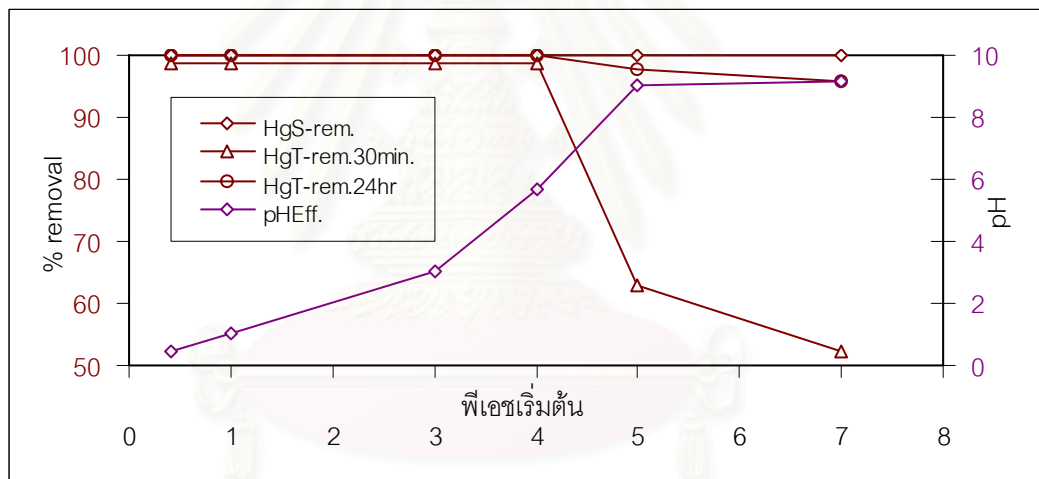


ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4

**รูปที่ 5.13** ลักษณะการตกตะกอนหลังเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวก (3 มก./ล.) และทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท



รูปที่ 5.14 ค่าปรอทที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท



รูปที่ 5.15 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดให้มีปริมาณปรอทได้สูงสุดไม่เกิน 0.005 มก./ล. ดังนั้นในกรณีนี้จะมีเฉพาะชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 เท่านั้นที่ผ่านมาตรฐานดังกล่าว

เมื่อทิ้งให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นตกตะกอน 30 นาที พบว่าน้ำใสส่วนบนในแต่ละชุดการทดลองมีค่าปรอททั้งหมด 2.175, 2.038, 1.943, 1.830, 56.6 และ 73.1 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าปรอททั้งหมดขึ้นอยู่กับปริมาณของของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบน นอกจากนี้ในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 และ 7 อาจกล่าวได้ว่าของแข็งแขวนลอย

ที่เหลืออยู่ในน้ำคือตะกอนของสารประกอบปรอทเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากในน้ำใส่ส่วนบนมีค่าปรอททั้งหมดสูง

จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่าค่าพีเอชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอท กล่าวคือเมื่อน้ำเสียหลังการเติมสารคลอรีนได้ตั้งโพลีเมอร์มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 0.4 - 9 พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดปรอทละลายใกล้เคียงกัน แต่ค่าพีเอชมีผลต่อปฏิกิริยาโคแอกกูเลชัน กล่าวคือเมื่อน้ำเสียหลังการเติมคลอรีนได้ตั้งโพลีเมอร์มีค่าพีเอชสูง จะทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมากและตกตะกอนไม่ดี

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารเคมีในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียอาจหมายถึงสภาวะซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงและต้องสามารถแยกตะกอนโลหะหนักที่เกิดขึ้นออกจากน้ำได้ง่ายด้วย ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นพบว่าทุกชุดการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดปรอทละลายสูงพอๆ กันแต่ใน 2 ชุดการทดลองหลังพบว่าการแยกของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำทำได้ยาก ดังนั้นอาจเลือกค่าพีเอชเริ่มต้นเท่าใดก็ได้ในช่วง 0.4 - 4 เพื่อนำไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป แต่เนื่องจากในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 มีค่าปรอทละลายเหลืออยู่ในน้ำทิ้งต่ำที่สุด ดังนั้นจึงเลือกค่าพีเอชดังกล่าวไปทำการทดลองหาปริมาณคลอรีนที่เติมที่เหมาะสมต่อไป

## 5.2 ขั้นตอนการศึกษาปริมาณคลอรีนที่เติมที่เหมาะสมในการกำจัดปรอท

การศึกษาผลของปริมาณสารคลอรีนที่เติมต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท โดยทำการทดลองแบบจาร์เทสต์ 5 ชุดการทดลอง โดยกำหนดให้น้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้นคงที่เท่ากับ 4 และแปรผันปริมาณคลอรีนที่เติม 5 ค่าดังนี้ คือ 240, 480, 720, 960 และ 1,200 มก./ล. ตามลำดับ นอกจากนี้ทุกชุดการทดลองยังมีการเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวก (สารโคแอกกูแลนต์) เท่ากับ 2 มก./ล. ด้วย ขั้นตอนและวิธีการทดลองสามารถดูเพิ่มเติมจากหัวข้อที่ 4.1.3 ส่วนผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.2

### 5.2.2.1 ไออาร์พีและพีเอช

ผลของค่าไออาร์พีและพีเอชแสดงดังรูปที่ 5.16 จากรูปดังกล่าวพบว่าชุดการทดลองที่เติมปริมาณสารคลอรีนมากขึ้นทำให้น้ำเสียหลังการเติมสารคลอรีนมีค่าพีเอชสูงขึ้นด้วย กล่าวคือชุดการทดลองที่ใช้สารคลอรีน 240, 480, 720, 960 และ 1,200 มก./ล. พบว่าทำให้พีเอชมีค่าเท่ากับ 4.1, 4.5, 5.7, 6.8 และ 7.3 ตามลำดับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากสารคลอรีนชนิดนี้เป็นสารละลายต่างเข้มข้น ซึ่งนอกจากจะทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นแล้วยังพบว่าทำให้ค่าไออาร์พีลดลงตามปริมาณการใช้สารคลอรีนที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 5.2 ผลของค่าปริมาณคลอรีนที่เติมเมื่อดำเนินการบำบัดน้ำเสียสิ่งแวดล้อมทางกายภาพบำบัดน้ำเสียสิ่งแวดล้อม

คลอรีนที่เติม (mg/l)	pH		ORP (mV)			ปรอท (mg/l)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		ของแข็งแขวนลอย (mg/l)		SV30 (ml/l)
	pH <sub>at,Cl<sub>2</sub></sub>	pH <sub>Et</sub>	ORP <sub>adj,pH</sub>	ORP <sub>at,Cl<sub>2</sub></sub>	ORP <sub>Et</sub>	Hg <sub>int</sub>	Hg <sub>at,Cl<sub>2</sub></sub>	Hg <sub>Et</sub>	Hg <sub>T-rem,30min</sub>	Hg <sub>S-rem</sub>	SS <sub>T</sub>	SS <sub>up,30min</sub>	
240	4.1	4.1	591	-110	-115	148	16.648	15.291	15.865	89.67	280	4	26
480	4.4	4.5	613	-178	-167	148	0.110	0.005	0.927	100.00	216	2	47
720	5.7	5.7	611	-245	-253	148	0.104	0.002	0.836	100.00	268	2	51
960	6.7	6.8	615	-304	-310	148	0.002	0.001	0.826	100.00	248	4	46
1200	7.2	7.3	622	-315	-320	148	0.003	0.005	6.360	100.00	304	28	40

pH<sub>at,Cl<sub>2</sub></sub> = ค่าพีเอชหลังเติมสารคลอรีนที่เติมเมื่อดำเนินการบำบัดน้ำเสียสิ่งแวดล้อม

pH<sub>Et</sub> = ค่าพีเอชหลังการบำบัด (หลังเติมสารโพแทสเซียมเปอร์มังกาเนต)

ORP<sub>adj,pH</sub> = ค่าโอxidationรีดักชันที่พีเอช 4 (หลังปรับพีเอช)

ORP<sub>at,Cl<sub>2</sub></sub> = ค่าโอxidationรีดักชันที่เติมคลอรีนที่เติมเมื่อดำเนินการบำบัดน้ำเสียสิ่งแวดล้อม

ORP<sub>Et</sub> = ค่าโอxidationรีดักชันที่เติมคลอรีนที่เติมเมื่อดำเนินการบำบัดน้ำเสียสิ่งแวดล้อม

Hg<sub>int</sub> = ค่าปรอทของน้ำเสียสิ่งแวดล้อมก่อนปรับพีเอช

Hg<sub>at,Cl<sub>2</sub></sub> = ค่าปรอทหลังเติมสารคลอรีนที่เติมเมื่อดำเนินการบำบัดน้ำเสียสิ่งแวดล้อม

=

Hg<sub>S-rem</sub>

Hg<sub>T-rem,30min</sub>

Hg<sub>S-rem</sub>

Hg<sub>T-rem,30min</sub>

SS<sub>T</sub>

SS<sub>up,30min</sub>

SV30

=

=

=

=

=

=

=

=

ค่าปรอทหลังการบำบัด (หลังเติมสารโพแทสเซียมเปอร์มังกาเนต)

ค่าปรอททั้งหมดหลังบำบัดและตกตะกอน 30 นาที

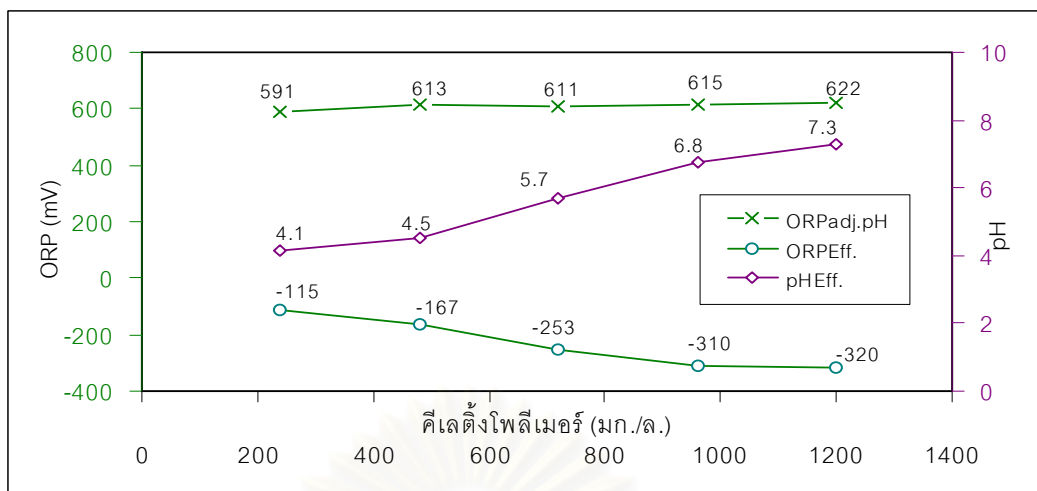
ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทละลาย

ประสิทธิภาพการกำจัดปรอททั้งหมดหลังตกตะกอน 30 นาที

ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

ของแข็งแขวนลอยในน้ำใสหลังตกตะกอน 30 นาที

ปริมาณตะกอนที่ตกตะกอน 30 นาที



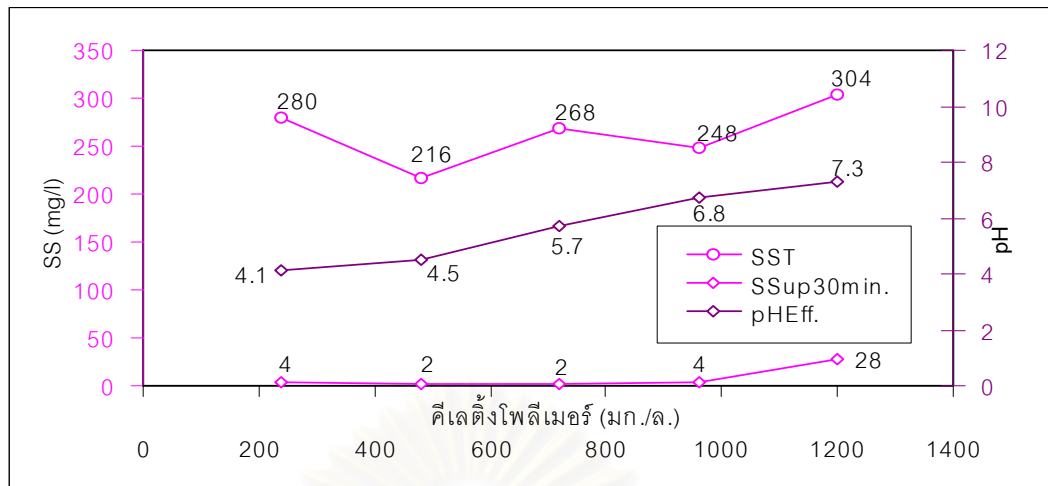
**รูปที่ 5.16** ค่าพีเอชและโออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน ปริมาณสารคลอรีนโดสของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

กล่าวคือในแต่ละชุดการทดลองมีค่าโออาร์พีหลังการเติมสารคลอรีนโดสเท่ากับ -115, -167, -253, -310 และ -320 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ในขณะที่น้ำเสียสังเคราะห์ปรอทภายหลังการปรับพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 4 ของแต่ละชุดการทดลองมีค่าโออาร์พีประมาณ 600 มิลลิโวลต์

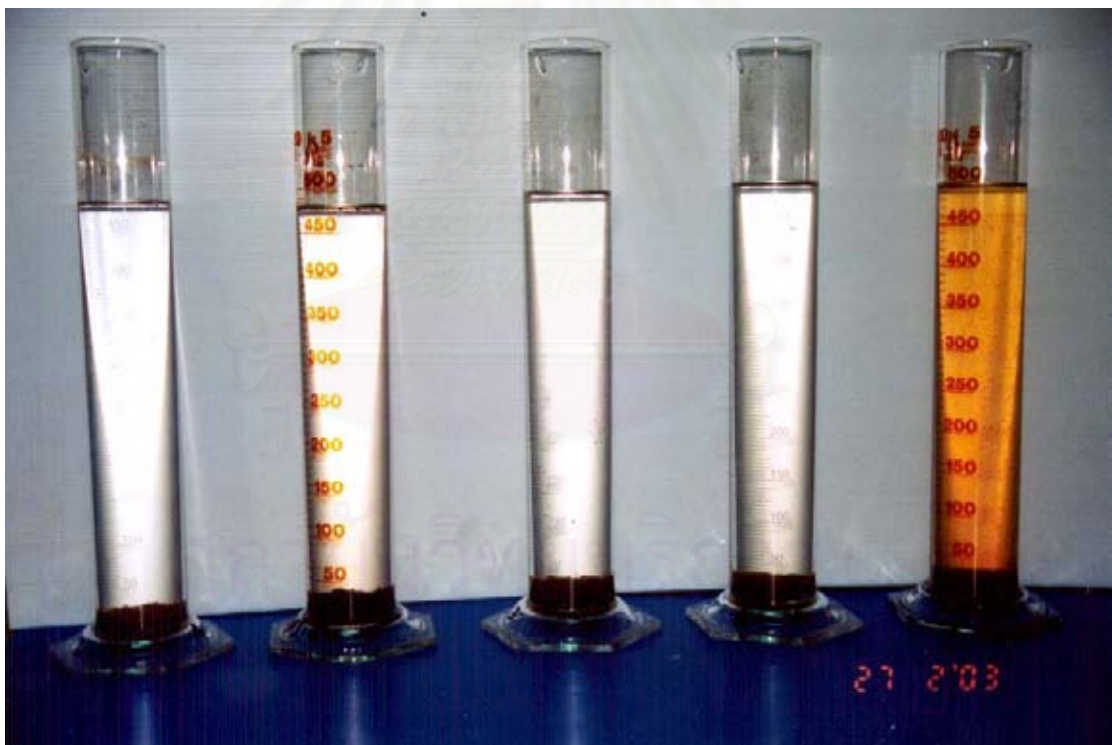
#### 5.2.2.2 ของแข็งแขวนลอย

ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.17 ซึ่งพบว่าการใช้สารคลอรีนโดสที่ปริมาณต่างๆ ไม่มีผลทำให้ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เกิดขึ้นแตกต่างกันมากนัก กล่าวคือในแต่ละชุดการทดลองที่ใช้สารคลอรีนโดส 240, 480, 720, 960 และ 1,200 มก./ล. พบว่ามีของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเกิดขึ้นเท่ากับ 280, 216, 268, 248 และ 304 มก./ล. ตามลำดับ แต่ชุดการทดลองที่ใช้สารคลอรีนโดสในช่วง 240 ถึง 960 มก./ล. พบว่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ดีกว่า โดยเฉพาะชุดการทดลองที่ใช้สารคลอรีนโดสเท่ากับ 480 มก./ล. ส่วนชุดการทดลองที่ใช้สารคลอรีนโดสเท่ากับ 1,200 มก./ล. พบว่ามีของแข็งแขวนลอยเหลืออยู่ในน้ำใสส่วนบนมากที่สุดและน้ำเสียนี้ออกน้ำตาลปานกลาง ดังรูปที่ 5.18 ซึ่งในแต่ละชุดการทดลองมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนเท่ากับ 4, 2, 2, 4 และ 28 มก./ล. ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้ชุดการทดลองที่ใช้สารคลอรีนโดส 1,200 มก./ล. ตกตะกอนได้ไม่ดีนัก อาจเนื่องจากค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการเติมสารคลอรีนโดสมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ (คือมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.3) ซึ่งมีความสอดคล้องกับการทดลองก่อนหน้านี้





รูปที่ 5.17 ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน ปริมาณสารคอลลอยด์ของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท



จากซ้ายไปขวาคือ ชุดการทดลองที่ใช้สารคอลลอยด์ 240, 480, 720, 960 และ 1,200 มก./ล.

รูปที่ 5.18 ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันปริมาณสารคอลลอยด์ของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

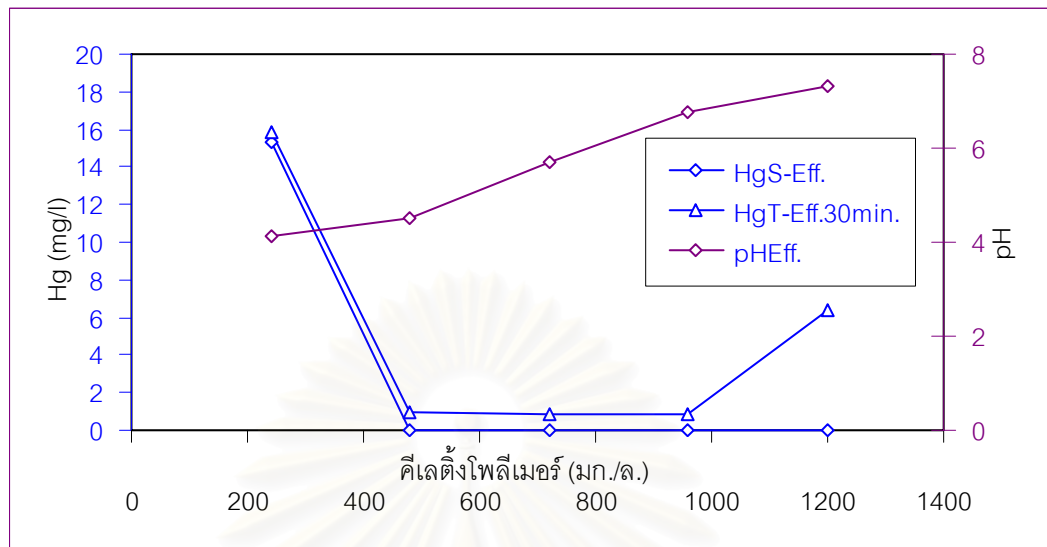
### 5.2.2.3 ประสิทธิภาพการกำจัดปรอท

จากการทดลองกำจัดปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าปรอทเริ่มต้นเท่ากับ 148 มก./ล. โดยแปรผันการใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ระหว่าง 240 - 1,200 มก./ล. และกำหนดให้น้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 โดยมีผลการวิเคราะห์ปรอทที่สภาวะต่างๆ ดังรูปที่ 5.19 และ 5.20 ซึ่งพบว่าปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทด้วย กล่าวคือชุดการทดลองที่มีการใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ 240, 480, 720, 960 และ 1,200 มก./ล. พบว่ามีปริมาณปรอทละลายเหลืออยู่ในน้ำทิ้ง 15.3, 0.005, 0.002, 0.001 และ 0.005 มก./ล. ตามลำดับ จากการทดลองดังกล่าวอาจสรุปว่าถ้าต้องการกำจัดปรอทในน้ำเสียที่มีค่าปรอทเริ่มต้นประมาณ 148 มก./ล. ต้องใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ชนิดนี้อย่างน้อย 480 มก./ล. จึงจะทำให้มีปริมาณปรอทเหลืออยู่ในน้ำต่ำกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม

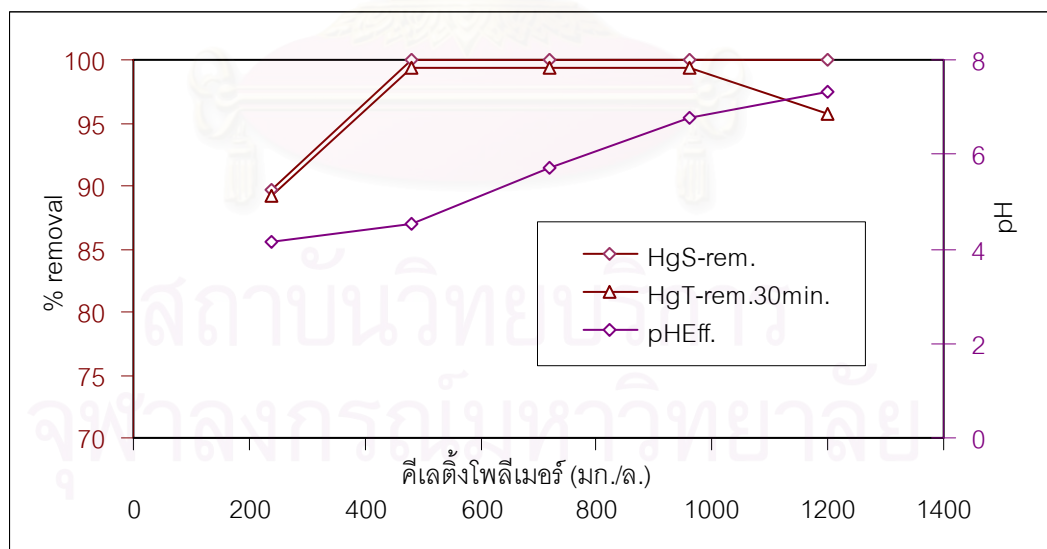
### 5.2.3 สรุปผลการกำจัดปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทด้วยสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์

การใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ 480 มก./ล. ก็เพียงพอที่จะกำจัดปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าปรอทเริ่มต้น 148 มก./ล. เพื่อให้มีค่าปรอทละลายเหลือ  $\leq 0.005$  มก./ล. และ มีค่าปรอททั้งหมดน้อยกว่า 1 มก./ล. ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าถ้าต้องการกำจัดปรอท 1 กรัม จะต้องใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่น้อยกว่า 3.2 กรัม จึงจะทำให้มีค่าปรอทต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม และพบว่ามีของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้น 1.6 กรัม/กรัม (ปรอทที่ถูกกำจัด) ในขณะที่เดียวกันพบว่าการตกตะกอนผลึกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้มีของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้นเท่ากับ 1.2 กรัม/กรัม (ปรอทที่ถูกกำจัด)

สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทละลายสูงและมีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่าน้ำเสียหลังการเติมคีเลตติ้งโพลีเมอร์จะมีค่าพีเอชแปรผันในช่วง 0.4 - 9.2 ก็ตาม แต่ค่าพีเอชดังกล่าวมีผลต่อปฏิกิริยาโคแอกกูเลชันของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้น กล่าวคือถ้า น้ำเสียหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีค่าพีเอชสูง มีผลทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้น มีขนาดเล็กและตกตะกอนไม่ดี ดังนั้นต้องคำนึงอยู่เสมอว่าการใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เพื่อกำจัด ปรอทในน้ำเสียต้องควบคุมค่าพีเอชไม่ให้เกิน 7 ซึ่งนอกจากจะสามารถกำจัดปรอทได้ดีแล้วยังทำให้สามารถแยกของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นออกจากน้ำได้ง่ายด้วย นอกจากนี้จากการทดลอง ยังพบว่าการใช้สารโพลีเมอร์ประจุบวก 2 มก./ล. (สารโคแอกกูแลนต์) ร่วมกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ ทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ง่ายขึ้น ถ้าค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีค่าไม่เกิน 7



รูปที่ 5.19 ค่าปรอทที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันปริมาณสารคาร์บอนกัมมันต์ของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท



รูปที่ 5.20 ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันปริมาณสารคาร์บอนกัมมันต์ของน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

### 5.3 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการศึกษาหาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 5.3.1 ขั้นตอนการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดโครเมียม

การศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเป็นการทดลองแบบจาร์เทสต์ 6 ชุดการทดลอง โดยแปรค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย 6 ค่า คือ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และทุกชุดการทดลองใช้ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์คงที่เท่ากับ 600 มก./ล. (จากหัวข้อที่ 5.1.2) ขั้นตอนและวิธีการทำการทดลองสามารถดูเพิ่มเติมได้จากหัวข้อที่ 4.1.2 ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5.3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 5.3.1.1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการ

น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมที่เตรียมขึ้นมีค่าพีเอชน้อยกว่า 1 ซึ่งค่าที่เครื่องวัดพีเอชวัดได้เท่ากับ 0.4 ดังนั้นเมื่อต้องการแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าต่างๆ ข้างต้น จึงต้องใช้สารที่ให้สภาพต่างเป็นสารปรับพีเอช ซึ่งในที่นี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเป็นสารปรับพีเอช และพบว่าถ้าต้องการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียให้เท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 ต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0, 47.5, 48.1, 48.2, 48.3 และ 48.4 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.21 จากผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทในหัวข้อที่ 5.2.1.1 โดยพบว่าการปรับค่าพีเอชจาก 0.4 เป็น 3 ต้องใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับค่าพีเอชจาก 3 เป็น 9 นอกจากนี้ชุดการทดลองนี้มีความต้องการปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์พอๆ กับชุดการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท (เมื่อปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากัน) เนื่องจากในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละประเภทใช้ปริมาณกรดเท่ากันนั่นเอง

##### 5.3.1.2 ไออาร์พีและพีเอช

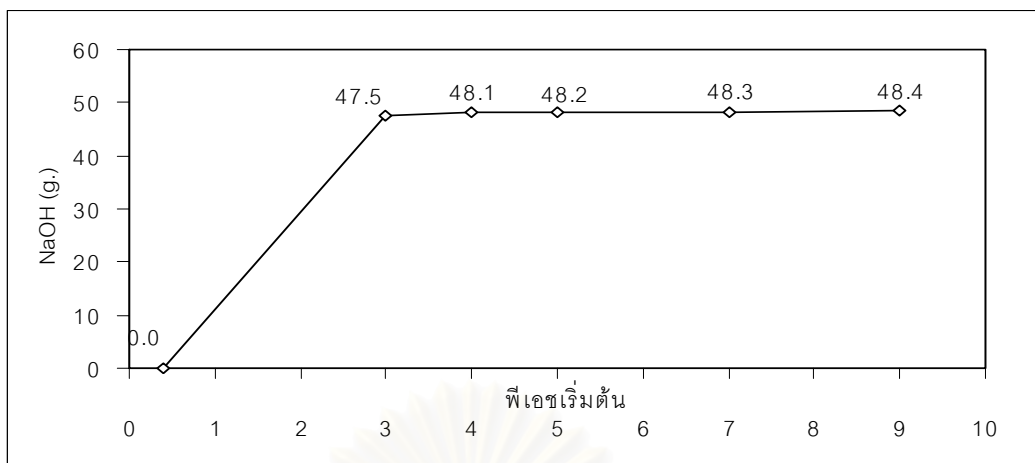
ค่าไออาร์พีและพีเอชที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.22 เนื่องจากสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เป็นสารละลายต่างเข้มข้น ดังนั้นเมื่อใส่ลงไปน้ำเสียจึงทำให้ค่าพีเอชมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย (โดยเฉพาะชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น  $\geq 4$ ) กล่าวคือชุดการทดลองที่น้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 พบว่าหลังการใช้สาร

ตารางที่ 5.3 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม

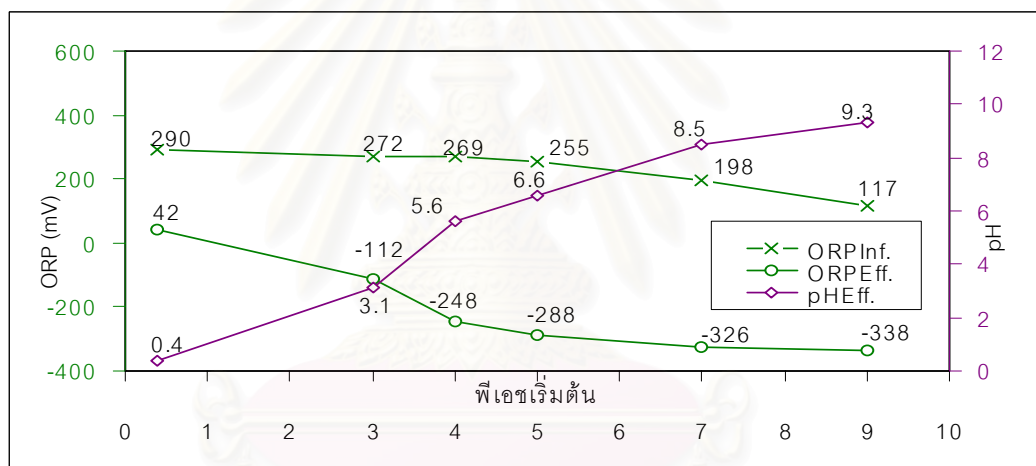
pH	ปริมาณ NaOH (g/l)	ORP (mV)		โครเมียม (mg/l)						ประสิทธิภาพการกำจัด (%)				ของแข็งแขวนลอย (mg/l)			SV30 (ml/l)
		pH <sub>int</sub>	pH <sub>EQ</sub>	ORP <sub>int</sub>	ORP <sub>EQ</sub>	Cr <sub>int</sub>	Cr <sub>adj.pH</sub>	Cr <sub>S-rem</sub>	Cr <sub>T-rem.30min</sub>	Cr <sub>T-rem.24hr</sub>	Cr <sub>T-rem.30min</sub>	Cr <sub>T-rem.24hr</sub>	SS <sub>T</sub>	SS <sub>up30min</sub>	SS <sub>up24hr</sub>	SS <sub>upcoag</sub>	
0.4	0 (0 ml)	37.2	37.2	290	42	37.2	35.4	36.95	34.39	4.8	0.6	7.5	8	0	0	0	*
3	47.5 (95 ml)	37.2	37.2	272	-112	37.2	31.5	34.14	33.60	15.4	8.2	9.7	28	8	0	2	4.7
4	48.1 (96.2 ml)	37.2	37.2	269	-248	37.2	17.8	20.67	19.90	52.3	44.4	46.5	60	22	4	0	18.7
5	48.2 (96.46 ml)	37.2	37.2	255	-288	37.2	2.2	31.79	4.89	94.1	14.5	86.8	88	72	6	0	*
7	48.30 (96.60 ml)	37.2	37.2	198	-326	37.2	1.2	14.76	0.65	99.3	60.3	98.3	48	16	2	12	14.9
9	48.37 (96.75 ml)	37.2	37.2	117	-338	37.2	0.1	16.01	0.49	99.6	57.0	98.7	48	18	0	10	14.9

\* = หนักไม่ได้

- pH<sub>int</sub> = ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนปรับพีเอช
- pH<sub>EQ</sub> = ค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัด (หลังเติมโคแอกูแลนต์โพสิทีฟ)
- ORP<sub>int</sub> = ค่าไอออนรีดของน้ำเสียในแต่ละจุดการทดลองหลังปรับพีเอช
- ORP<sub>EQ</sub> = ค่าไอออนรีดเริ่มต้นของน้ำหลังการบำบัด (หลังเติมโคแอกูแลนต์โพสิทีฟ)
- Cr<sub>int</sub> = ค่าโครเมียมเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนปรับพีเอช
- Cr<sub>adj.pH</sub> = ค่าโครเมียมหลังปรับพีเอชในแต่ละจุดการทดลอง
- Cr<sub>S-rem</sub> = ค่าโครเมียมที่เหลือหลังการบำบัด (หลังเติมโคแอกูแลนต์โพสิทีฟ)
- Cr<sub>T-rem.30min</sub> = ค่าโครเมียมทั้งหมดถึงน้ำบำบัดและที่จุดทดลอง 30 นาที
- Cr<sub>T-rem.24hr</sub> = ค่าโครเมียมทั้งหมดถึงน้ำบำบัดและที่จุดทดลอง 24 ชั่วโมง
- Cr<sub>S-rem</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมละลาย
- Cr<sub>T-rem.30min</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมด (ภาคทดลอง 30 นาที)
- Cr<sub>T-rem.24hr</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมด (ภาคทดลอง 24 ชั่วโมง)
- SS<sub>T</sub> = ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
- SS<sub>up30min</sub> = ของแข็งแขวนลอยหลังทดลอง 30 นาที
- SS<sub>up24hr</sub> = ของแข็งแขวนลอยหลังทดลอง 24 ชั่วโมง
- SS<sub>upcoag</sub> = ของแข็งแขวนลอยหลังเติมโพสิทีฟและตกตะกอน 30 นาที
- SV30 = ปริมาตรของชั้นตะกอนหลังการทดลอง 30 นาที



รูปที่ 5.21 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม



รูปที่ 5.22 ค่าพีเอชและโออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม

คือตั้งโพลีเมอร์ทำให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 0.4, 3.1, 5.5, 6.6, 8.5 และ 9.3 ตามลำดับ (สอดคล้องกับการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท)

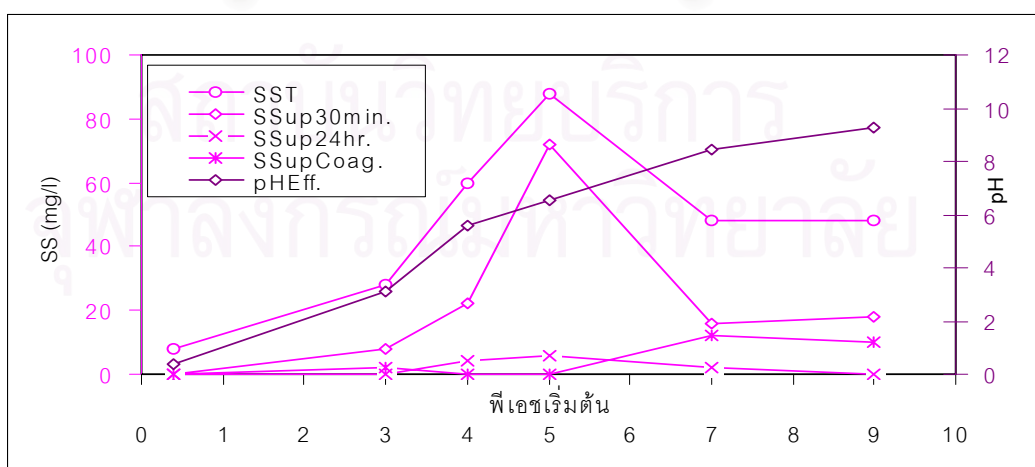
น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองมีค่าโออาร์พีเป็นบวกทั้งสิ้น แต่ค่าโออาร์พีมีค่าลดลงเมื่อน้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้นมากขึ้น กล่าวคือชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 พบว่ามีค่าโออาร์พีเท่ากับ 290, 272, 269, 255, 198 และ 117 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ แต่น้ำเสียหลังการเติมสารคือตั้งโพลีเมอร์มีค่าโออาร์พีลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าโออาร์พีเริ่มต้นและโดยส่วนใหญ่จะมีค่าเป็นลบ (ยกเว้นชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าโออาร์พีดังกล่าวมีค่า

เป็นลบมากขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น กล่าวคือ น้ำเสียหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ในแต่ละชุดการทดลองมีค่าไอออนพีเท่ากับ 42, -112, -248, -288, -326 และ -338 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ (สอดคล้องกับการทดลองที่ทำกับน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท)

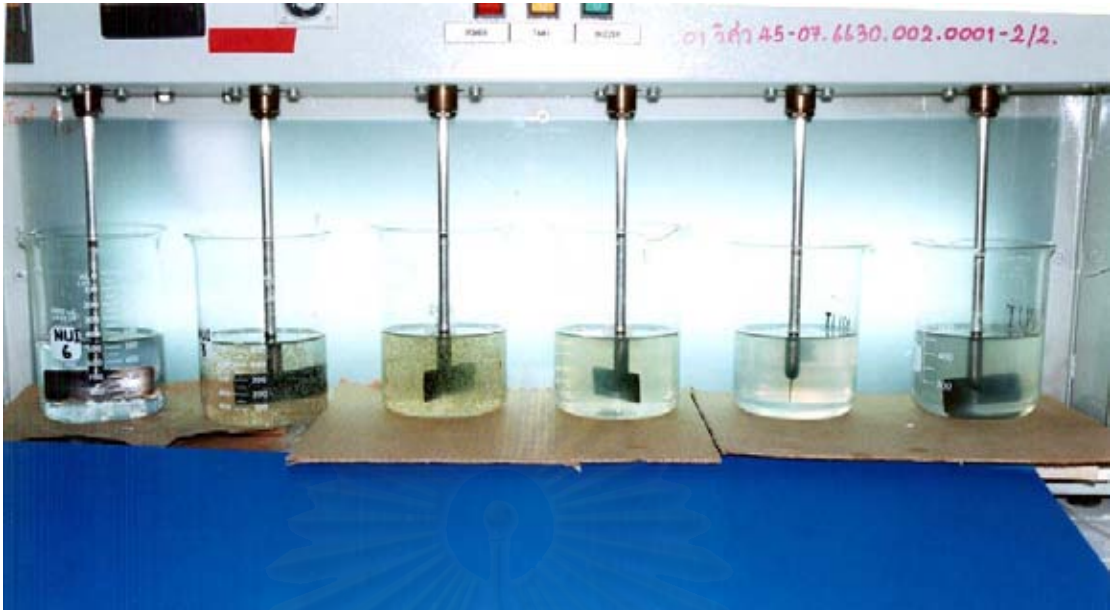
### 5.3.1.3 ของแข็งแขวนลอย

ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.23 ในขณะที่ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียในแต่ละชุดการทดลองเพื่อทำให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นตามที่ต้องการ พบว่ามีของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กสีเขียวอมฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดเจนขึ้นในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชมากกว่า 3 ซึ่งคาดว่าเป็นตะกอนของ  $\text{Cr}(\text{OH})_3$

ในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ลงไปและกวนผสม พบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4 มีของแข็งแขวนลอยสีขาว-เหลืองเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย (น้อยมาก) สำหรับชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และ 4 พบว่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่และมีสีน้ำตาลอ่อน ส่วนชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5, 7 และ 9 พบว่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและมีสีเขียวอมฟ้าดังรูปที่ 5.24 โดยที่ในแต่ละชุดการทดลองมีของแข็งทั้งหมดเกิดขึ้นเท่ากับ 8, 28, 60, 88, 48 และ 48 มก./ล. ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที ดังรูปที่ 5.25 พบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 มีค่าของแข็งแขวนลอยเหลืออยู่ในน้ำใสส่วนบนเท่ากับ 0, 8, 22, 72, 16 และ 18 มก./ล. (ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4 เกิดของแข็งแขวนลอยทั้งหมดน้อยมากจึงมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนเท่ากับ 0 มก./ล.) จากผลดังกล่าวพบว่าแม้ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 จะมีของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่แต่ตกตะกอนได้ไม่ทัน ส่วนชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 และ 9 แม้ว่าของแข็งแขวนลอยมีขนาดเล็ก

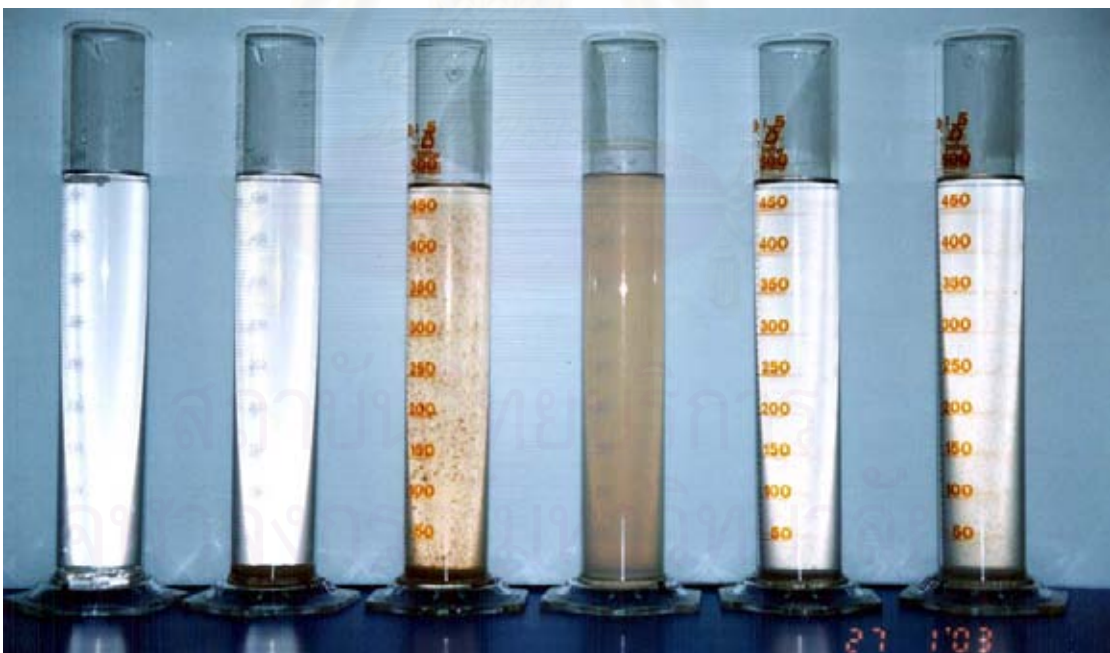


รูปที่ 5.23 ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม



จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ

รูปที่ 5.24 ลักษณะของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นหลังเติมคัลเซียมไฮดรอกไซด์ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม



จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ

รูปที่ 5.25 ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม

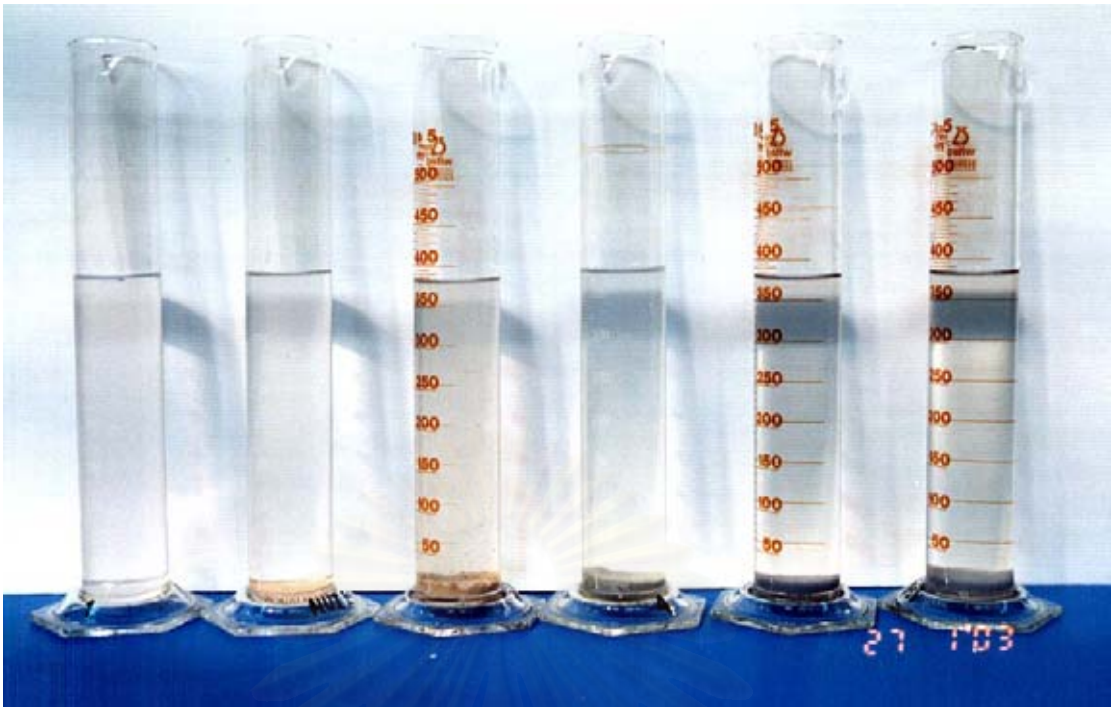


แต่สามารถตกตะกอนได้ดี (เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4) ต่างกับชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ซึ่งพบว่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กเช่นกัน แต่ของแข็งแขวนลอยดังกล่าวแทบจะไม่ตกตะกอนเลยภายใน 30 นาที อย่างไรก็ตามเมื่อทิ้งให้ ตกตะกอนนานถึง 24 ชั่วโมง พบว่าของแข็งแขวนลอยของทุกชุดการทดลองสามารถตกตะกอนได้เกือบหมดดังรูปที่ 5.26 ซึ่งมีของแข็งแขวนลอยเหลืออยู่ในน้ำใสส่วนบนเท่ากับ 0, 0, 4, 6, 2 และ 0 ตามลำดับ

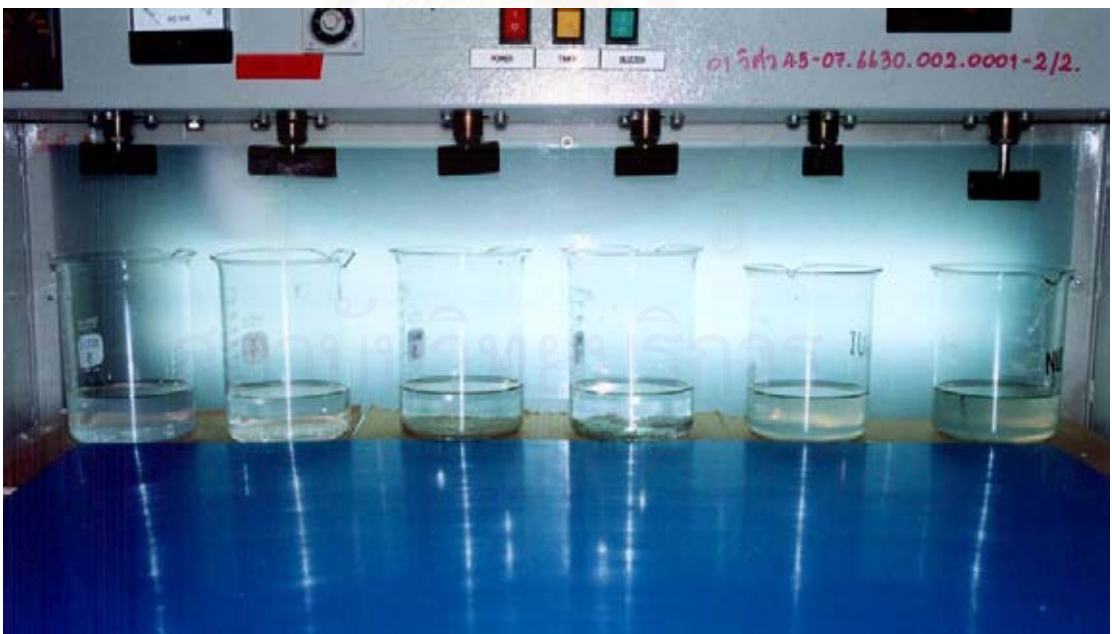
อย่างไรก็ตามได้ทดสอบความสามารถในการตกตะกอนเมื่อใช้สารโคแอกกูแลนต์ด้วย โดยนำน้ำเสียที่เหลืออยู่หลังทิ้งให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมงมาเทลงบีกเกอร์และกวนผสมใหม่และเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวก 3 มก./ล. ลงไป กวนช้า 20 นาที และปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที จากผลการทดลองภายหลังการเติมสารโคแอกกูแลนต์พบว่าในแต่ละชุดการทดลองมีของแข็งแขวนลอยเหลืออยู่ในน้ำใสเท่ากับ 0, 2, 0, 0, 12 และ 10 ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.27 แต่จะเห็นว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 และ 9 จะมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสน้อยกว่าเมื่อไม่มีการใช้สารโคแอกกูแลนต์อยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งจากการสังเกตของผู้ทดลองเห็นว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 และ 9 ดังกล่าวแม้จะเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวก (สารโคแอกกูแลนต์) ลงไปก็ไม่ได้ช่วยทำให้การตกตะกอนดีขึ้นแต่อย่างใด อาจเป็นเพราะค่าพีเอชหลังการเติมสารคือเลติงโพลีเมอร์มีค่าสูงคือ 8.5 และ 9.3 ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเติมโพลีเมอร์ประจุบวกมีผลทำให้ของแข็งแขวนลอยมีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนได้ดีขึ้นเฉพาะชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชหลังการเติมสารคือเลติงโพลีเมอร์น้อยกว่า 8.5

#### 5.3.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม

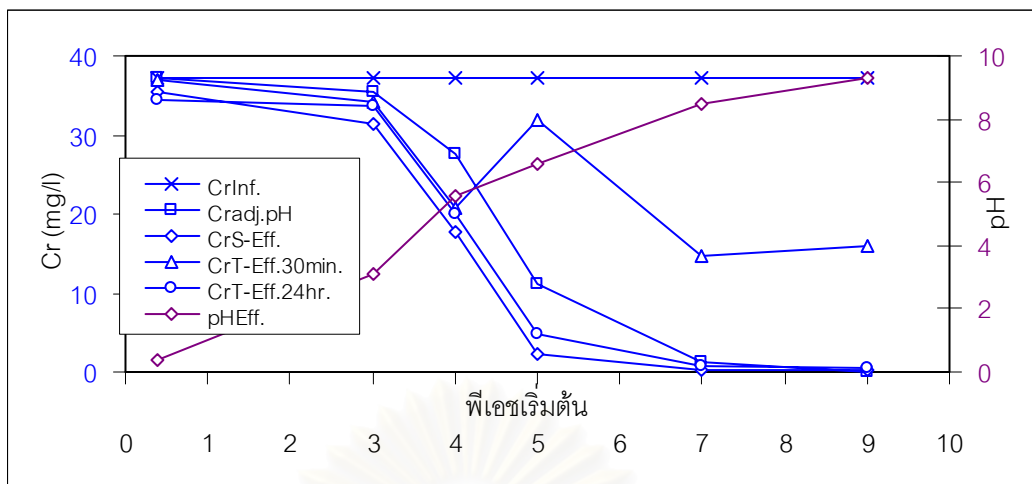
จากการทดลองกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าโครเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 37 มก./ล. โดยใช้สารคือเลติงโพลีเมอร์ 600 มก./ล. โดยแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียให้อยู่ระหว่าง 0.4 - 9 ผลการวิเคราะห์โครเมียมที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.28 และ 5.29 จากรูปดังกล่าวพบว่า หลังการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้สูงขึ้น จะทำให้ค่าโครเมียมละลายลดลง กล่าวคือหลังการปรับพีเอชเริ่มต้นให้ได้เท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 พบว่ามีค่าโครเมียมละลายเหลืออยู่ 37.2, 35.4, 27.2, 11.2, 1.2 และ 0.1 มก./ล. ตามลำดับ (ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4 คือ น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเริ่มต้นที่ยังไม่มีการปรับพีเอชนั่นเอง) ผลดังกล่าวคาดว่าโครเมียมละลายที่หายไป น่าจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  โดยกระบวนการตกตะกอนผลึก เนื่องจากผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับความสามารถในการละลาย ของผลึก  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  ดังรูปที่ 3.2 จากการทดลองข้างต้นอาจกล่าวได้ว่าเพียงแต่ปรับค่าพีเอชของ น้ำเสียให้มีค่าประมาณ 8.5 - 9 (ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์) ก็สามารถกำจัดโครเมียมละลาย ให้เหลือต่ำกว่า 0.75 มก./ล. ได้ โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่น้ำเสียมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 9



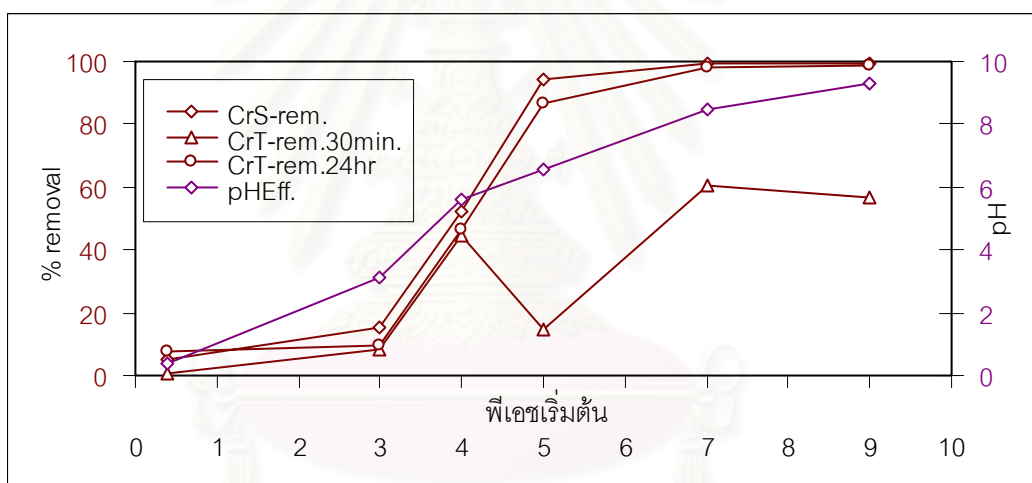
จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ  
**รูปที่ 5.26** ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อ  
 แปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม



จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ  
**รูปที่ 5.27** ลักษณะการตกตะกอนหลังเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวก (3 มก./ล.) และทิ้งให้  
 ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์  
 โครเมียม



รูปที่ 5.28 ค่าโครเมียมที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม



รูปที่ 5.29 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม

พบว่ามียค่าโครเมียมละลายเพียง 0.1 มก./ล.

ในสภาวะหลังการใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์พบว่า ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 มียค่าโครเมียมละลายเท่ากับ 35.4, 31.5, 17.8, 2.2, 0.3 และ 0.2 มก./ล.ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีผลต่อการกำจัดโครเมียมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากค่าโครเมียมละลายภายหลังการเติมคีเลตติ้งโพลีเมอร์ใกล้เคียงกับค่าโครเมียมละลายหลังการปรับพีเอชนั่นเอง ซึ่งในกรณีนี้คาดว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่ได้มีส่วนในการกำจัดโครเมียมโดยตรง แต่มีส่วนในการกำจัดโดยทางอ้อมเท่านั้น เนื่องจาก

สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์สามารถเพิ่มสภาพต่างในน้ำและทำให้ค่าพีเอชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ดังกล่าวแล้วข้างต้น) จึงมีผลทำให้ผลึก  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  ละลายน้ำได้น้อยลง (จากรูปที่ 3.2) หรือสรุปได้ว่าการกำจัดโครเมียมจากการทดลองนี้ไม่ได้เกิดจากสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ แต่เกิดจากกลไกการตกตะกอนผลึกเป็นหลัก

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดโครเมียมโดยการใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ มีจุดประสงค์เพื่อจะนำค่าพีเอชที่เหมาะสมไปทำการศึกษาหาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อไป แต่จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่มีส่วนโดยตรงในการกำจัดโครเมียม ซึ่งก็หมายความว่าค่าพีเอชก็ไม่มีผลใดๆ สำหรับการกำจัดโครเมียมโดยการใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์นั่นเอง แต่อาจมีคำถามว่า “เป็นไปได้หรือไม่ว่าการทดลองดังกล่าวใช้ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์น้อยเกินไป” ดังนั้นเพื่อตรวจสอบค่าดังกล่าวดังกล่าวจึงได้ทำการทดลองต่อไปโดยการแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ โดยกำหนดให้น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมทุกชุดการทดลองมีค่าพีเอชคงที่เท่ากับ 3 เหตุผลที่เลือกค่าพีเอชเริ่มต้นดังกล่าวก็เนื่องจากผลจากการกราฟไตเตรชันในรูปที่ 5.2 บ่งชี้ว่าเมื่อเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ตั้งแต่ 0 – 1,440 มก./ล. ก็ไม่มีผลทำให้ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงผลของค่าพีเอชที่มีต่อการกำจัดโครเมียมด้วยกลไกการตกตะกอนผลึกนั่นเอง

### 5.3.2 ขั้นตอนการศึกษาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม

การศึกษาผลของปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม เป็นการทดลองแบบจาร์เจสต์ซึ่งมี 6 ชุดการทดลอง โดยกำหนดค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละชุดการทดลองให้มีค่าคงที่เท่ากับ 3 และแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ 6 ค่า คือ 120, 480, 720, 960, 1,200 และ 1,440 มก./ล. ตามลำดับ เนื่องจากการทดลองนี้มุ่งเน้นศึกษาผลของสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่มีต่อการกำจัดโครเมียมเท่านั้น จึงทำการวิเคราะห์เฉพาะค่าโครเมียมละลาย ค่าพีเอช และไออาร์พีเท่านั้น ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5.4

#### 5.3.2.1 ไออาร์พีและพีเอช

ผลของค่าไออาร์พีและพีเอชในสถานะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.30 ชุดการทดลองที่ใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 120, 480, 720, 960, 1,200 และ 1,440 มก./ล. พบว่าทำให้น้ำเสียในแต่ละชุดการทดลองมีค่าพีเอชค่อนข้างคงที่ กล่าวคือน้ำเสียหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีค่าพีเอชเท่ากับ 3.0, 3.0, 3.1, 3.1, 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวเป็นไปตามวัตถุประสงค์

ตารางที่ 5.4 ผลของปริมาณสารคลอรีนที่เติมคลอรีนต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียตั้งเคราะห์โครเมียม

คลอรีนที่เติม (mg/l)	pH		ORP (mV)		โครเมียม (mg/l)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
	pH <sub>int.</sub>	pH <sub>Ext.</sub>	ORP <sub>int.</sub>	ORP <sub>Ext.</sub>	Cr <sub>int.</sub>	Cr <sub>adj pH</sub>	Cr <sub>s-Ext</sub>	
120	3	3.0	281	-130	28.0	27.1	26.8	4.4
480	3	3.0	278	-165	28.0	27.1	26.1	6.8
720	3	3.1	280	-176	28.0	27.1	25.9	7.5
960	3	3.1	279	-185	28.0	27.1	25.0	10.8
1200	3	3.2	283	-209	28.0	27.1	23.8	15.1
1440	3	3.3	288	-218	28.0	27.1	24.6	12.1

pH<sub>int.</sub> = ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียตั้งเคราะห์ก่อนปรับพีเอช

pH<sub>Ext.</sub> = ค่าพีเอชของน้ำภายหลังการบำบัด (หลังเติมคลอรีน)

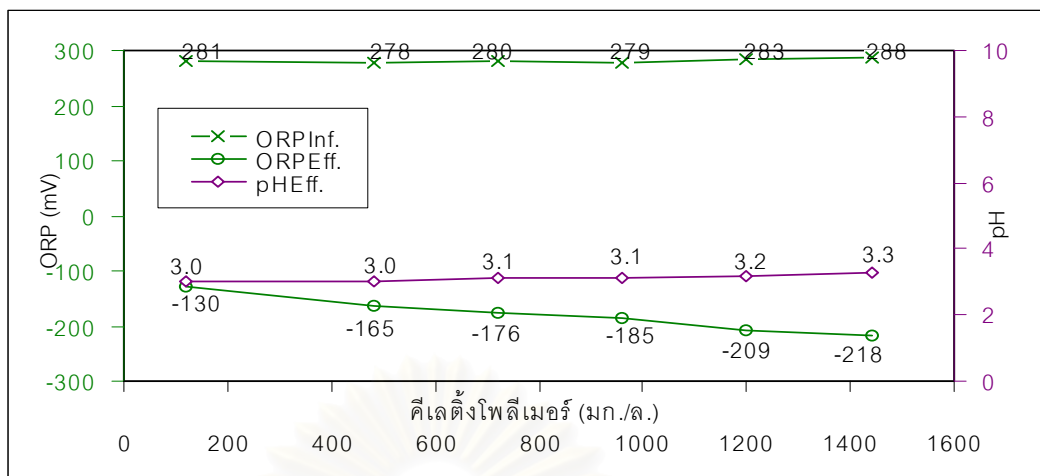
ORP<sub>int.</sub> = ค่าโออาร์พีเริ่มต้นของน้ำเสียตั้งเคราะห์

ORP<sub>Ext.</sub> = ค่าโออาร์พีของน้ำภายหลังการบำบัด (หลังเติมคลอรีน)

Cr<sub>int.</sub> = ค่าโลหะโครเมียมเริ่มต้นของน้ำเสียก่อนปรับพีเอช

Cr<sub>s-Ext.</sub> = ค่าโลหะโครเมียมตกค้างที่เหลือภายหลังการบำบัด (หลังเติมคลอรีน)

Cr<sub>s-rem.</sub> = ค่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะโครเมียมตกค้าง



**รูปที่ 5.30** ค่าพีเอชและโออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน ปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม

ที่ต้องการ เนื่องจากมุ่งเน้นศึกษาเฉพาะผลของปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพ การกำจัดโครเมียม โดยปราศจากผลของค่าพีเอชหรือการตกตะกอนผลึกเข้ามาเกี่ยวข้อง

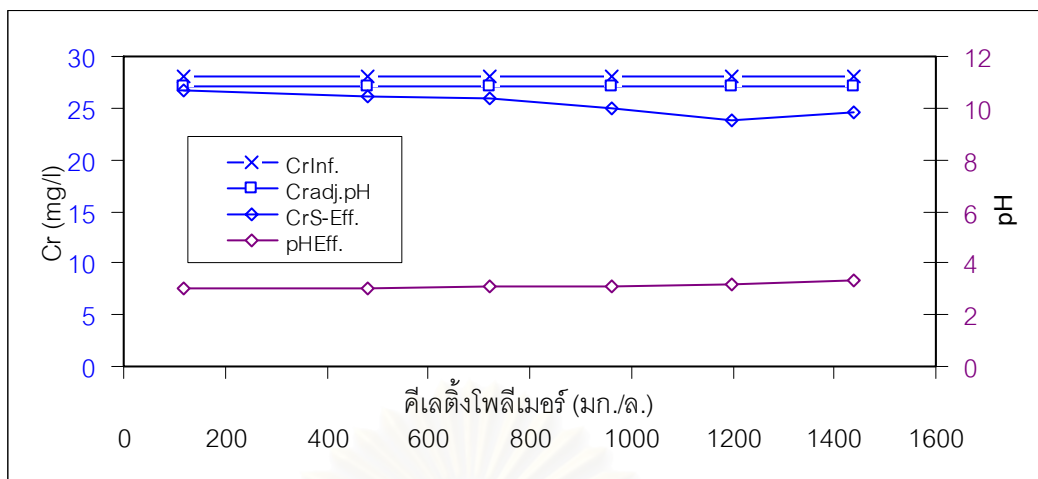
นอกจากนี้ยังพบว่าค่าโออาร์พีหลังการเติมสารคลอรีนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ที่เติมลงไป กล่าวคือชุดการทดลองที่ใช้สารคลอรีนไดออกไซด์เท่ากับ 120, 480, 720, 960, 1,200 และ 1,440 มก./ล. พบว่าแต่ละชุดการทดลองมีค่าโออาร์พีเท่ากับ -130, -165, -176, -185, -209 และ -218 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ

### 5.3.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม

ผลการวิเคราะห์โครเมียมที่สภาวะต่างๆ ของทุกชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.31 จากรูปดังกล่าวพบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นก็ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพ การกำจัดโครเมียม กล่าวคือเมื่อเติมสารคลอรีนไดออกไซด์เท่ากับ 120, 480, 720, 960, 1,200 และ 1,440 มก./ล. พบว่าในแต่ละชุดการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมร้อยละ 4.4, 6.8, 7.5, 10.8, 15.1 และ 12.1 ตามลำดับ และผลการทดลองดังกล่าวยังบ่งชี้ได้ชัดเจนว่าสารคลอรีน ไดออกไซด์ชนิดนี้ไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้

### 5.3.3 สรุปผลการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารคลอรีนไดออกไซด์

การศึกษาจากผลการทดลองข้างต้นอาจกล่าวได้ว่าสารคลอรีนไดออกไซด์ชนิดนี้ ไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้ ดังนั้นค่าพีเอชและปริมาณของสารคลอรีนไดออกไซด์จึงไม่มีผลใดๆ กับการกำจัดโครเมียม เนื่องจากโดยปกติกลไกในการกำจัดโลหะหนักด้วยสารคลอรีนไดออกไซด์



**รูปที่ 5.31** ค่าโครเมียมที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม

ชนิดนี้เป็นปฏิกิริยาคีเลชันร่วมกับโคออร์ดิเนชัน โดยจะมีกลุ่มไดไฮดรอกซีคาร์บาเมตทำปฏิกิริยาคีเลชันกับโลหะหนักและเนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลแบบโพลิเมอร์เมื่อจับกับโลหะหนักแล้วจึงเปลี่ยนรูปโลหะหนักละลายไปเป็นของแข็งแขวนลอยซึ่งในขณะเดียวกันก็เกิดกระบวนการโคออร์ดิเนชันไปพร้อมๆ กัน จึงทำให้เกิดของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ โดยปกติปฏิกิริยาคีเลชันจะเกิดขึ้นได้นั้นต้องมีการแลกเปลี่ยนอิออนระหว่างไฮเดียม (ที่เกาะติดกับกลุ่มไดไฮดรอกซีคาร์บาเมต) กับโลหะหนัก (ดูเพิ่มเติมได้ในหัวข้อ 3.3.5) ดังนั้นจากการทดลองนี้อาจกล่าวได้ว่าโครเมียมไม่สามารถแลกเปลี่ยนประจุกับไฮเดียมจากกลุ่มไดไฮดรอกซีคาร์บาเมตได้ หรืออาจกล่าวได้ว่า ปฏิกิริยาระหว่างโครเมียมกับกลุ่มไดไฮดรอกซีคาร์บาเมตมีค่าเสถียรภาพคงที่ (stability constant,  $K_s$ ) น้อยกว่าปฏิกิริยาระหว่างไฮเดียมกับกลุ่มไดไฮดรอกซีคาร์บาเมต จึงไม่เกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังกล่าว

อย่างไรก็ตามวิธีการซึ่งสามารถกำจัดโครเมียมได้ดีและมีประสิทธิภาพสูงคือการตกตะกอนผลึกด้วยไฮดรอกไซด์ จากการทดลองข้างต้นได้พิสูจน์แล้วว่าเมื่อใช้ไฮเดียมไฮดรอกไซด์ปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 8 - 9 ก็สามารถทำให้โครเมียมละลายมีค่าต่ำ (ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม) นอกจากนี้ผลึกดังกล่าวก็สามารถแยกออกจากน้ำได้ดีโดยการปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือถ้ามีการใช้สารโคออร์ดิเนนต์ช่วยในการรวมตะกอน ก็จะทำให้ผลึกดังกล่าวตกตะกอนได้ดีขึ้นและใช้เวลาให้น้อยลงด้วย

#### 5.4 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เงิน

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเงินสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเงิน ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการศึกษาหา

ปริมาณสารคลอรีนที่เติมโพลิเมอร์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงิน โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 5.4.1 ขั้นตอนการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดเงิน

การศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในน้ำเสียสังเคราะห์เงิน เป็นการทดลองแบบจาร์เทสต์ 5 ชุดการทดลอง โดยแปรค่าพีเอชเริ่มต้น 5 ค่า คือ 1, 4, 6, 8 และ 10 ตามลำดับ และในแต่ละชุดการทดลองใช้ปริมาณสารคลอรีนที่เติมโพลิเมอร์คงที่เท่ากับ 720 มก./ล. (จากหัวข้อที่ 5.1.3) ขั้นตอนและวิธีการทดลองสามารถดูเพิ่มเติมได้จากหัวข้อที่ 4.1.2 สำหรับผลการทดลองของทุกชุดการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.5 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

##### 5.4.1.1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการ

น้ำเสียสังเคราะห์เงินที่เตรียมขึ้นมีค่าพีเอชเท่ากับ 0.4 ดังนั้นเมื่อต้องการแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองจำเป็นต้องใช้สารที่ให้สภาพต่างในการปรับค่าพีเอชของน้ำเสีย ซึ่งในที่นี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเป็นสารปรับพีเอช ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.32 จากรูปดังกล่าวพบว่าชุดการทดลองที่จะต้องปรับค่าพีเอชจาก 0.4 ไปเป็น 1, 4, 6, 8 และ 10 ต้องใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 27.5, 49.0, 49.03, 49.1 และ 49.3 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับชุดการทดลองที่ทำกับน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทและโครเมียม สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละประเภทมีการใช้ปริมาณกรดเท่ากันนั่นเอง

##### 5.4.1.2 ไออาร์พีและพีเอช

ค่าไออาร์พีและพีเอชที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.33 ในสภาวะหลังการเติมสารคลอรีนที่เติมโพลิเมอร์พบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1, 4, 6, 8 และ 10 มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นขึ้นเป็น 1, 4.2, 6.5, 8.7, และ 10.5 ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารคลอรีนที่เติมโพลิเมอร์มีสภาพต่างนั่นเอง (เห็นได้ชัดเจนในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นมากกว่า 4) แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากชุดการทดลองของน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ แต่จากการตรวจสอบค่าพีเอชดังกล่าวกับค่าพีเอชในกราฟไตเตรชันของน้ำเสียสังเคราะห์เงินที่ค่าพีเอชต่างๆ ก็พบว่ามีความสอดคล้องกับการทดลองนี้

เมื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าเริ่มต้นต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง จะมีค่าไออาร์พีเป็นบวกทั้งสิ้น เพียงแต่ว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น ย่อมทำให้ค่าไออาร์พีมีแนวโน้มลดลงด้วย ส่วนในสภาวะหลังการเติมสารคลอรีนที่เติมโพลิเมอร์พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าไออาร์พีลดลงอย่างมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับค่าไออาร์พีเริ่มต้น) และอีกเช่นเดียวกัน ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชหลังการเติมสารคลอรีนที่เติมโพลิเมอร์สูงกว่า ก็ทำให้ค่าไออาร์พี



ตารางที่ 5.5 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในน้ำเสียสังเคราะห์เงิน

pH	ปริมาณ NaOH (g/l)	ORP (mV)		เงิน (mg/l)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)				ของแข็งแขวนลอย (mg/l)			SV30 (ml/l)	
		ORP <sub>inf</sub>	ORP <sub>Et</sub>	Ag <sub>inf</sub>	Ag <sub>adj pH</sub>	Ag <sub>5-ET</sub>	Ag <sub>T-ET 30min</sub>	Ag <sub>T-ET 24hr</sub>	Ag <sub>5-rem</sub>	Ag <sub>T-rem 30min</sub>	Ag <sub>T-rem 24hr</sub>	SS <sub>T</sub>	SS <sub>up30min</sub>	SS <sub>up24hr</sub>		SS <sub>upCoag</sub>
1	27.5 (55 ml)	470	-40	214.1	194	0.07	9.25	1.43	100.0	95.7	99.3	244	16	6	6	14
4	49 (98 ml)	403	-180	214.1	192	0.10	2.76	0.44	100.0	98.7	99.8	272	6	2	0	26
6	49.03 (98.1 ml)	387	-308	214.1	187	0.07	6.52	0.48	100.0	97.0	99.8	284	16	2	0	37
8	49.12 (98.25 ml)	382	-337	214.1	180	0.06	7.74	0.97	100.0	96.4	99.5	268	12	4	0	28
10	49.29 (98.6 ml)	344	-370	214.1	95	20.49	53.57	42.91	90.4	75.0	80.0	148	20	0	4	5

pH<sub>inf</sub> = ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ (หลังปรับพีเอช)

pH<sub>Et</sub> = ค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัด (หลังเติมคลอรีนโพสิเมอร์)

ORP<sub>inf</sub> = ค่าโออาร์พีของน้ำเสียสังเคราะห์ (หลังปรับพีเอช)

ORP<sub>Et</sub> = ค่าโออาร์พีของน้ำเสียก่อนปรับพีเอช

Ag<sub>inf</sub> = ค่าเงินเริ่มต้นของน้ำเสียก่อนปรับพีเอช

Ag<sub>adj pH</sub> = ค่าเงินหลังปรับพีเอชในแต่ละจุดการทดลอง

Ag<sub>5-ET</sub> = ค่าเงินละลายที่เหลือหลังการบำบัด (หลังเติมคลอรีนโพสิเมอร์)

Ag<sub>T-ET 30min</sub> = ค่าเงินทั้งหมดหลังการบำบัดโดยใช้ตกตะกอน 30 นาที

Ag<sub>T-ET 24hr</sub> = ค่าเงินทั้งหมดหลังการบำบัดโดยใช้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง

Ag<sub>5-rem</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะเงินละลาย

Ag<sub>T-rem 30min</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะเงินทั้งหมดหลังตกตะกอน 30 นาที

Ag<sub>T-rem 24hr</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะเงินทั้งหมดหลังตกตะกอน 24 ชั่วโมง

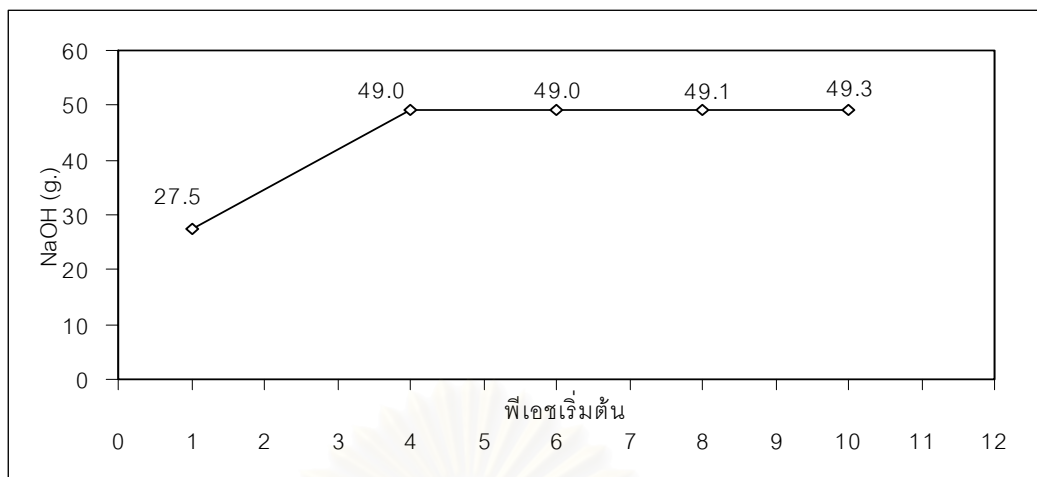
SS<sub>T</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

SS<sub>up30min</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสหลังตกตะกอน 30 นาที

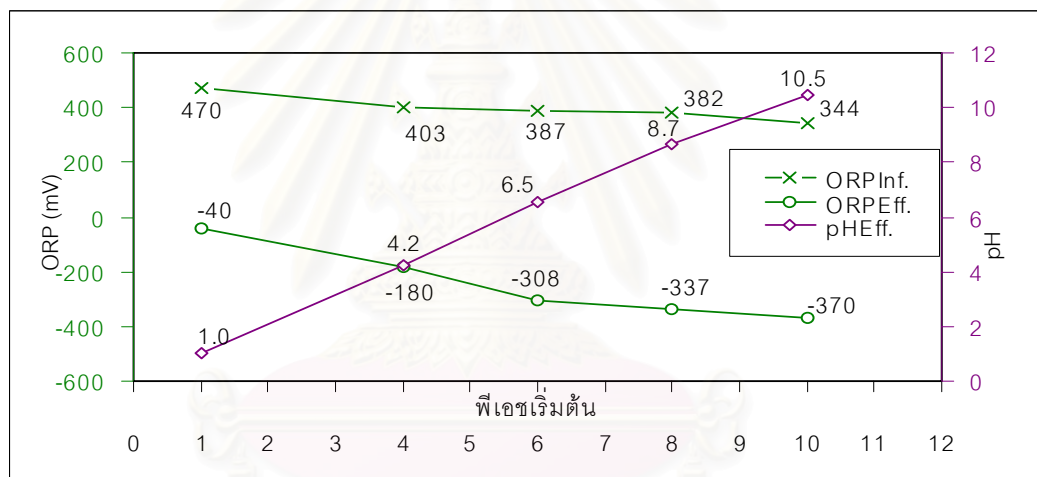
SS<sub>up24hr</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสหลังตกตะกอน 24 ชั่วโมง

SS<sub>upCoag</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสหลังเติมโพสิเมอร์บวกและตกตะกอน 30 นาที

SV30 = ปริมาตรของชั้นตะกอนภายใต้การตกตะกอน 30 นาที



รูปที่ 5.32 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับปรับค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลองของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน

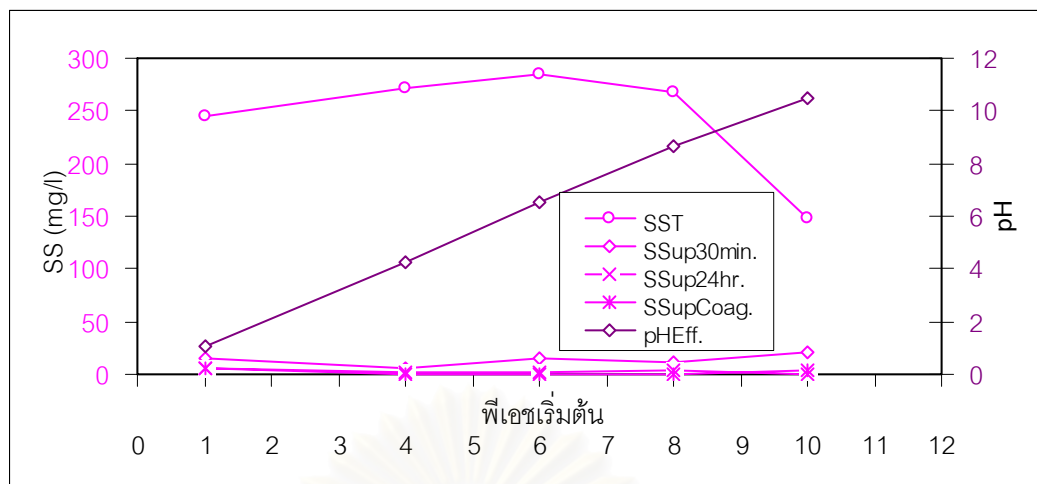


รูปที่ 5.33 ค่าพีเอชและโออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน

มีค่าน้อยลงด้วย กล่าวคือน้ำเสียหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ในแต่ละชุดการทดลองมีค่าโออาร์พีเท่ากับ  $-40$ ,  $-180$ ,  $-308$ ,  $-337$  และ  $-370$  มิลลิโวลต์ ตามลำดับ

#### 5.4.1.3 ของแข็งแขวนลอย

ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.34 ในขณะที่ปรับพีเอชให้ได้ตามค่าพีเอชเริ่มต้นที่ต้องการในแต่ละชุดการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 มีของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กสีน้ำตาลเกิดขึ้นมากพอสมควร แต่ชุด



รูปที่ 5.34 ของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าฟิโอสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน

การทดลองที่มีค่าฟิโอสเริ่มต้นเท่ากับ 1, 4, 6 และ 8 ไม่พบของแข็งแขวนลอยใดๆ เกิดขึ้น สำหรับในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์พบว่า ทุกชุดการทดลองเกิดของแข็งแขวนลอยสีดำขึ้น ซึ่งชุดการทดลองที่มีค่าฟิโอสเริ่มต้นเท่ากับ 1, 4, 6, 8 และ 10 มีของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเกิดขึ้นเท่ากับ 244, 272, 284, 268 และ 148 มก./ล. ตามลำดับ จากผลดังกล่าวพบว่า ในแต่ละชุดการทดลองมีของแข็งแขวนลอยทั้งหมดใกล้เคียงกัน และสาเหตุที่ทำให้ชุดการทดลองที่มีค่าฟิโอสเริ่มต้นเท่ากับ 10 มีค่าของแข็งแขวนลอยต่ำ เนื่องจากของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมาก (ไม่สามารถตกตะกอนได้ แม้จะทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วก็ตามดังรูปที่ 5.35) และมีของแข็งแขวนลอยบางส่วนหลุดผ่านกระดาษกรอง GF/C ไปได้ (ในขั้นตอนการวิเคราะห์หาของแข็งแขวนลอยทั้งหมด) จึงทำให้ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดน่าจะมีความเป็นจริง นอกจากนี้ของแข็งแขวนลอยบางส่วนสามารถหลุดผ่านเยื่อกรอง 0.45 ไมครอนได้ด้วย ซึ่งสังเกตได้จากน้ำที่ผ่านการกรองยังมีสีน้ำตาลอ่อน จึงทำให้ชุดการทดลองที่มีค่าฟิโอสเริ่มต้นเท่ากับ 10 มีค่าเงินละลายสูง (20.5 มก./ล.)

หลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์และทิ้งให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที พบว่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนของแต่ละชุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 16, 6, 16, 12 และ 20 มก./ล. ตามลำดับ แต่ชุดการทดลองที่มีค่าฟิโอสเริ่มต้นเท่ากับ 10 น่าจะมีค่าของแข็งแขวนลอยน้อยกว่าความเป็นจริง เนื่องจากมีของแข็งแขวนลอยบางส่วนสามารถผ่านกระดาษกรอง GF/C ได้ในขั้นตอนการหาของแข็งแขวนลอย และเมื่อทิ้งให้ตกตะกอนนานขึ้นเป็น 24 ชั่วโมง พบว่าของแข็งแขวนลอยในแต่ละชุดการทดลองสามารถตกตะกอนได้เกือบหมด (ยกเว้นชุดการทดลองที่มีค่าฟิโอสเริ่มต้นเท่ากับ 10) โดยมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนเท่ากับ 6, 2, 2, 4 และ 0 มก./ล. ตามลำดับ (ชุดการทดลองที่มีค่าฟิโอสเริ่มต้นเท่ากับ 10 มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง เนื่องจากของแข็งแขวนลอยสามารถหลุดผ่านกระดาษกรอง GF/C)

นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของการใช้สารโคแอกกูแลนต์ช่วยในการตกตะกอนด้วย โดยนำน้ำเสียหลังการตกตะกอน 24 ชั่วโมงมาเทใส่ปิกรเกอร์เพื่อกวนผสมใหม่ และเติมสาร โพลีเมอร์ประจุบวก 3 มก./ล. กวนช้าประมาณ 20 นาที พบว่าของแข็งแขวนลอยในแต่ละชุด การทดลองมีขนาดใหญ่กว่าเดิม (ยกเว้นชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10) หลังจากนั้น ึ่งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาทีดังรูปที่ 5.36 ซึ่งพบว่าของแข็งแขวนลอยสามารถตกตะกอนได้ดี และตกได้เร็วขึ้น (ตกได้เกือบหมดภายใน 30 นาที) ซึ่งมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบน เท่ากับ 6, 0, 0, 0 และ 4 มก./ล. ตามลำดับ

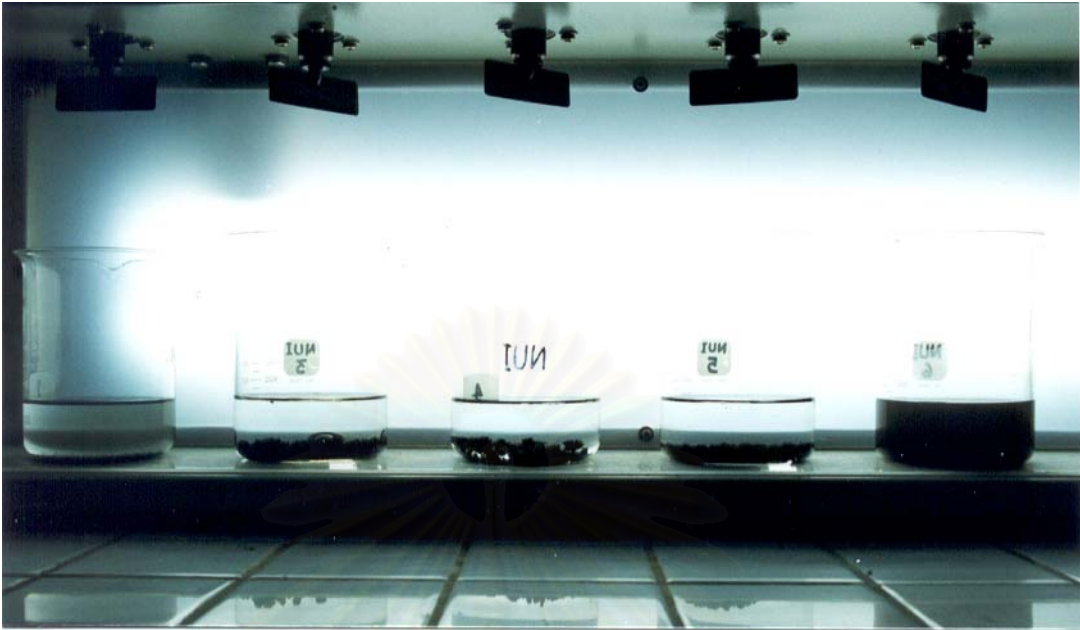


จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1, 4, 6, 8 และ 10 ตามลำดับ

**รูปที่ 5.35** ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อ แปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน

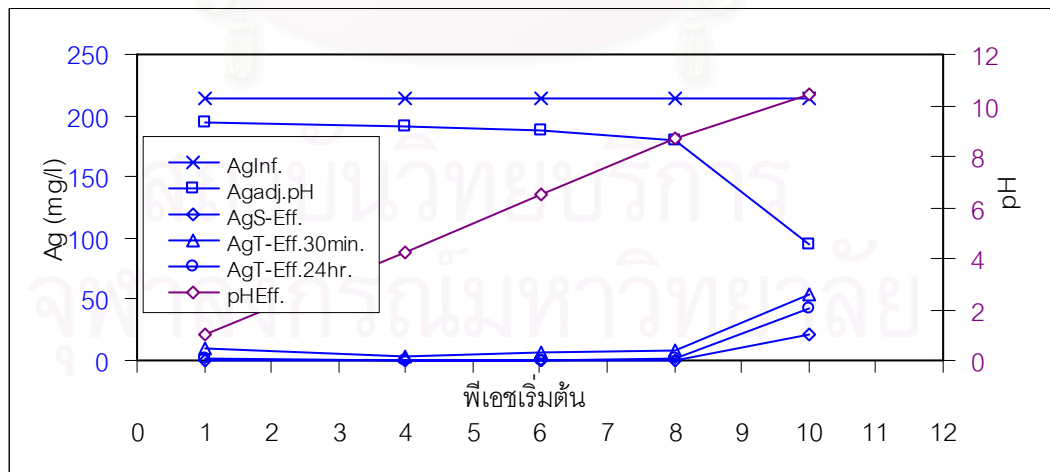
#### 5.4.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัดเงิน

จากการทดลองกำจัดเงินในน้ำเสียสังเคราะห์เงินที่มีค่าเงินเริ่มต้นเท่ากับ 214 มก./ล. โดยใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ 720 มก./ล. โดยแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียในช่วง ระหว่าง 1 - 10 โดยมีผลการวิเคราะห์เงินที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.37 และ 5.38 จากรูปดังกล่าวพบว่าเมื่อปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้นทำให้

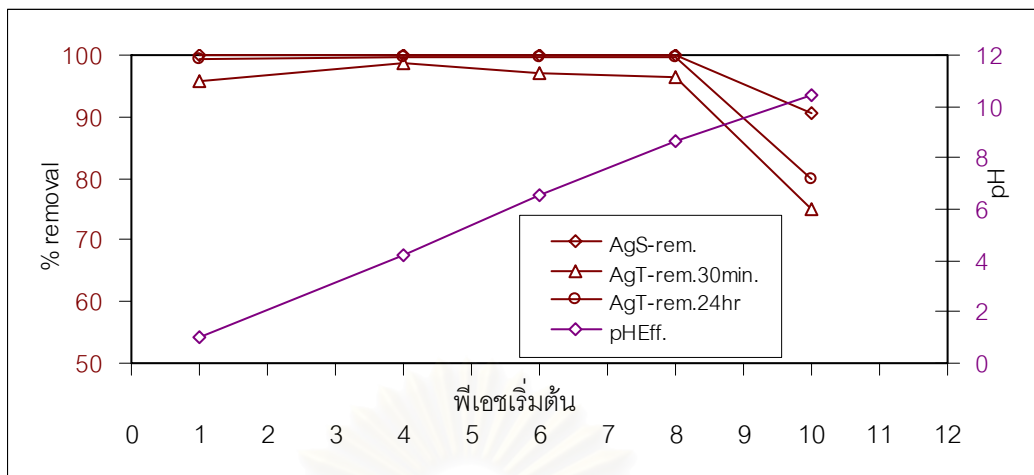


จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1, 4, 6, 8 และ 10 ตามลำดับ

รูปที่ 5.36 ลักษณะการตกตะกอนหลังเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวก (3 มก./ล.) และทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาทีในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน



รูปที่ 5.37 ค่าเงินที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน



รูปที่ 5.38 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน

ค่าเงินละลาย (หลังการปรับพีเอช) มีค่าลดลง กล่าวคือชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1, 4, 6, 8 และ 10 มีค่าเงินละลายเท่ากับ 194, 192, 187, 180 และ 95 มก./ล. ตามลำดับ ผลดังกล่าวคาดว่าค่าเงินที่หายไปอาจจับตัวเป็นผลึกกับไฮดรอกไซด์ (จากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป) เนื่องจากผลดังกล่าวสอดคล้องกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายน้ำของผลึกเงินไฮดรอกไซด์กับค่าพีเอชดังรูปที่ 3.2

ในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์พบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1, 4, 6, 8 และ 10 มีค่าเงินละลายเท่ากับ 0.07, 0.1, 0.07, 0.06 และ 20.5 มก./ล. ตามลำดับ ดังที่กล่าวแล้วข้างต้นว่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในชุดการทดลองหลังสุดมีขนาดเล็กมากและสามารถหลุดผ่านเยื่อกรองเมมเบรน 0.45 ไมครอนได้ จึงทำให้ค่าเงินละลายที่วัดได้มีค่าสูง และจากผลข้างต้นอาจกล่าวได้ว่าค่าพีเอชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินละลาย อย่างไรก็ตามค่าพีเอชกลับมีผลต่อลักษณะของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้น พบว่าถ้าค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีค่าสูง ทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและตกตะกอนไม่ดี

สำหรับค่าเงินทั้งหมดขึ้นอยู่กับปริมาณของของแข็งแขวนลอยที่เหลืออยู่ในน้ำได้ ส่วนบนหลังการตกตะกอน อย่างไรก็ตามถ้าทิ้งให้ของแข็งแขวนลอยตกตะกอนนานถึง 24 ชั่วโมง จะทำให้ของแข็งแขวนลอยตกตะกอนได้เกือบหมด (ยกเว้นชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10) จึงทำให้ค่าเงินทั้งหมดมีค่าต่ำ (น้อยกว่า 1 มก./ล.)

จากผลการทดลองข้างต้นกล่าวได้ว่าค่าพีเอชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงิน กล่าวคือ เมื่อค่าพีเอชหลังเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์อยู่ในช่วง 1 - 10 พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัด

เงินละลายสูงใกล้เคียงกันทุกชุดการทดลอง อย่างไรก็ตามค่าพีเอชมีผลต่อปฏิกิริยาโคแอกกูเลชันของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้น กล่าวคือเมื่อพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีค่ามากขึ้น มีแนวโน้มทำให้ของแข็งแขวนลอยมีขนาดเล็กและตกตะกอนได้ไม่ตื้นัก

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้สารเคมีในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียควรหมายถึงสภาวะซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงและต้องแยกตะกอนโลหะหนักที่เกิดขึ้นออกจากน้ำได้ง่ายด้วย ซึ่งจากการทดลองข้างต้นพบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 น่าจะมีความเหมาะสมที่สุดตามเหตุผลที่กล่าวข้างต้น ดังนั้นจึงเลือกค่าพีเอชดังกล่าวนำไปทดลองหาค่าปริมาณคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อไป

#### 5.4.2 ขั้นตอนการศึกษาปริมาณคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมในการกำจัดเงิน

การศึกษาผลของปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในน้ำเสียสังเคราะห์เงินเป็นการทดลองแบบจาร์เทสต์ 5 ชุดการทดลอง โดยกำหนดให้น้ำเสียสังเคราะห์ทุกชุดการทดลองมีค่าพีเอชเริ่มต้นคงที่เท่ากับ 4 และแปรผันปริมาณคีเลตติ้งโพลีเมอร์ 6 ค่า คือ 240, 360, 480, 720, 960 และ 1,200 มก./ล. ตามลำดับ ขั้นตอนและวิธีการทดลองสามารถดูเพิ่มเติมได้จากหัวข้อที่ 4.1.3 ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5.6

##### 5.4.2.1 ไออาร์พีและพีเอช

ผลของค่าไออาร์พีและพีเอชแสดงดังรูปที่ 5.39 จากรูปดังกล่าวพบว่าชุดการทดลองที่เติมปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์สูงขึ้น ทำให้ค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์สูงขึ้นด้วย กล่าวคือชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 240, 360, 480, 720, 960 และ 1,200 มก./ล. ทำให้มีค่าพีเอชในแต่ละชุดการทดลองเท่ากับ 4.0, 4.0, 4.1, 4.3, 5.5 และ 6.4 ตามลำดับ สาเหตุดังกล่าวก็เนื่องจากสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เป็นสารละลายต่างเข้มข้น

นอกจากนี้ชุดการทดลองที่มีการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าไออาร์พีในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ลดลงด้วย ซึ่งมีค่าไออาร์พีเท่ากับ 200, 50, -95, -230, -328 และ -351 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ในขณะที่น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 มีค่าไออาร์พีประมาณ 565 มิลลิโวลต์

##### 5.4.2.2 ของแข็งแขวนลอย

ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.40 จากรูปดังกล่าวพบว่าเมื่อใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละชุดการทดลองไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 240, 360, 480, 720, 960 และ 1,200 มก./ล. มีค่าของแข็งแขวนลอย

ตารางที่ 5.6 ผลของปริมาณคลอรีนที่เติมเมื่อดังโพลีเมอธต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในน้ำเสียสังเคราะห์เงิน

คลอรีนที่เติม (mg/l)	pH		ORP (mV)		เงิน (mg/l)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		ของแข็งแขวนลอย (mg/l)		SV30 (ml/l)
	pH <sub>int</sub>	pH <sub>ext</sub>	ORP <sub>int</sub>	ORP <sub>ext</sub>	Ag <sub>int</sub>	Ag <sub>sett</sub>	Ag <sub>rem, 30min</sub>	Ag <sub>rem</sub>	Ag <sub>rem, 30min</sub>	SS <sub>T</sub>	SS <sub>up30min</sub>	
240	4	4.0	522	200	230	5.4	6.5	97.67	97.16	251	7	10
360	4	4.0	520	50	230	0.1	0.6	99.96	99.75	245	7	15
480	4	4.1	519	-95	230	0.1	0.5	99.96	99.79	268	6	23
720	4	4.3	519	-230	230	0.1	0.7	99.96	99.70	274	6	34
960	4	5.5	518	-328	230	0.1	0.8	99.96	99.67	274	8	43
1200	4	6.4	517	-351	230	0.1	0.7	99.97	99.72	265	9	43

pH<sub>int</sub> = ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (หลังปรับพีเอช)      Ag<sub>rem, 30min</sub> = ค่าเงินทั้งหมดที่บำบัดและตกตะกอน 30 นาที

pH<sub>ext</sub> = ค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัด (หลังเติมคลอรีน)      Ag<sub>sett</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะเงินตกตะกอน

ORP<sub>int</sub> = ค่าโวลต์เริ่มต้นของน้ำเสีย (หลังการปรับพีเอช)      Ag<sub>rem, 30min</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะเงินทั้งหมดหลังตกตะกอน 30 นาที

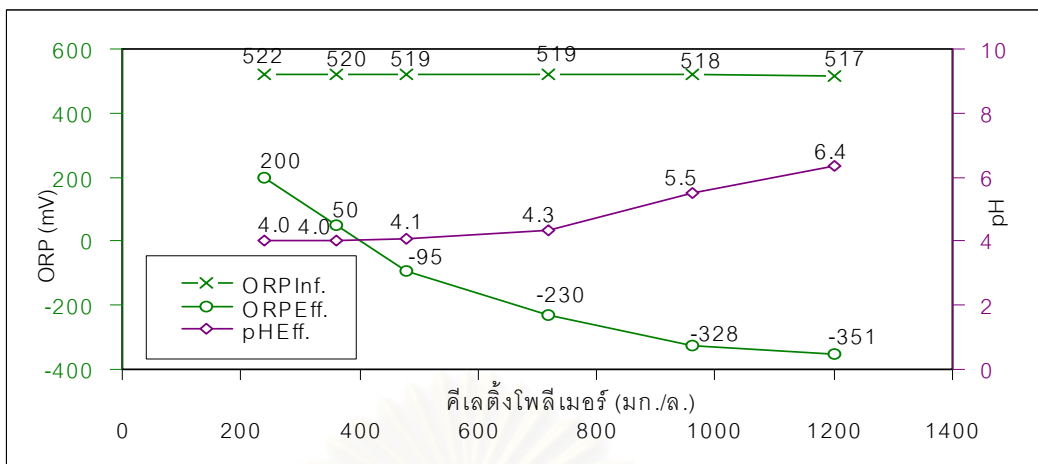
ORP<sub>ext</sub> = ค่าโวลต์พีเอชของน้ำหลังการบำบัด (หลังเติมคลอรีน)      SS<sub>T</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

Ag<sub>int</sub> = ค่าเงินเริ่มต้นของน้ำเสียตกตะกอนปรับพีเอช      SS<sub>up30min</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยหลังตกตะกอน 30 นาที

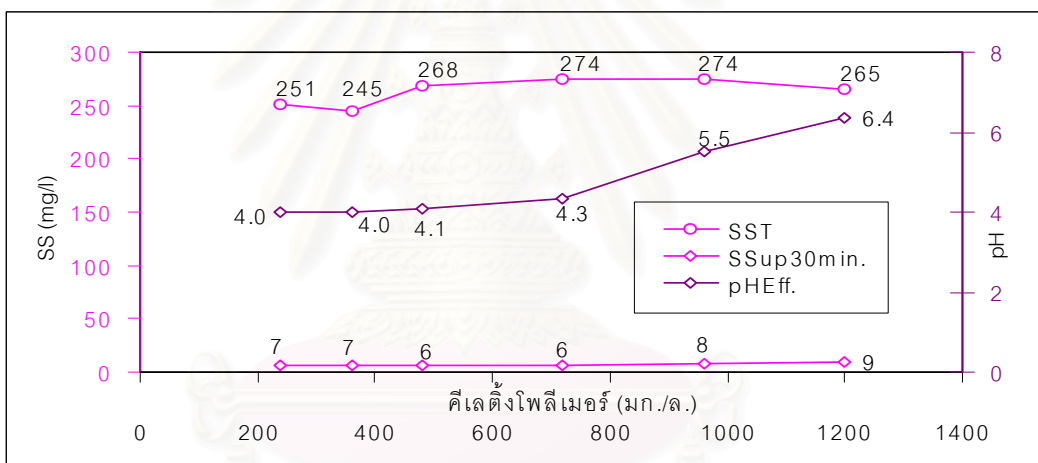
Ag<sub>sett</sub> = ค่าเงินตกตะกอนหลังการบำบัด (หลังเติมคลอรีน)      SV30 = ปริมาตรขึ้นตะกอนหลังการตกตะกอน 30 นาที







รูปที่ 5.39 ค่าพีเอชและโออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน ปริมาณสารคิลเล็งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน



รูปที่ 5.40 ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน ปริมาณสารคิลเล็งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน

ทั้งหมดเท่ากับ 251, 245, 268, 274, 274 และ 265 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นมีสีเข้มขึ้นเมื่อเติมสารคิลเล็งโพลีเมอร์มากขึ้น

ในสภาวะหลังการเติมสารคิลเล็งโพลีเมอร์ กวนผสม และทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที พบว่าในแต่ละชุดการทดลองสามารถตกตะกอนได้ดีและมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใต้อ่างล่างคือมีค่าของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 7, 7, 6, 6, 8 และ 9 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองข้างต้นซึ่งพบว่าเมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 1 - 7 ทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นสามารถตกตะกอนได้ดี

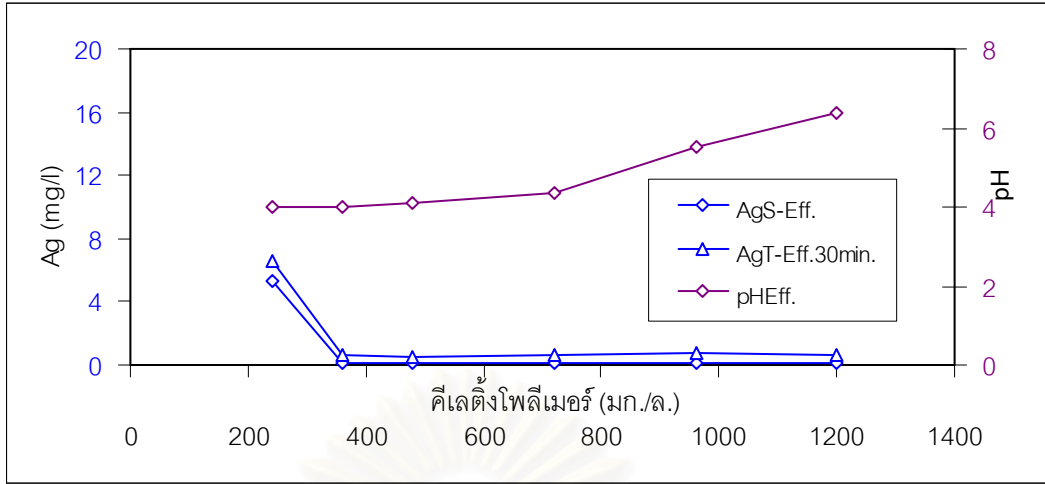
#### 5.4.2.3 ประสิทธิภาพการกำจัดเงิน

จากการทดลองกำจัดเงินในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าเงินเริ่มต้นเท่ากับ 230 มก./ล. โดยกำหนดให้น้ำเสียทุกชุดการทดลองมีค่าพีเอชเริ่มต้นคงที่เท่ากับ 4 และแปรผันปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ในช่อง 240 - 1,200 มก./ล. โดยที่ผลการวิเคราะห์เงินที่สภาวะต่างๆ ของทุกชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.41 และ 5.42 เมื่อเติมสารคลอรีนไดออกไซด์  $\geq 360$  มก./ล. พบว่าในแต่ละชุดการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดเงินไม่แตกต่างกันมากนักและมีประสิทธิภาพในการกำจัดเงินสูง โดยมีค่าเงินละลายเหลืออยู่ในน้ำประมาณ 0.1 มก./ล. แต่ถ้าเติมสารคลอรีนไดออกไซด์น้อยกว่า 360 มก./ล. (ในที่นี้หมายถึง 240 มก./ล.) พบว่าทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเงินด้อยลง ซึ่งมีค่าเงินละลายเท่ากับ 5.4 มก./ล. จากผลการทดลองข้างต้นอาจกล่าวได้ว่าการใช้สารคลอรีนไดออกไซด์เพียง 360 มก./ล. และมีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 ก็เพียงพอที่จะกำจัดเงินละลายให้มีค่าต่ำได้ประมาณ 0.1 มก./ล. และยังทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นสามารถตกตะกอนได้ดีอีกด้วย

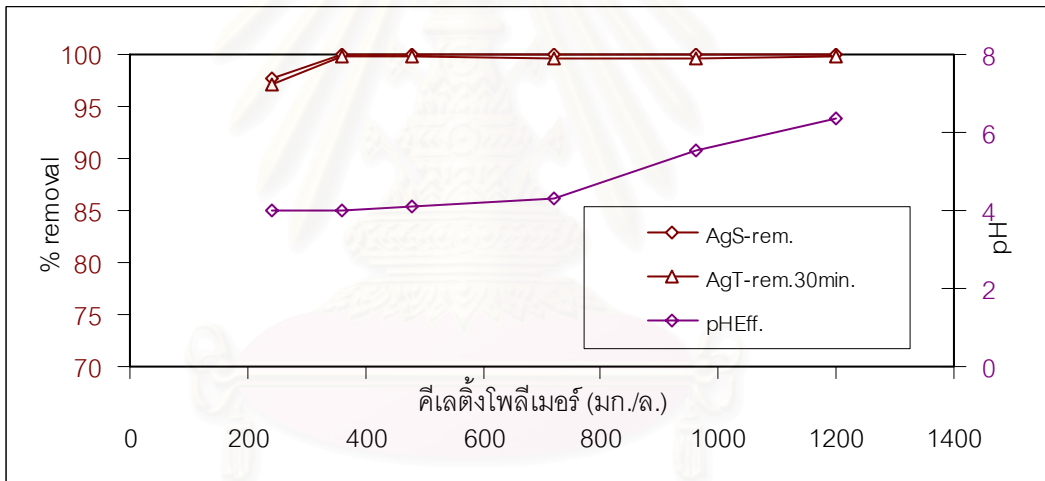
#### 5.4.3 สรุปผลการกำจัดเงินในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารคลอรีนไดออกไซด์

จากการทดลองข้างต้นอาจกล่าวได้ว่า การใช้สารคลอรีนไดออกไซด์ 360 มก./ล. เพื่อกำจัดเงินในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าเงินเริ่มต้นประมาณ 210 - 230 มก./ล. ก็เพียงพอที่จะทำให้ค่าเงินละลายลดลงและมีค่าเท่ากับ 0.1 มก./ล. และมีค่าเงินทั้งหมดน้อยกว่า 1 มก./ล. ซึ่งในกรณีนี้อาจกล่าวได้ว่าถ้าต้องการกำจัดเงิน 1 กรัม ต้องใช้ปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ไม่น้อยกว่า 1.6 กรัม และพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นต่อปริมาณเงินที่ถูกกำจัดเท่ากับ 1.1 กรัม/กรัม

นอกจากนี้อาจสรุปได้ว่าค่าพีเอชในช่วง 1 - 8.5 ไม่มีผลต่อการกำจัดเงินละลายด้วยสารคลอรีนไดออกไซด์ชนิดนี้ แต่ค่าพีเอชน่าจะมีผลต่อปฏิกิริยาโคแอกกูเลชันหรือการรวมตะกอนของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นภายหลังการเติมสารคลอรีนไดออกไซด์ กล่าวคือถ้าค่าพีเอชหลังการเติมสารคลอรีนไดออกไซด์มีค่าสูง มีแนวโน้มทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและตกตะกอนไม่ดี ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าถ้าควบคุมค่าพีเอชหลังการเติมสารคลอรีนไดออกไซด์ให้ต่ำกว่า 8.5 ก็เพียงพอที่จะทำให้ของแข็งแขวนลอยตกตะกอนได้ดี



รูปที่ 5.41 ค่าเงินที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน



รูปที่ 5.42 ประสิทธิภาพการกำจัดเงินในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียสังเคราะห์เงิน

### 5.5 ผลการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเหล็กสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการศึกษาหาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 5.5.1 ขั้นตอนการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดเหล็ก

การศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก เป็นการทดลองแบบจาร์เทสต์ 6 ชุดการทดลอง โดยทำการแปรค่าพีเอชเริ่มต้น 6 ค่า คือ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ และทุกชุดการทดลองกำหนดให้เติมปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 480 มก./ล. (จากหัวข้อที่ 5.1.4) ขั้นตอนและวิธีการทดลองสามารถดูเพิ่มเติมได้จากหัวข้อ 4.1.2 โดยที่ผลการทดลองของทุกชุดการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.7 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 5.5.1.1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการ

น้ำเสียสังเคราะห์เหล็กที่เตรียมขึ้นมีค่าพีเอชเท่ากับ 0.4 ดังนั้นต้องใช้สารปรับพีเอช เพื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง ในที่นี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น เป็นสารปรับพีเอช ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.43 จากผลดังกล่าวพบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 มีความต้องการปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0, 47.90, 48.80, 48.82, 48.83 และ 48.87 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับความต้องการปริมาณสารไฮดรอกไซด์ที่ทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักชนิดอื่น เนื่องจากในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าว ใช้ปริมาณกรดเท่ากันนั่นเอง

### 5.5.1.2 ไออาร์พีและพีเอช

ค่าไออาร์พีและพีเอชที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.44 ซึ่งพบว่าหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ ทำให้ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 มีค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไปเป็น 0.5, 3.0, 6.0, 8.0, 8.7 และ 9.4 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามค่าพีเอชในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4 และ 3 เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก (เหตุผลดังกล่าวได้อธิบายในหัวข้อที่ 5.2.2.1) นอกจากนี้ น้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละชุดการทดลอง มีค่าไออาร์พีเป็นบวกและมีค่าลดลงตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 178 - 575 มิลลิโวลต์ แต่หลังจากเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าไออาร์พีลดลงและมีค่าเป็นลบ ในที่สุด (ยกเว้นชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4)

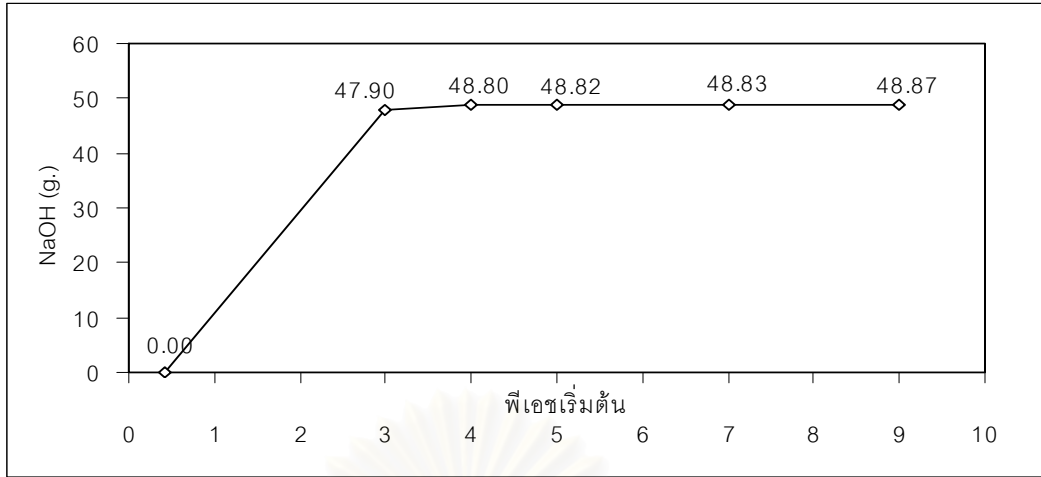
### 5.5.1.3 ของแข็งแขวนลอย

ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.45 ในขณะที่ปรับพีเอชให้ได้ตามค่าพีเอชเริ่มต้นที่ต้องการในแต่ละชุดการทดลอง สังเกตเห็นของแข็งแขวนลอยสีเหลืองอมส้มเกิดขึ้น ซึ่งเริ่มเห็นได้ชัดเจนขึ้นในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และยิ่งชัดเจนมากขึ้นและสีของของแข็งแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมส้มเมื่อน้ำเสียมีค่าพีเอชมากกว่า 3 ขึ้นไป

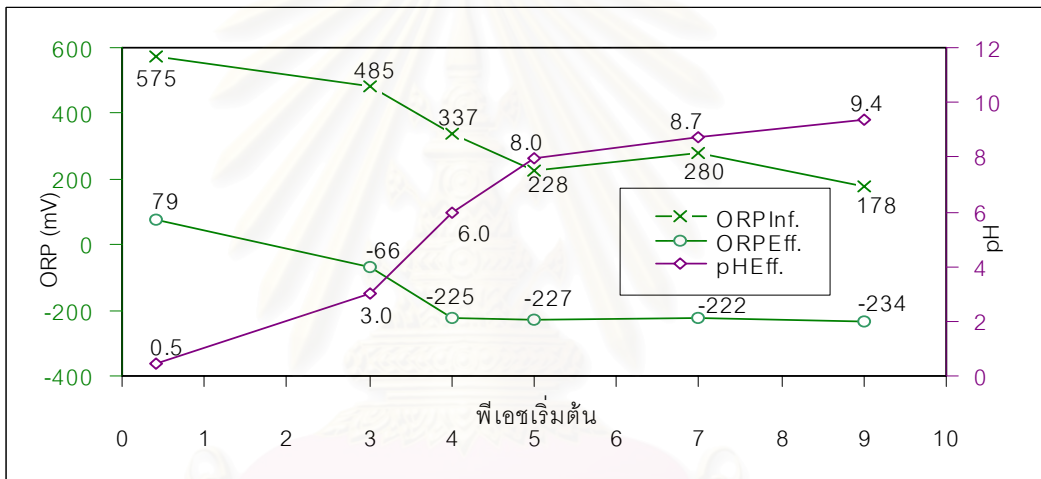
ตารางที่ 5.7 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก

pH	ปริมาณ		ORP (mV)		เหล็ก (mg/l)					ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			ของแข็งแขวนลอย (mg/l)			SV30 (ml/l)				
	pH <sub>int</sub>	pH <sub>Ext</sub>	NaOH (g/l)	ORP <sub>int</sub>	ORP <sub>Ext</sub>	Fe <sub>int</sub>	Fe <sub>Ext</sub>	Fe <sub>rem</sub> 30min	Fe <sub>rem</sub> 24hr	Fe <sub>S-rem</sub>	Fe <sub>T-rem</sub> 30min	Fe <sub>T-rem</sub> 24hr	SS <sub>T</sub>	SS <sub>up30min</sub>	SS <sub>up24hr</sub>		SS <sub>upCoag</sub>			
0.4		0.5	0 (0 ml)	575	79	135	134.7	130.0	134.0	131.8	3.5	0.5	2.2	32	4	0	2	34		
3		3.0	47.9 (95.8 ml)	485	-66	135	89.9	87.4	116.7	118.3	35.1	13.4	12.1	52	6	0	0	31		
4		6.0	48.8 (97.6 ml)	337	-225	135	2.1	4.9	10.8	17.8	96.4	92.0	86.8	30.4	10	2	0	83		
5		8.0	48.82 (97.63 ml)	228	-227	135	0.3	0.3	4.3	0.9	99.8	96.8	99.4	328	10	2	2	107		
7		8.7	48.83 (97.66 ml)	280	-222	135	0.3	0.3	5.2	0.5	99.8	96.1	99.7	328	12	6	2	62		
9		9.4	48.87 (97.75 ml)	178	-234	135	0.3	0.3	7.7	0.5	99.8	94.3	99.7	308	44	8	0	62		
pH <sub>int</sub>	=		ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (หลังปรับพีเอช)							Fe <sub>S-rem</sub>	=									
pH <sub>Ext</sub>	=		ค่าพีเอชของน้ำหลังการบำบัด (หลังเติมโคแอกูแลนต์โพสิเมอร์)							Fe <sub>T-rem</sub> 30min	=									
ORP <sub>int</sub>	=		ค่าโออาร์พีของน้ำเสียสังเคราะห์ (หลังปรับพีเอช)							Fe <sub>T-rem</sub> 24hr	=									
ORP <sub>Ext</sub>	=		ค่าโออาร์พีของน้ำหลังการบำบัด (หลังเติมโคแอกูแลนต์โพสิเมอร์)							SS <sub>T</sub>	=									
Fe <sub>int</sub>	=		ค่าเหล็กของน้ำเสียสังเคราะห์ (ก่อนปรับพีเอช)							SS <sub>up30min</sub>	=									
Fe <sub>Ext</sub>	=		ค่าเหล็กหลังการปรับพีเอช							SS <sub>up24hr</sub>	=									
Fe <sub>rem</sub>	=		ค่าเหล็กละลายหลังบำบัด (หลังเติมโคแอกูแลนต์โพสิเมอร์)							SS <sub>upCoag</sub>	=									
Fe <sub>T-rem</sub> 30min	=		ค่าเหล็กทั้งหมดหลังบำบัดและตกตะกอน 30 นาที							SV30	=									
Fe <sub>T-rem</sub> 24hr	=		ค่าเหล็กทั้งหมดหลังบำบัดและตกตะกอน 24 ชั่วโมง								=									

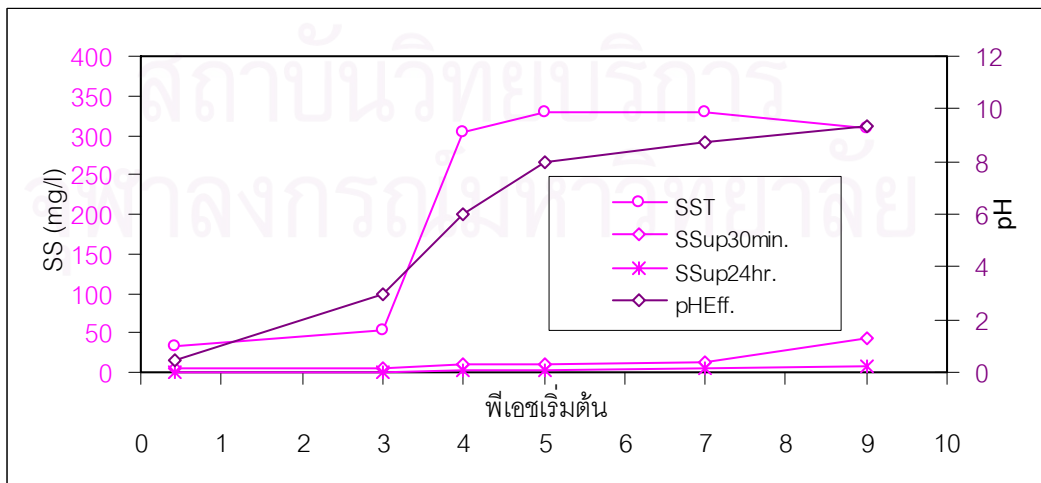
ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กละลาย  
 ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กทั้งหมดหลังตกตะกอน 30 นาที  
 ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กทั้งหมดหลังตกตะกอน 24 ชั่วโมง  
 ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด  
 ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสหลังตกตะกอน 30 นาที  
 ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสหลังตกตะกอน 24 ชั่วโมง  
 ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสหลังเติมโพสิเมอร์บวกและตกตะกอน 30 นาที  
 ปริมาตรชั้นตะกอนภายหลังตกตะกอน 30 นาที



รูปที่ 5.43 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับปรับค่าพีเอชเริ่มต้น ในแต่ละชุดการทดลองของน้ำเสียสังเคราะห์หลัก



รูปที่ 5.44 ค่าพีเอชและโออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์หลัก



รูปที่ 5.45 ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์หลัก

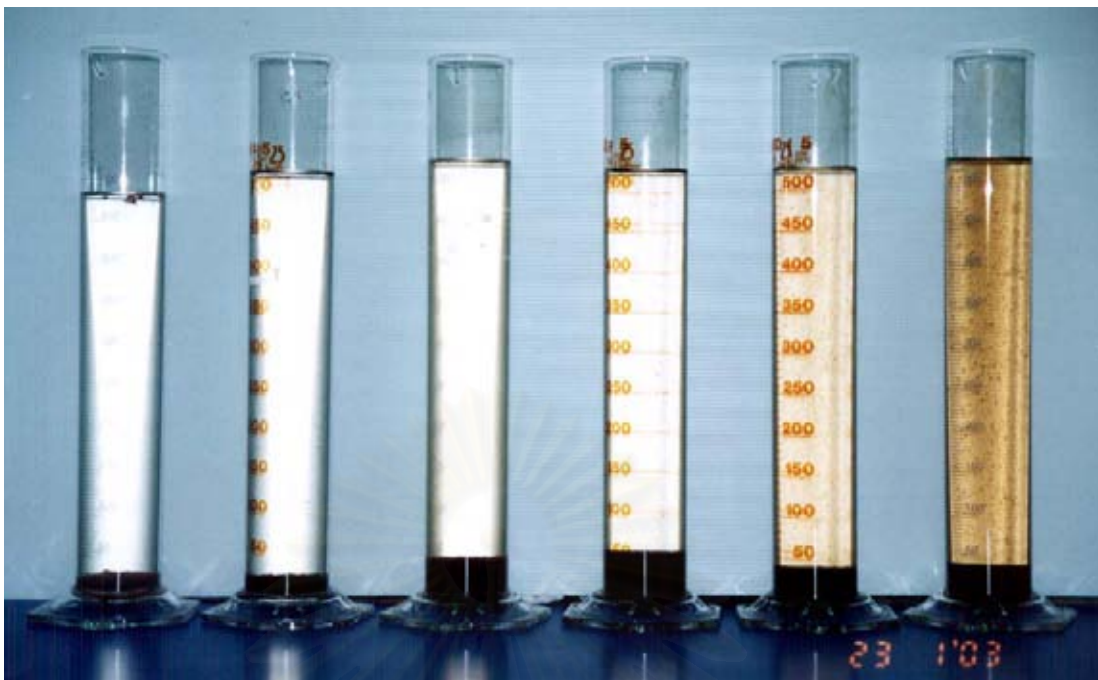
ในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์พบว่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เกิดขึ้นมีค่าสูงขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้นด้วย กล่าวคือชุดการทดลองที่มีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 มีค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเกิดขึ้นเท่ากับ 32, 52, 304, 328, 328 และ 308 มก./ล. ตามลำดับ

ในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ กวนผสม และทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ดังรูปที่ 5.46 พบว่าของแข็งแขวนลอยสีส้มที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการปรับพีเอชเปลี่ยนเป็นสีดำเข้ม และมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 (หรือมีค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 0.5, 3.0, 6.0, 8.0, 8.7 และ 9.4 ตามลำดับ) มีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนเท่ากับ 4, 6, 10, 10, 12 และ 44 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งจากผลดังกล่าวพบว่าค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีผลต่อลักษณะของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้น กล่าวคือถ้าค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์  $\leq 8$  จะทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นตกตะกอนได้ดี แต่ถ้าพีเอชมีค่ามากกว่า 8 จะทำให้ของแข็งแขวนลอยตกตะกอนได้ช้า อย่างไรก็ตามถ้าทิ้งให้ตกตะกอนนานขึ้นเป็น 24 ชั่วโมง พบว่าทุกชุดการทดลองสามารถตกตะกอนได้เกือบหมดดังรูปที่ 5.47 ซึ่งในแต่ละชุดการทดลองมีของแข็งแขวนลอยในน้ำใสเท่ากับ 0, 0, 2, 2, 6 และ 8 ตามลำดับ

นอกจากนี้ได้ทดสอบความสามารถในการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นโดยใช้สารโคแอกกูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุบวก 3 มก./ล.) ด้วย ผลการทดลองภายหลังการเติมสารโคแอกกูแลนต์และกวนซ้ำ 20 นาที แล้วปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาทีดังรูปที่ 5.48 พบว่าในแต่ละชุดการทดลองมีของแข็งแขวนลอยเหลืออยู่ในน้ำใสเท่ากับ 2, 0, 0, 2, 2 และ 0 มก./ล. ตามลำดับ ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าการเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวกมีผลทำให้ของแข็งแขวนลอยมีขนาดใหญ่ขึ้นและช่วยให้จมตัวได้เร็วขึ้น

#### 5.5.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก

จากการทดลองกำจัดเหล็กในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าเหล็กเริ่มต้นเท่ากับ 135 มก./ล. โดยที่ทุกชุดการทดลองใช้ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์คงที่เท่ากับ 480 มก./ล. และแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียในช่วง 0.4 - 9 โดยมีค่าเหล็กที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.49 ถึง 5.50 จากรูปพบว่าน้ำเสียภายหลังการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าต่างๆ ทำให้ค่าเหล็กละลายในแต่ละชุดการทดลองลดลงตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น กล่าวคือชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 พบว่ามีค่าเหล็กละลายเท่ากับ 134.5, 89.9, 2.1, 0.3, 0.3 และ 0.3 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งจากผลดังกล่าวพบว่าเพียงแค่ปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 4 ก็สามารถทำให้ค่าเหล็กละลายเหลือเพียง 2.1 มก./ล. ซึ่ง



จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ

**รูปที่ 5.46** ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาทีในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก



จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ

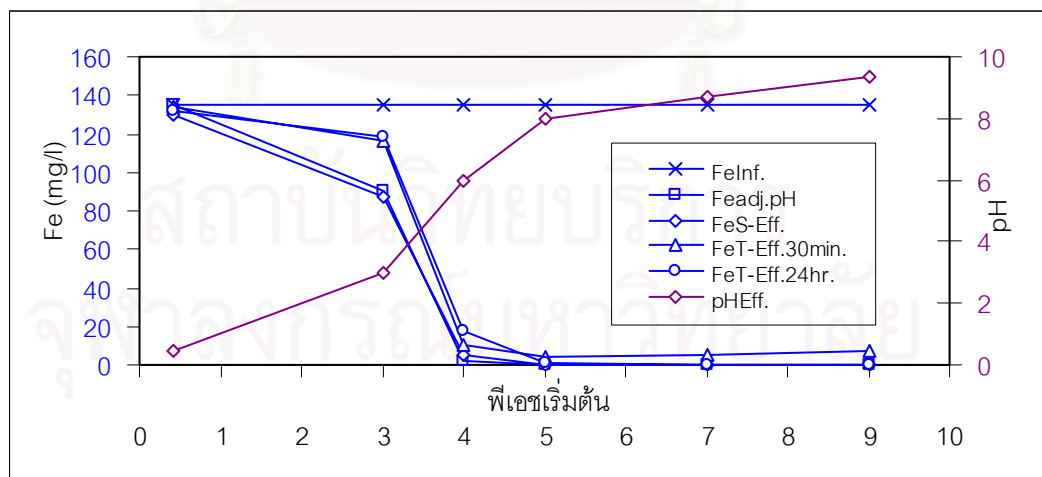
**รูปที่ 5.47** ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมงในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก



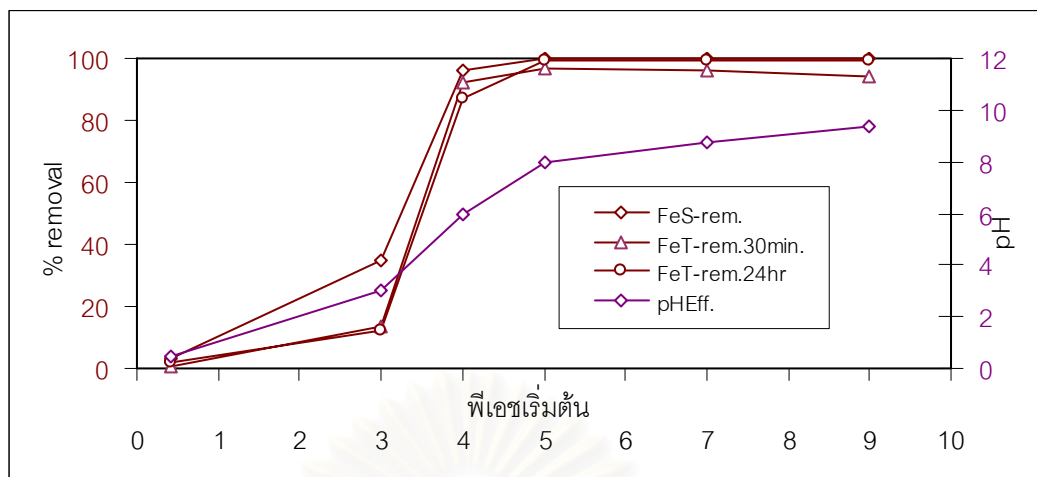


จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 0.4, 3, 4, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ

**รูปที่ 5.48** ลักษณะการตกตะกอนหลังเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวก (3 มก./ล.) และทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก



**รูปที่ 5.49** ค่าเหล็กที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก



รูปที่ 5.50 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก

ซึ่งสอดคล้องกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์กับพีเอชของน้ำที่ค่าต่างๆ ดังรูปที่ 3.2 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ากลไกการกำจัดเหล็กข้างต้นเกิดจากกลไกการตกตะกอนผลึกด้วยไฮดรอกไซด์ ซึ่งพบว่าการปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีค่ามากกว่า 4 ก็ทำให้ค่าเหล็กต่ำกว่า 10 มก./ล. (ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของบางนิคมอุตสาหกรรม)

หลังจากเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์และกวนผสมประมาณ 30 - 40 นาทีพบว่าค่าเหล็กหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ใกล้เคียงกับค่าเหล็กในขั้นตอนหลังปรับพีเอชนั่นเอง กล่าวคือหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีค่าเหล็กเท่ากับ 130.0, 87.4, 4.9, 0.3, 0.3 และ 0.3 มก./ล. ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่สามารถกำจัดเหล็กได้ แต่อาจมีส่วนในการกำจัดโดยทางอ้อมเพียงเล็กน้อย กล่าวคือเมื่อเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เป็นการเพิ่มสภาพต่างหรือทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น จึงทำให้ผลึกเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้น้อยลงหรือกล่าวได้ว่ากลไกหลักในการกำจัดเหล็กจากการทดลองนี้น่าจะเกิดจากการตกตะกอนผลึกกับไฮดรอกไซด์เป็นหลัก

เนื่องจากการทดลองนี้มุ่งศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดเหล็กโดยการใส่สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ และนำค่าพีเอชดังกล่าวไปทำการทดลองเพื่อหาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อไป แต่จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่มีส่วนโดยตรงในการกำจัดเหล็ก ซึ่งก็หมายความว่าค่าพีเอชก็ไม่มีผลใดๆ สำหรับการกำจัดเหล็กโดยการใส่สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์นั่นเอง ดังนั้นผู้ทดลองจึงมีความเห็นว่าไม่จำเป็นทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป (ขั้นตอนการศึกษาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อการกำจัดเหล็ก)

### 5.5.2 ผลของปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็ก

ดังที่กล่าวแล้วว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่มีความสามารถในการกำจัดเหล็ก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อหาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อการกำจัดเหล็ก

### 5.5.3 สรุปผลการกำจัดเหล็กในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์

เนื่องจากกลไกในการกำจัดโลหะหนักด้วยสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เป็นปฏิกิริยาคีเลชันร่วมกับโคออร์ดิเนชัน โดยมีกลุ่มไดไฮโดรคาร์บาเมตทำปฏิกิริยาคีเลชันกับโลหะหนัก และหลังจากทำปฏิกิริยากันแล้วก่อให้เกิดของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้น ซึ่งในปฏิกิริยาคีเลชันจะเกิดขึ้นได้นั้นต้องมีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโซเดียม (ซึ่งอยู่ติดกับกลุ่มไดไฮโดรคาร์บาเมต) กับโลหะหนัก ดังหัวข้อที่ 3.3.3 - 3.3.5 ดังนั้นจากการทดลองนี้อาจคาดคะเนได้ว่าเหล็กไม่สามารถแลกเปลี่ยนประจุกับโซเดียมจากกลุ่มไดไฮโดรคาร์บาเมตได้

ถึงแม้ว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ชนิดนี้ไม่สามารถกำจัดเหล็กได้ แต่มีวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเหล็ก ได้แก่ การสร้างผลึกในรูปเฟอริคไฮดรอกไซด์ ซึ่งจากการทดลองข้างต้นได้พิสูจน์แล้วว่าสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์เหล็กที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 135 มก./ล. และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารปรับพีเอช พบว่าถ้าปรับค่าพีเอชให้  $\geq 4$  ก็สามารถกำจัดเหล็กให้เหลือ  $\leq 2.1$  มก./ล. ได้

## 5.6 ผลการทดลองกับน้ำเสียซีโอดีเจือจาง

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักต่างๆ ในน้ำเสียซีโอดีสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนัก ขั้นตอนที่สองเป็นการศึกษาหาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนัก ส่วนขั้นตอนที่สามเป็นการศึกษาหาปริมาณของสารโคออร์ดิเนชันที่เหมาะสม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (หมายเหตุ – น้ำเสียซีโอดีเจือจางในที่นี้หมายถึงการนำน้ำเสียซีโอดีจริงมาเจือจาง 10 เท่า ด้วยน้ำประปา)

### 5.6.1 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักต่างๆ

การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักต่างๆ ในน้ำเสียซีโอดีเป็นการทดลองแบบจาร์เทสต์ 7 ชุดการทดลอง โดยแปรค่าพีเอชเริ่มต้น 7 ค่า คือ 0.3 (ไม่ปรับพีเอช), 1, 3, 4, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละชุดการทดลองใช้ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์และโพลีเมอร์ประจุบวก (สารโคออร์ดิเนชัน) เท่ากัน คือ 2,160 มก./ล. (จากหัวข้อที่ 5.1.5) และ 3 มก./ล. ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนและวิธีการทดลองสามารถดูเพิ่มเติมได้ในบทที่ 4

โดยที่ผลการทดลองในแต่ละชุดการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.8 ถึง 5.11 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(หมายเหตุ – ในตารางที่ 5.8 ถึง 5.11 สำหรับผลของค่าพีเอช โออาร์พี ของแข็งแขวนลอย ความต้องการปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเอสวี 30 เหมือนกันในทุกตารางแต่จะแตกต่างกันเฉพาะผลของการวิเคราะห์โลหะหนักเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ผล)

### 5.6.1.1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการ

เนื่องจากน้ำเสียซีโอดีมีค่าพีเอชน้อยกว่า 1 (เท่ากับ 0.3) ดังนั้นจึงแปรผันค่าพีเอช เริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลองโดยการใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเป็นสารปรับพีเอช ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องการในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.51 จากรูปดังกล่าวพบว่าชุดการทดลองที่ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1.0 และ 3.0 ต้องใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 34.4 และ 55 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ในขณะที่ชุดการทดลองที่ปรับค่าพีเอชเป็น 4.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 มีความต้องการสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ใกล้เคียงกับชุดที่ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 3 กล่าวคือมีความต้องการเท่ากับ 55.6, 55.9, 56.3 และ 56.3 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ เหตุผลที่เป็นเช่นนั้นได้อธิบายแล้วในหัวข้อที่ 5.2.1.1 นอกจากนี้สามารถสรุปได้ว่าการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียซีโอดีให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วง 3.0 – 9.0 แทบจะไม่มี ความแตกต่างในเรื่องของงบประมาณในแง่ของความต้องการในการใช้สารปรับพีเอช

### 5.6.1.2 โออาร์พีและพีเอช

ค่าโออาร์พีและพีเอชที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.52 เนื่องจากสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เป็นสารละลายต่างเข้มข้น ดังนั้นเมื่อเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ลงในชุดการทดลองต่างๆ จะทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น กล่าวคือชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.3, 1.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 พบว่าน้ำเสียหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์และตามด้วยสารโพลีเมอร์ประจุบวกมีค่าพีเอชสูงขึ้นเป็น 0.3, 1.0, 3.0, 8.5, 9.1, 9.3 และ 9.8 ตามลำดับ สาเหตุที่ค่าพีเอชในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.3, 1.0 และ 3.0 ไม่เปลี่ยนแปลงมาก เนื่องจากที่ค่าพีเอชดังกล่าวมีสภาพกรดและและศักยภาพในการสะเทินต่างได้สูง ดังตัวอย่างการคำนวณในหัวข้อที่ 5.2.1.1

น้ำเสียซีโอดีที่เจือจาง 10 เท่า มีค่าโออาร์พีเป็นบวกประมาณ 600 มิลลิโวลต์ แต่เมื่อปรับค่าพีเอชเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองพบว่าค่าโออาร์พีมีแนวโน้มลดลง (สอดคล้องกับชุดการทดลองของน้ำเสียสังเคราะห์) กล่าวคือชุดการทดลองที่มี

ตารางที่ 5.8 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทที่น้ำเสียซีไอทีเจื่อง

pH	ปริมาณ		ORP (mV)		ปรอท (mg/l)					ประสิทธิภาพกำจัด (%)		ของแข็งแขวนลอย (mg/l)		SV30 (ml/l)
	pH <sub>int</sub>	NaOH (g/l)	ORP <sub>int</sub>	ORP <sub>Ext.</sub>	Hg <sub>int.</sub>	Hg <sub>adj pH</sub>	Hg <sub>S-Ext.</sub>	Hg <sub>T-Ext.30min.</sub>	Hg <sub>S-rem.</sub>	Hg <sub>T-rem.30min.</sub>	SS <sub>T</sub>	SS <sub>up30min.</sub>		
0.3	0.3	0 (0 ml)	600	221	201.5	201.5	0.004	0.980	100.0	99.5	712	8	85	
1	1.0	34.4 (68.8 ml)	563	138	201.5	181.3	0.002	0.523	100.0	99.7	620	6	87	
3	3.0	55 (110 ml)	526	55	201.5	120.3	0.003	0.164	100.0	99.9	576	4	96	
4	8.5	55.6 (111.2 ml)	440	-383	201.5	70.3	0.003	0.535	100.0	99.7	1076	2	133	
5	9.1	55.9 (111.81 ml)	426	-438	201.5	61.3	0.001	6.602	100.0	96.7	1036	54	85	
7	9.3	56.29 (112.58 ml)	399	-450	201.5	56.0	0.001	10.420	100.0	94.8	1004	110	70	
9	9.8	56.3 (112.6 ml)	396	-505	201.5	45.4	0.001	15.451	100.0	92.3	932	172	64	

pH<sub>int.</sub> = ค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง (หลังปรับพีเอช)      Hg<sub>T-Ext.30min.</sub> = ค่าปรอททั้งหมดหลังบำบัดและทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

pH<sub>Ext.</sub> = ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัด (หลังการเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต)      Hg<sub>S-rem.</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะปรอทละลาย

ORP<sub>int.</sub> = ค่าโออาร์พีเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง (หลังปรับพีเอช)      Hg<sub>T-rem.30min.</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดปรอททั้งหมดหลังตกตะกอน 30 นาที

ORP<sub>Ext.</sub> = ค่าโออาร์พีของน้ำภายหลังการบำบัด (หลังการเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต)      SS<sub>T</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

Hg<sub>int.</sub> = ค่าปรอทในน้ำเสียซีไอทีเจื่อง 10 เท่า      SS<sub>up30min.</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสหลังตกตะกอน 30 นาที

Hg<sub>adj pH</sub> = ค่าปรอทละลายหลังปรับพีเอชในแต่ละชุดการทดลอง      SV30 = ปริมาตรขี้ตะกอนหลังตกตะกอน 30 นาที

Hg<sub>S-Ext.</sub> = ค่าปรอทละลายหลังบำบัด (หลังการเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต)

ตารางที่ 5.9 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

pH	ปริมาณ NaOH(g/l)		ORP (mV)		โครเมียม (mg/l)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		ของแข็งแขวนลอย (mg/l)		SV30 (m/l)
	pH <sub>int.</sub>	pH <sub>eff.</sub>	ORP <sub>int.</sub>	ORP <sub>eff.</sub>	Cr <sub>int.</sub>	Cr <sub>acid,pH</sub>	Cr <sub>s-eff.</sub>	Cr <sub>T-rem,30min.</sub>	Cr <sub>s-rem.</sub>	Cr <sub>T-rem,30min.</sub>	SS <sub>T</sub>	
0.3	0.3	0 (0 ml)	600	221	46.4	46.4	41.40	41.54	10.8	10.5	712	8
1	1.0	34.4 (88.8 ml)	563	138	46.4	42.55	38.19	38.25	17.7	17.6	620	6
3	3.0	55 (110 ml)	526	55	46.4	40.39	36.25	36.30	21.9	21.8	576	4
4	8.5	55.6 (111.2 ml)	440	-383	46.4	13.1	0.047	0.265	99.9	99.4	1076	2
5	9.1	55.9 (111.81 ml)	426	-438	46.4	0.686	0.046	0.471	99.9	99.0	1036	54
7	9.3	56.29 (112.58 ml)	399	-450	46.4	0.071	0.042	0.861	99.9	98.1	1004	110
9	9.8	56.3 (112.6 ml)	396	-505	46.4	0.067	0.039	0.880	99.9	98.1	932	172

- pH<sub>int.</sub> = ค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง (หลังปรับพีเอช)      Cr<sub>T-rem,30min.</sub> = ค่าโครเมียมทั้งหมดหลังบำบัดและทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที
- pH<sub>eff.</sub> = ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัด (หลังการเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต)      Cr<sub>s-rem.</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะโครเมียมละลาย
- ORP<sub>int.</sub> = ค่าโออาร์พีเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง (หลังปรับพีเอช)      Cr<sub>T-rem,30min.</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมทั้งหมดหลังตกตะกอน 30 นาที
- ORP<sub>eff.</sub> = ค่าโออาร์พีของน้ำภายหลังบำบัด (หลังการเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต)      SS<sub>T</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
- Cr<sub>int.</sub> = ค่าโครเมียมในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง 10 เท่า      SS<sub>up,30min.</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสหลังตกตะกอน 30 นาที
- Cr<sub>acid,pH</sub> = ค่าโครเมียมละลายหลังปรับพีเอชในแต่ละชุดการทดลอง      SV30 = ปริมาตรตะกอนหลังตกตะกอน 30 นาที
- Cr<sub>s-eff.</sub> = ค่าโครเมียมละลายหลังบำบัด (หลังการเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต)

ตารางที่ 5.10 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

pH	ปริมาณ NaOH(g/l)	ORP (mV)		เงิน (mg/l)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		ของแข็งแขวนลอย (mg/l)		SV30 (ml)	
		pH <sub>int.</sub>	pH <sub>Ext.</sub>	ORP <sub>int.</sub>	ORP <sub>Ext.</sub>	Ag <sub>int.</sub>	Ag <sub>adj pH</sub>	Ag <sub>s-Ext.</sub>	AG <sub>T-Ext 30min</sub>	AG <sub>s-rem.</sub>	AG <sub>T-rem 30min</sub>		SS <sub>T</sub>
0.3	0 (0 ml)	0.3	0.3	600	221	181.9	181.9	0.013	0.92	100.0	99.5	712	8
1	34.4 (88.8 ml)	1.0	1.0	563	138	181.9	180.8	0.046	0.83	100.0	99.5	620	6
3	55 (110 ml)	3.0	3.0	526	55	181.9	174.9	0.075	0.31	100.0	99.8	576	4
4	55.6 (112 ml)	4.0	4.0	440	-383	181.9	122.5	0.070	0.82	100.0	99.5	1076	2
5	55.9 (112.8 ml)	5.0	5.0	426	-438	181.9	107.25	0.071	11.56	100.0	93.6	1036	54
7	56.29 (112.58 ml)	7.0	7.0	399	-450	181.9	91.5	0.074	12.25	100.0	93.3	1004	110
9	56.3 (112.6 ml)	9.0	9.0	386	-505	181.9	70.8	0.070	17.28	100.0	90.5	932	172

pH<sub>int.</sub> = ค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง (หลังปรับพีเอช)      AG<sub>T-Ext 30min</sub> = ค่าเงินทั้งหมดหลังบำบัดและทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

pH<sub>Ext.</sub> = ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัด (หลังการเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต)      AG<sub>s-rem</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดเงินละลาย

ORP<sub>int.</sub> = ค่าโออาร์ซีเริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง (หลังปรับพีเอช)      AG<sub>T-rem 30min</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดเงินทั้งหมดหลังตกตะกอน 30 นาที

ORP<sub>Ext.</sub> = ค่าโออาร์ซีของน้ำภายหลังจากบำบัด (หลังการเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต)      SS<sub>T</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

Ag<sub>int.</sub> = ค่าเงินในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง 10 เท่า      SS<sub>up30min</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำหลังตกตะกอน 30 นาที

Ag<sub>adj pH</sub> = ค่าเงินละลายหลังปรับพีเอชในแต่ละชุดการทดลอง      SV30 = ปริมาตรขึ้นตะกอนหลังตกตะกอน 30 นาที

Ag<sub>s-Ext.</sub> = ค่าเงินละลายหลังบำบัด (หลังการเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต)

ตารางที่ 5.11 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำเสียซีไอดีเจ็อง

pH	ปริมาณ		ORP (mV)		เหล็ก (mg/l)				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		ของแข็งแขวนลอย (mg/l)		SV30 (ml/l)
	pH <sub>int</sub>	pH <sub>EH</sub>	NaOH (g/l)	ORP <sub>int</sub>	Fe <sub>int</sub>	Fe <sub>adj pH</sub>	Fe <sub>S-EH</sub>	Fe <sub>T-EH,30min</sub>	Fe <sub>S-rem</sub>	Fe <sub>T-rem,30min</sub>	SS <sub>T</sub>	SS <sub>up30min</sub>	
0.3	0.3		0 (0 ml)	600	138.1	138.08	129.35	128.20	6.3	7.2	712	8	85
1	1.0		34.4 (68.8 ml)	563	138.1	136.50	117.70	120.95	14.8	12.4	620	6	87
3	3.0		55 (110 ml)	526	138.1	25.03	31.31	94.75	77.3	31.4	576	4	96
4	8.5		55.6 (111.2 ml)	440	138.1	2.21	0.23	1.29	99.8	99.1	1076	2	133
5	9.1		55.9 (111.81 ml)	426	138.1	0.31	0.23	2.27	99.8	98.4	1036	54	85
7	9.3		56.29 (112.58 ml)	399	138.1	0.23	0.23	4.62	99.8	96.7	1004	110	70
9	9.8		56.3 (112.6 ml)	396	138.1	0.25	0.23	7.67	99.8	94.4	932	172	64

pH<sub>int</sub> = ค่าพีเอชเริ่มต้นในแต่ละจุดการทดลอง (หลังปรับพีเอช)      Fe<sub>T-EH,30min</sub> = ค่าเหล็กทั้งหมดหลังบำบัดและทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

pH<sub>EH</sub> = ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัด (หลังการเติมโพธิ์, เมอร์ประจุบวก)      Fe<sub>S-rem</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กละลาย

ORP<sub>int</sub> = ค่าโออาร์พีเริ่มต้นในแต่ละจุดการทดลอง (หลังปรับพีเอช)      Fe<sub>T-rem,30min</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กทั้งหมดหลังตกตะกอน 30 นาที

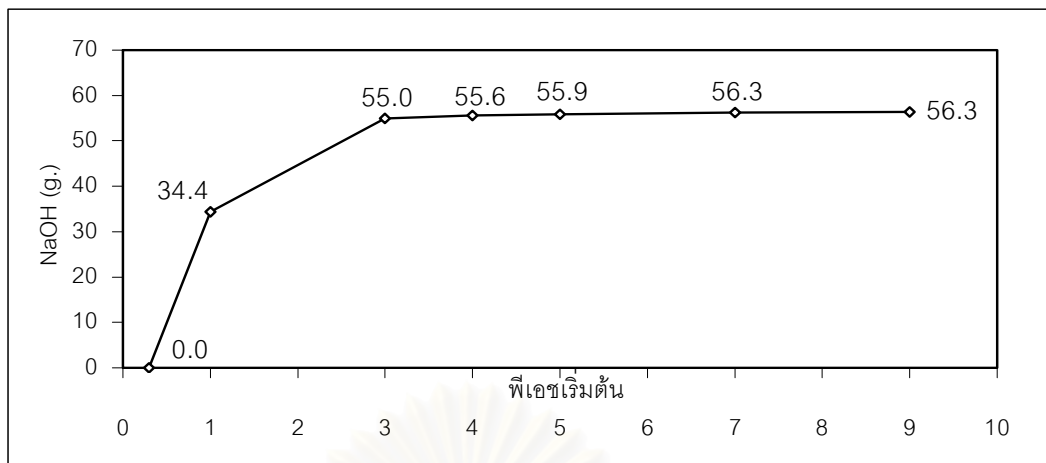
ORP<sub>EH</sub> = ค่าโออาร์พีของน้ำภายหลังการบำบัด (หลังการเติมโพธิ์, เมอร์ประจุบวก)      SS<sub>T</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

Fe<sub>int</sub> = ค่าเหล็กในน้ำเสียซีไอดีเจ็อง 10 เท่า      SS<sub>up30min</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสหลังตกตะกอน 30 นาที

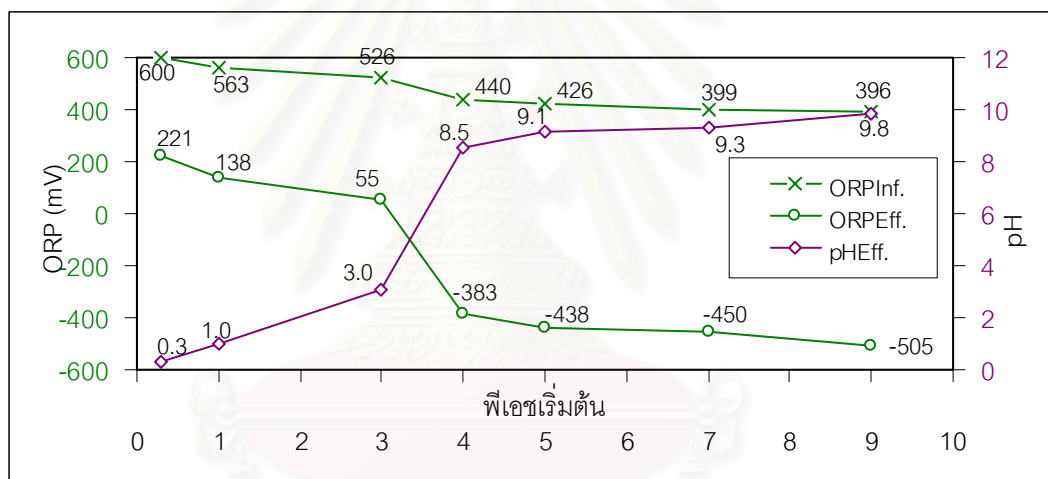
Fe<sub>adj pH</sub> = ค่าเหล็กการละลายหลังปรับพีเอชในแต่ละจุดการทดลอง      SV30 = ปริมาตรขุ่นตะกอนหลังตกตะกอน 30 นาที

Fe<sub>S-EH</sub> = ค่าเหล็กการละลายหลังบำบัด (หลังการเติมโพธิ์, เมอร์ประจุบวก)





**รูปที่ 5.51** ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับปรับค่าพีเอชเริ่มต้น  
ในแต่ละชุดการทดลองของน้ำเสียซีไอดีเจือจาง



**รูปที่ 5.52** ค่าพีเอชและโออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง  
เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

การปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 ทำให้ค่าโออาร์พีเปลี่ยนแปลงไปเป็น 563, 526, 440, 426, 399 และ 396 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ส่วนในสภาวะหลังการเติมสารคลอรีนและโพลิเมอร์พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าโออาร์พีลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าโออาร์พีเริ่มต้น นอกจากนี้ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอช (หลังเติมคลอรีนและโพลิเมอร์) มากกว่ายี่สิบทำให้ค่าโออาร์พีมีค่าน้อยกว่าอีกเช่นกัน กล่าวคือมีค่าโออาร์พีหลังการเติมสารคลอรีนและโพลิเมอร์ประจวบเท่ากับ 221, 138, 55, -383, -438, -450 และ -505 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวอาจสรุปได้ว่าค่าโออาร์พีมีความสัมพันธ์ผกผัน

กับค่าพีเอช เช่น ถ้าค่าพีเอชในน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าไออาร์พีมีแนวโน้มลดลง (หมายเหตุ – ค่าพีเอชและค่า ไออาร์พีในสภาวะหลังการเติมสารคลอรีนโพลีเมอร์มีค่าใกล้เคียงกับในสภาวะหลังการเติมสาร โพลีเมอร์ประจุบวก)

### 5.6.1.3 ของแข็งแขวนลอย

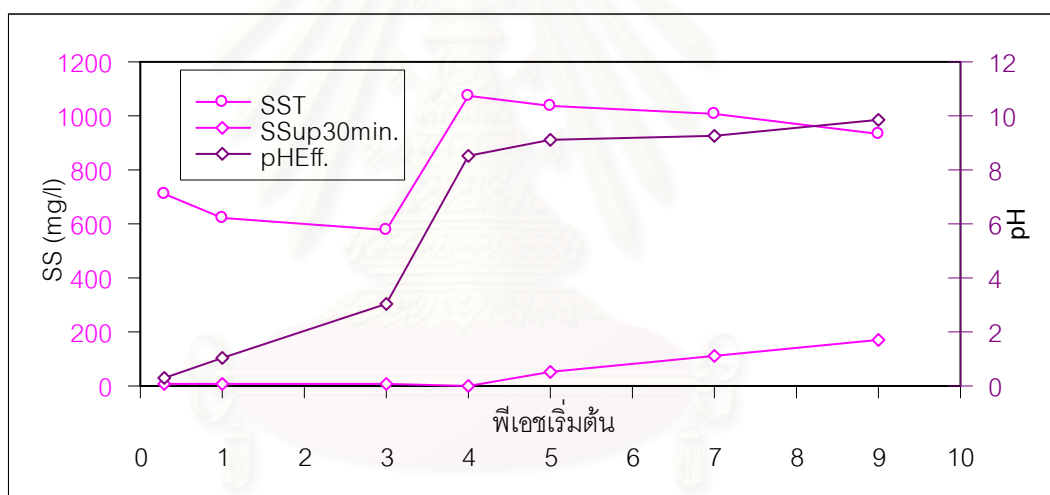
ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.53 เมื่อน้ำเสียซีโอไดถูกปรับพีเอชให้ได้ตามค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 เริ่มมีของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กสีขาวเกิดขึ้นแต่ไม่มากนักและน้ำเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองมากขึ้น ส่วนชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น  $\geq 4$  พบว่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นนั้นเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมส้ม

สำหรับในสภาวะหลังการเติมสารคลอรีนโพลีเมอร์พบว่าทุกชุดการทดลองเกิดของแข็งแขวนลอยสีดำเกิดขึ้น โดยที่ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.3, 1 และ 3 มีค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดใกล้เคียงกันประมาณ 600 – 700 มก./ล. ส่วนชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4, 5, 7, และ 9 มีค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูงกว่า 3 ชุดการทดลองแรก ซึ่งมีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดประมาณ 950 – 1,000 มก./ล. ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดโลหะละลายในแต่ละชุดการทดลอง กล่าวคือทุกชุดการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและเงินสูงใกล้เคียงกัน (ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและเงินละลายเกือบ 100%) แต่ใน 3 ชุดการทดลองแรกมีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและเหล็กละลายต่ำคือประมาณ 10 - 20% และ 6 - 30% ตามลำดับ แต่ใน 4 ชุดการทดลองหลังมีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและเหล็กมากขึ้น คือ 99.9% และ 99.8% ตามลำดับ ซึ่งโดยปกติโครเมียมและเหล็กละลายที่ถูกกำจัดจะเปลี่ยนรูปไปเป็นของแข็งแขวนลอย ดังนั้นจึงทำให้ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดใน 4 ชุดการทดลองหลังมากกว่า 3 ชุดการทดลองแรกนั่นเอง หรืออาจกล่าวได้ว่าของแข็งแขวนลอยส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นใน 3 ชุดการทดลองแรกน่าจะเป็นสารประกอบของปรอทและเงินที่เกิดจากกลไกโคเลชันร่วมกับโคแอกกูเลชันเป็นหลัก ส่วนใน 4 ชุดการทดลองหลังนั้น ของแข็งแขวนลอยส่วนหนึ่งเกิดจากกลไกโคเลชันร่วมกับโคแอกกูเลชัน แต่ของแข็งแขวนลอยส่วนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ 3 ชุดการทดลองแรกน่าจะเกิดจากกลไกการกำจัดโครเมียมและเหล็กในรูปผลึกไฮดรอกไซด์ (จากหัวข้อที่ 5.3 และ 5.5)

สำหรับในสภาวะหลังการเติมสารคลอรีนโพลีเมอร์ตามด้วยสารโพลีเมอร์ประจุบวกและทิ้งให้ของแข็งแขวนลอย (ที่เกิดขึ้น) ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาทีแสดงดังรูปที่ 5.54 ซึ่งพบว่าค่าพีเอชหลังการเติมสารคลอรีนโพลีเมอร์มีผลกับลักษณะและการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้น กล่าวคือลักษณะของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.3, 1, 3 และ 4 (ซึ่งมีค่าพีเอชหลังการเติมสารคลอรีนโพลีเมอร์ไม่เกิน 8.5) มีขนาด

ใหญ่และสามารถตกตะกอนได้ดี ซึ่งมีของแข็งแขวนลอยเหลืออยู่ในน้ำใสส่วนบนเท่ากับ 8, 6, 4, และ 2 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5, 7 และ 9 (ซึ่งมีค่าพีเอชหลังการเติมสารคิเลตติ้งโพลีเมอร์มากกว่า 8.5) มีขนาดเล็กและตกตะกอนได้ไม่ดีนักแม้ว่าจะมีการใช้สารโพลีเมอร์ประจุบวกช่วยในการรวมตะกอนก็ตาม ซึ่งน้ำใสส่วนบนมีของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 54, 110 และ 172 มก./ล. ตามลำดับ

ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทและเงิน (ในหัวข้อที่ 5.2.1 และ 5.4.1 ตามลำดับ) และสังเกตได้ว่าเมื่อค่าของของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนสูงขึ้น (ในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชหลังการเติมสารคิเลตติ้งโพลีเมอร์มากกว่า 8.5) ทำให้ค่าปรอททั้งหมดและเงินทั้งหมดสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าโครเมียมทั้งหมดและเหล็กทั้งหมด ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าส่วนของของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กและตกตะกอนได้ช้า (เหลืออยู่ในน้ำใสหลังการตกตะกอน 30 นาที) น่าจะเป็นสารประกอบของปรอทและเงินเป็นส่วนใหญ่

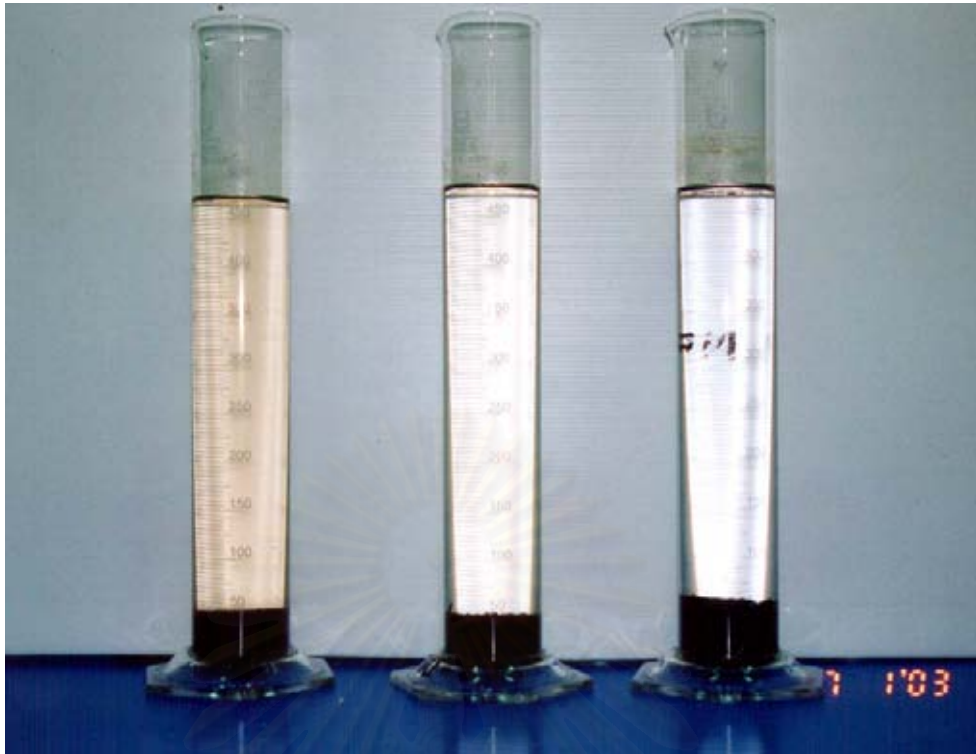


รูปที่ 5.53 ของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

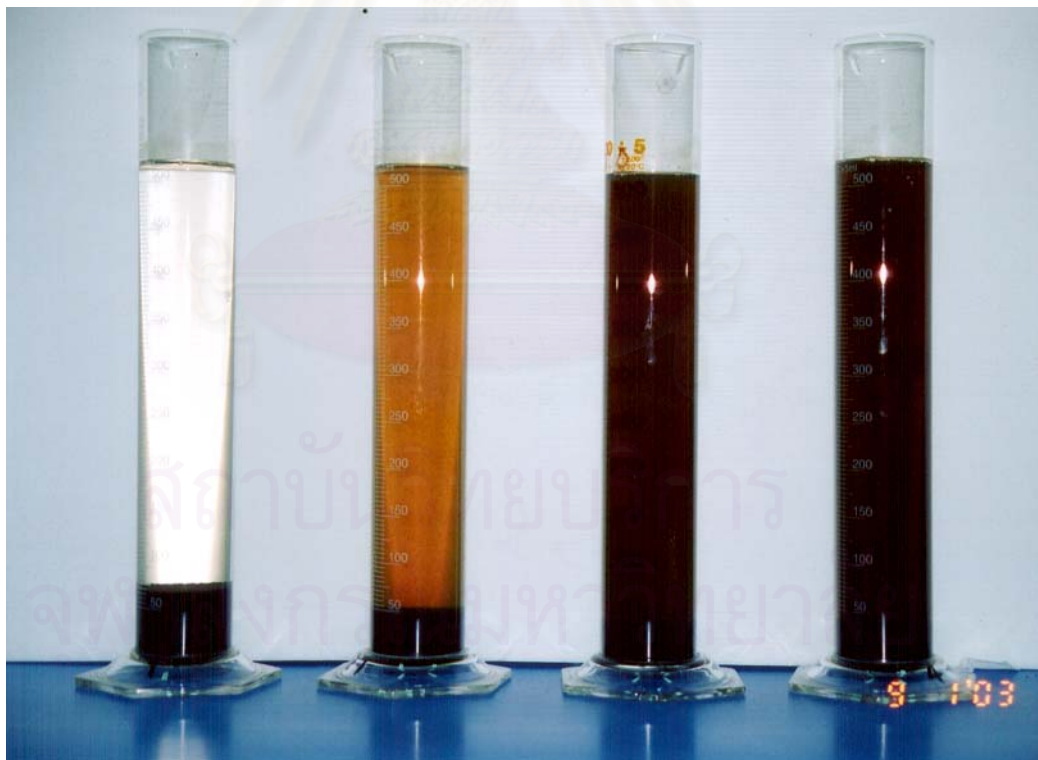
#### 5.6.1.4 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก

##### ก. ปรอท

ผลการวิเคราะห์ปรอทที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงในตารางที่ 5.8 และรูปที่ 5.55 ในสภาวะหลังการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าเริ่มต้นต่างๆ พบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น ทำให้ค่าปรอทละลายลดลง ซึ่งสอดคล้องกับชุดการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท ซึ่งคาดว่าปรอทละลายลดลงเนื่องจากเกิดกลไกการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

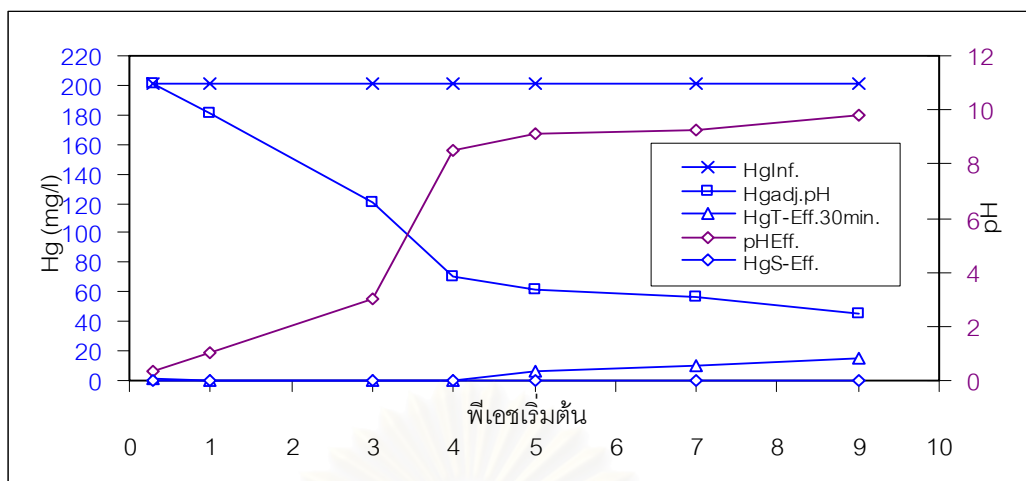


จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.3, 1 และ 3 ตามลำดับ



จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4, 5, 7 และ 9 ตามลำดับ

รูปที่ 5.54 ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีไอดีเจือจาง



**รูปที่ 5.55** ค่าปรอทที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าสูงถึง 9 ก็พบว่าค่าปรอทละลายยังเหลืออยู่ในปริมาณมาก (ประมาณ 45.4 มก./ล.) ซึ่งจากผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าเป็นไปได้อย่างยากที่จะกำจัดปรอทละลายในน้ำเสียซีไอดีด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว

สำหรับในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าปรอทละลายใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำกว่า 0.005 มก./ล. (มีประสิทธิภาพการกำจัดเกือบ 100%) ซึ่งมีความสอดคล้องกับชุดการทดลองที่ทำกับน้ำเสียสังเคราะห์ปรอท จากผลดังกล่าวอาจสรุปได้ว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์สามารถกำจัดปรอทได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าในน้ำเสียจะมีค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ในช่วง 0.3 – 9.8 ก็ตาม

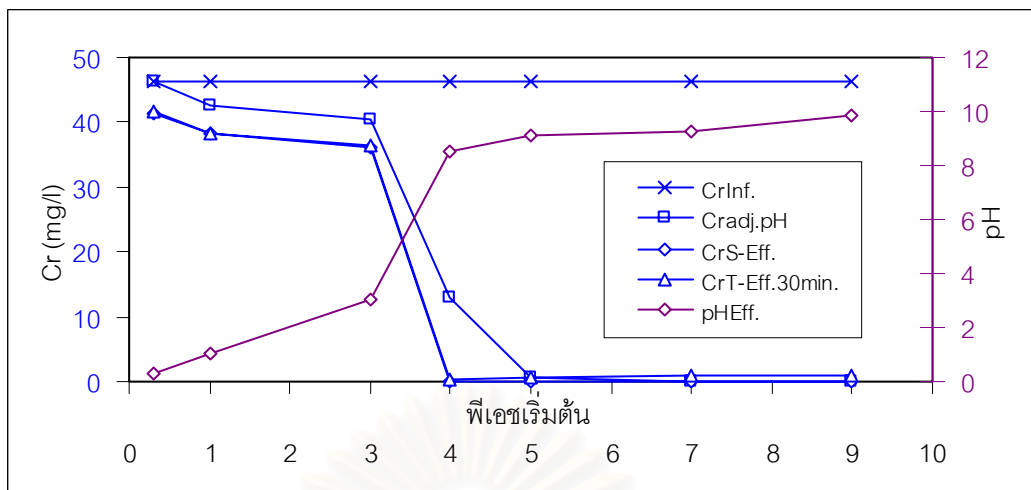
ถึงแม้ว่าค่าพีเอชในช่วงดังกล่าวไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทละลาย แต่ค่าพีเอชมีผลต่อลักษณะของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้น ดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 5.6.1.3 ซึ่งส่งผลต่อค่าปรอททั้งหมดด้วย กล่าวคือถ้าชุดการทดลองใดมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนต่ำ (ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่เกิน 8.5) พบว่ามีค่าปรอททั้งหมดน้อยกว่า 1 มก./ล. และถ้าชุดการทดลองใดมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนสูงจะทำให้ค่าปรอททั้งหมดสูงด้วย กล่าวคือชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5, 7 และ 9 (มีค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์และสารโพลีเมอร์บวกเท่ากับ 9.1, 9.3 และ 9.8 ตามลำดับ) พบว่ามีค่าปรอททั้งหมดประมาณ 6.6, 10.4 และ 15.5 มก./ล. ตามลำดับ จากผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าของแข็งแขวนลอยส่วนหนึ่งในน้ำใสส่วนบนหลังการตกตะกอนต้องมีสารประกอบของปรอทอยู่ด้วย

### ข. โครเมียม

ผลการวิเคราะห์โครเมียมที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.56 พบว่าเมื่อมีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น มีผลให้ค่าโครเมียมละลายลดลงด้วย และพบว่าเมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 - 9 จะทำให้มีค่าโครเมียมละลายน้อยกว่า 0.75 มก./ล. ซึ่งสอดคล้องกับชุดการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมและรูปที่ 3.2 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากลไกในการกำจัดโครเมียมได้แก่การตกตะกอนผลึกเป็นโครมิกไฮดรอกไซด์ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าสามารถกำจัดโครเมียมในน้ำเสียซีโอดีเจือจางได้ง่ายเพียงแค่การปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวก็เพียงพอแล้วที่จะทำให้มีค่าโครเมียมต่ำกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

สำหรับในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ พบว่าค่าโครเมียมละลายลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าโครเมียมละลายในขั้นตอนหลังการปรับค่าพีเอช (ก่อนเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์) ซึ่งสอดคล้องกับชุดการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม โดยอาจกล่าวได้ว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้ เช่น ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.3, 1.0 และ 3.0 พบว่าค่าโครเมียมละลายหลังการปรับพีเอชเท่ากับ 46.4, 42.6 และ 40.4 มก./ล. ตามลำดับ ในขณะที่หลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์พบว่ามีค่าโครเมียมละลายเท่ากับ 41.4, 38.2 และ 36.3 มก./ล. ตามลำดับ แต่ในบางชุดการทดลองสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์อาจมีผลต่อการกำจัดโครเมียมได้บ้างโดยทางอ้อมเนื่องจากสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เป็นสารละลายต่างเข้มข้น ดังนั้นเมื่อเติมลงไป น้ำเสียจึงทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นและทำให้ผลึกของโครมิกไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้น้อยลงด้วย เช่น ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.0 มีค่าโครเมียมละลายหลังการปรับพีเอชเท่ากับ 13.1 มก./ล. แต่หลังจากเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ลงไปทำให้น้ำเสียซีโอดีมีค่าพีเอชเป็น 8.5 ซึ่งที่พีเอชดังกล่าวทำให้ผลึกของโครมิกไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้น้อยที่สุด ดังรูปที่ 3.2 จึงทำให้ค่าโครเมียมละลายต่ำลงและมีค่าเท่ากับ 0.05 มก./ล. ซึ่งจากการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่ากลไกหลักในการกำจัดโครเมียมได้แก่การสร้างผลึกกับไฮดรอกไซด์ (ดูเพิ่มเติมในชุดการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม)

นอกจากนี้ยังพบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าโครเมียมทั้งหมดใกล้เคียงกับค่าโครเมียมละลาย แม้ว่าในบางชุดการทดลองจะมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียเป็นปริมาณสูง โดยเฉพาะชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 9 มีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียหลังการตกตะกอน 30 นาทีเท่ากับ 172 มก./ล. แต่พบว่ามีค่าโครเมียมทั้งหมดเพียง 0.88 มก./ล. ซึ่งผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าของแข็งแขวนลอยส่วนใหญ่ในน้ำเสียส่วนบนดังกล่าว น่าจะเป็นสารประกอบของโลหะหนักชนิดอื่น



รูปที่ 5.56 ค่าโครเมียมที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผัน  
ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีโอดีเจือจาง

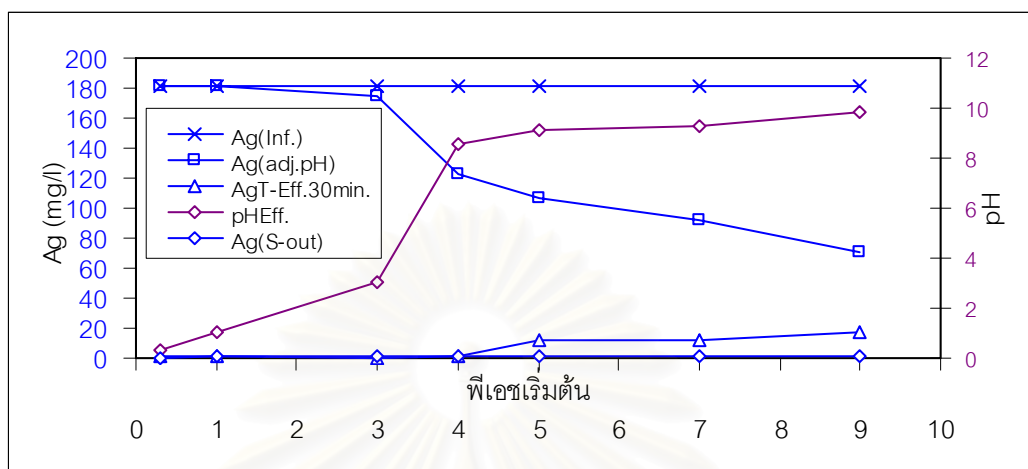
### ค. เงิน

ผลการวิเคราะห์เงินที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงในตารางที่ 5.10 และรูปที่ 5.57 โดยพบว่าเมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น ทำให้ค่าเงินละลายลดลง ซึ่งสอดคล้องกับชุดการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เงินและรูปที่ 3.2 ดังนั้นจึงคาดว่าเงินละลายดังกล่าวถูกกำจัดด้วยกลไกการสร้างตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าสูงถึง 9 ก็พบว่าค่าเงินละลายยังเหลืออยู่ในปริมาณมาก (ประมาณ 70.8 มก./ล.) ซึ่งจากผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าเป็นไปได้ยากที่จะกำจัดเงินละลายในน้ำเสียซีโอดีด้วยวิธีการสร้างตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวที่ค่าพีเอชดังกล่าว

สำหรับในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าเงินละลายใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำกว่า 0.1 มก./ล. หรือมีประสิทธิภาพการกำจัดเกือบ 100% ซึ่งมีความสอดคล้องกับชุดการทดลองที่ทำกับน้ำเสียสังเคราะห์เงิน จากผลดังกล่าวอาจสรุปได้ว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์สามารถกำจัดเงินละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าในน้ำเสียจะมีค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ในช่วง 0.3 – 9.8 ก็ตาม

แต่ค่าพีเอชดังกล่าวมีผลต่อลักษณะของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 5.6.1.3 และมีผลต่อค่าเงินทั้งหมดด้วย ถ้าชุดการทดลองใดมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนหลังการตกตะกอนต่ำ (ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่เกิน 8.5) พบว่ามีค่าเงินทั้งหมดน้อยกว่า 1 มก./ล. ส่วนชุดการทดลองใดมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนสูง จะทำให้ค่าเงินทั้งหมดสูงด้วย กล่าวคือชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5, 7 และ 9 (มีค่าพีเอชหลังเติมคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 9.1, 9.3 และ 9.8) พบว่ามีค่าเงินทั้งหมด

ประมาณ 11.56, 12.25 และ 17.28 มก./ล. ตามลำดับ ผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าของแข็งแขวนลอยส่วนหนึ่งในน้ำใสส่วนบนหลังการตกตะกอนต้องมีสารประกอบของเงินด้วย



รูปที่ 5.57 ค่าเงินที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีโอดีเจือจาง

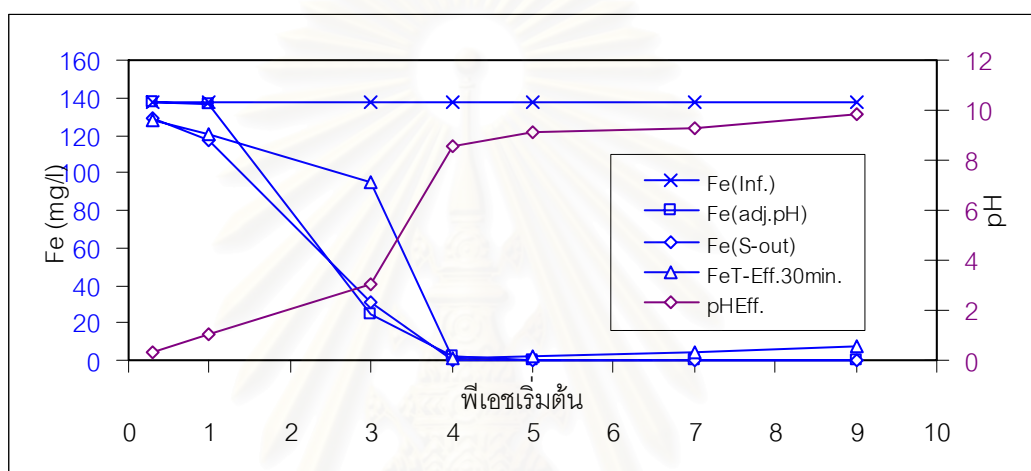
#### ง. เหล็ก

ผลการวิเคราะห์เหล็กที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.11 และรูปที่ 5.58 จากผลดังกล่าวพบว่าเมื่อมีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น ทำให้ค่าเหล็กละลายลดลง และยังพบว่าเมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 4 – 9 ทำให้ค่าเหล็กละลาย  $\leq 2.21$  มก./ล. ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3.2 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากลไกในการกำจัดเหล็กได้แก่การสร้างผลึกเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์และอาจกล่าวได้ว่าสามารถกำจัดเหล็กในน้ำเสียซีโอดีได้ง่ายเพียงแค่การปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีค่า  $\geq 4$  เท่านั้น

สำหรับในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ พบว่าค่าเหล็กละลายลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเหล็กละลายในขั้นตอนหลังการปรับค่าพีเอช (สอดคล้องกับชุดการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่สามารถกำจัดเหล็กได้ (โดยสังเกตจากชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 0.3, 1 และ 3) แต่สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์อาจมีผลต่อการกำจัดเหล็กได้บ้างโดยทางอ้อม กล่าวคือหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ทำให้ค่าพีเอชในน้ำเสียซีโอดีสูงขึ้น จึงทำให้ผลึกของเหล็กไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้น้อยลงนั่นเอง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ากลไกหลักในการกำจัดเหล็กได้แก่การสร้างตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (ดูเพิ่มเติมในชุดการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก)



นอกจากนี้ยังพบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าเหล็กทั้งหมดไม่แตกต่างกับค่าเหล็กละลายมากนัก แม้ว่าในบางชุดการทดลองจะมีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสในปริมาณสูง โดยเฉพาะชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 9 มีค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสหลังการตกตะกอนเท่ากับ 172 มก./ล. แต่พบว่ามีค่าเหล็กทั้งหมดเพียง 7.67 มก./ล. ผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่าของแข็งแขวนลอยในรูปของสารประกอบเหล็กสามารถตกตะกอนได้ดีพอสมควร โดยที่ของแข็งแขวนลอยส่วนใหญ่ในน้ำใสส่วนบนดังกล่าวน่าจะอยู่ในรูปสารประกอบของโลหะหนักชนิดอื่น



รูปที่ 5.58 ค่าเหล็กที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีโอดีเจือจาง

### 5.6.1.5 ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดี

กลไกหลักในการกำจัดปรอทและเงินด้วยสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ได้แก่ปฏิกิริยาคีเลชันร่วมกับโคแอกกูเลชัน ซึ่งพบว่าค่าพีเอชไม่มีผลต่อการกำจัดปรอทและเงินละลายด้วยปฏิกิริยาดังกล่าว เนื่องจากสามารถกำจัดปรอทและเงินได้ดีและมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึง 100% แม้ว่าน้ำเสียจะมีค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์อยู่ในช่วง 0.3 – 9.8 ก็ตาม แต่ค่าพีเอชดังกล่าวมีผลต่อปฏิกิริยาคีเลชันหรือการรวมของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นหลังปฏิกิริยาคีเลชัน กล่าวคือเมื่อค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีค่ามากกว่า 8.5 ทำให้ของแข็งแขวนลอยมีขนาดเล็กและตกตะกอนได้ไม่ดี แม้ว่าจะมีการใช้สารโพลีเมอร์ชนิดประจุบวกแล้วก็ตาม จึงทำให้มีค่าปรอททั้งหมดและเงินทั้งหมดสูงขึ้นตามปริมาณของของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนหลังการตกตะกอน

โครเมียมและเหล็กไม่สามารถถูกกำจัดด้วยสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ เนื่องจากค่าโครเมียมและเหล็กละลายในระหว่างขั้นตอนหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์กับขั้นตอนก่อนเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ (หรือหลังปรับพีเอช) ไม่แตกต่างกันนัก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะความชอบในการทำปฏิกิริยาระหว่างโครเมียมหรือเหล็กกับกลุ่มไดไฮโอคาร์บาเมตของสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ชนิดนี้น้อยกว่าความชอบในการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมกับกลุ่มไดไฮโอคาร์บาเมต เนื่องจากปฏิกิริยาคีเลชันจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการแลกเปลี่ยนอิออนกันระหว่างอิออนที่เกาะติดกับกลุ่มไดไฮโอคาร์บาเมต (โซเดียม) กับอิออนของโลหะหนัก (ดูเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 3.3) สำหรับกลไกหลักในการกำจัดโครเมียมและเหล็ก ได้แก่ การสร้างผลึกไฮดรอกไซด์ โดยที่ประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะหนักด้วยกลไกนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและความสามารถในการละลายน้ำของผลึกไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของโลหะหนักแต่ละชนิดดังรูปที่ 3.2 และจากการทดลองนี้พบว่าเมื่อน้ำเสียซีโอติมีค่าพีเอชมากกว่า 5 ก็เพียงพอที่จะทำให้ค่าโครเมียมและค่าเหล็กน้อยกว่า 0.75 และ 10 มก./ล. ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าผลึกของโครเมียมและเหล็กไฮดรอกไซด์สามารถตกตะกอนได้ดีพอสมควร กล่าวคือแม้ในชุดการทดลองที่น้ำใส่ส่วนบนมีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง แต่พบว่าปริมาณโครเมียมและเหล็กทั้งหมดมีค่าไม่แตกต่างกับโครเมียมและเหล็กละลายมากนัก

เนื่องจากจุดประสงค์ของการทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ในน้ำเสียซีโอติเจือจางด้วยสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ ซึ่งจะเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสมไปทำการทดลองหาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อดังที่กล่าวข้างต้นแล้วว่า สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์สามารถกำจัดโครเมียมและเหล็กได้น้อยมาก แต่สามารถถูกกำจัดได้ง่ายโดยควบคุมพีเอชให้สูงกว่า 5 ก็เพียงพอที่จะทำให้ค่าโครเมียมและเหล็กต่ำกว่า 0.75 และ 10 มก./ล. ตามลำดับ ดังนั้นในที่นี้จึงไม่คำนึงถึงผลในการกำจัดโครเมียมและเหล็กสำหรับการเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม แต่จะศึกษาผลของค่าพีเอชในการกำจัดปรอทและเงิน ซึ่งก็พบว่าค่าพีเอชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทและเงินละลายมากนัก ซึ่งทุกชุดการทดลองมีประสิทธิภาพการกำจัดเกือบ 100% แต่ค่าพีเอชมีผลต่อลักษณะและการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้น ซึ่งเพียงพอควบคุมค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่ให้เกิน 8.5 ก็จะทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นสามารถตกตะกอนได้ดี ดังนั้นสามารถเลือกค่าพีเอชเริ่มต้นเท่าใดก็ได้ในช่วง 0.3 – 9 เพื่อนำไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป แต่ถ้าเป็นไปได้ควรเลือกค่าพีเอชที่หลังจากการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์แล้วมีค่าพีเอชไม่สูงจนเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้น (ตกได้ไม่ดี) ดังนั้นในที่นี้จึงเลือกค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 เพื่อนำไปทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากเมื่อดูจากกราฟไตเตรชันในรูปที่ 5.5 แล้วพบว่าเมื่อแปรผันปริมาณคีเลตติ้งโพลีเมอร์ตั้งแต่ 0 – 6,000 มก./ล. ก็ยังทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นไม่มากนัก (พีเอชไม่เกิน 6)

### 5.6.2 ขั้นตอนการศึกษาหาปริมาณคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ที่เหมาะสม

การศึกษาผลของปริมาณสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ในน้ำเสียซีไอดีเจ็จจึงเป็นการทดลองแบบจาร์เทสต์ 6 ชุดการทดลอง โดยกำหนดให้ค่าพีเอชเริ่มต้นคงที่เท่ากับ 3 (จากหัวข้อที่ 5.6.1.5) และแปรผันปริมาณคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ 6 ค่า คือ 240, 480, 960, 1,200, 1,440 และ 1,680 มก./ล. ตามลำดับ นอกจากนี้ในแต่ละชุดการทดลองมีการเติมโพลีเมอร์บวกปริมาณ 3 มก./ล. ด้วย เพื่อช่วยในการรวมตะกอนหลังขั้นตอนการเติมสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ สำหรับขั้นตอนการทดลองสามารถดูเพิ่มเติมได้จากหัวข้อที่ 4.1.3

เนื่องจากสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ไม่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมและเหล็ก (จากการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์และการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีก่อนหน้านี) ดังนั้นในการทดลองนี้จึงมุ่งเน้นเฉพาะผลของปริมาณสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและเงินเท่านั้น ดังนั้นในชุดการทดลองนี้จึงไม่มีการวิเคราะห์ผลของค่าโครเมียมและเหล็ก

ผลการทดลองของแต่ละชุดการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.12 และ 5.13 โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 5.6.2.1 ไออาร์พีและพีเอช

ค่าไออาร์พีและพีเอชที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.59 จากรูปดังกล่าวพบว่าชุดการทดลองที่เติมสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์มากขึ้น มีผลให้ค่าไออาร์พีลดลงด้วย กล่าวคือเมื่อใช้สารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ 240, 480, 960, 1200, และ 1,680 มก./ล. ทำให้ค่าไออาร์พีภายหลังการเติมสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์มีค่าเท่ากับ 264, 225, 215, 180, 159 และ 126 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และถึงแม้ว่าสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์จะให้น้ำมีสภาพต่างสูงขึ้น แต่ค่าพีเอชของน้ำเสียในแต่ละชุดการทดลองค่อนข้างคงที่เท่ากับ 3 สาเหตุดังกล่าวเนื่องจากน้ำเสียที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 มีค่าสภาพกรดและอิออนไฮโดรเจนสูง จึงมีศักยภาพสูงในการสะเทินต่างนั่นเอง (ดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 5.2.11)

#### 5.6.2.2 ของแข็งแขวนลอย

ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.60 โดยพบว่าปริมาณของของแข็งแขวนลอยจะมากขึ้นตามปริมาณสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีความสอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและเงิน กล่าวคือชุดการทดลองที่เติมสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ในช่วง 240 – 1,200 มก./ล. พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและเงินละลายเพิ่มขึ้นจาก 90.8% เป็น 100% และจาก 61.5% เป็น 99.95% ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.61 และผลการกำจัดโลหะละลายดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาคลอรีนร่วมกับโคแอกกูเลชัน ซึ่งทำให้โลหะละลายเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำจึงทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเพิ่มขึ้นด้วยโดยเพิ่มจาก 528 มก./ล. เป็น 816 มก./ล. นอกจากนี้เมื่อเติมสารคลอรีนที่เล็งโพลีเมอร์ในช่วง 1200 - 1,680 มก./ล. พบว่าปริมาณ

ตารางที่ 5.12 ผลของปริมาณสารคลอรีนที่เติมเมื่อบำบัดน้ำเสียที่โอดีเจียง

ปริมาณ คลอรีน (mg/l)	pH <sub>ER</sub>	ORP <sub>ER</sub> (mV)	ปรอท (mg/l)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		ของแข็งแขวนลอย (mg/l)		SV30 (ml)
			Hg <sub>int</sub>	Hg <sub>SEI</sub>	Hg <sub>T-ER,30min</sub>	Hg <sub>S-rem</sub>	Hg <sub>T-rem,30min</sub>	SS <sub>T</sub>	SS <sub>up,30min</sub>	
240	3.01	264	199.8	18.375	27.700	90.8	86.1	528	11	25
480	3.01	225	199.8	0.633	0.865	99.7	99.6	664	13	41
960	3.03	215	199.8	0.025	0.502	100.0	99.7	736	16	48
1200	3.04	180	199.8	0.007	0.675	100.0	99.7	816	10	69
1440	3.05	159	199.8	0.003	0.557	100.0	99.7	831	4	77
1680	3.07	126	199.8	0.002	0.459	100.0	99.8	848	2	87

pH <sub>ER</sub>	=	ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัด (หลังเติมโพสิเมอร์ประจุบวก)	Hg <sub>S-rem</sub>	=	ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทละลาย
ORP <sub>ER</sub>	=	ค่าโออาร์พีของน้ำหลังบำบัด (หลังเติมโพสิเมอร์ประจุบวก)	Hg <sub>T-rem,30min</sub>	=	ประสิทธิภาพการกำจัดปรอททั้งหมดที่สกัดภายใน 30 นาที
Hg <sub>int</sub>	=	ค่าปรอทเริ่มต้นของน้ำเสียที่โอดีเจียง 10 เท่า	SS <sub>T</sub>	=	ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
Hg <sub>SEI</sub>	=	ค่าปรอทละลายหลังบำบัด (หลังเติมโพสิเมอร์ประจุบวก)	SS <sub>up,30min</sub>	=	ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำไหลทิ้งที่สกัดภายใน 30 นาที
Hg <sub>T-ER,30min</sub>	=	ค่าปรอททั้งหมดที่สกัดและทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที	SV30	=	ปริมาณที่ขึ้นตะกอนหลังตกตะกอน 30 นาที

146

ตารางที่ 5.13 ผลของปริมาณสารคลอรีนที่เติมต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการกำจัดเงินในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

ปริมาณ คลอรีนที่เติม (mg/l)	pH <sub>Et</sub>	ORP <sub>Et</sub> (mV)	เงิน (mg/l)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		ของแข็งแขวนลอย (mg/l)		SV30 (ml/l)
			Ag <sub>Int</sub>	Ag <sub>SEt</sub>	Ag <sub>TEt 30min</sub>	Ag <sub>S-em</sub>	Ag <sub>T-em 30min</sub>	SS <sub>T</sub>	SS <sub>up30min</sub>	
240	3.0	264	232.6	89.48	94.60	61.52	59.32	528	11	25
480	3.0	225	232.6	24.64	26.75	89.40	88.50	664	13	41
960	3.0	215	232.6	0.47	0.73	99.80	99.69	736	16	48
1200	3.0	180	232.6	0.11	0.52	99.95	99.78	816	10	69
1440	3.1	159	232.6	0.05	0.44	99.98	99.81	831	4	77
1680	3.1	126	232.6	0.01	0.39	100.00	99.83	848	2	87

pH<sub>Et</sub> = ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัด (หลังเติมโพสิเมอร์ประจุบวก) Ag<sub>S-em</sub> = ประสิทธิภาพในการกำจัดเงินระคาย

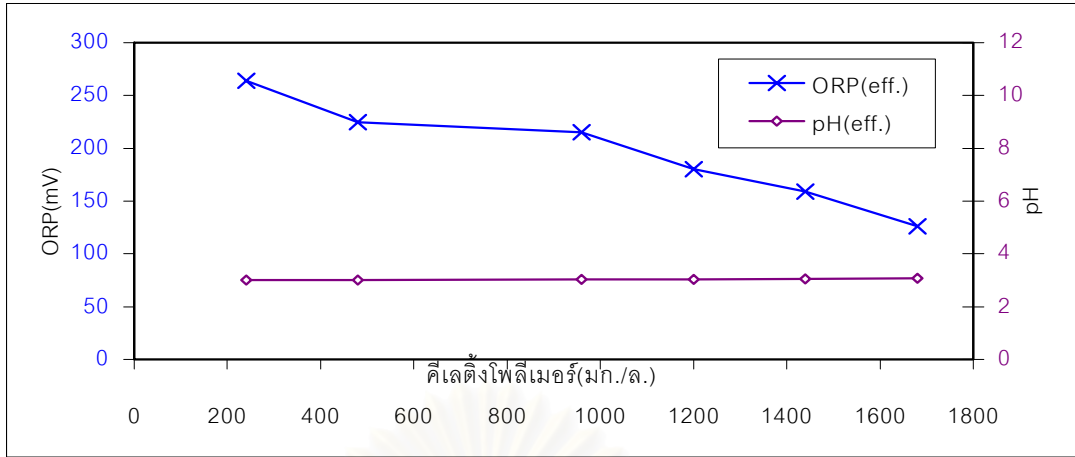
ORP<sub>Et</sub> = ค่าโออาร์พีของน้ำหลังบำบัด (หลังเติมโพสิเมอร์ประจุบวก) Ag<sub>T-em 30min</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดเงินทั้งหมดทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

Ag<sub>Int</sub> = ค่าเงินเริ่มต้นของน้ำเสียซีไอดีเจือจาง 10 เท่า SS<sub>T</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

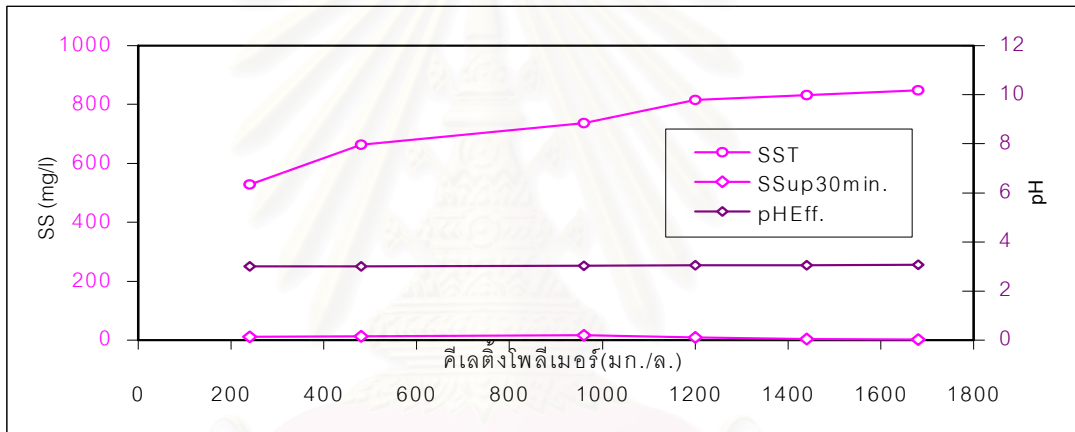
Ag<sub>S-ET</sub> = ค่าเงินละลายหลังบำบัด (หลังเติมโพสิเมอร์ประจุบวก) SS<sub>up30min</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำไหลทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

Ag<sub>T-ET 30min</sub> = ค่าเงินทั้งหมดหลังบำบัดและทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที SV30 = ปริมาณตะกอนหลังตกตะกอน 30 นาที

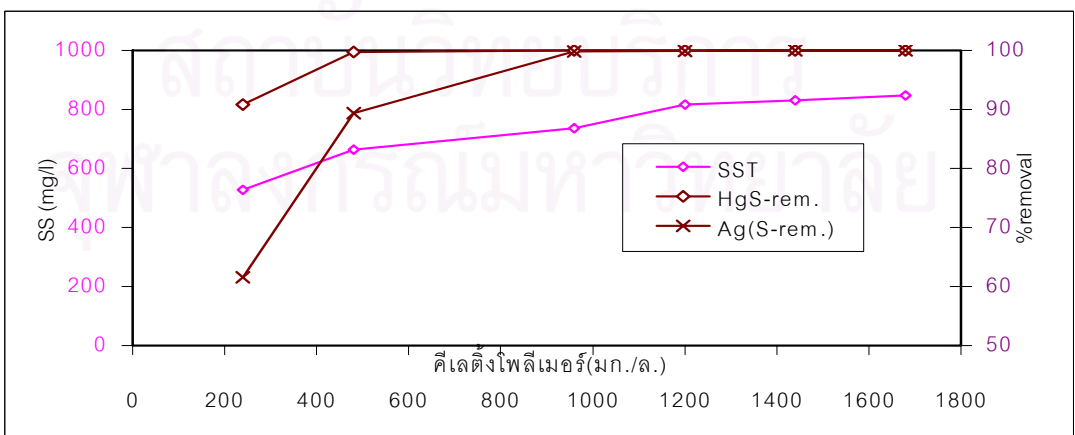
ฟรี



รูปที่ 5.59 ค่าพีเอชและโออาร์พีที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จจาง

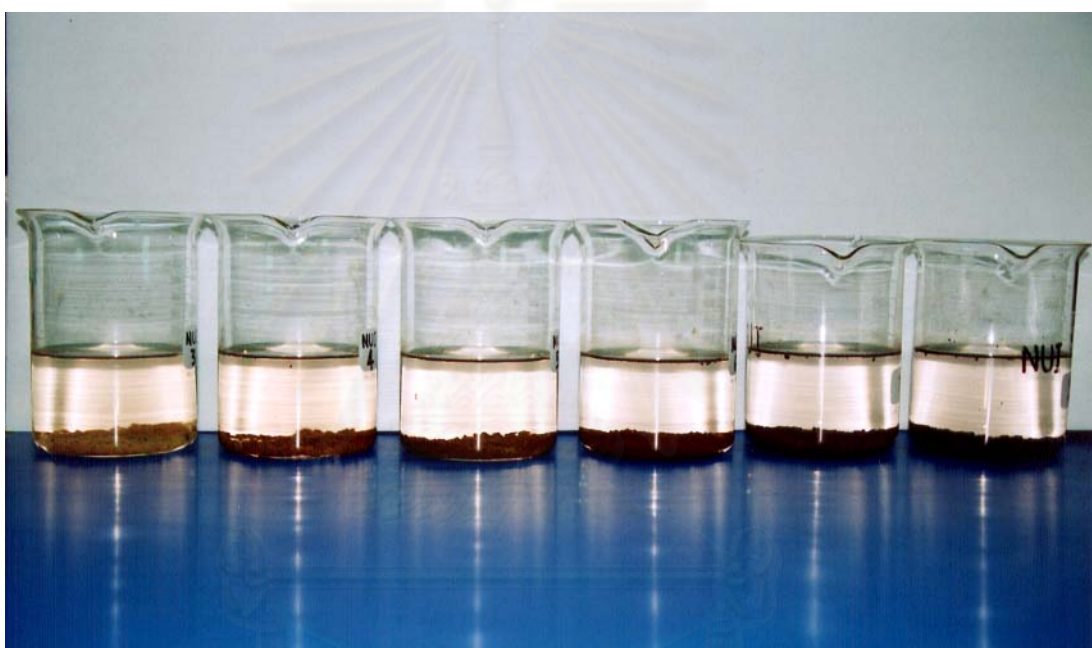


รูปที่ 5.60 ของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จจาง



รูปที่ 5.61 เปรียบเทียบของแข็งแขวนลอยทั้งหมดกับประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จจาง

ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดค่อนข้างคงที่คือประมาณ 816 - 848 มก./ล. (ดังรูปที่ 5.61) เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและเงินละลายคงที่นั่นเอง เมื่อทิ้งให้ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เกิดขึ้นตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที ดังรูปที่ 5.62 พบว่าของแข็งแขวนลอยของทุกชุดการทดลองมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้ดีพอๆกัน ซึ่งชุดการทดลองที่เติมสารคิเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 240, 480, 960, 1,200, 1,440 และ 1,680 มก./ล. มีปริมาณของของแข็งแขวนลอยในน้ำใสส่วนบนเท่ากับ 11, 13, 16, 10, 4 และ 2 มก./ล. ตามลำดับ และจากการทดลองพบว่าสีของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นจะมีสีเข้มขึ้น (จากสีน้ำตาลเป็นสีดำ) ตามปริมาณสารคิเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้น



จากซ้ายไปขวา คือ ชุดการทดลองที่ใช้สารคิเลตติ้งโพลีเมอร์ตั้งแต่ 240, 480, 960, 1200, 1440 และ 1,680 มก./ล. ตามลำดับ

**รูปที่ 5.62** ลักษณะการตกตะกอนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันปริมาณคิเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

### 5.6.2.3 ผลของปริมาณสารคิเลตติ้งโพลีเมอร์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดี

ชุดการทดลองนี้มุ่งเน้นศึกษาปริมาณสารคิเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมต่อการกำจัดปรอทและเงินในน้ำเสียซีไอดี ดังนั้นในชุดการทดลองนี้จึงเก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์เฉพาะค่า

ปรอทและเงินเท่านั้น (ไม่ทำการวิเคราะห์ค่าโครเมียมและเหล็กด้วย) เหตุผลดังกล่าวได้อธิบายแล้วในตอนต้นของหัวข้อนี้

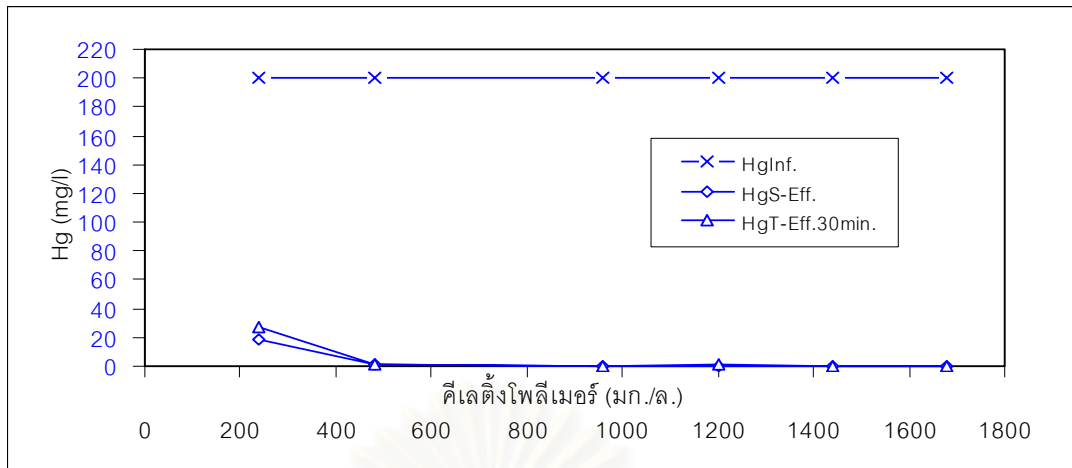
ผลการวิเคราะห์ปรอทและเงินที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.63 ถึง 5.65 จากรูปดังกล่าวพบว่าปริมาณของสารซีเลตติ้งโพลีเมอร์มีผลต่อปริมาณปรอทและเงิน กล่าวคือในชุดการทดลองที่มีการเติมสารซีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 240, 480, 960, 1,200, 1,440 และ 1,680 มก./ล. มีปริมาณปรอทละลายเหลืออยู่เท่ากับ 18.375, 0.633, 0.025, 0.007, 0.003 และ 0.002 มก./ล. ตามลำดับ และมีปริมาณเงินละลายเท่ากับ 89.48, 24.64, 0.47, 0.11, 0.05 และ 0.01 มก./ล. ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามจากการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ถ้าต้องการกำจัดปรอทและเงินในน้ำเสียซีโอดีที่เจือจาง 10 เท่า ให้มีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้ง ต้องใช้สารซีเลตติ้งโพลีเมอร์ชนิดนี้เท่ากับ 1,440 มก./ล. (มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดค่าปรอทไว้ไม่เกิน 0.005 มก./ล. และส่วนมาตรฐานของนิคมอุตสาหกรรมบางแห่งกำหนดเงินไว้ไม่เกิน 1 . 0 มก. /ล. )

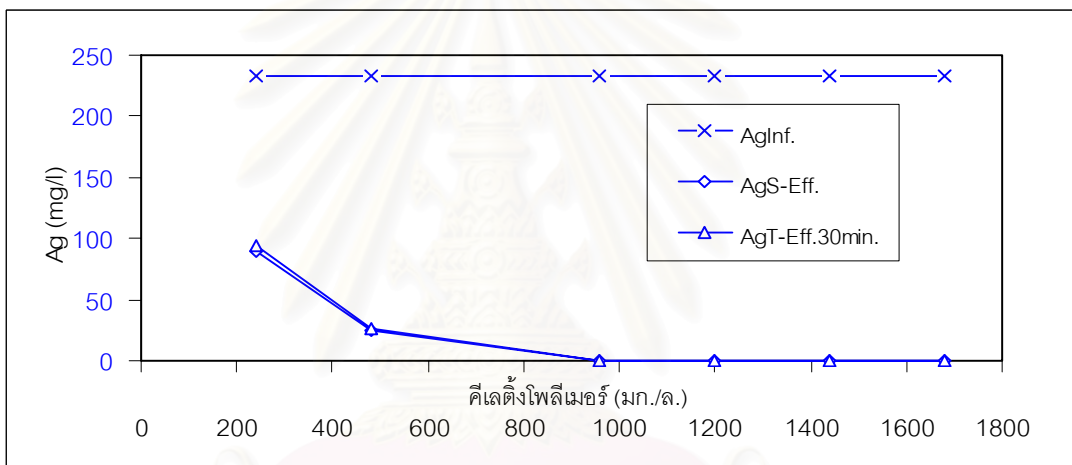
จากผลดังกล่าวพบว่าต้องใช้สารซีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 1,440 มก./ล. จึงจะทำให้ปรอทมีค่าต่ำกว่า 0.005 มก./ล. ตามลำดับ (ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม) แต่ถ้ามองในแง่ของการกำจัดเงินเพียงตัวเดียว พบว่าถ้าต้องการกำจัดเงินให้ต่ำกว่า 1 มก./ล. (มาตรฐานน้ำทิ้งของนิคมอุตสาหกรรมบางแห่ง) ต้องใช้สารซีเลตติ้งโพลีเมอร์เพียง 960 มก./ล. ถึงอย่างไรก็ตามก็ไม่ได้หมายความว่าสารซีเลตติ้งโพลีเมอร์มีความสามารถในการกำจัดเงินได้ดีกว่าปรอท เพียงแต่ว่ามาตรฐานน้ำทิ้งได้กำหนดค่าปรอทต่ำกว่าค่าเงินประมาณ 200 เท่านั่นเอง และถ้ามองอีกด้านหนึ่งพบว่า เมื่อเติมสารซีเลตติ้งโพลีเมอร์เพียง 240 มก./ล. ทำให้สามารถกำจัดปรอทละลายได้สูงถึง 90.8% ในขณะที่กำจัดเงินละลายได้เพียง 61.5% เท่านั้น ดังรูปที่ 5.65 จากผลดังกล่าวอาจสรุปได้ว่าสารซีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เติมลงไปจะเลือกทำปฏิกิริยากับปรอทก่อนและเมื่อค่าปรอทในน้ำต่ำแล้ว จึงจะทำปฏิกิริยากับเงินต่อไปหรืออาจกล่าวได้ว่าสารซีเลตติ้งโพลีเมอร์ชนิดนี้สามารถจับตัวกับปรอทได้ดีกว่าเงิน หรืออาจกล่าวได้ว่าระหว่างสารซีเลตติ้งโพลีเมอร์กับปรอทมีค่าคงที่ความเสถียร (stability constant) มากกว่าระหว่างสารซีเลตติ้งโพลีเมอร์กับเงิน ซึ่งผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับลักษณะของปฏิกิริยาคีเลชันโดยทั่วไป (สามารถดูเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 3.3.1 - 3.3.5 และในตารางที่ 3.7)

### 5.6.3 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในสภาวะที่เหมาะสม และผลของปริมาณสารโพลีเมอร์ประจุบวก

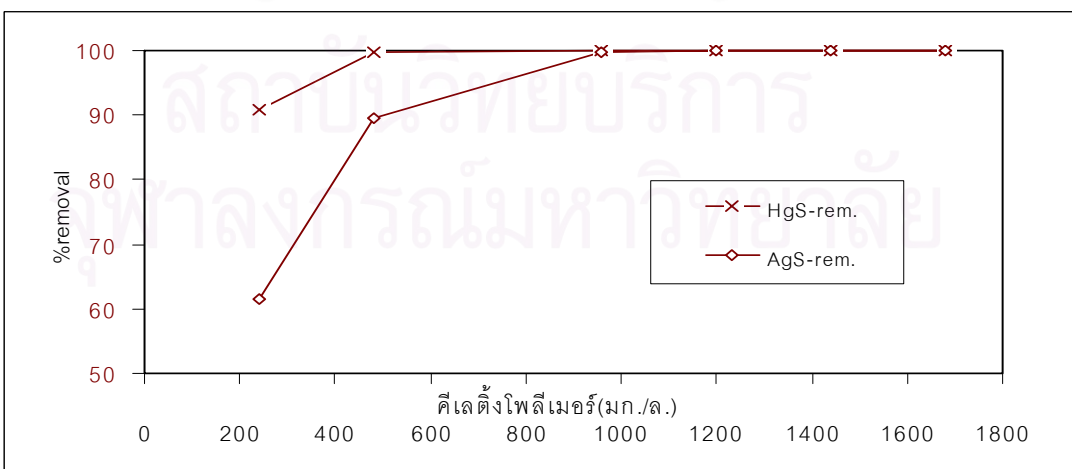




รูปที่ 5.63 ค่าปรอทในสภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จจาง



รูปที่ 5.64 ค่าเงินในสภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลองเมื่อแปรผันปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ของน้ำเสียซีไอดีเจ็จจาง



รูปที่ 5.65 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดปรอทและเงินในน้ำเสียซีไอดีเจ็จจางที่ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ต่างๆ

จากหัวข้อที่ 5.6.1 และ 5.6.2 อาจสรุปได้ว่าถ้าต้องการกำจัดปรอทและเงินในน้ำเสียซีโอดี (ที่เจือจาง 10 เท่า) ให้มีค่าต่ำกว่าค่ากำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งทั้งคู่ ต้องใช้ปริมาณสารคีเลตติ้ง โพลีเมอร์ทั้งหมด 1,440 มก./ล. ซึ่งโดยปกติแล้วค่าพีเอชไม่มีผลต่อการกำจัดปรอทและเงินละลาย แต่ถ้าต้องการให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นสามารถตกตะกอนได้ดี ต้องควบคุมค่าพีเอชระหว่างการบำบัดปฏิบัติของสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์กับน้ำเสียซีโอดีไม่ให้เกิน 8.5 และจากหัวข้อที่ 5.6.1 ยังพบอีกว่าถ้าน้ำเสียซีโอดีมีค่าพีเอชมากกว่า 5 ก็จะทำให้โครเมียมและเหล็กกลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้ง (มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดค่าโครเมียมไว้ไม่เกิน 0.75 มก./ล. ส่วนมาตรฐานน้ำทิ้งของนิคมอุตสาหกรรมบางแห่งกำหนดค่าเหล็กไว้ไม่เกิน 10 มก./ล.)

**ดังนั้นคาดว่าแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดในน้ำเสียซีโอดี (ที่เจือจาง 10 เท่า) ให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งพร้อมๆ กัน สามารถกระทำได้โดยการใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 1,440 มก./ล. และควบคุมค่าพีเอช (หลังการเติมคีเลตติ้งโพลีเมอร์) ให้มีค่าเท่ากับ 8.0 – 8.5** ซึ่งจากกราฟไตเตรชันของน้ำเสียซีโอดีดังรูปที่ 5.5 สรุปได้ว่า ถ้าต้องการให้น้ำเสียซีโอดีในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ (เท่ากับ 1,440 มก./ล.) แล้วมีค่าพีเอชประมาณ 8.5 จะต้องปรับน้ำเสียซีโอดีให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5.0

ดังนั้นเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในสภาวะดังกล่าว จึงได้ทำการทดลองในขั้นตอนนี้เพิ่มเติม นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของปริมาณสารโพลีเมอร์ประจุบวกต่อความสามารถในการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นพร้อมกันไปด้วย ซึ่งแบ่งเป็น 5 ชุด การทดลอง โดยแปรผันปริมาณสารโพลีเมอร์ประจุบวก 5 ค่า คือ 0, 1, 2, 3 และ 5 มก./ล. ตามลำดับ และในแต่ละชุดการทดลองจะปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีโอดีเจือจางเท่ากับ 5.0 และใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 1,440 มก./ล. สำหรับขั้นตอนการทดลองสามารถดูเพิ่มเติมได้ในบทที่ 4

ผลการทดลองในแต่ละชุดการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.14 ถึง 5.17 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (หมายเหตุ – ในตารางที่ 5.14 ถึง 5.17 ผลของค่าพีเอช ไออาร์พี ของแข็งแขวนลอย และเอสวี30 เหมือนกันในทุกตาราง แต่จะแตกต่างกันเฉพาะผลของโลหะหนักเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ผล)

### 5.6.3.1 ไออาร์พีและพีเอช

น้ำเสียซีโอดีหลังการปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 5.0 พบว่ามีค่าไออาร์พีประมาณ 400 มิลลิโวลต์ และในสภาวะหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าไออาร์พีใกล้เคียงกันประมาณ -75 ถึง -53 มิลลิโวลต์ และมีค่าพีเอชประมาณ 8.4 - 8.5 ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ (เนื่องจากที่ค่าพีเอชดังกล่าวจะทำให้ค่าโครเมียมและเหล็กละลายมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้ง นอกจากนี้ยังทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นตกตะกอนได้ดี ดูเพิ่มเติมได้จากการทดลองของน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมและเหล็ก และจากการทดลองกับน้ำเสียซีโอดีเจือจางในหัวข้อ 5.6.1)

ตารางที่ 5.14 ผลของปริมาณสารโพสิเทมิทอร์บิวทอลต่อประสิทธิภาพการกำจัดปรอทในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง

ปริมาณโพสิเทมิทอร์บิวทอล (mg/l)	pH		ORP (mV)		ปรอท (mg/l)			ประสิทธิภาพกำจัด (%)			ของแข็งแขวนลอย (mg/l)		SV30 (ml/l)
	pH <sub>int.</sub>	pH <sub>Ext.</sub>	ORP <sub>int.</sub>	ORP <sub>Ext.</sub>	Hg <sub>int.</sub>	Hg <sub>SEt.</sub>	Hg <sub>Tr-Ext. 30min.</sub>	Hg <sub>S-rem.</sub>	Hg <sub>Tr-rem. 30min.</sub>	SS <sub>T</sub>	SS <sub>Up30min.</sub>		
0	5.0	8.4	420	-72	190.2	0.001	0.890	100.0	99.5	972	12	159	
1	5.0	8.5	416	-53	190.2	0.001	0.740	100.0	99.6	992	6	153	
2	5.0	8.4	422	-68	190.2	0.001	0.589	100.0	99.7	976	6	142	
3	5.0	8.4	431	-72	190.2	0.001	0.733	100.0	99.6	1064	2	150	
5	5.0	8.5	424	-75	190.2	0.001	0.862	100.0	99.5	960	4	150	

pH<sub>Ext.</sub> = ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัด (หลังเติมโพสิเทมิทอร์บิวทอล) Hg<sub>S-rem.</sub> = ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทละลาย

pH<sub>int.</sub> = ค่าพีเอชของน้ำเสีย (หลังปรับพีเอช) Hg<sub>Tr-rem.30min.</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดปรอททั้งหมดทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

ORP<sub>Ext.</sub> = ค่าโออาร์พีของน้ำหลังบำบัด (หลังเติมโพสิเทมิทอร์บิวทอล) SS<sub>T</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

Hg<sub>int.</sub> = ค่าปรอทเริ่มต้นของน้ำเสียซีโอดีเจือจาง 10 เท่า SS<sub>Up30min.</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

Hg<sub>S-Ext.</sub> = ค่าปรอทละลายหลังบำบัด (หลังเติมโพสิเทมิทอร์บิวทอล) SV30 = ปริมาณตะกอนหลังตกตะกอน 30 นาที

Hg<sub>Tr-Ext. 30min.</sub> = ค่าปรอททั้งหมดหลังบำบัดและทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที



ตารางที่ 5.15 ผลของปริมาณสารโพแทสเซียมต่อประสิทธิภาพการกำจัดโคลนีย์ในน้ำเสียที่โอดีเจ็ดจาก

ปริมาณโพแทสเซียม (มก./ล.)	pH		ORP (mV)		โคลนีย์ (mg/l)		ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		ของแข็งแขวนลอย (mg/l)		SV30 (ml/l)
	pH <sub>inf.</sub>	pH <sub>em.</sub>	ORP <sub>inf.</sub>	ORP <sub>em.</sub>	Cr <sub>inf.</sub>	Cr <sub>S-em.</sub>	Cr <sub>T-em. 30min.</sub>	Cr <sub>S-em.</sub>	Cr <sub>T-em. 30min.</sub>	SS <sub>T</sub>	
0	5.0	8.4	420	-72	42.2	0.07	0.15	99.8	99.6	972	12
1	5.0	8.5	416	-53	42.2	0.03	0.18	99.9	99.6	992	6
2	5.0	8.4	422	-68	42.2	0.03	0.13	99.9	99.7	976	6
3	5.0	8.4	431	-72	42.2	0.03	0.17	99.9	99.6	1064	2
5	5.0	8.5	424	-75	42.2	0.02	0.17	100.0	99.6	960	4

pH<sub>inf.</sub> = ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัด (หลังเติมโพแทสเซียม) Cr<sub>S-em.</sub> = ประสิทธิภาพในการกำจัดโคลนีย์ละลาย

pH<sub>em.</sub> = ค่าพีเอชของน้ำเสีย (หลังบำบัด) Cr<sub>T-em. 30min.</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดโคลนีย์ทั้งหมดทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

ORP<sub>em.</sub> = ค่าโออาร์พีของน้ำหลังบำบัด (หลังเติมโพแทสเซียม) SS<sub>T</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

Cr<sub>inf.</sub> = ค่าโคลนีย์เริ่มต้นของน้ำเสียที่โอดีเจ็ดจาก 10 เท่า SS<sub>sp. 30min.</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

Cr<sub>S-em.</sub> = ค่าโคลนีย์ละลายหลังบำบัด (หลังเติมโพแทสเซียม) SV30 = ปริมาตรขึ้นตะกอนหลังตกตะกอน 30 นาที

Cr<sub>T-em. 30min.</sub> = ค่าโคลนีย์ทั้งหมดหลังบำบัดและทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที



ตารางที่ 5.16 ผลของปริมาณสารโพสิเทรียมออกไซด์รวมต่อประสิทธิภาพการกำจัดเงินในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง

ปริมาณโพสิเทรียมออกไซด์ (มก./ล.)	pH		ORP (mV)		เงิน (mg/l)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		ของแข็งแขวนลอย (mg/l)		SV30 (ml/l)
	pH <sub>int.</sub>	pH <sub>Ext.</sub>	ORP <sub>int.</sub>	ORP <sub>Ext.</sub>	AG <sub>int.</sub>	AG <sub>s-rem.</sub>	AG <sub>T-rem. 30min.</sub>	AG <sub>T-rem. 30min.</sub>	SS <sub>T</sub>	SS <sub>up30min.</sub>		
0	5.0	8.4	420	-72	211.9	0.1	0.7	99.9	972	12	159	
1	5.0	8.5	416	-53	211.9	0.1	0.6	99.9	992	6	153	
2	5.0	8.4	422	-68	211.9	0.1	0.3	100.0	976	6	142	
3	5.0	8.4	431	-72	211.9	0.1	0.5	100.0	1064	2	150	
5	5.0	8.5	424	-75	211.9	0.1	0.7	100.0	960	4	150	

pH<sub>Ext.</sub> = ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัด (หลังเติมโพสิเทรียมออกไซด์) AG<sub>s-rem.</sub> = ประสิทธิภาพในการกำจัดเงินละลาย

pH<sub>int.</sub> = ค่าพีเอชของน้ำเสีย (หลังบำบัด) AG<sub>T-rem. 30min.</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดเงินทั้งหมดทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

ORP<sub>Ext.</sub> = ค่าโออาร์พีของน้ำหลังบำบัด (หลังเติมโพสิเทรียมออกไซด์) SS<sub>T</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

AG<sub>int.</sub> = ค่าเงินเริ่มต้นของน้ำเสียซีโอดีเจือจาง 10 เท่า SS<sub>up30min.</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำใสตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที

AG<sub>s-Ext.</sub> = ค่าเงินละลายหลังบำบัด (หลังเติมโพสิเทรียมออกไซด์) SV30 = ปริมาตรตะกอนหลังตกตะกอน 30 นาที

AG<sub>T-Ext. 30min.</sub> = ค่าเงินทั้งหมดหลังบำบัดและทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที



ตารางที่ 5.17 ผลของปริมาณสารโพแทสเซียมต่อประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กในน้ำเสียซีไอดีเจองาง

ปริมาณโพแทสเซียม (มก./ล.)	pH		ORP (mV)		เหล็ก (mg/l)			ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		ของแข็งแขวนลอย (mg/l)		SV30 (ml)
	pH <sub>int.</sub>	pH <sub>ext.</sub>	ORP <sub>int.</sub>	ORP <sub>ext.</sub>	Fe <sub>int.</sub>	Fe <sub>s-ext.</sub>	Fe <sub>T-ext. 30min.</sub>	Fe <sub>s-rem.</sub>	Fe <sub>T-rem.30min.</sub>	SS <sub>T</sub>	SS <sub>up30min.</sub>	
0	5.0	8.4	420	-72	138.9	0.3	0.8	99.8	99.4	972	12	159
1	5.0	8.5	416	-53	138.9	0.2	0.9	99.8	99.4	992	6	153
2	5.0	8.4	422	-68	138.9	0.2	0.8	99.9	99.4	976	6	142
3	5.0	8.4	431	-72	138.9	0.2	0.8	99.9	99.4	1064	2	150
5	5.0	8.5	424	-75	138.9	0.1	0.8	99.9	99.4	960	4	150

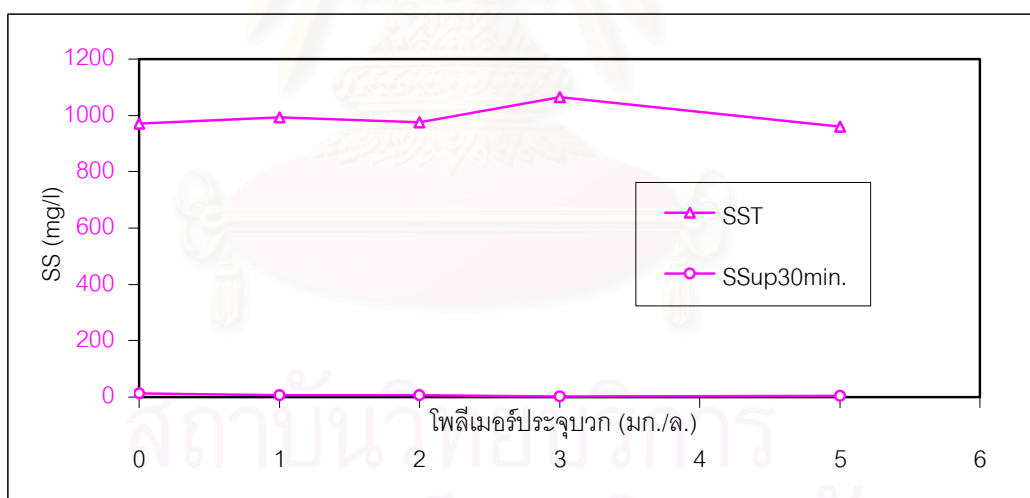
pH<sub>ext.</sub> = ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัด (หลังเติมโพแทสเซียม) Fe<sub>s-rem.</sub> = ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก  
 pH<sub>int.</sub> = ค่าพีเอชของน้ำเสีย (หลังบำบัด) Fe<sub>T-ext. 30min.</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กทั้งหมดที่ได้ออกภายใน 30 นาที  
 ORP<sub>ext.</sub> = ค่าไออาร์พีของน้ำหลังบำบัด (หลังเติมโพแทสเซียม) SS<sub>T</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด  
 Fe<sub>int.</sub> = ค่าเหล็กเริ่มต้นของน้ำเสียซีไอดีเจองาง 10 เท่า SS<sub>up30min.</sub> = ค่าของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียซีไอดีเจองาง 30 นาที  
 Fe<sub>s-ext.</sub> = ค่าเหล็กตกค้างหลังบำบัด (หลังเติมโพแทสเซียม) SV30 = ปริมาตรที่ตกตะกอนหลังจาก 30 นาที  
 Fe<sub>T-ext. 30min.</sub> = ค่าเหล็กทั้งหมดหลังบำบัดและทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที



### 5.6.3.2 ของแข็งแขวนลอย

ค่าของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.66 พบว่าหลังการเติมสารคลีเลตติ้ง โพลีเมอร์และสารโพลีเมอร์ประจุบวก พบว่าในแต่ละชุดการทดลองมีปริมาณของแข็งแขวนลอย สีดำเกิดขึ้น ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันประมาณ 960 – 1,050 มก./ล. (สอดคล้องกับการทดลอง ในหัวข้อที่ 5.6.1 ในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.0 – 9.0)

จุดประสงค์การเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวกเพื่อช่วยในการรวมตะกอนของของแข็งแขวนลอยให้มีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้ดีขึ้น จากการทดลองแปรผันปริมาณสารโพลีเมอร์ประจุบวก 5 ค่า ได้แก่ 0, 1, 2, 3, และ 5 มก./ล. พบว่าในน้ำใสส่วนบนหลังทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาทีพบว่ามีปริมาณของแข็งแขวนลอยเหลืออยู่เท่ากับ 12, 6, 6, 2 และ 4 มก./ล. ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่าปริมาณสารโพลีเมอร์ประจุบวกไม่มีผลต่อการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอยมากนักที่สภาวะนี้ อย่างไรก็ตามจากการทดลองในหัวข้อที่ 5.6.1 พบว่าค่าพีเอชมีผลอย่างมากต่อลักษณะและความสามารถในการตกตะกอนของของแข็งแขวนลอย กล่าวคือถ้าควบคุมค่าพีเอชหลังการเติมสารคลีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่ให้เกิน 8.5 จะทำให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นสามารถตกตะกอนได้ดี (ซึ่งก็มีความสอดคล้องกับการทดลองนี้เช่นกัน)



รูปที่ 5.66 ของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่างๆ ในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อแปรผันปริมาณสารโพลีเมอร์ประจุบวกของน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

### 5.6.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก

เกือบทุกชุดการทดลองเหลือปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะมีการเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวกหรือไม่ มี ดังนั้นจึงจะขอกกล่าวถึงเฉพาะในชุดการทดลองที่ไม่มี การเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวก โดยเมื่อปรับน้ำเสียซีไอดีเจือจาง 10 เท่า ให้มีค่าพีเอชเริ่มต้น

เท่ากับ 5.0 และเติมปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์เท่ากับ 1,440 มก./ล. จะทำให้น้ำเสียซีไอดีเจือจางซึ่งมีค่าปรอท โครเมียม เงิน และเหล็กเริ่มต้นประมาณ 200, 42, 210 และ 140 มก./ล. มีปริมาณลดลงเหลือ 0.001, 0.07, 0.1 และ 0.3 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด 100, 99.8, 99.9 และ 99.8% ตามลำดับ จากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าที่สภาวะดังกล่าว (พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 และใช้สารคลอรีนไดออกไซด์เท่ากับ 1,440 มก./ล.) สามารถกำจัดโลหะหนักต่างๆ ในน้ำเสียซีไอดีเจือจางให้มีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้ง

#### 5.6.4 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

ในน้ำเสียซีไอดีประกอบด้วยโลหะหนัก 4 ชนิดอยู่ร่วมกัน ได้แก่ ปรอท โครเมียม เงิน และเหล็ก ซึ่งจากการทดลองข้างต้นพบว่ากลไกในการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน กล่าวคือโครเมียมและเหล็กไม่สามารถกำจัดได้โดยตรงด้วยการใช้สารคลอรีนไดออกไซด์ แต่สามารถกำจัดโดยทางอ้อมคือทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชสูงขึ้น ทำให้ผลึกของโครเมียมและเหล็กไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้น้อยลงซึ่งสอดคล้องกับการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมและเหล็ก ซึ่งจากการทดลองในหัวข้อที่ 5.6.1 พบว่าเพียงพอปรับค่าพีเอชของน้ำเสียซีไอดีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีค่ามากกว่า 5 ก็ทำให้ปริมาณโครเมียมและเหล็กละลายต่ำกว่า 0.75 และ 10 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนปรอทและเงินสามารถถูกกำจัดได้ง่ายด้วยการใช้สารคลอรีนไดออกไซด์ ซึ่งพบว่าใช้สารคลอรีนไดออกไซด์เพียง 1,440 มก./ล. ก็สามารถทำให้น้ำเสียซีไอดีมีค่าต่ำกว่า 0.005 และ 1 มก./ล. ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้สารคลอรีนไดออกไซด์ในการกำจัดปรอทและเงินต้องควบคุมไม่ให้ค่าพีเอชเกิน 8.5 มิฉะนั้นจะทำให้ของแข็งแขวนลอยซึ่งเป็นสารประกอบของปรอทและเงินมีขนาดเล็กและตกตะกอนได้ไม่ดี

ซึ่งจากการทดสอบการกำจัดโลหะหนักต่างๆ ในน้ำเสียซีไอดี (เจือจาง 10 เท่า) โดยการใช้สารคลอรีนไดออกไซด์เท่ากับ 1,440 มก./ล. และควบคุมค่าพีเอชให้เท่ากับ 8.4 – 8.5 พบว่าสามารถกำจัดปรอท โครเมียม เงิน และเหล็กละลายน้ำให้เหลือเท่ากับ 0.001, 0.07, 0.1 และ 0.3 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งน้ำทิ้งดังกล่าวมีคุณภาพตามมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมหรือมาตรฐานน้ำทิ้งของนิคมอุตสาหกรรมบางแห่ง การควบคุมค่าพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 8.4 - 8.5 มีหลายวิธี แต่ในที่นี้พบว่าเมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีไอดีให้เท่ากับ 5.0 จากนั้นเติมสารคลอรีนไดออกไซด์ 1,440 มก./ล. จะทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นและมีค่าประมาณ 8.4 - 8.5 พอที่ส่วนเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนเพียงประมาณ 30 นาทีถึง 1 ชั่วโมง ก็สามารถทำให้ของแข็งแขวนลอยส่วนใหญ่ตกตะกอนได้ดี สำหรับปริมาณสารเคมีและค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการกำจัดโลหะหนักในสภาวะดังกล่าวจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.7 ต่อไป ส่วนลักษณะน้ำเสียของงานวิจัยนี้ ก่อนและหลังบำบัดแสดงดังตารางที่ 5.18 และการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียซีไอดีแบบเบตซ์อย่างง่ายด้วยการใช้สารคลอรีนไดออกไซด์สามารถดูได้ในภาคผนวก ง.



ตารางที่ 5.18 ลักษณะน้ำเสียซีไอดีของงานวิจัยนี้ก่อนและหลังบำบัด

ลักษณะ	ปริมาณ		
	ไม่เจือจาง	เจือจาง 10 เท่า	หลังบำบัด
พีเอช <sup>1</sup>	< 1	< 1	8.5
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids) (มก./ล.)	586,650 <sup>2</sup>	58,665	83,522 <sup>3</sup>
ซัลเฟต (มก./ล.)	580,880 <sup>4</sup>	58,088	45,000 <sup>5</sup>
ปรอท <sup>6</sup> (มก./ล.)	1,871.8	187.18	0.001
โครเมียม <sup>7</sup> (มก./ล.)	433	43.30	0.07
เงิน <sup>7</sup> (มก./ล.)	2,068.3	206.83	0.1
เหล็ก <sup>7</sup> (มก./ล.)	1,298.7	129.87	0.3

<sup>1</sup> : วัดโดยใช้พีเอชมิเตอร์ HORIBA pH METER F-13

<sup>2</sup> : จากการคำนวณ (ค่าโดยประมาณ) เนื่องจากไม่สามารถระเหยให้แห้งโดยใช้เครื่องอังน้ำได้เนื่องจากจะเหลือกรดซัลฟิวริกอยู่ที่ก้นหลังจากนําระเหยไปหมดแล้ว (จุดเดือดของกรดซัลฟิวริกสูงกว่าน้ำ)

<sup>3</sup> : นำไประเหยบนเครื่องอังน้ำ (Water Bath)

<sup>4</sup> : จากการคำนวณ (ค่าโดยประมาณ)

<sup>5</sup> : วิเคราะห์โดย Turbidimetric Method

<sup>6</sup> : วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer ด้วยวิธี Hydride generation

<sup>7</sup> : วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer ด้วยวิธี Direct Air-Acetylene Flame

### 5.6.5 เปรียบเทียบปริมาณความต้องการสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เพื่อใช้ในการกำจัดปรอทและเงินในน้ำเสียสังเคราะห์และในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

จากการทดลองใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ในการกำจัดโลหะปรอทและเงินในน้ำเสียสังเคราะห์ ปรอท น้ำเสียสังเคราะห์เงิน และในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง (ซึ่งมีทั้งปรอทและเงินอยู่รวมกัน) พบว่าปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ต้องใช้ในการกำจัดโลหะปรอทและเงินให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากผลการทดลองการกำจัดปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทพบว่า ถ้าต้องการกำจัดปรอท 1 กรัมจะต้องใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่น้อยกว่า 3.2 กรัมจึงจะเพียงพอที่จะกำจัดปรอทละลายในน้ำเสียสังเคราะห์ให้เหลือ  $\leq 0.005$  มก./ล. ดังนั้นถ้าในน้ำเสียซีไอดีเจือจางปริมาตร 1 ลิตร และมีปรอทอยู่ 0.2 กรัม (200 มก./ล.) จะต้องใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่น้อยกว่า 0.64 กรัม

2. จากผลการทดลองการกำจัดเงินในน้ำเสียสังเคราะห์เงินพบว่าถ้าต้องการกำจัดเงิน 1 กรัมจะต้องใช้สารคลอรีนไดออกไซด์ไม่ต่ำกว่า 1.6 กรัม จึงจะทำให้น้ำทิ้งมีค่าเงิน  $< 1$  มก./ล. ดังนั้นถ้าในน้ำเสียคลอรีนไดออกไซด์เจือจางปริมาตร 1 ลิตรมีเงินอยู่ 0.21 กรัม (210 มก./ล.) จะต้องใช้สารคลอรีนไดออกไซด์ไม่ต่ำกว่า 0.34 กรัม

3. จากข้อ 1 และข้อ 2 จะเห็นว่าถ้านำความต้องการปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์เพื่อใช้ในการกำจัดปรอทและเงินมารวมกันเหมือนกับปริมาณที่มีในน้ำเสียคลอรีนไดออกไซด์เจือจางปริมาตร 1 ลิตรจะได้ว่าถ้าในน้ำเสียคลอรีนไดออกไซด์เจือจางมีปรอทอยู่ 0.2 กรัม และเงิน 0.21 กรัม จะต้องการปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์เท่ากับ  $0.64 + 0.34 = 0.98$  กรัม แต่ความต้องการปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ที่แท้จริงในน้ำเสียคลอรีนไดออกไซด์เจือจางเพื่อที่จะทำให้โลหะหนักทั้ง 2 ชนิดดังกล่าวมีค่า  $\leq$  ที่มาตรฐานน้ำทิ้งกำหนดจะต้องใช้สารคลอรีนไดออกไซด์ = 1.44 กรัม จะเห็นว่าจะต้องใช้มากกว่าความต้องการจริง ประมาณ 47% ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในน้ำเสียคลอรีนไดออกไซด์เจือจางมีอิออนของสารต่างๆ มากมาย ซึ่งมากกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ เช่น อิออนของเหล็ก อิออนของโครเมียม หรือ อิออนของสารอื่นๆ ที่อาจรบกวนการทำปฏิกิริยาของสารคลอรีนไดออกไซด์กับโลหะปรอทและเงิน หรืออาจมีสารอื่นที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารคลอรีนไดออกไซด์จึงทำให้น้ำเสียคลอรีนไดออกไซด์เจือจาง มีความต้องการปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์มากกว่าปริมาณที่ต้องการในน้ำเสียสังเคราะห์

## 5.7 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียคลอรีน

### 5.7.1 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปรอทและเงิน

ค่าใช้จ่ายในที่นี้จะคิดเฉพาะค่าสารคลอรีนไดออกไซด์ที่ใช้ในการกำจัดปรอทและเงินในน้ำเสียสังเคราะห์เท่านั้น

#### 5.7.1.1 น้ำเสียสังเคราะห์ปรอท

ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าปรอทเริ่มต้น 148 มก./ล. พบว่าจะต้องใช้สารคลอรีนไดออกไซด์อย่างน้อย เท่ากับ 480 มก./ล. จึงจะเพียงพอที่จะกำจัดปรอทละลายในน้ำเสียสังเคราะห์ให้เหลือน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.005 มก./ล. ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าถ้าต้องการกำจัดปรอท 1 กรัม จะต้องใช้สารคลอรีนไดออกไซด์ไม่ต่ำกว่า 3.2 กรัม จึงจะทำให้น้ำทิ้งมีค่าปรอทต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นเมื่อต้องการคิดเป็นค่าใช้จ่ายเฉพาะค่าสารคลอรีนไดออกไซด์ต่อกรัมของโลหะหนักปรอทที่ถูกกำจัด จะได้ว่า ถ้าต้องการกำจัดปรอท 1 กรัมจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นค่าสารคลอรีนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.96 บาท (สารคลอรีนไดออกไซด์ที่ใช้ราคา 300 บาท/กก.)

### 5.7.1.2 น้ำเสียสังเคราะห์เงิน

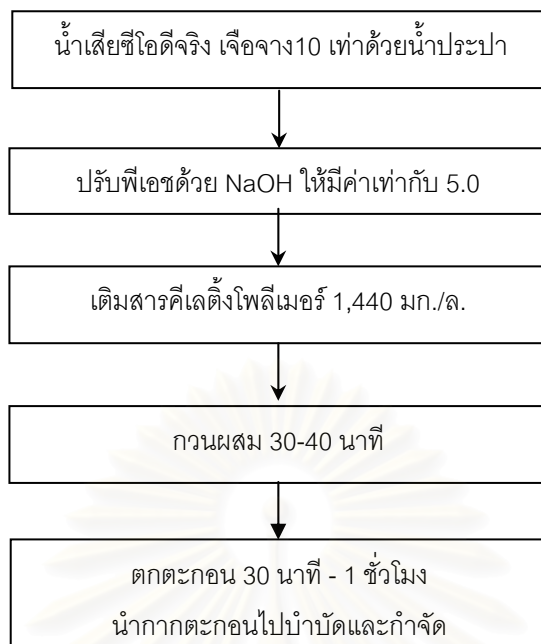
ในทำนองเดียวกันน้ำเสียสังเคราะห์เงินที่มีค่าเงินเริ่มต้น 230 มก./ล. พบว่า จะต้องใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์อย่างน้อย เท่ากับ 360 มก./ล. จึงจะเพียงพอที่จะกำจัดเงินละลาย ในน้ำเสียสังเคราะห์ให้เหลือน้อยกว่า 1 มก./ล. ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าถ้าต้องการกำจัดเงิน 1 กรัม จะต้องใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่น้อยกว่า 1.6 กรัม จึงจะทำให้น้ำทิ้งมีค่าเงินต่ำกว่า 1 มก./ล. ดังนั้นเมื่อต้องการคิดเป็นค่าใช้จ่ายเฉพาะค่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ต่อกรัมของโลหะเงินที่ถูกกำจัด จะได้ว่าถ้าต้องการกำจัดเงิน 1 กรัมจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นค่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ เท่ากับ 0.48 บาท (สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ใช้ราคา 300 บาท/กก.)

### 5.7.2 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอไลต์

จากการทดลองกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอไลต์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับ สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ในหัวข้อที่ 5.6 พบว่าสภาวะและขั้นตอนที่เหมาะสมซึ่งทำให้น้ำทิ้งหลังการ บำบัดมีคุณภาพตามมาตรฐานน้ำทิ้งแสดงดังรูปที่ 5.67 ได้แก่ การเจือจางน้ำเสียซีโอไลต์ 10 เท่า ปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5.0 เติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ 1,440 มก./ล. หลังจากนั้นทิ้งให้ตกตะกอนประมาณ 30 นาทีถึง 1 ชั่วโมง และนำกากตะกอน ไปบำบัดและกำจัดต่อไป

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอไลต์ตามสภาวะและขั้นตอนต่างๆ ข้างต้นสามารถแบ่งออก ได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ค่าน้ำประปาที่ใช้เจือจางน้ำเสีย (เจือจาง 10 เท่า) ค่าสารเคมี และค่าบำบัด ตะกอนที่เกิดขึ้น และจากการคำนวณพบว่า**การบำบัดน้ำเสียซีโอไลต์ด้วยวิธีนี้ต้องเสียค่าใช้จ่าย เท่ากับ 11,300 - 15,800 บาท/ลบ.ม. (น้ำเสียซีโอไลต์เข้มข้น) หรือเท่ากับ 0.9 - 1.3 บาท/ตัวอย่าง** (เมื่อมีปริมาณน้ำเสียซีโอไลต์เกิดขึ้นประมาณ 80 มล./ตัวอย่าง\* สำหรับวิธีวิเคราะห์ แบบเปิด) ดังตารางที่ 5.19 และถ้าต้องการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอไลต์ของ งานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นที่ผ่านมาสามารถดูได้จากภาคผนวก ค ส่วนรายละเอียดค่าใช้จ่ายในการ บำบัดน้ำเสียซีโอไลต์ในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังนี้

(หมายเหตุ : \* การวิเคราะห์ซีโอไลต์ของห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีวิเคราะห์แบบเปิด โดยปริมาณน้ำเสียซีโอไลต์ ที่จะเกิดขึ้นต่อการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ 1 ตัวอย่างหาได้คร่าวๆ ดังนี้คือ ปริมาณน้ำตัวอย่าง 20 มล. เติม 0.25N  $K_2Cr_2O_7$  10 มล. เติม conc.  $H_2SO_4$  ที่มี  $Ag_2SO_4$  30 มล. เมื่อนำไปรีฟลักซ์แล้วทิ้ง ให้เย็น นำไปไตเตรทด้วย 0.1N FAS ใช้ปริมาตรที่ไตเตรทประมาณ 20 มล. ดังนั้นสรุปได้ว่าการ วิเคราะห์ค่าซีโอไลต์ต่อ 1 ตัวอย่างน้ำจะมีน้ำเสียซีโอไลต์เกิดขึ้นประมาณ 80 มล.)



รูปที่ 5.67 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียซีโอดีที่สภาวะเหมาะสม

ตารางที่ 5.19 สรุปค่าใช้จ่ายในการกำจัดโลหะหนักต่างๆ ในน้ำเสียซีโอดี\*\*

รายการ	ปริมาณ (กก./ลบ.ม.)	ราคาต่อหน่วย (บาท/กก.)	ค่าใช้จ่าย	
			(บาท/ลบ.ม.)	(บาท/ตัวอย่าง)*
โซเดียมไฮดรอกไซด์	559	12 - 20	6,708 - 11,180	0.5 - 0.8
สารคลอไรด์ฟลูออไรด์	14.4	300	4,320	0.3
ค่าบำบัดและกำจัดกาก ตะกอน	100	2.48	248.45	0.02
<b>รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด</b>			<b>11,277 - 15,749</b>	<b>0.9 - 1.3</b>

หมายเหตุ : \* สำหรับการวิเคราะห์ซีโอดีแบบเปิด (น้ำเสีย 1 ตัวอย่างทำให้เกิดน้ำเสียซีโอดี  
ประมาณ 80 มล.)

: \*\* ค่าใช้จ่ายต่อน้ำเสียซีโอดีเข้มข้น 1 ลบ.ม.

### 5.7.2.1 ค่าน้ำประปา

น้ำเสียซีโอดีที่ใช้ในการทดลองนี้เตรียมโดยนำน้ำเสียซีโอดีจริงมาทำการเจือจาง 10 เท่า ถ้าต้องการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดี 1 ลบ.ม. ต้องใช้น้ำประปา 10 ลบ.ม. โดยปกติ

น้ำประปามีราคาประมาณ 10 บาท/ลบ.ม. **ดังนั้นจะเป็นเงินค่าน้ำประปาสำหรับเจือจางน้ำเสียซีโอดี 1 ลบ.ม. =  $10 \times 10 = 100$  บาท/ลบ.ม. (น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น)**

### 5.7.2.2 ค่าสารเคมี

#### ก. โซเดียมไฮดรอกไซด์

น้ำเสียซีโอดี (เจือจาง 10 เท่า) ต้องปรับให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 เนื่องจากในการทดลองนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50% เป็นสารปรับพีเอช จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.6.1 พบว่าถ้าต้องการปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 5 ต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 55.9 กรัม/ลิตร ซึ่งเท่ากับ 55.9 กก./ลบ.ม. เนื่องจากน้ำเสียซีโอดีที่นำมาทำการทดลองได้ทำการเจือจาง 10 เท่า ดังนั้นปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ทั้งหมดเท่ากับ  $55.9 \times 10 = 559$  กก./ลบ.ม. (น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น) ซึ่งโดยปกติสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 50% มีราคาประมาณ 6 - 10 บาท/ลิตร หรือเท่ากับ 12 - 20 บาท/กก. **ดังนั้นถ้าต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 559 กก./ลบ.ม. จะต้องเสียค่าใช้จ่ายเท่ากับ 6,708 - 11,180 บาท/ลบ.ม.**

#### ข. สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์

ในการทดลองนี้ใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ซึ่งมีชื่อว่า "EPOFLOC L-1" ซึ่งมีราคา 300 บาท/กก. และจากผลการทดลองนี้พบว่าต้องการใช้เท่ากับ 1,440 มก./ลิตร หรือ 1.44 กก./ลบ.ม. (น้ำเสียซีโอดีเจือจาง 10 เท่า) แต่ถ้าต้องการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีเข้มข้น 1 ลบ.ม. ต้องใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เท่ากับ  $1.44 \times 10 = 14.4$  กก./ลบ.ม. **ดังนั้นเสียค่าใช้จ่ายเท่ากับ  $14.4 \times 300 = 4,320$  บาท/ลบ.ม. (น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น)**

#### ค. สารโคแอกกูแลนต์

จากการทดลองกับน้ำเสียซีโอดี พบว่าถ้าควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่เกิน 8.5 สามารถทำให้ตกตะกอนได้ดี และเมื่อเติมสารโพลีเมอร์ประจุบวกตั้งแต่ 1 - 5 มก./ล. ก็ทำให้ความสามารถในการตกตะกอนดีขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าในกรณีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สารโคแอกกูแลนต์ จึงไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ แต่ถ้าต้องการจะใช้สารโพลีเมอร์ประจุบวก (ชนิดที่ใช้ในการทดลองนี้) 1 มก./ล. ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นประมาณ 2.3 บาท/ลบ.ม. (น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น) ซึ่งราคาของสารโพลีเมอร์ประจุบวกชนิดนี้เท่ากับ 230 บาท/กก.

### 5.7.2.3 ค่าบำบัดและกำจัดตะกอน

การคำนวณปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากชุดการทดลองที่เลือกค่าที่เหมาะสมแล้ว คือเลือกค่าพีเอชเหมาะสมที่ 5 ปริมาณคือเลตติงโพลีเมอร์ 1,440 มก./ล. โดยไม่มีการเติมสาร โคแอกกูแลนต์ (โพลีเมอร์ประจุบวก) เกิดตะกอนแห้งขึ้นเท่ากับ 1,000 มก./ล. (1.0 กก./ลบ.ม. ของน้ำเสียซีโอดีที่เจือจาง 10 เท่า) ซึ่งถ้าคิดต่อน้ำเสียซีโอดีเข้มข้นจะมีตะกอนแห้งเกิดขึ้น 10 กก./ลบ.ม. อย่างไรก็ตามคงเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติที่จะทำแห้งตะกอนที่เกิดขึ้น เนื่องจากวิธีการดังกล่าวทำให้มีงบประมาณสูง แนวทางที่เป็นไปได้กระทำโดยการแยกน้ำออกบางส่วน เช่น การใช้เครื่องอัดกรอง (filter press) เป็นต้น ซึ่งหากตะกอนที่ได้น่าจะมีความเข้มข้นของของแข็ง แขนวลอยประมาณ 10 - 30% แต่ในที่นี้ถ้าคิดว่าหากตะกอนหลังการแยกน้ำมีความเข้มข้นเท่ากับ 10% ดังนั้นหากตะกอนดังกล่าวน่าจะมีน้ำหนักประมาณ 100 กก./ลบ.ม. หรือ 0.1 ตัน/ลบ.ม. น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น

หากตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดจะถูกนำไปทำลายฤทธิ์และฝังกลบ ยังศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสำหรับการให้บริการศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ แสดงดังตารางที่ 5.20

**ตารางที่ 5.20** ค่าใช้จ่ายสำหรับการให้บริการศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ

(ธनिया เจริญมิวจาวัฒน์, 2541)

รายการ	ค่าบริการ (บาท/ตัน)
1. ค่าขนส่งกากของเสียจากห้องปฏิบัติการไปยังศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ	165.00
2. ค่าบำบัดกากของเสียที่ศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ	755.00
3. ค่าขนส่งกากของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำไปยังที่ฝังกลบจังหวัดราชบุรี	228.00
4. ค่าจัดการฝังกลบกากของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว	874.00
5. ค่าขนถ่ายกากของเสีย	300.00
รวมค่าบริการ	2,322.00
ภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%	162.54
รวมค่าใช้จ่าย	2,484.54

หมายเหตุ

- ระยะทางจากห้องปฏิบัติการไป – กลับยังศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำประมาณ 60 กิโลเมตร
- ค่าขนส่งกากของเสียจากห้องปฏิบัติการไปยังศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ 2.75 บาท/ตัน-กิโลเมตร

เนื่องจากค่ากำจัดตะกอนนั้นขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างห้องปฏิบัติการกับศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ ดังนั้นในการคำนวณจะใช้ระยะทางโดยประมาณจากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ไปยังศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ ไป – กลับประมาณ 60 กม. ดังนั้นเมื่อมีกากตะกอนเกิดขึ้น 100 กก./ลบ.ม. จะคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการบำบัดตะกอน และค่าจัดการฝังรวมค่าขนส่งได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าบำบัดและกำจัดตะกอน} &= \text{ค่าขนส่งกากของเสียจากห้องปฏิบัติการไป-กลับยังศูนย์} \\
 &\quad \text{กำจัดกากแสมดำ} + \text{ค่าบำบัดกากของเสียที่ศูนย์กำจัดกาก} \\
 &\quad + \text{ค่าขนส่งกากของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากศูนย์กำจัดกาก} \\
 &\quad \text{ไปฝังกลบที่จังหวัดราชบุรี} + \text{ค่าจัดการฝังกลบกากของเสีย} \\
 &\quad + \text{ค่าขนถ่ายกากของเสีย} \\
 &= (2.75/1000 \times 100 \times 60) + \\
 &\quad (755/1000 \times 100) + \\
 &\quad (228/1000 \times 100) + \\
 &\quad (874/1000 \times 100) + \\
 &\quad (300/1000 \times 100) \\
 &= 232.2 \text{ บาท/ลบ.ม น้ำเสียซีไอดีเข้มข้น} \\
 \text{คิดรวมภาษีมูลค่าเพิ่ม 7\%} &= (232.2 \times 0.07) + 232.2 \\
 &= 248.45 \text{ บาท/ลบ.ม น้ำเสียซีไอดีเข้มข้น}
 \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

1. สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์สามารถกำจัดปรอทและเงินละลายได้ดี น่าจะเกิดจากค่าคงที่ความเสถียร ( $K_s$ ) ระหว่างปรอทและเงินกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ มีค่ามากกว่าค่าคงที่ความเสถียรระหว่างโซเดียมกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์จึงทำให้ปรอทและเงินสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับโซเดียมและจับตัวกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนคีเลตได้ด้วยปฏิกิริยาคีเลชันและสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ยังสามารถกำจัดปรอทได้ดีกว่าเงินเมื่อสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีอยู่อย่างจำกัด (จากการทดลองในหัวข้อที่ 5.6.2) จึงคาดว่าปรอทน่าจะมีค่าเสถียรภาพสูงกว่าเงินในการทำปฏิกิริยากับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์อีกด้วย
2. สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ไม่สามารถกำจัดโครเมียมและเหล็กได้ น่าจะเกิดจากค่าคงที่ความเสถียรระหว่างโครเมียมและเหล็กกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ มีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ความเสถียรระหว่างโซเดียมกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์จึงทำให้โครเมียมและเหล็กไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับโซเดียมและจับตัวกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนคีเลตด้วยปฏิกิริยาคีเลชันได้
3. ปริมาณการใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในน้ำด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่าถ้าในน้ำเสียมีค่าปรอทประมาณ 150 มก./ล. (น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปรอทชนิดเดียว) พบว่าการใช้ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ชนิดนี้ 480 มก./ล. ก็เพียงพอที่จะทำให้ปรอทละลายเหลืออยู่ในน้ำต่ำกว่า 0.005 มก./ล. หรือถ้าในน้ำเสียมีค่าเงินประมาณ 200 มก./ล. (น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเงินชนิดเดียว) พบว่าการใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ชนิดนี้ 360 มก./ล. ก็เพียงพอที่จะทำให้เงินละลายเหลืออยู่ในน้ำต่ำกว่า 1.0 มก./ล. นอกจากนี้การใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ในการกำจัดปรอทและเงินในน้ำเสียสังเคราะห์ปรอทและเงินข้างต้นพบว่า มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดเกิดขึ้นเท่ากับ 1.6 และ 1.1 กรัม/กรัม (ของโลหะหนักที่ถูกกำจัด)
4. สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทและเงินสูงแม้ในน้ำเสียจะมีค่าพีเอชแปรผันในช่วงกว้างก็ตาม (น้ำเสียสังเคราะห์ปรอทมีค่าพีเอชเริ่มต้น <math><1.0</math> ถึง 7.0 ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์เงินมีค่าพีเอชเริ่มต้น 1 ถึง 10)



5. โครเมียมและเหล็กถูกกำจัดได้ดีโดยกลไกการตกตะกอนผลึก ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโครเมียมเริ่มต้น 37 มก./ล. (มีโครเมียมเพียงชนิดเดียว) สามารถถูกกำจัดให้เหลือน้อยกว่า 0.75 มก./ล. ได้โดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับ 9.0 ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าเหล็กเริ่มต้น 135 มก./ล. พบว่าเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับ 5 ก็สามารถกำจัดเหล็กละลายให้เหลือต่ำกว่า 1 มก./ล. ได้
6. การปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์พบว่าประสิทธิภาพสูงในการกำจัดโลหะหนักทุกชนิดในน้ำเสียซีโอดี จากการทดลองเมื่อนำน้ำเสียซีโอดีมาเจือจาง 10 เท่า พบว่ามีปริมาณปรอท โครเมียม เงิน และเหล็กเริ่มต้นประมาณ 200, 46, 180 และ 140 มก./ล. ตามลำดับ เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับ 5.0 หลังจากนั้นเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ 1,440 มก./ล. กวนผสมประมาณ 30 - 40 นาที และทิ้งให้ตกตะกอน 30 นาที พบว่าน้ำใสส่วนบนมีค่าปรอท โครเมียม เงิน และเหล็กละลายเท่ากับ 0.001, 0.07, 0.1 และ 0.3 มก./ล. ตามลำดับ นอกจากนี้ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีนี้มีประมาณ 1,000 มก./ล.หรือเท่ากับ 1.8 กรัม/กรัมของน้ำหนักของโลหะหนักรวมที่ถูกกำจัด แต่วิธีการกำจัดโลหะหนักต่างๆ ในน้ำเสียซีโอดีข้างต้นต้องควบคุมค่าพีเอชในน้ำเสียไม่ให้เกิน 8.5 ด้วย มิฉะนั้นจะส่งผลให้ของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและตกตะกอนไม่ดี ซึ่งจากการทดลองนี้ควบคุมค่าพีเอชหลังการเติมสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ให้เท่ากับ 8.4 - 8.5 พบว่าของแข็งแขวนลอยที่เกิดขึ้นสามารถตกตะกอนได้ดีโดยไม่ต้องใช้สารรวมตะกอนช่วย
7. การกำจัดโลหะหนักต่างๆ ในน้ำเสียซีโอดีข้างต้นเกิดจากกลไกในการกำจัด 2 ชนิดร่วมกัน กลไกแรก ได้แก่ การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (โครเมียมและเหล็กไฮดรอกไซด์) โดยควบคุมค่าพีเอชในน้ำเสียให้ได้ประมาณ 8.4 - 8.5 ก็ทำให้โลหะหนักละลายมีค่าน้อยตามที่ต้องการ ส่วนกลไกที่ 2 ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาคีเลชันร่วมกับโคแอกกูเลชันดังอธิบายแล้วในข้อ 1 ซึ่งต้องควบคุมค่าพีเอชไม่ให้เกิน 8.5 มิฉะนั้นอาจทำให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโคแอกกูเลชันต่ำ กล่าวคือทำให้ฟลอคมีขนาดเล็กและแยกออกได้ยาก (ตกตะกอนไม่ดี)
8. การกำจัดโลหะหนักต่างๆ ในน้ำเสียซีโอดีด้วยวิธีนี้พบว่ามีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 11,277 - 15,749 บาท/ลบ.ม. (น้ำเสียซีโอดีเข้มข้น) โดยแบ่งเป็นค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ (559 กก.) 6,708 - 11,180 บาท/ลบ.ม. ค่าสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ (14.4 กก.) 4,320 บาท/ลบ.ม. และค่าบำบัดกากตะกอน (100 กก.) รวมทั้งค่าขนส่ง 248.45 บาท/ลบ.ม. หรือถ้าคิดเป็นค่าใช้จ่ายต่อการวิเคราะห์ซีโอดีของตัวอย่างน้ำ 1 ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ พบว่ามีค่าใช้จ่ายรวมเท่ากับ 0.9 - 1.3 บาทต่อตัวอย่างน้ำ (ที่มีการวิเคราะห์ค่าซีโอดีแบบเปิด) นอกจากนี้

พบว่าค่าใช้จ่ายในส่วนของการปรับพีเอช (โซเดียมไฮดรอกไซด์) เท่ากับร้อยละ 60 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด ในขณะที่ค่าสารเคลือบโพลีเมอร์เท่ากับร้อยละ 38 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดนั่นเอง

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการตรวจวัดสารประกอบโลหะในตะกอนอบแห้ง (X-ray Diffraction) เพื่อที่จะยืนยันถึงกลไกหรือปฏิกิริยาในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีด้วยสารเคลือบโพลีเมอร์ว่าสารประกอบโลหะหนักในตะกอนอยู่ในรูปใด เช่น อยู่ในรูปของโลหะซัลไฟด์หรือในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์มากกว่ากัน
2. ทดลองทำการชะละลายกากตะกอนที่เกิดขึ้นเพื่อที่จะพิสูจน์ว่าเมื่อโลหะหนักถูกกำจัดโดยปฏิกิริยาคีเลชัน (โดยเฉพาะปรอทและเงิน) จะทำให้ตะกอนโลหะหนักที่เกิดขึ้นมีความคงตัว (โลหะหนักไม่หลุดออกจากตะกอนได้ง่าย) จริงหรือไม่ ถ้าจริงก็จะลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดตะกอนที่เกิดขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมลดลง
3. ถ้าจะนำกากตะกอนโลหะหนักที่ได้ไปทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ควรต้องคำนึงถึงปริมาณซัลเฟตที่มีอยู่ในตะกอนปริมาณสูงด้วย เนื่องจากอาจต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่สามารถทนซัลเฟตได้สูง
4. ศึกษาวิธีการนำกลับโลหะที่ถูกสารเคลือบโพลีเมอร์จับไว้ โดยเฉพาะปรอทและเงิน
5. ทำการทดสอบสาร Chelating Chemical ตัวอื่นที่ใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น AQUAMET, Thio-Red เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ชนิษฐา ทวีถาวรสวัสดิ์. การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยวิธีการตกตะกอนผลึกทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สภาวะแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- คณะกรรมการจัดทำคู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย, สวสท. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3 (ปรับปรุงครั้งที่ 2) : โรงพิมพ์เรือนแก้วการพิมพ์, 2540.
- คณะกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์สาขาเคมีตามโครงการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ระดับมหาบัณฑิตของทบวงมหาวิทยาลัย. เคมี. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 5 : สำนักพิมพ์อักษรเจริญทัศน์, 2533.
- ธนิยา เหยี่ยมวิจาวดี. การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้แบคทีเรีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- นฤมิตร คินิมาน. การทำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- พวงรัตน์ แก้วล้อม. แนวทางการจัดการน้ำเสียซีโอดีในเขตกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- มณีรัตน์ องค์วรรณดี. การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1 : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์ และมันรัช ตันฑุลเวศม์. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1 : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์ และวุฒิ วิพันธ์พงษ์. การกำจัดโลหะหนักด้วยสารโพลีเมอร์ที่มีกลุ่มไฮโดรคาร์บาเมต1:การควบคุมด้วยไออาร์พี. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการประจำปีระดับชาติ ครั้งที่ 11 สวสท.:42. จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2542 : 182-189.

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (สวสท.), สมาคม. รวมกฎหมายสิ่งแวดล้อมสำหรับผู้ปฏิบัติ.  
พิมพ์ครั้งที่ 2 : มิตรนราการพิมพ์, 2544.

สิริโสภา นิลพันธ์. การกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียที่รวบรวมได้จากห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์โดยวิธีโคแอกกูเลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.

สุพจน์ โตตระกูล. หลักการของปฏิกิริยาเคมีวิเคราะห์. ภาควิชาปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2526.

สุรัตน์ เพชรเกษม. การศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดีโดยวิธีตกตะกอนด้วยสารเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2541.

สุรรัตน์ ถมยาศิริกุล. การกำจัดไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียซีไอดีด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย. การทำตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นตัวประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

## ภาษาอังกฤษ

Amer, S.I. Environmental Technology [online]. March/April 1998. Available from :  
<http://www.aquachem-inc.com/w-metalfinishing.htm> [2003, April 26]

Aslam, S. and Walker, O.L. Recycling of Mercury and Silver from COD Tests. Water Pollution Control Federal. 54 (July 1982) : 1148-1151.

Clifford, D.S., Subramonian, S. and Sorg, T.J. Removing dissolved inorganic contaminants from water. Env.Sci.Tech. 20, (1986) : 1072-1080.

Cullinane, M.J., Jones, K.W. and Malone, P.G. Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Waste. Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, USEPA, Washington, D.C., June 1986.

Freeman, H.M. Standard Handbook of Hazardous waste treatment and disposal. New York : McGraw-Hill Book, 1989.

Hendrickson, K.J., Benjamin, M.M., Ferguson, J.F., et al. Removal of Silver and Mercury from spent COD test solution. Water Pollution Control Federal. 56 (1984) : 468-

473.

- Henke, K.R. Chemistry of heavy metal precipitates resulting from reactions with Thio-Red®. Water Environment Research. 70, 6 (1998) : 1178-1185.
- Lanouete, K.H. Industrial Wastewater and Solid Waste Engineering. Chemical Engineering. (1977) : 116-123.
- Maruyama, T., Hannah, S.A. and Cohen, J.W. Metal removal and Chemical Treatment Process. Water Pollution Control Federal. 47 (1975) : 962-977.
- McAnally, S.L., Benefield, L., Reed, R.B. Nickel removal from a synthetic nickel plating wastewater using sulfide and carbonate for precipitation and coprecipitation. Sep. Sci.Tech. 192. 3 (1984) : 191-217.
- Miyoshi Oil and Fat Company, Japan patent 6-049436 (1994)
- Nakamura, T. and Iwano, H. Self-Ripening precipitation Process-A Linear Polymeric Precipitant and Cross-Flow Microfiltration System to Remove Silver from Photoprocessing Wash Water. J.Imag.Sci.Tech. 39, 5 (1995) : 419-424.
- Okazaki, H. Practice of Hazardous Wastes Treatment. Treatment and Disposal of Hazardous Wastes from Industry : Some Experience. (1983) : 99-131.
- Patterson, J.W., Allen, H.E. and Scala J.J. Carbonate precipitation for heavy metals pollutants. J. Wat. Pollut. Control Fed. 49,12 (1977) : 2397-2410.
- Peter, R.W. and Ku, Y. Batch precipitation studies for heavy metal removal by sulfide precipitation. In AICHE Symp. Series, Separation of Heavy Metals and Other Contaminants. 81 ,243 (1985) : 9-27.
- Peter, R.W., Ku, Y. Bhattacharyya and Chen, L.F. Evaluation of recent treatment techniques for removal of heavy metals from industrial wastewater. In AICHE Symp. Series, Separation of Heavy Metals and Other Contaminants. 81, 243 (1985) : 165-203.
- Sund, C. Physico-Chemical Processing Options. Hazardous Waste & Hazardous Materials. 3, 2 (1986) : 183-194.
- U.S. Environmental Protection Agency. Control and Treatment Technology for the Metal Finishing Industry Sulfide Precipitation. Washington, D.C., 1980.
- Williams, R.T., Dean, R.B. and Wise, R.H. Disposal of mercury wastes from water laboratories. Env.Sci.Tech. 5, (1971) : 1044-1045.

## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

กฤษณา ชูติมา. หลักเคมีทั่วไป. เล่ม 2. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

พิมล เวียนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. เคมีสภาวะแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ไอเดียนสโตร์, 2539.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2 : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. วิศวกรรมกรรมประปา. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1 : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

### ภาษาอังกฤษ

APHA, AWWA and WEF., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19<sup>th</sup> Edition. Washington, D.C., American Public Health Association, 1995.

Colin F. Bell. Principles and Applications of Metal Chelation. Oxford : Clarendon, 1977.

Hartinger, L. Handbook of Effluent Treatment and Recycling for the Metal Finishing Industry. 2<sup>nd</sup> Edition. ASM INTERNATIONAL Materials Park, Ohio and FINISHING PUBLICATIONS LTD, 1994.

Stumm, W., Morgan, James J. AQUATIC CHEMISTRY Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters. 3<sup>rd</sup> Edition. (n.p.) : JOHN WILEY & SONS, 1996.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.  
การทดลองเบื้องต้น (Pretest)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ภาคผนวก ก.**  
**การทดลองเบื้องต้น (Pretest)**

ทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองเบื้องต้นก่อนการวางแผนการดำเนินการทดลองการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียซีโอไลต์โดยการใช้สารคิเลตติ้งโพลีเมอร์ เพื่อหาความเป็นไปได้และหาประสิทธิภาพในการทดลองดังกล่าวเบื้องต้น การทดลองเบื้องต้นทำโดยการใช้สารคิเลตติ้งโพลีเมอร์ที่มีชื่อว่า "EPOFLOC L-1" และใช้กับน้ำเสียซีโอไลต์จริงที่ได้จากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองเบื้องต้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเจือจางน้ำเสียซีโอไลต์จริงต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก อัตราเร็วในการตกตะกอน ลักษณะของตะกอนและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น เพื่อนำค่าการเจือจางที่เหมาะสมไปทำการทดลองหาสภาวะอื่นๆ ที่เหมาะสม ต่อการกำจัดโลหะหนักต่อไป การทดลองเบื้องต้นนี้แบ่งการทดลองเป็น 4 ชุดการทดลอง คือ

1. ทำการทดลองกับน้ำเสียซีโอไลต์ที่ไม่มีการเจือจาง
2. ทำการทดลองกับน้ำเสียซีโอไลต์ที่มีการเจือจาง 20 เท่า
3. ทำการทดลองกับน้ำเสียซีโอไลต์ที่มีเจือจาง 50 เท่า
4. ทำการทดลองกับน้ำเสียซีโอไลต์ที่มีการเจือจาง 100 เท่า

### ขั้นตอนการทำการทดลองในแต่ละชุดการทดลอง

แบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน

- **ขั้นตอนที่ 1** เป็นการทดลองด้วยการทำกราฟไตเตรชันระหว่างน้ำเสียซีโอไลต์ที่มีอัตราการเจือจางต่างๆ กับสารคิเลตติ้งโพลีเมอร์ เพื่อหาปริมาณของสารคิเลตติ้งโพลีเมอร์อย่างคร่าวๆ เพื่อนำไปใช้ในการทำการทดลองในขั้นตอนที่ 2 โดยมีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียซีโอไลต์ที่ใช้กับชุดการทดลองต่างๆ ชุดการทดลองละ 100 มล. และปรับพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50% ให้มีพีเอชเท่ากับ 5
2. ทำกราฟไตเตรชันโดยการไตเตรทระหว่างน้ำเสียซีโอไลต์กับสารคิเลตติ้งโพลีเมอร์ โดยทำการวัดไออาร์พี และพีเอชตลอดการไตเตรทเพื่อหาปริมาณของสารคิเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับน้ำเสียโดยดูจากค่าไออาร์พีเริ่มคงที่หรือเปลี่ยนแปลงน้อย (มันลิน ตันทูลเวศม์ และวุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2542) และนำมาคำนวณปริมาณสารคิเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ต้องใช้ในการทดลองในขั้นตอนที่ 2

- **ขั้นตอนที่ 2** เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียที่มีอัตราการเจือจางต่างๆ โดยคำนวณการใช้ปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์จากการทดลองขั้นตอนที่ 1 และมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

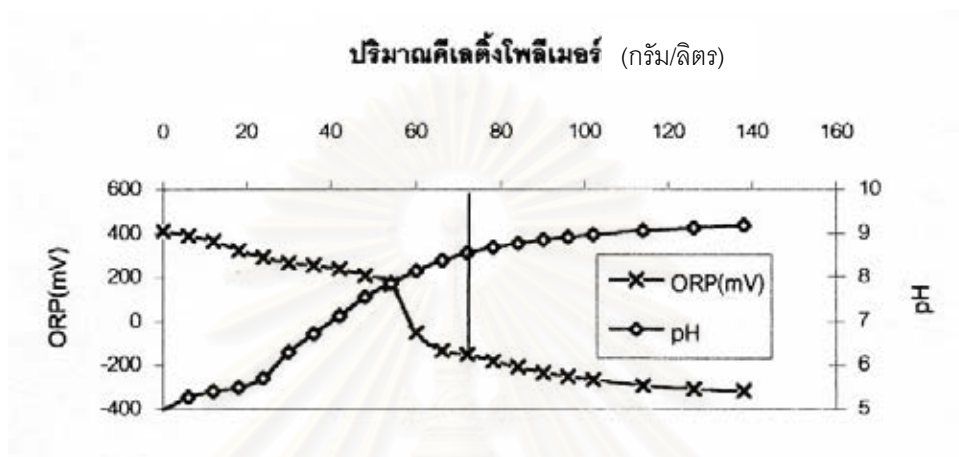
1. เตรียมน้ำเสียซีไอดีที่ใช้กับชุดการทดลองต่างๆ ชุดการทดลองละ 500 มล. และปรับพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50% ให้พีเอชเท่ากับ 5 และเก็บน้ำ ตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์โลหะหนัก 4 ชนิด คือ ปรอท โครเมียม เงิน และเหล็ก
2. เมื่อปรับพีเอชเท่ากับ 5 แล้วให้ใส่สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ (ตามปริมาณที่คำนวณได้จากกราฟไตเตรชันในขั้นตอนที่ 1) และทำการกวนเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที (ทำการทดลองกับเครื่องจาร์เทสต์)
3. หลังจากใส่สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์และกวนเร็ว 5 นาทีแล้ว ให้เติมสารส้มด้วยปริมาณ 5 เท่าของปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ใช้ (ได้จากการแนะนำของบริษัทผู้ผลิตสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ชนิดนี้ว่า ควรใส่สารส้มประมาณ 3 - 20 เท่าของปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ใช้ ทำการกวนเร็ว ต่ออีก 2 นาที และต่อด้วยการกวนช้า 15 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน 30 นาที และ เก็บน้ำใสส่วนบนไปวิเคราะห์หาโลหะหนัก 4 ชนิด คือ ปรอท โครเมียม เงิน และเหล็ก

### ผลการทดลอง

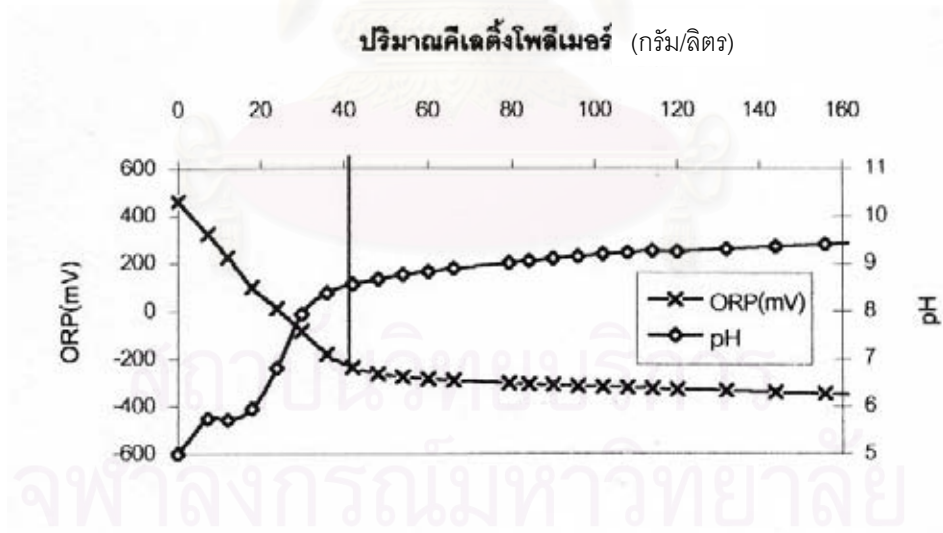
1. การหาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสมแต่ละชุดการทดลองโดยการหาจากกราฟไตเตรชัน

เนื่องจากชุดการทดลองที่ไม่มีการเจือจางน้ำเสียซีไอดีนั้นทำให้การปรับค่าพีเอช (ให้เท่ากับ 5) ทำได้ยากในทางปฏิบัติ คือ ถ้าปรับพีเอชด้วยเกล็ดของโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยตรงอาจทำให้เกิดอันตรายได้และทำให้น้ำเสียร้อนมาก (อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส) เดือดและมีไอเกิดขึ้น และเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายได้ยาก แต่ถ้าปรับพีเอชโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กว่าจะได้ค่าพีเอชตามต้องการ ปริมาณน้ำเสียน้ำก็เพิ่มขึ้นกว่าเดิมมากจนกลายเป็นการเจือจางน้ำเสีย ดังนั้นทางผู้ทดลองได้ตัดสินใจไม่ทำการทดลองในชุดนี้ เนื่องจากมีความคิดเห็นว่าทำได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นทำให้การทดลองเหลือ 3 ชุดการทดลอง คือเจือจางน้ำเสียซีไอดี 20, 50 และ 100 เท่าตามลำดับ ผลการทำกราฟไตเตรชันระหว่างน้ำเสียแต่ละชุดการทดลองกับสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์แสดงดังรูปที่ ก-1 ก-2 และ ก-3 พบว่าจุดที่คิดว่าสารคีเลตติ้ง โพลีเมอร์ทำปฏิกิริยากับโลหะหนักในน้ำเสียพอดี (ค่าไออาร์พีลดลงอย่างรวดเร็วและเปลี่ยนแปลงน้อยหรือคงที่ในเวลาต่อไป) สำหรับชุดการทดลองที่มีการเจือจาง 20, 50 และ 100 เท่า มีปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับโลหะหนักในน้ำเสียเท่ากับ 72, 42 และ 31.2 มิลลิกรัม/น้ำเสีย 100 มิลลิลิตร หรือ 720, 420 และ 312 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบปริมาณของคี

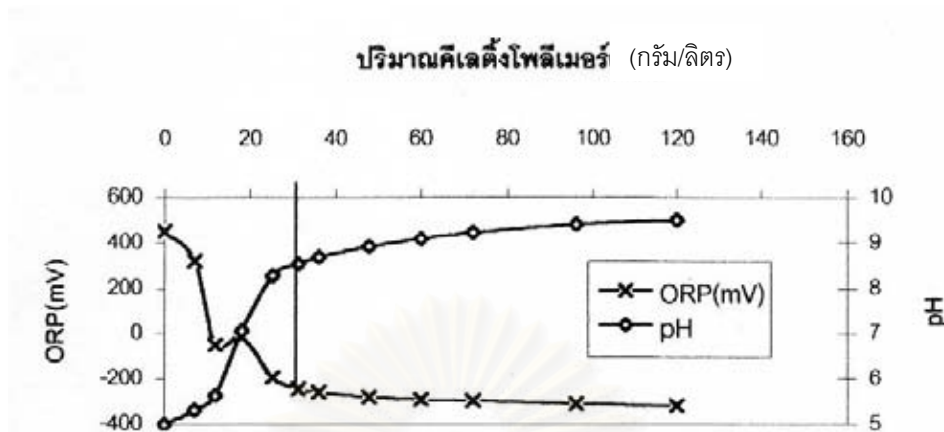
เลดดิ้งโพลีเมอร์ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับชุดการทดลองต่างๆ เมื่อมีอัตราการเกิดน้ำเสียเท่ากันจะเท่ากับ 14.4, 21 และ 31.2 กรัม ต่อน้ำเสียซีไอดี 1 ลิตร ตามลำดับ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเมื่ออัตราส่วนการเจือจางมากขึ้นทำให้มีการใช้ปริมาณของคิเลดดิ้งโพลีเมอร์มากขึ้น (เมื่อมีน้ำเสีย ซีไอดีเท่ากัน) ด้วยอัตราคงที่ (ดังรูปที่ ก-4)



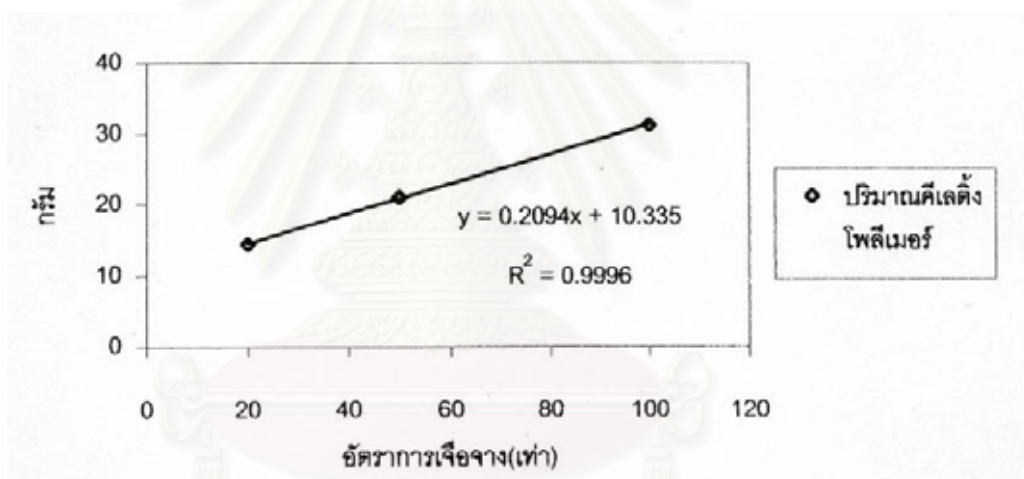
รูปที่ ก-1 กราฟไตเตรชันระหว่างน้ำเสียซีไอดีเจือจาง 20 เท่า และคิเลดดิ้งโพลีเมอร์ 1 : 50 (เข้มข้น 24 กรัม/ลิตร)



รูปที่ ก-2 กราฟไตเตรชันระหว่างน้ำเสียซีไอดีเจือจาง 50 เท่า และคิเลดดิ้งโพลีเมอร์ 1 : 50 (เข้มข้น 24 กรัม/ลิตร)



รูปที่ ก-3 กราฟไตเตรชันระหว่างน้ำเสียซีไอดีเจือจาง 100 เท่า และคลอรีนไดออกไซด์ 1 : 50 (เข้มข้น 24 กรัม/ลิตร)



ที่มีการเจือจางน้ำเสีย 20, 50 และ 100 เท่าตามลำดับ ต่อน้ำเสียซีไอดี 1 ลิตร

ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนที่ 2 ซึ่งทำการทดลองกับน้ำเสียที่แต่ละอัตราการส่วนการ เจือจางจะ 500 มล. และคำนวณปริมาณสารคลอรีนไดออกไซด์ที่ได้จากกราฟไตเตรชันดังกล่าว พบว่าจะใช้ปริมาณคลอรีนไดออกไซด์เท่ากับ 360, 210 และ 156 มิลลิกรัม/น้ำเสีย 500 มิลลิตร หรือ 720, 420 และ 312 มิลลิกรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร กับชุดการทดลองที่เจือจางน้ำเสีย 20, 50 และ 100 เท่า ตามลำดับ และคำนวณปริมาณสารส้มเท่ากับ 5 เท่า ของปริมาณคลอรีนไดออกไซด์ ที่ใช้ได้เท่ากับ 1.8, 1.05 และ 0.78 กรัม/น้ำเสีย 500 มิลลิตร หรือ 3.6, 2.1 และ 1.56 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร กับชุดการทดลองที่เจือจางน้ำเสียเท่ากับ 20, 50 และ 100 เท่า ตามลำดับ

## 2. การหาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยสารคีเลติงโพลีเมอร์

เนื่องจากโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียซีไอดีมีทั้งหมด 4 ตัว คือ ปรอท (Hg) โครเมียม (Cr) เงิน (Ag) และเหล็ก (Fe) แต่เนื่องจากขณะช่วงเวลาที่ทำการทดลองเบื้องต้นนี้เครื่องวิเคราะห์ปรอทชำรุด ดังนั้นทางผู้ทดลองจึงไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณปรอทได้ ดังนั้นในการทำการทดลองเบื้องต้นนี้จะทำการวิเคราะห์โลหะหนักเพียง 3 ตัว (ซึ่งทางผู้ทดลองมีความมั่นใจว่าผลการทดลองนี้ก็สามารถทำให้มีประโยชน์เพื่อปรับไปใช้กับการทำงานวิจัยต่อไปในอนาคต) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของชุดการทดลองต่างๆ

ชุดการทดลองเจือจาง (เท่า)	ชนิดโลหะ	20	50	100
ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย (มก./ล.)	Ag	104.7	41.88	22.12
	Fe	67.55	27.56	13.17
	Cr	18.65	7.76	4.04
ปริมาณโลหะหนักหลังบำบัด (มก./ล.)	Ag	0.16	0.17	0.15
	Fe	13.9	7.67	5.24
	Cr	4.4	2.25	1.75
ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	Ag	99.8	99.6	99.3
	Fe	79.4	72.2	60.2
	Cr	76.4	71.0	56.7
ปริมาณของ NaOH ที่ใช้ปรับพีเอช (กรัม)/น้ำเสีย 1 ลิตร (น้ำเสียซีไอดีเจือจางค่าต่างๆ)		28.2	11.2	5.6
SV 30 (มล./ล)		70	34	26

### 2.1 ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ปรับพีเอชให้เท่ากับ 5

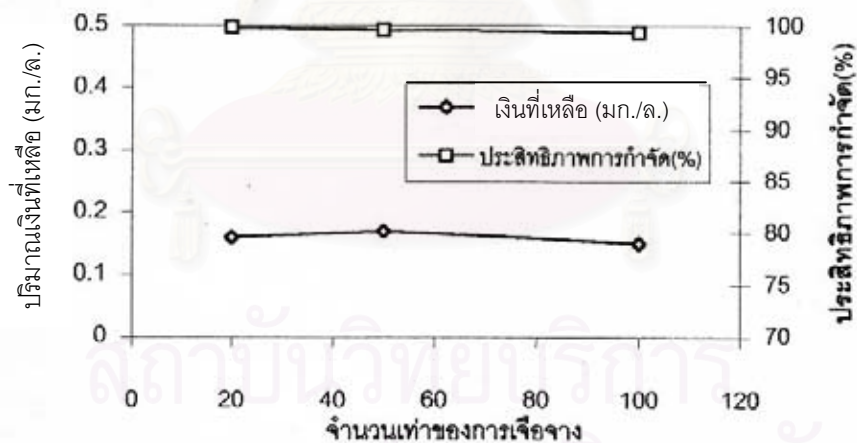
ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับพีเอชของชุดการทดลองที่เจือจางน้ำเสียซีไอดีเท่ากับ 20, 50 และ 100 เท่า เท่ากับ 14.1, 5.6 และ 2.8 กรัม/น้ำเสีย 500 มิลลิลิตร หรือ 28.2, 11.2 และ 5.6 กรัม/น้ำเสีย 1 ลิตร ตามลำดับ และพบว่าปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ปรับพีเอชมีความสัมพันธ์กับอัตราการเจือจางน้ำเสียเป็นแบบสัดส่วนโดยตรง หรืออาจกล่าวได้ว่าถ้าอัตราการเกิดน้ำเสียซีไอดีเท่ากันแม้จะทำการปรับพีเอชด้วยการไม่เจือจางก่อนหรือเจือจางด้วยอัตราส่วนเท่าใดให้มีพีเอชเท่ากัน สุดท้ายแล้วก็จะใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากัน

## 2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก

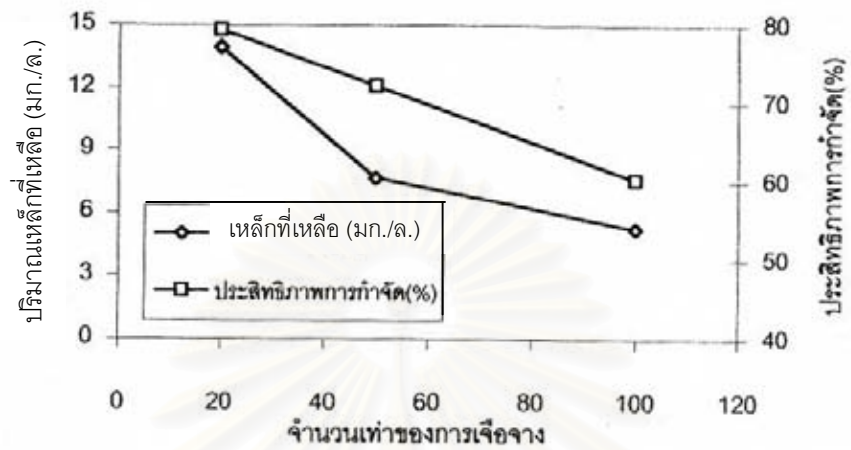
ชุดการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีที่มีการเจือจางด้วยอัตราส่วน 20, 50 และ 100 เท่า มีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะเงินใกล้เคียงกัน คือ 99.8, 99.6 และ 99.3% ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดเงินน้อยลงเพียงเล็กน้อยเมื่ออัตราการเจือจางเพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ ก-5) และยังพบว่า ปริมาณเงินของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกันทุกชุดการทดลอง

ชุดการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีที่มีการเจือจางด้วยอัตราส่วน 20, 50 และ 100 เท่า มีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะเหล็กเท่ากับ 79.4, 72.2 และ 60.2% ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่ออัตราการเจือจางน้ำเสียสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กลดลง (ดังรูปที่ ก-6) แต่มีปริมาณของเหล็กในน้ำที่ผ่านการบำบัดต่ำกว่า

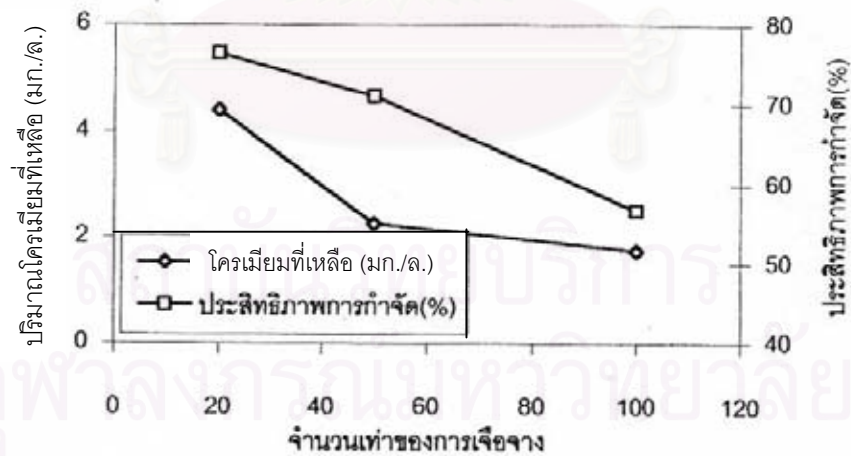
ชุดการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีที่มีการเจือจางด้วยอัตราส่วน 20, 50 และ 100 เท่า มีประสิทธิภาพการกำจัดโลหะโครเมียมเท่ากับ 76.4, 71.0 และ 56.7% ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่ออัตราการเจือจางน้ำเสียสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมลดลง (ดังรูปที่ ก-7) แต่มีปริมาณของโครเมียมของน้ำที่ผ่านการบำบัดต่ำกว่า



รูปที่ ก-5 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะเงินในน้ำเสียซีไอดีที่มีการเจือจางด้วยอัตราส่วน 20, 50 และ 100 เท่า



รูปที่ ก-6 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะเหล็กในน้ำเสียซีไอดีที่มีการเจือจางด้วยอัตราส่วน 20, 50 และ 100 เท่า



รูปที่ ก-7 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะโคโรเมียในน้ำเสียซีไอดีที่มีการเจือจางด้วยอัตราส่วน 20, 50 และ 100 เท่า

### 2.3 ค่าพีเอชและไออาร์พี

ค่าพีเอชและค่าไออาร์พีในชั้นตอนต่างๆ ในการทดลองแสดงดังตารางที่ ก-2 พบว่าค่าพีเอชและค่าไออาร์พีมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงในชั้นตอนต่างๆ คล้ายๆ กัน คือ เมื่อเติมสารคลอรีนไดออกไซด์ลงไปทำให้น้ำเสียมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น และมีค่าไออาร์พีลดลงและมีค่าเป็นลบ ซึ่งมีค่าไออาร์พีใกล้เคียงกับจุดที่เลือกจากกราฟไตเตรชันของแต่ละชุดการทดลองที่มีอัตราการเจือจางน้ำเสียต่างๆ แต่เมื่อเติมสารส้มลงไปทำให้ค่าพีเอชลดลงและมีค่าไออาร์พีเพิ่มขึ้นและไออาร์พี มีค่าเป็นบวกในช่วงต้นๆ

ตารางที่ ก-2 ค่าพีเอชและไออาร์พีในชั้นตอนต่างๆ ของทุกชุดการทดลอง

	PH			ORP		
	20	50	100	20	50	100
อัตราสารเจือจาง (เท่า)	20	50	100	20	50	100
หลังปรับพีเอช	5	5	5	488	459	455
หลังเติมคลอรีนไดออกไซด์	7.98	8.32	8.25	-143	-277	-299
หลังเติมสารส้ม	3.88	3.45	3.95	44	34	14

### 2.4 ลักษณะและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น

ลักษณะการเกิดตะกอนในชั้นตอนต่างๆ ของทุกชุดการทดลองคล้ายคลึงกัน คือ หลังปรับพีเอชเป็น 5 ตะกอนที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟlocs สีน้ำตาลอมส้มขนาดปานกลาง ตกตะกอนได้เร็วปานกลาง แต่เมื่อเติมสารคลอรีนไดออกไซด์ลงไปและเริ่มการกวนเร็ว สังเกตเห็นตะกอนสีน้ำตาลเข้มออกดำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อกวนเร็วครบ 5 นาที ก็หยุดกวนสังเกต เห็นว่าตะกอนที่เกิดขึ้นตกตะกอนได้ช้ามากและตะกอนมีขนาดเล็ก แต่เมื่อใส่สารส้มและกวนเร็ว 2 นาที ตามด้วยกวนช้าอีก 15 นาที และปล่อยให้ตกตะกอน พบว่าตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นมากและ ตกตะกอนได้เร็วมาก คือ สามารถตกตะกอนได้เกือบหมดภายใน 5 นาที และมีปริมาณตะกอน ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 35, 17 และ 13 มล. ในกระบอกตวง 500 มล. ด้วยอัตราส่วนการเจือจาง 20, 50 และ 100 เท่า ตามลำดับ

### 2.5 ค่าใช้จ่ายในการบำบัด เฉพาะค่าสารเคมี

ค่าสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดสำหรับชุดการทดลองต่างๆ เมื่อมีอัตราการเกิดน้ำเสียซีไอดีเท่ากันแสดงดังตารางที่ ก-3 พบว่าเมื่ออัตราการเจือจางเพิ่มขึ้น ค่าใช้จ่ายโดยรวมเฉพาะค่าสารเคมีจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งราคาค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่มาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับพีเอช แต่จะใช้ปริมาณใกล้เคียงกันไม่ว่าอัตราการเจือจางจะเป็นเท่าใด แต่ราคาค่าสารคลอรีนไดออกไซด์และสารส้มจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่เมื่ออัตราการเจือจางเพิ่มขึ้น



ตารางที่ ก-3 ค่าใช้จ่ายเฉพาะค่าสารเคมีของแต่ละชุดการทดลองเมื่อมีอัตราการเกิดน้ำเสียซีไอดีเท่ากัน

อัตราการเจือจาง (เท่า)	ชนิดสารเคมีที่ใช้	ปริมาณที่ใช้ (กรัม/ลิตร)	ราคาสารเคมี (บาท/กก.)	ค่าใช้จ่าย		
				(บาท/ลิตร)	(บาท/ลบ.ม.)	รวม (บาท/ลบ.ม.)
20	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ที่ใช้ปรับพีเอชเป็น 5)	564	20	11.28	11,280	16,176
	คีเลตติ้งโพลีเมอร์	14.4	300	4.32	4,320	
	สารส้ม	72	8	0.576	576	
50	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ที่ใช้ปรับพีเอชเป็น 5)	560	20	11.2	11,200	18,340
	คีเลตติ้งโพลีเมอร์	21	300	6.3	6,300	
	สารส้ม	105	8	0.84	840	
100	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ที่ใช้ปรับพีเอชเป็น 5)	560	20	11.2	11,200	21,808
	คีเลตติ้งโพลีเมอร์	31.2	300	9.36	9,360	
	สารส้ม	156	8	1.248	1,248	

### สรุปผลการทดลองเบื้องต้น

จากผลการทดลองข้างต้นอาจสรุปได้ว่าการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีด้วยการใช้ สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ตานั้นอาจจำเป็นต้องเจือจางน้ำเสียก่อนเนื่องจากการปรับพีเอชทำได้ง่ายกว่าและเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ (ปริมาณตะกอนไม่มากจนเกินไปจนอาจทำให้การแยกน้ำใสส่วนบนกระทำได้อย่างยาก) และจากผลการทดลองสรุปได้ว่าเมื่ออัตราการเจือจางสูงขึ้นแทบจะไม่มีผลต่อ ประสิทธิภาพในการกำจัดเงิน แต่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดเหล็กและโครเมียมลดลง และยังทำให้การใช้ปริมาณคีเลตติ้งโพลีเมอร์โดยรวมเพิ่มขึ้น (เมื่อมีปริมาณน้ำเสียซีไอดีเท่ากัน) ดังนั้นการทดลองต่อไปเพื่อศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก เช่นการหาค่าพีเอช ที่เหมาะสม การหาปริมาณสารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่เหมาะสม ทางผู้ทดลองมีความคิดเห็นว่าควรเลือกอัตราการเจือจางน้ำเสียให้ต่ำกว่าการทดลองนี้เพื่อลดค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี (สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์และสารโคแอกกูแลนต์) แต่ต้องไม่น้อยจนเกินไปจนทำให้การปรับพีเอชกระทำได้อย่างยาก ดังนั้นผู้ทดลองจึงเลือกอัตราการเจือจางเท่ากับ 10 เท่า ไปใช้ในการทำการทดลองต่อไป



ภาคผนวก ข.  
การเตรียมน้ำเสียส่งเคราะห์แต่ละประเภท

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข.

### การเตรียมน้ำเสียแต่ละประเภทมีวิธีการเตรียมดังนี้

งานวิจัยนี้เริ่มแรกจะทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละประเภทก่อน ได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์ประเภท น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม น้ำเสียสังเคราะห์เงิน และน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก เพื่อดูผลของค่าพีเอชและปริมาณสารคลอรีนที่เติมที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก แต่ละชนิด หลังจากนั้นจึงจะทำการทดลองกับน้ำเสียซีไอดีเจือจาง (เจือจางน้ำเสียซีไอดีจริง 10 เท่า) ซึ่งมีโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดข้างต้นอยู่รวมกัน ดังนั้นจึงจะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีปริมาณของโลหะหนักแต่ละชนิดใกล้เคียงกับปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีเจือจาง 10 เท่า โดยจะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ประเภท น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม น้ำเสียสังเคราะห์เงิน และ น้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 185, 44, 209 และ 139 มก./ล. ตามลำดับ แต่จากการเตรียมปริมาณความเข้มข้นเท่ากับค่าดังกล่าว เมื่อนำไปทำการทดลองแล้ววัดค่าปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นอาจได้ค่าแตกต่างไปจากความเข้มข้นที่เตรียมบ้าง (ดูได้จากตารางที่ 4.1) เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่นการผิดพลาดของเครื่องชั่ง การดูดซับโลหะหนักของภาชนะที่ใส่ สัตว์ออกน้ำตัวอย่าง (ขวดแก้วทึบแสง) หรืออื่นๆ ซึ่งมีวิธีการเตรียมน้ำเสียแต่ละประเภทดังนี้

#### 1. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 185 มก./ล.

เตรียมจาก  $\text{HgSO}_4$  ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 297 และสมมติว่าเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ประเภท 1 ลิตร

ถ้าต้องการ  $\text{Hg}^{+2}$  เท่ากับ 200.6 มก. ต้องใช้สาร  $\text{HgSO}_4$  = 297 มก.

ดังนั้นถ้าต้องการ  $\text{Hg}^{+2}$  เท่ากับ 185 มก. ต้องใช้สาร  $\text{HgSO}_4$  =  $(185 \times 297)/200.6$  มก.

= 273.90 มก.

$\cong 274$  มก.

ดังนั้นถ้าต้องการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทปริมาตร 1 ลิตร สามารถทำโดยนำน้ำกลั่นมา 800 มล. เติมกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 37.5\* มล. คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นเติม  $\text{HgSO}_4$  274 มก. คนให้ละลาย แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

ในการทำการทดลองต้องทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ประเภททั้งหมด 11 ชุดการทดลอง (ชุดการทดลองละ 500 มล.) + สำหรับทำกราฟไตเตรชันอีก 500 มล. ดังนั้น ต้องเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทอย่างน้อยเท่ากับ 6 ลิตร แต่ควรเตรียมเผื่อไว้สำหรับการทำ การทดลองซ้ำหรือทำซ่อมในชุดการทดลองที่อาจเกิดการผิดพลาดต่างๆ ขึ้น ในที่นี้จะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ประเภท 10 ลิตร โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ประเภทเข้มข้นไว้เป็นสารละลายสต็อกโดยให้มีความเข้มข้นประเภทเท่ากับ 1,850 มก./ล. ในปริมาตร 1 ลิตร เมื่อนำมาใช้จึงทำการเจือจาง 10 เท่า โดยใช้น้ำประปา

วิธีเตรียมสารละลายสต็อกมีดังนี้

ถ้าต้องการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1 ลิตร ต้องใช้  $\text{HgSO}_4$  274 มก.

$$\begin{aligned} \text{“—————” 10 ลิตร ต้องใช้ } \text{HgSO}_4 &= 274 \times 10 = 2,740 \text{ มก.} \\ &= 2.74 \text{ กรัม} \\ &\cong 2.8 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

นำ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  375 มล. ใส่ในน้ำ 500 มล. (ค่อยๆ ใส่ทีละน้อยเพราะจะร้อนมาก) คนให้เข้ากันทิ้งไว้ ให้เย็น หลังจากนั้นใส่  $\text{HgSO}_4$  2.80 กรัม คนให้ละลาย แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

## 2. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 44 มก./ล.

เตรียมจาก  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 662 ทั้งนี้เนื่องจากโครเมียมในน้ำเสียซีไอดี มีประจุ +3 และสมมติว่าเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม 1 ลิตร

ถ้าต้องการ  $\text{Cr}^{+3}$  เท่ากับ 104 มก. ต้องใช้สาร  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  = 410 มก.

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นถ้าต้องการ } \text{Cr}^{+3} \text{ เท่ากับ 44 มก. ต้องใช้สาร } \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O} &= (44 \times 410)/104 \text{ มก.} \\ &= 173.5 \text{ มก.} \\ &\cong 174 \text{ มก.} \end{aligned}$$

ดังนั้นถ้าต้องการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมปริมาตร 1 ลิตร สามารถทำโดยละลาย  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  174 มก. ในน้ำกลั่น 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 37.5\* มล. คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

ในการทำการทดลองต้องทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมทั้งหมด 12 ชุด การทดลอง (ชุดการทดลองละ 500 มล.) + สำหรับทำกราฟไตเตรชันอีก 500 มล. ดังนั้น ต้องเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมอย่างน้อยเท่ากับ 6.5 ลิตร แต่ควรเตรียมเผื่อไว้สำหรับการทำการทดลองซ้ำหรือทำซ่อมในชุดการทดลองที่อาจเกิดการผิดพลาดต่างๆ ขึ้น ในที่นี้จะเตรียม น้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม 10 ลิตร โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเข้มข้นไว้เป็น สารละลายสต็อกโดยให้มีความเข้มข้นโครเมียมเท่ากับ 440 มก./ล. ในปริมาตร 1 ลิตร เมื่อนำมาใช้จึงทำการเจือจาง 10 เท่า โดยใช้น้ำประปา

วิธีเตรียมสารละลายสต็อกมีดังนี้

ถ้าต้องการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียม 1 ลิตร ต้องใช้  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  174 มก.

$$\begin{aligned} \text{“—————”} \quad 10 \text{ ลิตร ต้องใช้ } \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O} &= 174 \times 10 = 1,740 \text{ มก.} \\ &= 1.74 \text{ กรัม} \\ &\cong 1.8 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ละลาย  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  1.8 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 375 มล. คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

### 3. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เงินให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 209 มก./ล.

เตรียมจาก  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 312 และสมมติว่าเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เงิน 1 ลิตร

ถ้าต้องการ  $\text{Ag}^+$  เท่ากับ 216 มก. ต้องใช้สาร  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  = 312 มก.

ดังนั้นถ้าต้องการ  $\text{Ag}^+$  เท่ากับ 209 มก. ต้องใช้สาร  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  =  $(312 \times 209)/216$  มก.

= 301.9 มก.

$\cong 302$  มก.

ดังนั้นถ้าต้องการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เงินปริมาตร 1 ลิตร สามารถทำโดยนำ  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  302 มก.

ใส่ลงในกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 37.5\* มล. ตั้งทิ้งไว้ 1 - 2 วันเพื่อให้  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  ละลายได้ทั้งหมด หลังจากนั้นนำมาเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร ทิ้งให้เย็น

ในการทำการทดลองต้องทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เงินทั้งหมด 11 ชุดการทดลอง (ชุดการทดลองละ 500 มล.) + สำหรับทำกราฟไตเตรชันอีก 500 มล. ดังนั้นต้องเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เงินอย่างน้อยเท่ากับ 6 ลิตร แต่ควรเตรียมเผื่อไว้สำหรับการทำการทดลองซ้ำหรือ ทำซ่อมในชุดการทดลองที่อาจเกิดการผิดพลาดต่างๆ ขึ้น ในที่นี้จะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เงิน 10 ลิตร โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เงินเข้มข้นไว้เป็นสารละลายสต็อกโดยให้มีความเข้มข้นเงินเท่ากับ 2,090 มก./ล. ในปริมาตร 1 ลิตร เมื่อนำมาใช้จึงทำการเจือจาง 10 เท่า ด้วยน้ำกลั่น (สาเหตุที่ใช้น้ำกลั่นเนื่องจากผู้วิจัยต้องการทราบประสิทธิภาพที่แท้จริงในการกำจัดเงินของสาร คีเลตติ้งโพลีเมอร์ที่ใช้โดยที่ไม่ให้เงินตกตะกอนไปในรูปอื่นก่อนที่จะใช้สารคีเลตติ้งโพลีเมอร์ เพราะเนื่องจากถ้าใช้น้ำประปาในการเจือจางน้ำเสียสังเคราะห์เงิน จะทำให้น้ำตัวอย่างที่จะทำการทดลองมีปริมาณความเข้มข้นของเงิน

เริ่มต้นลดลงเนื่องจากอิออนของโลหะเงิน ( $\text{Ag}^+$ ) จะทำปฏิกิริยากับ  $\text{Cl}^-$  ที่มีในน้ำประปากลายเป็นตะกอนผลึกของ  $\text{AgCl}$  ซึ่งจะเห็นได้จากน้ำตัวอย่างจะมีสีขาวขุ่นมาก)

วิธีเตรียมสารละลายสต็อกมีดังนี้

ถ้าต้องการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เงิน 1 ลิตร ต้องใช้  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  302 มก.  
 “—————” 10 ลิตร ต้องใช้  $\text{Ag}_2\text{SO}_4 = 302 \times 10 = 3,020$  มก.  
 $= 3.02$  กรัม  
 $\cong 3$  กรัม

นำ  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  3 กรัมใส่ลงในกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 375 มล. ตั้งทิ้งไว้ 1 - 2 วันเพื่อให้  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  ละลายได้ทั้งหมดหลังจากนั้นนำมาเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น

#### 4. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เหล็กให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 139 มก./ล.

เตรียมจาก  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 404 ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กในน้ำเสียซีไอดีมีประจุ +3 และสมมติว่าเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก 1 ลิตร

ถ้าต้องการ  $\text{Fe}^{+3}$  เท่ากับ 56 มก. ต้องใช้สาร  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} = 404$  มก.  
 ดังนั้นถ้าต้องการ  $\text{Fe}^{+3}$  เท่ากับ 139 มก. ต้องใช้สาร  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} = (139 \times 404)/56$  มก.  
 $= 1,002.8$  มก.  
 $\cong 1,003$  มก.

ดังนั้นถ้าต้องการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เหล็กปริมาตร 1 ลิตรสามารถทำโดยละลาย  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  1,003 มก. ในน้ำกลั่นมา 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 37.5\* มล. คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

ในการทำการทดลองต้องทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์เหล็กทั้งหมด 6 ชุด การทดลอง (ชุดการทดลองละ 500 มล.) + สำหรับทำกราฟไตเตรชันอีก 500 มล. ดังนั้น ต้องเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมอย่างน้อยเท่ากับ 3.5 ลิตร แต่ควรเตรียมเผื่อไว้สำหรับการทำการทดลองซ้ำหรือ ทำซ่อมในชุดการทดลองที่อาจเกิดการผิดพลาดต่างๆ ขึ้น ในที่นี้จะเตรียม น้ำเสียสังเคราะห์เหล็ก 10 ลิตร โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้นไว้เป็นสารละลายสต็อกโดย ให้มีความเข้มข้นเหล็กเท่ากับ 1,390 มก./ล. ในปริมาตร 1 ลิตร เมื่อนำมาใช้จึงทำการเจือจาง 10 เท่า ด้วยน้ำประปา

วิธีเตรียมสารละลายสต็อกมีดังนี้

ถ้าต้องการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์หลัก 1 ลิตร ต้องใช้  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  1,003 มก.

$$\begin{aligned} \text{“ } \text{—————} \text{” } 10 \text{ ลิตร ต้องใช้ } \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O} &= 1,003 \times 10 = 10,030 \text{ มก.} \\ &= 10.03 \text{ กรัม} \\ &\cong 10 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ละลาย  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  10 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 375 มล. คนให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

**หมายเหตุ :** \* ปริมาณกรดที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ประมาณจากวิธีปฏิบัติที่ผู้ปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำของห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สถานที่ ที่ผู้วิจัยเก็บน้ำมาทำการทดลอง) ใช้ในการวิเคราะห์ซีไอดี โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีวิเคราะห์แบบเปิด ซึ่งใช้ปริมาณน้ำตัวอย่าง 20 มล. เติม 0.25N  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  10 มล. เติม conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ที่มี  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  30 มล. เมื่อนำไปรีฟลักซ์แล้ว ทิ้งให้เย็น นำไปไตเตรทด้วย 0.1N FAS ใช้ปริมาตรที่ไตเตรทประมาณ 20 มล. ดังนั้นสรุปได้ว่า น้ำเสียซีไอดี ที่เกิดขึ้น 80 มล. จะมีปริมาณกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  30 มล. ดังนั้นถ้าน้ำเสียซีไอดี 1 ลิตร จะมีปริมาณกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  375 มล. แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ น้ำเสียก่อนที่จะนำมาทำการทดลองจะทำการเจือจาง 10 เท่าก่อน ดังนั้น จึงต้องเตรียมให้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นโลหะหนักและปริมาณกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ใกล้เคียงกับน้ำซีไอดีเจือจาง 10 เท่า ดังนั้นน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลิตรจะมีกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  อยู่ประมาณ 37.5 มล.

## 5. การเตรียมน้ำเสียซีไอดีเจือจาง

น้ำเสียซีไอดีเจือจางเตรียมโดยนำน้ำเสียซีไอดีที่เก็บรวบรวมไว้กวนผสมให้เข้ากัน เมื่อจะทำการทดลองจึงจะนำมาเจือจาง 10 เท่าด้วยน้ำประปา เนื่องจากชุดการทดลองที่ใช้ น้ำเสียซีไอดีเจือจางมีอยู่จำนวน 18 ชุดการทดลอง (ชุดการทดลองละ 500 มล.) + สำหรับทำกราฟ ไตเตรชันอีก 600 มล. ดังนั้นควรมีปริมาณน้ำเสียซีไอดีเก็บรวบรวมเป็นสต็อกไว้อย่างน้อย 1 ลิตร



ภาคผนวก ค.

เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีไอดี  
ของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ภาคผนวก ค.**  
**เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียซีโอดี**  
**ของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา**

ปริมาณโลหะหนักก่อนและหลังบำบัดรวมถึงปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัดในน้ำเสียซีโอดีของงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมารวมถึงงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ ค - 1 ส่วนตารางเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีของงานวิจัยต่างๆ แสดงดังตารางที่ ค - 2

จากตารางที่ ค - 1 และ ค - 2 จะเห็นว่าปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีของแต่ละงานวิจัยมีความแตกต่างกัน รวมถึงปริมาณความต้องการสารปรับพีเอชด้วย เนื่องจากน้ำเสียซีโอดีที่นำมาทำการทดลองของแต่ละงานวิจัยมาจากหลายๆ ห้องปฏิบัติการจึงทำให้น้ำเสียซีโอดี มีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันไปตามแต่ละห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจะเห็นว่าการจะนำค่าใช้จ่าย โดยรวม (ค่าสารเคมี + ค่าบำบัดตะกอน) ของแต่ละงานวิจัยมาเปรียบเทียบกันค่อนข้างทำได้ยาก และราคาของสารเคมีต่างๆ เช่นราคาของโซเดียมไฮดรอกไซด์ของแต่ละงานวิจัยก็แตกต่างกัน ดังนั้นในตารางที่ ค - 2 จึงได้คำนวณราคาค่าสารเคมีออกมาเป็นราคา (บาท) /หน่วย ของสารเคมีแต่ละชนิดที่ใช้เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบราคาของสารเคมีชนิดเดียวกันของแต่ละงานวิจัย เช่นคิดเป็น บาท/กรัม หรือบาท/ลิตร และเนื่องจากน้ำเสียซีโอดีของแต่ละงานวิจัยมีปริมาณ โลหะหนักแต่ละชนิดไม่เท่ากัน รวมถึงปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัดด้วย ดังนั้นในตารางที่ ค - 2 จึงคำนวณราคารวมค่าสารเคมีออกมาเป็น บาท/กรัมของโลหะหนักที่ถูกกำจัดด้วย เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบ โดยนำราคารวมค่าสารเคมีที่เป็น บาท/ลิตร มาหารด้วยปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัดรวมทั้งหมด (กรัม/ลิตร) ก็จะได้ราคารวมค่าสารเคมีออกมาเป็น บาท/กรัมของโลหะหนักทั้งหมด ที่ถูกกำจัด แต่ก็ยังไม่ใช้ค่าที่ถูกต้องนัก เนื่องจากในแต่ละงานวิจัย น้ำเสียซีโอดีมีความเป็นกรด ไม่เท่ากันดังจะเห็นได้จากความต้องการปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ปรับพีเอช ดังนั้นถ้า น้ำเสียของงานวิจัยใดมีความเป็นกรดสูงกว่าก็จะทำให้มีความต้องการปริมาณต่างเพื่อใช้ในการปรับพีเอชสูงด้วย ซึ่งส่วนใหญ่แล้วค่าใช้จ่ายส่วนนี้จะเป็นค่าใช้จ่ายหลักของการบำบัดน้ำเสียซีโอดี ส่วนค่าบำบัดตะกอนไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากขึ้นอยู่กับระยะทางจากแต่ละห้องปฏิบัติการไปยังศูนย์กำจัดกากด้วย

ตารางที่ ค -1 ตารางแสดงปริมาณโลหะก่อนและหลังบำบัดรวมถึงปริมาณโลหะที่ถูกกำจัดในงานวิจัยต่างๆ

ผู้วิจัย	ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล.)											
	Hg			Cr			Ag			Fe		
	Hg <sub>Inf.</sub>	Hg <sub>Eff.</sub>	Hg <sub>Rem.</sub>	Cr <sub>Inf.</sub>	Cr <sub>Eff.</sub>	Cr <sub>Rem.</sub>	Ag <sub>Inf.</sub>	Ag <sub>Eff.</sub>	Ag <sub>Rem.</sub>	Fe <sub>Inf.</sub>	Fe <sub>Eff.</sub>	Fe <sub>Rem.</sub>
พัชรภรณ์ (2545)	2000	0.001	2000.00	420	0.07	419.93	2100	0.1	2099.9	1400	0.3	1399.7
พวงรัตน์ (2537)	1803	0.005	1803.00	700	0.32	699.68	1150	0.34	1149.66	670	- <sup>1</sup>	670 <sup>2</sup>
ธนัชฐา (2538)	1341.2	0.001	1341.20	288.45	0.01	288.44	921.1	0.5	920.6	153.18	1.32	151.86
สุรัตน์ (2541)	940	0.001	940.00	301	0.1	300.9	1455	0.13	1454.87	725	40.5	684.5

หมายเหตุ 1 : ของพวงรัตน์ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าเหล็กหลังบำบัดไว้

2 : เป็นปริมาณเหล็กที่สมมติว่าสามารถกำจัดได้ 100% จากงานวิจัยของพวงรัตน์

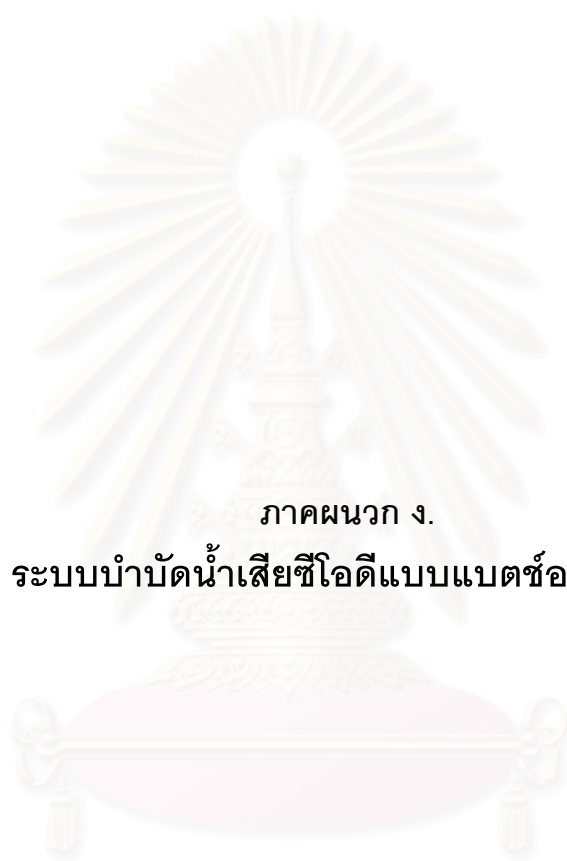
$$\begin{aligned}
 \text{Hg}_{\text{Rem}} (\text{ปริมาณโลหะที่ถูกกำจัด}) &= \text{Hg}_{\text{Inf.}} - \text{Hg}_{\text{Eff.}} = \text{ค่าปรอทเริ่มต้นในน้ำเสียรีโอดี} - \text{ค่าปรอทที่เหลือหลังบำบัด} \\
 \text{Cr}_{\text{Rem}} (\text{ปริมาณโครเมียมที่ถูกกำจัด}) &= \text{Cr}_{\text{Inf.}} - \text{Cr}_{\text{Eff.}} = \text{ค่าโครเมียมเริ่มต้นในน้ำเสียรีโอดี} - \text{ค่าโครเมียมที่เหลือหลังบำบัด} \\
 \text{Ag}_{\text{Rem}} (\text{ปริมาณเงินที่ถูกกำจัด}) &= \text{Ag}_{\text{Inf.}} - \text{Ag}_{\text{Eff.}} = \text{ค่าเงินเริ่มต้นในน้ำเสียรีโอดี} - \text{ค่าเงินที่เหลือหลังบำบัด} \\
 \text{Fe}_{\text{Rem}} (\text{ปริมาณเหล็กที่ถูกกำจัด}) &= \text{Fe}_{\text{Inf.}} - \text{Fe}_{\text{Eff.}} = \text{ค่าเหล็กเริ่มต้นในน้ำเสียรีโอดี} - \text{ค่าเหล็กที่เหลือหลังบำบัด}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ค - 2 ตารางเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียซีไอดีที่บึงงานวิจัยต่างๆ

ผู้วิจัย	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัด					สารเคมี				ราคารวม (ค่าสารเคมี)		ค่าบำบัด ตะกอน (บาท/ลิตร)	
	Hg <sub>Rem</sub> (มก./ล.)	Cr <sub>Rem</sub> (มก./ล.)	Ag <sub>Rem</sub> (มก./ล.)	Fe <sub>Rem</sub> (มก./ล.)	โลหะรวม (มก./ล.)	ชนิด	ปริมาณที่ใช้/ น้ำเสีย 1 ลิตร	ราคาหน่วย (บาท/หน่วย)	ราคา/ น้ำเสียซีไอดี 1 ลิตร (บาท)	(บาท/ลิตร)	(บาท/ลิตร) ที่ถูกกำจัด		
พัชรภรณ์ (2545)	2000	419.9	2099.9	1399.7	5.92	น้ำระป่า (L)	10	0.01	0.1				
						NaOH (g)	559	0.012 - 0.02	6.708 - 11.18	11.126 - 15.6	1.88 - 2.64		0.4 (ตะกอนเปียก)
						ซีเลตติ้งโพลีเมอร์ (g)	14.4	0.3	4.32				
พงษ์รัตน์ (2537)	1803.0	699.7	1149.7	670	4.32	NaOH (g)	215	0.03	6.54				
						0.018N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (L)	0.013	8.15	0.106	7.096	1.642 <sup>2</sup>		0.08
						NaCl (L)	0.025	18	0.45				
ธนิษฐา (2538)	1341.2	288.44	920.6	151.86	2.70	NaOH (g)	300	0.02	6.099	6.4	2.37		0.06
						Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)	20.2	0.012	0.24				
สุรัตน์ (2541)	940.0	300.9	1454.9	684.5	3.38	NaCl (g)	4	0.009	0.036				
						FeS (g)	3	1	3	10.236	3.028		-
						NaOH (g)	270	0.027	7.2				

หมายเหตุ 1 : พงษ์รัตน์ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าเหล็กหลังบำบัดได้ด้วยจึงสมมติว่า จากงานวิจัยสามารถกำจัดเหล็กได้ 100 %

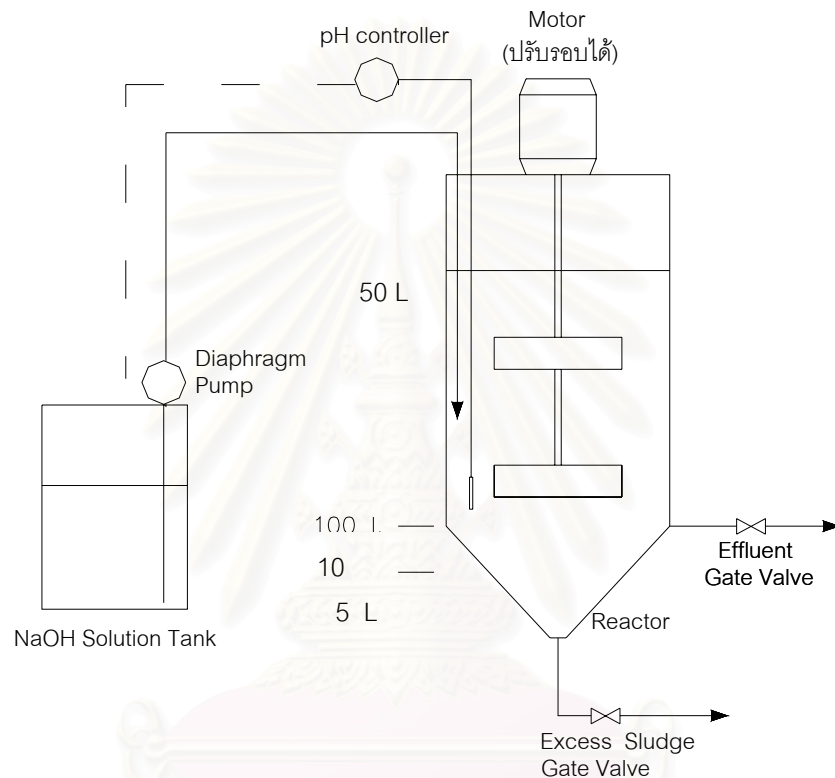
2 : ได้จากการคำนวณโดยสมมติเพิ่มงานวิจัยของพงษ์รัตน์สามารถกำจัดโลหะหนักได้ 100%



ภาคผนวก ง.  
ระบบบำบัดน้ำเสียซีไอดีแบบแบริ่งอย่างง่าย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.  
ระบบบำบัดน้ำเสียซีไอดีแบบแบตช์อย่างง่าย



รูปที่ ง - 1 ระบบบำบัดน้ำเสียซีไอดีแบบแบตช์อย่างง่าย  
(ดัดแปลงจากผลการทดลองของงานวิจัยนี้)

หมายเหตุ – เนื่องจากปริมาณน้ำเสียซีไอดีเกิดขึ้นน้อยมาก ดังนั้นในทางปฏิบัติควรออกแบบระบบบำบัดแบบแบตช์และทำงานโดยใช้คนควบคุม (Manual) เป็นหลัก ดังรูปที่ ง - 1  
ขั้นตอนการทำงาน

1. ป้อนน้ำเสียซีไอดีลงในถัง reactor เป็นปริมาณ 5 ลิตร (มีขีดบอกปริมาตรดังกล่าวที่ข้างถัง reactor)
2. เปิดให้ motor ทำงาน และปรับความเร็วรอบให้เหมาะสม ประมาณ 100 – 150 รอบ/นาที

3. ป้อนน้ำประปาลงในถัง reactor จนมีปริมาตร 50 ลิตร ซึ่งถือว่าเป็นการเจือจางน้ำเสียซีไอดี 10 เท่า (มีซีดีบอกริมาตรดังกล่าวที่ข้างถัง reactor)
4. เปิดให้เครื่อง pH controller ทำงาน โดยตั้งค่าพีเอชไว้ในช่วง 5.0 – 5.5 ซึ่งโดยปกติแล้วน้ำเสียซีไอดีเจือจางมีค่า pH < 1 ดังนั้นในช่วงแรก pH controller จะสั่งให้ปั๊มต่างทำงาน และ เมื่อ pH > 5 ก็สั่งให้ปั๊มต่างหยุดทำงาน (Diaphragm Pump) หลังจากนั้นน้ำเสียมีค่า pH ตามที่กำหนดแล้ว ก็ปิด pH controller (สาเหตุที่กำหนดให้น้ำเสียมีค่าพีเอชเท่ากับ 5.0 – 5.5 เนื่องจากเมื่อเติมสารคลอรีน 1,440 มก./ล. แล้ว ก็จะทำให้ค่าพีเอชสุดท้ายอยู่ในช่วง 8.0 – 8.5 ซึ่งจะทำให้สามารถกำจัดโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดออกจากน้ำเสียซีไอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังทำให้สลัดจ์ที่เกิดขึ้นสามารถตกตะกอนได้ดีอีกด้วย แต่ต้องระมัดระวัง ไม่ให้ค่าพีเอชสุดท้ายมีค่า > 8.5 เนื่องจากจะทำให้สลัดจ์ที่เกิดขึ้นตกตะกอนได้ช้า (จากผลการวิจัยของงานวิจัยนี้)
5. ป้อนสารคลอรีนด้วยปริมาณที่เหมาะสม (ได้จากการทำจาร์เทสต์) ซึ่งสารคลอรีน 1,440 มก./ลิตร ใช้ในงานวิจัยนี้ ต้องใช้ปริมาณ 1,440 มก./ลิตร จึงทำให้กำจัดเงินและปรอทได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง หลังจากเติมสารคลอรีนแล้วปรับความเร็วรอบของ Motor ประมาณ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นปรับความเร็วรอบให้เท่ากับ 30 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที
6. ปิด motor ซึ่งจะทำให้สลัดจ์ที่เกิดขึ้นตกตะกอน ซึ่งอาจใช้เวลาตกตะกอน 1 – 2 ชั่วโมง โดยให้ผู้ปฏิบัติสังเกตว่าในน้ำใสส่วนบนยังมีของแข็งแขวนลอยเหลืออยู่มากน้อยเพียงใด เช่น ถ้ายังมีของแข็งแขวนลอยเหลืออยู่ ก็ปล่อยให้ตกตะกอนต่อไป เป็นต้น
7. หลังจากขั้นตอนการตกตะกอนแล้ว ให้ผู้ปฏิบัติเปิด Effluent Gate Valve เพื่อระบายน้ำใสส่วนบนทิ้ง โดยมีน้ำสลัดจ์เหลืออยู่ประมาณ 10 ลิตร (มีซีดีบอกริมาตรดังกล่าวที่ข้างถัง reactor)
8. หลังจากระบายน้ำใสส่วนบนทิ้งแล้ว ให้ผู้ปฏิบัติเปิด Excess Sludge Gate Valve เพื่อระบายสลัดจ์ที่เหลือทิ้ง หลังจากนั้นอาจนำน้ำสลัดจ์ที่ได้ดังกล่าวไปตากแดด เพื่อลดปริมาณน้ำในสลัดจ์ จึงทำให้ปริมาตรสลัดจ์ที่ลดลงด้วย หลังจากนั้นจึงนำสลัดจ์ดังกล่าวไปบำบัดต่อไป
9. เมื่อมีน้ำเสียซีไอดีเกิดขึ้นอีกในรอบใหม่ ( 5 ลิตร) ก็ให้บำบัดเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1 – 8



ภาคผนวก จ.

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก จ.**  
**ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม**  
**ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)**  
**ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535**  
**เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งระบายออกจากโรงงาน**

อาศัยอำนาจตามความในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุว่า “ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงานเว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษาแต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง (Dilution)” รัฐมนตรีว่าการกระทรวง อุตสาหกรรมจึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

**ข้อ 1 คำจำกัดความ**

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมที่จะระบาย ลงสู่แหล่งน้ำหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุม การระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

**ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีคุณสมบัติดังนี้**

(1) ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0

(2) ทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้

2.1 ค่าทีดีเอส ไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่ กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำ หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่ กรมโรงงาน อุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

(3) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจ แตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของอุตสาหกรรม ตามที่ กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

(4) โลหะหนักมีค่าดังนี้



4.1	ปรอท (Mercury)	ไม่มากกว่า	0.005	มก./ล.
4.2	เซเลเนียม (Selenium)	ไม่มากกว่า	0.02	มก./ล.
4.3	แคดเมียม (Cadmium)	ไม่มากกว่า	0.03	มก./ล.
4.4	ตะกั่ว (Lead)	ไม่มากกว่า	0.2	มก./ล.
4.5	อาร์เซนิก (Arsenic)	ไม่มากกว่า	0.25	มก./ล.
4.6	โครเมียม (Chromium)			
	4.6.1 Hexavalent Chromium	ไม่มากกว่า	0.25	มก./ล.
	4.6.2 Trivalent Chromium	ไม่มากกว่า	0.75	มก./ล.
4.7	แบเรียม (Barium)	ไม่มากกว่า	1.0	มก./ล.
4.8	นิกเกิล (Nickel)	ไม่มากกว่า	1.0	มก./ล.
4.9	ทองแดง (Copper)	ไม่มากกว่า	2.0	มก./ล.
4.10	สังกะสี (Zinc)	ไม่มากกว่า	5.0	มก./ล.
4.11	แมงกานีส (Manganese)	ไม่มากกว่า	5.0	มก./ล.
(5)	ซัลไฟด์ (Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ )	ไม่มากกว่า	1	มิลลิกรัมต่อลิตร
(6)	ไซยาไนด์ (Cyanide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN)	ไม่มากกว่า	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร
(7)	ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่มากกว่า	1	มิลลิกรัมต่อลิตร
(8)	สารประกอบฟีนอล (Phenols Compounds)	ไม่มากกว่า	1	มิลลิกรัมต่อลิตร
(9)	คลอรีนอิสระ (Free chlorine)	ไม่มากกว่า	1	มิลลิกรัมต่อลิตร
(10)	เพสตีไซด์ (Pesticide)	ต้องไม่มี		
(11)	อุณหภูมิ	ไม่มากกว่า	40	องศาเซลเซียส
(12)	สี	ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ		
(13)	กลิ่น	ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ		
(14)	น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease)	ไม่มากกว่า	5	มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
(15)	ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	เวลา 5 วัน ไม่มากกว่า	20	มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่ง

รองรับน้ำ หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

(16) ค่าทีเคเอ็น (TKN sinv Kjeldahl Nitrogen) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำ หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

(17) ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำ หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ 3 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ 2 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

(1) การตรวจสอบค่าความเป็นกรดต่างของน้ำทิ้ง ให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรด และต่างของน้ำ (pH meter)

(2) การตรวจสอบค่าทีดีเอส ให้ใช้วิธีการระเหยแห้ง ระหว่างอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง

(3) การตรวจสอบค่าสารแขวนลอย ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)

(4) การตรวจสอบค่าโลหะหนัก ให้ใช้วิธีการดังนี้

4.1 การตรวจสอบค่าสังกะสี โครเมียม ทองแดง แคดเมียม แบเรียม ตะกั่ว นิกเกิล และแมงกานีส ให้ใช้วิธีอะตอมมิก แอปซอพชั่น สเปกโตรโฟโตเมตตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิดไดเร็คแอสไพเรชั่น (Direct Aspiration) หรือวิธีพลาสมา อิมิสชั่น สเปกโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟ คัพเพิล พลาสมา (Inductively Coupled Plasma : ICP)

4.2 การตรวจสอบค่าอาร์เซนิก และเซลเนียม ให้ใช้วิธีอะตอมมิกแอปซอพชั่น สเปกโตรโฟโตเมตตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิดไฮไดรด์ เจนเนอเรชั่น (Hydride Generation) หรือวิธีพลาสมา อิมิสชั่น สเปกโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟ คัพเพิล พลาสมา (Inductively Coupled Plasma : ICP)

4.3 การตรวจสอบค่าปรอท ให้ใช้วิธีอะตอมมิกแอปซอพชั่น โคลด์ เวปอร์ เทคนิค (Atomic Absorption Cold Vapour Technique)

(5) การตรวจสอบค่าซัลไฟด์ ให้ใช้วิธีการไตรเตรท (Tritrate)

- (6) การตรวจสอบค่าไซยาไนด์ ให้ใช้วิธีกลั่นและตามด้วยวิธีไพริดีนบาร์บิตุริกแอซิด (Pyridine-Barbituric Acid)
- (7) การตรวจสอบค่าฟอร์มาลดีไฮด์ ให้ใช้วิธีเทียบสี (Spectrophotometry)
- (8) การตรวจสอบค่าสารประกอบฟีนอล ให้ใช้วิธีกลั่น และตามด้วยวิธี4-อะมิโน ไพริน (Distillation,4-Aminoantipyrine)
- (9) การตรวจสอบค่าคลอรีนอิสระ ให้ใช้วิธีไอโอดิเมตริก (Iodometric Method)
- (10) การตรวจสอบค่าสารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ ให้ใช้วิธีก๊าซ โครมาโตกราฟี (Gas-Chromatography)
- (11) การตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำ ให้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
- (12) การตรวจสอบค่าน้ำมันและไขมัน ให้ใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำมันของน้ำมันและไขมัน
- (13) การตรวจสอบค่าบีโอดี ให้ใช้วิธีอะไซด์ โมดิฟิเคชัน (Azide Modification) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ติดต่อกัน หรือวิธีอื่นที่กรมโรงงานอุตสาหกรรม ให้ความเห็นชอบ
- (14) การตรวจสอบค่าที่เคเอ็น ให้ใช้วิธีเจลดาล์ (Kjeldahl)
- (15) การตรวจสอบค่าซีโอดี ให้ใช้วิธีย่อยสลายโดยโปตัสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion)

ข้อ 4 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามข้อ 3 จะต้องเป็นไปตามคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย หรือ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ซึ่ง American Public Health Association, American Water Works Association และ Water Environment Federation ของสหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนดไว้ด้วย

ประกาศ ณ วันที่ 14 มิถุนายน 2539

ไชยวัฒน์ สิ้นสุวรรณ

(นายไชยวัฒน์ สิ้นสุวรรณ)

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

ประกาศราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 113 ตอนที่ 52ง วันที่ 27 มิถุนายน 2539  
ที่มา : สวสท., 2544

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัชราภรณ์ ทวีสุวรรณพร เกิดวันที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2516 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2538 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2542



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย